

# 基于遗传算法的再制造逆向物流网络随机选址模型

孙浩

(东南大学经济管理学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 针对再制造逆向物流网络不确定性高的特点, 建立了一个混合整数非线性规划 (mixed integer nonlinear programming, MINLP) 的随机选址模型. 模型中将回收中心和再制造工厂分别看作具有  $M/M/1$  和  $M/M/c$  特征的随机排队系统, 考虑了废旧产品在系统中的逗留时间和库存费用. 然后提出一种双层遗传算法进行求解: 用外层遗传算法搜索 0-1 整型变量的可行组合, 用内层遗传算法解决剩余的运输子问题. 最后通过一个算例说明了模型和算法的有效性.

**关键词:** 再制造; 设施选址; 排队论; 双层遗传算法

**中图分类号:** F252.9

**文献标识码:** A

## A Stochastic Location Model for Remanufacturing Reverse Logistics Network Based on Genetic Algorithm

SUN Hao

(School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on the characteristic of high uncertainty in remanufacturing reverse logistics networks, a stochastic location model for mixed integer nonlinear programming (MINLP) is built, in which return centers and remanufacturing factories are seen as stochastic queuing systems that are of characteristics of  $M/M/1$  and  $M/M/c$  respectively. Cycle time and inventory costs of the old products in the system are taken into account. Then a bi-level genetic algorithm is proposed. The feasible combinations of 0-1 binary variables are searched by the outer genetic algorithm and the remaining transportation sub-problems are solved by the inner genetic algorithm. Finally, an example is given to prove the validity of the model and algorithm.

**Keywords:** remanufacturing; facility location; queuing theory; bi-level genetic algorithm

### 1 引言 (Introduction)

再制造是指通过必要的拆卸检修和零部件更换等, 将废旧产品恢复得如同新产品的过程, 适用于汽车、计算机、打印机、复印机、手机、电视机、电冰箱、空调器、洗衣机、轮胎、印刷电路板等众多产品. 面对有限的资源和废弃物处理能力, 再制造作为一种产品回收处理的高级形式, 可以有效实现资源优化利用、环境保护和经济可持续发展的综合目标. 因此, 再制造已经受到工业发达国家的高度重视, 成为实现可持续发展最有效的途径之一.

再制造过程包括以下步骤<sup>[1]</sup>: 收集、检测和分类、再制造、废弃处置、再分销, 其网络结构具有分散、复杂、多层次、闭环、确定性低的特点<sup>[2]</sup>. 求解再制造逆向物流网络中的设施选址问题一般包括确定生产厂、再制造工厂、回收中心等设施的数量、位

置和规模, 所建模型的目标函数是从运行周期的角度要求各类费用 (包括设施投资费用、运输费用、仓储费用、废旧品处理费用等) 之和最小或总利润最大, 约束条件则包括物流运输的平衡约束、生产处理能力约束、库存容量限制约束、设备数量约束以及决策变量的非负约束或非负整数约束.

从已有的研究来看, 大部分文献从不同的角度建立了确定型再制造逆向物流网络的设施选址优化模型<sup>[3~8]</sup>. 然而, 再制造逆向物流网络与传统的生产分销网络最大的区别就在于废旧产品的回收时间、地点和质量的不确定性以及其他动态因素等<sup>[1]</sup>. 文 [9~12] 建立了模糊或随机规划选址模型来反映其不确定性. Listes 等在考虑了市场需求的不确定以及回收产品的数量、质量不确定的情况下, 建立了一个通用的再制造产品回收网络的随机模型, 然

后用拉格朗日松弛法进行求解<sup>[9]</sup>。同年, Salema 等在上述模型的基础上, 将单产品发展为多产品<sup>[10]</sup>。顾巧论<sup>[11]</sup>将废旧产品的回收数量看成是模糊参数, 提出了制造/再制造集成物流网络的模糊机会约束规划模型。马祖军<sup>[12]</sup>考虑了产品需求量和废旧产品回收量的随机性, 提出了一种制造/再制造集成物流网络的两阶段补偿随机规划模型。但以上模型重点依据回收品数量和质量的不确定性来构建模型, 求解过程也是先将模糊或随机模型清晰化, 最终求解确定型的混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 模型。

Lieckens 等提出了一个与以上都完全不同的模型, 该模型用具有  $G/G/1$  特征的排队论模型来描述废弃物品从多个收集点运往少量回收处理中心的动态过程, 其中考虑了某些随机动态因素, 包括废旧品在回收网络的逗留时间、实施再制造的提前期等。但文章只用差异进化 (differential evolution, DE) 算法解决了单层次的再制造产品回收网

