

10-18-2021

Joint Distribution Location-routing Problem and Large Neighborhood Search Algorithm

Zhenping Li

1. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; ;

Yuwei Zhao

1. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; ;2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029,China; ;

Yuwei Zhang

1. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; ;3. School of Management Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China; ;

Lining Xing

4. School of Information System and Management, University of National Defense Science and Technology, Changsha 410003, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Joint Distribution Location-routing Problem and Large Neighborhood Search Algorithm

Abstract

Abstract: Based on the characteristics of two-echelon, multi-center, and heterogeneous fleets in urban logistics joint distribution system, the two-echelon joint distribution location routing problem is studied. *The problem is formulated into a mixed integer programming model to minimize the total costs. An adaptive large neighborhood search algorithm (ALNS) for solving the model with multiple deletion and insertion operators is proposed to obtain neighborhood solution. The selection probability of each operator is adjusted according to the neighborhood solution to accelerate the convergence speed. Several test examples are generated based on the benchmark of location-routing problem. Both ALNS algorithm and Gurobi software are used to solve the problem respectively, and the fast effectiveness of the ALNS algorithm is verified by comparative analysis.*

Keywords

two-echelon joint distribution, location-routing problem, mixed integer programming, adaptive large neighborhood search, simulated annealing

Authors

Zhenping Li, Yuwei Zhao, Yuwei Zhang, Lining Xing, and Ren Teng

Recommended Citation

Li Zhenping, Zhao Yuwei, Zhang Yuwei, Xing Lining, Ren Teng. Joint Distribution Location-routing Problem and Large Neighborhood Search Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2518-2531.

共同配送选址-路径问题及大邻域搜索算法

李珍萍¹, 赵雨薇^{1,2}, 张煜炜^{1,3}, 邢立宁⁴, 任腾^{5*}

(1. 北京物资学院 信息学院, 北京 101149; 2. 北京化工大学 经济管理学院, 北京 100029; 3. 首都经济贸易大学 管理工程学院, 北京 100070; 4. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410003; 5. 中南林业科技大学 物流与交通学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 结合城市物流共同配送体系两层级、多中心、多车型等特点, 研究了两层级共同配送选址-路径问题。以总成本极小化为目标, 建立该问题混合整数规划模型, 设计求解模型的自适应大邻域搜索算法。算法应用多种删除操作符和插入操作符生成邻域解, 根据每次迭代得到的邻域解优劣调整相应操作符的选择概率, 加快收敛速度。利用选址-路径问题的标准测试集生成若干算例, 分别利用自适应大邻域搜索算法和 Gurobi 软件进行求解, 通过对比分析验证自适应大邻域搜索算法的快速有效性。

关键词: 两层级共同配送; 选址-路径问题; 混合整数规划; 自适应大邻域搜索; 模拟退火

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 10-2518-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0685

Joint Distribution Location-routing Problem and Large Neighborhood Search Algorithm

Li Zhenping¹, Zhao Yuwei^{1,2}, Zhang Yuwei^{1,3}, Xing Lining⁴, Ren Teng^{5*}

(1. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;

2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3. School of Management Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China;

4. School of Information System and Management, University of National Defense Science and Technology, Changsha 410003, China;

5. School of Logistics and transportation, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Based on the characteristics of two-echelon, multi-center, and heterogeneous fleets in urban logistics joint distribution system, the two-echelon joint distribution location routing problem is studied. The problem is formulated into a mixed integer programming model to minimize the total costs. An adaptive large neighborhood search algorithm (ALNS) for solving the model with multiple deletion and insertion operators is proposed to obtain neighborhood solution. The selection probability of each operator is adjusted according to the neighborhood solution to accelerate the convergence speed. Several test examples are generated based on the benchmark of location-routing problem. Both ALNS algorithm and Gurobi software are used to solve the problem respectively, and the fast effectiveness of the ALNS algorithm is verified by comparative analysis.

Keywords: two-echelon joint distribution; location-routing problem; mixed integer programming; adaptive large neighborhood search; simulated annealing

引言

环境问题日益严峻, 减少碳排放, 缓解城市交

通拥堵问题势在必行。根据相关研究, 货运车辆是造成的碳排放和交通拥堵的主要原因。共同配送作为一种新的配送方式能够有效提高物流车辆的使

收稿日期: 2020-09-10

修回日期: 2020-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(71771028), 北京自然科学基金(9212004, Z180005), 北京市属高校高水平科研创新团队建设项目(IDHT20180510)

第一作者: 李珍萍(1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向为物流网络优化、智能算法。E-mail: lizhenping66@163.com

通讯作者: 任腾(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为物流工程与管理、复杂系统建模与仿真。E-mail: chinarenteng@163.com

用效率,降低车辆使用数量和总行驶里程,缓解城市交通拥堵,减少碳排放造成的污染,并且有利于整合社会整体资源,实现生态环境保护与社会经济发展的动态平衡^[1],集中规划和布局物流基础设施,减少物流资源对越来越珍贵的城市土地的占用。从整个社会的角度来讲,实现城市物流共同配送不仅有利于提高物流配送效率和减少交通拥堵,还能提升顾客满意度^[2],降低物流成本,实现总体收益最大化。为了实施共同配送策略,首先要构建共同配送网络,并建立共同配送运营管理模式。共同配送网络主要包含物流中心、配送中心和客户点 3 类节点,以及 2 个层级多种类型的车辆路径,即从物流中心到配送中心的大型运输车配送路径,和从配送中心到客户点的多种小型运输车配送路径。共同配送网络构建问题是两层级选址-路径问题(Two-echelon location routing problem, 2E-LRP),该问题包括共同配送中心的选址问题与两层级配送路径的规划问题,该问题是 NP-Hard 的。

针对一般选址-路径问题,国内外学者从不同角度开展了研究,包括与应急资源配置相结合^[3],与无人机飞行轨迹联合优化^[4],与库存问题集成优化等^[5]。关于 2E-LRP 问题,现有研究成果较为丰富,主要集中在快速有效算法的设计方面,如运用改进的遗传算法^[6],模拟退火算法和邻域搜索算法相结合的两阶段启发式算法^[7],自适应大邻域搜索元启发式算法^[8],基于目标函数分解的协同进化算法^[9]等。上述文献在第二层级的路径优化中只考虑了单一车型,实际中使用不同类型的车辆更能节约成本、降低碳排放^[10]。与第二层级是单车型路径规划的 2E-LRP 问题相比,第二层级考虑多种配送车型更加符合实际情况,但求解难度随着问题维度的增加而成倍增加。关于多车型的选址-路径问题的主要研究成果依然集中在算法设计上,如自适应大邻域搜索元启发式算法^[11],基于进化搜索的混合算法^[12],ANN 算法和拉格朗日启发式算法相结合的两阶段算法^[13],聚类分析和遗传算法相结合的两阶段算法^[14],多目标粒子群优化和自适应多

目标变量邻域搜索的混合算法^[15]等。

而以上关于 2E-LRP 问题的研究成果,在第一层级的路径规划只考虑了单个物流中心的情况。针对多车型多中心的选址-路径问题的研究较少。而本文研究的城市共同配送网络体系,第一层级规划多个物流中心与多个共同配送中心之间的单车型车辆路径,从配送中心到客户点的第二层级的配送过程可以使用多种车型,该问题属于两层级、多中心、多车型、带容量限制的选址-路径问题。本文将基于城市共同配送网络构建和路径规划的实际场景,研究基于多车型的两层级共同配送选址-路径问题,建立问题的数学模型,并设计求解模型的快速有效算法。

