

三维装载约束下汽车零部件同时取送的循环取货路径优化研究*

车路涛¹, 杨中华^{1,2,3}

(1. 武汉科技大学 恒大管理学院, 武汉 430065; 2. 湖北省产业政策与管理研究中心, 武汉 430065;
3. 武汉科技大学 服务科学与工程研究中心, 武汉 430065)

摘要:【目的】考虑汽车零部件入厂物流多频次、小批量的循环取货模式和在取货同时返还零部件物流箱的现实需求,探讨了三维装载约束下汽车零部件同时取送的循环取货路径问题。【方法】构建以运输和线边库存总成本最小为目标的数学模型,设计了两阶段蚁群算法,第一阶段由车辆路径规划子算法得到近似最优解的记忆库,第二阶段利用装载可行性检验子算法得到可行解。【结果】实例仿真结果表明:使用简单算术相加的模糊车辆装载约束得出的取货方案无法实现车辆成功装载。考虑三维装载约束的循环取货方案的路线由2条增加为3条,虽然车辆的平均空间装载率下降了27.45%,但是确保了装载方案的可行性。【结论】考虑三维装载约束的汽车零部件同时取送的循环取货路径方案既满足了取货同时返还零部件物流箱的现实需求,又保证了方案中车辆三维装载可行性。

关键词:循环取货;路径优化;三维装载约束;同时取送;两阶段蚁群算法

中图分类号:O221;F505

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)01-0061-12

汽车零部件入厂物流作为汽车物流的第一阶段,它的自身性质直接影响着最终产成品的质量和成本。基于循环取货(Milk-run)的入厂物流不仅能通过提高运输车辆装载率和降低返回空载率来减少零部件供应中的运输成本,还能提高整个汽车供应链的运作效率^[1-2]。车辆路径问题(Vehicle routing problem, VRP)和车辆装载问题(Vehicle filling problem, VFP)是汽车零部件循环取货中面临的核心问题,最初它们被看做独立的两个问题加以研究。之后,学者们将这两个NP问题组合起来,开始研究三维装载约束下的车辆路径问题(Three-dimensional loading capacitated vehicle routing problem, 3L-CVRP)^[3]。

运输和装载是汽车入厂物流作为配送活动的主要操作环节,如何设计出高效率的装箱方案及合理的配送路线,对于缩短装车时间、降低车辆空载率、节约车辆资源、降低运输成本等具有重要的现实意义。VRP一直是物流成本控制研究的热点。多数学者在成本、客户满意度等约束下研究了多目标车辆路径优化问题,但是基于现实需要很少考虑“需求拆分”^[4]。Ohlmann等人^[5]在“需求拆分”的情形下研究了精益生产系统中的一般频次路径(Common frequency routing, CFR)问题,设计了两阶段算法对循环取货系统中的相关路径优化及调度问题进行了分析。Karlin^[6]以每条路径的库存成本与运输成本最小化为目标,构建零部件入厂物流数学模型,涉及运输库存总体优化。夏明伟^[7]设计每个供应商可以被多条路径服务,在考虑时间窗的约束下,建立车辆使用成本、主路径计划与日路径计划的变动管理成本最小为目标的数学模型,但是该方案未考虑线边库存成本以及装载可行性问题。Wu等人^[8]重新定义入厂物流业务范围,围绕目前入厂物流存在的主要问题,构建工位编组驱动的取货新模式。在VRP研究中,学者们发现装载可行性也是决定取货方案可行性的重要一环。伊俊敏等人^[9]从需求拆分、托盘装箱、分类堆码等方面考虑车辆的装载可行性,探讨大量弱异性货物取货路径问题。崔会芬等人^[10]在VRP研究中考虑了装载顺序、车辆重心和尺寸等因素对三维装箱可行性的影响,并设计遗传算法求解多目标组合优化模型实现装箱与车辆路径的组合优化。由于车辆和货物自身等性质,三维装载还需注意车辆重心、底面积支撑、不可重叠等问题^[11-13]。王长琼等人^[14]综合考虑VRP与三维装载问题,建立了三维装载约束下以运输成本最小为目标的路径优化模型,但没有涉及“同时取送”问题。基于汽车入厂物流的现实需要,在零部件循环

* 收稿日期:2022-04-01 修回日期:2022-08-19 网络出版时间:2023-02-22 17:20

资助项目:教育部人文社科规划基金(No. 21YJAZH050);武汉科技大学2021年度研究生创新创业基金(No. JCX2021038)wust.edu.cn

第一作者简介:车路涛,男,研究方向为物流工程与管理,E-mail:799190553@qq.com;通信作者:杨中华,男,副教授,博士,E-mail:yzh100@wust.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20230222.1415.028.html

取货的同时,也需要考虑将空物流箱返回供应商的问题。郭放等人^[15]在考虑前置仓选址的条件下探讨了面向城市小件物流配送的同时取送货 VRP,实现了物流配送和退货取回的同步,但是他们的方案却并没有考虑“三维装载”这一现实需要。为数不多的研究将同时取送和三维装载约束纳入车辆路径优化问题之中。彭碧涛等人^[16]探讨同时取送的三维装载问题,并用禁忌搜索算法进行求解。杜博文等人^[17]提出了考虑三维装载约束的一对一取送路径优化方法,却在研究中忽视了运输库存总成本最优的需要。

基于上述研究背景可以发现,目前关于汽车零部件入厂物流的研究主要集中于取货模式、车辆路径优化等方面,而少数考虑三维装载约束的研究则往往忽视了取货过程中同时返还物流箱的现实需要,考虑同时取送的三维装载约束下汽车零部件循环取货路径问题(The simultaneous delivery and pickup vehicle routing problem with three-dimension loading constraints, 3L-VRPSDP)的研究尚不多见。因此,本研究对循环取货模式中三维装载约束下取货同时返还零部件物流箱的汽车零部件入厂物流车辆路径优化问题进行了探讨,建立了以运输与线边库存总成本最小为目标函数的数学模型,并设计了两阶段蚁群算法求解这一问题。

1 3L-VRPSDP 模型构建

1.1 问题描述

基于循环取货模式三维装载约束下同时返还零部件物流箱的汽车零部件入厂物流车辆路径优化问题的具体描述如下:

假设循环取货网络 $G=(V,A)$, 其中 $V=\{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为网络中所有节点的集合, 弧集 $A=\{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ 中 (i, j) 表示节点 i 和点 j 之间的线路, 并且每条线路一个行驶距离为 d_{ij} ($d_{ij} \geq 0$), 其中, 节点 v_0 表示主机厂, 其他节点 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示零部件供应商。 $U=\{1, 2, \dots, u\}$ 为车辆集合, 在主机厂有 u 辆相同规格的箱式货车可供使用, 每辆取货车车厢的长、宽、高分别为 L, W, H , 车辆的最大载质量为 D , 最大容积为 $C=L \times W \times H$, 最大行驶里程为 R 。

