

文章编号: 1006-9798(2005)03-00027-05

基于模拟退火算法的逆向物流网络设计研究<sup>\*</sup>

戴更新, 侯云章

(青岛大学管理科学与工程系, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 逆向物流的兴起使物流的网络设计问题显得更为复杂, 为此建立了混合整数设计模型, 借助于模拟退火算法综合研究了正逆向结合的物流网络设计问题。通过对算法在不同控制参数下所得结果进行比较, 得出了网络设计中各设施的选址结果以及系统运作费用最小时的运输路线, 并且求出了最小运作费用。数值试验表明在处理逆向物流网络设计问题中模拟退火算法能够在较短的时间得出系统的设计方案, 是一种比较可行的算法。

**关键词:** 网络设计; 设施选址; 逆向物流; 模拟退火算法

**中图分类号:** F830; F253

**文献标识码:** A

近些年来, 随着社会环保意识和可持续发展意识的加强以及企业之间竞争的加剧, 逆向物流逐渐引起人们的重视。所谓逆向物流, 美国物流管理协会将其定义为“计划、实施和控制原料、半成品库存、制成品和相关信息, 高效和成本经济地从消费点到起点的过程, 从而达到回收价值和适当处置的目的”。国内外众多学者对逆向物流作了大量的研究, Fleischmann<sup>[1]</sup> 将这些研究成果分为 3 大类: 产品生产再生产计划、逆向物流网络设计、库存控制。

在逆向物流的网络设计问题中, 由于逆向物流网络自身高度的不确定性和“由多到少”<sup>[2]</sup> 的特性, 使得问题变得尤为复杂。研究者大多采用对传统的设施选址模型进行修改的方法来研究独立的逆向物流系统。Barros 等<sup>[3]</sup> 对建筑废料中沙子的再循环网络设计进行了探讨, 建立了一个多层次的有能力限制的仓库选址模型; Louwers 等<sup>[4]</sup> 设计了地毯废弃物的再循环网络, 该网络有两层: 地方回收中心和化工厂, 决策变量为地方回收中心的位置、容量; Vaidyanathan 等<sup>[5]</sup> 则针对一般的含有逆向物流的网络建立了一个三级的模型, 包括: 废品源点、废品集中点、废品再处理点。针对这些问题, 作者们建立了混合整数线性规划数学模型, 该模型采用启发式的方法, 将整个问题分成若干子问题, 逐个进行求解。这一问题可以看作是逆向物流中的工厂选址问题(CPLP), 当工厂的数目较多时, 也是一类 NP 难题, 借助于 AMPL 工具采用启发式的方法可得出较优的方案。这些研究都是将逆向物流作为一个独立的模型来处理, 没有综合正向渠道统一进行考虑。基于此, 本文研究了一个正逆结合的物流网络设计问题, 并借助于模拟退火算法进行求解。

## 1 问题的描述

考察一个三级的供应链系统, 即生产厂、分销中心、零售点的网络设计问题, 系统的框架如图 1 所示。在正向的物流渠道中, 生产商将生产出的产品运往分销中心, 分销中心再将产品分配至各个不同的零售商。在逆向渠道中, 与此相反: 零售商作为废旧品的收集源点, 一方面接收顾客的返回品, 另一方面收集自身产生

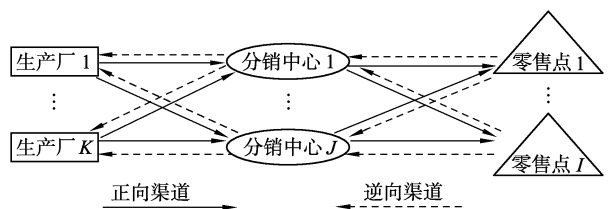


图 1 系统框架结构图

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2004-10-29; 修回日期: 2005-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70171045); 山东省自然科学基金资助项目(Y200G06); 山东省教育厅资助项目(J99F53)

