

文章编号: 1001-0920(2008)01-0035-06

基于二阶段随机规划的回收物流网络优化设计研究

狄卫民

(西南交通大学 经济管理学院, 成都 610031)

摘要: 针对含有连续分布随机参数的回收物流网络优化设计问题, 结合抽样理论, 建立了由样本数量决定求解效率的二阶段随机规划模型. 指出适量小样本对应的模型最优值必然是实际最优值的下界, 提出了基于大样本分析的物流网络稳健性评价方法以及实际最优值上界的确定方法. 给出模型求解的混合遗传算法, 并总结了物流网络的优化设计步骤. 通过具体算例说明了模型及其算法在设计决策中的应用.

关键词: 回收物流网络; 随机规划; 混合遗传算法; 产品回收

中图分类号: F252; C934 **文献标识码:** A

Optimal design research for returned logistics network based on two-stage stochastic programming

DI Wei-min

(School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China. E-mail: diweimin@126.com)

Abstract: With the help of sampling theory, a two-stage stochastic programming model is developed to solve the returned logistics network optimal design problems with continuous distribution stochastic parameters, whose computation efficiency is determined by sample quantity. And the model's optimal values resulting from appropriately small scale samples are always lower bounds of the true optimal value. Network robust estimation approach and true optimal value's upper bound judgement method are presented based on corresponding analysis to large scale samples. Mixed genetic algorithm of the model is given, and the network optimal design steps are summarized. An example shows the application of the proposed model and its algorithm in design decision-making.

Key words: Returned logistics network; Stochastic programming; Mixed genetic algorithm; Product recovery

1 引言

为保护自然环境, 有效利用资源, 促进循环经济与可持续发展目标的实现, 废旧产品的回收处理受到许多国家, 尤其是工业发达国家的高度重视^[1-4], 与此相关的回收物流网络优化设计问题也成为当前的研究热点^[2,5]. 回收物流网络建设具有战略重要性, 网络设计结果的合理与否将直接影响回收物流系统运作的效率和效益. 有关研究中, 多数文献将不确定因素进行了确定性近似, 从而建立了确定性混合整数规划模型^[2,5]. 该类模型能够反映回收物流系统的特殊结构, 但无法反映系统在回收量、回收时间、需求量、产品质量等方面的随机特征, 因而其解算结果难以保证物流网络的稳健性. 为此, Listes^[6]给出了基于情景树分析的多阶段随机规划模型, 并在考虑 7 种需求情景, 2 种供应情景的情况下, 对建

筑废沙回收网络进行了研究. 多阶段随机规划模型要求随机参数离散取值, 适于解决可以进行情景分析的网络优化问题. 但当随机参数连续取值或分布函数已知时, 该模型将受到限制. 例如, 假设网络有 50 个设施点, 每个设施点有 1 个独立的随机参数, 且每个随机参数人为地离散为 3 种情景, 那么, 优化设计时每次迭代需要计算 3^{50} , 约 7×10^{23} 种组合情景. 设施点或随机参数的离散情景增多时, 计算量将急速增加, 从而导致维数灾难.

为避免计算量的大幅度变化, 本文结合抽样理论, 建立了回收物流网络优化设计的二阶段随机规划模型, 并给出了相应的混合遗传算法和具体算例.

2 二阶段随机规划模型

2.1 建模准备

由于废旧产品破损程度不一, 质量参差不齐, 为

收稿日期: 2006-09-28; 修回日期: 2007-01-04.

作者简介: 狄卫民(1970—), 男, 山东嘉祥人, 博士生, 从事物流管理、决策科学等研究.

减少运输费用,方便后续作业,在产品再处理之前必须将其检验分类,并将不可再利用的产品或组件及时废弃,这样,回收物流网络设计除包括传统的工厂定位外,还需进行检测中心的位置确定.为简单起见,本文考虑一个由回收点、检测中心和再处理工厂3种物流设施形成的废旧产品回收物流系统.即由回收点回收的产品经检测中心处理(检验、分类)后,一部分被废弃处置(机械处理、焚烧或掩埋),剩余部分全部送往再处理工厂进行维修、再制造或再循环处理,如图1所示.

