

基于随机期望值模型的不确定环境下再制造逆向 物流网络选址研究*

毛海军, 吉星照

(东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘要: 再制造逆向物流的主要特征是回收产品的数量、质量不确定, 以及再制造出“新”产品的需求不确定。基于不确定规划相关理论, 在分析再制造逆向物流网络结构的基础上, 将各个回收/消费市场的回收产品的数量、质量以及“新”产品的需求量看作随机参数, 提出了再制造逆向物流网络的随机期望值模型, 并利用遗传算法与随机模拟相结合的混合智能算法设计了该模型的求解算法。最后, 根据算例对模型进行了计算, 验证了该方法的可行性。

关键词: 再制造逆向物流网络; 随机期望值模型; 混合智能算法

中图分类号: TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0130-04

Research on Location Model of Remanufacturing Reverse Logistics Network under Uncertain Environment with EVM

MAO Hai-jun, JI Xing-zhao

(College of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: In the remanufacturing reverse logistics network, the quantity and quality of recycled products, and requirement of the “new” remanufactured products, are uncertain. According to theory of uncertain program, and base on the analysis of the construction of remanufacturing reverse logistics network, EVM (Expected value Programming) for the remanufacturing reverse logistics network was presented by treating the quantity and quality of recycled products and requirement of the “new” remanufactured products as stochastic parameters. And the solution scheme was pursued by the hybrid intelligence algorithm (genetic algorithm combined with stochastic simulation technique) as well. In the end, the effectiveness and adaptation were demonstrated by a case.

Key words: remanufacturing logistics network; EVM; hybrid intelligence algorithm

0 引言

再制造 (Remanufacturing) 是指通过必要的拆解、清洗、废旧零件检测更新、再装配及产品整体监测等, 将废旧产品恢复到“新”状态的再循环过程, 是一种能保护环境、节约能源, 经济和社会效益非常显著的绿色制造。实施再制造需要强大的逆向物流网络的支撑, 高效、通达、快捷的再制造逆向物流网络, 对促进废旧产品的准时回收与充分利用, 促进再制造产业的发展具有十分重要的作用。与正向物流网络相比, 再制造逆向物流最基本特点是网络结构输入参数的不确定

性, 这些因素主要包括: 回收的废旧产品的地点、时间、数量、质量的不确定性; “新”产品的需求地点、时间、数量的不确定性。这些不确定性导致了在再制造逆向物流网络布局选址、物流设施规模、检测和加工处理能力、再制造生产计划安排、销售安排等方面的一系列不确定。因此, 如何构筑一个减少不确定性因素影响的物流网络, 是构建再制造逆向物流的主要目标。

1 网络模型

按照逆向物流供应链的形式, 再制造逆向物流网络一般可分为闭环和开环两种。闭环的特性体现在: 制造/再制造企业构建自有的逆向物流网络, 将废旧产品回收、拆解、清洗、检测等, 开展再制造生产以及产品销售, 基本形成一个封闭的物流供应链。开环的特性体现在: 废旧产品由废品处理商、

收稿日期: 2006-08-01

修回日期: 2006-09-20

基金项目: *国家自然科学基金资助项目 (50575043); 东南大学
国家自然科学基金预研基金资助项目 (9221001359)

作者简介: 毛海军 (1965-), 男, 浙江余姚人, 教授。

毛坯制造商等其他企业回收, 通过不同的企业进行拆解、清洗、检测和零部件再加工等, 制造/再制造企业通过购买“新”的零部件, 开展再制造生产, 和产品销售。本文主要研究在不确定条件下, 单产品、多周期的闭环再制造逆向物流网络模型的构建。

1.1 网络结构

再制造过程主要有以下几个步骤: 回收、拆解、清洗、检测、零部件再加工或更新、产品装配和检测等几个步骤。考虑到运输、仓储成本、生产设施设备投入以及地域环境等综合, 将再制造逆向物流网络分为: 回收/销售市场、回收中心、拆解中心、再制造中心、再分销中心以及焚烧填埋中心等六个部分, 如图1所示。

