

回收连锁店选址问题及蘑菇繁殖算法求解

张宇恒, 张惠珍, 马良, 朱宁

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对日益增长的多样化回收服务需求, 解决了多服务方式、多规模的回收连锁店选址优化问题。构建了建设与服务成本最小化和客户满意度最大化的回收连锁店双目标选址模型, 并针对模型的具体特征, 将交叉与变异算子和精英保留策略等与基本蘑菇繁殖算法相结合, 设计了改进的蘑菇繁殖算法对模型求解。通过对某电子产品回收连锁店的选址优化实例, 确定其服务方式和选址的数量、位置及规模。验证了模型的有效性和算法的可行性。同时, 不同的服务方式及规模选择, 对回收连锁店的选址有显著影响, 企业相关决策者可通过合理提供不同服务来提升利润。

关键词: 多目标选址问题; 蘑菇繁殖算法; 多服务方式; 回收连锁店

中图分类号: O 224

文献标志码: A

Mushroom reproduction algorithm for solving location problem of recycling chain stores

ZHANG Yuheng, ZHANG Huizhen, MA Liang, ZHU Ning

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In view of the growing demand for diversified recycling services, this paper solves the location problem of recycling chain stores with multi-service and multi-scale. A bi-objective location model of recycling chain stores was constructed to minimize construction and service costs and maximize customer satisfaction. According to the specific characteristics of the model, an improved mushroom reproduction optimization was designed to solve the model by combining the crossover and mutation operator and elitist preservation strategy. The algorithm determined the service modes and the number, location and scale of recycling chain stores through an example of location optimization of an electronics recycling chain store. Finally, the paper verified the effectiveness of the model and the feasibility of the algorithm. Different service modes and scale choices have a significant impact on the location of recycling chain stores. Relevant decision makers can improve profits by reasonably providing different services.

Keywords: multi-objective location problem; mushroom reproduction optimization; multi-service; recycling chain store

收稿日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72101149); 教育部人文社会科学基金资助项目(21YJC630087)

第一作者: 张宇恒(1998-), 男, 硕士研究生。研究方向: 智能优化。E-mail: zhangyuheng326@163.com

通信作者: 张惠珍(1979-), 女, 副教授。研究方向: 运筹学、智能优化。E-mail: zhzyyz@163.com

随着科技的不断发展,电子产品的更新速度逐步加快,废旧电子产品也在源源不断地产生。2020年中国总共产生约5.24亿台废旧手机,且2014年至今,我国废旧二手手机存量累计超过20亿部,但废旧手机的回收率仅有7%,远远低于日本和欧美国家的46%和66%。这不仅造成了我国资源的严重浪费,也与可持续发展的理念相背离。回收需求无法被满足是造成这种局面的主要原因之一,因此,满足顾客多样的回收需求成为了回收企业线下连锁店选址重点考虑的问题,引起了国内外很多学者的关注和深入研究。例如,周林等^[1]在电商最后1 km配送问题中考虑了顾客自提和送货两种服务方式,并基于自提点共享的情况,研究了系统总成本最小的选址路径问题,发现送提一体和终端共享是有效的配送策略。黄露等^[2]在延误风险下,对配送网络中心选址问题提出了双层规划的模型,上层为企业决策模型,下层为顾客选择模型,得出了有效选址不仅节约成本还能降低顾客损失的结论。陈义友等^[3]以取货距离和自提点吸引力为主要因素,设计了效用函数,构建了2种不同的模型,求解结果表明,顾客对服务方式的不同选择行为,对自提点的选址有很大影响。Zhang等^[4]研究了顾客选择行为对于预防性健康设施的选址影响,提出了概率选择模型和最优选择模型这2个模型,并且进行对比。

在实际选址问题中,决策者考虑的因素往往不只一个,而是在多方面作出权衡。因此,多目标选址更能反映选址决策的实际情况,其所给出的选址方案比单目标选址方案更加合理。Naimi等^[5]以交货时间、供应链成本和产品质量作为目标函数,建立了多目标配送中心选址模型,并以加权的方式进行求解。Ramezani等^[6]将逆向供应链中的利润、顾客响应能力、质量作为目标,构建了多目标选址模型,并获得Pareto最优解集,分析了目标之间的权衡。陈义友等^[7]考虑了送货上门服务对自提点选址的影响,提出了顾客有限理性行为下多目标选址的模型。周向红等^[8]考虑了政府补贴行为对再制造逆向物流的影响,建立以社会成本、经济成本、收入为多目标的动态选址模型。本文在研究回收企业线下连锁店的选址过程中,不仅考虑了建设成本问题和服务成本问题,还考虑了顾客对服务的满意度问题,同时将多样化的服务方式纳入考虑范围。因此,本文构

建了以建设服务成本和顾客满意度水平为双目标的设施选址模型,以更好地满足企业利润和客户需求的目标。

回收门店选址问题是经典选址问题(如无容量设施选址问题、p-中位问题、覆盖问题等)的扩展,属于NP-hard问题。精确算法在可接受时间内难以给出问题的最优解,而智能优化算法则可以在较短的时间内为大规模优化问题提供较优的解,因此,智能优化算法在选址问题中的应用引起了国内外学者的重视。李凤月等^[9]利用麻雀搜索算法的协同进化优点,改进了果蝇优化算法,并采用两层搜索策略解决了选址库存的联合优化问题。宋艳等^[10]提出了分段式染色体编码方式,弥补传统的二进制编码在多级服务设施选址问题中染色体长度过长的缺点,以此来改进NSGA-II算法,有效地求解了多目标覆盖问题。刘凡等^[11]将适用于连续型优化的蘑菇繁殖算法进行编码和交叉算子的变化,求解了选址路径问题,并测试和比较了其有效性。

