

基于 NSGA- II 算法的正逆向物流网络中回收处理中心选址^①

杨喜文^② 郑建风^③ 邢力元

(大连海事大学交通运输工程学院 大连 116000)

摘 要 为保护环境和减少运输成本,对回收处理中心选址问题的研究应考虑多目标。本文从政府和企业两个角度出发,提出正逆向物流网络中回收处理中心的选址问题。将货物运输过程中产生的碳排放进行量化,并为本文研究的选址问题构建了双目标模型,使结果达到经济目标和环境目标的有效平衡。采用 Lingo 软件和 NSGA- II 算法两种方法对双目标模型进行求解。最后,以大连市为例进行数值分析,并对 NSGA- II 算法的求解结果进行灵敏度分析,验证算法的可行性与求解的稳定性。

关键词 逆向物流;正向物流;双目标模型;回收处理中心选址

0 引 言

随着经济的发展,人类对自然资源的需求日益增加,自然资源进入人类社会之后,最终以废弃物和垃圾的形式停滞下来。为了提高资源的利用效率,减少对自然环境的污染,逆向物流应运而生。在逆向物流网络中,合理的选择回收处理中心的位置是整个逆向物流系统优化的关键问题。在整个物流网络中,无论是流通物的数量、价值,还是时间方面的要求,正向物流都比逆向物流重要,然而逆向物流对整个物流网络也产生显著影响。从战略角度考虑,应该将逆向物流与正向物流联合起来,同时进行优化设计,本文研究的正是在正逆向物流网络中的回收处理中心选址问题。

对于正逆向物流网络的优化问题,国内外已经有许多学者从不同的角度进行了研究。Mansour 和 Zarei^[1]提出了运用启发式算法和搜索算法解决逆向物流中的选址问题。Guo 等人^[2]创造性地提出了两级正逆向物流网络,对建立的双目标模型采用遗传算法和粒子群优化算法进行求解,实现网络中的运输路径优化,有效减少了碳排放量。Ramezani 和

Zarei^[3]在不确定环境下,在正逆向物流网络中建立了随机多目标模型,该模型的 3 个目标分别考虑客户的时效性、供货质量和利润最大化,采用两阶段随机规划的方法求解。Fan 等人^[4]着眼于生鲜食品运输过程中的正逆向物流运输,构建了正逆向物流的两阶段路径规划模型,采用遗传算法求解,优化网络设计。Kumar 等人^[5]建立了以利润最大化为目标的多周期多层次的正逆向物流模型,通过粒子群算法进行求解,并获得车辆运输路线的最佳方案。严南南和李明^[6]建立了以总成本最小化和碳排放量最小化为目标的双目标混合整数线性规划选址模型,采用 Lingo 软件进行求解。黄瑞等人^[7]以总运营成本和碳排放成本之和最小为目标构建了选址模型,采用 Lingo11.0 进行求解。姜芳和郭建全^[8]构建了以总成本最小、碳排放最小和对环境影响程度最小为目标的多目标模型,通过粒子群算法和遗传算法求解。周向红等人^[9]构建了社会负效应最小和总成本(建设成本和运营成本)最小的多目标选址模型,采用线性加权和评价系数的方法将多目标模型转化为单目标模型,通过遗传算法进行求解。Shih^[10]通过建立混合整数规划模型优化逆向物流网络中的

① 国家自然科学基金(71871036)资助项目。
② 女,1992 年生,硕士生;研究方向:正逆向物流网络中的选址问题;E-mail:17824853883@163.com
③ 通信作者,E-mail: jfzheng@dlmu.edu.cn
(收稿日期:2020-01-07)

