

基于遗传算法的3L-CVRP 优化问题研究*

崔会芬^{1,2} 许佳瑜¹ 杨京帅^{1▲} 胡大伟¹ 朱鸿国²

(1. 长安大学汽车学院 西安 710064; 2. 广东省道路运输事务中心 广州 510101)

摘要 为提高物流配送效率,降低配送成本,探讨了三维装箱约束下的车辆路径优化问题。在装箱问题与车辆路径优化问题研究现状的基础上,将三维装箱与车辆路径优化进行整合,考虑客户需求、货物装载顺序、车辆尺寸、车辆重心等约束,建立以路径最短、车辆装载容积利用率和载重率最大的多目标组合优化模型,引入权重系数体现决策者偏好并归一化目标函数。设计适用的染色体编码规则,确定遗传操作中选择、交叉、变异方法,选取目标函数为适应度函数,引入最优个体保存策略防止算法的过早收敛,提高算法的准确性,通过 Matlab 编程实现该优化模型的求解。案例数值试验表明,该模型与算法能够实现装箱与车辆路径的组合优化,算法运行时间为 17 s 左右,相较于引导式局部搜索遗传算法减少了 5 s,车辆总行驶里程缩短了 7 km。

关键词 物流;三维装箱;车辆路径优化;遗传算法;最优个体保存策略

中图分类号:U468.8 文献标志码:A doi:10.3963/j.issn.1674-4861.2018.05.016

An Optimization of 3L-CVRP Based on a Genetic Algorithm

CUI Huifen^{1,2} XU Jiayu¹ YANG Jingshuai^{1▲} HU Dawei¹ ZHU Hongguo²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Road Transportation Service Center of Guangdong Province, Guangzhou 510101, China)

Abstract: In order to improve efficiency of logistics distribution and reduce costs, three-dimensional loading capacitated vehicle routing problem (3L-CVRP) is studied. Based on status of loading problems and optimization of vehicle routing, an integration of three-dimensional loading and routing problems is developed. A multi-objective combinatorial optimization model with the shortest path, the largest space utilization ratio, and the maximum loading rate is established, considering constraints of customer needs, loading order, the vehicle size, and the gravity center of vehicle, etc. weight coefficients is used to reflect preferences of decision makers, and normalizes the objective function. In order to improve calculation accuracy of the algorithm, applicable chromosome coding rules are designed to determine selection, intersection, and mutation methods in operation. A fitness function is selected as objective function. A preservation strategy of the optimal individual is applied to prevent premature convergence of the algorithm. Matlab is used to get the optimal solution. A case study shows that it can solve loading problems and optimize vehicle routing. The running time of the algorithm is about 17 s, which is 5 s less than a genetic algorithm with guided local search, and the total routing of object vehicle is shortened by 7 km.

Key words: logistics; three-dimensional loading; vehicle path optimization; genetic algorithm; preservation strategy of the optimal individual