蘑菇繁殖算法能有效地考虑各父代间的关系,并且其局部搜索的方式能较好地发挥优秀父代的优势。此外,蘑菇繁殖算法的选择机制将整体与部分相结合,有效地平衡了全局搜索与局部搜索,避免了算法过早陷入局部最优的问题。目前该算法还尚未应用在选址问题中,为了扩大蘑菇繁殖算法在选址领域的应用,测试算法在求解选址问题时的性能,本文根据多服务方式回收连锁店选址模型的特点,对蘑菇繁殖算法进行改进,并通过算例分析和对比已有算法,验证模型及算法的有效性和可行性。本文研究内容不仅可以为回收企业线下连锁店的选址提供解决方案,也进一步拓展了蘑菇繁殖算法的应用领域。

1 多服务方式回收连锁店选址模型

在现实生活中,回收企业及相关部门为了满足客户的需求,通常向客户提供多种服务方式,其主要包括:以邮寄方式为主的第三方配送回收服务、以客户线下主动前往店面为主的回收服务和以上门取货为主的回收服务。为了降低连锁店的服务运营和建设成本,同时增加客户线下回收的满意度,连锁店的选址和规模成了重要的决策内容。连锁店的规模不同,其服务覆盖范围也不

同,小规模连锁店可快速满足周边局部需求,但覆盖范围小;大规模的连锁店覆盖范围大,能提供更好更广的服务,但建设费用高。

1.1 模型假设

为了更好地构建模型,提出如下假设: a. 连锁店建设的规模不同,规模越大的店面,所需要的建设成本越大; b. 连锁店的服务覆盖范围以覆盖半径作为衡量标准,覆盖半径越大则覆盖范围越广; c. 连锁店邮寄服务和上门取货的成本与顾客的距离成正比; d. 顾客对于线下回收服务的满意度与距离成反比,与店面规模成正比; e. 对于某一个连锁店来说,位于其服务范围内的顾客,可被提供上门取货和线下门店回收的服务方式;而位于其服务范围之外的顾客,可被提供邮寄回收和线下门店回收的服务方式; f. 对于任一需求点来说,总有一部分顾客主观上会优先选择线下回收的服务方式来满足服务的体验性。

现介绍模型所用的符号。

集合:

I 为候选点集合, $I=\{1, 2, 3, \dots, n\}$;

J 为候选点规模集合, $J=\{1, 2, 3, \dots, h\}$;

K 为需求点集合, $K=\{1, 2, 3, \dots, m\}$ 。

参数:

r_j 为 j 规模设施的服务半径;

O_j 为建立 j 规模设施的固定成本;

d_{ik} 为第 i 个候选点与第 k 个需求点之间的距离;

D_k 为第 k 个需求点的总需求量;

β 为接受线下门店的最大需求比例;

C 为单位需求量的单位距离上门服务成本;

E 为单位需求量的单位距离邮寄服务成本;

B 为线下服务单位需求量的顾客满意度值;

λ 为距离衰减系数^[12]。

决策变量:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个候选点建立第 } j \text{ 种规模的回收点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$z_{1,ik} \geq 0$, 表示第 i 个候选点接受第 k 个需求点的邮寄服务数量;

$z_{2,ik} \geq 0$, 第 i 个候选点接受第 k 个需求点的线下门店服务数量;

$z_{3,ik} \geq 0$, 第 i 个候选点接受第 k 个需求点的上门服务数量;

$y_{ik} = \min\{1, \max\{0, \lfloor x_{ij}r_j - d_{ik} \rfloor + 1\}\}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K$ 。 y_{ik} 为辅助变量, 表示第 i 个候选点对第

k 个需求点的覆盖情况, 若第 k 个需求点在第 i 个候选点的服务范围内, 则 y_{ik} 取值为 1; 否则为 0。

1.2 模型建立

基于上述假设条件、模型参数及决策变量, 回收连锁店选址问题的数学模型为

$$\min Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} O_j x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ij} z_{3,ik} d_{ik} C + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ij} z_{1,ik} d_{ik} E \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ij} \frac{r_j}{\max_{j \in J} \{r_j\}} z_{2,ik} B e^{-\lambda d_{ik}} \quad (2)$$

约束条件:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$D_k y_{ik} \geq z_{3,ik}, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (4)$$

$$D_k (1 - y_{ik}) \geq z_{1,ik}, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} z_{2,ik} \leq \beta D_k, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} (z_{1,ik} + z_{2,ik} + z_{3,ik}) = D_k, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$z_{1,ik} + z_{2,ik} + z_{3,ik} \leq D_k \sum_{j \in J} x_{ij}, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, z_{1,ik} \geq 0, z_{2,ik} \geq 0, z_{3,ik} \geq 0,$$

$$\forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J \quad (9)$$

式中: Z_1 为成本函数; Z_2 为满意度函数。

目标函数式(1)表示最小化候选点的建设成本和服务运营成本之和; 目标函数式(2)表示最大化顾客对于线下回收服务的满意度; 约束式(3)表示每个候选点的位置只能建立一种规模的连锁店; 约束式(4)表示只有被候选点覆盖时, 顾客才会被提供上门服务的服务; 约束式(5)表示只有没被候选点覆盖时, 顾客才会被提供邮寄回收的服务; 约束式(6)表示在需求点内, 总有追求线下回收服务的顾客存在, 并占据一定比例; 约束式(7)表示需求点的总需求量要与所提供的回收服务总量相同; 约束式(8)表示只有当候选点建立时, 才可以为顾客提供不同的服务; 约束式(9)为决策变量的取值范围。