基础设施,极大降低了总成本,之后通过改变回收率和运行条件观察结果的稳定性。马祖军和代颖^[11]在逆向物流网络中构建了成本最小化的优化模型,通过求解模型最终在建立的网络中确定了设施的位置和数量,并且得到了最终的运输方案。胡悦等人^[12]提出了一种考虑不确定环境下的设施选址模型,在已有设施的基础上,将固定投资、运输成本、存储成本和回收货量的不稳定性考虑在内,通过一种遗传算法和贪婪算法的结合算法求解模型,结果可得出设施的具体选址方案。李锐等人^[13]采用蚁群算法求解建立的总成本最小化的网络设计优化模型,该模型建立在多个运营周期的情况下,可以优化正逆向物流网络。通过文献总结可以发现,对于在正逆向物流网络中的多目标选址问题的研究,大多数学者是将顾客的需求和企业的成本或时效性作为目标,很少从政府和企业两个角度同时出发建立多目标选址模型,并且大部分文献是采用一种方法进行求解。国内大部分的求解方法是通过将多目标问题转化为单目标问题,再通过 Lingo 软件或遗传算法进行求解,求解方法较为单一。针对这一问题,本文分别采用 NSGA-Ⅱ (non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ) 算法^[14]和 Lingo 软件^[15]两种方法进行求解,并对结果进行对比分析。本文建立的物流网络是包括物品回收与第二次配送的回收一再供应网络,并在该正逆向物流网络中建立回收处理中心选址模型。本文建立的双目标选址模型中,考虑到回收货物的复杂性和污染性,从政府的角度出发,应尽可能降低在运输过程中 CO₂ 的排放量;另一方面,从企业的角度出发,应保证运输成本和建设成本最小,故本文综合考虑政府和企业两方面的要求,研究以企业总成本(运输成本和建设成本)最小和碳排放总量最小为目标的双目标物流网络规划问题。

1 问题分析

1.1 问题描述

本文构建的回收一再供应的产品回收网络是具备多个起点和多个终点、多条线路的网络结构。该网络结构包括 3 个物流节点,大致分为 2 个阶段。

第 1 阶段是回收产品流向处理加工制造节点;第 2 阶段是处理后可再利用的产品再次供应到市场,销售给顾客。本文构建的回收一再供应物流系统示意图如图 1 所示。图中采用圆形代表回收站点,正方形代表回收处理中心,五角星形代表再分销点,图中的箭头指向表示回收货物的流动方向,其中从回收站点到回收处理中心的箭头表示第 1 阶段,从回收处理中心到再分销点的箭头表示第 2 阶段。

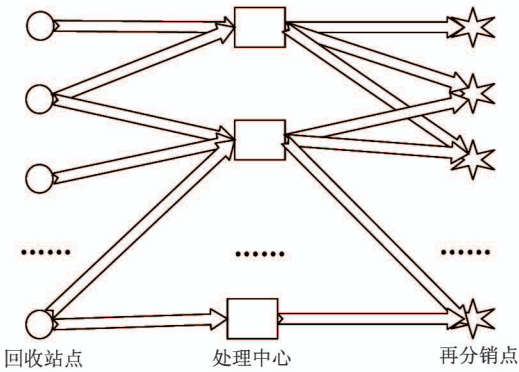


图 1 产品回收一再供应物流网络示意图

1.2 碳排放量的计算

首先计算整个物流网络中产生的实际总的碳排放成本。本研究主要针对在整个物流过程所消耗的石油燃料量来核算 CO₂ 的排放量。其计算公式为碳排放量 = 燃料消耗量 × CO₂ 排放系数,其中单位距离燃料消耗量表示如下^[3]:

$$L(m) = L_0 + \frac{(L^* - L_0)}{M} \times m \tag{1}$$

式(1)表示在车速等保持不变的情况下单位距离燃料消耗量与载货量之间的线性关系。其中 L* 为满载时单位距离燃料消耗量, L₀ 为空载时单位距离燃料消耗量; m 是车辆的载货量; M 为车辆最大载货量。

根据单位距离燃料消耗量与载货量之间的线性关系,将运输过程中的碳排放量表示如下^[3]:

$$e(X_{ij}) = e_0 \times L(X_{ij}) \times d_{ij} \tag{2}$$

式(2)表示在整个物流网络中,从物流节点 i 运送 X_{ij} 单位的货物至物流节点 j 行驶过程中产生的碳排放量。d_{ij} 为节点 i 至 j 的距离;单位距离燃料消耗量为 L(X_{ij}); e₀ 为 CO₂ 排放系数,在数值算例中有描述。

2 建立模型

2.1 问题假设

基于上述分析,建立产品回收网络中处理中心选址和运输网络优化模型,为建模方便,本文先做如下假设。

- (1)仅考虑回收一种类型的废旧产品;
- (2)建立处理中心的固定费用为已知常数;
- (3)仅在一些地理位置已知的备选地点考虑建设处理中心;
- (4)各回收站点和再分销市场的位置已经确定;
- (5)所有回收站点的总存储量都足够大到可以满足所有再分销点的需求量。

