

SM 两级闭环供应链系统建模与仿真研究^①

赵晓敏¹, 黄培清²

(1. 上海大学管理学院, 上海 200444; 2. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200052)

摘要: 与传统正向供应链相比, 处于闭环供应链中的制造商将对消费阶段后的废弃产品进行回收再处理, 从而形成一种制造与再制造并存的混合模式, 导致供应链系统复杂化. 本文利用控制理论对一个供应商和一个制造商构成的两级闭环供应链系统进行建模与仿真研究, 着重分析确定性需求和再制造环境下系统的动态行为和运作绩效. 研究表明, 再制造活动会对上游供应商带来较为显著的负面影响. 从运作层面看, 再制造活动会使供应商的生产和库存出现较大幅度的波动, 其波动程度要明显大于制造商本身; 从经济收益看, 再制造活动使制造商获益的同时却使上游供应商蒙受损失, 当制造商获得的额外收益不足以弥补供应商损失时, 将导致供应链整体收益变差.

关键词: 闭环供应链; 产品再制造; 逆向物流; 控制理论

中图分类号: F224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2011)05-0029-14

0 引言

近年来, 在“制造商责任延伸制”的广泛推行下, 废弃产品的回收再制造成为全球制造业、特别是高科技制造业面临的一个热点问题. IBM 戴尔, 以及国内的联想集团等一批知名企业纷纷将

其纳入到公司的总体战略中, 以期在实现“经济与环境协调发展”的同时构筑新的竞争优势. 对这些企业来讲, 产品的回收再制造改变了其传统的单向物流运作模式, 导致了一种更为复杂的结构——闭环供应链系统 (如图 1 所示).

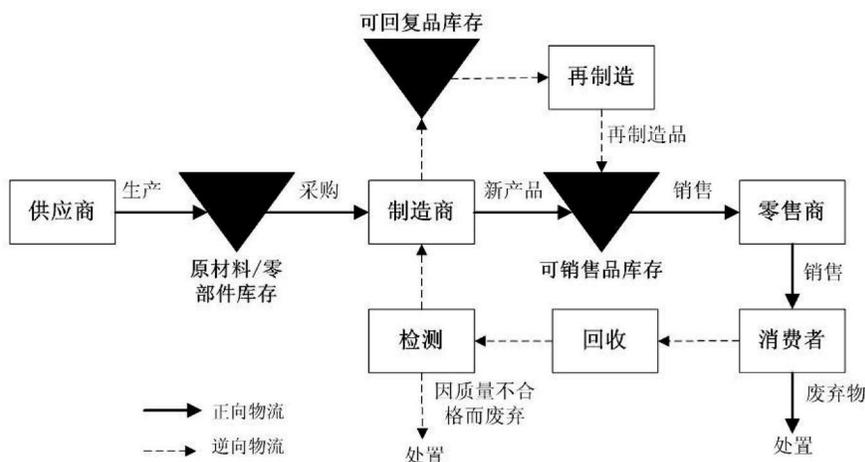


图 1 基于产品再制造的闭环供应链系统

Fig. 1 Closed-loop supply chain system with product remanufacturing

① 收稿日期: 2009-11-17; 修订日期: 2011-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70801041).

作者简介: 赵晓敏 (1975-), 女, 山西太原人, 副教授, 博士. Email: zhaoxiaomin1211@yahoo.com.cn

与传统正向供应链相比,处于闭环供应链中的制造商通过两种方式来补充可销售品库存以满足终端市场需求^②,购买原材料→生产新产品→补充可销售品库存→满足市场需求;从市场回收废旧产品→对废旧产品进行检测→对质量合格的产品进行再制造,使其达到“新产品”标准→补充可销售品库存→满足市场需求.由于新产品和再制品均可以满足终端市场需求,因此形成了制造和再制造并存的混合模式.

对于图1所示系统,一些学者从最优定价策略和渠道结构效率方面进行了研究. Savaskan等^[1]运用博弈论分析了基于再制造的闭环供应链最优渠道结构问题.黄祖庆和达庆利^[2]研究了直线型再制造供应链在不同决策结构下的收益以及与集成式“超组织”结构相比的效率损失.易余胤^[3]建立了制造商领导、零售商领导以及市场无领导者3种不同市场力量下的闭环供应链博弈模型,研究了不同市场力量结构对渠道成员决策的影响.晏妮娜和黄小原^[4]建立了基于第3方逆向物流服务提供商从事物料回收的闭环供应链模型,设计了制造商与第3方之间的目标奖惩合同,并讨论了分散决策下的Stackelberg对策和集成管理下的联合优化策略.

对于生产和库存管理中的最优控制策略问题, Van der Laan, Inderfurth, Kiesmüller等人做出了比较显著的贡献. Van der Laan和 Salmon^[5]、Inderfurth^[6]致力于寻求制造再制造系统中的最优控制策略,其研究表明当不考虑提前期影响时,制造再制造系统的结构相对比较简单,容易求得模型的最优策略解.但对于制造提前期和再制造提前期不为零的情况,整个模型的分析会变得相当麻烦,即使只针对制造提前期大于再造提前期1个周期的这种简单情况,库存模型的近似最优策略解也是十分难以获得的.

Van der Laan等人^[7]、Inderfurth和 Van der Laan^[8]、Kiesmüller^[9]等人进一步分析了提前期的影响,其研究表明,提前期时滞效应通常是导致制造再制造系统复杂化的一个很重要原因,因为新产品制造提前期(或采购提前期)和废旧产品再制造提前期的存在会增加模型中状态变量的维

度,特别是在两个提前期有较大差异时,制造再制造系统的描述和控制策略的结构将变得相当复杂,此时将难以求得系统的最优策略解.为此, Kiesmüller^[11]着重研究了几种启发式算法,以快速获得高质量的近似最优解.

为了从生产和库存管理层面探讨影响系统绩效的关键因素, Tang和 Nair, Zhou和 Disney, 赵晓敏等人采用系统动力学方法并结合计算机仿真技术对制造再制造系统的动态行为进行了研究. Tang和 Nair^[12]主要分析了再制造过程的信息透明度对制造再制造系统鲁棒性的影响,在对三种不同水平的信息透明度进行比较后指出,再制造过程的信息透明度越大,系统的鲁棒性表现越好. Zhou和 Disney^[13]重点分析了再制造提前期和回收率对制造再制造系统动态性能的影响.其研究表明,较高的产品回收率可以减少库存变化和牛鞭效应,回收量能够在一定程度上用于吸收需求波动,而再制造提前期对库存变化和牛鞭效应的影响并不明显.赵晓敏等人^[14]的研究指出,新产品生产提前期和废旧品再制造提前期之间的差异是影响系统性能的一个关键因素,两个提前期之间的差值越小,制造再制造系统性能越优,反之则越差.针对提前期差异问题,赵晓敏等人^[15]对制造再制造系统的库存控制策略进行了改进,其仿真结果表明改进的库存策略可以有效改善系统的成本绩效.

由于回收再制造显著增加了供应链系统的复杂性,在生产/库存管理层面探讨系统动态行为和运行效率的研究还主要聚焦于制造商构成的单级闭环供应链系统.本文将在既有成果基础上进一步扩展到上游环节,对一个供应商和一个制造商构成的两级闭环供应链系统进行建模与仿真研究,着重分析确定性需求和再制造环境下系统的动态行为和运作绩效.本文的研究目标主要包括两个方面,1)通过系统动态行为分析,探讨产品再制造对制造商本身及其上游供应商的生产决策和库存水平的影响;2)以传统正向供应链系统为标杆,评估产品再制造对闭环供应链整体以及对个体成员企业的经济价值.

② 本文研究一个供应商(符号S代表)和一个制造商(符号M代表)构成的闭环供应链系统,简称SM闭环供应链系统.

