多行程多交货期的成品油配送优化

高海龙[1], 谢 勇[1†], 马吉祥[1], 张 波[2]

(1. 华中科技大学 人工智能与自动化学院，武汉 430074；2. 上海幸宜信息科技有限公司，上海 200439)

摘 要: 研究多行程多交货期的成品油配送优化问题, 已知油库使用带运输时间窗的多舱车辆配送各加油站的多个订单, 每个加油站具有各自的优先级, 且加油站的各个订单带有交货期. 综合考虑客户优先级、订单交货期和车辆运输时间窗等因素, 以配送收益最大化为目标, 建立了多行程多交货期的成品油配送优化模型, 并设计了带交货期移除算子的改进变邻域搜索算法进行求解. 基于前向插入启发式算法构造初始解, 设计了基于订单交货期的邻域扰动算子和基于单位时间收益最大化的贪婪策略, 以增强算法的局部寻优能力, 并提出基于逆序访问的后期优化策略, 从而在保证解的质量情况下加快算法收敛速度. 通过不同规模下的仿真实验验证了模型和算法在最大化配送收益的同时, 也能有效提高配送及时性.

关键词: 多行程；订单交货期；运输时间窗；客户优先级；成品油配送；变邻域搜索算法

中图分类号: TE834；F253.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0190 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**

Optimization of refined oil distribution with multiple trips and multiple due time

GAO Hai-long[1], *XIE Yong*[1†], *MA Ji-xiang*[1], *ZHANG Bo*[2]

(1. School of Artificial Intelligence and Automation，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China；2. Shanghai Xingyi Information Technology Co. Ltd.，Shanghai 200439，China)

Abstract: In this paper, we study the optimization problem of refined oil distribution with multiple trips and multiple due time. Oil depots use multi-cabin vehicles with transportation time windows to distribute multiple orders from each gas station. Each gas station has its own priority, and each order of one gas station has a due time. Comprehensively considering factors including customer priority, order due time, and vehicle transportation time window, with the goal of maximizing distribution revenue, a distribution optimization model of refined oil with multiple trips and multiple due time is established. The improved variable neighborhood search algorithm with the due time removal operator is used to solve the problem. An initial solution based on pushing forward insertion heuristic is constructed. The neighborhood perturbation operator is designed according to the order due time, and a greedy strategy based on the maximum return per unit time is designed to enhance the local optimization ability of the algorithm. A later optimization strategy based on reverse order access is proposed to speed up the convergence speed while ensuring the quality of the solution. The effectiveness of the algorithm is verified by simulation experiments under different scales. The experimental results show that the model and algorithm we proposed can not only maximize the distribution revenue, but also effectively improve timeliness of delivery.

Keywords: multi-trip；order due time；transportation time window；customer priority；refined oil distribution；variable neighborhood search algorithm

0 引 言

近年来, 随着国民经济的发展, 成品油公路配送成本占成品油运输总成本的比重高达 60%~70%[1]. 如何制定经济高效的配送方案并提升客户满意度, 是成品油配送亟待解决的关键问题. 成品油配送问题相对于一般的配送问题更具复杂性, 具体表现为: 1) 多行程: 由于运输车辆有限, 一辆车在一天内可能要执行多次配送任务; 2) 多交货期: 同一加油站不同油品需求的交货期不同, 需要分时配送; 3) 多运输时间窗: 车辆工作时间在一天内划分为多个时间窗.

研究多行程多交货期的成品油配送优化问题, 对提高配送收益和配送及时性具有十分重要的意义.

收稿日期: 2021-01-29；**修回日期:** 2021-07-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71771096); 国家自然科学基金创新群体资助项目 (71821001).

†通讯作者. E-mail: xyhust@mail.hust.edu.cn.

这一问题已引起国内外学者的广泛关注. 车辆路径问题相关研究主要围绕多行程车辆路径问题[2-3]、需求可拆分车辆路径问题[4-5]、多行程多交货期车辆路径问题[6] 等进行展开, 而成品油配送相关研究主要集中在多舱配送、多行程配送和需求可拆分配送等几个方面. 在成品油多舱配送研究方面, Cornillier 等[7] 考虑带时间窗的多油库补货问题, 设计了启发式算法进行求解. Alinaghian 等[8] 设计了大规模邻域搜索和变邻域搜索混合算法求解多油库多车舱成品油配送问题. 以上研究均未考虑客户需求可拆分的情况. 在多行程成品油配送研究方面, Cornillier 等[9] 研究了在单一油库和多油库情况下的加油站补货问题, 未考虑订单的补货时间窗. 王旭坪等[6] 考虑了订单的补货时间窗, 采用先行程后分组的策略求解该问题, 但并未考虑车辆运输时间窗. 在需求可拆分的成品油配送研究方面, 张源凯等[10] 提出了基于 C-W 节约算法的 “需求拆分-合并装载” 策略. Wang 等[11] 设计了自适应大规模邻域搜索算法求解该问题. 上述研究均未综合考虑运输时间窗和订单交货期约束, 无法很好地满足客户需求.

本文拟研究综合考虑客户优先级、订单交货期和车辆运输时间窗等因素的成品油配送优化问题, 以配送收益最大为目标, 建立考虑多交货期的成品油配送优化模型, 进一步设计求解模型的带交货期移除算子的改进变邻域搜索算法. 本文算法的主要贡献在于: 1) 设计了订单交货期移除算子, 该算子在后面的实验中被证实表现良好; 2) 采用了基于单位时间收益最大化的贪婪策略进行局部优化, 应用该贪婪策略比应用基于收益的贪婪策略求解效果更好; 3) 加入了基于逆序访问的后期优化策略, 从而加快算法的收敛速度.

1 考虑多交货期的成品油配送优化模型

1.1 问题描述与模型假设

成品油配送问题可描述为: 针对 1 个油库和 n 个加油站的配送网络, 车辆均在油库进行成品油装载, 然后沿配送路线依次完成卸油任务, 最后返回至油库, 问如何在车辆有限且带运输时间窗的情况下制定配送方案, 以最大化配送收益. 结合问题实际, 对本文模型作以下说明和假设:

1) 已知油库与各加油站、加油站与加油站之间的距离;

2) 已知各加油站优先级、单位时间惩罚成本、订单需求量和交货期;

3) 已知油库的配送车辆数量、各车舱大小以及运输时间窗;

4) 允许车辆早到, 但车辆晚于订单交货期到达会有相应惩罚成本;

5) 不允许在同一行程多次访问同一加油站, 即无加油站访问回路;

6) 每个车舱只能装载一个加油站的一种油品, 每个订单只能由一个车舱一次性满足, 每个加油站的不同订单可由多辆车的不同车舱进行配送;

7) 每个订单的需求量不超过可用车型的最大装载量.