2 求解回收连锁店选址模型的混合离散蘑菇繁殖算法

蘑菇繁殖算法 (mushroom reproduction optimi-

zation, MRO)^[11, 13]是仿照蘑菇生长繁殖特性设计出的一种新型群智能优化算法。MRO算法以父代的蘑菇为初始种群,其通过传播自己的孢子来探索各个繁殖区域并细化搜索空间,找到更优秀的繁殖区域进行生长繁殖搜索活动。MRO算法在邻域搜索前,计算每个菌落的平均适应度值 $Avg(i)$ 和所有菌落的平均适应度值 T_{avg} ,并通过判断 $(Avg(i)+T_{avg}/c)$ 与 T_{avg} 的大小关系(c 为一个固定的阈值)决定每个菌落是否利用人工风方式进行全局搜索。对于最大化问题,若前者小于后者,并且存在比该菌落优秀的菌落,则对该菌落进行人工风方式的全局搜索。若前者大于后者,则继续利用产生孢子的行为进行邻域搜索。完成一轮迭代后,更新菌落中的父代和全局最优解,重新计算每个菌落的平均适应度值和全体菌落的平均适应度值。

MRO 算法所采用的邻域搜索方式可表示为

$$X_{ij} = X_{i,p} + \text{Rand}(-r, r)$$

(10)

式中: X_{ij} 为第 i 个父代蘑菇所生成的第 j 个孢子; $X_{i,p}$ 表示第 i 个父代蘑菇的位置, $\text{Rand}(-r, r)$ 为 r 步长内随机搜索的距离。

MRO 算法通过人工风进行全局搜索的方式可表示为

$$M_j = (X_i^* - X_k^*) \left(\frac{Avg(i)}{T_{avg}} \right)^{-m} \text{Rand}(-\delta, \delta) r_s + \text{Rand}(-\delta, \delta)$$

(11)

$$X_{ij} = X_{i,p} + M_j$$

(12)

式中: x_i^* 和 x_k^* 分别代表第 i 个和第 k 个菌落的父代蘑菇位置; m 为风的强度参数; δ 为风的方向系数; r_s 表示搜索步长; r 为搜索半径; M_j 为第 j 个子代移动的距离。

以 MRO 算法中菌落的思想为核心,结合所构建模型的特征,通过对解形式的改变,并结合改进的交叉算子和变异算子,设计求解回收连锁店选址模型的 MRO 算法。

2.1 算法设计

本文构建的模型既包含整数变量,又包含连续变量,且目标函数为非线性函数,求解比较困难。因此,首先利用设计的蘑菇繁殖算法确定整数变量的取值(即蘑菇繁殖算法中每一个菌落和孢子仅对应模型中整数变量的取值),然后调用优化软件 CPLEX 确定连续变量的取值,并计算目标函数值。

2.1.1 编码方式

文中整数变量的取值用含有 n 个分量的行向量来进行转化。向量中第 i 个分量的取值为 h ,此时整数变量 $x_{ih} = 1$,表示在候选点 i 处建设第 h 种规模的回收站^[14];若第 i 个分量的取值为 0,表示在第 i 个候选点处不建任何规模回收站。此种转化方式可直接满足模型中对整数变量的约束条件。13 个候选点、3 种规模的可行解编码形式如图 1 所示,候选点 2, 10 处不建回收站;候选点 1, 5, 7, 11, 12 处建立规模为 1 类的回收站;候选点 3, 6, 8, 13 处建立规模为 2 类的回收站;候选点 4, 9 处建立规模为 3 类的回收站。

1	0	2	3	1	2	1	2	3	0	1	1	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 1 单个解的表示

Fig.1 Representation of a single solution

采用含有 p 行(每一行代表一个可行解中整数变量的取值)和 n 列(候选点个数)的矩阵表示一个菌落。每个菌落的适应度值由菌落中所有解的平均适应度值表示。如含有 5 个可行解的菌落可表示为图 2 的形式。

1	0	2	3	1	2	1	2	3	0	1	1	2
0	1	1	3	0	3	3	2	0	1	0	3	3
2	1	0	1	0	0	1	2	1	3	2	0	1
1	3	2	1	2	1	0	3	2	3	2	0	2
1	0	0	2	0	3	2	3	0	0	1	0	1

图 2 菌落的表示

Fig.2 Representation of colonies

2.1.2 初始解的生成

首先采用随机生成的方式产生 q 个解,再分别对这些解扰动处理,形成以每个解自身为基础的 q 个菌落。该方法既避免了随机生成菌落的无序性,又可形成以初始解为基础的局部搜索来避免菌落中解的适应度相差太大的问题。

2.1.3 适应度函数及评价标准

采用加权法构造适应度函数。第 s 个解的适应度函数为

$$f(s) = \alpha \frac{Z_1}{Z_1^*} - (1 - \alpha) \frac{Z_2}{Z_2^*}$$

式中: Z_1^* 和 Z_2^* 分别为单独考虑各目标函数时的最优目标值^[15];参数 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 为权重。

该方法不仅消除了 2 个目标之间的量纲差异,还消除了 2 个目标之间的数量级差异。

由于需评价的指标较为复杂,合理设置各评价标准尤为关键。每个菌落之间存在对比关系,

将第 i 个菌落中所有解的适应度均值作为此菌落的平均适应度值 $Avg(i)$ 。同理, 将所有菌落中解的适应度均值作为种群的全局适应度均值 T_{avg} 。

2.1.4 交叉算子

为了将 MRO 算法应用于本文研究的问题, 将 MRO 算法与遗传算法中的交叉和变异操作相结合, 并引入精英保留策略来提升算法的搜索效率。将一般策略与精英保留策略交叉使用, 并利用汉明距离来评估种群的多样性, 避免在算法后期出现菌落同质化现象, 导致陷入局部最优。