0 引言

配送作为物流运作的核心环节之一,降低配送成本与提高配送效率是提升物流企业竞争力的

重要举措。运输和装载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、降低运输成本具有重要的现实意义。

收稿日期:2018-05-23

* 国家自然科学基金项目(51108040)、中央高校基本科研业务费项目(300102228205)资助

第一作者简介:崔会芬(1982—),博士研究生,研究方向:物流工程与管理。E-mail:1834320963@qq.com

▲通信作者:杨京帅(1978—),博士,教授,研究方向:物流工程、交通安全。E-mail:jshyang@chd.edu.cn

三维装箱约束下的车辆路径优化问题(three-dimensional loading capacitated vehicle routing problem, 3L-CVRP)是装箱问题和路径优化 2 个 NP(non-deterministic polynomial)问题的组合优化,成为物流配送近几年的研究热点。2007 年 M. Iori 等^[1]提出二维装箱约束限制容量车辆路径问题,提出启发式算法和精确算法进行求解,此后各学者相继对二维以及三维约束下的车辆路径优化问题进行研究。Wei L. J. 等^[2]针对二维装箱约束限制容量车辆路径问题,提出了一种可变的邻域搜索来解决车辆路径问题,天际线启发式算法解决二维装载问题。EEmmanouil Z. 等^[3]应用禁忌搜索算法对二维装箱约束下的车辆路线进行优化,对搜索空间边界进行了界定,并且设置了记忆架构去记录装载信息,使得搜索的效率提高。Zhang Z. Z. 等^[4]学者针对三维装箱约束下的车辆路径优化问题将车辆的燃料消耗量最小作为目标函数,提出本地进化搜索算法去搜索可行解空间,应用一种基于开放空间的启发式算法验证解的最优性。Guenther F. 等^[5]提出蚁群算法去解决三维装载约束下的车辆路径问题。Ruan Q. F. 等^[6]对三维装载问题和车辆路线问题分别建立数学模型,用人工蜂群算法解决车辆路径问题,启发式算法求解三维装载问题,通过混合算法检验两种算法得出的结果,获取 3L-CVRP 问题的最优解。Batoul M. 等^[7]对三维装箱约束下的车辆路径优化问题,提出用 column generation 启发式算法求解模型,在模型的建立中考虑了易碎品约束,定义了装载稳定性的表面接触面积。Leonardo J. 等^[8]提出一种经典启发式算法及两种启发式策略,应用模拟退火算法缩小搜索空间,应用记录更新算法提高模拟退火算法的准确性。在装箱约束方面分为 5 个优先级进行装载,在算法整合方面提出配载损失及公差使得算法融合性更好。彭碧涛等^[9]提出使用基于模拟退火算法的两阶段启发式算法进行求解,考虑了装载顺序、抗压能力和最小支持面等。张岐山等^[10]提出在满足一定客户满意度基础上,建立带软时间窗约束的单车型三维装箱绿色车辆路径优化模型,将单车型车辆调度中载重量、需求的时间窗、三维装箱等多约束考虑其中,采用多目标粒子群算法进行求解,对企业提高客户满意度具有参考价值。针对多车场配送问题,颜瑞等^[11]针对实际配送问题,建立多车场的三维装箱约束车辆路径问题模型,采用改进的模糊遗传算法求解车辆路径问题,采

用引导式局部搜索算法求解三维装箱问题。盛鑫^[12]则根据三标准聚类算法将客户分配给车场,应用节约成本法构造车辆路径,应用禁忌搜索算法优化装载,使得多车场的配载问题得到有效解决。伊俊敏等^[13]分别针对装载弱异性货物入厂物流的车辆路径优化决策以及某制造企业循环取货物流路径的优化问题进行了研究,前者针对弱异性中小尺寸货物装车堆码特点,建立了托盘单元化再装车、一维堆码装车和三维优化装车三种不同方案下的模型计算法,后者在装箱约束处理中通过“砌墙法”的有效简化处理,得到车辆容积和装车长度双容量约束的新型车辆路径问题模型^[14]。戚小振^[15]针对汽车零部件循环取货的特点,构建了三维装载约束下的零部件循环取货路径优化模型,设计了遗传禁忌算法和车辆装载检验算法相结合的混合算法求解该优化模型,对汽车零部件供应物流企业实施零部件循环取货提供了一定的科学根据与理论指导。王超等^[16]在三维装载约束的车辆路径问题基础上,建立最小化配送车辆数和最短化车辆路径两个目标函数,同时构建了多阶段/两层混合算法架构及其算法,并对不同决策者对路径的不同偏好问题进行了求解。综合相关文献,关于三维装箱约束下的车辆路径优化问题的组合优化研究方法主要分为精确算法和启发式算法^[17]。

三维装箱约束下的车辆路径问题从提出到发展仅仅经历了十几载,主要原因在于其求解难度大、搜索空间广、现实约束多^[18-20]等。现阶段国内外学者对于该问题的研究基本侧重单方面,未考虑决策者的决策偏好以及多目标决策的组合优化问题。引入权重系数来体现决策者的决策偏好,鉴于遗传算法对组合优化问题求解的高效性,应用遗传算法试图为该问题的求解提供思路。