1.2 模型构建

基于上述假设, 本模型定义以下符号:

1) 集合

M: 车辆集合, $M = \{1, 2, ..., a\}$, 其中 a 表示车辆总数;

N: 加油站和油库集合, $N = N_c \bigcup \{0\}$, 其中 $N_c = \{1, 2, ..., n\}$ 表示加油站编号集合, n 表示加油站总数, 0 表示油库编号;

K: 油品种类集合, $K = \{1, 2, ..., b\}$, b 表示油品种类总数;

H_m: 车辆 m 的舱位集合, $H_m = \{1, 2, ..., g_m\}$, g_m 表示车辆 m 的舱位数;

L_m: 车辆 m 的可能行程集合, $L_m = \{1, 2, ..., p_m\}$, p_m 表示车辆 m 的最大行程数.

2) 下标

m: 车辆编号, $m \in M$;

i, j: 加油站和油库编号, $i, j \in N$;

k: 油品种类编号, $k \in K$;

h: 车舱编号, $h \in H_m$;

l: 车辆行程序号, $l \in L_m$.

3) 参数

m^S: 车辆 m 的可用时间窗起始时刻;

m^E: 车辆 m 的可用时间窗截止时刻;

V_{mh}: 车辆 m 的第 h 个舱位容积;

c: 车辆单位距离运输成本 (元/吨/公里);

S_{ik}: 加油站 i 的油品 k 的交货期;

q_{ik}: 加油站 i 对油品 k 的需求量 (升);

r_i: 加油站 i 的油品单位收益 (元/吨/公里);

β_i: 加油站 i 的单位时间惩罚成本 (元/小时);

d_{ij}: 节点 i 到节点 j 的距离;

t_{ij}: 节点 i 到节点 j 需要的行驶时间;

DT: 配送周期截止时刻, 本文设置为 24;

ST: 车辆在在油库的装油时间和加油站的卸油时间, 本文设置为 0.5 小时;

φ: 一个极大的正数.

4) 决策变量

$w_{ml}=1$, 表示车辆 m 执行第 l 次行程, 否则 $w_{ml}=0$;

$x_{ij}^{ml}=1$, 表示车辆 m 的第 l 次行程从节点 i 行驶到节点 j, 否则 $x_{ij}^{ml}=0$;

$y_{hik}^{ml}=1$, 表示车辆 m 第 l 次行程的舱位 h 装载加油站 i 的油品 k, 否则 $y_{hik}^{ml}=0$;

γ_{mlik}: 车辆 m 的第 l 次行程到达加油站服务油品 k 的时刻;

γ_{ml}^{S}: 车辆 m 第 l 次行程开始从油库装油的时刻;

γ_{ml}^{E}: 车辆 m 第 l 次行程返回油库的时刻.

变量 μ_i^k 表示加油站 i 的油品 k 是否被配送, 配送取值为 1, 否则取值为 0. μ_i^k 的计算方式如下:

$$\mu_i^k=\sum_{m\in M}\sum_{l\in L_m}\sum_{h\in H_m}y_{hik}^{ml},\forall i\in N_c,k\in K. \tag{1}$$

变量 v_i^k 表示车辆晚于订单交货期 S_{ik} 到达加油站 i 导致油品 k 的断供时间. $\sum\limits_{i\in N_c}\sum\limits_{k\in K}\beta_i v_{ik}$ 表示断供惩罚成本, 用来衡量配送及时性, $\sum\limits_{i\in N_c}\sum\limits_{k\in K}\beta_i v_{ik}$ 越小, 配送及时性越高.

式 (2) 表示不同情况下断供时间 v_i^k 的计算方式: 对于任意加油站 i 的油品 k, 若该订单被分配但送达时刻晚于交货期, 则断供时间 = 送达时刻-交货期; 若该订单被分配且送达时刻早于交货期, 则断供时间为 0; 若该订单未被分配, 则断供时间 = 配送周期截止时刻-交货期.

$$v_i^k=\begin{cases}\max\{\sum\limits_{m\in M}\sum\limits_{l\in L_m}\sum\limits_{h\in H_m}y_{hik}^{ml}\gamma_{mlik} & \mu_i^k=1;\\ -S_{ik},0\},\\ DT-S_{ik}, & \mu_i^k=0.\end{cases} \tag{2}$$

成品油配送优化模型可表示为:

$$\max\ Z=\sum_{i\in N_c}\sum_{k\in K}r_iq_{ik}d_{0i}\mu_i^k-\sum_{i\in N_c}\sum_{k\in K}\beta_iv_i^k-\sum_{m\in M}\sum_{l\in L_m}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}x_{ij}^{ml}d_{ij}c. \tag{3}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{j\in N_c}x_{0j}^{ml}=\sum_{i\in N_c}x_{i0}^{ml}=w_{ml},\quad\forall m\in M,l\in L_m; \tag{4}$$

$$\sum_{i\in N}x_{ji}^{ml}=\sum_{i\in N}x_{ij}^{ml},\quad\forall j\in N,j\neq i,m\in M,l\in L_m; \tag{5}$$

$$\sum_{i\in N}x_{ji}^{ml}\leqslant w_{ml},\quad\forall j\in N,j\neq i,m\in M,l\in L_m; \tag{6}$$

$$w_{m(l+1)}\leqslant w_{ml},\forall m\in M,l\in L_m\setminus\{p_m\}; \tag{7}$$

$$y_{hik}^{ml}q_{ik}\leqslant V_{mh},\quad\forall m\in M,l\in L_m,h\in H_m,i\in N_c,k\in K; \tag{8}$$

$$\sum_{i\in N_c}\sum_{k\in K}y_{hik}^{ml}\leqslant w_{ml},\quad\forall m\in M,l\in L_m,h\in H_m; \tag{9}$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{l\in L_m}\sum_{h\in H_m}y_{hik}^{ml}\leqslant 1,\forall i\in N_c,k\in K; \tag{10}$$

$$x_{ij}^{ml}+x_{ji}^{ml}\leqslant 1,\quad\forall i,j\in N_c,j\neq i,m\in M,l\in L_m; \tag{11}$$

$$\gamma_{m(l+1)}^{S}\geqslant\gamma_{ml}^{E}-\varphi(1-w_{ml}),\quad\forall m\in M,l\in L_m\setminus\{p_m\}; \tag{12}$$

