

编者按: 逆向物流是与顺向物流相对的物流过程及管理。广义的逆向物流是指物品从消费者流向市场的过程和管理, 是回收和环保产业的综合; 狭义的逆向物流是指物资从产品消费点(包括最终用户和供应链上客户)到产品的来源点的物理性流动。作为非常规业务, 逆向物流会对企业常规业务带来不利, 但也有自身的优势, 主要作用表现在: 降低原材料成本, 稳定原材料供应; 提高顾客满意度, 增强企业竞争能力; 减少产品及其副产品对环境的污染, 改善企业形象, 获取社会效益; 促进企业质量管理体系的不断完善。所以, 逆向物流的市场是巨大的。

## 基于 MNP 方法的逆向物流网络优化设计模型

孙玉敏 杨怀珍 李仕阔 (桂林电子科技大学管理系, 广西桂林 541004)

**摘要** 基于混合整数非线性规划(MNP)方法提出了一种逆向物流网络优化设计模型, 据此确定网络中各种设施的数量、位置及物流量分配, 以使计划期内的净收益最大化。该模型的特点是考虑了正向和逆向物流的设施集成与运输整合, 考虑了回收中心处理技术的配备问题以及回收中心处理技术、再处理工厂、分销中心设计能力决策问题。

**关键词** MNP; 逆向物流网络; 优化设计

中图分类号 F252 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2007)31-10180-03

随着全球经济的发展和技术的进步, 产品生命周期日益缩短, 废旧产品数量猛增, 资源浪费和环境污染问题日益严重。与此同时, 人们的环保意识不断增强, 环保法规日益完善, 许多国家开始要求生产企业对产品生命周期全过程负责, 尤其是废旧产品的回收处理<sup>[1-3]</sup>。于是, 逆向物流这一新兴的科学领域应运而生, 并日渐成为理论界和企业界关注的热点。

近年来, 逆向物流网络优化设计问题引起了国内外学者的重视<sup>[4-5]</sup>。然而现有研究大多考虑在正向物流网络基础上进行扩建以增加逆向物流功能, 或构建独立的逆向物流网络, 而很少考虑逆向物流与正向物流的有机整合。另一方面, 回收中心配备不同的处理技术, 可能导致不同的处理成本, 因而还应该考虑回收中心的处理技术配备问题。此外, 现有研究一般假定各备选地点待建设施的处理能力是已知的, 但很多情况下需要根据模型来确定。为此, 笔者基于混合整数非线性规划(MNP)方法, 建立一种综合考虑的逆向物流网络优化设计模型。

### 1 问题描述

考虑构建一个逆向物流网络, 包括消费区域、回收中心、分销中心、集成分销回收中心、再处理工厂、废弃物处置中心等。网络结构如图1所示。

从消费区域收集的废旧产品运往回收中心, 经回收中心拆卸、检验、分类等处理后, 一部分没有利用价值的废旧产品运往废弃物处置中心, 剩下的运往再处理工厂。再处理工厂既可进行废旧产品再处理, 又可进行新产品生产。该模型仅考虑一种再处理方式, 即重新制造使产品达到新产品的质量水平。再生(新)产品则通过分销中心进行销售。

为降低物流成本和提高物流效率, 考虑正向和逆向物流的设施集成和运输整合。若在某地同时开设分销中心和回收中心, 则可以考虑开设集成分销/回收中心。该中心并用同一车队进行正向配送和逆向回收, 同时进行正向和逆向运输的整合, 即利用正向配送车辆的回程运输废旧产品。

逆向物流网络设计就是要确定上述各种设施的数量和位置, 并在由此构成的各条物流路径上合理分配物流量。目标是在一定的约束条件下, 使计划期内的净收益最大。

### 2 逆向物流网络优化设计模型

#### 2.1 模型假设

(1) 考虑单产品情形, 再处理工厂既可进行废旧产品再处理, 又可进行新产品生产。该模型仅考虑一种再处理方式, 即重新制造。两者的单位生产运营成本不同, 但均用来满足同一市场需求, 且单位分销运营成本和单位售价相同。