络的选址问题<sup>[13]</sup>。

本文在以上研究的基础上, 首先用具有  $M/M/1$  和  $M/M/c$  特征的经典排队论模型建立了多层次再制造产品回收网络的混合整数非线性规划 (MINLP) 选址模型。然后针对模型的非线性特征, 提出双层遗传算法进行求解。最后通过算例说明了模型和算法的有效性。

## 2 模型 (Model)

考虑以下再制造逆向物流网络的设施选址问题, 如图 1 所示。网络中包含消费地、回收中心、再制造工厂以及二手市场, 其具体运作过程如下: 在消费地产生的废旧品运往回收中心, 回收中心对其进行检测和分类, 一部分不可再制造的废旧品被丢弃, 剩余的可再制造部分运往再制造工厂进行再制造后, 在二手市场进行销售。当二手市场与原消费地重合时, 该再制造物流网络是闭环结构的; 反之, 当二手市场与原消费地分离时, 则是开环结构的。

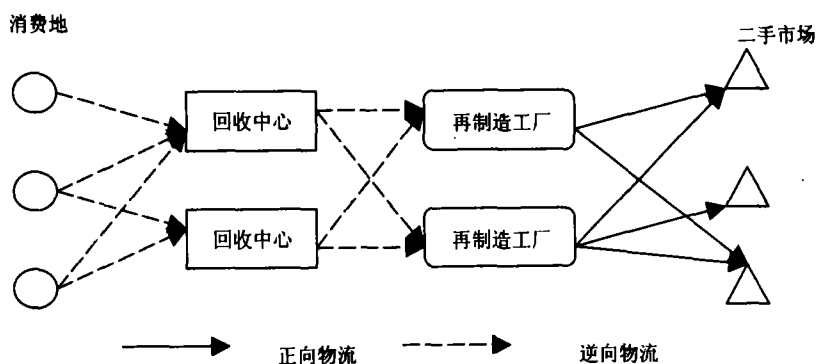


图 1 再制造逆向物流网络结构图

Fig.1 The structure of remanufacturing reverse logistic network

### 2.1 假设条件

建模时, 作如下假设:

(1) 只考虑单产品、单周期的情况, 将逆向物流作为周期起点。

(2) 假设处理设施为租用, 且回收中心和再制造工厂均有 3 种规模可供选择, 分别对应不同的检测能力和再制造能力。

(3) 消费地和二手市场的位置已知, 回收中心和再制造工厂需要在各自备选地中选择。

(4) 制造企业需对消费地未回收的废旧品和二手市场需求未满足的部分支付惩罚费用。

(5) 各类备选物流设施间的单位运输费用已知, 总运输费用是运输量的线性函数。

(6) 废旧品的产生服从泊松分布, 回收中心的检测时间和再制造工厂的再制造时间服从负指数分

布, 且由于本文主要用排队理论探讨废旧产品在回收中心和再制造工厂的逗留时间及平均库存量, 所以忽略了运输时间, 同文 [13]。

### 2.2 模型参数和变量

#### (1) 模型参数

$I = \{1, \dots, i, \dots, I_{\max}\}$ , 为消费地集合;  $J = \{1, \dots, j, \dots, J_{\max}\}$ , 为回收中心备选地集合;  $K = \{1, \dots, k, \dots, K_{\max}\}$ , 为再制造工厂备选地集合;  $M = \{1, \dots, m, \dots, M_{\max}\}$ , 为二手市场集合;  $F_j(q)$  和  $F_k(q)$  是在备选地  $j$  或  $k$  租用规模  $q$  的回收中心或再制造工厂的固定费用, 且分别对应最大检测能力和再制造能力  $C_j(q)$  和  $C_k(q)$  (其中  $q = 1, 2, 3$ , 代表小、中、大 3 种规模, 以下意义相同);  $c_j^h$  和  $c_j^r(q)$  分别为废旧产品在回收中心  $j$  的单位库存费用和在规模为  $q$  时的检测费用;  $c_k^h$  和  $c_k^r(q)$  分别为废旧产品在再制