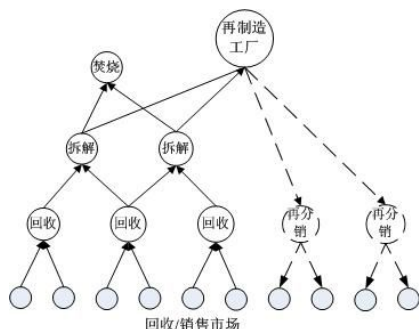


图1 网络结构图

Fig.1 Chart of network frame

回收中心从回收市场上将废旧产品回收后, 进行简单的清洗、检验、分类等, 然后集中起来将废旧产品运输到拆解中心; 拆解中心将运输来的废旧产品进行拆解, 对各个部件进行清洗、检测分析, 判断其是否可以再用, 不能再用的送去焚烧填埋中心进行无污染处理, 可利用的将其运送到再制造工厂进行加工制造; 再制造工厂通过这些“旧”的以及购买的新零部件进行再装配和整体检测, 生产出“新”的产品, 然后通过再分销中心将货物配送到销售市场。

1.2 模型假设

(1) 文中只考虑单产品、多周期的情况下再制造逆向物流网络建模, 不考虑再制造工厂采购的其他零部件; 再分销系统只考虑再制造产品, 不考虑其他产品。

(2) 候选地理网络结点的数量、位置、运输费率已经确定, 建立回收市场 (或消费市场) 的集

合, 其回收需求和产品需求均为随机, 其中产品需求两大于再制造的生产量;

(3) 网络结点按照回收、拆解、再制造、再分销等功能分层次, 确定各个功能设施选址的范围; 只考虑回收中心、拆解中心、再制造工厂、再分销中心的选址问题, 其数量、位置不确定, 但是必须在各自选址范围内进行选址选择; 回收中心、拆解中心、再制造工厂、再分销中心所选网络结点相同时, 可建设各功能设施的组合, 但是其在规模、运作上相互独立, 不考虑其建设成本会因综合建立而降低; 不考虑焚烧填埋地的选址问题;

(4) 回收中心、拆解中心、再制造工厂、再分销中心的周期内的作业能力和最大库存量有限制, 并采用同一的单位; 通过周期期末库存实现周期期间的连接。

(5) 不考虑库存策略、运输策略的影响, 仅研究战略层面的选址-分派问题。只考虑两点间的运输, 不考虑多点间最短路径问题, 忽略在同一地理网络结点内的运输费用。

(6) 主要考虑仓储成本、运输成本等物流成本和建设关闭成本等, 使网络建设运营成本最小。

1.3 数学模型

(1) 固定参数

周期: $Term = \{1, 2, 3, \dots, t, \dots, T\}$

回收/销售市场: $Market = \{1, 2, 3, \dots, m, \dots, M\}$

网络结点:

$Point = \{1, 2, 3, \dots, n, \dots, N\}$ $I, J, K, L \subseteq Point$

$I = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{(IN)}\}$, $J = \{b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_{(JN)}\}$

$K = \{c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_{(KN)}\}$, $L = \{d_1, d_2, \dots, d_l, \dots, d_{(LN)}\}$

表示回收中心 I 、拆解中心 J 、再制造工厂 K 、再分销中心 L 的可选集

$FNN_{n_1 n_2}$ 表示从网络结点 n_1 到结点 n_2 的运输费率

FMN_{mn} 表示从回收市场 m 到结点 n 的运输费率

存储费率: CI_{ti} 、 CJ_{tj} 、 CK_{tk} 、 CL_{tl}

建设成本: $BR I_{ti}$ 、 $BR J_{tj}$ 、 $BR K_{tk}$ 、 $BR L_{tl}$

关闭成本: $BW I_{ti}$ 、 $BW J_{tj}$ 、 $BW K_{tk}$ 、 $BW L_{tl}$

最大库存量: $MAX I_{ti}$ 、 $MAX J_{tj}$ 、 $MAX K_{tk}$ 、 $MAX L_{tl}$

作业能力: EI_{ti} 、 EJ_{tj} 、 EK_{tk} 、 EL_{tl}

(2) 随机参数

ε_{tm} 、 ξ_{tm} 表示周期 t 内回收/消费市场 m 的随机回收量和随机需求量

PI_{ti} 、 PJ_{tj} 、 PK_{tk} 表示周期 t 内回收中心 i 、拆解中心 j 、再制造工厂 k 的物流量的随机转换率

(3) 变量

运输变量:

X_{tmi} 周期 t 内从回收市场 m 到回收中心 i 的运输量

Y_{tj} 周期 t 内从回收中心 i 到拆解中心 j 的运输量

Z_{tjk} 周期 t 内从拆解中心 j 到再制造工厂 k 的运输量

S_{tkl} 周期 t 内从再制造工厂 k 到再分销中心 l 的运输量

W_{tlm} 周期 t 内从再分销中心 l 到消费市场 m 的物流量

库存变量: $t=0$ 时为初始库存

GI_{ti} 、 GJ_{tj} 、 GK_{tk} 、 GL_{tl} 表示周期 t 期末时回收中心 i

拆解中心 j 、再制造工厂 k 、再分销中心 l 的库存量

选址变量: 选择该结点时为 1, 否则为 0

RI_{ti} 、 RJ_{tj} 、 RK_{tk} 、 RL_{tl} 表示周期 t 内, 回收中心 i

拆解中心 j 、制造工厂 k 、再分销中心 l 等选址与否

(4) 目标函数

$$\text{Min} [E [c() + f() + b(), \varepsilon_{tm}, \xi_{tm}, PI_{ti}, PJ_{tj}, PK_{tk}]]$$

(5) 约束条件

$$E \left[\sum_{i=1}^{IN} RI_{ti} \times X_{tmi} - \varepsilon_{tm} \right] = 0$$

$$E \left[\sum_{l=1}^{LN} (RL_{tl} \times W_{tlm}) - \xi_{tm} \right] = 0$$

$$E \left[\sum_{m=1}^M (RI_{ti} \times X_{tmi}) - RI_{ti} \times EI_{ti} \right] \leq 0$$

$$E [RI_{ti} \times GI_{ti} - RI_{ti} \times MAXI_{ti}] \leq 0$$

$$E \left[\begin{aligned} &RI_{ti} \times PI_{ti} \times \sum_{m=1}^M X_{tmi} + RI_{ti} \times PI_{ti} \times GI_{(t-1)i} - \\ &RI_{ti} \times PI_{ti} \times GI_{ti} - RI_{ti} \times \sum_{j=1}^{JN} (RJ_{tj} \times Y_{tj}) \end{aligned} \right] = 0$$

$$E \left[RJ_{tj} \times \sum_{i=1}^{IN} (RI_{ti} \times Y_{tj}) - RJ_{tj} \times EJ_{tj} \right] \leq 0$$

$$E [RJ_{tj} \times GJ_{tj} - RJ_{tj} \times MAXJ_{tj}] \leq 0$$

$$E \left[\begin{aligned} &RJ_{tj} \times PJ_{tj} \times \sum_{i=1}^{IN} (RI_{ti} \times Y_{tj}) + RJ_{tj} \times PJ_{tj} \times GJ_{(t-1)j} - \\ &- RJ_{tj} \times PJ_{tj} \times GJ_{tj} - RJ_{tj} \times \sum_{k=1}^{KN} (RK_{tk} \times Z_{tjk}) \end{aligned} \right] = 0$$

$$E [RK_{tk} \times \sum_{j=1}^{JN} (RJ_{tj} \times Z_{tjk}) - RK_{tk} \times EK_{tk}] \leq 0$$

$$E [RK_{tk} \times GK_{tk} - RK_{tk} \times MAXK_{tk}] \leq 0$$

$$E \left[\begin{aligned} &RK_{tk} \times PK_{tk} \times \sum_{j=1}^{JN} (RJ_{tj} \times Z_{tjk}) + RK_{tk} \times PK_{tk} \times GK_{(t-1)k} - \\ &- RK_{tk} \times PK_{tk} \times GK_{tk} - RK_{tk} \times \sum_{l=1}^{LN} (RL_{tl} \times S_{tkl}) \end{aligned} \right] = 0$$

$$E [RL_{tl} \times \sum_{k=1}^{KN} (RK_{tk} \times S_{tkl}) - RL_{tl} \times EL_{tl}] \leq 0$$

$$E [RL_{tl} \times GL_{tl} - RL_{tl} \times MAXL_{tl}] \leq 0$$

$$E \left[\begin{aligned} &RL_{tl} \times \sum_{k=1}^{KN} (RK_{tk} \times S_{tkl}) + RL_{tl} \times GL_{(t-1)l} - \\ &RL_{tl} \times GL_{tl} - RL_{tl} \times \sum_{m=1}^M W_{tlm} \end{aligned} \right] = 0$$