2.2 参数

- K :网络中回收站点的集合($k=1,\cdots,K$);
- I :网络中回收处理中心的集合($i=1,\cdots,I$);
- J :网络中再分销市场的集合($j=1,\cdots,J$);
- R_k :回收站点 k 的存储能力;
- C_j :再分销点 j 的需求量;
- MC_{ki} :回收点 k 到回收处理中心 i 的单位运输费用成本;
- MC_{ij} :回收处理中心 i 到再分销点的单位运输费用成本;
- FC_i :新建回收处理中心的固定成本;
- UT_i :回收处理中心处理回收产品的能力限制;
- d_{ki} :回收点 k 到回收处理中心 i 的距离;
- d_{ij} :回收处理中心 i 到再分销点 j 的距离。

2.3 模型构建

- 模型的决策变量如下。
- X_{ki} :回收点 k 运往回收处理中心 i 的回收产品数量;
 - X_{ij} :回收处理中心 i 运往再分销点 j 的产品数量;
 - y_i :0-1 变量,为 1 时表示在某地新建回收处理中心 i ,否则为 0;
 - Z_{ki} :0-1 变量,为 1 时表示将回收站点 k 的回收品运往回收处理中心 i ,否则为 0。
- 正逆向物流的回收一再分配路线首先是由回收

点到回收处理中心,再由回收处理中心到再分销点,至此实现回收货物的循环利用。低碳环境下正逆向物流回收网络优化可以描述为如下的数学规划模型。

2.3.1 目标函数

建立的双目标模型的两个目标函数如式(3)和式(4)所示。式(3)表示在正逆向物流网络中回收一再分配的企业总成本(运输成本和建设成本)最小;式(4)表示运输过程中碳排放量最小,两个目标函数分别代表了经济目标和环境目标。其中式(3)中前 2 项为在正逆向物流中的运输费用,第 3 项为新建回收处理中心的固定成本。

$$\min(\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} MC_{ki} X_{ki} d_{ki} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} MC_{ij} X_{ij} d_{ij} + \sum_{i \in I} FC_i y_i) \quad (3)$$

$$\min(\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} e(X_{ki}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e(X_{ij})) \quad (4)$$

2.3.2 约束条件

确保各个回收站点 k 只向一个回收处理中心 i 运送货物,得到约束式(5):

$$\sum_{i \in I} Z_{ki} = 1, \forall k \in K \quad (5)$$

确保各个回收站点 k 向回收处理中心 i 运出的货物总量不应大于该回收站点的存储能力 R_k ,得到约束式(6):

$$\sum_{i \in I} X_{ki} \leq R_k, \forall k \in K \quad (6)$$

若某回收处理中心 i 被建立,即 0-1 变量 y_i 为 1,此时该回收处理中心处理的货物总量不应大于其最大的处理能力 UT_i ,得到约束式(7):

$$\sum_{k \in K} X_{ki} \leq UT_i \times y_i, \forall i \in I \quad (7)$$

在回收站点 k 向回收处理中心 i 运送货物时,确保只有某条路径被选择的情况下,即 Z_{ki} 为 1 时,该路径上才会有货物运量,得到约束式(8):

$$X_{ki} \leq R_k Z_{ki}, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (8)$$

确保各个再分销点 j 收到的货物总量满足其需求量 C_j ,得到约束式(9):

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \geq C_j, \forall j \in J \quad (9)$$

确保各个回收处理中心 i 的流量守恒约束(即流入量等于流出量),得到约束式(10):

$$\sum_{k \in K} X_{ki} = \sum_{j \in J} X_{ij}, \forall i \in I \quad (10)$$

满足从所有的备选处理中心 i 中选出两个即可,得到约束式(11):

$$\sum_{i \in I} y_i = 2 \quad (11)$$

确保只有该回收处理中心 i 被建立,即 y_i 为 1 时,该回收处理中心 i 才会有货物收到,得到约束式(12):

$$X_{ki} \leq UT_i \times y_i, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (12)$$

在正逆向物流网络中,各个节点之间的运量应该大于等于 0,此为已知的限定条件,得到约束式(13):

$$X_{ki} \geq 0, X_{ij} \geq 0, \forall k \in K, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (13)$$

决策变量 Z_{ki} 和 y_i 均为 0-1 变量,得到约束式(14):

$$Z_{ki} \in \{0, 1\}, y_i \in \{0, 1\}, \\ \forall k \in K, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (14)$$