$$\gamma_{ml}^{S}+ST+t_{0i}\leqslant\gamma_{mlik}+\varphi(1-x_{0i}^{ml}),\quad\forall m\in M,l\in L_m,i\in N_c,k\in K; \tag{13}$$

$$\gamma_{ml}^{E}\geqslant\gamma_{mlik}+ST+t_{i0}-\varphi(1-x_{i0}^{ml}),\quad\forall m\in M,l\in L_m,i\in N_c,k\in K; \tag{14}$$

$$\gamma_{mlik}+ST+t_{ij}\leqslant\gamma_{mljk}+\varphi(1-x_{ij}^{ml}),\quad\forall m\in M,l\in L_m,i,j\in N_c,k\in K; \tag{15}$$

$$m^S\leqslant\gamma_{ml}^{S}+\varphi(1-w_{ml}),\quad\forall m\in M,l\in L_m; \tag{16}$$

$$m^E\leqslant\gamma_{ml}^{E}-\varphi(1-w_{ml}),\quad\forall m\in M,l\in L_m; \tag{17}$$

$$w_{ml}\in\{0,1\},\forall m\in M,l\in L_m; \tag{18}$$

$$x_{ij}^{ml}\in\{0,1\},\forall m\in M,l\in L_m,i,j\in N; \tag{19}$$

$$y_{hik}^{ml}\in\{0,1\},\forall m\in M,l\in L_m,h\in H_m,i\in N_c,k\in K. \tag{20}$$

式 (3) 表示最大化配送收益. 其中, 第一项为订单配送收益, 第二项为断供惩罚成本, 第三项为运输成本. 式 (4) 表示当车辆 m 的行程 l 创建后, 所有车辆均从油库出发, 完成任务后返回油库, 且行程 l 中必须存在一个首先被服务的客户和一个最后被服务的客户. 式 (5) 表示车辆在当前站点完成配送任务后必须离开到下一个站点或者返回油库. 式 (6) 表示在一条配送路径中, 任意站点最多只能被访问一次. 式 (7) 表示对任一车辆而言, 只有当前一行程存在时才能创建后一行程. 式 (8) 表示车辆舱容约束. 式 (9) 表示每辆车的每个车舱最多只能装载一个加油站的一种成品油. 式 (10) 表示每个加油站的每个订单最多只能由一辆车的一个车舱一次性满足. 式 (11) 表示子

回路消除约束. 式 (12) 表示同一车辆相邻两次从油库出发的时间关系. 式 (13) 表示任一访问站点的到达时刻与车辆从油库开始装油时刻之间的关系. 式 (14) 表示任一访问站点的到达时刻与车辆最终返回油库时刻之间的关系. 式 (15) 表示车辆同一行程到达相继两个加油站之间的关系. 式 (16) 和 (17) 表示车辆从油库开始装油时刻和返回油库时刻与车辆时间窗之间的关系. 式 (18)~(20) 表示决策变量约束.

2 带交货期移除算子的改进变邻域搜索算法

本文问题具有多行程、多车舱和带有运输时间窗的特点. 结合问题特点, 从算法设计方面分析, 变邻域搜索算法简捷高效[12], 无需编码, 其已成功应用于求解较大规模多行程车辆路径问题[11,13-15]; 而经典的群体智能算法: 如遗传算法、粒子群算法等, 设计出能反映本文问题特点且易于解码的编码有一定难度 (难点在于如何在编码中表示多行程、多车舱及配送开始时间). 从求解效率方面分析, 变邻域搜索算法可采用移除式的邻域扰动算子, 保证邻域算子作用后的解仍为可行解, 在执行修复操作时, 仅重新构造原来被破坏掉的解的一部分, 节省计算时间; 而经典的群体智能算法, 多采用传统的交叉、易位、插入等操作算子, 由于本文问题中容积约束、车辆运输时间窗约束的存在, 导致传统操作算子作用后易产生非可行解, 降低了算法求解效率. 因此, 为避免在迭代过程中产生非可行解导致不必要的搜索, 本文采用对单个解 “破坏-重建” 的机制进行迭代寻优, 设计了求解模型的带交货期移除算子的改进变邻域搜索算法 (improved variable neighborhood search, IVNS).

2.1 算法整体框架

在车辆运输时间窗约束下, 利用传统的邻域动作 (如交换、易位等) 进行求解容易产生非可行解, 而先移除后插入操作通过重新构建车舱和订单间的匹配关系能有效避免非可行解的产生[16]. 因此, 本文采用先移除后插入操作进行邻域搜索. 在初始解构造阶段和解的局部优化阶段, 均以订单的单位时间收益最大为插入准则. 订单的单位时间收益可定义为: 订单的配送收益与完成该订单的配送时间的比值, 它是反应配送绩效的一个性能指标. 订单的配送收益为:

$$pf_{ik} = r_i q_{ik} d_{0i} - \beta_i v_{ik} - d_{(i-1)i}c, \qquad (21)$$

其中, pf_{ik} 表示加油站 i 油品 k 的配送收益, 其计算方式如式 (21) 所示; $r_i q_{ik} d_{0i}$ 表示订单收益, 指的是由加油站付给运输公司的收益; $\beta_i v_{ik}$ 表示配送该订单的断供惩罚成本; $d_{(i-1)i}c$ 表示运输成本.

为方便描述, 本文引入 “订单池” 的概念, 将未分配的订单全部放入订单池中.

改进变邻域搜索算法的整体步骤如下:

step 1: 构造初始解. 以单位时间收益最大为准则, 利用前向插入启发式算法 (push forward insertion heuristic, PFIH) 构造初始解.

step 2: 生成局部最优解. 首先, 利用不同邻域动作将部分订单从当前解移入订单池; 其次, 以单位时间收益最大为准则, 选取部分订单重新插入当前解到当前解的空车舱.

step 3: 对局部最优解进行后期优化. 通过调整局部最优解的访问次序进行后期优化, 从而提高算法的收敛速度和求解质量.

step 4: 算法终止. 当达到最优解连续不更新最大迭代次数时, 结束算法并输出最优解; 否则, 转 step2.

2.2 基于前向插入启发式算法的初始解构造

初始解质量往往对变邻域搜索算法的求解速度和质量有着重要影响. 前向插入启发式算法是一种贪婪构造启发式算法[17], 已成功应用于 VRP 问题的求解[18-20]. 因此, 本文采用前向插入启发式算法构造初始解.