1 3L-CVRP 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

三维装箱约束下的车辆路径优化问题可以描述为:给定 1 个无向图 $G=(D,E)$ 表示配送网络,其中 $D=\{D_0,D_1,D_2,\dots,D_n\}$ 为顶点集, $E=\{(D_i,D_j)/D_i,D_j\in D,0\leq i,j\leq N,i\neq j\}$ 为路径集合。顶点 D_0 表示配送中心, (D_1,D_2,\dots,D_n) 表示客户点集。 (D_i,D_j) 表示顾客 D_i 和 D_j 之间的线路, d_{ij} 表示客户 D_i 和客户 D_j 之间的距离,其中 $d_{ij}=d_{ji}$ 。配送中心拥有 k 辆同类型的货车,每辆货车的额定装载质量和最大容积分别用 G 和

V 表示;货车的长、宽、高分别用 L, W, H 表示。每件货物的长、宽、高和质量分别用 l_i, w_i, h_i, g_i 表示。该问题的配送过程见图 1, 图中, ①~⑩表示客户。

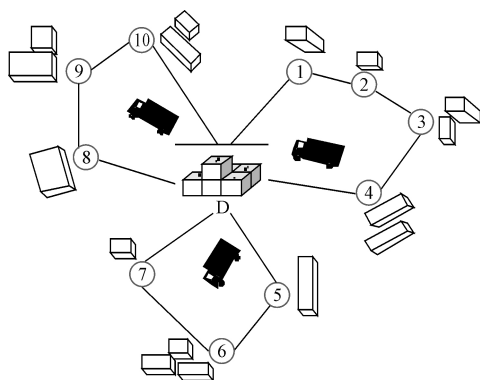


图 1 3L-CVRP 配送过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3L-CVRP distribution process

1.2 模型建立

1.2.1 3L-CVRP 问题假设与符号说明

在实际的物流配送过程中,影响配送效率与成本的 2 个主要因素,①车辆装载的效率,②配送车辆的运输成本。车辆装载的效率一方面体现在车辆额定装载质量和容积的利用率,最大程度的利用配送车辆的装载质量与容积,可以在相同的数量货物的情况下,需要的车辆数量减少;另一方面体现在按照计算出的货物装载顺序与位置进行装车,可以节省货物装载的时间,在单位时间内装载更多的车辆。运输成本的节约体现在通过合理的车辆路径安排,车辆完成货物配送的总行驶里程最短。

将装箱与车辆路径问题统筹考虑,其问题的复杂性不仅仅是装箱与路径优化问题的融合与扩充,在一定程度上改变了问题的本质,更加符合实际配送的需求。在构建模型时,既考虑装载顺序与货物配送路径中的客户到达顺序的一致性,避免不必要的货物倒装次数;又考虑到体积大重量轻或体积小重量大的车辆容积与载重利用率,以及车辆行驶稳定性,即货物装载的重心问题。

考虑到多目标决策时,决策者的偏好对构建的路径最短、车辆装载容积利用率和载重率最大的多目标组合优化模型的求解结果有一定的影响,引入权重系数体现决策者的偏好,对于决策者更为看重的目标赋予更高的权重。

在坐标体系中定义货物在车厢中的位置见图 2。

为方便数学模型对现实配送活动的描述,关

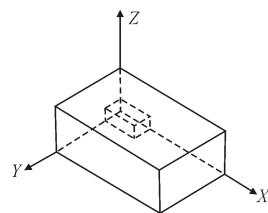


图 2 货物装箱示意图

Fig. 2 Cargo packing diagrams

于该组合优化问题的界定给出以下假设。

- 1) 配送中心只有 1 个,且配送中心所拥有货物能满足各个客户的需求。
- 2) 配送中心所拥有的车辆数满足所有配送要求。
- 3) 使用的车辆从配送中心出发,送完货后返回配送中心。
- 4) 每个客户的需求都得到满足且仅被服务 1 次。
- 5) 所有客户需求的货物是已知的。
- 6) 客户与客户、客户与配送中心的位置、距离是已知的。
- 7) 每辆车装载的货物体积、质量不能超过车辆允许的最大体积和载重约束。
- 8) 假设所有的货物都是规则均匀的长方体且单个货物的长宽高均不超过车辆箱体的尺寸。
- 9) 配送车辆为同一型号的箱式货车。
- 10) 货物的放置必须平行于车厢,只允许水平方向的旋转。
- 11) 为保证车辆行驶的稳定性,货物的重心必须在车厢的允许范围内。
- 12) 货物配送不考虑时间窗问题。
- 13) 货物的摆放必须满足先进后出原则 (first in last out),即如果客户在同一条服务路线上,先被服务客户所需货物不能被后服务客户所需货物挡住或压住。