1 问题描述和模型建立

1.1 问题描述

基于多车型的两层级共同配送问题可以描述为:某区域拟构建共同配送网络,已知该区域内有多个物流中心(物流中心集合记为 I)、多个共同配送中心备选点(共同配送中心备选点的集合为 J)和若干个客户点(所有客户集合记为 K)。每个物流中心只提供一种产品,不妨假设每个物流中心提供的产品序号与物流中心序号相同,即所有物流中心提供的产品集合为 I ;各个物流中心用同类型的大型车辆为共同配送中心配送产品;每个共同配送中心拥有多种类型二级配送车型(二级配送车型集合为 H),共同配送中心整合来自不同物流中心的多种产品,选择适当的二级车型 $h(h=1,2,\dots,H)$ 为客户点配送产品。已知物流中心、备选共同配送中心和各个客户点的位置坐标,每个客户需要一种或多种产品,客户 k 对产品 i 的需求量为 $q_k^i(k \in K, i \in I)$,二级车型 h 的车辆的最大装载量为 $Q_2^h(h \in H)$ 、固定动用成本为 $t_2^h(h \in H)$,从共同配送中心 j 到客户点 k ,使用二级车型 h 配送产品的单位运输费率为 $C_{jk}^h(j \in J, k \in K, h \in H)$ 。问如何选择共同配送中心的位置并规划两层级的配送路径,才能使总成本最低,并且尽可能降低车辆总行驶里程?

为了简化问题，做出如下假设：

(1) 一个物流中心 RC 只能提供一种产品，且物流中心 i 只提供产品 i ；

(2) 备选共同配送中心 DC 位置已知，每个备选共同配送中心容量有限，且固定运行成本已知；

(3) 不同层级节点之间使用的运输车类型已知，假设从物流中心到配送中心使用一级车辆运输，从配送中心到客户点使用二级车辆运输。一级车辆和二级车辆数量充足、且车容量及单位运输费率已知；第二层级的配送在车辆容量允许的情况

下，优先使用最大容量的二级车型；

(4) 每个客户点的所有产品需求只能由一辆二级车提供配送；

(5) 不考虑越级配送。即一级车只能由物流中心 RC 出发，将单一产品运送到各个共同配送中心 DC；二级车只能由共同配送中心 DC 出发，可以同时多种产品运送到多个客户点 C。

1.2 模型建立

模型中涉及到的符号定义见表 1。

表 1 符号的定义
Tab. 1 Notations and decision variables

符号	定义
I	物流中心集合，也是产品类型集合
J	备选共同配送中心集合
K	客户点集合
H	二级配送车辆类型集合
A	各种车型的可用车辆序号集合(假设每种车型的可用车辆数量为 $ A $ 且数量充足)
$N_1 = I \cup J$	物流中心和共同配送中心点集合，即一级配送路径节点集合
$N_2 = J \cup K$	共同配送中心和客户点集合，即二级配送路径节点集合
v_0	物流中心的数目(即产品类型数量)
g_j	备选共同配送中心 j 的固定运行成本， $j \in J$
R_j	备选共同配送中心 j 的容量， $j \in J$
t_1	一级车辆的固定动用成本
t_2^h	二级车型 h 的固定动用成本， $h \in H$
Q_1	一级车型的容量
Q_2^h	二级车型 h 的容量， $h \in H$
D_{ij}	一级配送车从节点 i 到节点 j 的距离， $i, j \in N_1$
D_{jk}^h	二级配送车型 h 从节点 j 到节点 k 的距离， $j, k \in N_2$
C_{ij}	一级车型从节点 i 到节点 j 的单位运输费率， $i, j \in N_1$
C_{jk}^h	二级车型 h 从节点 j 到节点 k 的单位运输费率， $h \in H, j, k \in N_2$
q_k^i	客户 k 对产品 i 的需求量， $i \in I, k \in K$
O_k^{hr}	辅助变量，用于消除第二层级的子路径
z_j	备选共同配送中心 j 是否被选中(1:是; 0:否) ($j \in J$)
v_{jk}	客户 k 是否分配给共同配送中心 j (1:是; 0:否) ($j \in J, k \in K$)
x_{ij}	一级车是否直接从节点 i 到节点 j (1:是; 0:否) ($i, j \in N_1, i \neq j$)
e_k^{hr}	二级车型 h 的第 r 辆车是否为节点 k 服务(1:是; 0:否) ($k \in N_2, h \in H, r \in A$)
y_{jk}^{hr}	二级车型 h 的第 r 辆车是否直接从节点 j 到节点 k (1:是; 0:否) ($j, k \in N_2, j \neq k; h \in H; r \in A$)
U_{ij}	一级车从节点 i 到节点 j 的装载量 ($i, j \in N_1, i \neq j$)
L_{jk}^{ihr}	二级车型 h 的第 r 辆车从节点 j 到节点 k 时产品 i 的装载量 ($j, k \in N_2, j \neq k; h \in H; i \in I; r \in A$)

表 1 中: $|A| = \left\lceil \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} q_k^i / \min(Q_2^h) \right\rceil$, 符号 $\lceil a \rceil$

表示取大于等于 a 的最小整数。

基于多车型的两层级共同配送选址-路径问题可以表示成如下混合整数规划模型:

$$\min w = \sum_{j \in J} g_j z_j + \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_1 x_{ij} + \sum_{h \in H} \sum_{r \in A} \sum_{j \in J} t_2^h e_j^{hr} \right) + \left(\sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} C_{ij} D_{ij} x_{ij} + \sum_{h \in H} \sum_{r \in A} \sum_{j \in N_2} \sum_{k \in N_2} C_{jk}^h D_{jk}^h y_{jk}^{hr} \right) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i \in N_1, i \neq j} x_{ij} = z_j v_0 \quad j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_1} x_{ij} = \sum_{j \in N_1} x_{ji} \quad i \in N_1 \quad (3)$$

$$x_{ij} = 0 \quad i \in I, j \in I \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} q_k^i v_{jk} \leq z_j R_j \quad j \in J \quad (5)$$

$$U_{ij} \leq Q_1 x_{ij} \quad i \in I, j \in N_1, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} U_{ji} = 0 \quad i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} U_{ij} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} q_k^i v_{jk} \quad i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{s \in N_1, s \neq j} U_{sj} - \sum_{s \in N_1, s \neq j} U_{js} = \sum_{k \in K} q_k^i v_{jk} \quad i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$U_{ij} \geq 0 \quad i \in N_1, j \in N_1 \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} v_{jk} = 1 \quad k \in K \quad (11)$$

$$v_{jk} \leq z_j \quad j \in J, k \in K \quad (12)$$

$$z_j \leq \sum_{k \in K} v_{jk} \quad j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{r \in A} \sum_{j \in N_2, j \neq k} y_{jk}^{hr} = 1 \quad k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{k \in N_2} y_{jk}^{hr} = \sum_{k \in N_2} y_{kj}^{hr} \quad j \in N_2, h \in H, r \in A \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jk}^{hr} \leq 1 \quad j \in N_2, h \in H, r \in A \quad (16)$$

$$y_{kj}^{hr} = 0 \quad j \in J, k \in J, r \in A \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} e_k^{hr} q_k^i \leq Q_2^h \quad h \in H, r \in A \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} L_{jk}^{ihr} \leq Q_2^h y_{jk}^h \quad j \in J, k \in N_2, j \neq k; h \in H; i \in I \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} L_{kj}^{ihr} = 0 \quad j \in J, h \in H, i \in I, r \in A \quad (20)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \sum_{r \in A} L_{jk}^{ihr} = \sum_{k \in K} q_k^i v_{jk} \quad j \in J, i \in I \quad (21)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{r \in A} \sum_{j \in N_2, j \neq k} L_{jk}^{ihr} - \sum_{h \in H} \sum_{r \in A} \sum_{j \in N_2, j \neq k} L_{kj}^{ihr} = q_k^i \quad k \in K, i \in I \quad (22)$$