循环取货过程中每次取货时,先返回物流箱空箱,然后再装载装有零部件的物流重箱。假设第 u 辆车服务供应商 i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$), $K=\{1, 2, \dots, k\}$ 为零部件种类集合, k 种零部件物流箱的装载数量为 $\{m_{iu1}, m_{iu2}, \dots, m_{iuk}: k \in K\}$, 共有 m_{iu} 个物流箱需要返还, k 种零部件物流箱的三维为 $\{(d_{li1}, d_{wi1}, d_{hi1}), (d_{li2}, d_{wi2}, d_{hi2}), \dots, (d_{lik}, d_{wik}, d_{hik}): k \in K\}$, 质量为 q_i , 体积为 s_i ; 同时共有 m'_{iu} 个零部件重箱需要装载, k 种零部件重箱的装载数量为 $\{m'_{iu1}, m'_{iu2}, \dots, m'_{iuk}: k \in K\}$, k 种零部件的三维分别为 $\{(p_{li1}, p_{wi1}, p_{hi1}), (p_{li2}, p_{wi2}, p_{hi2}), \dots, (p_{lik}, p_{wik}, p_{hik}): k \in K\}$, 质量为 q'_i , 体积为 s'_i 。

基于循环取货模式中 CFR 问题,根据路径频次平均拆分取货量,在满足车辆路径约束和三维装载约束下,保证取货路线被成功装载,引入线边最大库存限制,在装配线上零部件为线性消耗背景下,将汽车零部件入厂物流系统与生产系统进行了系统性优化和整合,实现多频次小批量取货,使得汽车入厂物流运输和线边库存总成本最小。同时取送的三维装载约束下汽车零部件循环取货流程如图 1 所示。

1.2 3L-VRPSDP 模型假设

本研究对构建的 3L-VRPSDP 模型做如下假设:

- 1) 只有 1 个主机厂且位置确定,在每条路径上车辆都从主机厂 v_0 出发,最后回到 v_0 。
- 2) 任一供应商只由 1 条路线经过,每条路线上的供应商取货频次一致,且只由 1 辆车进行服务并遍历 1 条路线上的所有供应商。
- 3) 在遍历每个供应商时,先将零件物流箱卸载返还给供应商,然后再装载从该供应商取货的零部件重箱。
- 4) 每辆车在配送周期内可多次循环取货,但取货车必须在最大循环周期内完成单个循环的取货活动。
- 5) 在每条路线上的任何时刻,每辆车上所要装载的货物总质量不能超过自身最大载质量 D ,总体积不能超过自身最大容积 C 。
- 6) 在任何时刻所有供应商处的取货量都不能超出主机厂的最大线边库存。
- 7) 每辆车的车厢及每个供应商处的零部件重箱均为长方体,每个要返还的物流箱折叠后为相应零部件重箱

高的 $\frac{1}{4}$ ^[18], 即 $d_{hik} = \frac{p_{hik}}{4}$, λ 为物流箱材料的密度, 折叠后物流箱的质量为 $q_{ik} = \lambda \times d_{lik} \times d_{wik} \times d_{hik}$ 。

8) 在任何时刻,货物都必须在车厢内,不得超出车厢的边界。

9) 货物的棱只能平行或垂直车厢的边放置,货物只能在水平面上做 90°旋转,货物不得倒置。

10) 从主机厂处出发前零部件物流箱的装载采用后入先出(Last in first out)的货物装载原则,即:如果第 r 条取货路线为 $(v_0, v_1, v_2, \dots, v_i, v_j, \dots, v_k, v_0)$,且先取供应商 v_i 的重箱然后取供应商 v_j 的重箱,则供应商 v_j 要返还的物流箱应该先于 v_i 要返还的物流箱装入车厢。

11) 循环取货过程中,不能重排车厢中的货物。任意供应商 v_i 在返还物流箱和装载所要取货的货物时,不能移动车厢内已经装载的其他货物。

12) 底面支撑面积(即货物底面与车厢或其他货物的接触大小)约束。假设货物底部接触面积为 $S_{底接}$,则它需要被支撑的面积为 $S_{底支}$,且 $S_{底支} \geq e \times S_{底接}$,其中 $0 < e \leq 1$ 。

13) 所有取货车辆均为飞翼箱式货车,可以从货车两侧进行装载,货车在取货过程中始终匀速行驶,取货方案中的每条路线都在车辆的最大行驶里程限制之内。

1.3 参数与变量说明

1.3.1 参数说明 a, b 分别为单位运输成本、单位库存成本, t_i 为供应商 v_i 的装卸时间, t_{ij} 为节点 i 到 j 的运输时间, T 为每辆车前次取货的最大时间限制, S 为主机厂线边最大库存; M_i 为供应商 v_i 全天需要接收的返还零部件物流箱的总数量, M'_i 为供应商 v_i 处全天需要取的零部件重箱的总数量, f_u 为车辆 $u (u \in U)$ 的取货频数; $(x_{ik}^u, y_{ik}^u, z_{ik}^u)$ 、 $(\bar{x}_{ik}^u, \bar{y}_{ik}^u, \bar{z}_{ik}^u)$ 分别是车辆 u 中第 i 个供应商处第 k 种零部件在车厢中正面右上角和侧面左下的角坐标。

1.3.2 决策变量说明 本研究中有关决策变量说明如下:

$$x_{iju} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } u \text{ 从节点 } i \text{ 到节点 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, z_{iu} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } u \text{ 服务供应商 } i \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$z_{iuk} = \begin{cases} 1, & \text{供应商 } i \text{ 的第 } k \text{ 种零配件物流空箱由车辆 } u \text{ 装载} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$z'_{iuk} = \begin{cases} 1, & \text{供应商 } i \text{ 的第 } k \text{ 种零配件物流重箱由车辆 } u \text{ 装载} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

1.3.3 坐标系设定 以车厢最左、最后、最下为原点 $O_1(0,0,0)$ 且以车厢最右、最后、最下为原点 $O_2(0,0,0)$, 分别构建两个坐标系 $Coos_1$ 和 $Coos_2$, 它们都以车厢的宽为 X 轴, 车厢的长为 Y 轴, 车厢的高为 Z 轴(图 2)。