3 算法设计

本文建立的模型为双目标 0-1 混合整数规划模型。本文通过两种方法对该模型进行求解,分别采用 Lingo11.0 软件和 NSGA-Ⅱ 算法,以下是两种方法的具体步骤。

3.1 Lingo 算法设计

第 1 步 参考采用 NSGA-Ⅱ 算法求解得到的帕累托曲线,得到两个目标函数的边界值,将边界值定义为两个目标函数的上界,企业总成本目标函数的上界为 M ,碳排放量目标函数的上界为 N 。

第 2 步 标准化过程。将两个目标函数标准化,从而使双目标问题转化为单目标问题。将企业总成本目标函数设为 $F(X)$,将碳排放量目标函数设为 $Y(X)$,设置参数 α (0 到 1 之间取值)代表权重,从而得到的单目标函数 $\min G(X)$ 如式(15)所示。

$$\min G(X) = \alpha \times \frac{F(X)}{M} + (1 - \alpha) \times \frac{Y(X)}{N} \quad (15)$$

第 3 步 输入单目标模型,不断改变参数 α 的取值,得到不同权重分配下的选址方案。

3.2 NSGA-Ⅱ 算法设计

由于该问题是多目标问题,存在不确定个数解集,即所谓的非劣解集,而 NSGA-Ⅱ 算法能够运用非支配分类程序,使多目标变为一个适应度函数形式,从而解决任意多目标问题,所以本文还应用了 NSGA-Ⅱ 算法探讨回收处理中心的选址问题。其算法的步骤如下。

第 1 步 染色体编码。染色体中包含所有的决策变量,根据模型中回收站点有 K 个,备选的回收处理中心有 I 个,再分销点有 J 个,所以决策变量共有 $(K \times I + I \times J + K \times I + I)$ 个,共分为 4 段,前 $K \times I$ 个决策变量为第 1 段,该段表示回收站点到回收处理中心的运量; $I \times J$ 个决策变量为第 2 段,该段表示回收处理中心 i 到再分销点 j 的货量; $K \times I$ 个决策变量为第 3 段,该段表示回收点 k 到回收处理中心 i 是否运货;最后 I 个决策变量为第 4 段,该段表示是否在此处设置回收中心。染色体的结构示意图如图 2 所示。一个染色体代表一个解方案,染色体的产生必须满足相应的约束条件,否则舍弃,设置种群数量为 N ,生成初始种群 P_0 。

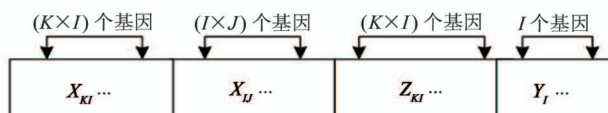


图 2 染色体的结构示意图

第 2 步 适应度函数。适应度函数是用来判断个体优劣程度的指标。针对本文构建的双目标模型,将企业总成本最小化的目标值设为 $Object1$,将碳排放量最小化的目标值设为 $Object2$,将适应度函数设计为 $fitness = \frac{1}{Object1} + \frac{1}{Object2 \times 1000}$,按照建立的双目标选址模型计算每个个体的适应度。

第 3 步 选择操作。采用轮盘赌选择法,利用群体中个体适应度的大小确定个体的遗传概率。个体被选中的概率与其适应度大小成正比。

第 4 步 交叉操作。对选择的个体进行单点交叉,即染色体依次两两配对,在一对染色体上选取一点分成两部分,然后互换重组为新的两条染色体。本文模型中,每个染色体的第 3 段和第 4 段基因即

最后的 $(K \times I + I)$ 个决策变量决定着第 1 和 2 段的 $(K \times I + I \times I)$ 个决策变量的取值,因此应在染色体的最后 $(K \times I + I)$ 个 0-1 变量中随机选取一点进行交叉操作,交叉完成后再根据这部分的取值随机产生其他决策变量,将不满足约束条件的个体淘汰。

第 5 步 变异操作。根据一定的变异概率,对种群中的染色体进行变异操作。同第 4 步,只对染色体的最后 $(K \times I + I)$ 个 0-1 变量改变编码,采用两点互换进行变异操作,即每代群体中随机变化一条染色体中的任意两个基因点。初始种群经过选择、交叉、变异操作生成第 1 代新种群 Q_1 。