$$\sum_{j \in J} e_j^{hr} \leq 1 \quad h \in H, r \in A \quad (23)$$

$$e_j^{hr} \leq z_j \quad h \in H, r \in A, j \in J \quad (24)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{r \in A} e_k^{hr} = 1 \quad k \in K \quad (25)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} L_{jk}^{ihr} = \sum_{k \in K} e_k^{hr} q_k^i \quad i \in I, h \in H, r \in A \quad (26)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{r \in A} y_{jk}^{hr} \leq v_{jk} \quad j \in J, k \in K \quad (27)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{r \in A} y_{kj}^{hr} \leq v_{jk} \quad j \in J, k \in K \quad (28)$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq k} y_{jk}^{hr} \leq e_k^{hr} \quad h \in H, r \in A, k \in K \quad (29)$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq k} y_{kj}^{hr} \leq e_k^{hr} \quad h \in H, r \in A, k \in K \quad (30)$$

$$y_{jk}^{hr} + \sum_{\substack{q \in H, b \in A, l \in N_2 \\ q \neq h, b \neq r, k \neq l}} y_{kl}^{qb} \leq 1 \quad j \in N_2; k \in K, j \neq k; h \in H, r \in A \quad (31)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{r \in A} y_{jk}^{hr} + v_{mj} + \sum_{n \in J, n \neq m} v_{nk} \leq 2 \quad m \in J; j, k \in K, j \neq k \quad (32)$$

$$e_j^{hr} + e_k^{hr} - 2 \cdot v_{jk} \leq 0 \quad j \in J, k \in K, h \in H, r \in A \quad (33)$$

$$O_k^{hr} - O_l^{hr} + t_2^h y_{lk}^{hr} \leq t_2^h - \sum_{i \in I} q_l^i \quad l, k \in K, h \in H, r \in A \quad (34)$$

$$\sum_{i \in I} q_k^i \leq O_k^{hr} \leq t_2^h \quad k \in K, h \in H, r \in A \quad (35)$$

$$L_{jk}^{ihr} \geq 0 \quad j, k \in N_2, i \in I, h \in H, r \in A \quad (36)$$

$$z_j, v_{jk} \in \{0, 1\} \quad j \in J, k \in K \quad (37)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N_1, i \neq j \quad (38)$$

$$e_k^{hr}, y_{jk}^{hr} \in \{0, 1\} \quad j, k \in N_2, j \neq k, h \in H, r \in A \quad (39)$$

目标函数(1)表示极小化总成本, 其中第 1 项表示共同配送中心选址成本, 第 2, 3 项分别表示第一层级和第二层级的车辆固定动用成本, 第 4, 5 项分别表示第一层级和第二层级路径的配送成本。

约束条件(2)~(10)是第一层级配送相关的约束。其中约束条件(2)表示每个被选中的共同配送中

心 j 恰好汇集来自 v_0 个物流中心的一级配送车辆；约束条件(3)表示到达某个节点的车必须从该节点离开；约束条件(4)禁止物流中心之间的路径；约束条件(5)保证每个被选中的共同配送中心均满足容量约束；约束条件(6)表示一级车的负载量不超过车容量；约束条件(7)表示一级车空车回到物流中心；约束条件(8)表示一级车从物流中心 i 出发时的总装载量等于所有被选中的配送中心对产品 i 的需求量之和；约束条件(9)表示从物流中心 i 出发为共同配送中心 j 提供服务的一级车装载量要满足共同配送中心 j 对产品 i 的需求；约束条件(10)表示装载量非负约束。

约束条件(11)~(36)是第二层级配送相关的约束。其中约束条件(11)表示每个客户恰好由一个配送中心提供服务；约束条件(12)表示若客户 k 由共同配送中心 j 提供服务，则配送中心 j 必然被选中；约束条件(13)表示每个被选中的配送中心至少为一个客户提供服务；约束条件(14)表示每个客户恰好被一辆二级车访问一次；约束条件(15)表示到达某个客户点的二级车必须从该客户点离开；约束条件(16)表示离开节点 j 的二级车至多直接到达一个客户点；约束条件(17)表示禁止二级车在配送中心之间的路径；约束条件(18)表示由一辆二级车服务的所有客户的各种产品总需求量不超过车辆的最大装载量；约束条件(19)表示二级车的实际装载量不超过车辆最大装载量；约束条件(20)表示任何二级车从客户回到配送中心时的装载量为 0，即空车回到起点；约束条件(21)表示所有离开共同配送中心 j 的二级车的总装载量等于该配送中心服务的客户总需求量；约束条件(22)表示所有到达客户 k 的车辆对产品 i 的装载量减去离开时对 i 的装载量等于客户 k 对产品 i 的需求量，即满足客户 k 对产品 i 的需求；约束条件(23)表示每辆二级车至多为一个共同配送中心服务；约束条件(24)表示若某个共同配送中心未被选中，则不会有二级车辆为其提供服务；约束条件(25)表示每个客户恰好被一辆二级车

服务；约束条件(26)表示每辆二级车离开配送中心时的装载量等于由该车辆服务的所有客户总需求量；约束条件(27)和(28)表示若客户 k 未分配给共同配送中心 j ，则不会有 j 和 k 之间的路线；约束条件(29)和(30)表示若车型 h 的第 r 辆车不服务二级节点，则不会从配送中心 j 出发或返回；约束条件(31)表示若车型 h 的第 r 辆车从节点 j 到节点 k ，则不会同时有另一辆车从 k 出发到另一个节点；约束条件(32)表示若客户 j 和 k 之间有路径，则 j 和 k 不会属于不同的配送中心；约束条件(33)表示若客户 k 由配送中心 j 出发的二级车辆 r 提供服务，则客户 k 必然被分配给共同配送中心 j ；约束条件(34)和(35)是第二层级子路经消除约束；约束条件(36)是二级车辆的装载量非负约束；约束条件(37)~(39)为决策变量取值约束。

基于多车型的两层级共同配送选址-路径问题是由多个 NP 难子问题构成的联合优化问题，虽然可以表示成混合整数规划模型，但由于模型中的变量和约束都很多，无法使用商业软件直接求解，因此设计求解模型的快速有效算法是解决这一类问题的关键。

2 算法设计

本节将设计自适应大邻域搜索算法(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)求解基于多车型的两层级共同配送选址-路径问题，并利用模拟退火算法确定候选解的接受规则，以加快算法的收敛速度，提高解的质量。

算法的基本思路为：首先利用贪婪算法生成初始可行解；然后对初始可行解执行自适应大邻域搜索优化过程，通过删除、插入操作，产生邻域解，利用模拟退火算法确定邻域解的接受规则，并根据每次迭代得到邻域解的优劣更新相应操作符的选择概率，以加快算法的收敛速度。重复执行大邻域搜索优化步骤，直到达到预先设定的最大迭代次数，将迭代过程得到的最好解作为近似最优解。

2.1 初始化

采用 4 个阶段生成初始可行解, 第 1 阶段选定初始的共同配送中心; 第 2 阶段将客户分配到选定的共同配送中心; 第 3 阶段生成第二层级的初始配送路径; 第 4 阶段生成第一层级的配送路径, 具体步骤见算法 1。