造工厂  $k$  的单位库存费用和在规模为  $q$  时的再制造费用;  $c_{ij}$ 、 $c_{jk}$  和  $c_{km}$  分别为从消费地到回收中心、回收中心到再制造工厂以及再制造工厂到二手市场的单位运输费用;  $\gamma_j$  为回收中心的丢弃率, 其最小值为  $\gamma_{\min}$ ;  $f_i$  为单位时间内在消费地  $i$  废旧品的产生频率, 服从均值为  $f_i$  的泊松分布,  $c_i^w$  为在消费地  $i$  未回收废旧产品的单位惩罚费用;  $D_m$  为单位时间内二手市场  $m$  对再制造产品的需求量;  $c_m^u$  为未满足二手市场  $m$  需求的单位惩罚费用;  $c_j^d$  为在回收中心  $j$  的单位丢弃费用.  $p_m$  为二手市场再制造产品的价格, 假设回收中心是单服务台的  $M/M/1/\infty$  排队系统, 再制造工厂是多服务台的  $M/M/c/\infty$  排队系统 [14,15].

## (2) 变量

$X_{ij}$  为单位时间内从消费地  $i$  运往回收中心  $j$  的废旧品数量;  $X_{jk}$  为单位时间内从回收中心  $j$  运往再制造工厂  $k$  的可再制造废旧品数量;  $X_{km}$  为单位时间内从再制造工厂  $k$  运往二手市场  $m$  的再制造产品数量;  $w_i$  为需求地  $i$  的废旧产品未回收的比重;  $u_m$  为二手市场  $m$  中未满足需求的比重;  $Y_j(q) = 0$  或 1, 如果在备选地  $j$  建立规模为  $q$  的回收中心, 则  $Y_j(q) = 1$ , 否则  $Y_j(q) = 0$ ;  $Z_k(q) = 0$  或 1, 如果在备选地  $k$  建立规模为  $q$  的再制造工厂, 则  $Z_k(q) = 1$ , 否则  $Z_k(q) = 0$ ;  $E(N_j^L)$  和  $E(N_k^H)$  分别为回收中心和再制造工厂的期望库存量, 即排队论中的平均队长.

目标函数:

$$\begin{aligned} \max \quad & p_m \cdot \sum_k \sum_m X_{km} \\ & - (\sum_j \sum_q F_j(q) \cdot Y_j(q) + \sum_k \sum_q F_k(q) \cdot Z_k(q)) \\ & + \sum_j \sum_q (c_j^h(q) \cdot E(N_j^L) + c_j^l(q) \cdot \sum_i X_{ij}) \\ & + \sum_k \sum_q (c_k^h(q) \cdot E(N_k^H) + c_k^r(q) \cdot \sum_j X_{jk}) \\ & + \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot X_{ij} + \sum_j \sum_k c_{jk} \cdot X_{jk} + \sum_k \sum_m c_{km} \cdot X_{km} \\ & + \sum_i c_i^w f_i w_i + \sum_m c_m^u D_m u_m + \sum_j c_j^d X_j^d \end{aligned} \quad (1)$$

约束条件:

(1) 设施处理约束:

$$f_i \cdot (1 - \omega_i) = \sum_j X_{ij} \quad \forall i \quad (2)$$

$$\gamma_j \cdot \sum_i X_{ij} = X_j^d \quad \forall j \quad (3)$$

$$\gamma_j \geq \gamma_{\min} \quad \forall j \quad (4)$$

$$(1 - \gamma_j) \cdot \sum_i X_{ij} = \sum_k X_{jk} \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_j X_{jk} = \sum_m X_{km} \quad \forall k \quad (6)$$

(2) 需求约束:

$$\sum_k X_{km} = D_m (1 - u_m) \quad \forall m \quad (7)$$

(3) 能力约束:

$$\sum_i X_{ij} \leq \sum_q C_j(q) Y_j(q) \quad \forall j \quad (8)$$

$$\sum_q Y_j(q) \leq 1 \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_j X_{jk} \leq \sum_q C_k(q) Z_k(q) \quad \forall k \quad (10)$$

$$\sum_q Z_k(q) \leq 1 \quad \forall k \quad (11)$$

(4) 逻辑约束:

$$q \in \{1, 2, 3\} \quad (12)$$

$$Y_j(q), Z_k(q) \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall k, \forall q \quad (13)$$

$$X_{ij}, X_{jk}, X_{km} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (14)$$

$$0 \leq \omega_i \leq 1, 0 \leq u_m \leq 1 \quad \forall i, \forall m \quad (15)$$