第 6 步 快速非支配排序。将初始种群 P_0 与第 1 代新种群 Q_1 合并生成第 1 代组合种群 R_1 ,根据模型中的双目标——总成本与碳排放量,计算 R_1 中每个个体的适应度函数值。对染色体进行两两比较,现假定给出两条染色体 s 和 t ,若 s 的总成本小于等于 t 的总成本并且碳排放量小于 t 的碳排放量,或者 s 的碳排放量小于等于 t 的碳排放量并且总成本小于 t 的总成本,则可确定为染色体 s 支配染色体 t 。反之, t 支配 s 。将种群中的非支配解划分为等级 1,剔除这些个体,再在剩余的个体中寻找新的非支配解,划为等级 2;重复以上操作,直至所有个体均被设定相应等级。

第 7 步 精英保留。第 1 代组合种群 R_1 经过快速非支配排序,再通过计算拥挤度^[16]和精英保留策

略,选出前 N 个较优的染色体组成新一代的种群 P_1 ,判断是否继续迭代计算。

第 8 步 终止条件。如不满足终止条件,返回第 3 步,循环操作,直到遗传代数达到限定的最大遗传代数 T 时,终止运行。

4 算例分析

4.1 数据说明

汽车产业是大连的支柱产业,本节以大连市汽车零部件回收为例,选择 18 个已有的汽车销售点作为回收站点,选择 15 个已有的五金销售点作为再分销市场,选择 11 个地点作为备选的回收处理中心,具体位置关系如图 3 所示。图中标号 1~18 表示选择的 18 个回收站点,标号 19~29 表示选择的 11 个回收处理中心,标号 30~44 表示选择的 15 个再分销点。任意两点之间的距离根据百度地图测距可知。各个回收站点每月的存储能力根据百度地图上显示的面积大小(在比例尺为 1:5000 的百度地图上,将各个回收站点近似为矩形计算其面积),规定单位存储能力为 0.5 kg/m^2 ,根据上述原则可以得到各个回收站点每月的存储能力,具体数据见表 1。各个回收处理中心的处理能力根据计算每个处理中心方圆 1.5 km 以内的分销点和回收站点的数量,规定处理中心的基本处理能力为 3000kg,每增加一个



图 3 回收—再销售系统位置分布情况

表 1 回收站点的存储能力

回收站点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
存储能力/kg	532	585	420	520	623	723	532	654	632	485	420	420	423	323	632	554	332	485

回收站点或者分销点,其处理能力增加 100 kg,根据此原则预设出各个回收处理中心的处理能力。各个回收处理中心建设的固定成本固定在一个量级,其差异情况根据各地区房价差异进行调整(规定基本的处理中心建设固定成本为 3000 元,通过调查得到各地区的房价并求其平均值,然后使各地区房价与平均值作差,规定房价每增加或减少 5000 元,处理中心建设的固定成本增加或减少 1000 元)得到,具体数据见表 2。各个再分销点的需求量根据百度地图上显示的面积大小(在比例尺为 1:5000 的百度地图上,将各个再分销点近似为矩形计算其面积),规定单位存储能力为 1 kg/m²,根据上述原则得到具体数据见表 3。由于在大连市内的物流网络运距较短,运输一般采用公路运输,所以在本方案中使用相同的 3 元/km/kg 的运价。假设排放系数 = 2.55 kg/L,回收点到回收处理中心以及回收处理中心到再分销

点使用同种车辆来配送,其最大载重量 M 为 500 kg,车辆满载与空载时单位距离燃料消耗量分别为 2 L/km 和 1 L/km^[7]。

表 2 备选处理中心的相关数据

备选处理中心	固定成本(元)	处理能力/kg
1	6250	5090
2	6900	4520
3	5800	3830
4	8200	3580
5	6700	3800
6	3500	3550
7	6850	4980
8	3450	3920
9	4800	5000
10	2900	4875
11	3600	5500

表 3 再分销点的需求量

再分销点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
需求量/kg	605	554	520	745	705	750	800	205	650	620	595	505	250	150	500

4.2 结果分析

4.2.1 NSGA-II 和 Lingo 的比较

算例求解分别采用 Lingo 软件和 NSGA-Ⅱ 算法两种方法,以下分别介绍两种算法求解下的结果,并对两种求解方法进行比较。使用 Lingo 求解,对两个目标赋予不同的权重,得到不同的选址方案和目标函数值,具体结果见表 4。其中企业权重表示对企业总成本的目标函数赋予的权重,政府权重表示对碳排放量的目标函数赋予的权重。