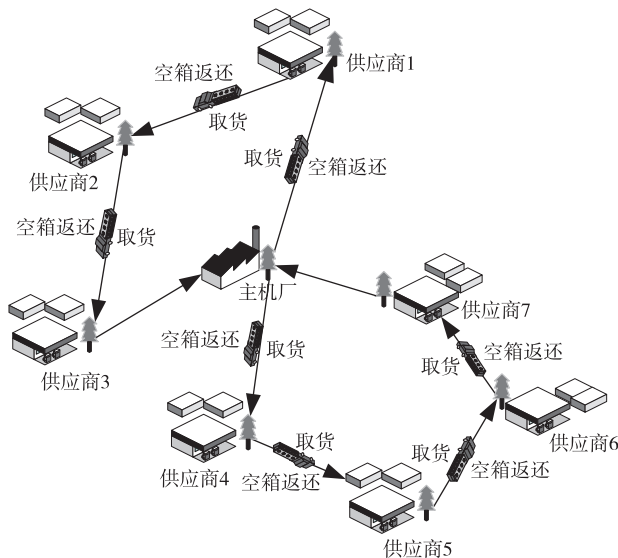


图 1 同时取送循环取货模式

Fig. 1 Simultaneous delivery and pickup vehicle routing problem

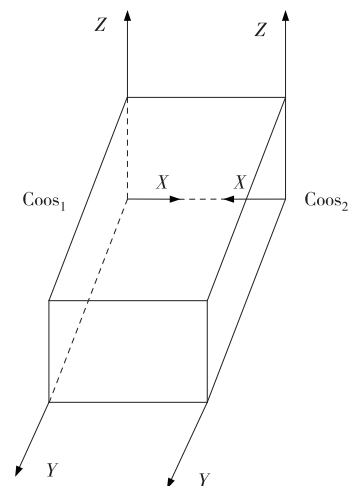


图 2 车辆装载空间坐标系

Fig. 2 Spatial coordinate system of vehicle loading

1.3.4 装载空间 返还物流箱的装载空间和取零部件的装载空间分别对应坐标系 $Coos_1$ 和 $Coos_2$ 。物流空箱装载空间描述为 (x, y, z, l_x, l_y, l_z) , 其中: (x, y, z) 表示该空间最左、最后、最下的点在坐标系 $Coos_1$ 中的坐标,

(l_x, l_y, l_z) 分别表示该空间的宽、长、高。类似地,取零部件的物流重箱装载空间也用 (x, y, z, l_x, l_y, l_z) 描述,其中: (x, y, z) 表示该空间最右、最后、最下的点在坐标系 Coos_2 中的坐标, (l_x, l_y, l_z) 分别表示该空间的宽、长、高。整个车厢分割为两个装载空间,若待返还物流空箱装载空间为 $(0, 0, 0, \eta W, L, H)$, 则取货零部件物流重箱的装载空间为 $(0, 0, 0, (1-\eta)W, L, H)$, 其中 $0 < \eta < 1$ 。

1.3.5 可行装载点 装载空间对应的 (x, y, z) 表示可行装载点,初始时两个装载空间都只有 1 个可行装载点 $(0, 0, 0)$, 当一物流箱 (w, l, h) 进入返还物流箱装载空间后,在坐标系 Coos_1 的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向上产生 3 个新的可行装载点 $(w, 0, 0)$ 、 $(0, l, 0)$ 和 $(0, 0, h)$, 从每个点分别向 X 轴、 Y 轴和 Z 轴延伸形成最大未装载三维空间 $(w, 0, 0, \eta W - w, L, H)$ 、 $(0, l, 0, W, \eta L - l, H)$ 和 $(0, 0, h, W, L, \eta H - h)$ (根据文献[16], 设可装载点为 (x, y, z) , 可装载点在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向的长度分别为 l_x 、 l_y 和 l_z , 基于该可装载点的可装载空间就描述为六元组 (x, y, z, l_x, l_y, l_z))。在取零部件物流重箱的装载空间装入一个货物后同样产生 3 个新的可行装载点和 3 个装载空间。

1.3.6 装载空间装换 由于两个坐标系共同使用 X 轴,因此在循环取货过程中,当送出需要被返还的物流空箱后,该物流空箱的装载点 (x, y, z) 取消转化为 $(x, y-l, z-h)$; 若 $(x, y-l=0, z-h=0)$, 则把它转换成零部件物流重箱的件取货装载空间。此时通过明确零部件物流重箱取货装载空间的所有可行装载点,更新相应的可行装载空间。

1.4 模型建立

1.4.1 目标函数 本研究将汽车零部件入厂物流系统与生产系统进行了系统性优化和整合,实现多频次小批量取货,使得汽车入厂物流运输和线边库存总成本最小。模型目标函数为:

$$\min F = \sum_{u \in U} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{iju} d_{ij} f_u \alpha + \sum_{i \in V} \sum_{u \in U} b(s'_i z'_{iu} + s_i z_{iu}).$$

其中: $\sum_{u \in U} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{iju} d_{ij} f_u \alpha$ 表示在配送周期内所有车辆多次取货后的总运输成本; $\sum_{i \in V} \sum_{u \in U} \beta(s'_i z'_{iu} + s_i z_{iu})$ 表示在配送周期内所有物流空箱和重箱的库存成本, 当中 $s'_i z'_{iu}$ 为所有物流重箱体积, $s_i z_{iu}$ 为所有物流空箱体积。

1.4.2 约束条件 三维装载约束下的 VRP, 需要同时满足车辆路径约束和三维装载约束。

1) 车辆路径约束。取货方案中每一条路径上的车辆都要满足以下约束:

$$\sum_{i \in V} x_{0iu} = \sum_{i \in V} x_{i0u} = 1, \forall u \in U, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{iju} = z_{ju}, \forall j \in V, j \neq 0, \forall u \in U, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{jiu} = z_{iu}, \forall i \in V, i \neq 0, \forall u \in U, \quad (3)$$

$$\sum_{u \in U} z_{iu} = 1, \forall i \in V, i \neq 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{iju} \leq |B| - 1, \forall B \in V, v_0 \in B, |B| \geq 2, \forall u \in U, \quad (5)$$

$$\begin{cases} q_i = \sum_{k \in K} q_{ik} m_{iuk} z_{iuk}, \sum_{i \in V, i \neq 0} z_{iu} q_i \leq D \\ s_i = \sum_{k \in K} d_{lik} d_{wik} d_{hik} m_{iuk} z_{iuk}, \sum_{i \in V, i \neq 0} z_{iu} s_i \leq C \end{cases}, \forall u \in U, \quad (6)$$

$$\begin{cases} q'_i = \sum_{k \in K} q'_{ik} m'_{iuk} z'_{iuk}, \sum_{i \in V, i \neq 0} z_{iu} q'_i \leq D \\ s'_i = \sum_{k \in K} p_{lik} p_{wik} p_{hik} m'_{iuk} z'_{iuk}, \sum_{i \in V, i \neq 0} z_{iu} s'_i \leq C \end{cases}, \forall u \in U, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} z_{iu} t_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} x_{iju} \leq T, \forall u \in U, \quad (8)$$

$$m_{iu} = \sum_{k \in K} m_{iuk} z_{iuk}, M_i = f_u m_{iu}, \forall i \in V, i \neq 0, \forall u \in U, \quad (9)$$

$$m'_{iu} = \sum_{k \in K} m'_{iuk} z_{iuk}, M'_i = f_u m'_{iu}, \forall i \in V, i \neq 0, \forall u \in U, \quad (10)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{iju} d_{ij} \leq R, \forall u \in U, \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{u \in U} s'_i z'_{iu} + s_i z_{iu} (f_u - 1) \leq S, \forall i \in V, i \neq 0, \forall u \in U. \quad (12)$$