模型构建的相关符号具体说明如下。

k 为是车辆的编号, $k=1, 2, 3, \dots, k$ 。

G_k, V_k 表示车辆 k 的额定装载质量和最大容积。

L_k, W_k, H_k 为车辆 k 箱体长、宽、高。

i 为节点编号, $i=0$ 为配送中心, $i=1, 2, 3, \dots, j, \dots, n$ 代表客户节点。

d_{ij} 为 2 个客户节点间的距离。

T_i 为客户 i 需要货物的总件数。

l_t, w_t, h_t 为客户 i 需要的第 t 件货物的长、宽、高。

g_{it} 为客户 i 需要的第 t 件货物的质量。

$\bar{x}_{it}, \bar{y}_{it}, \bar{z}_{it}$ 为客户 i 的第 t 件货物在车辆中的重心。

$(a', a''), (b', b''), (c', c'')$ 为车辆的重心范围, $a', a'', b', b'', c', c''$ 根据车辆的车厢规格决定。

$(\bar{x}_{ik}, \bar{y}_{ik}, \bar{z}_{ik})$ 为在第 k 辆车上, 客户 i 的第 t 件货物在车厢内的右后下角坐标。

$(\bar{x}_{ik}, \bar{y}_{ik}, \bar{z}_{ik})$ 为在第 k 辆车上, 客户 i 的第 t 件货物在车厢内的左前上角坐标。

优化模型需要的决策变量如下。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从客户 } i \text{ 直接到客户 } j \\ 0 & \text{车辆 } k \text{ 不从客户 } i \text{ 直接到客户 } j \end{cases},$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 服务客户 } i \\ 0 & \text{车辆 } k \text{ 不服务客户 } i \end{cases};$$

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{客户 } i \text{ 的第 } t \text{ 件货物装载在车辆 } k \text{ 上} \\ 0 & \text{客户 } i \text{ 的第 } t \text{ 件货物未装在车辆 } k \text{ 上} \end{cases};$$

$$r_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{在车辆 } k \text{ 上客户 } i \text{ 先于客户 } j \text{ 被服务} \\ 0 & \text{在车辆 } k \text{ 上客户 } i \text{ 后于客户 } j \text{ 被服务} \end{cases};$$

1.2.2 模型建立

三维装箱与车辆路径优化的多目标优化数学模型见式(1)~(22)。

$$\min s = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^k d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\max V = \sum_{k=1}^k \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} l_{it} w_{it} h_{it} y_{ik}}{V_k} \quad (2)$$

$$\max G = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{ik}}{G_k} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{ik} \leq G_k \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} l_{it} w_{it} h_{it} y_{ik} \leq V_k \quad (5)$$

$$[(\bar{x}_{ik} - \bar{x}_{ik}) - l_{it}][(\bar{y}_{ik} - \bar{y}_{ik}) - l_{it}] = 0 \text{ 或 } [(\bar{x}_{ik} - \bar{x}_{ik}) - w_{it}][(\bar{y}_{ik} - \bar{y}_{ik}) - w_{it}] = 0, i > 0 \quad (6)$$

$$\bar{z}_{ik} - \bar{z}_{ik} = h_{it} i > 0 \quad (7)$$

$$a' \leq \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} x_{it} y_{ki}}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{ki}} \leq a'' \quad (8)$$

$$b' \leq \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{it} y_{ki}}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{ki}} \leq b'' \quad (9)$$

$$c' \leq \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} z_{it} y_{ki}}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{ki}} \leq c'' \quad (10)$$

$$\bar{x}_{ik} \leq L_k \quad \forall k, k = 1, 2, 3, \dots, k \quad (11)$$

$$\bar{y}_{ik} \leq W_k \quad \forall k, k = 1, 2, 3, \dots, k \quad (12)$$

$$\bar{z}_{ik} \leq L_k \quad \forall k, k = 1, 2, 3, \dots, k \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0ik} = \sum_{i=1}^n x_{i0k} \quad \forall k, k = 1, 2, 3, \dots, k \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^k y_{ik} = 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^{T_i} \sum_{k=1}^k z_{ik} = T_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (16)$$