作者简介: 戴更新(1970-), 男, 安徽人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究领域为电子商务与物流、生产与运作管理。

的过期品、滞销品等运往分销中心;再由分销中心统一运往生产厂商进行处理。

系统中零售点的位置已经确定,其单位时间的需求和废品的产生数量均已知。另外,分销中心和生产厂的待选地点已经确定,并且,他们均有最大的数量限制。系统要解决如下问题:在待选的分销中心和生产厂中分别选择哪些作为系统的分销点和生产厂以及如何选择运输路线使总费用最小。

根据图 1 所示,模型中作出如下假设:① 零售点的总数为  $I$ ,分销中心的待选总数为  $J$ ,制造厂的待选总数为  $K$ ;② 各个零售点在单位时间内的需求和待处理的废品均为已知常量,分销中心有一定的库存容量;③ 生产厂的生产能力和库存能力已知,并且生产出的产品即刻运往分销中心,即新产品不占用生产厂的库存;④ 各生产厂、分销中心有一定的运作费用。

2 模型的建立

根据上述假设,以单位时间内系统运作费用最小为目标函数建立混合整数规划模型

min:  $C = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (h_{ij}^- x_{ij}^- + h_{ij}^+ x_{ij}^+) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (c_{jk}^- y_{jk}^- + c_{jk}^+ y_{jk}^+) + \sum_{j=1}^J F_j W_j + \sum_{k=1}^K G_k Z_k$  (1)

s. t.  $\sum_j x_{ij}^- = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, I$  (2)

$\sum_j x_{ij}^+ = d_i, \quad i = 1, 2, \dots, I$  (3)

$\sum_i (x_{ij}^- + x_{ij}^+) \leq B_j W_j, \quad j = 1, 2, \dots, J$  (4)

$\sum_j y_{jk}^- \leq D_k Z_k, \quad k = 1, 2, \dots, K$  (5)

$\sum_j y_{jk}^+ \leq C_k Z_k, \quad k = 1, 2, \dots, K$  (6)

$\sum_i x_{ij}^- = \sum_i y_{jk}^-, \quad j = 1, 2, \dots, j$  (7)

$\sum_i x_{ij}^+ = \sum_k y_{jk}^+, \quad j = 1, 2, \dots, J$  (8)

$\sum_j W_j = W, \quad W_j = \{0, 1\}, \quad j = 0, 1, \dots, J$  (9)

$\sum_k Z_k = Z, \quad Z_k = \{0, 1\}, \quad k = 0, 1, \dots, K$  (10)

式中,  $C$  表示系统运作的总费用, 元;  $x_{ij}$  为在逆向渠道中, 将零售点  $i$  的废品运送到分销中心  $j$  的数量;  $x_{ij}^+$  为在正向渠道中, 将分销中心  $j$  的物品运往零售点  $i$  的数量;  $y_{jk}^-$  为在逆向渠道中, 将分销中心  $j$  的废品运往生产厂  $k$  的数量;  $y_{jk}^+$  为在正向渠道中, 将生产厂  $k$  的物品运往分销中心  $j$  的数量;  $h_{ij}^-$ ,  $h_{ij}^+$  分别表示将废品从零售点  $i$  运到分销中心  $j$  及将物品从分销中心  $j$  运到零售点  $i$  的单位运输费用;  $c_{jk}^-$ ,  $c_{jk}^+$  分别表示将废品从分销中心  $j$  运到生产厂  $k$  及将物品从生产厂  $k$  运到分销中心  $j$  的单位运输费用;  $a_i$ ,  $d_i$  为零售点  $i$  单位时间内产生的废品数量及需求;  $B_j$  为分销中心  $j$  的仓库容量;  $D_k$ ,  $C_k$  分别表示生产厂  $k$  的仓库容量和生产能力;  $F_j$ ,  $G_k$  分别表示分销中心和生产厂单位时间的运作费用;  $W_j$ ,  $Z_k$  分别表示在求解方案中选择第  $j$  个分销中心和第  $k$  个生产厂, 而  $W$ ,  $Z$  分别表示允许建立的分销中心和生产厂的最大数目;  $W_j = \{0, 1\}$ ,  $Z_k = \{0, 1\}$  表示  $W_j$ ,  $Z_k$  取值为 0 或 1。目标函数 (1) 由整个网络系统的运输费用和分销中心及生产厂的运作费用组成。约束条件中: 式 (2) 表示零售点的废品应得到完全的处理, 式 (3) 表示零售点的需求要得到满足; 式 (4)、式 (5) 表示分销中心和生产厂的容量约束; 式 (6) 表示整个系统不能超出生产厂的生产能力限制; 式 (9)、式 (10) 则表示分销中心和生产厂的数量限制。