前向插入启发式算法的基本思路是: 首先选取当前时间窗起始时刻最早的车辆, 为该车辆分配种子订单 (当前单位时间收益最大的订单), 然后以剩余订单与种子订单所对应加油站连接后单位时间收益最大为原则, 选取对应的订单插入到该车辆的剩余空舱. 每次插入新订单后, 将插入的新订单作为种子订单, 更新车辆剩余行程时间及订单池, 继续填充剩余车舱, 直至该车辆不满足车舱或行程时间约束. 如此循环往复, 直到无剩余可用车辆或订单池为空.

2.3 结合订单交货期的邻域扰动算子设计

使用传统的邻域扰动算子 (如交换、插入、易位等) 求解本文问题容易产生非可行解[21], 而采用移除算子能有效避免非可行解. 本文参考文献 [11] 中的邻域扰动算子, 结合多交货期的问题特点, 设计了交货期移除算子 (Due Time Removal, DTR). 交货期移除算子通过调整车辆到站时刻与订单交货期之间的差距来减少断供惩罚成本, 增强算法的局部寻优能力. 该算子是指随机移除交货期与车辆到站时刻不符的 λ 个订单, 交货期与车辆到站时刻不符分为两种情况: 1) 交货期早于车辆到达时刻, 即车辆延时到达; 2) 交货期晚于车辆运输时间窗结束时刻. 其中,

$\lambda \in [1, n_{od}]$, n_{od} 表示当前解中交货期与车辆到达时刻不符的订单总数. 交货期移除算子通过调整车辆到站时刻与订单交货期之间的差距来减少断供惩罚成本, 增强算法的局部寻优能力.

算法的邻域扰动和局部优化过程, 如图 1 所示. 图 1 中, S_0 表示原解, 其由一系列行程 $X_{11}, X_{12}, ..., X_{ml}$ 组合而成. X_{ml} 表示车辆 m 第 l 次行程中车舱与配送订单的集合, $O_{i,k}$ 表示加油站为 i 油品为 k 的订单. S_1 表示经过邻域扰动后的解. 若使用交货期移除算子进行邻域扰动, 则选择行程 X_{ml} 中交货期与车辆到站时刻不符的订单, 然后将其从 S_0 中移除, 由此得到解 S_1. S_2 表示经过局部优化后的解. 将订单池中的订单按单位时间收益从大到小排列, 然后依次将满足约束的订单重新插入到解 S_1 对应的空舱中, 直到无剩余空舱, 由此得到解 S_2.

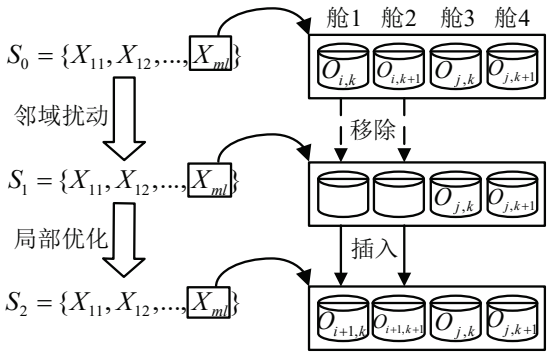


图 1 邻域扰动和局部优化示意图

邻域扰动以及解的局部优化过程中, 车辆到达站点的时刻会发生改变, 为计算各个订单的单位时间收益, 需要确定每一订单的断供时间, 进而需要动态更新车辆每一行程到达相应站点的时刻. 更新规则如下: 一旦某一站点被移除或插入到当前行程, 将新路径与原路径相比减少或增加的运输时间 t 累积起来,"通知" 下一行程更新到站时刻, 即在原到站时刻基础上减少或增加 t.

以邻域扰动后的时刻更新示意图 (图 2) 为例说明. 从图中可看出, 行程 1 在经过邻域扰动后, 移除了加油站 b, 相应的返回油库时刻也由原来的 8.5 缩减到 8($t = -0.5$). 因此, 行程 2 中到达每一加油站的时刻均需要在原来的基础上减少 0.5 小时, 但由于行程 2 也执行了邻域扰动操作 (移除了加油站 d), 因此对于行程 2 中不受扰动影响的站点 (加油站 c) 到站时刻在原来的基础上减少 0.5 小时, 受扰动影响的站点 (油库) 到站时刻需要重新计算. 同样地, 当向行程中插入订单时, 也需要对当前行程及后续行程进行到站时刻的更新, 更新过程与扰动后更新过程类似.

2.4 基于贪婪策略的局部优化

在邻域扰动后, 可能会出现部分车舱为空的情况, 导致车辆的车舱利用率下降, 解的质量降低. 为提高车辆的车舱利用率, 本文基于单位时间收益最大化的贪婪策略对邻域扰动后的解进行局部优化. 相比基于收益最大或成本最小的贪婪策略[11,13,22], 基于单位时间收益的贪婪策略考虑了行程时间, 在车辆运输时间有限的情况下, 能最大程度地提升装载效益.

基于贪婪策略的局部优化步骤如下:

step 1: 初始化. 将扰动后的解按车辆序号排序, 令 m 表示车辆序号, 初始化 $m = 1$.

step 2: 计算车辆剩余可用时间. 统计车辆 m 各个行程的空舱位容积, 计算车辆 m 在最后一次行程返回油库时刻距其可用截止时刻 m^E 的剩余时间间隔 t_m.

step 3: 为车辆空车舱匹配剩余订单. 若某行程有空舱位, 将该行程访问的最后一站记为位置 p, 将订单池中所有订单按其所在的加油站与位置 p 连接后的单位时间收益降序排列, 根据订单需求量和增加的运输时间的大小, 依次判断订单预插入到该行程中是否满足车舱容积及车辆运输时间窗限制. 若上述限制均满足, 记录插入该订单 i 增加的运输时间 t_i, 更新位置 p 以后的各个行程订单送达时刻, 并令 $t_m = t_m - t_i$. 将订单 i 插入到位置 p, 并将其从订单池移除. 重复 step3, 直至车辆 m 各个行程的空舱位均已被遍历, 转 step4.

step 4: 利用车辆剩余可用时间构造新行程. 记录此时 t_m 的大小, 若 t_m 大于 1 小时 (装油和卸油时间各需 0.5 小时, 因此剩余可用时间至少大于 1 小时), 则尝试利用剩余可用时间构造新的行程 (新行程构造过程与 PFIH 算法中的行程构造步骤相同); 否则, 转 step5.

step 5: 算法终止. 判断是否存在剩余可用车辆, 若是, 则令 $m = m + 1$ 并转 step2; 否则, 结束算法并输出局部优化解.