算法 1: 初始解生成

1: Input: RC, DC, C 坐标; DC 的容量 R 和成本 g ; C 的需求 q ; 两层级车辆信息;

2: 选择最少的共同配送中心 DC 满足所有客户需求, 记录选中的 DC 集合 initDC;

3: 计算每个客户 C 到 initDC 中每个中心的距离, 得到距离矩阵 d ;

4: 在满足 DC 容量约束的情况下, 将 C 尽可能分配到离其最近的 DC;

5: 以最大车型容量为约束, 使用 CW 算法生成第二层级的路径; 根据路径上所有客户的总需求确定实际需要的车型;

6: 根据选中的 DC, 利用求解 VRP 问题的精确算法确定第一层级的配送路径 z_0 并计算其对应的目标函数值 w_0 ;

7: Output: 初始解 z_0 和 w_0 。

第 1 阶段: 根据客户对各种产品的总需求量和备选共同配送中心的容量约束, 由公式(40)确定需要建立的最少共同配送中心个数 $Num_{\min}$ 。

$$\sum_{j \in J} R_j z_j \geq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} q_k^i \quad (40)$$

将所有的备选配送中心按容量从大到小排列后, 从容量最大的备选配送中心开始选取共同配送中心, 直到选中的共同配送中心总容量能够满足所有客户的总需求, 记录选定的初始共同配送中心序号。

第 2 阶段: 根据第一阶段选定的共同配送中心, 计算每个客户到选定的共同配送中心距离; 在满足共同配送中心容量约束的前提下, 尽可能将每个客户分配到离其最近共同配送中心; 若最近的

共同配送中心容量已经饱和, 则将客户分配到离其次近的共同配送中心。重复该步骤, 直到所有的客户都被分配。

第 3 阶段: 按照最大车型容量限制, 应用节约里程算法^[16], 生成第二层级的初始配送路径; 然后根据每一条路线上客户点的总需求量确定实际需要的车型。

第 4 阶段: 根据第一阶段选定的初始共同配送中心, 直接利用求解 VRP 问题的精确算法确定第一层级配送路径, 由于共同配送中心数量较少, 可以直接利用求解器(如 Gurobi)求解 VRP 问题的数学模型。

2.2 解的编码方式

两层级共同配送选址-路径问题的可行解涉及到选定的共同配送中心、第二层级路径、第一层级路径和客户的分配等多方面, 它们之间彼此相互关联并相互影响, 本文通过多个相互关联的矩阵表示一个可行解的编码, 如图 1 所示。

图 1 中(sortDCC)表示客户 C 分配到共同配送中心 $\sum_{j \in J} R_j z_j \geq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} q_k^i$ DC 的情况, 矩阵的行表示

共同配送中心, 矩阵的列为客户数目+1 (其中的 1 表示共同配送中心)。每行第一个元素表示共同配送中心的序号, 其余非 0 元素表示分配给共同配送中心的客户序号, 0 仅作为辅助元素, 保证矩阵每行元素个数相同, 每行元素均等于客户数目+1。若某个共同配送中心 DC 未被选中, 则没有 C 分配给它, 整行元素全为 0。衍生出来的矩阵(ks)表示被选中的 DC 集合。根据被选中的共同配送中心 DC, 分别计算出第一层级的路径集合(route1)和第二层级的路径集合(route2)。

2 个层级的路径集合都不包含 RC 或 DC, 用路线所在的行或是元胞数组的位置表示路线的起点和终点(即 RC 或 DC), 如图 1 中 route2 集合包含的路线 1 即[1,4,0,0]对应配送中心 1, 即该路线的起点和终点均为配送中心 1, 配送的客户为 C1

和 C4。没有选中的 DC (如图 1 中的配送中心 2) 对应的路线集合为空。每一个 DC 下分配的客户数目等于其在路线矩阵对应的列中包含的非 0 元素个数。然后根据(route2)集合中每条线路的客户总需求量确定最合适的车辆类型生成车辆类型(type2), 如图 1 中根据路线[1,4,0,0]的总需求量为

其分配了第 1 种类型的车辆。每一个 DC 对应一个车辆类型矩阵, 若某个 DC 未被选中(如配送中心 2)则对应的车辆类型矩阵为空; 选中的配送中心对应(type2)矩阵的列数等于其对应的(route2)矩阵的行数, 即每条路径恰好由一辆车服务。

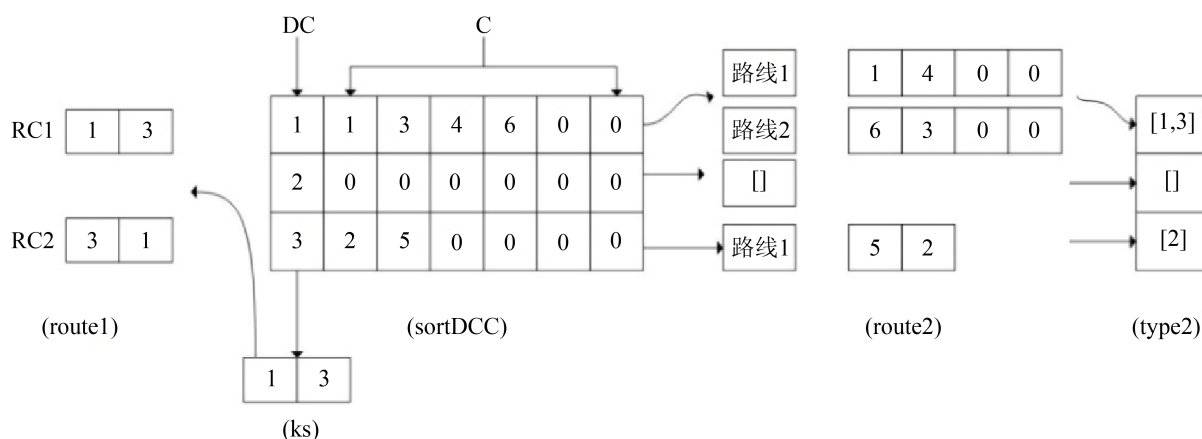


图 1 解的编码方式

Fig. 1 Representation of a solution

2.3 自适应大邻域搜索(ALNS)优化

2.3.1 自适应大邻域搜索的基本思想

对当前可行解, 首先使用删除操作符产生破坏解, 再利用插入操作符构造修复解, 作为原可行解的邻域解。本文构造了 9 种删除操作符和 2 种插入操作符产生邻域解, 通过邻域搜索对可行解进行逐步优化。在优化过程中, 每次使用一种删除操作符删除部分点以后, 立即将删除的点添加到删除列表 L_r 中, 然后再使用插入操作符, 将 L_r 中的每一个客户插入到适当的路径中, 形成修复的解, 并根据修复解中每一条路径的总需求, 重新确定需要使用的车型。

在求解过程中, 为每一种删除操作符和插入操作符分配一个分数, 表示该操作符的运算效果, 一开始设置每种操作符对应的分数均为 1, 如果使用某种操作符产生的邻域解优于当前的可行解, 则增加该操作符对应的分数。为了避免陷入

局部最优解, 定期将所有操作符的分数重置为 1。针对客户节点的删除操作符, 每次都在 $[b_L|K|, b_U|K|]$ 中随机选择删除的节点数, 区间左、右端点分别表示每次删除的客户节点数的下限和上限, b_L, b_U 表示删除节点数下上限占总节点数的百分比。