本文结合菌落的表示形式, 基于位置交叉 (position-based crossover, PBX)^[16] 的交叉方式设计交叉算子。首先, 在父代菌落中随机选择 2 个菌落, 并在选中的菌落中随机选择若干交叉点; 然后, 将父代 P1 中被选中的列替换为父代 P2 中

对应的列, 产生临时子代 TC1; 最后, 将子代菌落 TC1 与原父代菌落 P1 进行平均汉明距离的比较, 若符合差异度的要求, 则说明子代菌落 TC1 的多样性得以满足, 将临时子代 TC1 与父代 P1 以精英保留策略进行筛选或直接保留临时子代 TC1, 使得后代菌落的规模不变; 若不符合差异度要求, 则重新选择进行交叉操作, 如果达到规定上限次数还未产生符合差异度规定的子代, 则将父代与随机产生的菌落进行交叉操作, 直接保留子代菌落, 以弥补差异度不足所带来的同质化^[17]。如图 3 所示, 在拥有 5 个可行解的父代 P1 和父代 P2 菌落中, 选取父代 P1 中第 1 和 4 列, 将其替换为父代 P2 中对应的列并生成临时子代 TC1, 若符合差异度要求, 将其筛选或保留, 从而生成子代 C1。

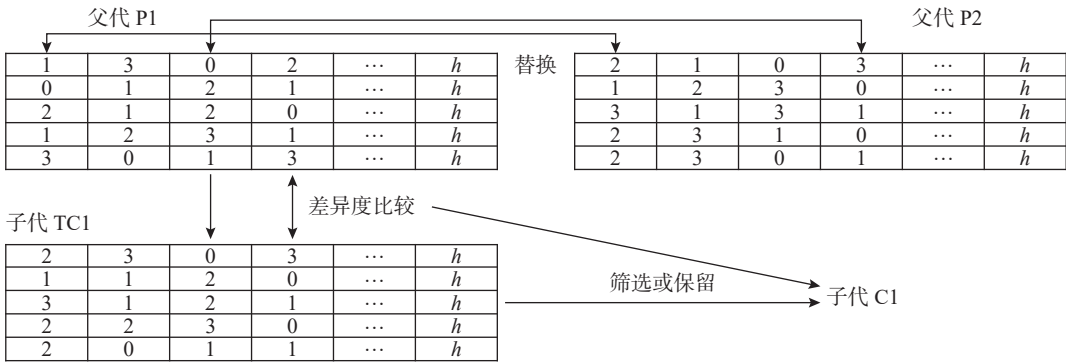


图 3 交叉算子

Fig.3 Crossover operator

2.1.5 变异算子

为了提高算法优化性能, 现以等概率的方式随机选择实数变异^[18]和单列交换^[19], 设计变异算子。

采用的实数变异为: 首先, 在给定的菌落中随机选择若干行 (每一行表示一个解), 然后, 在

每个选中的行中, 随机选择若干个变异点, 将这些点的取值在可行的集合内随机变动。如图 4 所示, 在有 5 个可行解的菌落中, 选取第 1 行第 4 列变异为实数 3; 第 3 行第 2 列变异为实数 1; 第 5 行第 3 列变异为实数 0。

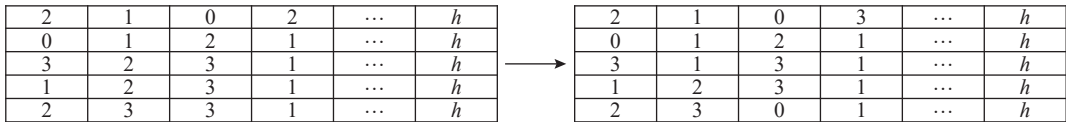


图 4 实数变异操作

Fig.4 Real mutation operation

采用的单列交换为: 首先, 随机选取不相同的偶数列, 然后, 将其两两配对, 并交换其取值, 得到新的菌落。如图 5 所示, 在有 5 个可行解的菌落中, 选取第 1, 3 列并将其交换位置; 选取第 2, 4 列并将其交换位置。

将变异得到的新菌落与原来的菌落比较汉明距离, 若符合差异度要求, 则将新菌落与父代菌落进行精英保留策略的筛选或直接保留新菌落; 若不符, 则重新选择进行变异操作, 当达到规定上限次数时, 还未产生新的菌落, 则选取当代中

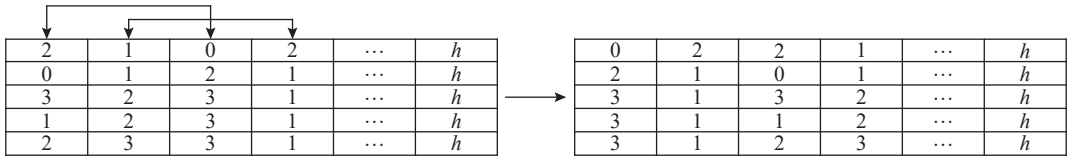


图5 单列交换操作

Fig.5 Single-column switching operation

最优菌落的若干解和随机生成的若干解组成新的菌落来代替此菌落。

2.2 算法流程

在上述算法设计的基础上，将改进的 MRO 算法的优化迭代步骤进行概括。

步骤 1 参数初始化。算法最大迭代次数 $G_{\max}$ ，最大交叉或变异次数 $T_{\max}$ ，初始迭代次数 $g=0$ ，初始交叉和变异次数 $t=0$ ，产生菌落的个数 Q 及菌落中包含解的个数 P 。