(2) 按消费区域总计产品(包括再生产品和新产品)需求量和废旧产品数量, 且消费区域划分及其产品需求量和废旧产品数量已知。

(3) 回收的废旧产品全部被运往回收中心(或集成分销/回收中心), 其最大可再制造率已知。不考虑再制造过程中的材料损耗, 即经回收中心(或集成分销/回收中心)检测合格的全部被再制造。

(4) 废弃物处置中心的数量、位置和处理能力已知, 仅在一些地理位置已知的备选地点中考虑再处理工厂、分销中心、回收中心、集成分销回收中心的选址, 其单位运营成本已知。

(5) 废旧产品回收的逆向运输没有日程限制, 可以等待利用正向配送车辆的回程来运输。

(6) 产品的单位运输成本与运输距离成正比, 运输距离用平面坐标上的欧几里德距离表示。

(7) 考虑回收中心处理技术、再处理工厂、分销中心建设成本的规模经济效应, 假定其建设成本与其设计处理能力之间呈分段线性关系。

#### 2.2 符号说明 为方便叙述, 引入如下符号。

(1) 下标。i 为已知的消费区域,  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ ; j 为可能开设回收中心的地点,  $j \in \{1, 2, \dots, N, N+1, \dots, J\}$ ; k 为已知的废弃物处置中心,  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ; l 为可能开设再处理工厂的地点,  $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ ; m 为可能开设分销中心的地点,  $m \in \{1, 2, \dots, N, N+1, \dots, M\}$ ; n 为可能开设集成分销/回收中心的地点,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ; t 为回收中心可能配备的处理技术类别,  $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 。

(2) 决策变量。  $y_j^b$  为 0-1 变量, 表示是否在 j 地开设

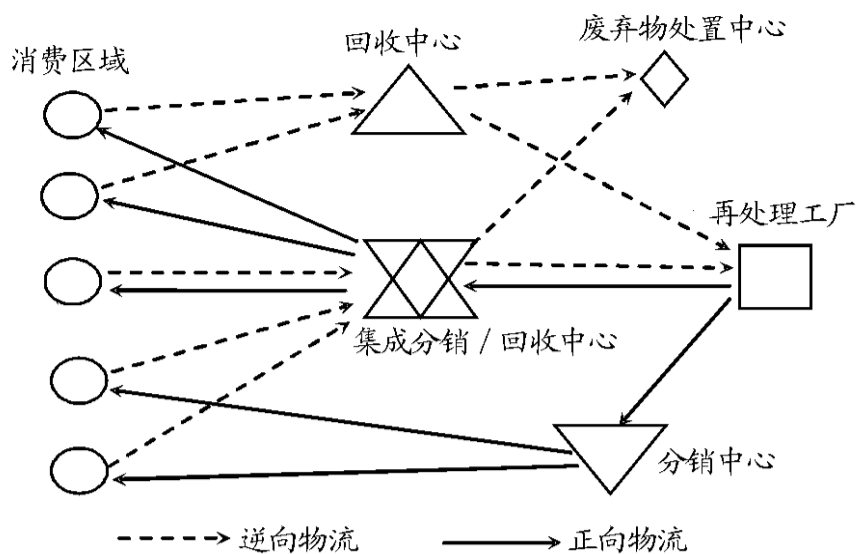


图1 逆向物流网络示意

回收中心,是取1,否取0; $y_{jt}^b$ 为0-1变量,表示是否为回收中心j配备第t类处理技术,是取1,否取0; $y_l^d$ 为0-1变量,表示是否在l地开设再处理工厂,是取1,否取0; $y_m^e$ 为0-1变量,表示是否在m地开设分销中心,是取1,否取0; $y_n^f$ 为0-1变量,表示是否在n地开设集成分销/回收中心,是取1,否取0; $x_{ijt}^{ab}$ 为消费区域i运往回收中心j采用处理技术t处理的废旧产品数量; $x_{jk}^{bc}$ 为回收中心j运往废弃物处置中心k的不可再制造废旧产品数量; $x_{jl}^{bd}$ 为回收中心j运往再处理工厂l的可再制造废旧产品数量; $x_{lm}^{de}$ 为再处理工厂l运往分销中心m的产品(包括再生产品和新产品)数量; $x_{mi}^{ea}$ 为分销中心m运往消费区域i的产品数量; $x_{in}^{af}$ 为消费区域i的废旧产品回收量中利用正向路径ni的配送车辆回程运往集成分销/回收中心n采用处理技术t进行处理的数量; $x_n^{fd}$ 为集成分销/回收中心n的可再制造废旧产品利用正向路径ln的配送车辆回程运往再处理工厂l的数量; $u_i$ 为消费区域i的产品需求未被满足的数量; $v_i$ 为消费区域i的废旧产品未被回收的数量; $z_{jt}^b$ 为回收中心j配备第t类处理技术的设计处理能力; $z_l^d$ 为再处理工厂l的设计生产能力; $z_m^e$ 为分销中心m的设计服务能力。