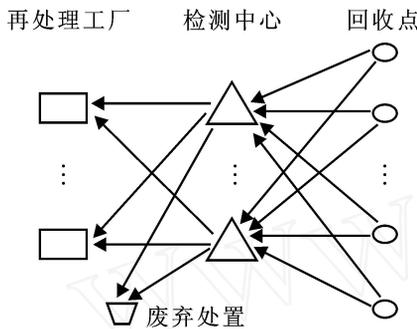


图1 回收物流网络示意

为便于模型建立,首先作如下假设:1)仅考虑单一废旧产品、单一运营周期的情况;2)废旧产品的回收量、检测中心和再处理工厂的最大处理能力都是分布已知的随机参数,但检测中心和再处理工厂的固定成本、处理成本及上下层设施间的运输成本是确定已知的;3)不考虑回收处理过程中的材料损耗,即经检测中心检验合格的回收产品全部用于再处理;4)仅在地理位置已知的备选地点中建设检测中心和再处理工厂;5)仅以各回收点作为废旧产品的获得点,且回收点的位置已经确定.

其次,引入下述符号:

1)决策变量: x_j 为0-1变量,表示是否在 j 地建设检测中心,是取1;否则取0. y_k 为0-1变量,表示是否在 k 地建设再处理工厂,是取1;否则取0. u_{ij} 为从回收点 i 运往检测中心 j 的回收产品数量, v_{jk} 为从检测中心 j 运往再处理工厂 k 的产品数量.

2)有关参数: m 为回收点的数量, n 为检测中心备选地点的数量, p 为再处理工厂备选地点的数量, q_i 为回收点 i 的废旧产品回收量, s_{ij} 为从回收点 i 运往检测中心 j 的废旧产品的运输和处理成本, t_{jk} 为从检测中心 j 运往再处理工厂 k 的产品的运输和处理成本, e_j 为在 j 地建设检测中心的固定成本, h_k 为在 k 地建设再处理工厂的固定成本, c_j 为检测中心 j 的最大处理能力, d_k 为再处理工厂 k 的最大处理能力, r 为回收产品的可利用比率, w 为废旧产品未被回收的处罚成本.

2.2 模型建立

令向量 $x = (x_j)_{1 \times n}$, $y = (y_k)_{1 \times p}$; 矩阵 $u = (u_{ij})_{m \times n}$, $v = (v_{jk})_{n \times p}$; 随机向量 $q = (q_i)_{1 \times m}$, $c = (c_j)_{1 \times n}$, $d = (d_k)_{1 \times p}$, $\theta = (q, c, d)_{1 \times (m+n+p)}$; 的第 l 次随机实现,即第 l 个样本值为 $\theta^l = (q^l, c^l, d^l)_{1 \times (m+n+p)}$, $l = 1, \dots, N$. 其中: $q^l = (q_i^l)_{1 \times m}$, $c^l = (c_j^l)_{1 \times n}$, $d^l = (d_k^l)_{1 \times p}$, 为从 θ 的概率密度函数中抽取样本的结果空间.

于是,可建立如下的二阶段随机规划模型.

第1阶段,需在随机向量实现之前完成设施建设决策,其模型(整数规划)为

$$\min_{x,y} f(x,y) = \sum_{j=1}^n e_j x_j + \sum_{k=1}^p h_k y_k + E[G(x,y,\theta^l)], \quad (1)$$

$$s.t. x_j, y_k \in \{0,1\}, \quad \forall j,k. \quad (2)$$

其中 $G(x,y,\theta^l)$ 表示给定物流网络(即给定的 x,y) 关于 θ^l 的运输、处理和处罚费用,即运营费用.为便于抽样理论的应用,这里考虑随机参数的有限离散分布情形.假设利用计算机模拟技术随机抽取的样本数量为 N ,则期望值为

$$E[G(x,y,\theta^l)] = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N G(x,y,\theta^l). \quad (3)$$