图 2 给出了 ALNS 算法的示意图, 左上角给出了一个当前可行解, 其对应的删除列表 L_r 为空集; 从当前可行解中删除客户 C3 和共同配送中心 DC3 以后形成破坏的解, 此时, 需要将删除的客户 C3 以及由于 DC3 的删除而被破坏的二级配送路径中包含的客户点 C2, C5 添加到删除列表 L_r 中, 即 $L_r = [2, 5, 3]$; 最后, 对删除列表 L_r 中的每一个节点应用插入算子, 将其插入到破坏的解中最合适的位置, 形成新的可行解, 即原来可行解的邻域解, 同时将 L_r 更新为空集。

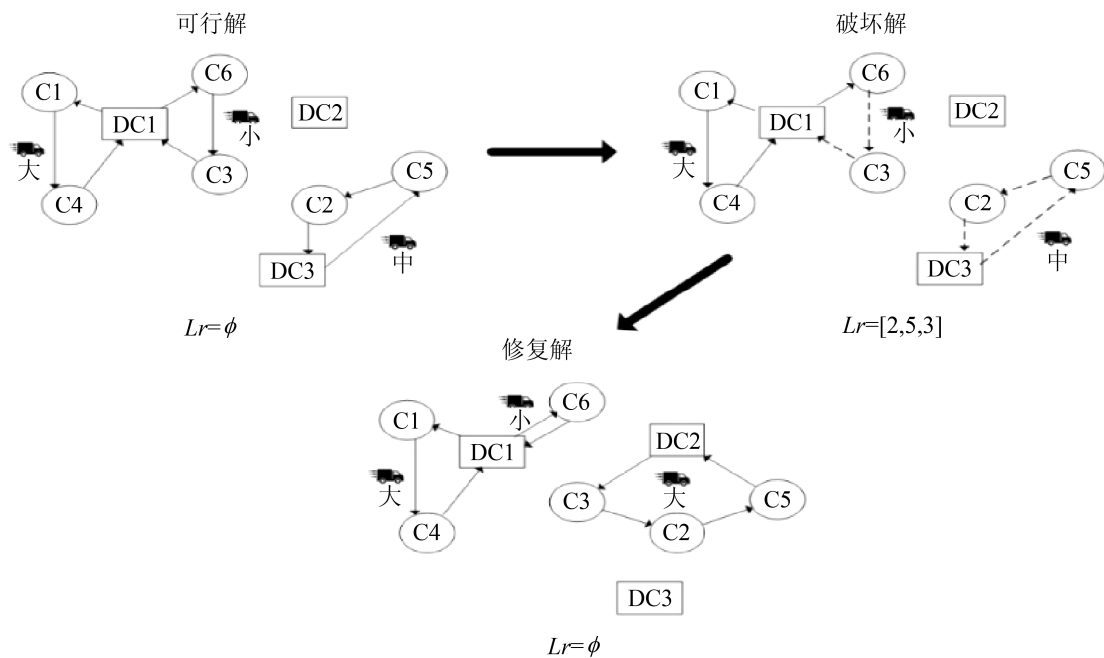


图 2 ALNS 算法示意图
Fig. 2 ALNS algorithm

2.3.2 删除操作符

本文使用两类删除操作符, 分别是基于多样化的删除操作符和基于强度的删除操作符。

(1) 基于多样化的删除操作符

1) 配送中心关闭删除符^[17]

随机选择一个已经选中的共同配送中心 j 并关闭, 同时将分配给该配送中心 j 的所有节点删除, 并添加到删除列表 Lr 中, 再随机打开一个未被选中的配送中心 k , 作为新选中的配送中心。

2) 随机删除符^[18]

随机选择 n 个节点删除, 并添加到删除列表 Lr 中。

3) 基于距离的配送中心删除符^[11]

此删除符基于配送中心关闭删除符, 不同的是, 关闭配送中心 j 后, 选择新打开的配送中心是满足容量约束情况下, 距离刚关闭的配送中心 j 最近的配送中心 k 。

(2) 基于强度的删除操作符

1) 此删除符基于从路径中删除极端节点的思想^[19], 即删除一些相对于路径的平均距离比较极端

的节点, 并添加到删除列表 Lr 中。

假设可行解中包含的路径集合为 $\beta = \{B_1, B_2, \dots, B_{|\beta|}\}$, 对于其中的每一条路径 B , 设其中包含的节点序列为 $B = i_1, \dots, i_{|B|}$, 计算路径中相邻 2 个节点之间的平均距离:

$$\bar{d}_B = \sum_{(i_t, i_{t+1}) \in B} d_{i_t i_{t+1}} / |B|$$

然后根据公式:

$$j^* = \arg \max_{B \in \beta, j \in B} \{\bar{d}_B - \bar{d}_{B \setminus \{j\}}\}$$

依次选择 n 个节点删除, 并添加到删除列表 Lr 中。

2) 最坏距离删除符^[8]

此删除符是基于距离的删除符, 即删除路径中离前序节点和后继节点距离之和最大的节点, 计算公式为:

$$j^* = \arg \max_{j \in C} \{d_{ij} + d_{jk}\}$$

计算可行解中每个节点到其所在路径中前序节点和后继节点的距离之和, 删除 n 个最长距离和对应的节点, 并添加到删除列表 Lr 中。

3) Shaw 删除符^[8]

此删除符是删除 n 个相似的节点, 其中节点之间的相似度可以基于距离、需求量等参数定义。先随机选择一个节点 $i(i \in C)$ 并添加到删除列表 Lr 中。若节点 $j(j \in C)$ 和 i 在一条路线上, $l_{ij}=1$; 否则, $l_{ij}=0$ 。然后根据公式:

$$j^* = \arg \min_{j \in C} \{ \Phi_1 d_{ij} + \Phi_2 |q_i - q_j| + \Phi_3 l_{ij} \}$$

选择 $n-1$ 个和节点 i 相似的节点, 其中 Φ_1, Φ_2, Φ_3 分别表示距离、需求量之差、是否在一条路径上等 3 个因素的权重。

4) 仅基于距离的删除符^[8]

此删除符是 Shaw 删除符中仅基于距离的特例情况。

5) 基于需求的删除符^[8]

此删除符是 Shaw 删除符中仅基于需求的特例情况。

6) 关闭配送中心删除符^[11]

此删除符是计算每个配送中心的利用率 $\Delta(k)(k \in DC)$, 并从中删除 $\Delta(k)$ 最小的一个配送中心。其中 $\Delta(k)$ 是配送中心 k 服务的客户总需求与配送中心 k 的容量之比:

$$\Delta(k) = \frac{\sum_{i \in C} q_i v_{ik}}{R_k}$$

2.3.3 插入操作符

本文使用 2 种插入操作符。

(1) 贪婪插入符^[8]

基于距离为 Lr 中的所有节点找到最佳的插入位置。根据公式:

$$d_i = d_{ji} + d_{ik} - d_{jk} (i \in Lr, j \in N_2)$$

选择其中距离最短的一个位置:

$$j^* = \arg \min_{B \in \beta, j \in B} \{ d_i \}$$

在 j^* 后插入节点 $i(i \in Lr)$ 。

(2) 带噪声扰动的贪婪插入符^[8]

此操作符是贪婪插入符的扩展, 但在选择节点的最佳位置时使用了一定的随机扰动。这种随机扰动主要通过修改节点 i 的成本来实现:

$$NewCost = ActualCost + \bar{d} \mu \varepsilon$$

式中: $\bar{d}$ 为根据贪婪插入符里的公式计算出的所有 d_i 中的最大值, μ 为扰动噪声参数, 设为 0.1, ε 为一个位于 $[-1, 1]$ 的随机数。