1 SM 两级闭环供应链系统描述与研究假设

1.1 系统描述

本文主要研究一个供应商和一个制造商组成的 SM 两级闭环供应链系统. 该系统中, 制造商直接面对市场, 是供应链中的第一级子系统; 供应商位于上游, 是链中的第二级子系统. 本文根据供应

链成员企业在生产决策和库存控制中物流与信息流的传递机制, 利用控制理论中的方框图来描述 SM 两级闭环供应链系统, 如图 2 所示. 在该系统中, 供应商和制造商分别根据下游传递来的市场需求信息或订单信息, 制定各自的生产计划或零部件采购计划并进行相应补货, 与供应商有所不同的是, 制造商需要对消费者淘汰的废旧产品予以回收再制造. 图 2 中任意两个变量之间的相互关联及其数学表达式将在文中第 3 节和第 4 节予以说明.

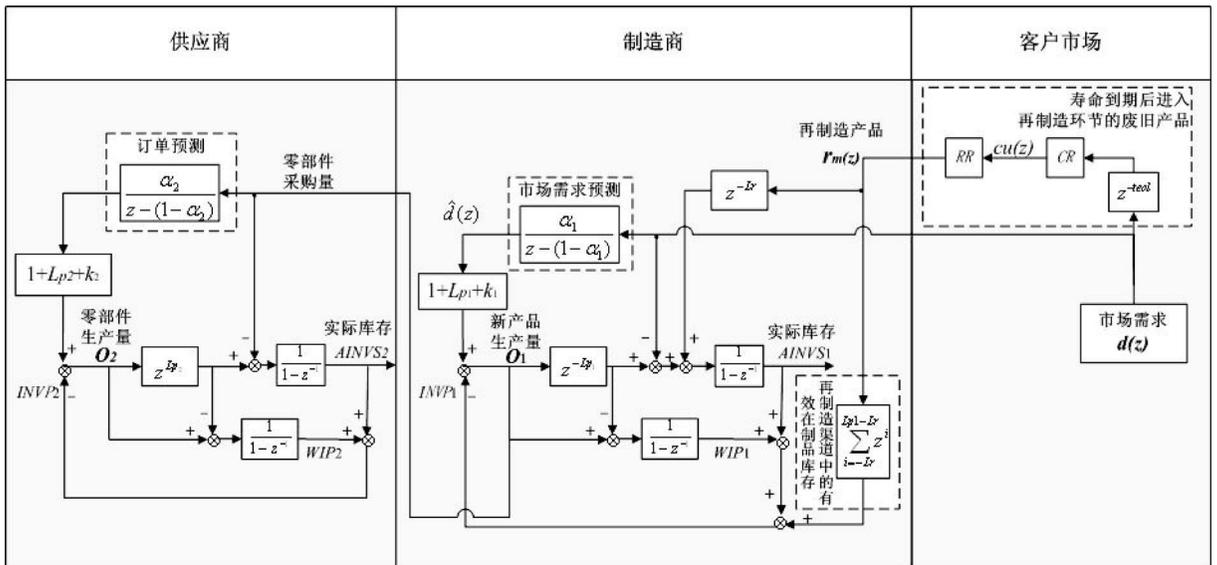


图 2 基于产品再制造的 SM 两级闭环供应链系统方框图

Fig 2 Block diagram of SM closed-loop supply chain system with product remanufacturing

1.2 研究假设

1) 在 SM 两级闭环供应链系统中, 制造商将通过生产新产品和再制造旧产品两种方式来满足市场需求, 其中经过再制造的产品在质量和性能上与新产品完全一致, 其售价也与新产品一致. 这一假设是符合一些实际案例的, 例如富士施乐公司再制造的复印机售价和同型号的新复印机售价是一样的; 再如柯达公司的一次性相机中 70% 以上的零部件来源于回收的相机, 其售价也与全新的一次性相机一样.

2) 供应链系统中只提供一种产品且该产品与零部件之间是一一对应关系, 即制造商每生产一个新产品就需要向上游供应商订购一个零部件.

3) 在每个周期, 供应链中的成员企业分别对

下游订单信息进行预测, 并根据该预测值和当期的库存信息制定生产计划或采购计划; 供应链中的成员企业利用库存来满足下游的订货需求, 因缺货不能立即满足的需求作为保留订单处理.

4) 在每个周期, 制造商对消费者淘汰的产品予以回收, 回收的产品只要质量允许就立即进行再制造, 否则将报废处置.

5) 由于消费者的不确定性, 制造商不可能将所有到期产品都如期回收回来, 因此假定制造商根据一定的回收率 CR 来回收废旧产品; 此外, 因损耗程度不同, 并非所有回收回来的废旧产品都可以进行再制造, 这里为简化起见, 假定回收回来的产品可以进行再制造的比例为 RR

符号说明见表 1.

表 1 符号说明
Table 1 Nomenclature description

d	市场需求	CR	回收率
α_i	指数平滑常数 ($0 < \alpha_i < 1$)	RR	再制造率
\hat{d}	市场需求预测值	cu	回收的废旧产品数量
O_i	生产量或订货量, 为系统决策变量	τ	报废处置的废旧产品数量
r_m	再制造的废旧产品数量	t_{col}	产品寿命期限
L_{pi}	生产提前期	NVP_i	库存水平
L_r	再制造提前期	WIP_i	生产渠道中的在制品库存
k	安全库存提前期	$ANVS_i$	实际库存; $ANVS_i > 0$ 表示有现货 $ANVS_i < 0$ 表示缺货

注: 下标 i 代表供应链中第 i 级成员企业. $i=1$ 代表制造商; $i=2$ 代表供应商.

2 制造商子系统传递函数模型

2.1 需求预测

制造商的生产计划或零部件采购计划是在对市场需求的预测基础上制定, 这里假定采用指数平滑法预测需求, 预测公式为 $\hat{d}(t) = \alpha \cdot d(t) + (1 - \alpha) \cdot \hat{d}(t-1)$, 经过 z 变换, 预测值 \hat{d} 与实际需求 d 之间的 z 域表达式为式 (1)

$$\hat{d}(z) = \frac{\alpha}{z - (1 - \alpha)} \cdot d(z) \quad (1)$$

2.2 生产 / 订货策略

制造商制定新产品生产计划或零部件采购计划时, 一方面是建立在对市场需求预测的基础上, 另一方面还需要考虑当前的库存水平. 在经典的定期盘点模型中, 制造商的新产品生产数量或零部件采购数量 Q_i 与库存盘点周期 T_i 和生产提前期 L_{pi} 内的平均需求、安全库存以及当期的库存水平 NVP_i 有关, 表达式为

$$Q_i = (T_i + L_{pi}) \cdot \hat{d}(t) + \hat{\sigma}_{T_i+L_{pi}} - NVP_i(t)$$

上式中, 第一项 $(T_i + L_{pi}) \cdot \hat{d}(t)$ 代表库存盘点周期 T_i 和生产提前期 L_{pi} 内的平均需求, 在 Disney 和 Towill^[16-18] 以及 Dejonckheere 等人^[19-20] 的研究中, T_i 设置为 1, 表示每个周期都进行盘点, 其研究结果并不失一般性. 上式中, 第二项 $\hat{\sigma}_{T_i+L_{pi}}$ 是为防范需求波动设定的安全库存. 为便于分析, Disney 和 Towill 以及

