DOI: 10.3901/JME.2013.16.185

干扰条件下闭环供应链定价决策及契约协调研究*

王银河¹ 王旭²

(1. 重庆大学机械工程学院 重庆 400030; 2. 重庆大学科技处 重庆 400030)

摘要: 在再制造闭环供应链系统实际运作的过程中, 干扰事件是不可避免的, 闭环供应链如何有效协调应对干扰事件成为一个研究热点。目前, 收益共享契约作为广泛应用的协调机制, 更能实现闭环供应链各成员的利润共享和风险分担, 为此利用收益共享契约来协调干扰事件。在非线性需求条件下, 考虑由单一制造商和零售商组成的闭环供应链系统。通过构建 Stackelberg 博弈模型, 研究当干扰事件引起市场需求、再制造成本、回收成本发生扰动时, 在集中和分散化决策下闭环供应链的最优决策。结果表明, 干扰事件下原有的收益共享契约不再协调闭环供应链, 尤其当市场规模扰动超过规定范围时, 应调整生产计划并采用新的收益共享契约, 从而达到闭环供应链的协调。通过算例验证了相关结论的有效性。

关键词: 闭环供应链 生产成本 收益共享契约 干扰管理 协调

中图分类号: F460

Research on Contract Coordination and Price Decision of Closed-loop Supply Chain under Disruption Condition

WANG Yinhe¹ WANG Xu²

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. Department of Science and Technology Research, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: In the course of remanufacturing closed-loop supply chain system in the actual operation, the disrupt event is inevitable, the closed-loop supply chain system how to coordinate events effectively become a hotspot of research. At present, revenue-sharing contract as a coordination mechanism is used widely, and it more to achieve the various members of the closed-loop supply chain profit sharing and risk sharing. Therefore, revenue-sharing contract to coordinate response to disrupt events is considered. To study a closed-loop supply chain system with single manufacturer and single retailer is established under the demand is unlinear function. When market scale, reproduction cost and collection cost are disrupted simultaneously, a Stackelberg game model is established. The optimal strategies of closed-loop supply chain under the centralized decision and decentralized decision are analyzed. Research result showed that the closed-loop supply chain coordination may be broken off by original revenue-sharing contract under a disruption event. The market disruptions exceeded a certain range when disruption even was happened, the original production plan is adjusted and the new revenue-sharing contract should be designed to coordinate the closed-loop supply chain. Finally, a numerical example is given to the conclusions efficiency.

Key words: Closed-loop supply chain Production cost Revenue-sharing contract Disruption management Coordination

0 前言

近年来, 随着科学技术和社会需求的高速发展, 产品频繁更新换代所产生的大量废弃物, 对环境和资源造成巨大的不利影响。同时, 企业在面对复杂市场环境和激烈竞争时发现, 由传统企业追求

产品质量、分销渠道和售后的竞争格局, 逐渐演变为正向供应链和逆向供应链相结合的态势。由于闭环供应链是正向加逆向供应链的有机集成, 企业将回收成本和再制造成本考虑到产品的成本中去, 使得企业在获得环保声誉的同时, 又能降低批发价格、增加利润。由此闭环供应链的研究正成为企业界和学术界的重要议题^[1]。目前国内外针对闭环供应链的定价策略和协调机制方面有了许多研究成果。如 SAVASKAN 等^[2]针对 4 种回收模式的再制造闭环供

* 国家软科学研究计划 (2009GXQ6D178) 和国家社会科学基金 (11BGL006) 资助项目。20121017 收到初稿, 20130313 收到修改稿

应链系统,研究了不同回收模式对节点企业定价及利润的影响,但未涉及策略对效率的影响;王玉燕等^[3]应用博弈理论对逆向供应链系统的定价策略进行研究,得出合作博弈和非合作博弈的均衡解,并对各种定价策略的效率进行了分析;李新军等^[4]研究由一个制造商和两个零售商组成的闭环供应链系统,得出当一个零售商具有中等决策权时,制造商和具有优先决策权的零售商的最优利润最大,整个供应链的最优利润最大;葛静燕等^[5]研究了分散决策情况下,制造商和零售商确定各自的批发价格和零售价格,并提出一个协调机制来提高系统效率;包晓英等^[6]研究差异定价策略协调闭环供应链系统,得出了在分散决策模型中,制造商的利润不与转移支付相关,并提出一种两部收费协调定价策略协调闭环供应链。以上文献是建立在稳定情形且对称信息的假设下,对闭环供应链的定价和协调进行的研究。