步骤 2 产生初始解。根据产生初始解的规则和参数的设定产生初始解，并计算菌落的适应度均值和当前种群的适应度均值，将适应度均值最小的菌落作为全局最优菌落和同代最优菌落，将适应度值最小的解作为全局最优解。

步骤 3 对于第 i 个菌落，若 $\text{Avg}(i)+T_{\text{avg}}/c < T_{\text{avg}}$ ，转步骤 4；否则，转步骤 5。

步骤 4 变异操作。若 $t < T_{\max}$ ，产生随机数 $r_m(r_m \in [0,1])$ ，若 $r_m < 0.5$ ，则菌落进行单列交换变异；若 $r_m \geq 0.5$ ，则菌落进行实数变异。变异后经过汉明距离差异度判断，符合条件则进行精英保留策略的筛选或直接保留新菌落，转步骤 7。否则 $t=t+1$ ，重复步骤 4，直到 $t \geq T_{\max}$ ，转步骤 6。

步骤 5 交叉操作。若 $t < T_{\max}$ ，产生随机数 $r_c(r_c \in [0,1])$ ，若 $r_c < 0.5$ ，则菌落与全局最优菌落进行交叉操作；若 $r_c \geq 0.5$ ，则菌落与同代最优菌落进行交叉操作。交叉后经汉明距离差异度判断，符合条件则进行精英保留策略的筛选或直接保留新菌落，转步骤 7。否则， $t=t+1$ ，重复步骤 5，直到 $t \geq T_{\max}$ ，转步骤 6。

步骤 6 将达到交叉或变异操作上限次数的菌落进行相应规则的处理后，保留新菌落。

步骤 7 更新操作。在同代所有菌落都进行完迭代过程后，更新当前的种群，并且更新全局最优菌落、同代最优菌落和全局最优解。

步骤 8 $g=g+1$ ，若 $g < G_{\max}$ ， $t=0$ 。转步骤 3；否则，输出最优解和最优菌落。

2.3 时间复杂度分析

算法的时间复杂度可以作为评估其优化性能

的标准之一。本文改进的 MRO 算法时间复杂度分析基于初始菌落的个数 Q 、菌落中所包含的解的个数 P 、变异或交叉的最大次数 $T_{\max}$ 、候选点个数 n 、候选点规模个数 h 、需求点个数 m 和算法的主要步骤进行。

由初始解生成的方法可知，算法中初始解生成的时间复杂度为 $O(Q \times P \times n \times h)$ 。在计算解的适应度时，由于计算 x_{ij} ， O_j ， r_j 的时间复杂度均为 $O(n)$ ，而计算 d_{ik} ， y_{ik} 的时间复杂度为 $O(n \times m)$ ，因此，适应度值计算的时间复杂度为 $O(n \times m)$ 。交叉操作与变异操作在最坏情况下进行 $T_{\max}$ 次，而每次操作中，产生新解的个数为 P_0 ，在选择阶段涉及到各菌落排序时，采用快速排序法，其时间复杂度为 $O(QT_{\max}(P+P_0)\log_2(P+P_0))$ 。对菌落的更新与对全局最优解的更新时间复杂度分别为 $O(Q)$ 与 $O(QP)$ 。综合以上各步骤，根据时间复杂度计算规则，在迭代 $G_{\max}$ 次情况下，改进的 MRO 算法时间复杂度为 $O(G_{\max}QPnh+G_{\max}QPnm+G_{\max}QT_{\max}(P+P_0)\log_2(P+P_0))$ 。

3 算例测试及分析

3.1 算例描述

选择某电子产品回收连锁店的选址作为测试算例。经过实地调研，该电子产品回收企业预计在某区域内 13 个候选点中开设 3 种店面规模不同的回收连锁店，对区域内 48 个需求点进行服务。候选点的坐标位置如表 1 所示。需求点的坐标位置和需求量如表 2 所示。

经实际调研和企业领导层决策，相关参数设置如下：1 类规模的回收店服务半径和固定成本分别为 $r_1=0.3$ km 和 $O_1=1\,000$ 元；2 类规模的回收店服务半径和固定成本分别为 $r_2=0.9$ km 和 $O_2=1\,500$ 元；3 类规模的回收店服务半径和固定成本分别为 $r_3=1.5$ km 和 $O_3=2\,000$ 元；线下门店需求比例 $\beta=0.3$ ；上门服务成本 $C=10$ 元/(kg·km)；邮寄服务成本 $E=5$ 元/(kg·km)；顾客满意度值 $B=10$ 单位/kg；

表 1 连锁店的位置信息

Tab.1 Location information of chain stores

编号	坐标
1	(19.103, 7.864)
2	(19.772, 17.323)
3	(13.956, 11.776)
4	(9.833, 14.831)
5	(21.282, 28.136)
6	(14.284, 6.184)
7	(1.469, 26.350)
8	(27.835, 21.255)
9	(34.542, 12.939)
10	(20.532, 39.147)
11	(30.143, 33.624)
12	(16.265, 32.938)
13	(12.528, 20.841)

距离衰减系数 $\lambda=1.5$ 。

3.2 优化结果与分析

利用 MATLAB 2020a 软件编程实现所设计的算法, 对算例进行求解。实验在 64 位 Windows 10 操作系统下进行, CPU 配置为 AMD Ryzen 7 4800U 1.8 GHz, 16 GB 内存。在 MATLAB 中调用 Cplex(64bit)12.10.0 软件求解连续型变量和目标函数值。经多次实验, 设置初始种群数量 $Q=40$, 最大迭代次数 $G_{\max}=50$, 最大交叉变异次数 $T_{\max}=20$