其中:(1)式表示取货车辆从主机厂出发,取货结束后最终回到主机厂;(2)、(3)、(4)式表示每个供应商有且仅有 1 辆车服务的路径经过;(5)式表示消除子回路,路径上的两个供应商只有 1 条路径经过且没有子回路,(5)式中 B 是主机厂和供应商点构成集合 V 的子集合, $|B| \geq 2$ 表示集合 B 中主机厂和供应商点的个数为 2 个及以上;(6)、(7)式计算所有物流重箱和空箱的体积,用以确保取货方案不超过车辆容积和载质量的限制;(8)式确保单次取货时间不超过最大取货期限限制,从而保障生产需求;(9)式确保每个供应商在主机厂里的零部件物流空箱全部都被成功返还;(10)式确保每个供应商处的零部件重箱全部被装载完;(11)式表示车辆最大行驶里程限制;(12)式表示取货方案不能超过线边最大库存,实现多批次、小批量取货。

2) 三维装载约束。取货方案中每一条路径上车厢内零部件重箱的堆叠都要满足以下约束,返还的物流空箱的堆叠约束与之一样。

$$\underline{x}_{ik}^u - \bar{x}_{ik}^u = p_{wik}, \underline{y}_{ik}^u - \bar{y}_{ik}^u = p_{lik}, \underline{z}_{ik}^u - \bar{z}_{ik}^u = p_{hik}, \quad (13)$$

$$0 \leq \underline{x}_{ik}^u, \bar{x}_{ik}^u \leq W, 0 \leq \underline{y}_{ik}^u, \bar{y}_{ik}^u \leq L, 0 \leq \underline{z}_{ik}^u, \bar{z}_{ik}^u \leq H, \forall i \in V, \forall u \in U, \quad (14)$$

$$[(\underline{x}_{ik}^u - \bar{x}_{ik}^u) - p_{wik}][(\underline{y}_{ik}^u - \bar{y}_{ik}^u) - p_{lik}] = 0, \forall i \in \left\{ \frac{i}{z_{iu}} = 1 \right\}, \quad (15)$$

$$\underline{z}_{ik}^u - \bar{z}_{ik}^u = p_{hik}, \forall i \in \left\{ \frac{i}{z_{iu}} = 1 \right\}. \quad (16)$$

其中:(13)式表示零部件重箱正面右上角 $(\bar{x}_{ik}^u, \bar{y}_{ik}^u, \bar{z}_{ik}^u)$ 和侧面左下角 $(\underline{x}_{ik}^u, \underline{y}_{ik}^u, \underline{z}_{ik}^u)$ 的关系;(14)式所有零部件重箱必须在车厢内;(15)式表示零部件重箱的棱与车厢的边正交或平行;(16)式表示零部件重箱可以水平面旋转 90° ,但不得倒置。

2 两阶段蚁群算法设计

目前用于求解 NP 问题的研究主要使用元启发式算法^[19],如遗传算法、蚁群算法、拟退火算法、粒子群搜索算法等。本文采用蚁群算法^[20]分别设计了车辆路径规划子算法和装载可行性检验子算法,构建求解 3L-CVRP 的两阶段蚁群算法。该算法的基本思路为:第一阶段,通过车辆路径规划子算法得出 VRP 的取货路径方案,近似最优解保存在记忆库中,把记忆库中的个体按适应度值从大到小排列。第二阶段,选择第一个最优解作为当前车辆路线方案,然后调用装载可行性检验子算法,如果找到可行装箱方案,则返回最优解;否则,选择记忆库中的下一个解作为车辆路线方案。如果记忆库中所有车辆路线方案均找不到可行解,则返回蚁群算法重新求解 VRP,重复算法直到找到可行解,或达到最大迭代次数。

2.1 车辆路径规划子算法

假设有 m 个蚂蚁和 n 个供应商,每只蚂蚁根据供应商间的距离和路径上信息素的数量为变量的概率函数选择下一个供应商, t 时刻供应商 i 处的蚂蚁数量为 $b_i(t)$, t 时刻蚂蚁 k 由供应商 i 转移到供应商 j 的概率为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in J_k(i)} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in C_{\text{allowed}k}, \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

其中: $C_{\text{allowed}k}$ 是蚂蚁 k 下一步可选择的供应商集合, $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻从供应商 i 到供应商 j 上的信息素强度, $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ 为从供应商 i 到供应商 j 的能见度, α, β 分别为信息因子、期望启发式因子。

蚂蚁每完成 1 轮运动后,各路径的信息素更新规则为:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \\ \Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \end{cases},$$

其中: ρ 为信息素挥发系数,并且 $0 < \rho < 1, 1-\rho$ 为信息素残留系数; $\Delta\tau_{ij}$ 为本次更新中供应商 i 到供应商 j 上的信息素变化量, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为本次更新中蚂蚁 k 从供应商 i 到供应商 j 留下的信息素变化量,具体为:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 从供应商 } i \text{ 到供应商 } j, \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

其中: Q 为信息素强度, 是一个常数; L_k 为蚂蚁 k 在本轮运动中一共走的路径长度。

车辆路径规划子算法流程如下:

步骤 1, 初始化参数。令 $t=0$, 并设置最大迭代次数为 T_{\max} , 设置 α, β, ρ, Q 和 m 的初始值, 令 $\Delta\tau_{ij}(0)=0$ 。

步骤 2, 设置蚂蚁访问客户的禁忌表 T_{tabu} 的索引号为 1, 允许访问的客户列表 T_{allowed} , 其中 $T_{\text{tabu}}=1, T_{\text{allowed}}=n$, 蚂蚁数目 $k=k+1$ 。

步骤 3, 每只蚂蚁根据转移概率 $p_{ij}^k(t)$ 从 T_{allowed} 中选择下一个客户。

步骤 4, 更新 T_{tabu} 索引号, 将该客户添加到 T_{tabu} 中, 并从 T_{allowed} 中删除该客户, 直到蚂蚁遍历所有客户。

步骤 5, 计算并选出本轮运动中的最短路径长度, 与之相应的路径作为本轮运动的最优解, 并更新 $\Delta\tau_{ij}^k$ 。

步骤 6, 若 $t > T_{\max}$, 输出结果; 否则, 清空所有 T_{tabu} 。

2.2 装载可行性检验子算法设计

2.2.1 装载方法 当装载供应商 v_i 需要返还的零部件物流空箱时, 一共有 m_{iu} 个零部件物流空箱需要装载; 当前存在 k 个物流空箱装载空间, 需要得到零部件物流空箱与装载空间的最优组合。

