

基于模块化设计的多产品闭环供应链优化研究

胡觉亮^a, 丁晓韵^b, 韩曙光^a, 方 惠^b

(浙江理工大学, a. 理学院; b. 经济管理学院, 杭州 310018)

摘 要: 建立带能力限制的处理多种电子电器产品的闭环供应链优化模型。模型以产品模块为单位,构建了产品零售商—修复服务提供商—环保设备或工厂(包含零件供应商提供零件给工厂环节)—配送中心—产品零售商的闭环供应链系统。模型全面考虑到电子产品逆向物流处理流程以及政府政策等企业外部环境,以最大化闭环供应链利润为目标函数,以回流产品的处理量和各节点处理能力为约束,最后,利用一个算例验证模型的合理性。

关键词: 闭环供应链; 模块化设计; 逆向物流; 整数规划; 网络优化

中图分类号: F274

文献标志码: A

引 言

近年来,随着电子行业的发展,产品更新换代的速度加快,废弃产品数量激增^[1]。不处理好废弃电子电器产品,将给环境造成污染,同时会浪费许多宝贵的资源^[2]。虽然原有的供应链上可能拥有与逆向供应链相同的成员,但由于逆向供应链中废旧物品的收集和运输需要不同的操作处理,故将逆向供应链完全并入正向供应链是不可能的^[3]。因此整合正向供应链与逆向供应链迫在眉睫,于是形成了闭环供应链。闭环供应链(closed loop supply chain)与逆向物流(reverse logistics)问题成为近10年来国际学术界关注的重要议题。在实业界,越来越多的企业也开始将其纳入企业的战略体系,予以高度重视^[4]。有效管理闭环供应链,既可以优化生态环境,促进社会经济可持续发展,又可以为企业带来明显的经济效益,强化企业的竞争优势^[5]。但是企业在产品的回收、修复、再制造比例的确定上遇到很多困难。

目前,国内外学者充分关注闭环供应链问题的研究。Fleischmann等^[6]首先建立无能力限制的单一产品逆向物流网络模型;马祖军等^[7]在此基础上建立了有能力限制的单一产品逆向物流网络优化模型;黄铮^[8]

结合二者思想建立三层逆向物流网络优化模型,选择出最优回收中心地址和最优化路径。由于环境问题的日益突出,政府政策对企业实施闭环供应链起着至关重要的决定作用,宗接亮^[9]和宋杰珍^[10]在构建闭环供应链优化模型时均考虑到政府对企业回收产品补贴的影响。

另一方面,对闭环供应链的研究已从单一产品慢慢转化为多种类产品,更加符合实际情况。Mutha等^[11]和Das等^[12]用模块化产品设计思想处理多种产品、进行闭环供应链整合;Hu等^[13]和Jayaraman等^[14]提出多阶段处理多品种危险废品的逆向物流系统;陈志忠等^[15]考虑各物流节点的回收物品数量的不确定性,建立了模糊机会约束规划模型。

综上所述,可以考虑以产品模块为单位进行多品种产品闭环供应链优化,充分考虑到电子产品闭环供应链网络中的处理流程及政府政策等企业外部因素对企业回收的影响,建立闭环供应链整数规划模型。

一、模型建立

(一)问题描述

以产品模块为单位,构建零售商—修复服务提供商—工厂(零件提供商)—零售商的闭环物流网络(如图1)。零售商C回收产品P,将其运输至修复

收稿日期: 2013-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(11201428, 11271324); 浙江省自然科学基金(Y6110091); 浙江理工大学研究生创新研究项目(YCX12035)

作者简介: 胡觉亮(1958—),男,浙江杭州人,教授,主要从事运筹学理论与应用方面的研究。

通信作者: 韩曙光, E-mail: zist001@163.com

服务提供商 R, R 接收 P 后将其拆分成不同的模块 m (如产品 1 由模块 m_1, m_2, m_3 组成), 对其进行检测, 检测合格率为 σ , 将检测合格的模块送至工厂, 同时将检测不合格的产品送至最终处理厂进行焚毁掩埋等处理。工厂一方面接收修复服务提供商运送来的旧模块, 另一方面将供应商提供的零件 k 组装成模块, 把这些新旧模块组装成为不同质量水平的产品后将其将运至配送中心 (DC), 最后由配送中心