和阈值 $c=10$ 时, 求解效率较高, 效果较好。

采用加权法计算适应度值, 将多目标问题转化为带有权重的单目标问题进行求解, 并对不同权重下最优解的情况进行分析。实验结果如表 3 所示。

首先采用权重极小化的方法^[20]对 2 个目标进行独立分析, 即为某一目标设置一个极小的权重 $\delta(\delta=10^{-4})$, 而另一目标的权重 $(1-\delta)$ 接近 1, 在此情况下, 分析目标函数的变化情况。之后, 通过改变目标函数的权重来分析结果的变化情况。当利用极小的权重来分析某个目标时, 得到或逼近另一目标在加权分析法中的最优解。在目标权重 α 取值为 δ 时, 主要考虑客户满意度目标, 对建设与服务成本目标的考虑很少, 主要表现在选址时不仅开放的候选点较多, 且候选点的规模较大, 这导致建设与服务成本目标高达 22482.07 元, 客户满意度目标达到了 3054.696 单位; 而相较于目标权重 α 取值为 $1-\delta$ 时, 建设与服务成本目标为 7715.482 元, 与实验中所得出的最优解相比仅提高 2.73%, 相较于最劣解却优化了 65.7%, 表现在开放的候选点较少, 且规模较小; 但此时客户满意度仅有 1613.601 单位, 相较于实验中的最优解降低了 47.2%。因此, 权重极小化方法可以较好地得到某个单独目标的优劣解, 为目标优化方向提供了较好的参考。

在其他权重变化中, 当 α 为 0.3 与 0.8 时, 建设与服务成本目标达到最优 7510.095 元。当 $\alpha=$

表 2 需求点的位置与需求量

Tab.2 Location and quantity of demand nodes

编号	需求量/kg	坐标	编号	需求量/kg	坐标	编号	需求量/kg	坐标	编号	需求量/kg	坐标
1	39	(29.703, 30.184)	13	40	(21.160, 14.959)	25	27	(18.861, 2.219)	37	33	(24.206, 29.061)
2	28	(30.395, 19.514)	14	37	(24.017, 13.689)	26	26	(13.960, 7.733)	38	38	(22.175, 35.456)
3	29	(34.635, 19.291)	15	34	(27.026, 10.673)	27	38	(14.014, 10.078)	39	29	(21.268, 31.407)
4	31	(35.744, 15.749)	16	46	(25.014, 9.546)	28	44	(13.251, 13.689)	40	40	(16.211, 34.731)
5	46	(34.249, 14.912)	17	40	(23.608, 8.304)	29	48	(9.334, 15.665)	41	32	(16.193, 30.843)
6	31	(29.618, 16.918)	18	39	(19.795, 12.794)	30	28	(4.299, 17.995)	42	41	(14.037, 28.221)
7	45	(27.642, 19.082)	19	48	(16.633, 15.603)	31	39	(9.163, 18.589)	43	42	(8.867, 24.147)
8	31	(24.300, 21.034)	20	32	(13.597, 16.482)	32	37	(14.252, 19.028)	44	44	(6.531, 28.560)
9	48	(31.801, 24.622)	21	44	(15.528, 13.643)	33	25	(16.332, 20.56)	45	36	(5.283, 24.888)
10	34	(30.952, 27.287)	22	44	(16.786, 11.969)	34	33	(15.631, 24.44)	46	27	(6.361, 21.594)
11	30	(28.239, 22.924)	23	35	(21.169, 8.466)	35	29	(18.955, 26.257)	47	31	(1.366, 25.798)
12	31	(19.081, 17.273)	24	39	(20.469, 3.836)	36	45	(22.580, 26.076)	48	48	(2.238, 21.486)

表 3 不同权重下的计算结果
Tab.3 Calculation results under different weights

序号	α	Z_1 -建设与服务成本/元	Z_2 -客户满意度/单位	解的情况/候选点序号(规模)
1	δ	22482.070	3 054.696	1(2); 2(2); 3(2); 4(2); 5(2); 6(0); 7(2); 8(2); 9(2); 10(2); 11(2); 12(2); 13(2)
2	0.1	10781.849	2 558.788	1(1); 2(1); 3(1); 4(0); 5(1); 6(0); 7(1); 8(0); 9(0); 10(0); 11(0); 12(1); 13(1)
3	0.2	8 788.493	2 002.078	1(0); 2(0); 3(1); 4(1); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(1); 11(0); 12(0); 13(0)
4	0.3	7 510.095	2 006.514	1(1); 2(0); 3(0); 4(0); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(1)
5	0.4	7 962.939	2 246.506	1(1); 2(0); 3(0); 4(0); 5(1); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(1)
6	0.5	8 128.645	2 268.985	1(0); 2(0); 3(1); 4(0); 5(1); 6(0); 7(1); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(0)
7	0.6	7 994.048	2 221.279	1(1); 2(0); 3(0); 4(0); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(1); 13(1)
8	0.7	7 752.698	2 013.063	1(0); 2(0); 3(1); 4(0); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(1)
9	0.8	7 510.095	2 006.514	1(1); 2(0); 3(0); 4(0); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(1)
10	0.9	7 752.698	2 013.063	1(0); 2(0); 3(1); 4(0); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(1)
11	1- δ	7 715.482	1 613.601	1(0); 2(0); 3(0); 4(0); 5(0); 6(0); 7(0); 8(1); 9(0); 10(0); 11(0); 12(0); 13(1)

0.8 时，建设与服务成本占总目标的比重较大，因此，在总目标的优化过程中，减少成本的支出成为主要目的，这使得决策者可以在高权重的情况下，最优化成本目标来达到最优决策的目的。当 $\alpha=0.3$ 时，此时客户满意度的权重较大，但成本目标也达到了优化的目的。这可为决策者提供多方案的选择，并且由于客户满意度权重较高，因此，可以在不影响成本目标的前提下，结合实际情况优化某些可控参数来继续优化满意度目标。