由表 4 的结果可知,不同的权重分配会影响选址决策,涉及到的选址方案共有两种。当政府权重大于等于 0.8 时,选择回收处理中心 4 和回收处理中心 7,此时主要考虑降低环境污染,使得碳排放量更小。当企业权重大于等于 0.3 时,选择回收处理

中心 3 和回收处理中心 9,此时主要考虑降低企业总成本。综上所述,使用 Lingo 求解可得到两种选址方案,三种目标函数的不同情况。本文以企业总成本为主,碳排放量为辅,结果选择回收处理中心 3 和处理中心 9,对应的目标函数值企业总成本为 595 029.50 元,碳排放量为 2484.9 kg。

另外,采用 Java 软件编程实现 NSGA-Ⅱ 算法。算法中设定种群规模为 N 为 100 个,最大遗传代数 T 为 400,交叉概率 $CP=0.6$,变异概率 $MP=0.05$ 。得到帕累托解如图 4 所示。图 4 中横坐标表示碳排放量,纵坐标表示企业总成本,其中图中曲线为 NSGA-Ⅱ 算法下的帕累托解,图中 3 个离散的三角形状的点为 Lingo 求解下的目标结果。

表 4 Lingo 求解不同权重分配下的最优方案选择

企业权重	政府权重	备选处理中心 选择方案	企业总成本 /元	碳排放量 /kg
0.0	1.0	4 和 7	0.0	2036.3
0.1	0.9	4 和 7	619 521.0	2363.8
0.2	0.8	4 和 7	619 521.0	2363.8
0.3	0.7	3 和 9	610 067.5	2389.4
0.4	0.6	3 和 9	595 029.5	2484.9
0.5	0.5	3 和 9	595 029.5	2484.9
0.6	0.4	3 和 9	595 029.5	2484.9
0.7	0.3	3 和 9	595 029.5	2484.9
0.8	0.2	3 和 9	595 029.5	2484.9
0.9	0.1	3 和 9	595 029.5	2484.9
1.0	0.0	3 和 9	567 370.0	0.0

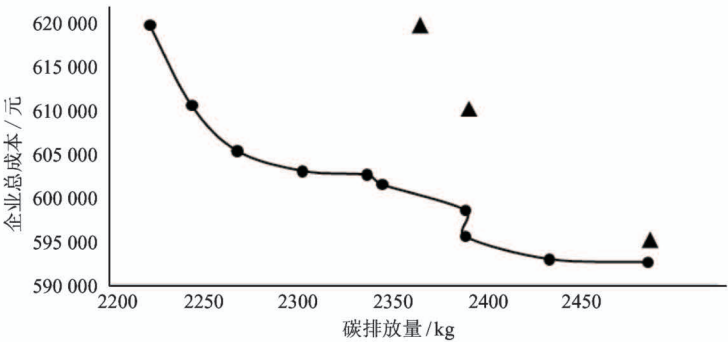


图 4 两种方法求解的结果比较

由图 4 中帕累托曲线可知,企业总成本和碳排放量是一对相互对立的目标,一个目标增大将导致另一个目标的减小,曲线上的各点都是企业总成本和碳排放量的非劣组合。当选址目标以企业总成本最小为主时,可在曲线下半支选择;选址目标以碳排放量最小为主时,可在曲线上半支选择。此处,以企

业总成本为主,碳排放量为辅,结果选择回收处理中心 1 和回收处理中心 9。对应的目标函数值企业总成本为 592 501.88 元,碳排放量为 2483.24 kg。具体运输方案如表 5 和表 6 所示。对于回收处理中心的选择,从政府的角度分析,虽然处理中心 1 的建设成本较高,但其处于中心位置,有利于降低碳排放

表 5 回收站点到备选处理中心运量表/kg

回收站点 备选 处理中心	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	493	0	419	499	602	723	0	0	0	314	0	0	0	304	624	497	19	485
9	0	584	0	0	0	0	532	626	615	0	388	408	22	0	0	0	0	0

表 6 备选处理中心到再分销点运量表/kg

再分销点备选 处理中心	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	554	520	297	705	729	762	0	0	620	0	59	0	0	128
9	0	0	448	0	21	38	205	650	0	595	446	250	150	372

量。回收处理中心 9 也位于中部位置,可以更好地覆盖大部分回收站点和再分销点;从企业角度分析,回收处理中心 9 的建设成本较低,会使企业的运输成本更低。该结果综合考虑了经济目标和环境目标,使得系统最优。