式 (1) 是目标函数, 表示再制造总利润最大化, 即用二手市场的销售额减去总费用 (包括设施的租用费用、库存费用、检测和再制造费用、运输费用、丢弃费用以及未回收或未满足需求的惩罚费用). 式 (2)~(6) 是设施处理平衡约束: 约束 (2) 表示消费地  $i$  回收的废旧产品运往各回收中心, 约束 (3) 表示经回收中心  $j$  检测的不可再制造的废旧品数量, 约束 (4) 表示回收中心  $j$  的丢弃率不小于最小丢弃率, 约束 (5) 表示经回收中心  $j$  检测的可再制造产品均运往各再制造工厂进行再制造, 约束 (6) 表示再制造品在二手市场销售. 式 (7) 是二手市场的需求平衡约束. 式 (8)~(11) 是设施服务能力约束: 约束 (8)、(9) 表示为避免系统膨胀, 回收中心的单位时间检测能力不小于其到达率, 且在任一回收中心备选地  $j$  只能选择一种规模; 同样, 约束 (10)、(11) 表示再制造工厂的单位时间再制造能力不小于其到达率, 且在任一再制造工厂备选地  $k$  也只能选择一种规模. 约束 (12)~(15) 分别限定了决策变量的取值范围或非负约束 (非负整数约束).

## 2.3 废旧品在回收再制造设施中的期望逗留时间与平均队长

在本文  $M/M/1/\infty$  和  $M/M/c/\infty$  排队系统中, 回收中心到达率  $\lambda_j^L = \sum_i X_{ij}$ , 服务率  $\mu_j^L = \sum_q C_j(q) Y_j(q)$ ; 再制造工厂到达率  $\lambda_k^H = \sum_j X_{jk}$ , 服务率  $\mu_k^H = \sum_q C_k(q) \cdot Z_k(q) / c$ .

回收中心  $M/M/1/\infty$  系统期望逗留时间  $\bar{W}_j^L$  及平均队长  $\bar{N}_j^L$  为:

$$\bar{W}_j^L = \frac{1}{\mu_j^L - \lambda_j^L} = \frac{1}{\sum_q C_j(q)Y_j(q) - \lambda_j^L}, \quad \bar{N}_j^L = \frac{\rho_j^L}{1 - \rho_j^L}$$

其中  $\rho_j^L = \frac{\lambda_j^L}{\mu_j^L}$ .

再制造工厂  $M/M/c/\infty$  系统期望逗留时间及平均队长  $\bar{N}_k^H$  为:

$$\bar{W}_k^H = \frac{\rho_c}{\lambda_k^H(1 - \rho_c)^2} \cdot p_c + \frac{1}{\mu_k^H} = \frac{\rho_c}{\lambda_k^H(1 - \rho_c)^2} \cdot p_c + \frac{1}{\sum_q C_k(q)Z_k(q)}$$

$$\bar{N}_k^H = \rho_k^H \bar{W}_k^H$$

上面等式中,  $p_0 = (\sum_{s=0}^{c-1} \frac{(\rho_k^H)^s}{s!} + \frac{c(\rho_k^H)^c}{c!(1 - \rho_k^H)})^{-1}$ ,  $p_c =$

$$\begin{cases} \frac{1}{c!} (\rho_k^H)^c p_0 & s \leq c \\ \frac{1}{c!c^{s-c}} (\rho_k^H)^c p_0 & s > c \end{cases}, \quad \rho_k^H = \frac{\lambda_k^H}{\mu_k^H}, \quad \rho_c = \frac{\lambda_c^H}{c\mu_k^H}.$$

特别地, 当  $c = 2$  时,  $\bar{W}_k^H = \frac{4\mu_k^H}{4(\mu_k^H)^2 - (\lambda_k^H)^2}$ ,  $\bar{N}_k^H = \frac{4\rho_k^H}{4 - (\rho_k^H)^2}$ .

### 3 再制造物流网络设施选址模型的双层遗传算法 (Bi-level genetic algorithm for facility-location model of remanufacturing logistics network)

用双层遗传算法求解再制造网络设施选址模型的主要思想是: 用外层遗传算法搜索 0-1 整型变量的最优解或满意解, 0-1 变量一旦确定, 则问题变成非线性规划 (non-linear programming, NLP), 可嵌套内层遗传算法来求解最优的运输方案.