需要注意的是, 若在匹配剩余订单过程中, 出现待匹配订单与已分配到当前行程的订单来自同一加油站的情况, 则将此待匹配订单的运输时间设置为一个极小的正数, 以保证计算单位时间收益时有意义.

2.5 基于逆序访问的后期优化

经过局部优化后, 可能出现车辆到站时刻晚于订单交货期的情况. 此时, 可以尝试通过调整车辆访

问加油站的次序改变断供时长, 从而减少断供惩罚成本. 出于不改变行程总时长的考虑, 后期优化仅限于逆序. 若局部最优解优于当前最优解, 则继续对该局部最优解进行后期优化以寻求更优解. 后期优化分为以下两方面:

1) 同一车辆的行程访问次序逆序. 例如某车辆在工作时间窗内依次执行行程 1 和行程 2, 调换后, 依次执行行程 2 和行程 1.

2) 同一行程的站点访问次序逆序. 例如某车辆某行程依次访问站点 1、站点 2 和站点 3, 调换后, 依次访问站点 3、站点 2 和站点 1.

若调换访问次序后, 断供惩罚成本减小, 则保留调换操作, 然后更新每一行程的车辆到站时刻; 否则, 保留原行程访问次序. 后期优化可进一步提高解的质量.

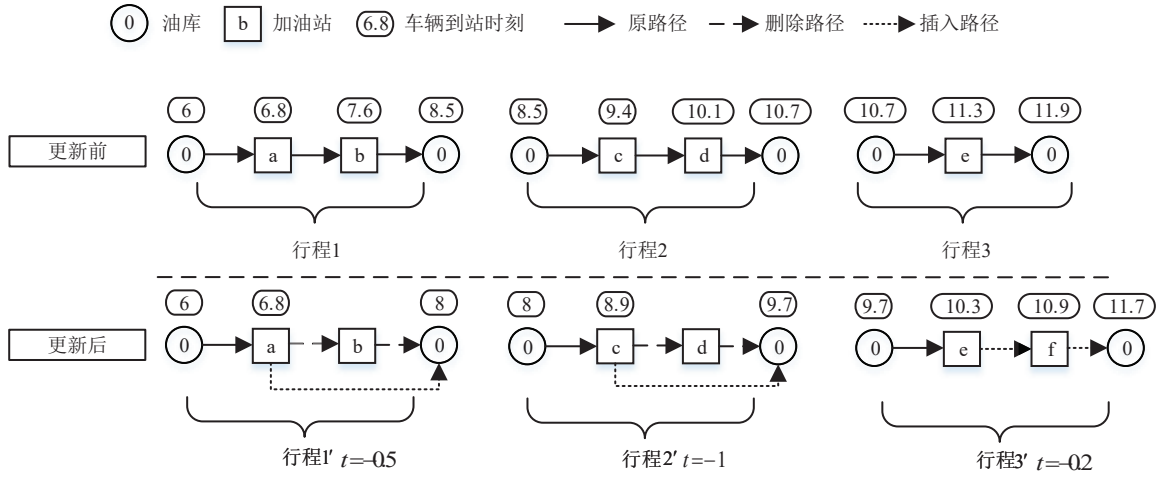


图 2 车辆到站时刻更新示意图

3 算例分析

目前尚未有成品油配送的标准算例, 且实际数据获取难度较大. 因此, 本文参考文献 [6] 的算例规模及加油站分布规律, 设计出 16 组算例. 算例命名方式为 X-S23-O69-V5-C4-16000[11], 表示该算例为第 X 个算例，其中包含 23 个加油站和 69 个订单, 车辆数为 5, 每辆车拥有 4 个车舱, 最大车舱容积为 16000L. 算例中订单的交货期取值范围在 9~22 时不等, 车辆行驶速度为 50Km/h, 该算例中的车辆具体信息如表 1 所示. 车辆单位距离运输成本为 0.9 元/吨/公里. 加油站的优先级系数为 1~3 不等, 优先级越高, 对应单位运输收益和单位惩罚成本也越高, 具体见表 2.

算法使用 Matlab R2017a 编程实现, 在 Intel® Core TM i7-7700 CPU@3.60GHz, 内存 8GB, 操作系统 Windows10 环境下运行.

3.1 算法有效性验证

为验证本文提出的 IVNS 算法的求解效果, 将其与无后期优化的变邻域搜索算法 (VNS) 和文献 [11] 中的自适应大邻域搜索算法 (ALNS) 进行对比分析. 本文改造了文献 [11] 中的 ALNS 算法使其适于求解本文问题, 其中, 邻域扰动算子与本文的邻域扰动算子保持一致, 局部优化阶段采用本文提出的基于单位时间收益最大化的贪婪策略和文献 [11] 中的基于后悔值准则插入策略, 改造的 ALNS 算法不包括本文提出的后期优化策略. 为保证不同算法对比的公平性, VNS 和 ALNS 算法的初始解构造方法和终止条件均与本文 IVNS 算法保持一致. 对每组算例分别采用三种算法求解 10 次, 记录并计算 10 次结果的最优值 (元)、平均值 (元)、标准差和 CPU 平均时间 (秒). 三种算法的实验结果如表 3 所示.

在最优解取值方面, IVNS 算法所求得的最优值均优于另外两种算法. 从平均值方面分析, 相比于 VNS 算法, 本文算法平均优化率为 7.67%(最高为 15.71%), 这表明加入后期优化过程能有效提高求解质量; 而相较 ALNS 算法而言, 其平均优化率为 2.95%(最高为 9.35%), 这表明本文算法的求解质量要优于 ALNS 算法. 综合对比三种算法运行耗时可以发现, 本文设计的 IVNS 算法运行耗时均小于另外两种算法, 这表明 IVNS 算法收敛速度更快. 从三种算法求解结果的标准差可以发现, 本文算法所得结果的大部分标准差小于另外两种算法, 表明本文设计的算法具有更好的稳定性.

以算例 S23-O69-V6-C3-16000 和 S50-O150-V14-C3-16000 为例, 设定最大迭代次数为 400, 比较两组算例在三种算法下的搜索过程, 分别如图 3(a) 和 (b) 所示. 从图 3 可看出 IVNS 算法在三种算法中收敛

速度最快, 并且最终可获得更优的配送收益值. 以上对比表明, 加入后期优化过程能在保证解的质量的前提下加快本文算法的收敛速度.

此外, 本文还通过断供惩罚成本来衡量配送及时性, 断供惩罚成本越小, 意味着配送及时性越高. 为比较不同算法求解结果的配送及时性, 计算每种算法所得解在 16 组算例下的断供惩罚成本, 结果如图 4 所示. 从图 4 可看出, 在 16 组算例中, 利用 IVNS 算法所得解的断供惩罚成本均小于另外两种算法所得结果, 说明 IVNS 算法在最大化配送收益的同时, 还能有效提高配送及时性.