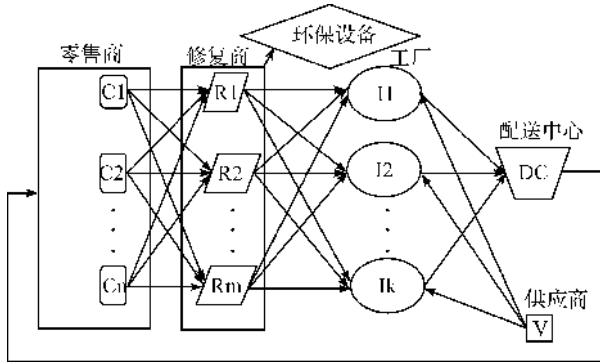


图 1 闭环供应链网络示意

配送给零售商以不同的价格售出不同质量水平的产品。论文考虑了政府回收单位补贴, 通过输入输出约束、各节点能力限制得到最优解优化物流网络。

(二)符号及变量

模型所涉及到的下标、参数及决策变量含义如表 1—表 3 所示。

表 1 模型下标含义

下标	意义
$p \in P$	产品集合
$q \in Q$	质量水平集合 ($q=1$: 产品全部由全新模块组成; $q=2$: 产品全部由新旧模块组成; $q=3$: 产品全部由旧模块组成)
$j \in J$	配送中心集合
$v \in V$	零件供应商集合
$k \in K$	零件集合
$c \in C$	零售商集合
$r \in R$	修复服务提供商集合
$i \in I$	工厂集合
$m \in M$	模块集合
$z \in Z$	环保设备集合

表 2 模型参数含义

参数	意义	参数	意义
P_{pc}	零售商 c 出售质量水平 q 的产品 p 的价格	NL_{mr}	修复服务提供商 r 修复的模块 m 的能力约束
γ_p	回收产品 p 的单位政府补贴	NL_{mi}	工厂 i 制造新模块 m 的能力约束
C_{pc}	零售商 c 回收产品 p 的单位契约成本	NL_{pji}	配送中心 j 接收质量水平为 q 的产品 p 的能力约束
FC_c	零售商 c 在契约中的固定成本	NL_{pqi}	工厂 i 生产质量水平 q 的产品 p 的能力约束
C_{pcr}	从零售商 c 到修复服务提供商 r 的单位运价	NL_{vk}	供应商 v 供应零件 k 的能力约束
C_{pij}	从工厂 i 送至配送中心 j 的产品 p 的单位成本	NL_{zm}	环保设备 z 处理模块 m 的能力约束
C_{pjic}	从配送中心 j 运至零售商 c 的产品 p 的单位成本	XQ_{pc}	零售商 c 所需的质量水平为 q 的产品 p 的需求
FD_j	配送中心 j 开启的固定费用	λ_{pm}	产品 p 所需要的模块 m 的数量
ω_1	单位回收产品最终处理费	pro	闭环供应链总利润
σ	模块检测可回收率	rev	闭环供应链总收益
ω_2	单位检测成本	co	闭环供应链总成本
C_{mr}	修复服务提供商 r 修复模块 m 的单位成本	HS	总回收成本
FR_r	修复服务提供商 r 开设的固定费用	PS	总配送成本
C_{ik}	供应商 v 提供组件 k 的单位成本	JC	总检测成本
FV_v	供应商 v 开设的固定成本	XF	总修复成本
C_{pqi}	工厂 i 生产质量水平为 q 的产品 p 的单位成本	SC	总生产成本
NL_{pc}	零售商 c 回收产品 p 的能力约束		

表 3 模型决策变量含义

决策变量	意义	决策变量	意义
Q_{pcr}	零售商 c 运往修复商 r 的产品 p 的量	n_v	供应商 v 是否在契约里
n_c	零售商 c 是否在契约中 (1: 是; 0: 否)	x_{pqi}	工厂 i 生产质量水平 q 的产品 p 的数量
y_{pqi}	从工厂 i 运至配送中心 j 的质量水平为 q 的产品 p 的数量	n_c	零售商 c 是否在契约里
L_{pjic}	从配送中心 j 运至零售商 c 的质量水平为 q 的产品 p 的数量	n_{pi}	工厂 i 是否生产产品 p
n_j	配送中心 j 是否开	Q_{zrm}	修复服务提供商 r 运输到最终处理厂 z 的模块 m 的数量
Q_{mr}	修复服务提供商 r 修复模块 m 的数量	Q_{rm}	修复服务提供商 r 修复模块 m 的数量
n_r	修复服务提供商 r 是否在契约里	n_r	修复服务提供商 r 是否加入契约
L_{pjic}	从配送中心 j 配送至零售商 c 的质量水平为 q 的产品 p 的量	Q_{mi}	工厂 i 制造的新模块 m 的数量
Q_{ik}	供应商 v 提供零件 k 的数量	n_i	工厂 i 是否加入契约