2.3.4 自适应调整操作符的选择概率

为了加快算法的收敛速度, 本文为每一种操作符设置一个被选择的概率。在迭代过程中, 根据每一步迭代产生的邻域解性能, 动态调整相应操作符的选择概率。最初设置 9 个删除操作符和 2 种插入操作符被选择的概率相等, 分别为 $1/9$ 和 $1/2$ 。在算法迭代过程, 操作符 d 在第 t 次迭代之后的被选择的概率通过下列公式进行更新:

$$P_d^{t+1} = P_d^t (1 - r_p) + r_p \pi_d / w_d$$

式中: w_d 是操作符 d 在目前迭代之后被使用过的总次数; r_p 是轮盘赌参数, r_p 为常数, 本文中设置为 0.1; π_d 是操作符的得分, 每个操作符的得分表示该操作符在每次迭代时的执行情况, 初始时, $\pi_d=1$, 得分分类情况如下:

$$\pi_d = \pi_d + \begin{cases} 30 & \text{若使用操作符 } d \text{ 得到的邻域解} \\ & \text{优于历次迭代的最好解} \\ 10 & \text{若使用操作符 } d \text{ 得到的邻域解} \\ & \text{仅比当前解好} \\ 6 & \text{若使用操作符 } d \text{ 得到的邻域解} \\ & \text{比当前解差, 但是被接受了} \end{cases}$$

本文根据模拟退火算法定义解的接受规则, 利用上述公式更新操作符的得分, 再根据更新后的操作符得分更新选择概率, 并对更新后的选择概率进行归一化, 作为下一次迭代各个操作符的选择概率。

2.4 算法步骤与流程图

ALNS 算法的基本步骤如算法 2 所示。

算法 2: ALNS 的基本步骤

1: Input: 初始温度 T_0 , 冷却系数 β , 终止温度 T_{end} ; 删除操作符 D_1 , 插入操作符 D_2 , 最大迭代次数 GENMAX;

2: Initialization: 生成初始解 z_0 , 和对应的目标函数值 w_0 ;

3: 初始化每种删除操作符 $d \in D_1$ 的选择概率 p_d^i , 每一种插入操作符 $r \in D_2$ 的选择概率 p_r^i ;

4: $T \leftarrow T_0$, $gen \leftarrow 1$, $z_c \leftarrow z_b \leftarrow z_0$, $w_c \leftarrow w_b \leftarrow w_0$;

5: while $T > T_{end}$ do

6: while $gen \leq MAXGEN$ do;

7: 以概率 p_d^i 选择一种删除操作符 $d' \in D_1$, 对 z_c 执行删除操作, 得到破坏的解 z_d ;

8: 以概率 p_r^i 选择一种插入操作符 $r' \in D_2$, 对 z_d 执行插入操作, 得到修复的解 z_t 和目标 w_t ;

9: if $w_t \leq w_c$ then

10: $z_c \leftarrow z_t$, $w_c \leftarrow w_t$;

11: else

12: $\theta \leftarrow e^{-(w_t - w_c)/T}$;

13: if $rand < \theta$ then

14: $z_c \leftarrow z_t$, $w_c \leftarrow w_t$;

15: if $w_c \leq w_t$ then

16: $z_b \leftarrow z_c$, $w_b \leftarrow w_c$;

17: $T \leftarrow \beta T$;

18: 更新操作符的选择概率;

19: $gen \leftarrow gen + 1$;

20: end while

21: end while

22: Output: 最优解 z_b 和最优值 w_b 。

使用算法 1 的初始化方法生成初始解 z_0 , 和对应的目标函数值 w_0 。初始化每个删除操作符和插入操作符被选择的概率。 z_b 是搜索过程中找到的最优解, z_c 是迭代开始时得到的当前解, 温度用 T 表示, 迭代计数器用 gen 表示。对当前解 z_c 执行删除操作和插入操作得到邻域解 z_t , 邻域解可以丢弃或成为当前解。如果修复后得到的邻域解 z_t 的目标函数值 w_t 小于当前解 w_0 , 那么当前解 z_c 被邻域解 z_t 替换; 否则, 以概率 θ 接受邻域解, 其中接受概率 $\theta = e^{-(w_t - w_c)/T}$; 在 $[0, 1]$ 中生成一个随机数 $rand$, 如果 $rand < \theta$, 则当前解 z_c 被邻域解 z_t 替换。如果当前解 z_c 的目标函数值小于 w_b , 则以当前解 z_c 替换

最优解 z_b 。算法中的当前温度逐渐降低为 βT 。迭代过程中, 通过自适应调整, 更新每个操作符的选择概率。算法流程图如图 3 所示。

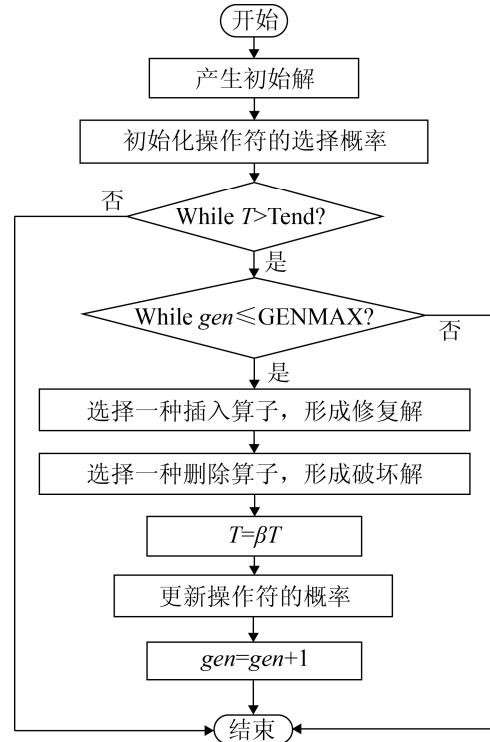


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of proposed algorithm

3 模拟计算与结果分析

使用 Prodron^[20]的 LRP 数据集生成算例, 由于每组数据中只有一个物流中心 $[0, 0]$, 且所有需求点均位于 $[0, 50] \times [0, 50]$ 的正方形区域内。为了模拟多物流中心的实际场景, 同时考虑到实际物流中心通常位于城区周围的交通枢纽处, 本文选取包含所有客户点的最小凸包作为城区, 凸包边界线作为城区边界, 在城区边界上随机选择一个位置作为新增的物流中心 RC 的位置。假设 2 个物流中心提供的产品类型不同; 将各客户的需求量随机分成两部分, 作为客户对 2 种产品的需求量; 第二层级各种车型的最大装载量、运输费率 and 固定调度成本如表 2 所示。第一层级的车辆的最大装载量为 1 000 kg, 固定动用成本为 1 000 元, 运输费率为 6 元。

表 2 第二层级车辆信息
Tab. 2 Information of second-echelon vehicle

数据类型	车辆类型	最大装载量/kg	固定成本(元)	运输费率(元)
x-x-x	1	50	150	17
	2	70	200	15
	3	90	240	13
x-x-x b	1	130	360	17
	2	150	400	15
	3	170	440	13

设定模拟退火算法的初始温度 $T_0=100$, 冷却

系数为 0.5, 终止温度为 0.5; ALNS 算法的迭代次数为 1 000; 每次迭代删除客户点个数的上下限百分比为: $b_L=0.2$, $b_U=0.6$ 。

对每个实例, 利用自适应大邻域搜索启发式算法运行 20 次, 取 20 次运算的平均目标函数值和平均运行时间, 与直接利用 Gurobi 求解混合整数规划模型运行 2 h 得到的解进行对比, 分析运行时间和总成本的差异, 验证自适应大邻域搜索启发式算法解的有效性。各种规模算例的模拟计算结果见表 3。