1) 左底优先。首先将供应商的 m_{iu} 个零部件物流空箱按照体积从大到小进行排列, 得到新的物流空箱序列; 然后将 k 个装载空间按照坐标 y 值最小、 x 值最小和 z 值最小进行排列, 得到新的空间序列; 最后调用装载空间序列中的第一个装载空间, 按照物流箱序列顺序分别尝试装载每个物流箱, 一旦装载成功, 得到该装载空间与物流箱的组合; 如果所有物流箱都装载失败, 则调用空间序列的第二个装载空间进行重新遍历物流箱序列尝试装载, 依次类推; 如果所有装载空间都无法成功装载任一物流箱, 表示该供应商需要返还的零部件物流空箱无法装载。

2) 最大接触面积。依次尝试将 m_{iu} 个物流箱与 k 个装载空间进行组合, 如果成功装载, 得到每个物流箱与之相应装载空间的接触面积, 接触面积为物流箱与车厢或其他货物的面积之和, 选出其中接触面积最大的组合。如果存在接触面积相等组合, 那么按照 y 值最小、 x 值最小和 z 值最小的顺序进行选择。

物流空箱可以被装载空间成功装载, 表示该装载空间的大小可以容纳下该物流空箱, 并且满足三维装载约束。上述两种装载方法同时也适用于取货时物流重箱的装载。

2.2.2 装载可行性检验 假设当前车辆 u 配送路线为 $(v_0, v_1, v_2, \dots, v_k, v_0)$, 如果车辆 u 还可以服务供应商 v_i , 即新的配送路线为 $(v_0, v_1, v_2, \dots, v_k, v_i, v_0)$, 则供应商 v_i 的货物需满足具有装载可行性, 即需要满足下列条件:

1) 供应商列表 $(v_i, v_k, \dots, v_2, v_1)$ 要取的货物总质量和总体积不超过车辆的载质量和容积, 且要取的货物可以在取货空间内按照列表先后顺序成功装载。

2) 对任一供应商 $X (X \in (1, 2, \dots, k, i))$, 当返还了该供应商零部件物流空箱后, 该供应商要取的零部件重箱可以在取货空间内被成功装载, 而且此时供应商列表 $(v_i, v_k, \dots, v_{X+1})$ 要返还零部件物流空箱的总质量和总体积加上已经装载的供应商列表 (v_1, v_2, \dots, v_X) 所要取的零部件重箱总质量和总体积分别都不能超过车辆的载质量和容积。

装载可行性检验子算法的流程如下:

步骤 1, 输入取货方案 $\{r_1, r_2, \dots, r_u\}$ 和供应商信息。

步骤 2, 调用取货路线序列 r_1 。

步骤 3, 调用“左底优先”的装载方法。

步骤 4, 调用路线, 按照路线的供应商倒序排列, 使用装载方法装载物流空箱, 然后卸载路线 r_1 第一个供应商的物流空箱。如果该供应商物流空箱所占空间的 y 坐标和 z 坐标均为 0, 则归入重箱装载空间, 调装载方法装载该供应商的重箱; 如果装载失败转到步骤 5; 如果装载成功, 则依次类推遍历下一个供应商; 如果路径中所有供应商全部成功装载执行步骤 6。

步骤 5, 调用“最大接触面积”的装载方法。如果装载失败则终止, 输出“取货方案不合格”。

步骤 6, 重复步骤 3 到步骤 5 依次遍历取货方案 $\{r_2, r_3, \dots, r_u\}$ 。如果所有路线全部被装载成功, 则输出“取货方案合格”, 否则输出“取货方案不合格”。

装载可行性检验子算法的流程图如图 3 所示。

2.3 两阶段算法设计

本研究设计的两阶段算法流程如下：

步骤 1,算法初始化:设定最大循环次数 T_{max} ,令 $t=0$ 。

步骤 2,调用车辆路径优化子算法,更新可行解记忆库。

步骤 3,令记忆库中第一个取货方案为 $i=1$;

步骤 4,调用装载可行性检验子算法,检验方案 i ,输出检验结果。若结果为“取货方案合格”,则输出为当前最优解;若结果为“取货方案不合格”,则令 $t=t+1$ 。

步骤 5,若 $t \leq T_{max}$,则转至步骤 2;若 $t > T_{max}$,终止算法,找不到可行解。

两阶段算法的流程图如图 4 所示。

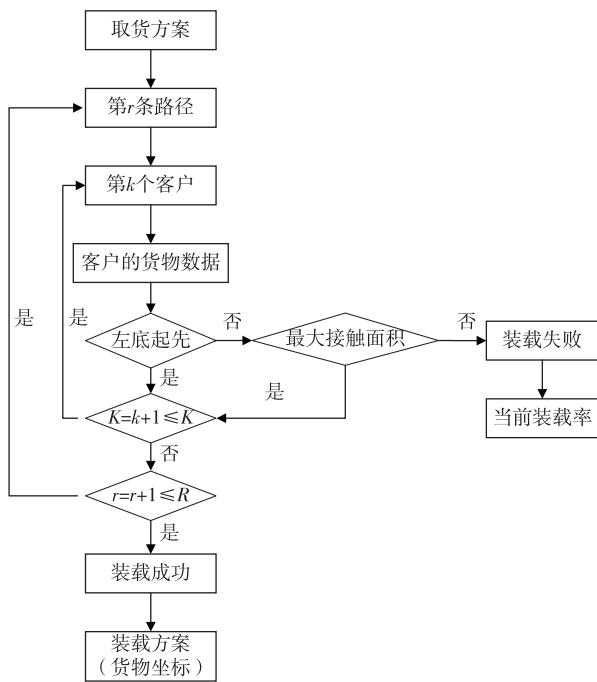


图 3 三维装载可行性检测

Fig. 3 Feasibility test of three-dimensional loading

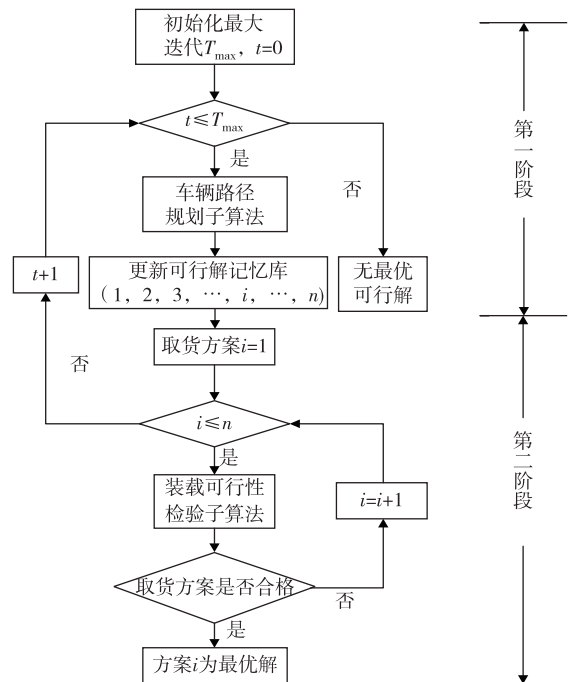


图 4 两阶段 3L-VRPSDP 算法

Fig. 4 Two-stage 3L-VRPSDP algorithm

3 算例检验

3.1 实例数据

某第三方物流公司为某汽车制造企业主机厂提供从 20 家供应商处的零部件取货服务,供应商位置坐标见表 1,零部件物流周转箱规格详情见表 2,主机厂线边库存设置为 80 m^3 ,最大取货周期为 6 h,运输单位成本和库存单位成本分别为 1,现有货车货厢规格为 $7.2 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$,最大载质量限制为 8 t,平均行驶速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,在每处供应商的平均装卸时间为 0.3 h。