Dejonckheere 等人在研究中令 $\hat{\sigma}_{T_i+L_{pi}} = 0$ 将提前期放大, 由 $k \hat{d}(t)$ 代替安全库存, 这种简化并不会影响研究结果. 这里, 仍沿用上述学者的研究方法, 因此 Q_i 在 z 域中可写为式 (2)

$$Q_i(z) = (1 + L_{pi} + k) \cdot \hat{d}(z) - NVP_i(z) \quad (2)$$

2.3 库存水平

NVP_i 反映制造商当期的可销售品库存水平信息, 由实际库存, 生产渠道中的在制品库存和再制造渠道中的在制品库存构成. 根据文献 [5-10, 15] 的研究, 其时域表达式为

$$NVP_i(t) = ANVS_i(t) + WIP_i(t) + \sum_{t=L_r}^{L_{pi}-L_r} \hat{r}_i(t+i)$$

其中第一项 $ANVS_i$ 为制造商当期的实际库存, 与上期实际库存、当期需求以及当期补充进来的新产品和再制造产品有关, 时域表达式为 $ANVS_i(t) = ANVS_i(t-1) + Q_i(t - L_{pi}) + \hat{r}_i(t - L_r) - d(t)$. 转换到 z 域后, $ANVS_i$ 的表达式为式 (3)

$$ANVS_i(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot (Q_i(z) \cdot z^{-L_{pi}} + \hat{r}_i(z) \cdot z^{-L_r} - d(z)) \quad (3)$$

第二项 WIP_i 为新产品生产渠道中的在制品库存, 与上期在制品库存、当期要生产的新产品数量以及当期已经生产好的新产品数量有关, 时域表达式为 $WIP_i(t) = WIP_i(t-1) + Q_i(t) - Q_i(t - L_{pi})$, WIP_i 的 z 域表达式为式 (4)

$$WIP_i(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot (Q_i(z) - Q_i(z) \cdot z^{-L_{pi}}) \quad (4)$$

第三项 $\sum_{t=L_r}^{L_q-L_r} f_n(t)$ 反映了 $[t-L_r, t+(L_q-L_r)]$ 时段再制造渠道中的在制品. 由于 L_q 和 L_r 的差异, 制造商在第 t 期进行生产决策时, 不一定能够完全获知此时段的信息, 因此需要根据两个提前期之间的大小关系区分对待. 当 $L_q \leq L_r$ 时, 制造商在第 t 期进行生产决策时, 可以完全获知 $[t-L_r, t+(L_q-L_r)]$ 时段的再制造信息; 而当 $L_q > L_r$ 时, 只有 $[t-L_r, t]$ 时段的再制造信息已知, 而 $[t+1, t+(L_q-L_r)]$ 时段的再制造信息未知, 需要进行预测. 假定 $\hat{f}_n(t)$ 为 $[t+1, t+(L_q-L_r)]$ 时段的平均再制造数量预测值, 则 NVP_1 的时域表达式可写为

$$NVP_1(t) = ANVS(t) + WIP_1(t) + \begin{cases} \sum_{t=L_r}^0 f_n(t) + (L_q-L_r) \hat{f}_n(t) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{t=L_r}^{L_q-L_r} f_n(t) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases}$$

假定采用指数平滑法预测再制造信息, 预测公式为 $\hat{f}_n(t) = \beta \cdot f_n(t-1) + (1-\beta) \cdot \hat{f}_n(t-1)$

$$Q(z) = \frac{z + \alpha_1 L_q + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1 - (\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + \alpha_1)}{(2z-1)[z-(1-\alpha_1)]} \cdot d(z) -$$

$$\frac{z}{z^2 \cdot (2z-1)} \cdot f_n(z) - \frac{z-1}{2z-1} \cdot \begin{cases} \left[\sum_{t=L_r}^0 z^{t+\frac{\beta(L_q-L_r)}{z(1-\beta)}} \right] \cdot f_n(z) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{t=L_r}^{L_q-L_r} z^t \cdot f_n(z) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

$$ANVS(z) = \frac{z(\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1) - \alpha_1 L_q + \alpha_1 k + \alpha_1}{z^n \cdot (z-1)(2z-1) \cdot [z-(1-\alpha_1)]} \cdot d(z) +$$

$$\frac{2z^{L_q+2} - z^{L_q+1} - z}{z^{L_q+1} \cdot (z-1)(2z-1)} \cdot f_n(z) - \frac{z}{z^n (2z-1)} \cdot \begin{cases} \left[\sum_{t=L_r}^0 z^{t+\frac{\beta(L_q-L_r)}{z(1-\beta)}} \right] \cdot f_n(z) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{t=L_r}^{L_q-L_r} z^t \cdot f_n(z) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases} \quad (8)$$

2.6 终值定理

式 (7) 和式 (8) 从数学角度表征了市场需求以及产品再制造活动对制造商生产决策和实际库存的影响; 显然, 当再制造活动纳入到日常生产环节时将会显著增加系统复杂性. 为分析系统趋于稳定时的状态, 利用控制理论中的终值定理得到以下两个定理

其中 β 为指数平滑常数. 经 z 变换后, 可得到 NVP_1 的 z 域表达式式 (5)

$$NVP_1(z) = ANVS(z) + WIP_1(z) + \begin{cases} \left[\sum_{t=L_r}^0 z^{t+\frac{\beta(L_q-L_r)}{z(1-\beta)}} \right] \cdot f_n(z) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{t=L_r}^{L_q-L_r} z^t \cdot f_n(z) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

2.4 产品再制造

销往市场的产品经过一段时间 t_0 后将因寿命到期被制造商回收, 假定回收率为 CR 再制造率为 RR 则在第 t 期可以再制造的产品数量为 $f_n(t) = CR \cdot RR \cdot d(t-t_0)$, 经过 z 变换, 可以得到 f_n 的 z 域表达式为式 (6)

$$f_n(z) = CR \cdot RR \cdot z^{-t_0} d(z) \quad (6)$$

2.5 关键变量之间的传递函数模型

本文主要分析产品再制造对制造商生产决策变量 Q 和实际库存水平 $ANVS$ 的影响, 根据式 (1) - (6), 可得到制造商子系统中生产量 Q 和可销售品实际库存 $ANVS$ 与市场需求 d 以及废旧品再制造数量 f_n 之间的传递函数模型式 (7) 和式 (8)

定理 1 在制造商子系统中, 随着时间的不断推移, 新产品的生产量将最终与外部市场需求减去废旧产品再制造数量后的“净需求”保持一致, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [d(t) - f_n(t)]$ (证明过程见附录 1).

定理 2 在制造商子系统中, 随着时间的不断推移, 可销售品实际库存将最终维持在预先设

定的安全库存水平, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} ANVS_2(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} k_2 d(t)$ (证明过程见附录 1).

终值定理的实用性在于它能预见到系统的长期表现, 定理 1 和定理 2 表明, 从长期行为来看, 制造商的新产品生产数量只与市场需求减去废旧产品再制造数量后的“净需求”有关; 制造商的可销售品库存则只与预先设定的安全库存水平有关. 显然, 再制造活动减少了新产品生产数量, 当新产品生产成本大于再制造成本时, 再制造活动有助于制造商实现生产成本和零部件采购成本的节约.