表 3 各种规模算例的模拟计算结果
Tab. 3 Numerical experiments of benchmark

算例参数	新增 RC 的位置	Gurobi				ALNS(20 次运算)		
		总成本		运行时间/s	Gap/%	平均成本	平均时间	Gap/%
		LB	UB					
20-5-1	[50,20]	28 625.22	29 098.78	7 200.00	1.63	29 098.78	19.81	0.00
20-5-1b	[21,47]	22 270.28	22 270.28	91.04	0.00	22 270.28	12.80	0.00
20-5-2	[50,50]	29 821.39	29 821.39	5 182.47	0.00	29 821.39	21.34	0.00
20-5-2b	[40,43]	20 490.31	20 490.31	456.63	0.00	20 493.87	12.41	0.02
Avg				3 232.53			16.59	0.00
50-5-1	[47,1]	24 771.45	33 184.19	7 200.00	25.40	27 037.19	38.58	8.38
50-5-1b	[0,42]	23 381.20	27 158.46	7 200.00	13.90	23 938.59	37.39	2.33
50-5-2	[36,48]	37 824.29	41 947.74	7 200.00	9.83	38 995.21	42.40	3.00
50-5-2b	[1,28]	37 677.35	40 247.79	7 200.00	6.39	38 801.63	39.51	2.90
50-5-2BIS	[38,49]	25 022.12	33 248.05	7 200.00	24.70	25 413.18	48.36	1.54
50-5-2bBIS	[48,2]	25 035.29	28 760.47	7 200.00	13.00	25 909.71	43.55	3.37
50-5-3	[17,50]	20 178.20	27 078.74	7 200.00	25.50	20 439.47	40.27	1.28
50-5-3b	[48,5]	20 080.47	23 986.32	7 200.00	16.30	20 696.69	38.43	2.98
Avg				7 200.00			41.06	3.22
100-5-1	[7,42]	NA	NA	7 200.00	NA	158 939.68	97.71	NA
100-5-1b	[18,0]	NA	NA	7 200.00	NA	153 007.93	82.40	NA
100-5-2	[40,12]	NA	NA	7 200.00	NA	119 991.59	42.97	NA
100-5-2b	[10,41]	NA	NA	7 200.00	NA	116 389.07	43.57	NA
100-5-3	[21,49]	NA	NA	7 200.00	NA	109 791.93	77.41	NA
100-5-3b	[38,2]	NA	NA	7 200.00	NA	105 417.11	99.11	NA
100-10-1	[45,0]	NA	NA	7 200.00	NA	186 864.35	132.17	NA
100-10-1b	[0,23]	NA	NA	7 200.00	NA	177 697.87	121.70	NA
100-10-2	[50,50]	NA	NA	7 200.00	NA	161 915.10	188.73	NA
100-10-2b	[48,17]	NA	NA	7 200.00	NA	161 129.13	141.43	NA
100-10-3	[32,45]	NA	NA	7 200.00	NA	161 247.70	168.71	NA
100-10-3b	[40,47]	NA	NA	7 200.00	NA	160 059.03	124.68	NA
200-10-1	[32,50]	NA	NA	7 200.00	NA	298 074.21	303.61	NA
200-10-1b	[0,27]	NA	NA	7 200.00	NA	287 455.86	250.79	NA
200-10-2	[50,17]	NA	NA	7 200.00	NA	339 756.59	444.36	NA
200-10-2b	[12,45]	NA	NA	7 200.00	NA	318 401.58	346.24	NA
200-10-3	[37,3]	NA	NA	7 200.00	NA	288 675.45	596.10	NA
200-10-3b	[42,3]	NA	NA	7 200.00	NA	280 956.80	397.21	NA
Avg				7 200.00			203.27	

表 3 算例参数所列为客户数量-备选共同配送中心数量-编号; 20-为小规模算例, 50-为中规模算例, 100-和 200-为大规模算例; 第二列为随机增加的 RC 的坐标; “LB”列为 Gurobi 在终止时找到的最优目标值的下界; “UB”列为 Gurobi 在 2 h 内找到的最佳可行目标值; 第 5 列为 Gurobi 使用的运行时间(s); 第 6 列“Gap(%)”为上下界差距, 为 $(UB - LB) / UB$ [8]; 第 7, 8 列为 ALNS 运行 20 次的平均成本和时间; 最后一列为 ALNS 算法求解结果和 Gurobi 求解得到的目标函数值下界之间的差距, 其中 $gap = \frac{ALNS_{Ave} - LB_{best}}{ALNS_{Ave}}$ [8]。

从表 3 可以看出, 对 20 个客户点的小规模算例中, 利用 ALNS 算法在短时间内得到了 3 个算例精确最优解, 1 个算例得到了局部最优解, 局部最优解与精确解几乎相同。平均来看, ALNS 的运算时间比 Gurobi 的运算时间少了 3 000 多秒, 得到的近似最优解与精确最优解的 gap 不超过 0.02%; 平均的 gap 值近似等于 0.00%。这说明对小规模问题, 本文的 ALNS 算法能在短时间内以较高的概率得到精确最优解。

对于 50 个客户点的中规模算例, Gurobi 无法在 2 h 内找到全局最优解, 只能得到局部最优解, ALNS 却能在短时间内找到比 Gurobi 得到的局部最优解更好的近似解。平均来看, ALNS 算法的运算时间大幅度减少。ALNS 运行 41.06 s 得到的近似解明显优于 Gurobi 运行 2 h 得到的解, ALNS 算法得到的近似解与 Gurobi 得到的最优下界值之间的差距只有 3.22%, 因此 ALNS 算法的近似比不超过 1.032 2。

对于 100-和 200-客户点的大规模算例, 因问题规模太大, Gurobi 已经无法求解。但是 ALNS 算法均可以在 10 min 内得到近似最优解, 平均运行时间为 203.27 s。

图 4 和图 5 分别描述了用 ALNS 算法求解小规模算例 20-5-1b 的迭代过程收敛图, 以及对应的共同配送中心选址-路径结果图。

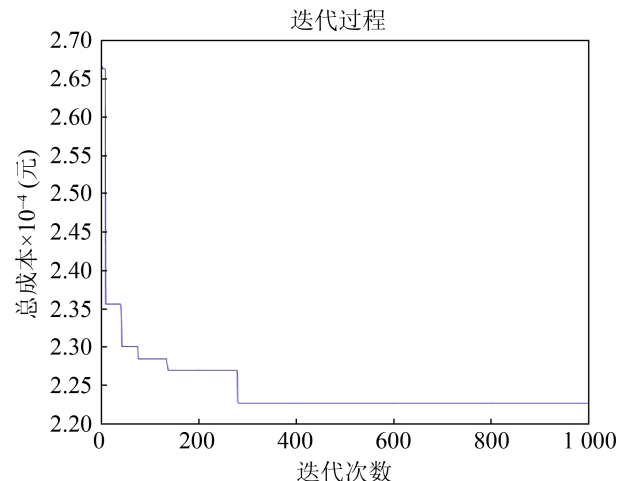


图 4 ALNS 算法求解算例 20-5-1b 的迭代图
Fig. 4 Iterative graph of applying ALNS algorithm for instance of 20-5-1b