3 模型的求解

上述模型中, 当整个网络系统的节点较多时, 问题就变成一个 NP 难题 (NP-hard), 而传统的混合整数

规划问题的求解方法在解决这一类问题时显得力不从心<sup>[9]</sup>。近几年来, 人们提出了一些启发式随机搜索算法, 如模拟退火算法、遗传算法, 为 NP 问题的解决提供了新的途径。

3.1 模拟退火算法简介

模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)又称为模拟冷却法、统计冷却法、随机松弛法和概率爬山法等。模拟退火算法(SA)是由 Kirkpatrick 于 1982 年提出的一种随机优化算法, 其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性, 模拟高温金属降温的热力学过程产生的。由于 SA 适用范围广, 算法简单, 便于实现, 是一种有效的全局优化方法。近年来模拟退火算法在优化领域得到广泛深入的研究和应用<sup>[9]</sup>。

3.2 基本的算法实现

模拟退火的基本思想是由一个初始的解出发, 不断重复对当前解“产生新解—判断约束、计算函数值—接受或舍弃新解”的迭代过程。

3.2.1 新解的产生策略

根据当前的解产生出新的分销中心和生产厂的选择方案, 随机采用如下 5 种方法之一: ① 在原有方案上, 随机去掉一些已经选择的分销中心; ② 在原有方案上, 随机去掉一些已经选择的生产厂; ③ 在剩下的分销中心集合中, 随机选择几个分销中心加入到原方案形成新的选择方案; ④ 在剩下的生产厂集合中, 随机选择几个生产厂加入到已选集合中, 形成新的选择方案; ⑤ 抛开原方案, 随机产生新的分销中心和生产厂。

3.2.2 新解的接受原则

根据 Metropolis 准则<sup>[7]</sup>, 如果新方案  $Y_n$  的目标函数值  $F(Y_n) \leq F(Y)$ , 则接受新解; 否则, 如果  $\exp\{-[F(Y_n) - F(Y)]/T\} \geq p_0$ , 则接受新解。其中,  $T$  为冷却进度表的控制参数;  $p_0$  为可接受概率。

3.2.3 温度参数的控制

1) 初始温度的选择  
在模拟退火算法中, 初始温度的选择很重要。初始温度选得太高将导致从当前较好的状态转到较差的状态的可能性大大增加; 初始温度选得太低, 算法不容易跳出局部最优解。

2) 退火策略  
由于算法中影响解收敛质量的温度由退火策略来决定, 因此退火策略的选择在模拟退火算法中占有重要的地位。如果退火过快, 可能无法找到最优解; 退火太慢, 则会增加算法的运算时间。本文选择了直线式的退火策略:  $T_n = \lambda \times T_c$ ,  $T_n$  为新的温度值,  $T_c$  为当前的温度值,  $\lambda$  称为温度衰减度。