3 供应商子系统传递函数模型

3.1 订单预测

供应商根据下游制造商的订货量制定零部件生产计划, 而制造商的订货量取决于新产品生产量, 因此供应商对下游订单的预测公式可写为,

$$\hat{Q}(t) = \alpha_2 \cdot Q(t-1) + (1-\alpha_2) \cdot \hat{Q}(t-1)$$

经过 z 变换有

$$\hat{Q}(z) = \frac{\alpha_2}{z - (1-\alpha_2)} Q(z) \quad (9)$$

3.2 生产策略

$$Q_2(z) = \frac{z + \alpha_2 I_2 + \alpha_2 k_2 + 2\alpha_2 - 1 - (\alpha_2 I_2 + \alpha_2 k_2 + \alpha_2)}{(2z-1)[z - (1-\alpha_2)]} \cdot Q(z) \quad (14)$$

$$ANVS_2(z) = \frac{z(\alpha_2 I_2 + \alpha_2 k_2 + 2\alpha_2 - 1) - \alpha_2 I_2 + \alpha_2 k_2 + \alpha_2}{z^2 \cdot (z-1)(2z-1) \cdot [z - (1-\alpha_2)]} \cdot Q(z) \quad (15)$$

3.5 终值定理

式 (14) 和式 (15) 从数学角度表征了制造商订货决策 Q 对上游供应商的影响, 而由式 (7) 和式 (8) 可知 Q 与市场需求 d 和产品再制造量 r 有关, 由此可见, 产品再制造的影响将沿着供应链向上游传递. 与制造商子系统类似, 可以利用控制理论中的终值定理分析供应商子系统的长期动态行为, 并得到以下两个定理

定理 3 在供应商子系统中, 随着时间的不断推移, 零部件生产量将最终与外部市场需求减去废旧产品再制造数量后的“净需求”保持一致, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} Q_2(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [d(t) - r(t)]$ (证明过程见附录 1).

定理 4 在供应商子系统中, 随着时间的不

分析方法同制造商子系统, 可得到供应商的零部件生产量 Q_2 的 z 域表达式

$$Q_2(z) = (1 + I_2 + k_2) \cdot \hat{Q}(z) - NVI_2(z) \quad (10)$$

式中, I_2 为供应商生产提前期, k_2 为安全库存提前期.

3.3 库存水平

NVI_2 反映供应商当期的零部件库存水平信息, 包含实际的零部件库存 $ANVS_2$ 和处于生产渠道中的零部件在制品库存 WIP_2 , 其 z 域表达式

$$NVI_2 = ANVS_2(z) + WIP_2(z) \quad (11)$$

其中 $ANVS_2$ 和 WIP_2 的 z 域表达式分别为式 (12) 和式 (13)

$$ANVS_2(z) = \frac{1}{1-z} \cdot (Q_2(z) \cdot z^{I_2} - Q(z)) \quad (12)$$

$$WIP_2(z) = \frac{1}{1-z} \cdot (Q_2(z) - Q(z) \cdot z^{I_2}) \quad (13)$$

3.4 关键变量之间的传递函数模型

根据式 (9) - (13), 可得到供应商子系统中生产变量 Q_2 和实际库存 $ANVS_2$ 与下游制造商订货量 Q 的传递函数模型

断推移, 零部件实际库存将最终维持在“净需求”下的安全库存水平, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} ANVS_2(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} k_2 [d(t) - r(t)]$ (证明过程见附录 1).

由上述定理可以得到以下结论

结论 1 在 SM 两级闭环供应链系统中, 当制造商将再制造活动纳入日常生产计划时, 系统会变得相当复杂, 但是通过对废旧产品的再制造却可以减少新产品生产数量, 理想状态可以实现新产品的“零生产”和废旧品垃圾的“零排放”, 从而有助于资源节约和减少环境污染. 此外, 尽管制造商担负产品再制造的职责, 但再制造活动的影响却会沿着制造商向上游传递, 进而影响供应商的生产决策和库存水平, 从长期行为来看, 再制造活动不仅会减少供应商生产零部件的数量, 而且随

着制造商订货量的下滑, 供应商还将相应调低所持有的零部件库存。

4 系统动态仿真

本节将通过动态仿真来验证前述定理及主要结论. 以传统正向供应链系统为标杆, 利用 Matlab 软件中的 Simulink 工具对 SM 两级闭环供应链系统进行仿真. 仿真历时 250 周, 仿真参数设置如下

需求信号设置: 以阶跃信号作为市场需求信号输入系统, 即 $d(t) = 1$ (当 $t > 0$), 该信号在分析确定性市场环境下的系统动态行为方面具有十分重要的代表性作用^[1-5, 11, 14].

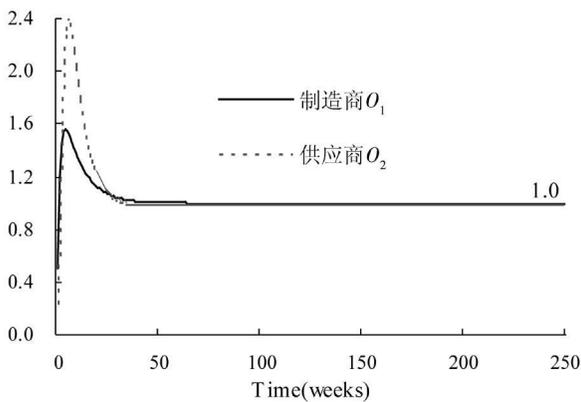
正向物流相关参数设置: 各级成员企业的生产提前期 $L_{pi} = 6$ 周, 需求预测因子 $\alpha_i = 0.1$; 安全库存提前期 $k_i = 1$ 周 (令供应链各级成员企业的提前期、预测因子及安全库存提前期取相同值不

会影响分析结果, 并且还有利于对比相同参数值下各级系统的行为表现^[4-5]).

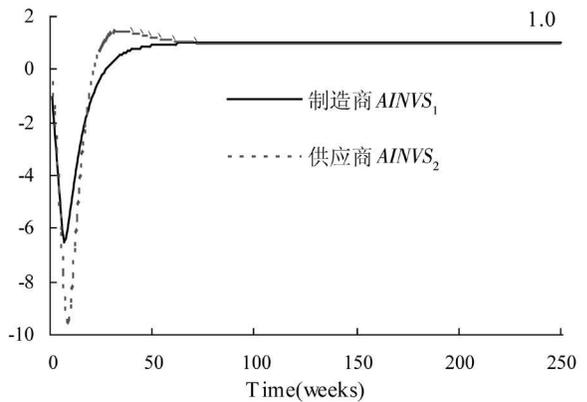
逆向物流相关参数设置: 废旧品回收率 $CR = 0.7$, 再制造率 $RR = 0.8$, 产品使用寿命期限 $t_0 = 50$ 周, 再制造信息的指数平滑常数 $\beta = 0.3$

4.1 传统正向供应链系统动态行为

图 3-a 描述了传统正向供应链系统中制造商的新产品生产量 (或零部件采购量) Q_1 以及供应商的零部件生产量 Q_2 随时间的动态变化; 图 3-b 描述了制造商的可销售品实际库存 $AINVS_1$ 以及供应商的零部件实际库存 $AINVS_2$ 随时间的动态变化. 从图中可以看出, 各级成员企业的生产量和实际库存在初期的波动之后 (其中处于上游供应商的波动幅度要高于制造商) 将趋于稳定, 表现为一段时间后制造商和供应商的生产量 (或采购量) 将与外部市场需求保持一致, 即维持在 $d(t) = 1.0$; 制造商和供应商的实际库存将维持在安全库存水平 $k_i d(t) = 1.0$



(a) 生产决策 / 订货决策



(b) 实际库存

图 3 传统正向 SM 两级供应链系统的动态行为

Fig 3 Dynamic behavior of traditional SM supply chain system without remanufacturing

4.2 SM 两级闭环供应链系统动态行为

图 4 描述了 SM 两级闭环供应链系统中制造商的新产品生产量 (或零部件采购量) Q_1 以及制造商的可销售品实际库存 $AINVS_1$ 随时间的动态变化. 图 5 描述了供应商的零部件生产量 Q_2 以及供应商的零部件实际库存 $AINVS_2$ 随时间的动态变化. 从图中可以看出, 在第 50 周后, 前期销往市场的产品将陆续返回到制造商处进行再制造, 此时再制造活动开始对制造商和上游供应商产生影响.