3.2 结果分析

利用 Python 进行编程计算,设定各参数即 $m=200, T=100, \alpha=1, \beta=3, \rho=0.4, Q=100$ 。

3.2.1 不考虑三维装载约束的同时取送循环取货车辆路径方案 在不考虑三维装载约束情况下,直接调用车辆路径规划子算法,经仿真计算得出循环取货方案如表 3 所示,目标函数收敛趋势如图 5 所示,取货方案路线如图 6 所示。

由于上述取货方案只考虑了取货零部件的车辆装载体积和容积的约束,没有考虑零部件的三维装载约束,所以车辆在实际装载过程中采用该方案并不一定能装载成功。为此,本研究调用装载可行性检验子算法对上述取货方案进行检验,发现路线 2 可以满足三维装载约束(图 7)而路线 1 无法满足三维装载约束,而且在满足三维装载约束前提下最大装载率仅为 79.98%。

表 1 供应商位置坐标

Tab.1 Supplier location coordinates

供应商序号	X 轴坐标	Y 轴坐标	供应商序号	X 轴坐标	Y 轴坐标	供应商序号	X 轴坐标	Y 轴坐标
0	25	25	7	40	35	14	20	12
1	6	47	8	30	31	15	25	18
2	14	43	9	39	26	16	34	11
3	10	45	10	23	28	17	38	13
4	25	48	11	12	24	18	33	7
5	22	38	12	9	13	19	36	8
6	33	41	13	18	13	20	48	10

注:序号 0 的供应商为主机厂

表 2 各供应商处零部件周装箱规格

Tab.2 Circulation box specifications of components from each supplier

供应商	编号	长/ mm	宽/ mm	高/ mm	需求量/箱	单箱重箱 质量/kg	供应商	编号	长/ mm	宽/ mm	高/ mm	需求量/箱	单箱重箱 质量/kg	
1	1001	730	550	320	10	414	9	9001	1 100	730	420	10	323	
	1002	730	550	320	20	358		9002	1 100	730	420	20	680	
	1003	730	550	320	10	265	10	10001	870	650	320	10	433	
2	2001	730	550	320	10	468		10002	870	650	320	10	522	
	2002	730	550	320	10	322	11	11001	870	650	320	30	880	
	2003	730	550	320	20	298		12	12001	600	400	280	20	708
	2004	730	550	320	10	512	12002		600	400	280	30	800	
3	3001	870	650	320	10	300	13	13001	870	650	320	20	400	
	3002	870	650	320	30	258		13002	870	650	320	10	633	
	3003	870	650	320	20	378		13003	870	650	320	20	645	
	3004	870	650	320	10	355	14	14001	870	650	320	10	576	
4	4001	600	400	280	30	480		14002	1 100	730	420	10	580	
	4002	600	400	280	30	290	15	15001	1 100	730	420	10	588	
	4003	600	400	280	20	435		16001	1 100	730	420	10	900	
5	5001	870	650	320	10	370	16	16002	1 100	730	420	10	810	
	5002	870	650	320	10	578		16003	730	550	320	10	948	
6	6001	730	550	320	20	677	17	17001	730	550	320	10	875	
	6002	730	550	320	10	345		17002	730	550	320	20	364	
7	7001	730	550	320	10	680		17003	730	550	320	10	470	
	7002	730	550	320	20	530		17004	730	550	320	10	400	
	7003	730	550	320	10	780	18	18001	600	400	280	20	255	
	7004	730	550	320	10	530		18002	600	400	280	30	790	
8	8001	730	550	320	20	698	19	19001	1 100	730	420	10	720	
	8002	1 100	730	420	10	713		20	20001	1 100	730	420	10	566
	8003	1 100	730	420	10	658			20002	1 100	730	420	10	478

注:单箱重箱质量为装满零部件的单箱物流重箱的质量,单箱物流空箱的质量由它的密度($1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和折叠后的体积计算

表 3 不考虑三维装载的取货方案

Tab. 3 Pickup scheme without three-dimensional loading constraints

项目	路线	
	路线 1: 0-5-3-1-4-2-6-7-9-8-10-0	路线 2: 0-11-12-13-14-15-16-18-19-17-20-0
取货次数	2	2
空间装载率	95.48%	77.93%
单次取货用时/h	5.62	5.64
行驶路程/km	104.83	105.46
总成本/运输成本/线边库存成本	496.15/420.60/75.54	

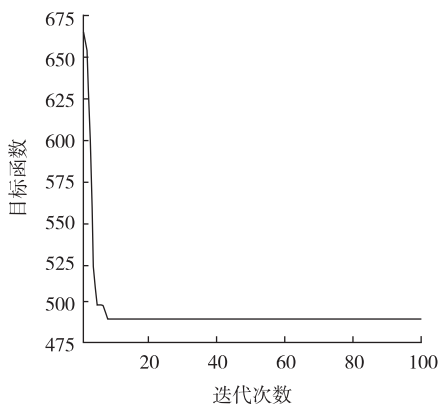


图 5 目标函数收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of objective function

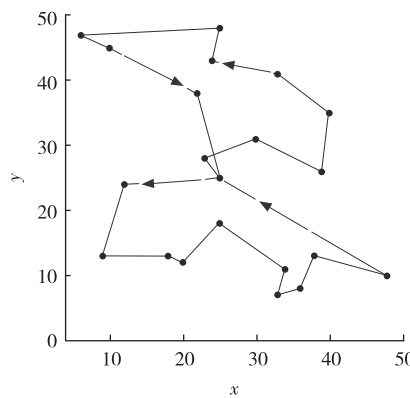


图 6 取货方案路线

Fig. 6 Pickup scheme roadmap

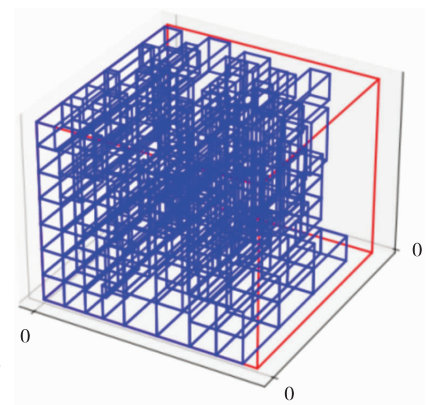


图 7 路线 2 车辆装载详情

Fig. 7 Vehicle loading details of route 2

3.2.2 考虑三维装载约束的同时取送循环取货车辆路径方案 在同样的参数条件下,调用本研究所设计的两阶段算法对考虑三维装载约束的同时取送循环取货 VRP 进行求解,得到取货方案如表 4 所示,目标函数收敛趋势如图 8 所示,取货方案路线如图 9 所示。