然而,在实际中一些不可预见的事件总是对人们的计划造成一定的干扰,严重情况将造成无法挽回的损失。例如泰国的洪水造成电脑硬盘供应短缺,电脑价格随之上涨、中国南方雪灾和汶川地震等地质灾害造成物资缺乏、需求物资成本波动,再如工厂的火灾、恐怖袭击、金融危机、“非典”等社会因素也严重影响商家的生产和销售。供应链突发事件应急管理成为近年来一个新的研究热点。为此,国内外学者已经提出了相应的协调机制。如文献[7-11]基于干扰事件造成需求和投资敏感系数以及成本 and 市场需求分别发生变化时,研究通过调整数量折扣契约来协调供应链;CHEN 等^[12]将研究对象扩展为供应商和一个占主导地位及多个零售商组成的供应链系统,研究当需求和成本发生扰动时,通过两种契约来协调供应链;王传涛等^[13]研究了当生产成本、市场规模和价格敏感系数同时扰动时,通过调整生产计划和设计新契约来协调供应链;庞庆华等^[14]考虑三级供应链的情形,当突发事件导致市场需求分布变化时,原有的收益共享契约不再协调供应链时,通过改进契约来有效协调各成员间的利润;高波等^[15]将需求和价格设为时间的函数,讨论了干扰事件对供应链定价和利润的影响,通过改进新契约来协调供应链系统;王玉燕^[16-17]研究了需求和成本扰动时的闭环供应链,采用修正的回购契约和收益共享契约来协调供应链系统。

从以上文献可以看出,大多研究者在研究干扰事件下的供应链为正向两级或三级供应链系统,鲜有针对闭环供应链干扰管理的研究成果。本文与前人研究的不同之处在于:① 将干扰管理思想和方法

扩展到闭环供应链协调领域,探讨两级闭环供应链的定价和协调机制,研究消除干扰事件引起闭环供应链双向双重边际化问题虽然更为复杂,但也更符合实际;② 扩展多个因素同时扰动的情形下闭环供应链协调策略,以往研究中极少涉及三个因素同时扰动下的供应链协调问题,尤其是闭环供应链,先前研究与实际情景偏差较大;③ 前人研究所采用的契约大都为数量折扣契约,这种契约在实施的过程中将花费较高的监管成本,导致无法在供应链实际运作中具体应用。收益共享契约作为应用广泛的协调机制,更能实现供应链各成员的利润共享和风险分担^[18-20]。鉴于此,本文考虑市场规模、再制造成本和回收成本三种因素同时发生扰动时,利用收益共享契约来协调闭环供应链系统,通过构建两级闭环供应链博弈模型,研究集中和分散化下最优定价决策及协调策略,最后通过数值分析验证修正后契约的有效性。通过分析契约前后变化对各方收益的影响规律,为供应链系统中决策者提供理论参考。

1 基准的闭环供应链决策模型

讨论由单个制造商和单个零售商组成的短周期闭环供应链系统。整个系统基于完全信息的 Stackelberg 动态博弈。制造商是博弈领导者,零售商是跟随者。制造商负责生产和委托零售商回收废旧产品,废旧产品经过拆解、再制造,形成与新产品无质量差别的再生产品。零售商负责销售和直接回收废旧产品。当干扰事件发生前,制造商根据市场需求进行生产,并将产品全部销售给零售商,同时制定收益共享契约分享闭环供应链总利润。当干扰事件发生后,制造商重新制定收益共享契约来协调闭环供应链,使各成员利益达到最优。制造商和零售商之间信息对称,如成本结构、利润函数等为共同知识。两者都是寻求自身利益最大化的理性决策者。

在闭环供应链模型中,假设制造商完全利用新材料生产的单位成本为 c_0 , 利用废旧回收再制造产品的单位成本为 c_m , 则节约成本 $\Delta_0 = c_0 - c_m$ 。产品的批发价格为 b_m , 零售价格为 b_r , 制造商生产量为 Q , 也即零售商的订购量。设市场需求 q 为零售价格的非线性函数 $q = D \exp(-k_1 p)$, D 为市场规模, k_1 为价格敏感系数, 则零售价格为 $p = (\ln(D/Q))/k_1$, 设制造商支付零售商的单位回收价格为 p , 且满足 $0 < b_m < \Delta_0$, 即回收节约的成本不小于回收价格。零售商支付消费者的回收价格为 b_r 。零售商回收成本分为固定成本 c_r 和可变成

c_v ，且回收成本是产品回收率 $\eta Q = h + k_2 b_r$ 的函数，这里 $0 < \eta \leq 1$ 。根据已有文献[16]设固定成本 $c_r = k_2 \eta^2$ ，其中 k_2 为回收投入参数，变动成本为 $c_v = s \eta Q$ ， s 为单位回收成本。