1) 从生产决策来看, 制造商的新产品生产量 (或零部件采购量) Q_1 以及供应商的零部件生产量 Q_2 , 最终都将与市场需求减去废旧品再制造数量后的“净需求”保持一致, 即维持在 $d(t) - r(t) = 0.44$. 显然, 相对于传统正向供应链系统而言, 再制造活动减少了制造商的新产品生产量和零部件采购量, 而随着制造商对零部件需求的减少, 再制造活动的影响传递到上游, 引起供应商所需生产的零部件数量相应减少.

2)从库存情况来看,再制造活动对制造商的影响较小,仅是在废旧品返回的初期(第50周时)引起了短暂波动,而再制造活动对上游供应商的影响要明显许多,表现为,在再制造活动刚开始的初期(第50周到第75周)供应商所持有的零部件库存出现了较大波动,此后供应商的零部件库

存逐渐稳定在“净需求”下的安全库存水平,即维持在 0.44(传统正向供应链系统中供应商的库存最终稳定在安全库存水平 $k_d(\eta) = 1.0$ 但在闭环供应链系统中,由于再制造活动的影响,供应商的安全库存水平为 $k_d(\eta) - h(\eta) = 0.44$ 这一现象已由定理 4得证)。

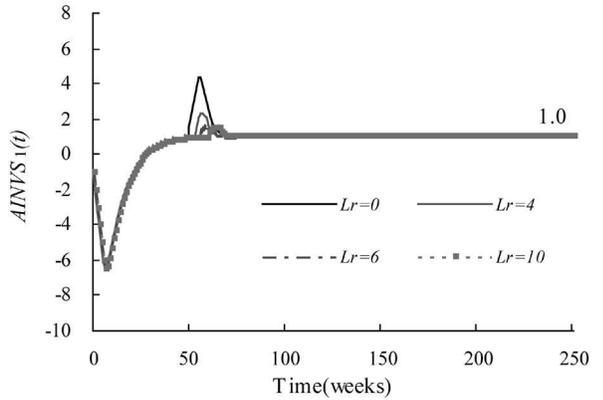
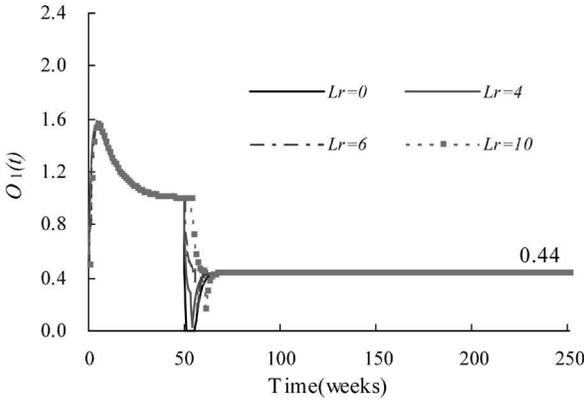


图 4 制造商子系统的动态行为

Fig 4 Dynamic behavior of manufacturer in a closed-loop supply chain system

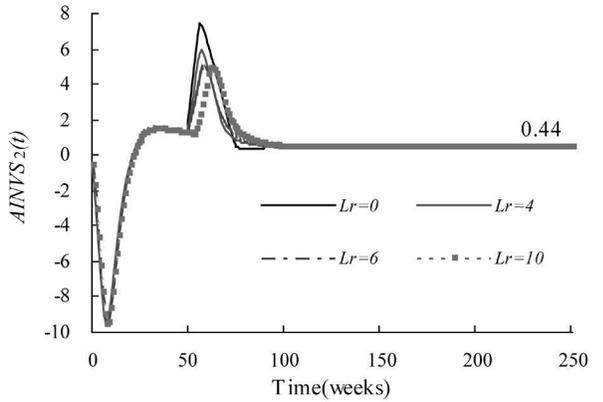
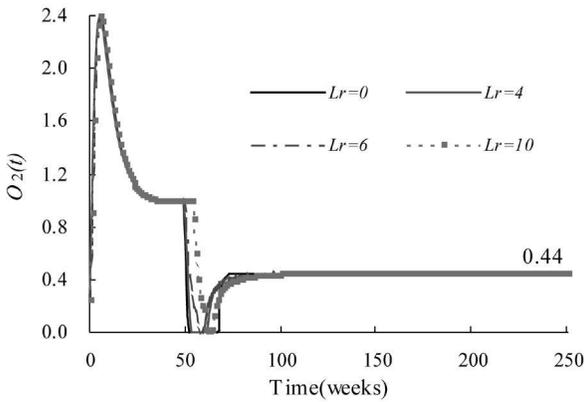


图 5 供应商子系统的动态行为

Fig 5 Dynamic behavior of supplier in a closed-loop supply chain system

本部分的动态仿真进一步验证了前文定理 1至定理 4的正确性.而通过与传统正向供应链系统的对比研究,也可以看出(对于再制造信号的突然变化,供应商要花费比制造商更长的时间,经历更大幅度的调整才能再次回复到稳定状态,这对于供应商是非常不利的.在运作层面上,虽然是制造商担负再制造活动职责,但是上游供应商受到的影响程度却显著大于制造商本身)。

5 SM两级闭环供应链系统经济价值分析

为了揭示产品再制造对整个供应链系统以及个体成员的经济影响,我们以传统正向供应链系统为标杆进行总收益分析.假定供应链系统总收益为 $\Pi = \sum_{i=1}^2 \pi_i$,其中 π_i 为供应链中第 i 级成员企业的总收益, π_i 取决于第 i 级成员企业的销售

收入以及支出的总成本, 见式 (16)

$$\pi_i = P_i \cdot \sum_{t=0}^T O_{i+1}(t) - TC_i \quad i=1, 2 \quad (16)$$

式中, P_i —供应链中第 i 级企业出售产品或零部件的单位价格 (元 / 件); $O_{i+1}(t)$ —下游向其上游企业发出的采购数量, 制造商作为供应链中的第一级企业, 其下游为消费者市场, 因此 $O_0(t) = d(t)$; TC_i —供应链中第 i 级成员企业的总成本, 由式 (17) 中列出的各项成本要素构成

$$TC_i = \sum_{t=0}^T (c_{i1} \cdot O_i(t) + c_{i2} \cdot h_i(t) + c_{i3} \cdot \alpha_i(t) +$$

$$c_{i4} \cdot \tau(t) + h_{i1} \cdot [ANVS(t)^+] + h_{i2} \cdot [ANVS(t)^-]) \quad (17)$$

式中 c_{i1} —供应链中第 i 级成员企业的单位新产品 (或零部件) 生产成本; c_{i2} —单位废旧产品回收成本; c_{i3} —单位废旧产品再制造成本; c_{i4} —单位废旧产品报废处置成本, 一般为环保法规规定的处罚成本; h_{i1} —供应链中第 i 级成员企业的单位产品 (或零部件) 存储成本; h_{i2} —供应链中第 i 级成员企业的单位缺货成本。

这里主要选取两组成本参数值进行分析, 如表 2 所示。

表 2 成本参数值
Table 2 Cost Parameters

	供应商成本参数取值				制造商成本参数取值							
	c_{12}	h_{12}	h_{13}	P_2	c_{11}	h_{11}	h_{13}	P_1	c_c	c_r	c_{τ}	$c_{11} + c_{\tau} > c_c + c_r$
第一组值	20	2	10	40	60	8	40	120	10	30	20	40
第二组值	20	2	10	40	60	8	40	120	20	40	20	20

注: 制造商愿意进行产品再制造的前提是 $c_{11} + c_{\tau} > c_c + c_r$ (即单位新产品生产成本与单位废弃品的环境处罚成本之和需大于单位回收成本与单位再制造成本之和), 否则制造商没有进行产品再制造的经济动机。此外, 再制造活动由制造商担负, 由此产生的逆向成本也由制造商承担, 供应商不涉及逆向成本参数 c_c 、 c_r 和 c_{τ} 。