(3) 参数。 $s_{jt}^b$ 为回收中心j配备第t类处理技术的成本,假定是其设计处理能力 $z_{jt}^b$ 的分段线性关系(该处以分两段为例),即

$$s_{jt}^b = \begin{cases} g_{jt}^b + w_{jt}^{b1} z_{jt}^b & (0 \leq z_{jt}^b \leq B_{jt}^b) \\ g_{jt}^b + w_{jt}^{b1} B_{jt}^b + w_{jt}^{b2} (z_{jt}^b - B_{jt}^b) & (B_{jt}^b < z_{jt}^b \leq A_{jt}^b) \end{cases}$$

式中, $g_{jt}^b$ 为回收中心j配备第t类处理技术的固定成本, $w_{jt}^{b1}$ 和 $w_{jt}^{b2}$ 为与其设计处理能力相关的单位建设成本( $w_{jt}^{b1} > w_{jt}^{b2}$ ), $A_{jt}^b$ 为其最大处理能力, $B_{jt}^b$ 为反映不同规模经济程度的处理能力分段点。

$s_l^d$ 为在l地建设再处理工厂的成本,假定是其设计生产能力 $z_l^d$ 的分段线性关系(该处以分两段为例),即

$$s_l^d = \begin{cases} g_l^d + w_l^{d1} z_l^d & (0 \leq z_l^d \leq B_l^d) \\ g_l^d + w_l^{d1} B_l^d + w_l^{d2} (z_l^d - B_l^d) & (B_l^d < z_l^d \leq A_l^d) \end{cases}$$

式中, $g_l^d$ 为固定建设成本, $w_l^{d1}$ 和 $w_l^{d2}$ 为与其设计生产能力相关的单位建设成本( $w_l^{d1} > w_l^{d2}$ ), $A_l^d$ 为最大生产能力, $B_l^d$ 为反映不同规模经济程度的生产能力分段点;

$s_m^e$ 为在m地建设分销中心的成本,假定是其设计服务能力 $z_m^e$ 的分段线性关系(该处以分两段为例),即

$$s_m^e = \begin{cases} g_m^e + w_m^{e1} z_m^e & (0 \leq z_m^e \leq B_m^e) \\ g_m^e + w_m^{e1} B_m^e + w_m^{e2} (z_m^e - B_m^e) & (B_m^e < z_m^e \leq A_m^e) \end{cases}$$

式中, $g_m^e$ 为固定建设成本, $w_m^{e1}$ 和 $w_m^{e2}$ 为与其设计服务能力相关的单位建设成本( $w_m^{e1} > w_m^{e2}$ ), $A_m^e$ 为最大服务能力, $B_m^e$ 为反映不同规模经济程度的服务能力分段点。