当 $1-\alpha=0.9$ 时，客户满意度目标达到最优 2558.788 单位。此时总目标优化中，增大客户满意度成为主要目的，这也体现在店面建设的数量较多，使更多的客户更容易获得店面服务。同时，在权重变化中，客户满意度目标波动没有成本目标波动明显，满意度目标的优劣相差为 21.7%，而成本目标的优劣相差为 30.4%。

为了研究 $z_{1,ik}$, $z_{2,ik}$, $z_{3,ik}$ 的具体优化情况，选取 $\alpha=0.3$ 时的优化结果为例，此时开放服务点 1, 8, 13, 各种服务方式的服务量如图 6 所示。

由图 6(a) 可知，服务点 1 为需求点 13~18, 21~27 提供服务，并且为需求点 23 提供线下门店回收服务 10.5 kg 和上门回收服务 24.5 kg，为其他需求点提供线下门店回收服务和邮寄回收服务。由图 6(b) 可知，服务点 8 为需求点 1~11, 36~39 提供服务，并且为需求点 7, 11 提供线下门店回收服务 13.5, 9 kg 和上门回收服务 31.5, 21 kg，为其他需求点提供线下门店回收服务和邮

寄回收服务。由图 6(c) 可知，服务点 13 为需求点 12, 19, 20, 28~35, 40~48 提供服务，并且为需求点 32 提供线下门店回收服务 11.1 kg 和上门回收服务 25.9 kg，为其他需求点提供线下门店回收服务和邮寄回收服务。

在本算例中，当需求点的线下服务需求被完全满足后，即达到了限制的最大需求 βD_k 后，需求点的剩余需求量将结合需求点是否被覆盖的具体情况，选择不同的且唯一的服务方式。如需求点 7 的需求总量为 45 kg，此时服务点 8 满足了其线下门店服务的最大需求量 13.5 kg，而剩余 31.5 kg 的需求量则全部由服务点 8 所提供的上门服务的服务方式满足；需求点 13 的需求总量为 40 kg，此时服务点 1 满足了其线下门店服务的最大需求量 12 kg，而剩余 28 kg 的需求量则全部由服务点 1 所提供的邮寄服务的服务方式满足。由此可看出，在一定范围内，若决策者可通过激励或营销的管理方式来提升客户线下服务的意愿，不仅可以增加客户满意度，同时也可减少其他服务方式所产生的运营成本，以此来实现利益最大化。

权重的变化影响着各目标函数的优化结果，也是决策者所关心的重点。 α 值的变化对决策产生的影响如图 7 所示。 Z 为优化目标。将 2 个目标函数的优化结果进行归一化处理，消除量纲和数量级的差异。再将建设与服务成本结果与权重 α 值相乘，减去客户满意度结果与 $(1-\alpha)$ 相乘后得到优化目标值。在 $\alpha=0.1$ 时，优化目标达到最小，此时

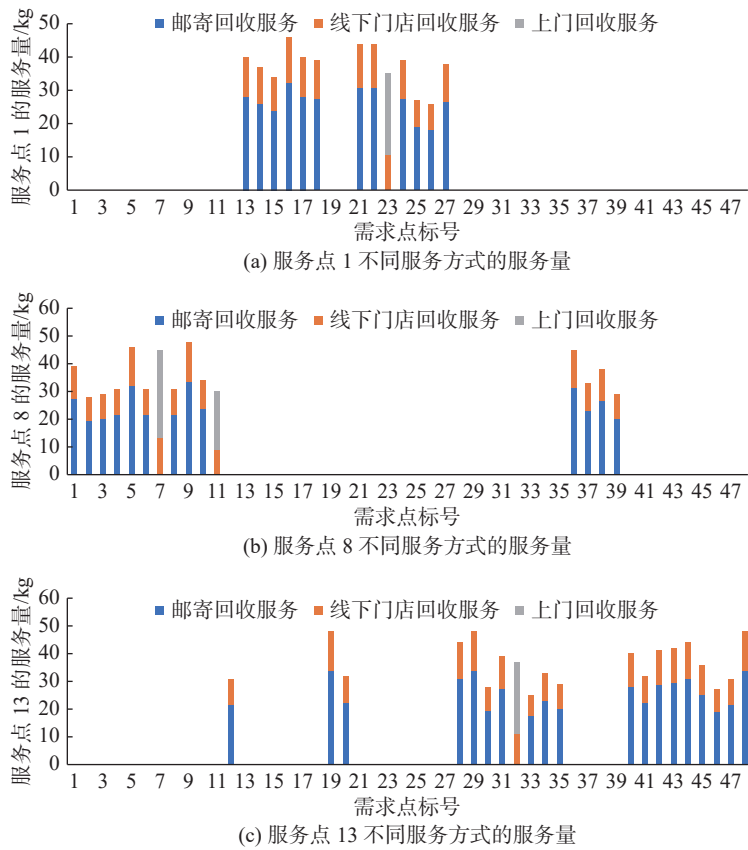


图 6 不同服务方式的服务量

Fig.6 Service volume of different service modes

客户满意度的权重很大, 虽然客户满意度优化效果最好, 但建设与服务成本的优化效果却最差, 这种极度偏差的权重设置在决策时往往是与现实相冲突的, 也是不可行的。因此, 选取 $\alpha=0.4$ 时的优化结果作为最优解提供给决策者, 此时建设与服务成本和客户满意度虽然都没达到最优, 但总体的优化结果却是最优的, 并且权重值也较为均衡, 符合现实考虑的情况。