(三) 目标函数及约束条件

1. 目标函数

模型目标函数为利润最大化,即总收益减去总成本:

$$\max pro = rev - co \quad (1)$$

总收益分为两部分,即零售商销售产品所得收入以及零售商回收产品得到的政府补贴:

$$rev = \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} P_{pqc} \sum_{j \in J} L_{pqjc} + \sum_{p \in P} \gamma_p \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} Q_{pcr} \quad (2)$$

总成本分别由回收成本、配送成本、检测成本、修复成本以及生产成本构成:

$$co = HS + PS + JC + XF + SC \quad (3)$$

其中,回收成本由零售商回收产品成本总和及零售商参与供应链的固定成本构成:

$$HS = \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} C_{pc} \sum_{r \in R} Q_{pcr} + \sum_{c \in C} FC_c * n_c \quad (4)$$

配送成本包括零售商配送回收产品至修复商所需的费用、产品从工厂配送至配送中心的费用、配送中心将产品配送至零售商的费用:

$$PS = \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} Q_{pcr} * C_{pcr} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{pij} \sum_{q \in Q} y_{pqij} + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} C_{pjic} \sum_{q \in Q} L_{pqjc} + \sum_{j \in J} FD_j * n_j \quad (5)$$

检测处理成本包括每个模块检测费及被运至最终处理厂的模块的最终处理费:

$$JC = \omega_2 * \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} Q_{pcr} + \omega_1 * (1 - \sigma) \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} Q_{pcr} + \omega_2 * \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} Q_{pcr} \quad (6)$$

修复成本包括模块的修复费以及修复服务提供商参与闭环供应链的固定成本:

$$XF = \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} C_{mr} * Q_{mr} + \sum_{r \in R} FR_r * n_r \quad (7)$$

生产成本包括从零件供应商手中采购零件的费用、将零件组装成模块的成本、将模块组装成产品的成本及供应商、工厂参与闭环供应链的固定成本:

$$SC = \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} C_{vr} * Q_{vr} + \sum_{r \in R} FV_v * n_v + \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{i \in I} C_{pqi} \sum_{d \in D} X_{pdqi} + \sum_{i \in I} FI_i * n_i + \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} Q_{mi} C_{mi} \quad (8)$$

2. 模型约束

a) 能力约束

以下约束分别表示零售商回收产品、最终处理厂处理废弃模块、修复商修复模块、供应商供应零件、工厂制造不同质量的产品、配送中心运输产品的

处理量不大于该网络结点的能力约束:

$$\sum_{r \in R} Q_{pcr} \leq n_c * NL_{pc} \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R} Q_{rzm} \leq n_z * NL_{zm} \quad (10)$$

$$Q_{rm} \leq n_r * NL_{mr} \quad (11)$$

$$Q_{vk} \leq n_v * NL_{vk} \quad (12)$$

$$X_{pqi} \leq NL_{pqi} \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} y_{pqij} \leq n_j * NL_{pqj} \quad (14)$$

b) 数量约束

零售商对产品的需求得到满足:

$$XQ_{pqc} \leq \sum_{j \in J} L_{pqjc} \quad (15)$$

为了促使逆向物流得以开展,需要保证修复商修复的模块必须大于零:

$$\sum_{m \in M} \sum_{r \in R} Q_{mr} > 0 \quad (16)$$

工厂生产的各类型模块总量等于流入工厂的已修复模块与新零件加工成的新模块之和:

$$\sum_{p \in P} \lambda_{pm} \sum_{q \in Q} \sum_{i \in I} x_{pqi} = \sum_{r \in R} Q_{mr} + \sum_{i \in I} Q_{mi} \quad (17)$$

零售商运至修复商的模块乘以检测合格率等于修复商修复的模块数:

$$\sigma \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} Q_{pcr} * \lambda_{pm} = Q_{mr} \quad (18)$$

二、算例

假设某品牌手机零售商决定要回收废旧手机,然后将回收的手机全部运至手机修复商处进行拆卸,经验表明,80%的模块检测合格运至工厂,20%的模块检测不合格被运至环保设施进行销毁作业。手机供应链上有2种产品(编号为1、2)、组成产品的有3种模块(编号为m1、m2、m3),这些模块由3种零件(编号为A、B、C)组成,由供应商提供全新零件给工厂制造成为全新产品,政府规定零售商每回收1号产品给予50元补贴,每回收2号产品补贴30元。现在从候选的2家零售商、2家修复服务提供商、2家工厂中建立方案使得新组成的物流网络总利润最大。模型所需各种数据如表4—表10所示。