当 $r_{ijk}=1$ 时, $\forall i, j=1, 2, 3, \dots, n$, 且 $i \neq j$

$$\bar{x}_{ik} - \bar{x}_{jk} \geq l_{it}, \bar{y}_{ik} - \bar{y}_{jk} \geq w_{it}, \bar{z}_{ik} - \bar{z}_{jk} \geq h_{it} \text{ 至少成立 1 个} \quad (17)$$

当 $r_{ijk}=0$ 时, $\forall i, j=1, 2, 3, \dots, n$, 且 $i \neq j$

$$\bar{x}_{jk} - \bar{x}_{ik} \geq l_{jt}, \bar{y}_{jk} - \bar{y}_{ik} \geq w_{jt}, \bar{z}_{jk} - \bar{z}_{ik} \geq h_{jt} \text{ 至少成立 1 个} \quad (18)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1_{i,j} > 0, \text{ 且 } i \neq j \quad (19)$$

$$y_{ki} = 0 \text{ 或 } 1_i > 0 \quad (20)$$

$$z_{ik} = 0 \text{ 或 } 1_i > 0 \quad (21)$$

$$r_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1_{i,j} > 0, \text{ 且 } i \neq j \quad (22)$$

式中: $k=1, 2, 3, \dots, k; i, j=1, 2, 3, \dots, n; t=1, 2, 3, \dots, T_i$ 。

式(1)为配送车辆的运输距离最短;式(2)为在配送过程中车辆的容积利用率最大;式(3)为在配送过程中车辆的载重利用率最大;式(4)为每辆车的载重不能超过车辆要求的额定载重;式(5)为每辆车的装载容积不能超过车辆要求的容积;式(6)为装载在车辆上的货物必须平行于车厢装载;式(7)为货物在车厢内不能倒置;式(8)至(10)为车辆车厢内装载的货物重心范围必须在车辆重心要求的范围内;式(11)至(13)为装载在车辆上的货物不能超过车厢尺寸范围;式(14)为配送车辆从配送中心出发,配送服务结束后返回配送中心;式(15)为同一客户必须由同一车辆进行服务;式(16)为所有客户的所有货物都必须完成配送;式(17)~(18)为同一行驶路径上的货物必须满足先后下上的约束;式(19)~(21)为 4 个决策变量。

为减少模型计算的复杂度,将把多目标规划转化为单目标规划^[21]。引入权重系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 同时将式(2)~(3)分别进行平均化处理。

转化的单目标函数可以表示为

$$\max f = \lambda_1 \frac{d_{\text{总}} - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^k d_{ij} x_{ijk}}{d_{\text{总}}} +$$

$$\lambda_2 \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} l_{it} \omega_{it} h_{it} y_{it}}{V_k} +$$

$$\lambda_3 \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} g_{it} y_{it}}{G_k} \quad (23)$$

式中: $d_{\text{总}} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij}$, 为配送中心及各个客户非重复距离之和。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 根据实际情况进行赋值, 赋值遵循以下原则。

1) $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。

2) $\lambda_1 \neq 0$ 且 λ_2, λ_3 不同时等于 0。若 $\lambda_1 = 0$, 即方案目标不考虑车辆的行驶距离, 问题直接转化为装箱问题; 若 λ_2, λ_3 同时 = 0, 即方案目标不考虑货物的装箱, 问题则转化为最短路问题。