在干扰事件前闭环供应链中制造商、零售商的利润函数分别为

$$\pi_m = (w - c_0)Q + (A_0 - b_m)\eta Q \quad (1)$$

$$\pi_r = (p - w)Q + (b_m - b_r)\eta Q - (k_2 \eta^2 + s \eta Q) \quad (2)$$

则整个系统的利润函数

$$\pi_{sc} = (p - c_0)Q + (A_0 - b_r)\eta Q - (k_2 \eta^2 + s \eta Q) \quad (3)$$

将 $p = (\ln(D/Q))/k_1$ 代入式(3)，可转化为

$$\pi_{sc} = (\ln(D/Q)/k_1 - c_0)Q + (A_0 - b_r)\eta Q - (k_2 \eta^2 + s \eta Q) \quad (4)$$

由式(4)易知函数 π_{sc} 关于 Q 的二阶导函数 $\frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial Q^2} = -\frac{1}{Q k_1} < 0$ ，可知最优订购量、最优价格及最优利润分别为

$$\bar{Q} = D / \exp(U) \quad (5)$$

$$\bar{p} = c_0 - (\eta A_0 + \eta b_r + s \eta) + 1/k_1 \quad (6)$$

$$\pi_{sc} = D(U - k_1 c_0)/(k_1 \exp(U)) + \eta D(A_0 - b_r - s)/\exp(U) - k_2 \eta^2 \quad (7)$$

式中 $U = 1 + c_0 k_1 - \eta k_1 A_0 + \eta k_1 b_r + \eta k_1 s$

所谓收益共享契约是指制造商给零售商一个较低的批发价格，并通过协议获得一部分零售商的销售收益来补偿批发收益，在国内此类契约的经典案例常见于特许经营行业，如酒类、服装等。由单个制造商和零售商组成的供应链的收益共享契约 (w, δ) 协调是指，对任意的 δ ($0 < \delta < 1$)，使得零售商利润 $\pi_r = (1 - \delta)\pi_{sc}$ ，即零售商占有的利润份额是供应链总利润的仿射函数。类似文献[18]，当收益共享契约中批发价格 w_0 和制造商分享总利润比例 δ_0 满足下列条件时，闭环供应链可以实现协调。

$$w_0 = (1 - \delta_0)(c_0 - \eta A_0 + \eta b_m) - \eta s \delta_0 \quad (8)$$

2 干扰事件对闭环供应链的影响

一体化条件下，制造商和零售商构成统一集团，由管理者统一决策达到供应链利润总体最优。假设干扰事件导致市场规模、再制造成本和单位回收成本发生的变化量分别为 ΔD 、 Δc_m 、 Δs ，显然

只有当 $D + \Delta D > 0$ ， $c_m + \Delta c_m > 0$ ， $s + \Delta s > 0$ 时才有实际意义。市场的变化也使制造商改变原有的生产计划，设干扰事件后的实际生产量为 Q ，最优产量为 Q^* ，实际产量和市场实际需求偏差 $Q - \bar{Q}$ 造成的额外成本为 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ ，其中 λ_1 为过剩生产导致的单位库存(处理)成本， λ_2 为单位缺货损失成本(如顾客流失或信誉损失等)，且 λ_1, λ_2 只针对过剩和缺货的产品。

为方便讨论，此种情形下仅考虑制造商对闭环供应链最优应对策略。制造商作为决策主导者，目标是使闭环供应链总体利益最大化。因此，在干扰事件发生后，闭环供应链的利润函数为

$$\begin{aligned} \pi_{scd}(Q) = & (\ln((D + \Delta D)/Q)/k_1 - c_0)Q + \\ & (A_0 - \Delta c_m - b_r)\eta Q - (k_2 \eta^2 + (s + \Delta s)\eta Q) - \\ & \lambda_1(Q - \bar{Q})^+ - \lambda_2(\bar{Q} - Q)^+ \end{aligned} \quad (9)$$