#### 3.1 外层编码

采用自然数编码方式对离散变量  $Y_j(q), Z_k(q)$  进行编码, 每个染色体用如下代码串表示:  $[Y'_1, \dots, Y'_j, \dots, Y'_{j_{\max}} | Z'_1, \dots, Z'_k, \dots, Z'_{k_{\max}}]$ , 其中,  $Y'_j = \max_q \{Y_j(q) \cdot q\}$ ,  $Z'_k = \max_q \{Z_k(q) \cdot q\}$ . 例如由 3 个回收中心和 2 个再制造工厂备选地构成的一个染色体可能为 [302|13], 则该染色体对应的网络结构为: 对回收中心而言, 备选地 1, 3 分别租用大规模和中规模的回收中心, 不选用备选地 2; 对再制造工厂而言, 备选地 1, 2 分别租用小规模和大规模的再制造工厂. 在外层编码时, 要保证解的可行性, 需满足以下设施能力约束:

(1) 单位时间内所有回收中心的检测能力总和大于所回收的废旧品数量, 即

$$\sum_{j \in J} \mu_j^L > \sum_{i \in I} f_i \cdot (1 - w_i) \quad (16)$$

(2) 单位时间内所有再制造工厂的再制造能力总和大于经检测的可再制造产品数量, 即

$$\sum_{j \in J} \mu_k^H > \sum_{i \in I} (1 - \max(\gamma_j)) \cdot f_i \cdot (1 - w_i) \quad (17)$$

### 3.2 内层编码、适应度计算及遗传操作

#### 3.2.1 编码

在确定以上各个整型变量以后, 约束 (9) 和 (11) 得到满足, 模型转化为非线性规划. 为了便于用内层遗传算法来继续求解, 将数量变量  $X_{ij}, X_{jk}$  转化为比率变量  $R_{ijk}$ : 即对于  $\forall i$ , 令  $R_{ijk} = \frac{X_{ij}}{f_i(1 - w_i)} \cdot \frac{X_{jk}}{\sum_k X_{jk}} (\forall j, \forall k)$ ,  $0 \leq R_{ijk} \leq 1$ ,  $\sum_k \sum_j R_{ijk} = 1$ .

通过以上变量的转换, 可得出以  $R_{ijk}$  为决策变量的等价模型, 且式 (2)、(5)~(7) 的流量平衡约束得到了满足.

为了提高解的可行性, 在编码时考虑到如果没有选中某一备选地  $j$  或  $k$  作为回收中心或再制造工厂, 则相应的连续型变量  $R_{ijk}$  必为 0, 所以只需再随机产生那些非零的  $R_{ijk}$  即可. 设选中的回收中心编号为  $j_1, \dots, j_M (1 \leq j_1 \leq \dots \leq j_M \leq J_{\max})$ , 选中的再制造工厂编号为  $k_1, \dots, k_P (1 \leq k_1 \leq \dots \leq k_P \leq K_{\max})$ , 其中  $P$  和  $M$  为所选中的回收中心和再制造工厂的个数. 则随机产生  $w_i = \text{rand}(0, 1)$  后, 令  $R_{ij_1k_1} = \text{rand}(0, 1)$ ,  $R_{ij_2k_1} = \text{rand}(0, 1) \cdot (1 - R_{ij_1k_1})$ , 依此类推, 最后得  $R_{ij_Mk_P} = 1 - (\sum_{k=k_1}^{k_{P-1}} \sum_{j=j_1}^{j_M} R_{ijk} + \sum_{j=j_1}^{j_{M-1}} R_{ij_kP})$ , 这样就能保证在初始化时满足  $\sum_k \sum_j R_{ijk} = 1$ . 其中, 为便于处理, 对于  $R_{ijk}$  采取文 [16] 提出的 0-1 二进制表示形式, 即将  $[0, 1]$  的连续型变量  $R_{ijk}$  离散化处理. 具体位数按精度要求确定, 本文设为 6 位有效数字.