$X_{tmi}, Y_{tj}, Z_{tjk}, S_{tkl}, W_{tlm},$

$GI_{ti}, GJ_{tj}, GK_{tk}, GL_{tl} \geq 0$

$RI_{ti}, RJ_{tj}, RK_{tk}, RL_{tl} \in \{0, 1\}$

$t \in \{1, 2, 3, \dots, T\}, n \in \{1, 2, 3, \dots, N\},$

$i \in \{1, 2, 3, \dots, IN\}, j \in \{1, 2, 3, \dots, JN\}$

$k \in \{1, 2, 3, \dots, KN\}, l \in \{1, 2, 3, \dots, LN\},$

$m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$

$$\begin{aligned} \text{仓储成本 } c() = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{IN} \sum_{m=1}^M CI_{ti} X_{tmi} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{JN} \sum_{i=1}^{IN} CJ_{tj} Y_{tj} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{KN} \sum_{j=1}^{JN} CK_{tk} Z_{tjk} + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{LN} \sum_{k=1}^{KN} CL_{tl} S_{tkl} \end{aligned}$$

$$\text{运输成本 } f() = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{IN} \sum_{m=1}^M Fmn_{ma_i} X_{tmi} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{JN} \sum_{i=1}^{IN} Fnn_{a_i b_j} Y_{tj} +$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{KN} \sum_{j=1}^{JN} Fnn_{b_j c_k} Z_{tjk} + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{LN} \sum_{k=1}^{KN} Fnn_{c_k d_l} S_{tkl} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{LN} Fnn_{md_l} W_{tlm}$$

建设关闭成本: 注: $\text{fix}()$ 表示无四舍五入取整

$b() =$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{IN} BR_{ti} \times \text{fix}((RI_{ti} - RI_{t-1i}) + 1) / 2 + \sum_{j=1}^{JN} BR_{tj} \times \text{fix}((RJ_{tj} - RJ_{t-1j}) + 1) / 2 \\ & + \sum_{k=1}^{KN} BR_{tk} \times \text{fix}((RK_{tk} - RK_{t-1k}) + 1) / 2 + \sum_{l=1}^{LN} BR_{tl} \times \text{fix}((RL_{tl} - RL_{t-1l}) + 1) / 2 \\ & - \sum_{i=1}^{IN} BW_{ti} \times \text{fix}((RI_{ti} - RI_{t-1i}) - 1) / 2 - \sum_{j=1}^{JN} BW_{tj} \times \text{fix}((RJ_{tj} - RJ_{t-1j}) - 1) / 2 \\ & - \sum_{k=1}^{KN} BW_{tk} \times \text{fix}((RK_{tk} - RK_{t-1k}) - 1) / 2 - \sum_{l=1}^{LN} BW_{tl} \times \text{fix}((RL_{tl} - RL_{t-1l}) - 1) / 2 \end{aligned}$$

2 混合智能算法设计及算例

再制造逆向物流网络属于战略层次的选址-分派问题, 可将求解模型过程分为: 选址决策过程、随机模拟过程和分派决策过程。计算过程如图 2 所示。

下面结合具体算例, 进行求解。

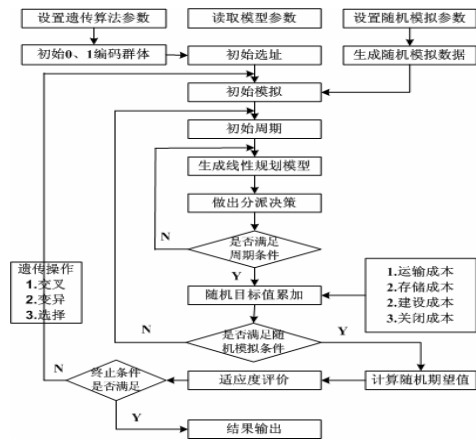


图 2 计算步骤

Fig.2 Calculation steps

某汽车制造企业, 拟开展废旧汽车发动机再制造业务。经过市场分析和网络布局分析, 在长三角地区建设再制造逆向物流网络。其中网络结点 $\text{Point}=5$, 回收/销售市场 $\text{Market}=11$, 周期 $\text{Term}=2$, 其中各周期中随机参数发生变化, 而网络固定参数保持不变。模型中 ε_{tm} 、 ξ_{tm} 、 PI_{ti} 、 PJ_{tj} 、 PK_{tk} 为随机变量。模型参数如表 1、2 所示。

表 1 运输费率、随机回收/需求期望值参数
Table.1 Parameter of transport costs. Random reuse/requirement expectation