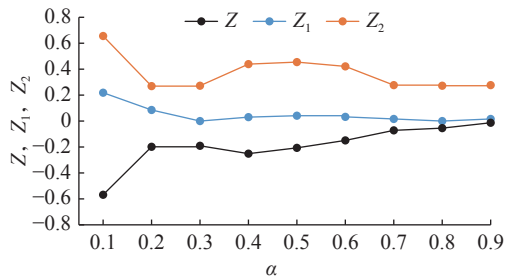


图 7 不同权重下的优化结果

Fig.7 Optimization results under different weights

此外, 为了验证本文所设计算法的求解性能, 选择 $\alpha=0.4$ 的情况下, 对比本文算法、改进蘑菇算法^[21]、遗传算法的求解效率, 结果如图 8 所示。改进蘑菇算法和遗传算法在解的质量上均不

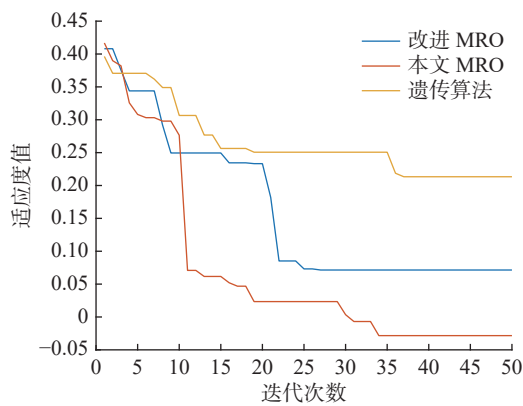


图 8 算法对比

Fig. 8 Algorithm comparison

如本文改进的算法。

4 结束语

回收企业线下门店选址的决策很大程度上决定了潜在回收量的多少, 而想要提高回收量, 为客户提供多样化的服务方式将是重要的手段之一, 其可为企业带来强有力的竞争优势。因此, 本文将企业的选址问题与服务方式相结合, 建立

了以建设与服务成本最小化、客户满意度最大化为目标的非线性数学模型来定量研究企业的回收连锁店选址问题。根据所构建模型的特点,设计了改进的MRO算法对其求解,并利用某电子产品回收连锁店选址的实际算例验证了模型的有效性和算法的可行性。

在后续研究中,一方面将进一步探索多目标问题的智能优化求解方法;另一方面,将更多的影响因素(如政府补贴、定价策略)纳入回收连锁店的选址问题中,使其更加符合实际情况。

参考文献:

- [1] 周林, 康燕, 宋寒, 等. 送提一体与终端共享下的最后一公里配送选址——路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(7): 1855–1864.
- [2] 黄露, 纪延光. 考虑顾客延误损失的配送中心选址双层规划问题研究[J]. *工业工程*, 2021, 24(2): 141–147.
- [3] 陈义友, 张锦, 罗建强. 顾客选择行为对自提点选址的影响研究[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(5): 135–144.
- [4] ZHANG Y, BERMAN O, VERTER V. The impact of client choice on preventive healthcare facility network design[J]. *OR Spectrum*, 2012, 34(2): 349–370.
- [5] NAIMI SADIGH A, FALLAH H, NAHAVANDI N. A multi-objective supply chain model integrated with location of distribution centers and supplier selection decisions[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(1/4): 225–235.
- [6] RAMEZANI M, BASHIRI M, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(1/2): 328–344.
- [7] 陈义友, 韩珣, 曾倩. 考虑送货上门影响的自提点多目标选址问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(11): 2679–2690.
- [8] 周向红, 高阳, 任剑, 等. 政府补贴下的再制造逆向物流多目标选址模型及算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(8): 1996–2003.
- [9] 李凤月, 齐小刚, 宋卫星, 等. 基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2343–2352.
- [10] 宋艳, 滕辰妹, 姜金贵. 基于改进NSGA-II算法的多级服务设施备用覆盖选址决策模型[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(1): 71–78.
- [11] 刘凡, 张惠珍, 周迅. 带模糊需求的开放式选址路径问题的混合离散蘑菇繁殖算法[J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(3): 738–744, 750.
- [12] 陈刚, 付江月, 何美玲. 考虑居民选择行为的应急避难场所选址问题研究[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(9): 6–14.
- [13] BIDAR M, KANAN H R, MOUHOUB M, et al. Mushroom reproduction optimization (MRO): a novel nature-inspired evolutionary algorithm[C]//2018 IEEE congress on evolutionary computation (CEC). Rio de Janeiro: IEEE, 2018: 1–10.
- [14] 宋英华, 葛艳, 杜丽敬, 等. 考虑车辆等待的应急物资调配方案优化研究[J]. *控制与决策*, 2019, 34(10): 2229–2236.
- [15] 赖志柱, 王铮, 戈冬梅, 等. 多目标应急物流中心选址的鲁棒优化模型[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(5): 74–83.
- [16] 宋存利. 求解混合流水车间调度的改进贪婪遗传算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(5): 1079–1086.
- [17] 魏士伟, 邓维. 基于多精英协同进化遗传算法的云资源调度[J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(5): 274–280.
- [18] 冯晨微, 王艳. 云制造系统并行任务优化调度[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(12): 2626–2635.
- [19] 李珍萍, 毛小寸. 多需求多类型自提点选址分配问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(11): 2889–2897.
- [20] 张沁莞, 张惠珍. 深埋式垃圾桶多目标选址模型研究及其应用[J]. *系统工程*, 2018, 36(10): 91–101.
- [21] 赖志柱, 王铮, 戈冬梅, 等. 多目标应急物流中心选址的鲁棒优化模型[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(5): 78–87.

(编辑: 石 瑛)