式中， $(x)^+ = \max\{x, 0\}$ 。通过比较干扰前后最优产量，可以得到如下引理 1。

引理 1 在一体化条件下，当干扰事件导致市场规模、制造和再制造成本发生扰动时，且满足当 $\Delta D > 0, \Delta c_m + \Delta s < 0$ 时，有 $Q^* \geq \bar{Q}$ ；当 $\Delta D < 0, \Delta c_m + \Delta s > 0$ 时，有 $Q^* \leq \bar{Q}$ 。

证明：应用反证法证明第一个结论，第二个结论可类似证明。假设 $\Delta D > 0, \Delta c_m + \Delta s < 0$ 时，有 $Q^* < \bar{Q}$ 成立。由于 $\bar{Q}$ 是干扰事件前的最优产量，则对任意的 $Q > 0$ ，有

$$\begin{aligned} \pi_{sc}(\bar{Q}) = & (\ln(D/Q)/k_1 - c_0)\bar{Q} + (A_0 - b_r)\eta \bar{Q} - \\ & (k_2 \eta^2 + s \eta \bar{Q}) \geq \\ & (\ln(D/Q)/k_1 - c_0)Q + (A_0 - b_r)\eta Q - \\ & (k_2 \eta^2 + s \eta Q) = \pi_{sc}(Q) \end{aligned}$$

当然也有 $\pi_{sc}(\bar{Q}) \geq \pi_{sc}(Q^*)$ 成立。

假设当 $\Delta D > 0, \Delta c_m + \Delta s < 0$ 时，有 $Q^* < \bar{Q}$ 成立，由 $\lambda_2 > 0$ 则有

$$\begin{aligned} \pi_{scd}(Q^*) = & (\alpha_1 - c_0)Q^* + (A_0 - \Delta c_m - b_r)\eta Q^* - \\ & (k_2 \eta^2 + (s + \Delta s)\eta Q^*) - \lambda_2(\bar{Q} - Q^*)^+ = \\ & (\alpha_2 + (A_0 - b_r)\eta Q^* - (k_2 \eta^2 + s \eta Q^*) + \\ & Q^* \alpha_4 - (\Delta c_m + \Delta s)\eta Q^* - \lambda_2(\bar{Q} - Q^*)^+ \leq \\ & (\alpha_3 - c_0)\bar{Q} + (A_0 - b_r)\eta \bar{Q} - (k_2 \eta^2 + \\ & s \eta \bar{Q}) + Q^* \alpha_4 - (\Delta c_m + \Delta s)\eta Q^* - \lambda_2(\bar{Q} - Q^*)^+ \leq \\ & (\alpha_3 - c_0)\bar{Q} + (A_0 - b_r)\eta \bar{Q} - (k_2 \eta^2 + \\ & s \eta \bar{Q}) + \bar{Q} \alpha_4 - (\Delta c_m + \Delta s)\eta \bar{Q} - \lambda_2(\bar{Q} - Q^*)^+ = \pi_{scd}(\bar{Q}) \end{aligned}$$

式中, $\alpha_1 = \ln((D + \Delta D)/Q)/k_1$, $\alpha_2 = \ln(D/Q^*)/k_1$, $\alpha_3 = \ln(D/Q)/k_1$, $\alpha_4 = \ln((D + \Delta D)/D)/k_1$ 。这与 Q^* 为 $\pi_{scd}(Q)$ 的最优解矛盾。命题得证。

从引理 1 中可以看出, 当干扰事件造成市场规模增大, 再制造成本和回收成本减小时, 制造商应增加产量来满足扩大的市场需求。这也说明制造商和零售商需要努力降低再制造成本和回收成本以增加整个供应链的收益。同样, 当干扰事件造成市场规模减小, 再制造成本和回收成本增大时, 制造商应减小产量满足缩减的市场规模。

由定理 1 可知, 当 $\Delta D > 0$, $\Delta c_m + \Delta s < 0$ 时, 有 $Q^* \geq \bar{Q}$, 于是

$$\pi_{scd1}(Q) = (\ln((D + \Delta D)/Q)/k_1 - c_0)Q + (A_0 - \Delta c_m - b_r)\eta Q - (k_2\eta^2 + (s + \Delta s)\eta Q) - \lambda_1(Q - \bar{Q}) \quad (10)$$

由一阶最优性条件 $\frac{\partial \pi_{scd1}(Q)}{\partial Q} = 0$ 可得最优产量

$$\tilde{Q} = (D + \Delta D)\exp(-U - V_1) \quad (11)$$

这里 $V_1 = \eta k_1 \Delta c_m + \eta k_1 \Delta s + \lambda_1 k_1$ 。通过比较 $\tilde{Q}$ 和 $\bar{Q}$, 由引理 1 可从以下两种情况进行考虑。