第2阶段,需在给定设施建设决策的基础上实现物流的合理分配,其模型(线性规划)^[7]为

$$G(x,y,\theta^l) = \min_{u,v} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_{ij} u_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p t_{jk} v_{jk} + \sum_{i=1}^m w \left(q_i^l - \sum_{j=1}^n u_{ij} \right), \quad (4)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n u_{ij} = q_i^l, \quad \forall i; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^p v_{jk} = r \sum_{i=1}^m u_{ij}, \quad \forall j; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m u_{ij} \leq c_j^l x_j, \quad \forall j; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n v_{jk} \leq d_k^l y_k, \quad \forall k; \quad (8)$$

$$u_{ij}, v_{jk} \geq 0, \quad \forall i,j,k. \quad (9)$$

上述模型中,式(1)使设施建设固定费用和建设后的运营费用的总和 $f(x,y)$ 最小化;式(2)为第1阶段决策变量的取值约束;式(4)表示在给定 x,y 和一次实现(即 θ^l)的情况下,使物流网络的运营费用 $G(x,y,\theta^l)$ 最小化;式(5),(6)为物流平衡约束;式(7),(8)为最大处理能力约束;式(9)为第2阶段的决策变量取值约束.

可见,采用抽样理论后,决定随机规划解算效率

的主要因素是样本数量 N ，而不再是随机向量的维数。并且， $f(x, y)$ 可用样本均值近似表示，其无偏估计值为

$$f_N(x, y) = \sum_{j=1}^n e_j x_j + \sum_{k=1}^p h_k y_k + \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N G(x, y, l). \quad (10)$$

这样，产生一批样本，便可通过求解二阶段随机规划模型得到相应于该批样本的回收物流网络。于是有如下命题：

命题 1 随机抽取足够数量的反映随机变量分布特征的 N 个样本，假设利用二阶段随机规划模型获得的最优估计值为 f_N^* ，样本对应实际问题最优解的估计值为 f^* ，则有 $f_N^* \geq f^*$ 。

证明 因为

$$f_N^* = E[\min_{x,y} (f_N(x, y))] = E[\min_{x,y} (\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N f(x, y, l))],$$

$$f^* = \min_{x,y} E[f(x, y)] = \min_{x,y} E[\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N f(x, y, l)].$$

所以有 $f_N^* \geq f^*$ 成立。

由命题 1 可知，如果选择适当数量的 N 个样本使 f_N^* 逼近实际最优值，则 f_N^* 便成为实际最优值的一个下界。

样本的产生具有一定的随机性，因而即便 N 相同，不同次抽样得到的回收物流网络也未必完全相同。为比较不同网络的性能优劣，应结合网络的稳健性对不同的回收物流网络进行评价。具体方法为：随机产生 N 个样本 (N 远大于 N)，并用这批样本计算不同网络适合随机参数变化的概率，如果网络适合于 N 个样本中的 R 个样本，则根据大数定律可将 R/N 作为该网络适用概率的估计值。适用概率越高，网络的稳健性越好。为便于网络优选，利用 R 个样本对不同网络的总费用（即建设和运营费用）均值及其方差作无偏估计，有

$$f_R(x, y) = \sum_{j=1}^n e_j x_j + \sum_{k=1}^p h_k y_k + \frac{1}{R} \sum_{l=1}^R G(x, y, l), \quad (11)$$

$$S_R^2(x, y) = \frac{1}{R-1} \sum_{l=1}^R [\sum_{j=1}^n e_j x_j + \sum_{k=1}^p h_k y_k + G(x, y, l) - f_R(x, y)]^2, \quad (12)$$

其中 S_R 为总费用标准差。

命题 2 随机抽取充分大数量的反映随机变量

分布特征的 N 个样本，并利用其中适合回收物流网络的 R 个样本对网络的总费用均值作无偏估计，那么，当网络的适用概率较高时，该估计值常常是实际问题最优值的一个上界。

注 1 对于适合于 R 个样本的回收物流网络而言，其设施决策对应着实际问题的一个可行解，当 N 充分大时，与其对应的总费用均值一般应大于或等于实际问题最优解所对应的最优值（因而命题 2 成立）。