#### 3.2.2 适应度计算

$R_{ijk}$  确定以后, 各再制造工厂的处理量也可以确定, 可通过表上作业法求解此时由再制造工厂到二手市场的最优运输方案  $X_{jk}$  (需考虑二手市场再制品的零售价格), 进而求出系统的总利润. 另外,  $R_{ijk}$  的确定可能违背式 (8) 和 (10) 的设施能力约束, 在此采用罚函数的形式反映在目标函数中, 惩罚系数的大小需适中. 若选取的惩罚系数过大, 则会带来寻找可行解集的巨大压力, 从而遗漏一些在可行域边缘使目标函数值较优的非可行解; 若选取

的惩罚系数过小，则会在一定程度上混淆可行解与非可行解。

3.2.3 遗传操作

选择：采用轮盘赌选择法，即第  $l$  个染色体的选择概率为  $F_l / \sum_{l=1}^L F_l$ ，并采用最佳保留策略。其中  $L$  为种群数量， $F_l$  为第  $l$  个个体的目标函数值。

交叉和变异：采用两点交叉方式，即对于两个选中的父体，随机产生两个交叉点，交换交叉点处的基因。采用单点变异方式，随机产生某一变异点，将其值由 0 变为 1 或由 1 变为 0，交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  的取值采用文 [7] 提出的自适应策略。

在以上遗传操作过程中，对于  $\forall i$ ，为保证  $\sum_k \sum_j R_{ijk} = 1$  的成立，只选取前  $P \times M - 1$  个非零连续型变量进行交叉和变异，然后令  $R_{ijMkp} = 1 - (\sum_{k=k_1}^{k_{p-1}} \sum_{j=j_1}^{j_M} R_{ijk} + \sum_{j=j_1}^{j_{M-1}} R_{ijk_p})$ 。而对于可能出现  $\sum_{k=k_1}^{k_{p-1}} \sum_{j=j_1}^{j_M} R_{ijk} + \sum_{j=j_1}^{j_{M-1}} R_{ijk_p} > 1$  的情况，采取修补策略 1 来保证其可行性：按归一化原则 [8] 使  $R'_{ijk} = R_{ijk} / (\sum_{k=k_1}^{k_{p-1}} \sum_{j=j_1}^{j_M} R_{ijk} + \sum_{j=j_1}^{j_{M-1}} R_{ijk_p})$ ， $R'_{ijMkp} = 0$ 。

3.3 外层遗传操作

与内层遗传算法不同，外层遗传算法是对离散变量进行编码，但相关的遗传操作差别不大，在此不再赘述。而经外层遗传算法进化后的染色体，也可能出现以下不可行的情况，即约束 (16) 和 (17) 的设施能力约束不能得到满足，则采取修补策略 2 来保证其可行性：随机增加新的备选点，或者将较小规模的设施换成较大规模的设施，直到满足能力约束为止。

3.4 伪代码

```
整个算法的伪代码如下：
Input(); // 读取数据：
generation=0; // 赋外层遗传算法迭代代数
初值：
Code(); // 用自然数编码方式对整型变量进行编码；
Evaluate(); // 用内层遗传算法求解剩余的运输子问题，该运输方案作为外层遗传算法的适应度值；
Keep the best; // 当代最佳保留；
While (不满足迭代代数)
{Generation++;
Select(); // 选择
Crossover(); // 交叉
Mutation(); // 变异
Modification(); // 修补
Evaluate();
Elitist();} // 历史最佳保留
Output(); // 输出结果
```

4 例子 (Examples)

选用了文 [13] 的部分数据，假设消费地和二手市场重合，并根据本文的模型进行了补充，其中回收中心和再制造工厂分别是具有  $M/M/1$  和  $M/M/2$  的随机服务系统。其它参数如表 1~6 所示。

表 1 消费地 (二手市场) 的相关参数  
Tab.1 Related parameters of customer zones (secondary market)

	$f_i$	$c_i^w$	$D_m$	$c_m^u$	$p_m$
1	60	27.5	30	0.5	100
2	35	27.5	60	0.5	80

表 2 备选回收中心的相关参数  
Tab.2 Related parameters of potential return centers

	$C_j(1)/F_j(1)$	$C_j(2)/F_j(2)$	$C_j(3)/F_j(3)$	$c_j^d(1)$	$c_j^d(2)$	$c_j^d(3)$	$c_j^h$	$\gamma_j$	$c_j^d$
1	30/200	50/400	60/500	0.55	0.45	0.35	73	0.1	0.50
2	30/150	50/300	60/385	0.4	0.35	0.3	54.75	0.1	0.25
3	30/225	50/450	60/575	0.3	0.25	0.2	91.25	0.1	0.75

表 3 备选再制造工厂的相关参数  
Tab.3 Related parameters of potential remanufacturing factories

	$C_k(1)/F_k(1)$	$C_k(2)/F_k(2)$	$C_k(3)/F_k(3)$	$c_k^r(1)$	$c_k^r(2)$	$c_k^r(3)$	$c_k^h$
1	35/400	45/525	55/650	4	3	2	120
2	30/450	50/550	60/725	3.5	2.5	1.5	150