情况 1: 由 $\tilde{Q} \geq \bar{Q}$, 得 $(D + \Delta D)\exp(-U - V_1) \geq D\exp(-U)$, 则 $\pi_{scd1}(Q)$ 在 $Q^* = \tilde{Q}$ 达到最大值

$$\pi_{scd1} = (D + \Delta D)(1 + \lambda_1 k_1)/k_1 \exp(U + V_1) - k_2\eta^2 \quad (12)$$

此时的最优零售价格为

$$p^* = (U + V_1)/k_1 \quad (13)$$

情况 2: 由 $\tilde{Q} < \bar{Q}$, 得 $(D + \Delta D)\exp(-U - V_1) < D\exp(-U)$, 于是 $\Delta D < D(\exp(V_1) - 1)$ 。 $\tilde{Q}$ 不满足约束条件 $Q^* \geq \bar{Q}$, 由于函数 $\pi_{scd1}(Q)$ 在区间 $[\bar{Q}, +\infty]$ 上是单调下降的, 所以函数在点 $Q^* = \bar{Q}$ 取得最大值, 此时闭环供应链的最优利润为

$$\pi_{scd1}(Q^*) = D(1 + \ln((D + \Delta D)/D) - \eta k_1 \Delta c_m - \eta k_1 \Delta s)/k_1 \exp(U) - k_2\eta^2$$

此时的最优零售价格为

$$p^* = (U + \ln(D + \Delta D) - \ln D)/k_1 \quad (14)$$

类似式(10), 当 $\Delta D < 0$, $\Delta c_m + \Delta s > 0$ 时, 有

$$\pi_{scd2}(Q) = (\ln((D + \Delta D)/Q)/k_1 - c_0)Q + (A_0 - \Delta c_m - b_r)\eta Q - (k_2\eta^2 + (s + \Delta s)\eta Q) - \lambda_2(\bar{Q} - Q) \quad (15)$$

令 $\pi_{scd2}(Q)$ 关于 Q 的一阶导函数 $\frac{\partial \pi_{scd2}(Q)}{\partial Q} =$

0, 可求得最优值

$$\hat{Q} = (D + \Delta D)\exp(-U - V_2) \quad (16)$$

式中, $V_2 = \eta k_1 \Delta c_m + \eta k_1 \Delta s - \lambda_2 k_1$, 依照前面的讨论过程有以下两种情形。

情况 3: 由 $\hat{Q} \leq \bar{Q}$, 得 $(D + \Delta D)\exp(-U - V_2) \leq D\exp(-U)$, 于是得到 $\Delta D \leq D(\exp(V_2) - 1)$ 。此时函数 $\pi_{scd2}(Q)$ 在 $Q^* = \hat{Q}$ 达到最大值

$$\pi_{scd2} = (D + \Delta D)(1 - \lambda_2 k_1)/k_1 \exp(U + V_1) - k_2\eta^2$$

此时的最优零售价格

$$p^* = (U + V_2)/k_1 \quad (17)$$

情况 4: 由 $\hat{Q} > \bar{Q}$, 可知 $(D + \Delta D)\exp(-U - V_2) > D\exp(-U)$, 由此得 $\Delta D > D(\exp(V_2) - 1)$ 。 $\hat{Q}$ 不满足约束条件 $Q^* \leq \bar{Q}$, 由于函数 $\pi_{scd2}(Q)$ 在区间 $[-\infty, \bar{Q}]$ 上是单调递增的, 所以函数在点 $Q^* = \bar{Q}$ 取得最大值, 此时闭环供应链的最优利润和最优零售价格为分别为

$$\pi_{scd2}(Q^*) = D(1 + \ln((D + \Delta D)/D) - \eta k_1 \Delta c_m - \eta k_1 \Delta s)/k_1 \exp(U) - k_2\eta^2 \quad (18)$$

$$p^* = (U + \ln((D + \Delta D)/D))/k_1 \quad (19)$$

综合以上结果, 可以得到以下定理。

定理 1 当干扰事件造成市场需求规模 D 变化 ΔD 、再制造成本变化 Δc_m 以及回收成本变化 Δs 分别满足以下条件时, 可得到零售商的最优订货量 Q^* 、最优价格 p^* 以及闭环供应链的最优利润 $\pi_{scd}(Q^*)$, 从而协调一体化条件下闭环供应链系统。具体分类情况如下。