表 1　算例 S23-O69-V5-C4-16000 的车辆相关信息

车辆序号	车舱数	舱 1 容积	舱 2 容积	舱 3 容积	舱 4 容积	运输时间窗
1	4	15 000	14 000	14 000	14 000	6-12；14-20
2	4	15 000	16 000	14 000	14 000	8-12；16-22
3	4	8 000	8 000	8 000	8 000	6-10；14-20
4	4	8 000	8 000	7 000	7 000	6-12；16-20
5	4	14 000	14 000	14 000	12 000	6-12；14-20

表 2　不同优先级加油站单位油品运输收益和单位时间惩罚成本

加油站优先级	单位油品运输收益 (元/吨/公里)	单位时间惩罚成本 (元/小时)
1	1.80	100
2	3.60	200
3	5.40	300

表 3　三种算法的运行结果

算例名称	IVNS				VNS				ALNS			
	最优值	平均值	标准差	时间	最优值	平均值	标准差	时间	最优值	平均值	标准差	时间
1-S23-O69-V5-C3-1	32 457	29 994	1 325	33	27 523	25 282	1 703	55	30 428	28 573	1 529	39
2-S23-O69-V5-C3-2	57 466	55 556	1 234	35	55 123	51 202	4 201	68	56 759	53 326	2 011	43
3-S23-O69-V5-C4-1	29 315	27 110	1 576	39	25 871	23 500	1 986	64	27 385	24 574	2 044	45
4-S23-O69-V5-C4-2	54 585	51 956	2 035	39	48 960	45 201	2 564	69	52 633	50 985	1 065	40
5-S23-O69-V6-C3-1	28 599	27 198	1 039	32	27 633	25 034	1 563	58	28 012	26 019	1 119	39
6-S23-O69-V6-C3-2	61 064	59 098	1 462	34	56 201	54 638	1 486	62	58 961	55 058	2 049	41
7-S23-O69-V6-C4-1	30 919	29 270	1 494	39	29 533	28 596	1 629	55	30 326	28 963	1 826	40
8-S23-O69-V6-C4-2	61 144	56 002	3 264	33	52 025	48 911	2 929	59	60 078	56 324	2 263	46
9-S50-O150-V12-C3-1	78 025	73 564	2 402	160	70 211	66 590	2 653	221	73 822	68 992	2 753	176
10-S50-O150-V12-C3-2	148 566	145 002	1 823	172	145 231	138 652	3 569	232	147 565	142 556	2 894	184
11-S50-O150-V12-C4-1	86 524	83 026	1 733	152	85 020	80 895	2 564	195	84 996	82 348	1 563	167
12-S50-O150-V12-C4-2	144 326	139 953	2 698	145	130 234	121 365	5 321	182	141 561	136 956	3 264	170
13-S50-O150-V14-C3-1	82 536	79 828	2 003	147	79 217	74 869	2 653	188	80 854	77 525	2 152	175
14-S50-O150-V14-C3-2	160 120	156 869	2 424	140	158 711	153 023	4 740	201	159 980	155 639	2 630	181
15-S50-O150-V14-C4-1	96 532	91 201	2 568	156	93 656	90 623	3 955	234	95 468	91 585	2 781	169
16-S50-O150-V14-C4-2	163 221	159 981	2 317	151	159 856	154 523	3 203	212	161 023	157 656	2 513	182

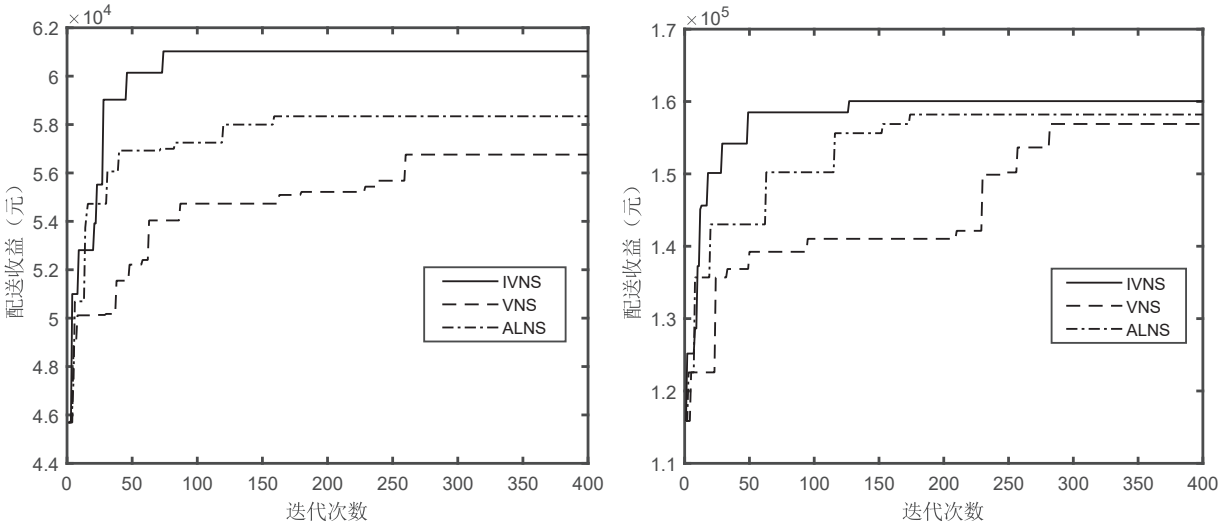
注 1　为了表示方便, 表格中算例名称最后一项的 “1” 代表 “8000”, “2” 代表 “16000”.

3.2　邻域扰动算子的影响分析

为分析本文所提出的邻域扰动算子对算法性能的影响, 本文以订单、站点和行程为不同操作单元, 设计了六种邻域扰动算子. 对文献 [11] 中的随机移除算子和最坏移除算子分别进行了扩展. 其中, 随机移除算子扩展为随机订单移除算子 (Random Order Removal, ROR) 和随机站点移除算子 (Random Station Removal, RSR), 最坏移除算子扩展为最坏订单移除算子 (Worst Order Removal, WOR) 和最小效益移除算子 (Worst Trip Removal, WTR). 保留了文献 [11] 中的最长行程移除算子 (Longest Trip Removal, LTR), 并新增了结合订单交货期的交货期移除算子.