用 VB 6.0 编写了双层遗传算法的程序, 在 Pentium 4 2.4G 处理器、512M 的环境下对上述算例进行了测试. 经反复试验后, 确定外层遗传算法参数取值为: 种群规模为 10, 最大迭代次数为 50, 交叉概率 0.6, 变异概率 0.1; 内层遗传算法参数取值为: 种群规模取 100, 最大迭代次数  $K=400$ , 较差染色体的交叉概率为  $P_{c0}=0.8$ , 较优染色体的交叉概率为  $P_{c1}=0.3$ , 较差染色体的变异概率为  $P_{m0}=0.5$ , 较优染色体的变异概率为  $P_{m1}=0.2$ . 用以上参数进行模拟, 得系统最优利润为 3217.928, 具体变量的结果如表 7 和表 8 所示.

表 4 从消费地到备选回收中心的单位运输费用  
Tab.4 Unit transportation costs between customer zones and potential return centers

<div><div></div><div></div></div>	$j_1$	$j_2$	$j_3$
$i_1$	6	10	6.25
$i_2$	2.4	9	2.55

表 8 连续型变量的最优解  
Tab 8 Optimal solutions of continuous variables

$i \rightarrow j$			$i \rightarrow k$			$k \rightarrow m$		
<div><div><math>i</math></div><div><math>j</math></div></div>	1	2	<div><div><math>j</math></div><div><math>k</math></div></div>	1	2	<div><div><math>k</math></div><div><math>m</math></div></div>	1	2
1	46.113	13.887	1	41.501	0	1	30	11.501
2	0	35	2	0	43.999	2	0	43.999

从以上结果可以看出, 运往回收中心 1 和 2 的废旧品总量分别为 46.113 和 48.887. 尽管只需租用中等规模的回收中心即可满足能力约束, 但废旧品在大规模回收中心处的逗留时间短、库存费用少, 弥补了多支付的租用费用.

最后, 比较了 Lingo 软件、单层遗传算法以及本文双层遗传算法的效率.

表 9 不同算法的比较  
Tab 9 Comparison of different algorithms

	平均运行时间	最优目标值	平均目标值
单层 GA	1816 s	3216.147	3120.454
双层 GA	3367 s	3217.928	3159.667
Lingo 软件	32634 s	3218.251	3218.251

从表 9 可以看出: (1) Lingo 软件利用分枝定界法求解, 在求解时间上大大超过其他智能算法; (2) 由于单层遗传算法将整型变量及连续型变量同时进行编码, 所以在计算时间上比本文的双层遗传算法短; (3) 双层遗传算法采用双层次编码, 牺牲了计算

表 5 从备选回收中心到备选再制造工厂的单位运输费用  
Tab.5 Unit transportation costs between potential return centers and potential remanufacturing factories

<div><div></div><div></div></div>	$j_1$	$j_2$	$j_3$
$k_1$	2.587	4.987	9.021
$k_2$	8.79	2.567	3.671

表 6 从消费地到备选再制造工厂的单位运输费用  
Tab.6 Unit transportation costs between customer zones and potential remanufacturing factories

<div><div></div><div></div></div>	$k_1$	$k_2$
$i_1$	9.219	7.19
$i_2$	8.062	3.776

表 7 非零整型变量的最优解  
Tab 7 Optimal solutions of non-zero binary variables

$Y_1(3)$	$Y_2(3)$	$Z_1(2)$	$Z_2(2)$
1	1	1	1

时间, 但其优点在于当整型变量确定后, 其求解精度比单层遗传算法要高.

5 结论 (Conclusion)

本文引入排队理论建立了一个再制造逆向物流网络的随机选址模型, 将回收中心和再制造工厂分别看作具有  $M/M/1$  和  $M/M/c$  特征的随机服务系统, 重点考虑了废旧产品在回收中心和再制造工厂处理时的逗留时间. 由于该模型属于典型的混合整数非线性规划问题, 求解难度较大, 所以又设计了双层遗传算法进行求解, 算例表明该算法的有效性. 未来的研究方向是结合我国制造企业的实际情况进行建模和分析.

参考文献 (References)

[1] Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard J M, Dekker R, et al. Quantitative models for reverse logistics: A review[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 103(1): 1~17.  
[2] 肖文. 产品回收再利用物流网络的特征及其分类 [J]. 物流技术, 2004, (2): 39~41.