(1) 当 $\Delta D \geq D(\exp(V_1) - 1)$ 时, 有 $Q^* = (D + \Delta D)\exp(-U - V_1)$, $p^* = (U + V_1)/k_1$, $\pi_{scd}(Q^*) = (D + \Delta D)(1 + \lambda_1 k_1)/(k_1 \exp(U + V_1)) - k_2\eta^2$ 。

(2) 当 $D(\exp(V_2) - 1) < \Delta D < D(\exp(V_1) - 1)$ 时, 有 $Q^* = D\exp(-U)$, $p^* = (U + \ln(D + \Delta D) - \ln D)/k_1$, $\pi_{scd}(Q^*) = D(1 + \ln((D + \Delta D)/D) - \eta k_1 \Delta c_m - \eta k_1 \Delta s)/(k_1 \exp(U)) - k_2\eta^2$ 。

(3) 当 $\Delta D \leq D(\exp(V_2) - 1)$ 时, 有 $Q^* = (D + \Delta D)\exp(-U - V_2)$, $p^* = (U + V_2)/k_1$, $\pi_{scd}(Q^*) = (D + \Delta D)(1 - \lambda_2 k_1)/(k_1 \exp(U + V_1)) - k_2\eta^2$ 。

从定理 1 可以看出, 干扰事件发生后, 闭环供应链的最优生产量在一定条件下仍具有鲁棒性, 即当市场规模 D 、再制造成本 c_m 和回收成本 s 的变化范围满足 $D(\exp(V_2) - 1) < \Delta D < D(\exp(V_1) - 1)$ 时, 制

造商仍可保持原有的生产计划，零售商只需调整销售价格，即可达到整个闭环供应链的最优利润，且价格调整只和市场规模的变化量有关。另外，当市场规模变化较大时，生产量和价格的调整与再制造成本变化量和回收成本变化量密切相关，这也说明要达到闭环供应链整个系统的利润最优，制造商要充分考虑到这些变化量对于最优决策的影响。

3 干扰事件下分散化闭环供应链协调机制

在分散决策情形下，闭环供应链中制造商和零售商各成员分属不同的利益集团，都将做出对自己利益最大化的决策，这势必导致双向的双重边际效应。当干扰事件发生后，零售商利润函数

$$\pi_r(Q) = (\ln((D + \Delta D)/Q)/k_1 - w)Q + (b_m - b_r)\eta Q - (k_2\eta^2 + (s + \Delta s)\eta Q) \quad (20)$$

同时，在原收益共享契约 w_0 下，由式(20)得二阶导函数 $\frac{\partial^2 \pi_r(Q)}{\partial Q^2} = -\frac{1}{k_1 Q} < 0$ ，知函数 $\pi_r(Q)$ 为凹函数， $\pi_r(Q)$ 存在最大值，令一阶条件

$$\frac{\partial \pi_r(Q)}{\partial Q} = 0$$

得到零售商最优订购量

$$Q_1 = (D + \Delta D) / \exp(\delta k_1(c_0 - \eta\Delta_0 + \delta\eta b_r + s\eta) - \eta k_1(b_m - b_r - \Delta s) + 1) \quad (21)$$

对比定理 1 中供应链最优订购量可知 $Q_1 \neq Q^*$ ，即原有契约使零售商的最优订购量未达到原有的最优订购量，这说明原有契约未能起到协调闭环供应链的作用。因此，有必要重新制定新的收益共享契约以达到供应链协调。由定理 1 可得到以下定理。

定理 2 当干扰事件引起市场规模、再制造成本、回收成本三者变化时，通过以下收入共享契约可以达到闭环供应链的协调，且零售商的收益可按闭环供应链比例 θ ($0 < \theta < 1$) 分配。

$$w_1 = \theta(c_0 - \eta\Delta_0 + \eta b_m + \psi(Q)/Q) - \eta(1 - \theta)(s + \Delta s + b_r + k_2\eta/Q) \quad (22)$$

$$\psi(Q) = \lambda_1(Q - \bar{Q})^+ + \lambda_2(\bar{Q} - Q)^+$$

证明：对任意的 θ ($0 < \theta < 1$)，由于干扰事件后的零售商利润函数式(20)，将式(22)代入式(20)可以得到

$$\pi_r(Q) = \theta\alpha_4 Q - w_1 Q + \theta\eta Q b_m - \eta Q b_r - \beta_1 = \theta((\alpha_4 - c_0)Q + (\Delta_0 - \Delta c_m - b_r)\eta Q) - \beta_1 - \lambda_1(Q - \bar{Q})^+ - \lambda_2(\bar{Q} - Q)^+ = \theta\pi_{scd}(Q)$$