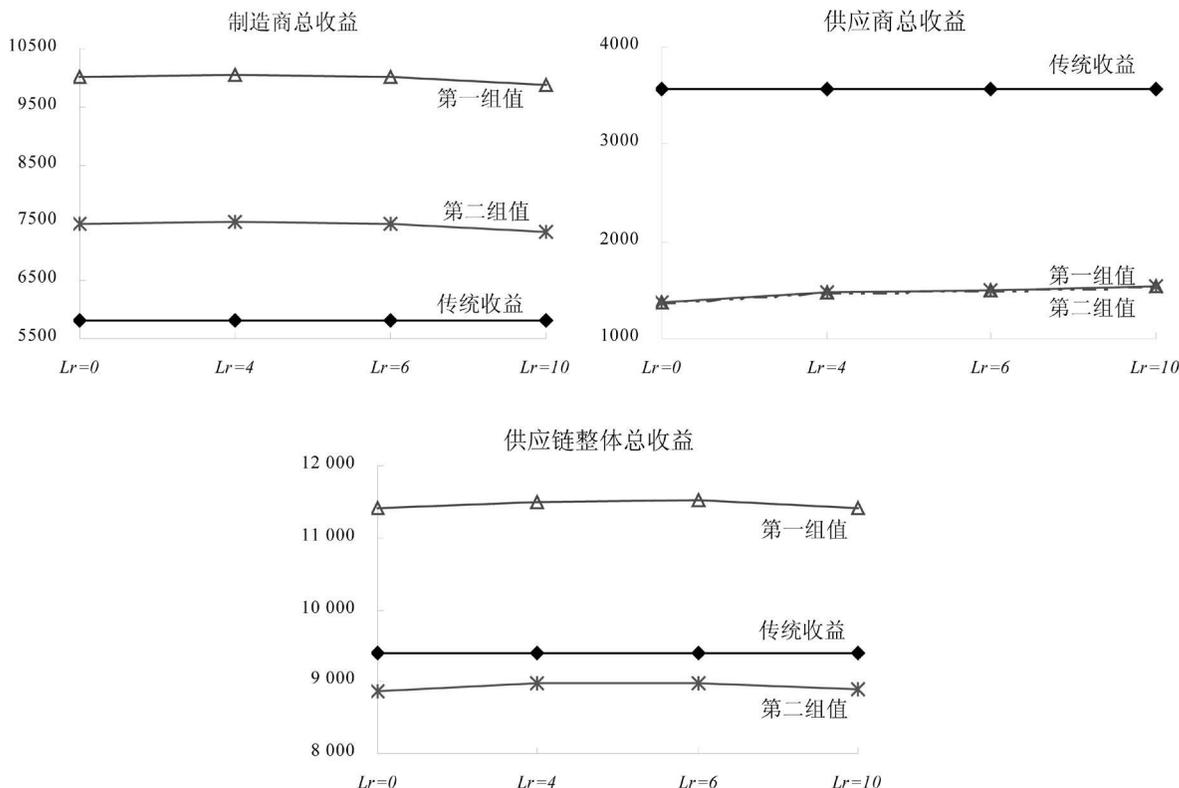


图 6 供应链整体及个体成员企业的总收益曲线

Fig 6 Total Profits of members and the whole supply chain system

注: 图 6 中传统收益指的是传统正向供应链系统中的收益; 第一组值和第二组值则是闭环供应链系统中的收益。

根据表 2 的参数值以及前面的仿真数据, SM 两级闭环供应链系统以及个体成员企业的总收益曲线如图 6 所示. 以传统正向供应链系统为基准, 对比两组取值下的闭环供应链收益, 可以发现如下现象

1) 从制造商总收益来看, ① 在两组不同成本参数取值下, 闭环供应链系统中的制造商总收益均高于其在传统正向供应链系统中的收益. 原因在于, 在闭环供应链中, 制造商虽然因为承担产品回收再制造而支付了额外费用, 但却通过再制造活动大幅减少了新产品生产成本和零部件采购成本, 由此获得显著的经济收益. ② 图 6 显示在第一组成本参数取值下, 制造商的总收益要高于第二组成本参数取值下的收益. 原因在于: 在 $\xi_1 + \xi_2 > \xi_1 + \xi_2$ 的前提下, $(\xi_1 + \xi_2) - (\xi_1 + \xi_2)$ 的差值越大, 制造商通过再制造获得的成本节约越显著, 由此获得的额外收益也越高.

2) 从上游供应商总收益来看, ① 处于闭环供应链系统中的供应商, 其总收益低于其在传统正向供应链系统中的收益. 原因在于, 在闭环供应链中, 废旧产品再制造活动在减少制造商生产新产品数量的同时, 也减少了制造商对上游零部件的需求量, 由此导致供应商的零部件销量下滑使其利益受损. ② 图 6 还显示, 两组不同成本参数取值下, 供应商在闭环供应链中的收益未发生任何改变, 这是因为, 本文重点探讨的是产品回收再制造带来的影响, 因此在两组成本参数取值时只是令回收成本 ξ_1 和再制造成本 ξ_2 发生改变, 其余参数保持不变. 由于研究中已假定是由制造商负责进行产品再制造并承担由此产生的费用, 供应商不涉及逆向物流中的成本参数 ξ_1 和 ξ_2 因此, 供应商只会因其零部件销量下滑而遭致损失, 不会因为逆向成本参数的改变而不同.

3) 从供应链整体总收益来看, 由于再造活动并不是对每一个成员企业都有利, 从事产品再制造虽然有利于改善制造商的收益, 但却会使上游供应商蒙受损失. 图 6 显示, 在第一组成本参数取值下 $(\xi_1 + \xi_2) - (\xi_1 + \xi_2) = 40$ 制造商通过再制造活动获得的额外收益较高, 可以弥补上游供应商的损失, 在此情况下, 闭环供应链系统总收益要高于传统正向供应链系统总收益. 此时, 制造商从事产品再制造有助于提升供应链系统整体绩效.

但是在第二组成本参数取值下 $(\xi_1 + \xi_2) - (\xi_1 + \xi_2) = 20$ 制造商获得的额外收益不足以弥补供应商的损失, 在此情况下, 闭环供应链系统总收益要低于传统正向供应链系统总收益. 此时, 制造商从事产品再制造反而会恶化供应链系统整体绩效.

综上所述, 可以得到以下结论

结论 2 ① 积极的再制造活动有助于制造商获得更多收益, 并且随着 $(\xi_1 + \xi_2) - (\xi_1 + \xi_2)$ 之间的差值增大, 制造商进行产品再制造的经济动机增强; ② 再制造活动虽然有利于制造商获益, 但却会使供应商蒙受经济损失, 其原因在于再制造活动在减少制造商生产新产品数量的同时, 也减少了制造商对上游零部件的需求量, 由此导致供应商的零部件销量下滑使其利益受损; ③ 当 $(\xi_1 + \xi_2) - (\xi_1 + \xi_2)$ 之间的差值较小时, 制造商获得的额外收益不足以弥补供应商的损失, 此时将会导致供应链整体收益下降.

6 结束语

本文对一个供应商和一个制造商构成的 SM 两级闭环供应链系统进行了建模与动态仿真研究, 并主要分析了确定性需求和再制造环境下的系统动态行为及其运作绩效. 研究结果表明: 在 $\xi_1 + \xi_2 > \xi_1 + \xi_2$ 的前提下, 再制造活动有利于制造商获得更多收益, 因此政府可以在明确制造商责任主体的基础上, 从加大环保法规处罚力度, 提高产品随意报废处置成本 ξ_2 的角度入手, 来促使制造商参与到产品再制造活动中来.