表4 模块的零件组成信息

模块编号	零件号
m1	A、B
m2	A、C
m3	B

表5 产品的模块组成信息

产品编号	模块号
P1	m1、m2
P2	m3

表6 零售商对不同质量的产品需求及售价

零售商编号	产品类型	质量水平	产品需求/个	产品售价/元
C1	P1	1	2 000	1 500
		2	1 600	1 000
		3	1 800	450
	P2	1	2 300	2 000
		2	2 100	1 700
		3	2 000	500
C2	P1	1	1 500	1 800
		2	1 800	1 200
		3	1 600	500
	P2	1	1 000	2 600
		2	1 300	2 000
		3	1 100	800

表7 零售商回收信息

零售商编号	产品类型	回收单价/元	最大回收量/个
C1	P1	80	3 000
	P2	55	1 300
C2	P1	40	3 530
	P2	60	2 500

表8 修复服务提供商提供模块信息

修复商编号	模块编号	修复单价/元	最大修复量/个
R1	m1	50	16 500
	m2	60	15 000
	m3	55	24 200
R2	m1	80	24 700
	m2	70	14 000
	m3	60	25 100

表9 供应商提供零件信息

零件类型	零件单价/元	最大供应量/个
A	10	14 550
B	25	14 500
C	30	15 000

表10 工厂制造产品信息

工厂编号	产品类型	质量水平	制造单价/元	最大制造量/个
I1	P1	1	200	2 800
		2	210	1 800
		3	190	2 500
	P2	1	180	2 300
		2	200	2 100
		3	250	2 000
I2	P1	1	250	3 000
		2	180	2 500
		3	200	1 600
	P2	1	220	1 500
		2	130	1 800
		3	110	1 900

通过 Lingo11.0 得到闭环供应链总利润 1 148.2 万元,零售商回收各类产品、工厂制造各类产品等数据如表 11—表 14 所示。

表11 零售商回收产品信息

零售商编号	产品类型	回收数量/个
C1	P1	0
	P2	1 300
C2	P1	3 530
	P2	2 500

表 11 表明 C1(1 号零售商)只需回收 P2(2 号产品)1 300 个,C2 需回收 3 530 个 P1 和 2 500 个 P2。这是由于回收同样的 P1,C1 的回收价格远远高于 C2,因此供应链中 C1 不被安排回收 P1。而回收 P2 时,C1 和 C2 出价相似,因此 P2 由 C1 和 C2 共同回收。令 C1 回收 P1 的单价从 80 元变 45 元,此时与 C2 回收 P1 的价格相似,经过 Lingo 软件重新计算,C1 回收 P1 的量从 0 变成 3 000 个,P2 仍为 1 300 个。

表12 修复服务商修复模块信息

修复商编号	模块类型	修复量/个
R1	m1	2 800
	m2	1 040
	m3	2 800
R2	m1	0
	m2	0
	m3	0

表 12 表明了 R1(1 号修复服务提供商)和 R2 修复模块 m1、m2、m3 的情况。由于表 8 列出了修复服务提供商修复各种模块的单价,可见 R2 修复所有模块的单价均比 R1 高,因此在此供应链中不安排 R2。当保持其他参数不变,使得 R2 修复模块

的价格与 R1 相同时,通过 Lingo 软件计算出的结果仍然不变,这是因为考虑到多开设一家模块修复厂,就要多 200 万元的固定成本。当保持其他参数不变,使得 R2 修复 m1 和 m3 模块的价格为 30 元和 20 元时,即 R2 修复 m1 和 m3 的价格远小于 R1 的,经过 Lingo 重新计算,结果如表 13 所示,R2 修复 m1 和 m3 模块的数量都增至 5 200 个,同时 Lingo 计算结果显示 C1 回收 P1 的量也发生变化,从 0 变为 3 000 个,这说明当模块修复单价降低时,能促进整个闭环供应链进行产品的回收。

表 13 模块修复改变后的模块修复信息

修复商编号	模块类型	修复量/个
R1	m1	0
	m2	1 040
	m3	0
R2	m1	5 200
	m2	0
	m3	5 200

表 14 是工厂制造不同质量等级的产品的信息。P11 表示质量水平为 1 的 1 号产品,P12 表示质量水平为 2 的 1 号产品,以此类推。由输出信息得到闭环供应链一般遵照哪个工厂的制造单价低就选择它来制造,直到达到制造能力所限。如生产 P11,I1 单价为 200 元,能力为 2 800 个,I2 单价为 250 元,能力为 3 000 个,因此,I1 制造 2 800 个 P11,而 I2 只需制造 700 个。