3 模型算法

已有研究表明，物流网络的优化设计是一类 NP 完全问题^[8]。因此，对于确定环境下的小型物流网络可采用分枝定界法、Benders 分解法或专门的优化软件（如 LINDO）获得最优解^[9,10]。但物流网络设施点较多时，采用遗传算法不失为一种有效的选择^[10,11]。遗传算法是一种基于“优胜劣汰”的全局优化算法，具有很好的鲁棒性，特别适用于高维决策问题^[12]。本文结合二阶段随机规划模型的特点，在随机模拟的基础上，将其与线性规划的精确算法有机结合，从而形成了相应的混合遗传算法。

3.1 算法描述

选取一定数量的第 1 阶段可行集中的决策 (x, y) 构成初始种群，并将其传递给第 2 阶段。利用线性规划程序求解以 (x, y) 为参数的随机规划问题，再将计算结果反馈给第 1 阶段。第 1 阶段根据反馈结果对相应决策 (x, y) 的适值（算法中的适值对应现实问题的网络期望总费用）进行估计，并执行遗传操作。循环迭代上述过程，以寻求第 1 阶段相对于整个系统的最优策略。如果群体中的最优适值在规定的进化代数内没有变动，或迭代到了规定的进化代数，则停止迭代，此时群体中的最优决策即为满意解。最后，结合满意解的网络评价数据考虑是否应用相应的回收物流网络。混合遗传算法的功能模块如下：

- 1) 模拟抽样。随机从 的概率密度函数中抽出 N 个或 N 个独立同分布的样本。
- 2) 编码。针对第 1 阶段的特点，随机产生一个初始种群，即随机产生一群由二进制串编码表示的染色体，其中：串由 0, 1 组成，长度为 $(n + p)$ ，前一部分表示决策向量 x ，后一部分表示决策向量 y 。为提高解的可行性，生成染色体时强行规定检测中心和再处理工厂的建设数目分别大于或等于 1。
- 3) 适值计算。针对第 2 阶段的特点，分别计算每条染色体相对每个样本的目标函数值（可调用 Matlab 中根据内点法原理编写的 linprog 函数），即 $G(x, y, l)$ 。将上述求解结果返回第 1 阶段，根据式

(10) 计算每条染色体的 $f_N(x, y)$, 并将其作为该染色体的适值.

4) 排序. 根据适值采用等差为 2 的线性排序方法计算各染色体的适应度.

5) 选择. 利用轮盘赌算法和代沟技术形成下一代种群中的部分染色体.

6) 交叉. 以交叉概率随机在新一代种群中选取 2 个染色体进行交叉, 并采用两点法随机确定交叉位置.

7) 变异. 以变异概率随机在新一代种群中选择变异个体, 并随机确定变异位置.

8) 重插入. 根据代沟设置比例将老一代种群中的个体精英保留下来, 从而获得完整的新一代种群.

9) 网络评价. 确定满意解 (x, y) , 利用 N 个样本根据式 (11), (12) 估计对应于该解的网络总费用均值及其方差, 并统计网络适用概率.

3.2 算法伪代码

为便于模型求解, 结合英国 Sheffield 大学推出的遗传算法工具箱, 本文编写了基于 Matlab 的计算程序, 计算参数为: 种群染色体 30, 最大进化代数 150, 最优适值的最大持续代数 30, 交叉概率 0.2, 变异概率 0.5, 代沟设置比例 10%.

模型求解算法的伪代码如下:

```
Initialization(); % 初始化、获取数据
Sample(N); % 抽取 N 个样本
Chrom(Pop_size); % 编码, 产生种群
Obj(Chrom); % 初始种群适值计算
While (Gen < Max_gen
    and Gen_repeat < Max_repeat)
{
    Ranking(Chrom); % 排序
    Select(New_chrom, Chrom, Gap);
    % 结合代沟技术选择
    Crossover(New_chrom); % 交叉
    Mutation(New_chrom); % 变异
    Obj(New_chrom); % 新种群适值计算
    Reins(Chrom, New_chrom, Chrom);
    % 重插入
}
Sample(N); % 抽取 N 个样本
Net_adaptation(); % 网络评价
Output(); % 结果输出
```