但同时也看到, 产品再制造活动的顺利进行绝非制造商一己之力即可完成, 还将依赖于供应链上其它企业的努力. 本文的研究表明, 再制造活动会对上游供应商带来较为显著的负面影响: 从运作层面看, 再制造活动会使供应商的生产和库存出现较大幅度的波动, 其波动程度要明显大于制造商本身; 从经济收益看, 再制造活动使制造商获益的同时却使上游供应商蒙受经济损失, 因此必然会引发新的矛盾. 对供应商来讲, 提供的零部件质量越好那么将来失去的业务也就越多 (因为零部件质量越好, 可以被再利用的次数也就越多, 制造商将来订购的零部件数量也就越少), 为了

避免自身利益受损, 供应商就有可能提供较差的零部件来阻止再制造活动的顺利进行. 因此为了防范供应商的道德风险问题, 就需要采取必要的措施来弥补供应商的损失, 使得供应商也能够从再制造活动中获利.

而本文的研究则表明, 当 $(\xi + \zeta) - (\xi + \zeta)$ 之间的差值较小时, 制造商获得的额外收益将不足以弥补供应商的损失, 此时, 即使制造商本身愿意进行再制造, 但也会因供应商的强烈抵制而难以实现. 现行的环保法规虽然从法律上明确了制造商的责任主体身份, 但是缺少了经济利益的驱动, 将难以保证上游企业的配合与支持, 这也是现阶段难以有效开展产品再制造活动的主要原因

之一. 因此, 对于制造商而言, 要想推动再制造活动的顺利开展, 就需要从降低逆向回收成本 ξ 和提高再制造技术以降低废旧品再制造成本 ζ 两个方面入手, 以便获得足够的收益来补偿供应商的损失并改善供应链整体绩效. 当然, 政府也可以给予一定的财政补贴来帮助制造商解决利益分配问题.

最后, 需要指出的是, 本文的研究还主要局限于确定性过程, 后续研究中我们将对随机需求和再制造情况下的闭环供应链系统进行建模与仿真研究. 此外, 不同的订货决策、预测方式等管理干预手段以及逆向物流规模对供应链的影响, 也都是非常值得深入探讨的问题, 这些研究将在今后的工作中逐步完成.

参考文献:

- [1] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239—252.
- [2] 黄祖庆, 达庆利. 直线型再制造供应链决策结构的效率分析 [J]. *管理科学学报*, 2006, 9(4): 51—57.
Huang Zuqing, Da Qingli. Study on efficiency of serial supply chains with remanufacturing [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2006, 9(4): 51—57. (in Chinese)
- [3] 易余胤. 具竞争零售商的再制造闭环供应链模型研究 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(6): 45—54.
Yi Yuyn. Closed-loop supply chain game models with product remanufacturing in a duopoly retailer channel [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(6): 45—54. (in Chinese)
- [4] 晏妮娜, 黄小原. 基于第 3 方逆向物流的闭环供应链模型及应用 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(4): 83—93.
Yan Nina, Huang Xiaoyuan. Models of closed-loop supply chain with third-party reverse logistics and their application [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(4): 83—93. (in Chinese)
- [5] Van der Laan E, Salmon M. Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal [J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 102: 264—278.
- [6] Inderfurth K. Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes [J]. *OR Spectrum*, 1997, 19: 111—122.
- [7] Van der Laan E, Salmon M, Dekker R. An investigation of lead time effects in manufacturing/remanufacturing systems under simple PUSH and PULL control strategies [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 115: 195—214.
- [8] Inderfurth K, Van der Laan E. Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing [J]. *International Journal of Production Economics*, 2001, 71: 381—390.
- [9] Kiesmuller G P. Optimal control of a one product recovery system with leadtimes [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 81—82: 333—340.
- [10] Kiesmuller G P. A new approach for controlling a hybrid stochastic manufacturing/remanufacturing system with inventories and different leadtimes [J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 147: 62—71.
- [11] Kiesmuller G P, Scherer C W. Computational issues in a stochastic finite horizon one product recovery inventory model [J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 146: 553—579.
- [12] Tang Q, Naim M M. The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system [J]. *International Journal of Production Research*, 2004, 42(19): 4135—4152.
- [13] Zhou Li. Disney SM. Bullwhip and inventory variance in a closed loop supply chain [J]. *OR Spectrum*, 2006, 28: 127—

[14] 赵晓敏, 帅 萍, 骆建文. 单级闭环供应链系统建模分析[J]. 系统工程, 2007, 25(1): 21—27.
 Zhao Xiaomin, Shuai Ping, Luo Jianwen. Modeling on a single-echelon closed-loop supply chain system[J]. Systems Engineering, 2007, 25(1): 21—27. (in Chinese)

[15] 赵晓敏, 黄培清, 骆建文. 基于改进策略的混合型制造/再制造系统分析[J]. 中国管理科学, 2007, 15(4): 34—41.
 Zhao Xiaomin, Huang Peiqing, Luo Jianwen. Performance analysis of a hybrid manufacturing/remanufacturing system based on improved policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2007, 15(4): 34—41. (in Chinese)

[16] Disney SM, Towill DR. The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the bullwhip effect in supply chains [J]. International Journal of Production Economics, 2003, 85: 199—215.

[17] Disney SM, Towill DR. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain [J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(1): 179—204.

[18] Disney SM, Towill DR. A discrete linear control theory model to determine the dynamic stability of vendor managed inventory [J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(1): 179—204.

[19] Dejonckheere J, Disney SM, Lambrecht M R, et al. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147: 567—590.

[20] Dejonckheere J, Disney SM, Lambrecht M R, et al. The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 153: 727—750.

Modeling and simulation on a SM closed-loop supply chain system

ZHAO Xiaomin^a, HUANG Peiqing^b

1. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Anhai College of Economics & Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200052, China

Abstract: Different from a traditional supply chain, the manufacturer in a closed-loop supply chain will take back and recycle or reuse the discarded products after their consumption. This leads to a hybrid system combining manufacturing and remanufacturing, which makes the supply chain system more complex than ever. This paper uses control theory to develop models and make simulations on a two-level closed-loop supply chain system with one supplier and one manufacturer, and particularly analyzes the system's dynamic behavior and operation performance under the situations of deterministic demands and returns. The results show that the remanufacturing activities have significant negative influence on supplier. From the perspective of operation, the supplier suffers greater fluctuation on his production and inventory due to the remanufacturing activities, and the extent of this fluctuation is bigger than that of the manufacturer. As for the economic value, the remanufacturing activities will increase the manufacturer's profits at the expense of the supplier's profits. When the extra gain from remanufacturing does not make up the supplier's loss, the performance of the whole supply chain system becomes worse.

Key words: closed-loop supply chain; product remanufacturing; reverse logistics; control theory

附录 1

定理 1 证明

根据式 (7) 有

$$O_1(z) = \frac{z^2 + \alpha_1 L_1 + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1 - (\alpha_1 L_1 + \alpha_1 k + \alpha_1)}{(2z-1)[z - (1-\alpha_1)]} \cdot d(z) -$$

$$\frac{z}{z^r \cdot (2z-1)} \cdot r_m(z) - \frac{z-1}{2z-1} \cdot \begin{cases} \left[\sum_{i=L_r}^0 z^i \frac{\beta(L_q-L_r)}{z-(1-\beta)} \right] \cdot r_m(z) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{i=L_r}^{L_q-L_r} z^i \cdot r_m(z) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases} \quad (A1)$$