3.2.4 算法终止的条件

同时使用两个条件共同控制算法的停止。  
1) 迭代总步数控制法 由于采用非时齐算法, 并根据温度下降法的确定, 算法的总迭代步数为  $M$ , 因此, 当总的迭代次数达到  $M$  时, 就停止运算。  
2) 基于不改进规则的控制法 如果当前最优解在连续  $L$  步降温期间均不改变, 则认为收敛, 就停止运算。

3.2.5 算法步骤

- 1) 随机产生分销中心和生产厂的选择方案作为初始方案计算目标函数值。
- 2) 设置初始温度为  $T_0$ , 令  $T_c = T_0$ ; 设置外循环次数  $K_0$ , 内循环次数  $K_1$ 。
- 3) 令当前的温度值  $T_c = T_n$ , 在  $T_c$  随机进行 3.2.1 所列某种迭代, 产生新方案。
- 4) 在步骤 3) 产生方案上, 求解物流设施选址的 CFLP 问题, 并计算新方案的目标函数值。按照 3.2.2 节中新解的接受原则进行方案的取舍。
- 5) 检查是否满足内循环次数  $K_1$ , 若不满足, 则返回步骤 3); 否则, 继续。
- 6) 检查是否满足外循环次数  $K_0$ , 或者方案是否令人满意(本文采用若连续的 7 个目标函数值相等, 则

认为方案令人满意),若是,则输出选择方案及求解结果,算法结束;否则,继续。

7) 进行降温调度:  $T_n=0.9\times T_c$ 。转至步骤 3)。

4 数值算例

用 Matlab 对上述算法进行实现,在数值试验中网络运行的参数均为随机产生。假设系统有 10 个零售点,6 个待选分销中心,4 个待选生产厂,分销中心和零售点的最大允许数目分别为 4 和 2。通过对退火算法中改变初始温度、温度衰减度参数的数值,对算法进行进一步的探讨,各个参数如表 1 所示;通过运算和参数的比较得出结果如图 1、图 2 所示。

表 1 算法控制参数表

| 参数项目 | 初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$ | 内循环次数 $K_1/\text{次}$ | 外循环次数 $K_0/\text{次}$ | 温度衰减度 $\lambda$ |
|------|---------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| 参数值  | 1 500                     | 100                  | 150                  | 0.95            |
|      | 2 000                     | 100                  | 120                  | 0.90            |
|      | 2 500                     | 100                  | 100                  | 0.85            |
|      | 3 000                     | 100                  | 100                  | 0.75            |
|      | 3 500                     | 100                  | 50                   | 0.65            |

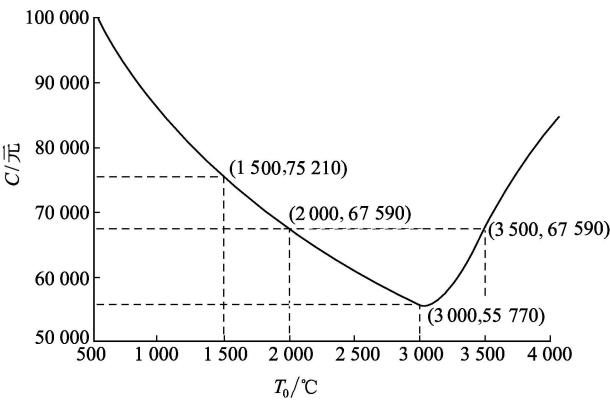


图 1 初始温度与求解结果关系图

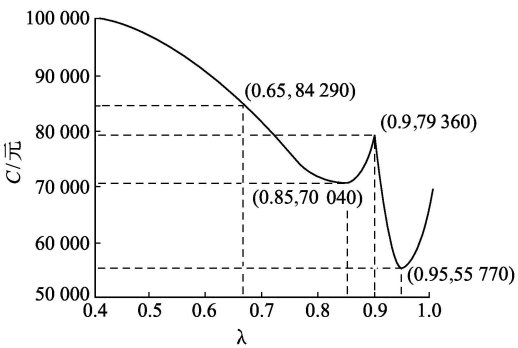


图 2 温度衰减度与求解结果关系图

由图 1 可见,初始温度对求解的结果有重要影响。就本文的实验结果,当初始温度选择 3 000  $^\circ\text{C}$ 时,可以得到较为满意的方案,此时总的费用值为 55 770 元。