	费率 Fmn (Fnn) t/元					ε (t)		ζ (t)	
	南京	常州	无锡	苏州	上海	t=1	t=2	t=1	t=2
南京	20(0)	90	120	140	200	300	340	260	300
常州	90	13(0)	30	60	115	240	280	200	230
无锡	120	30	13(0)	33	90	240	270	210	240
苏州	140	60	33	13(0)	65	270	290	240	260
上海	200	115	90	65	30(0)	360	450	340	400
扬州	65	65	105	125	205	250	260	210	230
镇江	55	55	75	105	185	220	180	190	210
宜兴	100	38	43	75	140	200	190	180	190
江阴	150	30	28	55	130	230	260	200	210
张家港	160	68	35	58	100	210	270	210	220
昆山	165	85	55	28	35	200	280	240	260

表 2 再制造逆向物流网络参数表
Table 2 Parameter of remanufacturing network of convers bargain

类型	回收	拆解	再制造	再分销	回收	拆解	再制造	再分销
结点	可选性 R				存储费率 C (元/t)			
南京	1	1	1	1	40	45	55	40
常州	1	1		1	30	41		30
无锡	1			1	30			30
苏州	1	1		1	35	40		35
上海	1	1	1	1	50	60	70	45
结点	最大库存量 MAX (t)				关闭成本 BW (万元)			
南京	60	55	75	70	0.66	40	4000	0.68
常州	50	50	0	60	0.49	30		0.5
无锡	50	0	0	70	0.5			0.58
苏州	60	55	0	60	0.55	40		0.55
上海	50	50	75	60	0.77	50	7000	0.7
	处理能力 E (t)				建设成本 BR (万元)			
南京	1000	2000	3500	1100	2	80	6000	3
常州	950	2000		900	1.5	70		2
无锡	900			950	1.6			2.5
苏州	950	2000		900	1.8	70		2.8
上海	1100	2000	4000	1200	2.5	90	9000	4
转换率	PI (%)		PJ (%)		PK (%)		PI、PJ、PK 服从泊松分布	
	t=1	t=2	t=1	t=2	t=1	t=2		
南京	91	88	66	71	108	115		
常州	89	83	67	78				
无锡	92	91						
苏州	93	89	74	68				
上海	88	83	71	66	105	112		

注：当网络结点同时位于某一城市时， $Fmn=0$ 。若是位于不同的城

市时 $Fnn=Fmn$ 。例如，20 (0) 表示回收市场（南京）到网络结点（南京）的费率是 $Fmn=40$ ，网络结点（南京）与网络结点（南京）的费率是， $Fnn=0$ 。其中 ε 和 ζ 服从泊松分布。

经过混合智能运算后，最后得到选址如图 3、图 4 所示。

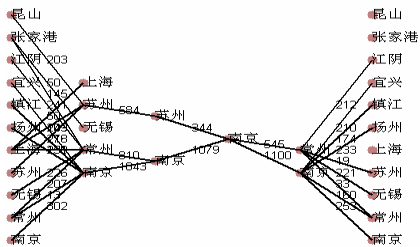


图 3 周期 t=1 时的网络模型图

Fig.3 Network model of cycle t=1

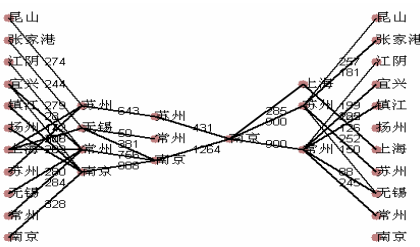


图 4 周期 t=2 时的网络模型图

Fig.4 Network model of cycle t=2

周期 $t=1$ 的选址为：回收中心[南京、常州、无锡、苏州、上海]；拆解中心[南京、苏州]；再制造工厂[南京]；再分销中心[南京、常州]。

周期 $t=2$ 的选址为：回收中心[南京、常州、无锡、苏州]；拆解中心[南京、常州、苏州]；再制造工厂[南京]；再分销中心[常州、苏州、上海]。

3 结 论

提出的单产品、多周期再制造逆向物流选址随机期望值模型及其混合智能算法，对研究再制造逆向物流设施选址有一定的参考价值。由于本文只研究了闭环下多周期、单产品再制造逆向物流网络模型的构建，因此，对多周期、多产品、开环、闭环等其他网络结构有待于进一步研究。

参考文献：

[1] Ahmad M.Alshamrani.Combined routing and product take-back strategies in reverse logistics [J]. CaseWestern Reserve University, Ph.D.thesis, 2003.
[2] Rolf Steinhilper, 朱胜, 姚巨坤, 等. 再制造—再循环的最佳形式 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2006.3.
[3] 马祖军. 再制造逆向物流网络优化设计模型研究 [J]. 交通运输与信息工程学报, 2004,2(2):53-58.

作者地址：南京市 东南大学交通学院 210096