3) $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的大小主要根据决策者的决策偏好进行赋值。当 $\lambda_1 > \lambda_2, \lambda_1 > \lambda_3$ 时, 即决策者认为距离对配送成本的影响较大, 或时间价值是决策者考虑的首要因素, 因此在方案选择上会侧重于路线最短, 即 λ_1 为权重系数中最大的; 而当 $\lambda_1 > \lambda_2, \lambda_1 > \lambda_3$ 时, 且 $\lambda_2 > \lambda_3$, 即表示在路线最短基础上, 在车辆载重允许下, 决策者认为车辆的容积利用率对配送效率与成本的影响较大, 反之亦然。当 $\lambda_1 < \lambda_2, \lambda_1 < \lambda_3$ 时, 即决策者认为车厢利用率对成本的影响较大, 或车辆数是决策者考虑的首要因素, 因此, 在方案选择上会侧重车厢的利用率; 而当 $\lambda_1 < \lambda_2, \lambda_1 < \lambda_3$, 且 $\lambda_2 > \lambda_3$ 时, 即表示在车厢利用率最大基础上, 决策者认为车辆的容积利用率, 对配送效率与成本的影响较大, 因此其权重系数赋值就大。

2 3L-CVRP 算法设计与模型验证

2.1 算法设计

设计遗传算法的相关要素, 包括染色体编码操作、适应度函数、选择算子、交叉算子、变异算子等^[22], 下面具体介绍遗传算法相关要素。

2.1.1 染色体的编码操作

个体编码操作是遗传算法实现的入门操作, 其是将数据转化到计算机的识别空间, 在计算机搜索空间内不断搜索出适应度较高的个体, 最终寻求出问题的最优解或近似最优解。针对配送中的实际装载要求, 编码方案由六部分组成, 见图 3。

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 客户需求 | 车辆编号 | 货物顺序 | 放置位置 | 放置方向 | 放置层级 |
|------|------|------|------|------|------|

图 3 编码方案

Fig. 3 Coding scheme

在货物放置方向上, 根据货物允许的 2 种放置方向, 定义货物的放置方向对应的编码见表 1。

表 1 货物放置方向编码

Tab. 1 Coding of cargo placement direction

| 货物放置方向 | 对应编码 | 货物放置方向 | 对应编码 |
|--|------|--|------|
| $l_{it} // L_{it}, \omega_{it} //$ $W_{it}, h_{it} // H_{it}$ | 0 | $\omega_{it} // L_{it}, l_{it} //$ $W_{it}, h_{it} // H_{it}$ | 1 |

2.1.2 适应度函数设定

遗传算法中使用适应度这个概念来度量群体中各个个体在优化计算中找到最优解的程度, 适应度较高的个体遗传到下一代的概率就大, 适应度低的个体遗传到下一代的概率就小。为了能够直接将适应度函数与群体中的个体优劣相联系, 采用的适应度函数为所建优化模型归一化后的目标函数, 即式(23)。

2.1.3 选择算子

选择操作是基于适应度评价的基础上, 其主要目的就是为了避免优秀基因被淘汰, 提高遗传算法的全局收敛性和计算效率。轮盘赌选择法是依据个体的适应度值计算每个个体在子代中出现的概率, 并按照此概率随机选择个体构成子代种群。为了降低轮盘赌选择法系统误差, 充分发挥遗传算法“优胜劣汰”的特征, 提出将最优个体保存策略与轮盘赌相结合的方法, 来提高遗传算法的收敛性。

2.1.4 交叉算子

交叉方法主要有: 单点交叉、多点交叉、均匀交叉和算术交叉。一般随着交叉点数的增加, 个体结构被破坏的概率也逐渐增大, 有效保存较好个体模式的难度也将变大。单点交叉简单常用, 选择单点交叉方法作为交叉操作算子。

2.1.5 变异算子

基本位变异算子操作改变的是个体编码串中的个别基因基因座上的基因值, 是最简单、最基本和应用最普遍的变异操作算子, 相比于其他变异操作的操作复杂性, 基本位变异算子减少了遗传算法的运行时间。根据 3L-CVRP 优化问题的特点以及基本位变异算子的优势, 采用的变异方法为基本位变异法。

2.2 实例应用

为检测所构建模型的准确性和算法的有效

性,将 <http://prolog.univie.ac.at/research/VRPandBPP/> 网站下载的标准算例相关数据对所构建的模型和算法进行验证测试。在该测试数据集中,选取 E016-03m.dat 作为测试数据。在该测试数据 E016-03m.dat 中总共有 15 个客户、4 辆车,车厢的尺寸分别为长 60 cm、宽 25 cm、高 30 cm,车辆的最大装载质量为 90 cm,客户总需求的货物数量为 32 个。在该测试数据中,假定该车厢的重心范围约束分别为 $[0, 50]$, $[5, 20]$, $[0, 30]$ 。目标函数中各部分权重系数的选择,选择 $\lambda_1 = 1/3$, $\lambda_2 = 1/3$, $\lambda_3 = 1/3$, 即 3 个目标的权重系数相同进行优化模型的求解。