由图 2 可知,温度的衰减度对求解结果也产生重要影响,但是二者呈现不规则变化。当衰减度值  $\lambda$  取 0.95 时,可以求得较为满意解 55 770 元。

5 结论

在物流网络系统中,当系统的节点数目较多时,设施的选址问题就成为一类 NP 难题,并且由于逆向物流的加入,使得问题变得更加复杂。现有相关文献大多仅从逆向角度建立工厂选址模型,并且借助于传统方法进行求解。在逆向物流网络中,既包括传统的从生产商、分销商到零售商的正向渠道系统,也包括从最终客户到分销商、生产商的逆向系统。在这种情形下,传统的求解方法很难有效地解决 NP 难题。模拟退火算法是近些年提出的一种适合解大规模组合优化问题的一种算法,是 NP 完全问题的通用有效近似算法。

本文运用模拟退火算法从正逆两个角度对这类问题进行了求解,系统的总费用由物料的运输费用,各个生产厂和分销中心的运作费用等组成,在满足系统的容量、源点需求等约束条件下,得出了系统的选址结果以及正逆两个方向的运输路线。通过比较不同控制参数下算法的结果值,经过大量的运算,得到了逆向物流

系统的网络设计方案, 并得出系统的最优运输路线, 而最小运作费用为 55 770 元。本文的研究结果不仅从理论上探讨了研究逆向物流网络系统的新方法, 也拓展了模拟退火算法的应用, 同时对逆向物流网络体系的建设有着显著的现实指导意义。

参考文献:

[ 1 ] Fleischmann M, Bloemhof Ruwaard J, Dekker R, et al. Quantitative Models for Reverse Logistics: a Review [ J ] . European Journal of Operational Research, 1997, 103: 1 - 17.

[ 2 ] Mortiz Fleischmann, Hans Ronald Krikke Rommert Dekker, Simme Douwe P Flapper. A Characterizati on of Logistics Networks for Product Recovery [ J ] . The International Journal of Management Science, 2000, 28: 653 -666.

[ 3 ] Barros A I, Dekker R, Scholten V. A Two Level Netw- Ork for Recycling Sand: a Case Study [ J ] . European Journal of Operational Research, 1998, 110: 199 - 214.

[ 4 ] Louwers D, Kip B J, Peters E, et al. A Facility Location Allocation Model for Re Using Carpet Materials [ J ] . Computers and Industrial Engineering, 1999, 36(4): 1 - 15.

[ 5 ] Vaidyanathan J, Raymond A P, Erik R. The Design of Reverse Distribution Networks: Models and Solution Procedures [ J ] . European Journal of Operational Research, 2003, 150: 128 - 149.

[ 6 ] 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法( 第一册): 模拟退火算法 [ M ] . 北京: 科学出版社, 1994.

[ 7 ] Dowsland K A, Dowsland W B. Packing Problem [ J ] . European Journal of Operational Research, 1992, 56( 1): 214.

Study on Network Design of Reverse Logistics Based on  
Simulated Annealing Algorithm

DAI Geng xin, HOU Yun zhang

(Department of Management Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The development of reverse logistics makes the network design of logistics more complicated. This paper researches both the traditional and reverse logistics in a virtual company, and an MIP model is established to resolve the problem. With the help of simulated annealing and in comparison with the results of different parameters of the algorithm we get the locations of the facilities, the transportation route and the minimal cost of the model. Numerical results show that the simulated annealing has more efficiently in dealing with the net design problem of reverse logistics, which can get the project of network design during short time.

**Key words:** network design; facility location; reverse logistics; simulated annealing