通过以上分析可知,使用两种求解方法得到了两种不同的选址方案,但两个目标函数值的差别不大。从目标值的角度分析,发现使用 NSGA-Ⅱ 算法得到的两个目标函数值更小,即可以得到更优的选址方案。但通过 NSGA-Ⅱ 算法得到的结果需要经过灵敏度分析来验证其结果的有效性和稳定性。在使用 Lingo 求解时,由于不同的权重分配会影响回收处理中心的选择方案,决策者在权重分配时往往存在主观判断,从而影响结果的客观性。

4.2.2 灵敏度分析

针对本算例,分析改变遗传参数对最优解进化过程的影响。更改遗传交叉概率 CP 与遗传变异概率 MP 的取值,在选址决策为回收处理中心 1 和 9 的背景下,对其最优值的变化进行分析,验证得到的帕累托解的稳定性。具体分析如下所示。

图 5 和图 6 表示当 $MP=0.05$ 不变时,将 CP 由 0.6 分别调整为 0.7 和 0.8 时,最优解的进化过程的比较。图 5 中横坐标表示进化代数,纵坐标表示企业总成本。图 6 中横坐标表示进化代数,纵坐标表示碳排放量。观察发现在改变交叉概率的情况下,当运行程序到第 350 代时,不同情况下的最优解均达到稳定。 $CP=0.7$ 时,对应的目标函数值企业总成本为 589 433.13 元,误差为 0.51%;碳排放量为 2503.22 kg,误差为 0.80%。 $CP=0.8$ 时,对应的目标函数值企业总成本为 591 759.38 元,误差为 0.13%;碳排放量为 2495.12 kg,误差为 0.48%。

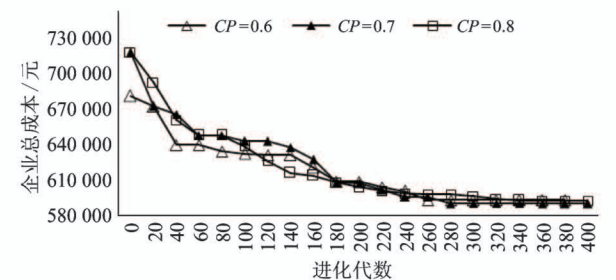


图 5 不同 CP 下最优解中企业总成本的进化过程

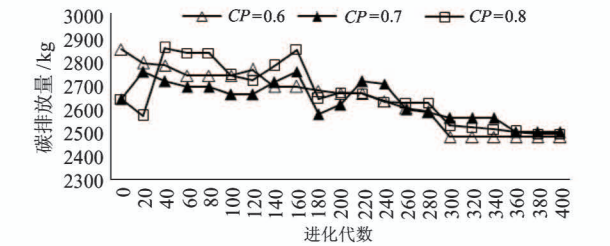


图 6 不同 CP 下最优解中碳排放量的进化过程

图 7 和图 8 表示当 $CP=0.6$ 不变时,将 MP 由 0.05 分别调整为 0.06 和 0.07 时,最优解的进化过程的比较。图 7 中横坐标表示进化代数,纵坐标表示企业总成本。图 8 中横坐标表示进化代数,纵坐标表示碳排放量。观察发现在改变变异概率的情况下,当运行程序到第 300 代时,不同情况下的最优解均达到稳定。 $MP=0.06$ 时,对应的目标函数值企业总成本为 592 425.88 元,误差为 0.08%;碳排放量为 2489.25 kg,误差为 0.24%。 $MP=0.07$ 时,对应的目标函数值企业总成本为 591 448.38 元,误差为 0.17%;碳排放量为 2492.40 kg,误差为 0.37%。

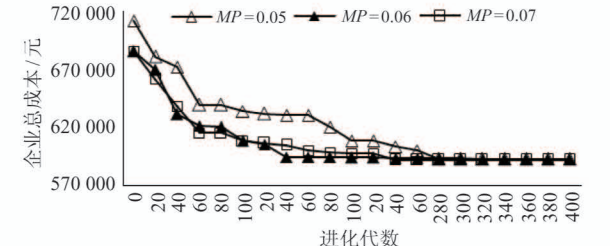


图 7 不同 MP 下最优解中企业总成本的进化过程

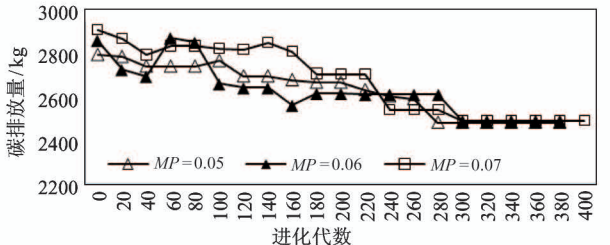


图 8 不同 MP 下最优解中碳排放量的进化过程

通过分析可知,当固定变异概率,交叉概率发生变化,或者当固定交叉概率,变异概率发生变化情况下,在同样决策选址背景下,得到的相应两个最优解取值之间的误差很小,仅仅是迭代的中间过程产生一定的变化。由此可见,本文设计的遗传算法是合