$g_j^b$ 为在j地开设回收中心的固定成本; $q_{jt}^b$ 为回收中心j采用第t类处理技术的单位废旧产品处理成本; $q_l^{dn}$ 为再处理工厂l的单位新产品生产运营成本; $q_l^{dr}$ 为再处理工厂l的单位再生产品生产运营成本; $q_m^e$ 为分销中心m的单位产品服务成本; $g_n^f$ 为在n地开设集成分销/回收中心,其固定开设成本相对于 $g_n^b + g_n^e$ 的节约额; $q_k^c$ 为废弃物处置中心k的单位废旧产品处理成本; $TR_{ij}^{ab}$ 为废旧产品由消费区域i运往回收中心j的单位距离运输成本; $L_{ij}^{ab}$ 为消费区域i到回收中心j的距离; $TR_{jk}^{bc}$ 为不可再制造废旧产品由回收中心j运往废弃物处置中心k的单位距离运输成本; $L_{jk}^{bc}$ 为回收中心j到废弃物处置中心k的距离; $TR_{jl}^{bd}$ 为可再制造废旧产品由回收中心j运往再处理工厂l的单位距离运输成本; $L_{jl}^{bd}$ 为回收中心j到再处理工厂l的距离; $TR_{lm}^{de}$ 为产品由再处理工厂l运往分销中心m的单位距离运输成本; $L_{lm}^{de}$ 为再处理工厂l到分销中心m的距离; $TR_{mi}^{ea}$ 为产品由分销中心m运往消费区域i的单位距离运输成本; $L_{mi}^{ea}$ 为分销中心m到消费区域i的距离; $TR_{in}^{af}$ 为消费区域i回收的废旧产品利用正向路径ni的配送车辆回程运往集成分销/回收中心n所节约的单位距离运输成本; $L_{in}^{af}$ 为消费区域i到集成分销/回收中心n的距离, $L_{in}^{af} = L_{ij}^{ab}$ (当j=n时); $TR_n^{fd}$ 为集成分销/回收中心n的可再制造废旧产品利用正向路径ln的配送车辆回程运往再处理工厂l所节约的单位距离运输成本; $L_n^{fd}$ 为集成分销/回收中心n到再处理工厂l的距离, $L_n^{fd} = L_{jl}^{bd}$ (当j=n时); $d_i$ 为消费区域i的产品需求量; $r_i$ 为消费区域i的可回收废旧产品数量; $P_i^u$ 为产品在消费区域i的单位售价; $p_i^v$ 为消费区域i的废旧产品单位收集成本; $c_i^u$ 为消费区域i的产品需求未被满足的单位缺货成本; $c_i^v$ 为消费区域i的废旧产品未被回收的单位处罚成本; $A_k^c$ 为废弃物处置中心k的最大处理能力; $j_t$ 为废旧产品经回收中心j采用第t类处理技术处理后的最大可再制造率。

2.3 模型建立 引入0-1变量 $j_t^b$ 。令

$$j_t^b = \begin{cases} 0 & (0 \leq z_{jt}^b \leq B_{jt}^b) \\ 1 & (B_{jt}^b < z_{jt}^b \leq A_{jt}^b) \end{cases}$$

可将分段函数表示的 $s_{jt}^b$ 转化为如下形式:

$$s_{jt}^b = g_{jt}^b + w_{jt}^{b1} z_{jt}^b + [(w_{jt}^{b1} B_{jt}^b + w_{jt}^{b2} (z_{jt}^b - B_{jt}^b) - w_{jt}^{b1} z_{jt}^b) / j_t^b]$$

同时,满足约束条件 $0 \leq z_{jt}^b \leq A_{jt}^b$ 和 $(B_{jt}^b + A_{jt}^b) j_t^b - A_{jt}^b < z_{jt}^b \leq (B_{jt}^b + A_{jt}^b) j_t^b + B_{jt}^b$ 。同理,可对 $s_l^d$ 和 $s_m^e$ 进行转化。

至此,可建立综合考虑正向和逆向物流的设施集成、正向和逆向物流的运输整合、回收中心处理技术的配备问题以及回收中心处理技术、再处理工厂、分销中心设计能力决策问题的逆向物流网络设计模型:

$$\max Z = \sum_{m=1}^M \rho^u X_{mi}^{ea} - \sum_{j=1}^J g_j^b Y_j^b + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (g_{jt}^b + w_{jt}^{b1} z_{jt}^b + (w_{jt}^{b1} B_{jt}^b + w_{jt}^{b2} (z_{jt}^b - B_{jt}^b) - w_{jt}^{b1} z_{jt}^b) j_t^b) Y_{jt}^b + \sum_{l=1}^L (g_l^d + w_l^{d1} z_l^d + (w_l^{d1} B_l^d + w_l^{d2} (z_l^d - B_l^d) - w_l^{d1} z_l^d) l^d) Y_l^d + \sum_{m=1}^M (g_m^e +$$