4 回收物流网络优化设计

回收物流网络设计的主要任务是确定待建物

流设施的位置、数量及其系统运营后相应设施之间的物流分配. 其中物流设施的位置确定是网络设计的核心内容, 它决定了回收物流网络的基本结构, 直接影响着系统运营后的物流分配结果, 含有随机参数时更是如此. 由于网络建设超前于实际物流活动, 提出如下回收物流网络的优化设计步骤:

Step1: 确定随机参数的分布函数和其他设计参数的数值;

Step2: 建立相应的二阶段随机规划模型;

Step3: 利用混合遗传算法解算模型, 得到相应于多批样本的多个回收物流网络;

Step4: 为得到稳健性较高、期望总费用较低的回收物流网络, 利用大样本估计上述物流网络的适用概率、总费用均值及其标准差, 然后根据命题 1, 命题 2 和网络评价方法对不同网络进行综合比较与选择;

Step5: 在开展物流活动前, 先根据当时的新信息推测随机参数的明晰数值, 然后利用第 2 阶段的线性规划模型确定系统运营后相应设施之间的物流分配.

5 算例

某地区需建立某种废旧产品的回收物流网络, 给定 8 个固定回收点, 8 个备选检测中心 (限制在有回收点的地方) 和 4 个备选再处理工厂. 考虑到每年的经营状况, 给出表 1, 表 2 所示的设计参数及其回收产品的可利用比率 $r = 0.65$. 假设回收量和最大处理能力都服从正态分布且方差都是均值的 10%, 而且要求废旧产品全部回收 (即 $w = +$). 问: 如何进行回收物流网络的优化设计; 能否选用将随机参数近似后 (直接利用均值或 1.1 倍均值近似) 计算而得的回收物流网络?

根据二阶段随机规划模型, 在考虑随机参数不确定性的情况下, 利用编写的程序先后对 6 组数量不等的样本进行计算, 计算得到的满意解及其适值见表 3. 如果忽略随机参数的不确定性, 用均值将随机参数近似为确定参数, 然后再利用确定性 MILP 模型^[7]进行计算, 得到的最优解和最优值见表 3 中的 $N = 0$ 一行. 若使用 1.1 倍的均值加以近似, 计算结果见 $N = 1$ 一行.

由表 3 中的“解编号”(不同解的编号) 可以看出, 8 次计算共得到 5 个不同的解, 且使用不同样本得到的同一个解的适值也有所不同. 为进一步考察这些解对应网络的优劣, 随机产生 4 000 个样本, 并根据其估计各个网络的适用概率、总费用均值及其标准差, 计算结果见表 4. 为便于比较, 同时给出标准差与均值的比值.

表 1 设施间的运输和处理成本

千元 / 件

s_{ij} / t_{jk}	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.26/11.83	1.35/12.13	1.41/12.17	1.40/11.99	1.46/-	1.48/-	1.41/-	1.35/-
2	1.45/11.64	1.16/12.04	1.50/12.08	1.43/12.00	1.37/-	1.39/-	1.42/-	1.37/-
3	1.48/11.95	1.47/12.02	1.19/12.15	1.45/12.06	1.35/-	1.46/-	1.48/-	1.40/-
4	1.41/11.82	1.44/12.20	1.39/12.07	1.25/11.99	1.53/-	1.38/-	1.41/-	1.44/-
5	1.51/11.80	1.32/11.88	1.33/12.14	1.57/11.93	1.21/-	1.45/-	1.35/-	1.37/-
6	1.55/11.84	1.36/12.14	1.46/11.88	1.44/11.90	1.47/-	1.19/-	1.32/-	1.50/-
7	1.49/11.88	1.40/12.05	1.49/12.02	1.48/11.76	1.38/-	1.33/-	1.18/-	1.39/-
8	1.46/11.86	1.38/12.10	1.44/12.23	1.54/12.00	1.43/-	1.54/-	1.42/-	1.15/-