理有效的,能够求解出模型的近似最优解。

5 结 论

以往对于正逆向物流网络选址问题的研究多是对成本最小或是收益最大的单目标的研究,或者基于顾客需求和企业成本的双目标选址研究。本文基于环境效益与经济效益双目标,不仅考虑企业的总运营成本,包括建设成本和运输成本,而且从政府角度出发使碳排放量最小,建立了混合整数的双目标选址模型。本文建立的回收处理中心选址模型从回收市场到再分销市场综合考虑的基础上包括了第二次配送的正向网络,最后通过算例验证了模型的可行性,得到的结果解决了具体的回收处理中心的选址问题,并且得到了具体的运输方案。由于现实中选址和路径的选择受到较多因素的影响,未来可考虑更多不确定因素情况下的正逆向回收物流网络优化问题的研究。

参考文献

- [1] Mansour S, Zarei M. A multi-period reverse logistics optimisation model for end-of-life vehicles recovery based on EU directive[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2008, 21(7):764-777
- [2] Guo J, Wang X, Fan S. Forward and reverse logistics network and route planning under the environment of low-carbon emissions[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 106(C):351-360
- [3] 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

- [4] Fan S, Xu X, Liang C. Construction of forward and reverse logistics network and route planning of fresh food E-commerce enterprises[C]//IEEE International Conference on E-Business Engineering, Beijing, China, 2015: 160-165
- [5] Kumar V N S A, Kumar V, Brady M, et al. Resolving forward-reverse logistics multi-period model using evolutionary algorithms[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 183(5):356-370
- [6] 严南南,李明. 基于低碳的报废汽车逆向物流网络选址问题研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(5):180-184
- [7] 黄瑞,严凌,张振栋. 低碳经济下逆向物流回收网络优化研究[J]. *物流科技*, 2017, 40(11):67-71
- [8] 姜芳,郭建全. 多目标多周期多阶段逆向物流网络动态联建[J]. *上海理工大学学报*, 2018, 40(3):274-281
- [9] 周向红,成思婕,成鹏飞. 自营回收模式下再制造逆向物流网络多周期多目标选址规划[J]. *系统工程*, 2018, 9(2):47-56
- [10] Shih L H. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2001, 32(1):55-72
- [11] 马祖军,代颖. 产品回收逆向物流网络优化设计模型[J]. *管理工程学报*, 2005, 19(4):114-117
- [12] 胡悦,罗亚波,李霞. 基于混合算法的不确定环境下逆向物流网络设计研究[J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(1):78-83
- [13] 李锐,黄敏,王兴伟. 多周期的第四方物流弹性正逆向集成网络设计模型与算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(4):892-903
- [14] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197
- [15] 王林,叶小侠. 基于 Lingo 语言求解物流配送中心选址模型[J]. *物流技术*, 2008, 27(10): 113-115
- [16] 陈婕,熊盛武,林婉如. NSGA-II 算法的改进策略研究[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(19):42-45

Location of recycling process centers in a forward and reverse logistics network based on NSGA- II algorithm

Yang Xiwen, Zheng Jianfeng, Xing Liyuan

(School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000)

Abstract

For the environmental protection and transportation cost reduction, the hub location problem should consider multiple objectives. From the perspective of government and enterprises, this paper proposes a hub location problem to investigate the location of recycling process centers in a forward and reverse logistics network. The carbon emissions generated during the cargo transportation are quantified. A dual-objective model is presented for the proposed problem to balance the economic objective and the environmental objective. Lingo 11.0 and NSGA- II algorithm are presented to solve the dual-objective model. A case study is provided for Dalian. To verify the feasibility and stability of NSGA- II algorithm, a number of sensitivity analyses are given.

Key words: reverse logistics, forward logistics, dual objective model, location of recycling process center