设计加油站规模为 23 的八组算例, 每组算例运算 10 次, 统计每种算子在每组算例中发现新的最优解的次数, 计算各扰动算子在发现新的最优解方面所占的比例, 结果如表 4 所示. 实验结果显示, 六种邻域扰动算子中, 交货期移除算子 (DTR) 对发现新的最优解的贡献最大, 贡献比例达到了 36.49%, 表明了本文设计的与交货期相关的邻域扰动算子的有效性; 其次是最长行程移除算子 (LTR) 和最坏订单移除算子 (WOR), 贡献比例分别占 26.60% 和 25.15%; 随机站点移除算子 (RSR)、随机订单移除算子 (ROR) 和最小效益移除算子 (WTR) 的贡献比例最小, 均在 7% 以下. 为进一步检验本文设计的 DTR 算子的性能, 将本文提出的 IVNS 算法和去除 DTR 算子的 IVNS 算法的求解结果进行对比. 实验结果表明, 前者的平均

优化率为 8.06%(最高为 15.89%), 且平均耗时比后者平均节省了 13.5%. 这进一步表明 DTR 算子能增强 IVNS 算法的局部寻优能力, 有利于算法跳出局部最优.



(a)算例S23-O69-V6-C3-16000　　(b)算例S50-O150-V14-C3-16000

图 3　不同算法的搜索过程

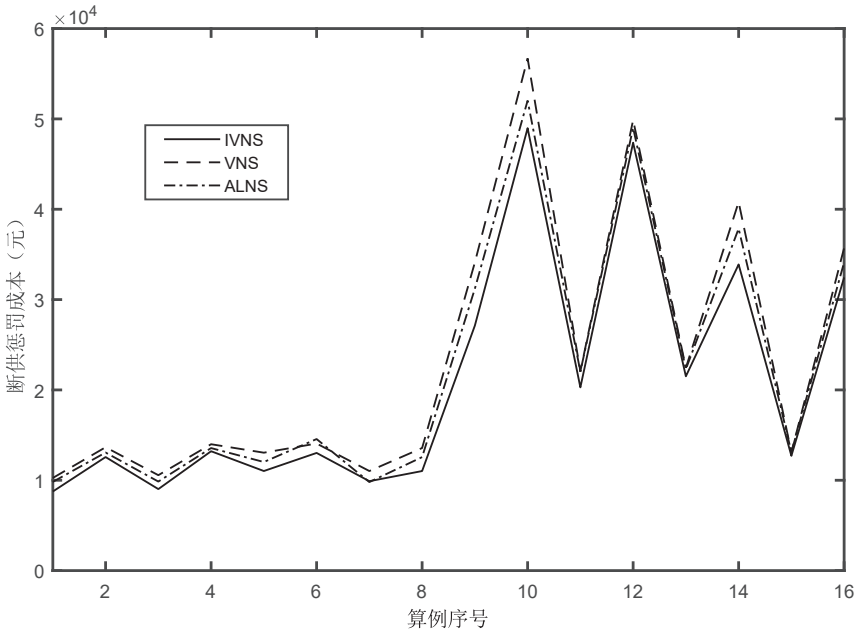


图 4　不同算法所得解的断供惩罚成本

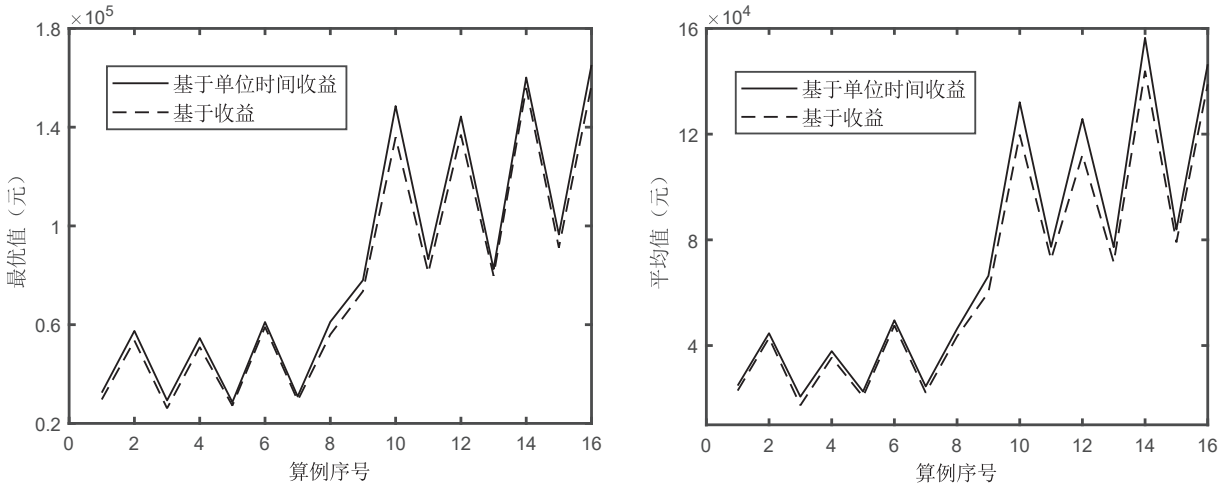
表 4　各邻域扰动算子的性能比较

算例名称	ROR	RSR	WOR	WTR	LTR	DTR
S23-O69-V5-C3-8000	2	3	15	1	32	23
S23-O69-V5-C3-16000	1	3	7	0	2	3
S23-O69-V5-C4-8000	1	13	6	1	20	30
S23-O69-V5-C4-16000	3	1	11	2	19	35
S23-O69-V6-C3-8000	4	3	8	1	9	39
S23-O69-V6-C3-16000	0	2	21	1	18	12
S23-O69-V6-C4-8000	1	1	33	2	6	14
S23-O69-V6-C4-16000	4	4	21	3	23	21
贡献比例 (%)	3.30	6.19	25.15	2.27	26.60	36.49

3.3　不同贪婪策略的影响分析

在解的局部优化过程中, 分别运用基于单位时间收益和基于收益的贪婪策略对邻域扰动后的解进行局部优化. 其中, 基于收益的贪婪策略在优化过程中, 仅考虑配送订单所带来的收益, 而基于单位时间收益的贪婪策略不仅考虑了配送订单所带来的收益,

还考虑了配送该订单所用时长. 分别运用以上两种贪婪策略进行解的局部优化, 计算得出的目标函数最优值和平均值分别如图 5(a) 和 (b) 所示. 从图中可看出, 基于单位时间收益的 IVNS 算法与基于收益的 IVNS 算法相比, 前者所求得的最优值和平均值均优于后者所求的结果. 因此, 本文采用基于单位时间收益的贪婪策略进行解的局部优化, 以进一步提升算法的求解质量.