根据这一循环取货方案生成的 3 条路线的车辆三维装载方案分别如图 10 a、b、c 所示,可以发现尽管相对于不考虑三维装载约束的方案而言,尽管 3 条线路的车辆装载率有所下降,但是各路线上的车辆的零部件装载方案均满足了三维装载约束,保障了取货方案的装载可行性。

综上所述,虽然考虑三维装载约束的汽车零部件循环取货方案在成本方面增加了 9.66%,车辆行驶总路程增加了 16.17%,车辆的平均空间装载率从 86.70%下降为 59.25%,车辆的平均空间装载率下降了 27.45%,取货路线也由 2 条增加到 3 条;但是考虑三维装载约束保证了每条路线的取货方案都可以装载成功,满足了实际情况中对装载空间的需要。

4 结束语

目前很多有关车辆路径优化的研究仅仅考虑车辆的载重和容积约束,往往忽视三维空间装载可行性的约束;按照这些研究所提出的优化方案进行实际操作往往导致车辆装载失败,反而降低了装载工作效率并增加了物流管理成本。本研究提出考虑三维装载约束、同时取送需求下循环取货的汽车零部件入厂物流车辆路径优化问题,构建了运输成本和线边库存成本最小的目标函数模型并利用两阶段的蚁群算法对问题进行求解。这样既满足了汽车零部件入厂物流运作中同时返还物流空箱的现实需要,又实现了汽车企业在追求“零库存”的同时对运输成本的控制。实验结果表明:在装载大量规格不同的箱式货物时,只考虑简单算术相加的模糊装载空间限制的车辆路径优化不太具有现实意义。考虑三维装载约束的汽车零部件同时取送的循环取货路径方案一方面满足了在取货同时返还零部件物流箱的现实需求,另一方面又保证了方案中车辆三维装载可行性。

表 4 考虑三维装载的取货方案

Tab. 4 The pickup scheme with three-dimensional loading constraints

项目	路线		
	路线 1:0-8-10-11-12-13-14-15-0	路线 2:0-1-3-5-2-4-6-7-9-0	路线 3:0-20-17-16-19-18-0
取货次数	2	2	2
空间装载率	56.43%	79.63%	41.70%
单次取货用时/h	3.71	4.92	3.22
行驶路程/km	64.58	110.86	68.84
总成本/运输成本/线边库存成本	544.09/468.55/75.54		

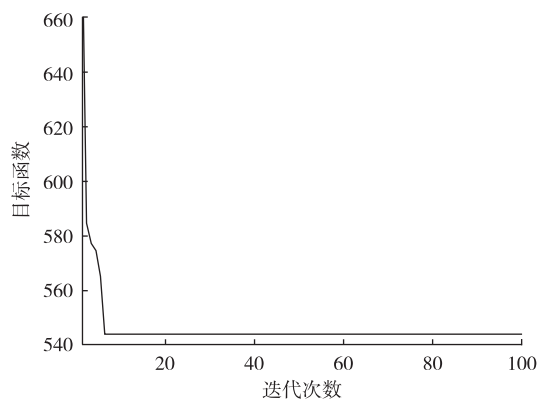


图 8 考虑三维装载的目标函数收敛曲线

Fig. 8 Convergence curve of objective function considering three dimensional loading

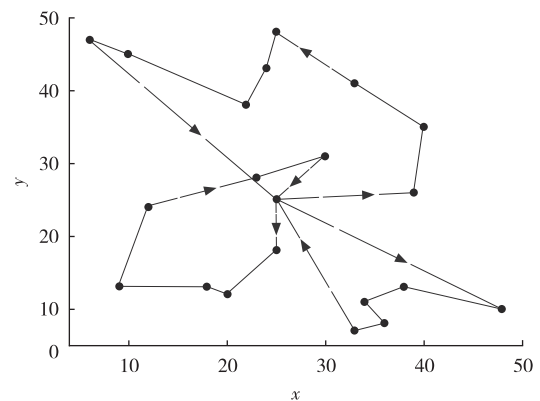


图 9 考虑三维装载的取货方案路线

Fig. 9 Taking into account three dimensional loading scheme route

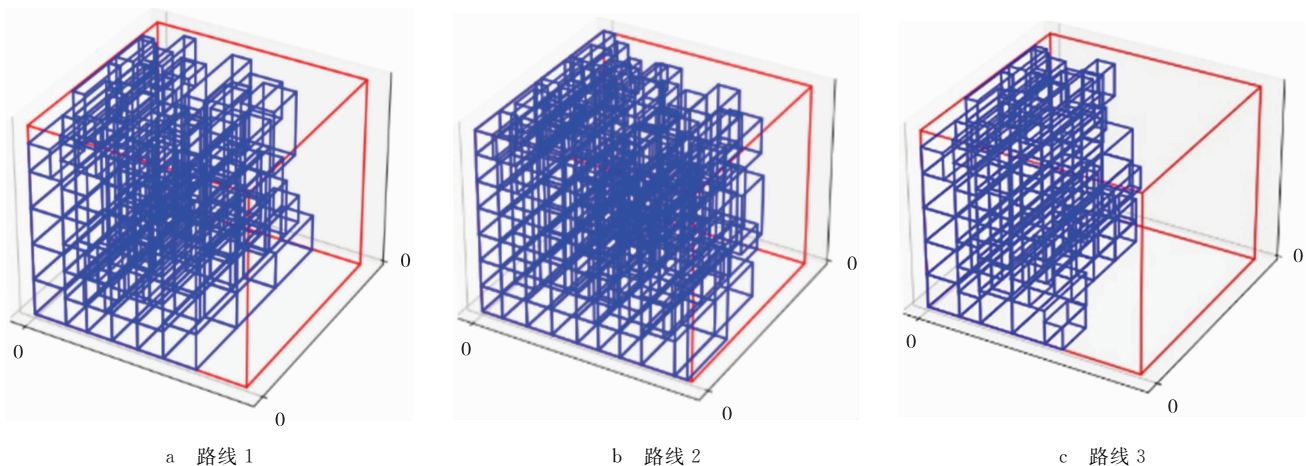


图 10 3 条路线的车辆装载详情

Fig. 10 Vehicle loading details of 3 routes

在同时取送的三维装载约束循环取货路径问题中,同时取送和循环取货模式的性质决定了三维装载的优化只能是局部供应商处的装载最优,无法做到全局最优;这也使得汽车零部件入厂物流无法做到三维空间利用率最高。在未来的研究中,可在三维装载方法的设计、货物空间不重叠的约束和装载点的选取等方面展开深入的探讨。

参考文献:

- [1] 林永昊,姚明山,赵磊,等. 汽车零部件三维装载问题研究[J]. 上海管理科学,2018,40(2):101-107.