在进行模型的遗传算法求解之前,首先确定遗传算法输入参数及控制参数。根据以往文献的经验,结合运行实验,确定参数如下:种群规模 $\text{popsize} = 40$,交叉率 $\text{pcross} = 0.9$,变异率 $\text{pmutation} = 0.1$,迭代次数 $K = 500$ 。当选择以上参数时,算法在可接受的时间内得到了质量较好的近优解。经过程序运行输出适应度函数值的变化趋势,见图 4。车辆路径配送优化结果见图 5。

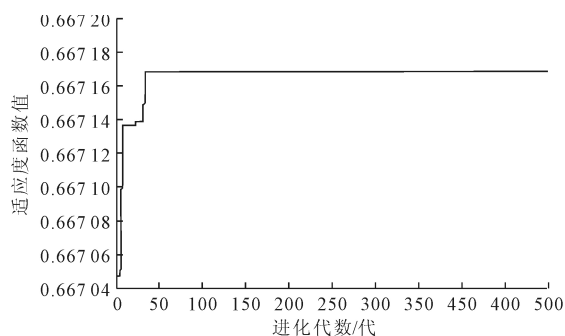


图 4 适应度函数收敛图

Fig. 4 Convergence diagram of fitness function

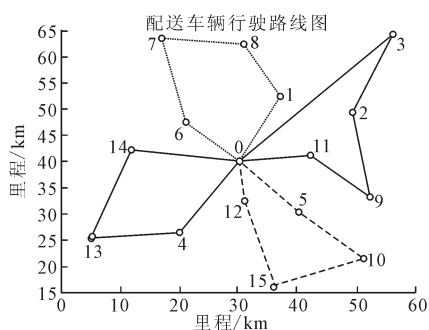


图 5 配送车辆行驶路线图

Fig. 5 Route map of distribution vehicle

由图 4 可以看出适应度函数收敛速度是较快的,在每次的程序运行中,算法运行时间是较短的,平均在 17 s 左右,相较于文献[11]中引导式局部搜索遗传算法运行时间 22 s 减少了 5 s。

17 s 与 22 s 均是可以接受的算法运行时间,算法运行时间的减少在现实配送活动中意义不大。但在理论价值上,因所构建的模型中考虑了装载顺序与货物配送路径中的客户到达顺序的一致性、车辆行驶稳定性的货物重心以及装载约束等因素以及决策者的偏好的情况下,设计的算法仍能对该多目标组合优化模型以更短的时间得到近优解,体现了设计算法较高的效率。

由图 5 可知,在该测试数据中配送车辆 4 辆车的配送方案分别为:车辆 1 的行驶路线为 0-12-15-10-5-0;车辆 2 的行驶路线为 0-14-13-4-0;车辆 3 的行驶路线为 0-3-2-9-11-0;车辆 4 的行驶路线为 0-1-8-7-6-0。4 辆车的总行驶里程 298 km 相较于文献[11]引导式局部搜索遗传算法里程 305 km 距离减少,在满足装载约束、车辆利用率最高的前提下,车辆路径得到了进一步优化,说明算法在路径改善上具有良好的优化能力。在 15 个客户、4 辆车的小规模测试中,取得了 7 km 的里程节约。在多客户、多车辆的配送组织活动中,模型与算法对大幅降低运输成本意义重大。