(下转第 233 页)

声,又能较好地保留边缘,再用 DA-GMRF 模型进行图像分割,考虑了平滑约束在边缘处的自适应性,避免了过平滑,得到了较好的分割结果。

## 5 结论 (Conclusions)

双边滤波用于图像平滑,既考虑了空间域的关系,又考虑了灰度域的相互影响,是一种保留边缘的平滑技术。本文提出的多尺度双边滤波算法降低了单尺度双边滤波中参数选取的难度,改善了其平滑效果。对于噪声图像的分割,先用多尺度双边滤波算法进行噪声图像的预处理,再用 DA-GMRF 模型进行图像分割,能够取得较好的分割效果。

## 参考文献 (References)

- [1] Oppenheim V, Schafer R W, Buck J R. Discrete-Time Signal Processing[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.
- [2] Chan P, Lim J S. One-dimensional processing for adaptive image-restoration[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(1): 117~126.
- [3] Rank K, Unbehauen R. An adaptive recursive 2-D filter for removal of Gaussian noise in images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(3): 431~436.
- [4] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998. 836~846.
- [5] Pappas T N. An adaptive clustering algorithm for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(4): 901~914.
- [6] Liu J Q, Yang Y H. Multiresolution color image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(7): 689~700.
- [7] Andrey P, Tarroux P. Unsupervised segmentation of Markov random field modeled textured images using selectionist relaxation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(3): 252~262.
- [8] Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 721~741.
- [9] 乔琳,史泽林.一种基于 DA-GMRF 的无监督图像分割方法[J]. 光电工程, 2007, 34(10): 88~92.
- [10] 肖传民,史泽林,乔琳.一种基于 DA-STMRF 模型的运动目标分割方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(9): 2440~2442.
- [11] Barash D. A fundamental relationship between bilateral filtering, adaptive smoothing, and the nonlinear diffusion equation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(6): 844~847.
- [12] Elad M. On the origin of the bilateral filter and ways to improve it[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(10): 1141~1151.
- [13] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 257~266.

## 作者简介:

- 肖传民 (1978-), 男, 硕士生。研究领域为图像处理与自动目标识别。
- 乔琳 (1973-), 男, 博士生。研究领域为图像处理与自动目标识别。
- 史泽林 (1964-), 男, 研究员, 博士生导师。研究领域为图像处理与自动目标识别。

(上接第 228 页)

- [3] Krikke H R, Van Harten A, Schuur P C. Business case Océ: Reverse logistic network re-design for copiers[J]. OR Spektrum, 1999, 21(3): 381~409.
- [4] Jayaraman V, Guide V D R, Srivastava R. A closed-loop logistics model for remanufacturing[J]. Journal of the Operational Research Society, 1999, 50(5): 497~508.
- [5] Shin L H. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 32(1): 55~72.
- [6] Lu Z Q, Bostel N. A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(2): 299~323.
- [7] 代颖, 马祖军, 刘飞. 基于混合遗传算法的制造/再制造集成物流网络优化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(11): 1853~1859, 1875.
- [8] 周根贵, 曹振宇. 遗传算法在逆向物流网络选址问题中的应用研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(1): 42~47.
- [9] Listes O. A generic stochastic model for supply-and-return network design[J]. Computer & Operations Research, 2007, 34(2): 417~442.
- [10] Salema M I G, Barbosa-Povoa A P, Novais A Q. An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 179(3): 1063~1077.
- [11] 顾巧论, 季建华. 再制造/制造系统集成物流网络模糊机会约束规划模型[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 889~894.
- [12] 马祖军, 代颖, 刘飞. 制造/再制造集成物流网络设计的随机规划模型[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9): 902~906.
- [13] Lieckens K, Vandaele N. Reverse logistics network design with stochastic lead times[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(2): 395~416.
- [14] Toktay L B, Wein L M, Zenios S A. Inventory management of remanufacturable products[J]. Management Science, 2000, 46(11): 1412~1426.
- [15] Jr Guide V D R, Souza G C, van Wassenhove L N, et al. Time value of commercial product returns[J]. Management Science, 2006, 52(8): 1200~1214.
- [16] 黄小原, 卢震. 二级供应链模型及其在服务销售问题中的应用[J]. 系统工程理论方法应用, 2003, 12(3): 228~231.

## 作者简介:

- 孙浩 (1981-), 男, 博士生。研究领域为供应链管理, 逆向供应链管理。