表 2 回收量均值、固定成本和最大处理能力均值

地点 q_i 均值 / 件	e_j / 千元	c_j 均值 / 件	h_k / 千元	d_k 均值 / 件
1	2 335	731	6 310	600
2	1 640	677	5 270	1 200
3	970	242	1 420	1 200
4	2 265	383	2 830	600
5	1 128	625	5 250	-
6	918	193	930	-
7	1 680	587	4 870	-
8	1 223	313	2 130	-

表 3 不同组样本的计算结果

N	满意解或最优解 (x, y)	解编号	适值或最优值
50	((0 1 1 0 0 1 1 1), (1 1 0 1))	1	112 811
100	((0 1 0 1 0 0 1 1), (1 1 0 1))	2	112 516
150	((0 1 1 0 0 1 1 1), (1 0 1 1))	3	112 407
200	((0 1 1 0 0 1 1 1), (1 1 0 1))	1	112 298
250	((0 1 1 0 0 1 1 1), (1 0 1 1))	3	112 480
300	((0 1 0 1 0 0 1 1), (1 0 1 1))	4	112 646
0	((0 1 0 0 0 0 1 1), (1 0 0 1))	5	111 252
1	((0 1 0 0 0 0 1 1), (1 0 0 1))	5	122 099

表 4 网络评价数据

解编号	适用概率 %	总费用均值 千元	总费用标准差 千元	标准差 / 均值 / %
1	99.800	112 679.25	4 170.57	3.70
2	99.975	112 741.94	4 190.51	3.72
3	99.800	112 687.94	4 173.25	3.70
4	99.975	112 735.98	4 185.99	3.71
5	34.400	108 550.74	3 581.67	3.30

由表 4 可知,解 2 和解 4 对应的网络适用概率和总费用均值都高于解 1 和解 3,但同样适用概率的网络所对应的总费用均值并不相同,因而,从总体趋势看,网络的性能越好,其期望总费用越高.纵观上述 4 个解,它们对应网络的适用概率均接近 100%,根据统计学观点,网络不适用情况的发生已属小概率

事件,即上述 4 个解在网络适用概率意义下基本无差异.

结合表 3 可以看出,考虑随机参数的不确定性时,除 $N = 50$ 这组样本外,利用其他组样本所得的适值(即利用小样本 N 得到的总费用均值)均小于利用大样本($N = 4 000$)得到的总费用均值.根据命题 1 和命题 2 可以认为,除 $N = 50$ 这组样本外,其他组样本基本反映出随机变量的分布特点,因而利用它们便可得到关于网络总费用均值的较好无偏估计.

综合考虑解 1 ~ 4 对应的网络评价数据,解 1 对应的总费用均值和标准差与均值的比值最小,因此,可根据解 1 建立回收物流网络,即在检测中心备选地点 2,3,6,7,8 建设检测中心,在再处理工厂备选地点 1,2,4 建设再处理工厂.然后,根据开展物流活动前推测而得的明晰数值便可确定系统运营后相应设施之间的物流分配(有关运算略).

用随机参数的均值或 1.1 倍均值将不确定参数近似为确定参数,所得的结果对应解 5.由表 4 可以看出,解 5 对应的网络适用概率很差,仅 34.4%,因此,不可选用将随机参数近似后(直接利用均值或 1.1 倍均值)计算而得的回收物流网络.