$$W_m^{e1} Z_m^e + (W_m^{e1} B_m^e + W_m^{e2} (Z_m^e - B_m^e) - W_m^{e1} Z_m^e) Y_m^e - \sum_{n=1}^N g_n^f Y_n^f + \sum_{i=lj=1t=1}^I J T Q_i^b X_{ijt}^{ab} + \sum_{k=1}^K Q_k^c X_{jk}^{bc} + \sum_{l=1}^L Q_l^{dr} X_{jl}^{bd} + \sum_{l=1}^L Q_l^{dn} (X_{lm}^{de} - X_{jt}^{bd}) + \sum_{m=1}^M Q_m^e X_{mi}^{ea} + \sum_{i=lj=1t=1}^I J T TR_{ij}^{ab} L_{ij}^{ab} X_{ijt}^{ab} + \sum_{j=lk=1}^J K TR_{jk}^{bc} L_{jk}^{bc} X_{jk}^{bc} + \sum_{j=l=1}^J L TR_{jl}^{bd} L_{jl}^{bd} X_{jl}^{bd} + \sum_{l=1m=1}^L M TR_{lm}^{de} L_{lm}^{de} X_{lm}^{de} + \sum_{m=li=1}^M I TR_{mi}^{ea} L_{mi}^{ea} X_{mi}^{ea} - (\sum_{i=ln=1t=1}^I N T TR_{in}^{af} L_{in}^{af} X_{irt}^{af} + \sum_{n=1l=1}^N L TR_{nl}^{fd} L_{nl}^{fd} X_{nl}^{fd}) + \sum_{i=1}^I (c_i^u u_i + c_i^v v_i) + \sum_{i=lj=1t=1}^I J T P_i^v X_{ijt}^{ab} / \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{m=1}^M X_{mi}^{ea} = d_i - u_i \quad P_i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1t=1}^J T X_{ijt}^{ab} = r_i - v_i \quad P_i \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{jk}^{bc} + \sum_{l=1}^L X_{jl}^{bd} = \sum_{i=1t=1}^I T X_{ijt}^{ab} \quad P_j \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{jl}^{bd} = \sum_{i=1t=1}^I T X_{ijt}^{ab} \quad P_j \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jl}^{bd} = \sum_{m=1}^M X_{lm}^{de} \quad P_l \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{lm}^{de} = \sum_{i=1}^I X_{mi}^{ea} \quad P_m \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{irt}^{af} = X_{ni}^{ea} \quad P_{i,n} \quad (8)$$

$$X_{irt}^{af} = X_{irt}^{ab} \quad P_{i,n,t} \quad (9)$$

$$X_{nl}^{fd} = X_{nl}^{de} \quad P_{l,n} \quad (10)$$

$$X_{nl}^{fd} = X_{nl}^{bd} \quad P_{l,n} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ijt}^{ab} = z_{jt}^b y_{jt}^b \quad P_{j,t} \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jk}^{bc} = A_k^c \quad P_k \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{lm}^{de} = z_l^d y_l^d \quad P_l \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{mi}^{ea} = z_m^e y_m^e \quad P_m \quad (15)$$

$$z_{jt}^b = A_{jt}^b y_{jt}^b \quad P_{j,t} \quad (16)$$

$$z_l^d = A_l^d y_l^d \quad P_l \quad (17)$$

$$z_m^e = A_m^e y_m^e \quad P_m \quad (18)$$

$$y_{jt}^b = y_j^b \quad P_{j,t} \quad (19)$$

$$y_n^f = y_n^b \quad P_n \quad (20)$$

$$y_n^f = y_n^e \quad P_n \quad (21)$$

$$z_{jt}^b > (B_{jt}^b + A_{jt}^b) y_{jt}^b - A_{jt}^b \quad P_{j,t} \quad (22)$$