$$\beta_1 = (k_2\eta^2 + (s + \Delta s)\eta Q)$$

可以看出零售商利润是闭环供应链总利润的仿射函数，闭环供应链可以通过契约来协调各成员利益。所以当干扰事件发生后，零售商可根据调整后的契约 (w_1, θ, Q) 来确定自己最优订购量和最优价格，从而可以达到自身利益的最大化。特殊情形下，当 $\Delta D = \Delta s = 0$ 时， $w_1 = w_0$ ，即当干扰事件仅造成再制造成本发生变化时，原有收益共享契约仍可协调闭环供应链各成员利益，制造商可调整契约参数 θ 使自己利益最大化，这说明契约具有一定的鲁棒性。

4 数值试验

下面通过数值算例来验证上述结论的有效性。当干扰事件导致市场需求、再制造成本、回收成本发生扰动时，闭环供应链的最优产量、最优定价、闭环供应链最优利润也将受其影响，因而也影响到利润在各个成员间的分配，这就需要用契约机制来协调闭环供应链。为更好地揭示相关变量的演化规律，本文将干扰事件前后利润差值和干扰事件后利润的比值，即变化率做对比分析得出契约对闭环供应链的影响规律。

假设某电子产品制造商用新原料制造成本为 $c_0 = 12$ 元，回收再制造成本为 $c_m = 8$ 元，市场规模 $D = 8\ 000$ 件，价格敏感系数 $k_1 = 0.2$ ，制造商计划回收补偿价格 $b_m = 2$ 元，回收比例 $\delta = 0.8$ ，回收投入系数 $k_2 = 1$ ，零售商的单位回收价格 $b_r = 1$ 元，单位回收成本 $s = 0.5$ 元。制造商和零售商经过谈判，制造商分享闭环供应链的渠道收益比例为 $\delta = 0.6$ 。设干扰事件发生后，制造商偏离生产计划造成的损失成本为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ 元。

依据前文的结论易得稳定条件下闭环供应链最优产量 $\bar{Q} = 313$ 件、最优价格 $\bar{p} = 16.2$ 元、最优利润 $\bar{\pi}_{sc} = 1\ 566.4$ 元。此时，采用收益共享契约制造商利润为 $\pi_m = 939.8$ 元，零售商利润 $\pi_r = 626.6$ 元。

当干扰事件造成市场规模、再制造成本和回收投入发生扰动后，依照 ΔD 、 Δk_2 、 Δs 的不同取值范围分三种情况进行数值试验，表 1 中显示三种干扰因素在不同扰动程度下闭环供应链中最优策略。表 2 中显示了供应链的最优产量、最优价格、最优利润在不同扰动水平下的变化率。

从表 1 中可以看出，当干扰事件发生时，闭环供应链的最优产量、最优价格、最优利润与 Δc_m 的变化同方向。当 Δc_m 和 Δk_2 同方向变化时，闭环供应链最优利润与 Δs 反方向变化，当 Δk_2 与 Δs 同方向

表 1 不同扰动程度下新旧契约对闭环供应链利润对比

	市场规模 变化量 $\Delta D/\text{件}$	再制造成本 变化量 $\Delta c_m/\text{元}$	回收成本 变化量 $\Delta s/\text{元}$	最优产量 $Q^*/\text{件}$	最优价格 $P^*/\text{元}$	最优利润 $\pi(Q^*)/\text{元}$
1	-1 000	-2	-0.5	313.3	15.5	1 670.2
	-1 000	-2	0.5	313.3	15.5	1 545.1
	-1 000	2	-0.5	296.9	15.8	796.1
	-1 000	2	0.5	274.1	16.2	734.9
2	-40	-2	-0.5	313.3	16.2	1 871.8
	-40	-2	0.5	313.3	16.7	1 746.5
	40	2	-0.5	313.2	16.2	1 370.6
	40	2	0.5	311.7	16.2	835.7
3	1 000	-2	-0.5	352.5	16.2	2 114.7
	1 000	-2	0.5	343.3	16.7	1 938.9
	1 000	2	-0.5	343.3	16.7	1 562.9
	1 000	2	0.5	343.3	16.8	1 437.5