6 结 语

回收物流网络设计是回收物流管理的重要组成部分.本文考虑到设计参数的不确定性,结合抽样理论建立了网络设计的二阶段随机规划模型,探讨了实际问题最优值的选取范围及其考察不同物流网络优劣的评价方法;在随机模拟的基础上给出了求解模型的混合遗传算法,根据运算结果的比较确定了较为合适的回收物流网络,并指出了系统运营后既定物流网络的物流分配规划方法.因此,本文的研究成果有助于降低不确定信息带来的决策风险,也为回收物流网络的设计实践奠定了良好的理论基础.但文中仅考虑了回收量和处理能力的随机性,对于回收时间和产品质量的随机性还需作进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Fleischmann M, Krikke H R, Dekker R, et al. A characterization of logistics networks for product recovery[J]. *Omega*, 2000, 28(6): 653-666.
- [2] Fleischmann M, Jacqueline M, Bloemhof-Ruwaard, et al. Quantitative models for reverse logistics: A review [J]. *European J of Operational Research*, 1997, 103(1): 1-17.
- [3] Thierry M, Salomon M, Van Nunen J, et al. Strategic issues in product recovery management [J]. *California Management Review*, 1995, 37(2): 114-135.
- [4] Rogers D S, Tibben-Lembke R S. Going backwards: Reverse logistics trends and practices [M]. Reno: University of Nevada, 1999: 2-27.
- [5] 达庆利, 黄祖庆, 张钦. 逆向物流系统结构研究的现状及展望[J]. *中国管理科学*, 2004, 12(1): 131-138. (Da Qing-li, Huang Zu-qing, Zhang Qin. Current and future studies on structure of the reverse logistics system: A review [J]. *Chinese J of Management Science*, 2004, 12(1): 131-138.)
- [6] Listes O, Dekker R. A stochastic approach to a case study for product recovery network design [J]. *European J of Operational Research*, 2005, 160(2): 268-287.
- [7] 赵宜, 尹传忠, 蒲云. 回收物流设施多层选址模型及其算法[J]. *西南交通大学学报*, 2005, 40(4): 530-534. (Zhao Yi, Yin Chuang-zhong, Pu Yun. Facility location model for multi-level returned logistics and its algorithm [J]. *J of Southwest Jiaotong University*, 2005, 40(4): 530-534.)
- [8] Hyun J K, Hokey M. The dynamic design of a reverse logistics network for repair facilities [R]. Louisville: University of Louisville, 2003:1-11.
- [9] 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, 9(4): 114-117. (Ma Zu-jun, Dai Ying. Optimization model for reverse logistics network design for product recovery [J]. *J of Industrial Engineering/ Engineering Management*, 2005, 9(4):114-117.)
- [10] 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. (Zhou Gen-gui, Cao Zhen-yu. A genetic algorithm approach to location-allocation problem in reverse logistics network [J]. *Chinese J of Management Science*, 2005, 13(1): 42-47.)
- [11] Hokey M, Hyun J K, Chang S K. A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns [J]. *Omega*, 2006, 34(1): 56-69.
- [12] 戴晓晖, 李敏强, 寇纪淞. 遗传算法理论研究综述[J]. *控制与决策*, 2000, 15(3): 263-268, 273. (Dai Xiao-hui, Li Min-qiang, Kou Ji-song. Survey on the theory of genetic algorithms [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 263-268, 273.)
- [14] Yeom Sungsoo, Balachandan K R, Reonen J. The role of transfer price for coordination and control within a firm [J]. *Review of Quantitative Finance and Accounting*, 2000, 14(2): 161-192.
- [15] Gox R F, Schondube J R. Strategic transfer pricing with risk-averse agents [J]. *Schmalenbach Business Review*, 2004, 56(2): 98-118.
- [16] Alles M, Datar S. Strategic transfer pricing [J]. *Management Science*, 1998, 44(4): 451-461.
- [17] Gox R F. Strategic transfer pricing, absorption costing and vertical integration [J]. *Management Accounting Research*, 2000, 11(3): 52-67.
- [18] 慕银平, 唐小我, 马永开. 存在外部垄断竞争市场的中间产品转移定价研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2003, 23(7): 44-49. (Mu Yin-ping, Tang Xiao-wo, Ma Yong-kai. Study on the transfer pricing of intermediate product existing external monopoly markets [J]. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2003, 23(7): 44-49.)
- [19] 慕银平, 唐小我, 马永开. 不对称竞争条件下的集团转移定价决策[J]. *控制与决策*, 2005, 20(2): 165-169. (Mu Yin-ping, Tang Xiao-wo, Ma Yong-kai. Firm transfer pricing decision under asymmetric competition [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(2): 165-169.)
- [20] Bulow J L, Geanakoplos J D, Klemperer P D. Multimarket oligopoly: Strategic substitutes and complements[J]. *J of Political Economy*, 1985, 93(3): 488-511.

(上接第34页)