- LIN Y H, YAO M S, ZHAO L, et al. Research on 3d loading of auto parts[J]. Shanghai Management Science, 2018, 40(2): 101-107.
- [2] 刘胜, 沈大勇, 商秀芹, 等. 求解三维装箱问题的多层树搜索算法[J]. 自动化学报, 2020, 46(6): 1178-1187.
LIU S, SHEN D Y, SHANG X Q, et al. A Multi-level tree search algorithm for three dimensional container loading problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(6): 1178-1187.
- [3] GENDREAU M, IORI M, LAPORTE G, et al. A tabu search algorithm for a routing and container loading problem[J]. Transportation Science, 2006, 40(3): 342-350.
- [4] 罗梓璋, 杨杰庆, 刘学文. 基于 NSGA-II 的考虑客户满意度的多目标车辆路径问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(6): 13-17.
LUO Z X, YANG J Q, LIU X W. Research on multi-objective vehicle routing problem considering customer satisfaction based on NSGA-II [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(6): 13-17.
- [5] OHLMANN J W, FRY M J, THOMAS B W. Route design for lean production systems[J]. Transportation Science, 2008, 42(3): 352-370.
- [6] KARLIN J. Defining the lean logistics learning enterprise: examples from Toyota's North American supply chain[D]. Michigan: University of Michigan, 2004.
- [7] 夏明伟. 基于循环取货的汽车零部件入厂物流路径计划的优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
XIA M W. Research on optimization of inbound logistics of auto parts milk-run routing problem[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [8] WU Q, WANG X, HE Y D, et al. A robust hybrid heuristic algorithm to solve multi-plant milk-run pickup problem with uncertain demand in automobile parts industry[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2018, 13(2): 169-178.
- [9] 伊俊敏, 苏志雄. 装载弱异性货物入厂物流的车辆路径方案优化决策[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(3): 357-362.
YI J M, SU Z X. An optimal decision on the vehicle routing schemes of inbound logistics with loading of weakly heterogeneous cargoes[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(3): 357-362.
- [10] 崔会芬, 许佳瑜, 杨京帅, 等. 基于遗传算法的 3L-CVRP 优化问题研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(5): 124-131.
CUI H F, XU J Y, YANG J S, et al. An optimization of 3L-CVRP based on a genetic algorithm[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(5): 124-131.
- [11] 王素欣, 温恒, 卢福强, 等. 货物三维装箱问题建模及其乌鸦搜索算法优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(8): 21-30.
WANG S X, WEN H, LU F Q, et al. Modeling of 3D cargo loading problem and optimization of crow search algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(8): 21-30.
- [12] 吴蓓, 丁文英, 杜彦华, 等. 基于重力装载的自适应随机算法求解多箱型三维装箱问题[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 3084-3093.
WU B, DING W Y, DU Y H, et al. Adaptive random algorithm based on gravity loading to solve 3D-MBSBPP[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(11): 3084-3093.
- [13] 李峰, 王厦娆, 刘小平, 等. 集装化运输单箱配载问题研究综述[J]. 包装工程, 2021, 42(23): 259-267.
LI F, WANG X R, LIU X P, et al. Research overview of single container stowage in containerized transportation[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(23): 259-267.
- [14] 王长琼, 戚小振. 三维装载约束下的汽车零部件循环取货路径优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(6): 1161-1165.
WANG C Q, QI X Z. Vehicle routing problem with three dimensional loading constraints based on milk-run in automotive parts supply logistics[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(6): 1161-1165.
- [15] 郭放, 黄志红, 黄卫来. 考虑前置仓选址与服务策略的同时取送货车辆路径问题研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 962-978.
GUO F, HUANG Z H, HUANG W L. Integrated sustainable planning of fast-pick area network and vehicle routing with simultaneous delivery and pick-up[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(4): 962-978.
- [16] 彭碧涛, 周世平. 同时取送货的三维装载约束下车辆路径问题[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(6): 242-247.
PENG B T, ZHOU S P. Simultaneous delivery and pickup vehicle routing problem with three-dimension loading constraints[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(6): 242-247.

- [17] 杜博文,张英贵,刘春君,等.带三维装载和一对一取送约束的车辆路径优化研究[J].工业工程与管理,2022,27(2):35-44.
DU B W,ZHANG Y G,LIU C J,et al. Optimization on one-to-one pickup and delivery vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints[J]. Industrial Engineering and Management,2022,27(2):35-44.
- [18] 杨龙龙.考虑可折叠集装箱回收的车辆路径问题研究[D].北京:北京交通大学,2020.
YANG L L. Research on vehicle route problem considering collapsible containers being recycled[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2020.
- [19] 张济风,杨中华.时变路网环境下多温冷链配送路径优化研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(1):119-126.
ZHANG J F,YANG Z H. Research on distribution path optimization of multi-temperature cold chain in time-varying road network environment[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science),2020,37(1):119-126.
- [20] 蒋莎,刘学文,叶家君.基于蚁群算法的无人机任务规划优化模型研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2019,36(1):1-7.
JIANG S,LIU X W,YE J J. Research on optimization model of UAV mission planning based on ant colony algorithm[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2019,36(1):1-7.

Operations Research and Cybernetics

Simultaneous Delivery and Pickup Vehicle Routing Problem with Three-Dimension Loading Constraints Based on Milk-Run in Automotive Parts Supply Logistic

CHE Lutao¹, YANG Zhonghua^{1,2,3}

(1. Evergrande School of Management, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430065;

2. Hubei Province Center for Industrial Policy and Management Research, Wuhan 430065;

3. Center for Service Science and Engineering, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: [Purposes]According to the characteristics of milk-run in automotive parts inbound logistics, which can help automotive company achieve automotive parts transportation in smaller batch, more frequency, a simultaneous delivery and pickup vehicle routing problem with three-dimension loading constraints was discussed to meet the demand to delivery circulation boxes and pickup automotive parts simultaneously. [Methods]A mathematical model was established to minimize the total cost of transportation and inventory, and then a two-stage ant colony algorithm was designed to solve the model. In the first stage, the memory bank of the approximate optimal solution was obtained by the vehicle path planning sub-algorithm, and in the second stage, the feasible solution was obtained by the loading feasibility test sub-algorithm. [Findings]The simulation results show that the pickup scheme based on the fuzzy vehicle loading constraint with simple arithmetic addition cannot be successfully loaded. By contrast, the routes of the pickup scheme with three-dimensional loading constraint increased from 2 to 3, and the vehicle loading rate reduced by 27.45%, but the loading feasibility of the scheme is ensured. [Conclusions]The milk-run routes with fuzzy loading space constraint are not practical because of the lack of three-dimension loading constraints test. The simultaneous delivery and pickup vehicle routing scheme with three-dimension loading constraints not only meets the practical needs of recycling circulation box, but also ensures the feasibility of the three-dimensional loading.

Keywords: milk-run; vehicle routing problem; three-dimension loading constraints; simultaneous delivery and pickup; two-stage ant colony algorithms

(责任编辑 方 兴)