(a) 不同贪婪策略下的最优值　　(b) 不同贪婪策略下的平均值

图 5　基于不同贪婪策略的求解效果对比

4　结　论

本文研究了多行程多交货期的成品油配送问题, 综合考虑客户优先级和车辆运输时间窗, 以运输公司收益最大化建立了成品油配送优化模型, 设计了求解模型的带交货期移除算子的改进变邻域搜索算法, 并设计不同规模的仿真实验验证了算法的有效性. 根据实验结果, 可得出如下结论: 1) 本文设计的 IVNS 算法在求解质量和求解效率方面均优于一般的 VNS 和文献中的 ALNS 算法; 2) 结合本文问题特点设计的交货期移除算子对发现新的最优解的作用显著; 3) 采用基于单位时间收益最大化的贪婪策略进行解的局部优化能在一定程度上提升算法的求解质量. 本文仅考虑订单提前下达的情况, 未来可考虑订单动态到达, 设计成品油动态调度优化模型和算法, 这是进一步的研究方向.

参考文献 (References)

[1] 孙丽华. 石化企业成品油物流优化信息化建设探析 [J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(5): 620-624.
(Sun L H. Study on the logistics optimization informationization of oil products in Petrochemical enterprises[J]. Computers and Applied Chemistry, 2012, 29(5): 620-624.)

[2] Yan S, Chu J C, Hsiao F Y, et al. A planning model and solution algorithm for multi-trip split-delivery vehicle routing and scheduling problems with time windows[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 87: 383-393.

[3] Cattaruzza D, Absi N, Feillet D, et al. An iterated local search for the multi-commodity multi-trip vehicle routing problem with time windows[J]. Computers & Operations Research, 2014, 51: 257-267.

[4] 詹红鑫. 成品油多舱位配送路径优化问题研究 [D]. 大连: 大连理工大学经济管理学院, 2018.
(Zhan H X. Research on the refined product multi-compartment distribution routing optimization problem[D]. Dalian: School of Economics and Management, Dalian University of Technology, 2018.)

[5] Luo Z, Qin H, Zhu W, et al. Branch and price and cut for the split-delivery vehicle routing problem with time windows and linear weight-related cost[J]. Transportation ence, 2017, 51(2): 668-687.

[6] 王旭坪, 詹红鑫, 孙自来, 等. 多行程带补货时间窗的成品油多舱配送路径优化 [J]. 管理工程学报, 2020, 34(04): 182-195.
(Wang X P, Zhan H X, Sun Z L, et al. Optimization of routes for multi-compartment, multi-trip refined oil distribution with replenishment time[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2020, 34(04): 182-195.)

[7] Cornillier F, Boctor F F, Renaud J. Heuristics for the multi-depot petrol station replenishment problem with time windows[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 220(2): 361-369.

[8] Alinaghian M, Shokouhi N. Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search[J]. Omega, 2018, 76: 85-99.

[9] Cornillier F, Laporte G, Boctor F F, et al. The petrol station replenishment problem with time windows[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(3):

919-935.

[10] 张源凯, 孙丽君, 胡祥培. 成品油配送多车舱车辆指派及路径优化问题研究 [J]. 运筹与管理, 2017, 26(7): 1-9.
(Zhang Y K, Sun L J, Hu X P. Multi-compartment vehicle dispatching and routing for product oil distribution[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(7): 1-9.)

[11] Wang L, Kinable J, Van Woensel T. The fuel replenishment problem: A split-delivery multi-compartment vehicle routing problem with multiple trips[J]. Computers & Operations Research, 2020, 118: 104904.

[12] Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search[J]. Computers & operations research, 1997, 24(11): 1097-1100.

[13] François V, Arda Y, Crama Y, et al. Large neighborhood search for multi-trip vehicle routing[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 255(2): 422-441.

[14] Cheikh M, Ratli M, Mkaouar O, et al. A variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with multiple trips[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2015, 47: 277-284.

[15] Wassan N, Wassan N A, Gábor Nagy, et al. The multiple trip vehicle routing problem with backhauls: formulation and a two-level variable neighborhood search[J]. Computers & Operations Research, 2017, 78(C): 454-467.

[16] 徐东洋, 李昆鹏, 郑飘, 等. 多车场多车型多品类供需未匹配与可任意拆分取送货车辆路径问题优化 [J]. 管理学报, 2020, 17(7): 1086-1095.
(Xu D Y, Li K P, Zheng P, et al. The optimization research of multi-category unpaired supply-demand and arbitrary split pickup and delivery vehicle routing problem with multi-depot and multi-type trucks[J]. Chinese Journal of Management, 2020, 17(7): 1086-1095.)

[17] Solomon M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. Operations research, 1987, 35(2): 254-265.

[18] 宋伟刚, 王聪, 赵玲. 大规模客户车辆调度问题启发式算法研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3696-3701.
(Song W G, Wang C, Zhao L. Heuristic method for vehicle routing problem with large scale customers[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14): 3696-3701.)

[19] 张建同, 丁烨. 变邻域模拟退火算法求解速度时变的 VRPTW 问题 [J]. 运筹与管理, 2019, 028(011): 77-84.
(Zhang J T, Ding Y. Simulated annealing with variable neighborhood for time-dependent vehicle routing problem with time window[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 028(011): 77-84.)

[20] Cardoso P J S, Schütz G, Mazayev A, et al. Solutions in under 10 seconds for vehicle routing problems with time windows using commodity computers[C]//International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Springer, Cham, 2015: 418-432.

[21] Cheikh M, Ratli M, Mkaouar O, et al. A variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with multiple trips[J]. Electron. Notes Discret. Math., 2015, 47: 277-284.

[22] 李珍萍, 周文峰, 张煜炜, 等. 考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题 [J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2999-3005.
(Li Z P, Zhou W F, Zhang Y W, et al. Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints[J]. Control and Decision, 2020, 35(12): 2999-3005.)

作者简介

高海龙 (1994−), 男, 硕士生, 从事物流系统优化与仿真研究, E-mail: hlgao2019@hust.edu.cn;

谢勇 (1974−), 男, 副教授, 博士, 从事物流系统仿真与优化等研究, E-mail: xyhust@mail.hust.edu.cn;

马吉祥 (1996−), 男, 硕士, 从事导航与定位研究, E-mail: unicorn@hust.edu.cn;

张波 (1975−), 男, 高工, 从事能源行业信息化建设等领域的研究, E-mail: paul_cheung@189.cn.