$$z_{jt}^b = (B_{jt}^b + A_{jt}^b) y_{jt}^b + A_{jt}^b \quad P_{j,t} \quad (23)$$

$$z_l^d > (B_l^d + A_l^d) y_l^d - A_l^d \quad P_l \quad (24)$$

$$z_l^d = (B_l^d + A_l^d) y_l^d + B_l^d \quad P_l \quad (25)$$

$$z_m^e > (B_m^e + A_m^e) y_m^e - A_m^e \quad P_m \quad (26)$$

$$z_m^e = (B_m^e + A_m^e) y_m^e + A_m^e \quad P_m \quad (27)$$

$$y_j^b, y_{jt}^b, Y_n^d, Y_m^e, Y_n^f, y_{jt}^b, l^d, m^e \in \{0,1\} \quad P_{j,l,m,n,t} \quad (28)$$

$$X_{ijt}^{ab}, X_{jk}^{bc}, X_{jl}^{bd}, X_m^{de}, X_{ni}^{ea}, X_{irt}^{af}, X_{nl}^{fd}, u, v, z_j^b, z_l^d, z_m^e = 0 \quad (29)$$

$$P_{i,j,k,l,m,n,t} \quad (29)$$

目标式(1)表示在设计逆向物流网络时,使系统计划期内的净收益最大。约束式(2)和(3)描述了产品需求和回收的满足情况;式(4)描述了每个回收中心的物流量守恒;式(5)规定了废旧产品经回收中心j采用第t类处理技术处理后的最大可再制造率,以满足技术和经济上的可行性;式(6)表示每个再处理工厂的废旧产品输入量不超过产品输出量,不足部分表示补充新产品的数量;式(7)描述了每个分销中心的物流量守恒;式(8)表示逆向路径in上利用正向配送车辆回程运输的废旧产品量不超过正向路径ni上的产品配送量(假设正向配送车辆满载);式(9)表示逆向路径in上利用正向配送车辆回程运输的废旧产品量 $X_{irt}^{af}$ 不超过该路径上的废旧产品回收总量 $X_{irt}^{ab}$ ,而剩余部分 $X_{irt}^{ab} - X_{irt}^{af}$ 需另外派车运输;式(10)表示逆向路径nl上利用正向配送车辆回程运输的废旧产品量不超过正向路径ln上的产品配送量(假设正向配送车辆满载);式(11)表示逆向物流nl上利用正向配送车辆回程运输的废旧产品量 $X_{nl}^{fd}$ 不超过该路径上的可再制造废旧产品回收量 $X_{nl}^{bd}$ ,而剩余部分 $X_{nl}^{bd} - X_{nl}^{fd}$ 需另外派车运输;式(12)~(15)表示各种设施的处理能力限制;式(16)~(18)表示各种待建设施的设计能力不超过其最大能力限制;式(19)保证只为已经开设的回收中心配备处理技术;式(20)和(21)表示只有在某地同时开设分销中心和回收中心时才考虑开设集成分销/回收中心。需要说明的是,当 $y_n^f$ 为1时, $y_n^b$ 和 $y_n^e$ 必然都为1,但这只意味着仅开设集成分销/回收中心,而不是三者都开设;式(22)~(27)是转化分段函数而增加的约束;式(28)和(29)规定了各个变量的取值范围。

该模型是一个MNL P模型,可利用LINGO8.0软件包求解。

参考文献

[1] FLHSCHMANN M, KRUIJE HR, DEKKERR, et al. A characterisation of logistics networks for product recovery[J]. *Omega*, 2000, 28: 653 - 666.  
 [2] THERRY M, SALOMON M, NUNENJ, et al. Strategic issues in product recovery management[J]. *California Management Review*, 1995, 37(2): 114 - 135.  
 [3] 马祖军, 代颖, 张殿业. 逆向物流网络结构与设计[J]. *物流技术*, 2004, (4): 12 - 14.  
 [4] FKEUSCGNABB M, BKIENGF RUWAARD J M, Dekker R, et al. Quantitative models for reverse logistics: a review[J]. *European Journal of Operation Research*, 1997, 103: 1 - 17.  
 [5] FLEISCHMANN M. Quantitative models for reverse logistics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.