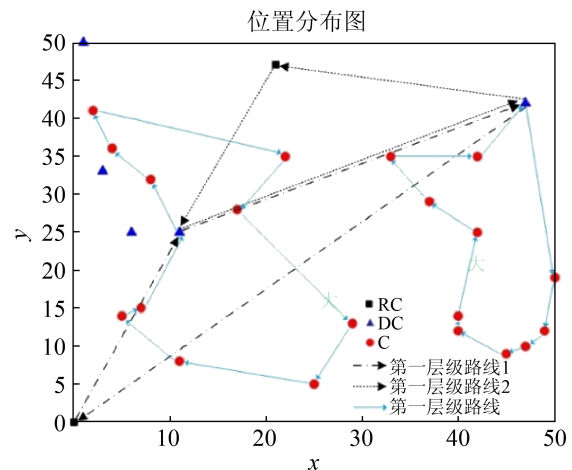


图 5 ALNS 算法求解算例 20-5-1b 的结果
Fig. 5 Result of applying ALNS algorithm for instance of 20-5-1b

综上所述, 本文的自适应大邻域搜索算法在求解多中心多车型的两层级共同配送选址-路径问题时, 表现出了很好的性能。通过算例测试及对比分析验证了 ALNS 算法在计算时间和寻优能力方面的优势, 该算法可以用于解决企业的实际问题。

4 结论

本文结合城市物流共同配送网络的特点, 建立了基于多中心多车型的两层级选址-路径问题的数学模型, 设计了求解模型的自适应大邻域搜索算法, 算法采用多种删除操作符和插入操作符产生邻

域解，并利用模拟退火算法定义邻域解的接受规则，根据各种操作符产生的邻域解的接受情况更新操作符的得分以及选择概率，有效提高了求解效率，加快了算法收敛速度。最后，利用 Prodhon 的 LRP 数据集进行测试比较，发现利用本文的自适应大邻域搜索启发式算法，不仅能求出小规模问题的精确最优解，而且可以快速求出中大规模问题的近似最优解。本文的模型和算法为解决共同配送的物流网络构建和优化问题提供了决策依据。

本文的创新点在于：研究了基于多车型的两层级共同配送网络的构建和路径优化问题；在基础的两层级选址-路径问题中加入了多中心、多车型的考虑，使问题更加贴近两层级共同配送的实际场景；建立了混合整数规划模型，并设计了快速有效的自适应大邻域搜索算法。

本文在研究两层级共同配送问题时做了一些必要的简化假设，如假设所有客户点对各种产品的需求量是确定的，假设不能越级配送，假设客户的需求不可拆分等。未来可以在以下几个方面对问题进行深入研究：考虑客户对各种产品的需求是随机的情况；考虑可越级配送等情况。

参考文献：

- [1] 任腾, 李姝萱, 周忠宝, 等. 基于满意度 BLP-DEA 的区域可持续发展系统效率评价研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-13 [2020-11-22]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0080>.
Ren Teng, Li Shuxuan, Zhou Zhongbao, et al. Study on Efficiency Evaluation of Regional Sustainable Development System Based on BLP-DEA and Satisfaction Degree[J/OL]. Chinese Journal of Management Science. [2020-11-22]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0080>.
- [2] 任腾, 陈玥, 向迎春, 等. 考虑客户满意度的低碳冷链车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 1108-1117.
Ren Teng, Chen Yue, Xiang Yingchun, et al. Optimization of Low Carbon Cold Chain Vehicle Path Considering Customer Satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(4): 1108-1117.
- [3] 彭春, 李金林, 王珊珊, 等. 多类应急资源配置的鲁棒选址-路径优化[J]. 中国管理科学, 2017, 25(6): 143-150.
Peng Chun, Li Jinlin, Wang Shanshan, et al. Multiple Relief Resources Robust Location-Routing Optimization[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(6): 143-150.
- [4] Li H, Wang H, Chen J, et al. Two-echelon Vehicle Routing Problem with Time Windows and Mobile Satellites[J]. Transportation Research Part B: Methodological (S0191-2615), 2020, 138: 179-201.
- [5] 唐金环, 戴守峰, 姜力文, 等. 顾客有限“碳行为”偏好对选址-路径-库存联合优化的影响[J]. 中国管理科学, 2016, 24(7): 110-119.
Tang Jinhuan, Ji Shoufeng, Jiang Liwen, et al. The Effect of Consumers Bounded “Carbon Behavior” Preference on Location-Routing-Inventory Optimization[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(7): 110-119.
- [6] Wang Y, Assogba K, Liu Y, et al. Two-echelon Location-routing Optimization with Time Windows Based on Customer Clustering[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2018, 104: 244-260.
- [7] Pichka K, Bajgiran A H, Petering M E H, et al. The Two Echelon Open Location Routing Problem: Mathematical Model and Hybrid Heuristic[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2018, 121: 97-112.
- [8] Demir E, Bektas T, Laporte G. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pollution-routing Problem[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2012, 223(2): 346-359.
- [9] 郭鹏辉, 朱建军, 王嵩华. 考虑异质物资合车运输的灾后救援选址-路径-配给优化[J]. 系统工程理论与实践, 2019(9): 2345-2360.
Guo Penghui, Zhu Jianjun, Wang Hehua. Location-routing-allocation Problem with Consolidated Shipping of Heterogeneous Relief Supplies in Post-disaster Rescue[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019(9): 2345-2360.
- [10] Yu Y, Wang S, Wang J, et al. A Branch-and-price Algorithm for the Heterogeneous Fleet Green Vehicle Routing Problem with Time Windows[J]. Transportation Research Part B: Methodological (S0191-2615), 2019, 122: 511-527.
- [11] Koç Ç, Bektas T, Jabali O, et al. The Impact of Depot Location, Fleet Composition and Routing on Emissions in City Logistics[J]. Transportation Research Part B: Methodological (S0191-2615), 2016, 84: 81-102.

- [12] Koç Ç, Bektaş T, Jabali O, et al. The Fleet Size and Mix Location-routing Problem with Time Windows: Formulations and a Heuristic Algorithm[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2016, 248(1): 33-51.
- [13] Zhao Q, Wang W, De Souza R. A Heterogeneous Fleet Two-echelon Capacitated Location-routing Model for Joint Delivery Arising in City Logistics[J]. *International Journal of Production Research* (S1366-588X), 2018, 56(15): 5062-5080.
- [14] 石兆, 符卓. 配送选址-多车型运输路径优化问题及求解算法[J]. *计算机科学*, 2015, 42(5): 245-250.
Shi Zhao, Fu Zhuo. Distribution Location-routing Problem of Heterotypic Vehicles and its Algorithms[J]. *Computer Science*, 2015, 42(5): 245-250.
- [15] Govindan K, Jafarian A, Khodaverdi R, et al. Two-echelon Multiple-vehicle Location-routing Problem with Time Windows for Optimization of Sustainable Supply Chain Network of Perishable Food[J]. *International Journal of Production Economics* (S0925-5273), 2014, 152(6): 9-28.
- [16] Clarke G, Wright J W. Scheduling of Vehicles From a Central Depot to a Number of Delivery Points[J]. *Operations Research* (S0030-364X), 1964, 12(4): 568-581.
- [17] Hemmelmayr V C, Cordeau J F, Crainic T G. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for Two-echelon Vehicle Routing Problems Arising in City Logistics[J]. *Computers & Operations Research* (S0305-0548), 2012, 39(12): 3215-3228.
- [18] Ropke S, Pisinger D. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows[J]. *Transportation Science* (S0041-1655), 2006, 40(4): 455-472.
- [19] Ropke S, Pisinger D. A Unified Heuristic for a Large Class of Vehicle Routing Problems with Backhauls[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2006, 171(3): 750-775.
- [20] Prodhon C. The Location-routing Problem[D]. Troyes: Troyes University of Technology, 2006.