利用控制理论中的 z 变换技术,可以得到生产变量 Q_1 在时域中的终值

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} Q_1(t) &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot Q_1(z) \text{ 将 } z=1 \text{ 代入 (A1) 所示的 } Q_1(z) \text{ 公式中,经整理后可得} \\ \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot Q_1(z) &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \left[\frac{1^2 + 1 \times (\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1) - (\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + \alpha_1)}{(2-1)[1-(1-\alpha_1)]} \cdot d(z) \right] - \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot \frac{1}{1^{L_r} \times (2-1)} \cdot r_m(z) - \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot \frac{1-1}{2-1} \cdot \begin{cases} \left[\sum_{i=L_r}^0 1^i \frac{\beta(L_q-L_r)}{1-(1-\beta)} \right] \cdot r_m(z) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{i=L_r}^{L_q-L_r} 1^i \cdot r_m(z) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases} \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot d(z) - \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot r_m(z) = 0 \stackrel{\text{反变换}}{=} \lim_{t \rightarrow \infty} d(t) - r_m(t) \end{aligned} \quad \text{证毕.}$$

证明 定理 2

根据式 (8) 有

$$\begin{aligned} & -2z^{q+3} + z_{1,q+2}(3-2\alpha_1) - z^{q+1}(1-\alpha_1) + z + \\ \text{ANVS}_1(z) &= \frac{z(\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1) - \alpha_1 L_q + \alpha_1 k + \alpha_1}{z^q \cdot (z-1)(2z-1) \cdot [z-(1-\alpha_1)]} \cdot d(z) + \\ & \frac{2z^{q+2} - z^{q+1} - z}{z^{q+L_r}(z-1)(2z-1)} \cdot r_m(z) - \frac{z}{z^q(2z-1)} \cdot \begin{cases} \left[\sum_{i=L_r}^0 z^i \frac{\beta(L_q-L_r)}{z-(1-\beta)} \right] \cdot r_m(z) & \text{当 } L_q > L_r \text{ 时,} \\ \sum_{i=L_r}^{L_q-L_r} z^i \cdot r_m(z) & \text{当 } L_q \leq L_r \text{ 时} \end{cases} \end{aligned} \quad (B1)$$

令 $f_1(z), F_d(z)$ 分别为式 (B1) 中 $d(z)$ 系数的分子和分母, $f_q, F_f(z)$ 分别为式 (B1) 中第一项 $r_m(z)$ 系数的分子和分母; $f_2(z), F_f(z)$ 分别为式 (B1) 中第二项 $r_m(z)$ 系数的分子和分母; 因此式 (B1) 可以写为

$$\text{ANVS}_1(z) = \frac{f_1(z)}{F_d(z)} \cdot d(z) + \frac{f_q(z)}{F_f(z)} \cdot r_m(z) - \frac{f_2(z)}{F_f(z)} \cdot r_m(z) \quad (B2)$$

为得到可用库存 ANVS_1 在时域中的终值,可分别求式 (B2) 中每一项的终值,具体过程如下

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow 1} \frac{f_1(z)}{F_d(z)} &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{-2z^{q+3} + z_{1,q+2}(3-2\alpha_1) - z^{q+1}(1-\alpha_1) + z + z(\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1) - \alpha_1 L_q + \alpha_1 k + \alpha_1}{z^q \cdot (z-1)(2z-1) \cdot [z-(1-\alpha_1)]} \stackrel{0/0 \text{型未定式}}{\underset{\text{罗必塔法则}}{=}} \lim_{z \rightarrow 1} \frac{f_1'(z)}{F_d'(z)} \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{\{-2(L_q+3) \cdot z^{q+2} + (L_q+2) \cdot (3-2\alpha_1) \cdot z^{q+1} - (L_q+1) \cdot (1-\alpha_1) \cdot z^q + 3z + 2\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + 2\alpha_1 - 1 - (\alpha_1 L_q + \alpha_1 k + \alpha_1)\}}{\{L_q \cdot z^{q+1} \cdot (z-1) \cdot (2z-1) \cdot [z-(1-\alpha_1)] + z^q(2z-1) \cdot [z-(1-\alpha_1)] + 2z^q \cdot (z-1) \cdot [z-(1-\alpha_1)] + z^q \cdot (z-1) \cdot (2z-1)\}} \end{aligned} \quad (B3)$$

$$\begin{aligned} & \text{将 } z \text{ 代入} \\ & \frac{\alpha_1 k}{\alpha_1} = k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow 1} \frac{f_q(z)}{F_f(z)} &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{2z^{q+2} - z^{q+1} - z}{z^{q+L_r}(z-1)(2z-1)} \stackrel{0/0 \text{型未定式}}{\underset{\text{罗必塔法则}}{=}} \lim_{z \rightarrow 1} \frac{f_q'(z)}{F_f'(z)} \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{2(L_q+2)z^{q+1} - (L_q+1)z^q - 2z}{(L_q+L_r)z^{q+L_r+1} \cdot (z-1)(2z-1) + z^{q+L_r}(2z-1) + z^{q+L_r} \cdot (z-1) \cdot 2} \\ & \text{将 } z \text{ 代入} \\ & \frac{\quad}{\quad} = L_q + 1 \end{aligned} \quad (B4)$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} \frac{f_2(z)}{F_f(z)} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z}{z^q(2z-1)} \cdot \begin{cases} \sum_{i=L_r}^0 z^i \frac{\beta(L_q-L_r)}{z-(1-\beta)} & L_q > L_r \\ \sum_{i=L_r}^{L_q-L_r} z^i & L_q \leq L_r \end{cases} \stackrel{\text{将 } z \text{ 代入}}{\underset{\text{整理后得}}{=}} \begin{cases} L_r + 1 + \frac{\beta(L_q-L_r)}{\beta} & L_q > L_r \\ L_q + 1 & L_q \leq L_r \end{cases} \quad (B5)$$

根据 (B3)、(B4) 和 (B5) 得到可用品实际库存 ANVS₁ 在时域中的终值

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} ANVS_1(t) &\stackrel{\text{变换}}{=} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) ANVS_1(z) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot \left[\frac{f_d(z)}{F_d(z)} \cdot d(z) + \frac{f_1(z)}{F_1(z)} \cdot r_m(z) - \frac{f_2(z)}{F_2(z)} \cdot r_m(z) \right] \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot [k_1 d(z) + (L_p + 1) \cdot r_m(z) - (L_p + 1) r_m(z)] \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot k_1 d(z) \stackrel{\text{反变换}}{=} \lim_{t \rightarrow \infty} k_1 d(t) \end{aligned}$$

综上所述得证 $\lim_{t \rightarrow \infty} ANVS_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} k_1 d(t)$.

同理可证 $\lim_{t \rightarrow \infty} Q_2(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [d(t) - r_m(t)]$
 $\lim_{t \rightarrow \infty} ANVS_2(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} k_2 Q_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} k_2 [d(t) - r_m(t)]$

证毕.

(上接第 18 页)

[17] Albano G, Lizzeri A. Strategic certification and provision of quality [J]. International Economic Review, 2001, 42(1): 267-83

[18] Lizzeri A. Information revelation and certification intermediaries [J]. RAND Journal of Economics, 1999, 30(2): 214-231

[19] Myerson R. Incentive compatibility and the bargaining problem [J]. Econometrica, 1979, 47(1): 61-74

Analysis of supplier's security state inspection strategy under asymmetric information

ZHANG Yu, WANG Shouyang

1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100083, China,
2. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract: The supplier's risk is one of the main risk sources in supply chain. To a retailer it is important to know how to use strategies to deal with the risk and the key point to make the strategy effective is to get the supplier's security state information. On the one hand it is easier for the supplier to know the possible risk because the supplier's security state information is privately owned, on the other hand when involved with security state the supplier need to invest in inspection, evaluation or certification to get the information accurately. Under the asymmetric information that the supplier's security state is unknown, this paper studied the retailer based on the profit maximization principle how to present two kinds of contracts: reward or penalty to encourage the supplier to invest in inspection or not and get the supplier's security state information. Finally, the paper assessed the advantages and disadvantages of the two kinds of contracts.

Key words: supply chain; security state; reward; penalty; asymmetric information