货物的装载顺序与位置仅对车辆 1 的装载状况进行展示,车辆 1 的装载效果见图 6。

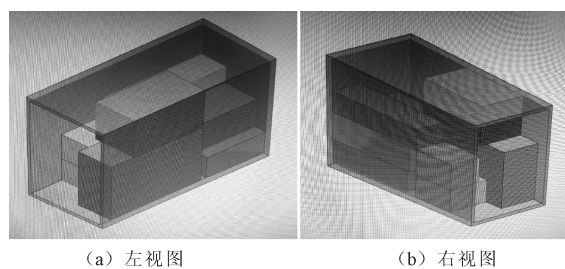


图 6 车辆 1 装载效果图

Fig. 6 Loading effect diagram of vehicle 1

3 结束语

根据实际配送中的现实约束,建立了以车辆路径最短、载重利用率和装载容积利用率最大为目标的装箱和路径规划的组合优化模型,为降低模型求解复杂性提出线性加权法将多目标优化转化为单目标优化。在模型求解算法上提出了一种有最优个体保存策略的遗传算法来解决配载优化问题。测试数据验证了模型的准确性和算法的有效性,对配载问题的解决具有一定的参考意义。模型没有考虑多配送中心、多车场以及货物属性等因素,对该类问题有待进一步的研究与探讨。

参考文献

References

- [1] IORI M, GONZALEZ J J, VIGO D. An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints[J]. *Transportation Science*, 2007, 41(2): 253-264.
- [2] WEI L J, ZHANG Z Z, ZHANG D F, et al. A variable neighborhood search for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(3): 798-814.
- [3] EMMANOUIL E Z, CHRISTOS D T, CHRISTOS T K. A guided tube search for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. [J] *European Journal of Operational Research*, 2009, 195(3): 729-743.
- [4] ZHANG Z Z, WEIL J, ANDREW L. An evolutionary local search for the capacitated vehicle routing problem minimizing fuel consumption under three-dimensional loading constraints[J]. *Transportation Research Part B*, 2015, 82: 20-35.
- [5] GUENTHER F, KARL F D, RICHARD F H, et al. Meta heuristics for vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints[J]. *European Journal Operational Research*, 2010, 201(3): 751-759.
- [6] RUAN Q F, ZHANG Z Q, MIAO L X, et al. A Hybrid approach for the vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints [J]. *Computer & Operations Research*, 2013, 40(6): 1579-1589.
- [7] BATOUL M, ANJALI A, SATYAVEER C. A Column Generation Based Heuristic for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 55(6): 1730-1747.
- [8] LEONARDO J, REINALDO M. Heuristic algorithms for a three-dimensional loading capacitated vehicle routing problem in carrier[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015(88): 110-130.
- [9] 彭碧涛, 周永务. 三维装载约束的车辆路径问题的模拟退火算法[J]. *工业工程*, 2011, 14(5): 71-73.
PENG Bitao, ZHOU Yongwu. Simulated annealing algorithm for vehicle routing problem with 3D loading constraints[J]. *Industrial Engineer*, 2011, 14(5): 71-73. (in Chinese)
- [10] 张岐山, 郑快生. 考虑客户满意度的三维装箱绿色路径研究[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(3): 286-292.
ZHANG Qishan, ZHENG Kuaisheng. Research on 3D packing green path considering customer satisfaction[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 30(3): 286-292. (in Chinese)
- [11] 颜瑞, 张群, 胡睿. 考虑三维装箱约束的多车场车辆路径问题[J]. *管理工程学报*, 2016, 31(12): 2328-2342.
YAN Rui, ZHANG Qun, HU Rui. Multi depot vehicle routing problem considering three-dimensional packing constraints [J]. *Journal of Management Engineering*, 2016, 31(12): 2328-2342. (in Chinese)
- [12] 盛鑫. 考虑装载约束的多车场车辆路径问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
SHENG Xin. Study on multi depot vehicle routing problem considering loading constraints [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [13] 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(3).
YI Junmin, SU Zhixiong. Optimization of Vehicle Routing Plan for Loading Weak Alien Goods into Plant Logistics[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2018(3).
- [14] 伊俊敏, 苏志雄. 考虑循环取货装车堆码的一种车辆路径问题研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(2): 179-184.
YI Junmin, SU Zhixiong. Research on a Vehicle Routing Problem Considering Recycling Loading and Unloading Codes[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2017, 41(2): 179-184.
- [15] 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[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
QI Xiaozhen. Research on Optimization of vehicle routing cycle under three dimensional loading constraints[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 王超, 金淳, 韩庆平. 三维装载与CVRP联合多目标优化问题的模型与算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(5): 929-934.
WANG Chao, JIN Chun, HAN Qingping. Model