表 15 表明了供应商应该提供的新零件数,使得工厂能够制造全新产品和混合产品,此部分供应费用占总成本比例较大。

模型可以优化闭环供应链节点布置,合理确定产品的回收、修复、再制造比例,使得企业通过回收达到利润最大。

表 14 工厂制造产品信息

工厂编号	产品类型	质量水平	制造量/个
I1	P1	1	2 800
		2	900
		3	2 500
	P2	1	2 300
		2	1 600
		3	1 200
I2	P1	1	700
		2	2 500
		3	900
	P2	1	1 000
		2	1 800
		3	1 900

表 15 供应商提供新零件信息

零件类型	供应数量/个
A	13 600
B	12 800
C	6 800

三、结 语

论文根据电子产品回收实际需求,利用产品模块拆分重组思想构建了电子产品零售商—修复服务提供商—环保设备或工厂(零件供应商)—配送中心零售商的闭环物流网络模型。模型全面考虑到电子产品逆向物流网络处理流程。为激励企业进行回收,论文考虑政府补贴,以最大化逆向物流网络利润为目标函数,以回流产品的处理量和各节点处理能力为约束,指导电子产品企业优化闭环供应链节点布置,确定回收、修复、再制造比例,使得总利润最大化。算例通过 Lingo 软件计算表明,在今后企业实施闭环供应链时,能否改进模型算法,让企业闭环供应链优化更加精确,也是研究重点。在论文提出的模型基础上,还可以添加回收产品仓库、二手零件市场等网络结点,使得模型更加贴近现实。

参考文献:

- [1] 胡彦娜. 逆向物流管理: 21 世纪新立异的竞争战略[J]. 物流科技, 2010(7): 5-7.
- [2] 张志平, 邹建平. 企业逆向物流的发展趋势研究[J]. 物流科技, 2006(3): 31-32.
- [3] 贺超, 张玉良. 基于产品多生命周期的闭环供应链信息采集与共享[J]. 中国流通经济, 2012, 26(9): 44-48.
- [4] 潘意志, 曹明华, 彭水军. 正向供应链与逆向供应链的整合: 闭环供应链管理探讨[J]. 商场现代化, 2005, 28: 139-141.
- [5] 刘彦平. 逆向物流与闭环供应链管理问题研究[J]. 南京社会科学, 2006(5): 28-32.
- [6] 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.
- [7] 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, 19(4): 114-117.
- [8] 黄铮. 废弃物回收逆向物流网络优化设计[J]. 系统工程, 2009, 27(7): 49-53.
- [9] 宗接亮. 废弃电子电器产品逆向物流网络规划[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010.
- [10] 宋杰珍. 逆向物流与正向物流的整合优化设计[J]. 物

- 流工程与管理, 2010, 2(11): 17-20.
- [11] Mutha A, Pokharel S. Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 334-346.
- [12] Das K, Chowdhury A H. Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135: 209-221.
- [13] Hu T L, Sheu J B, Huang K H. A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2002, 38: 457-473.
- [14] Jayaraman V, Patterson R A, Rolland E. The design of reverse distribution networks: models and solution procedures[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 150(1): 128-149.
- [15] 陈志忠, 杨信丰, 李引珍. 逆向物流综合回收问题的建模研究[J]. 兰州交通大学学报, 2011, 30(4): 100-105.

Optimization of Multi-product Closed-Loop Supply Chain Based on Modular Design

HU Jue-liang^a, DING Xiao-yun^b, HAN Shu-guang^a, FANG Hui^b

(a. School of Sciences; b. School of Economics and Management,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper establishes a closed-loop supply chain optimization model with capacity limitation which deals with multiple electronic products. The model takes the product module as a unit and constructs a closed-loop supply chain system including product retailers-repair service suppliers-environmental protection equipment or factories (including parts suppliers providing parts for the factory)-distribution center- product retailers. The model comprehensively takes into consideration of reverse logistics process of electronic products and external enterprise environment such as government policy, regards maximization of closed-loop supply chain profit as the objective function and takes processing capacity of returned products and processing power of each node as the constraint. Finally, a numerical example is used to testify the model.

Key words: closed-loop supply chain; modular design; reverse logistics; integer programming; network optimization

(责任编辑: 陈和榜)