表 2 不同扰动水平下闭环供应链不同最优量的变化率

	市场规模 变化量 $\Delta D/\text{件}$	再制造成本 变化量 $\Delta c_m/\text{元}$	回收成本 变化量 $\Delta s/\text{元}$	最优产量 变化率 t_0	最优价格 变化率 t_1	最优利润 变化率 t_2
1	-1 000	-2	-0.5	-0.000 1	-0.043	-0.062
	-1 000	-2	0.5	-0.000 1	-0.043	-0.038
	-1 000	2	-0.5	0.05	-0.019	0.97*
	-1 000	2	0.5	0.142*	-0.043	1.131*
2	-40	-2	-0.5	-0.000 1	-0.043	-0.163
	-40	-2	0.5	-0.000 1	-0.071	-0.103
	40	2	-0.5	-0.000 1	-0.043	-0.428
	40	2	0.5	-0.000 1	-0.043	0.874*
3	1 000	-2	-0.5	-0.112*	-0.043	-0.260
	1 000	-2	0.5	-0.001	-0.071	-0.192*
	1 000	2	-0.5	-0.001	-0.071	-0.002
	1 000	2	0.5	0.001	-0.071	-0.008

注：*为最优生产量和最优利润变化较大的数据。

变化时，闭环供应链最优价格、最优利润随 Δc_m 同方向变化。当 Δc_m 和 Δs 同方向变化时，最优利润与 Δk_2 反方向变化。其次从表 2 中看出： Δc_m 、 Δk_2 和 Δs 三者变化时，最优价格的变化并不十分明显。但在 Δc_m 变化较大且 Δk_2 和 Δs 同方向变化时，最优生产量和最优利润的变化较大。另外，还可以看出当 Δk_2 变化时，最优利润的变化幅度较大。综上，干扰事件发生后，闭环供应链中制造商和零售商要获得更大的利润，就需要降低再制造成本，这也启示企业可以通过降低再制造成本、增强回收努力的方法提高企业的总体利润。

在以上讨论的三种情形下，对干扰事件造成不同因素扰动情况下，新旧契约对闭环供应链各成员利润的影响，从表 3 中可以看出，在原契约下，不仅零售商的收益为负值(如第 2 栏)，而且其中多数不符合制造商和零售商的收益分成，这说明原有契

约不能对闭环供应链协调，需要对原契约进行重新设计。从表 3 中新契约下制造商和零售商的利润情况，可以看出新数量折扣契约可以协调因干扰事件。

表 3 不同扰动程度下新旧契约对闭环供应链利润对比

市场 规模 变化 量/件	再制 造成 本变 化量 /元	回收 成本 变化 量/元	制造商利润 /元		零售商利润 /元		供应链利润 /元	
			旧契约	新契约	旧契约	新契约	旧契约	新契约
-1 000	-2	-0.5	1 816	1 065.1	-176.6	605.4	1 640	1 670
-1 000	2	0.5	1 190	440.9	-143.8	293.9	1 046	734.2
10 00	-2	-0.5	2 103	1268	-92.94	845.2	2 010	2 114
1 000	-2	0.5	1 517	1162	-150.3	773.9	1 367	1 937
1 000	2	-0.5	1 323	940.6	-68.01	625.1	1 255	1 565
1 000	2	0.5	1 568	862.9	-150	575.2	1 418	1 438

5 结论

本文讨论了在非线性市场需求规模的前提下，当干扰事件引起市场需求、再制造成本、回收努力发生扰动时，闭环供应链的定价决策和契约协调机制。研究了集中决策时制造商的最优定价和最优应对策略。通过对模型的比较分析，得到如下结论。

(1) 在一体化决策条件下，当干扰事件引起市场规模增大时，制造商应增加产量、减小再制造成本来满足扩大的市场需求，零售商应减小回收成本来增加供应链系统利润，反之亦然。当干扰因素在一定范围内变化时，作为主导者的制造商仍维持原来契约可达到闭环供应链各成员利益最大，即收益共享契约具有一定的鲁棒性；当干扰因素不在该范围扰动时，制造商应采取新的价格和生产策略达到总系统的利润最优。

(2) 在分散化决策条件下，原有的收益共享契约已不能协调干扰条件下的闭环供应链各方利润。需要采用修正的收益共享契约达到闭环供应链各成员的最优利润。

(3) 在资源日益匮乏的今天，实施闭环供应链模式的企业应意识到，降低再制造成本和加大回收努力对闭环供应链系统利润影响较大。在积极有效的契约下达到最优的闭环供应链总利润是各成员共赢的基础。

本文还有几个可以扩展的方面：首先，本文仅对单个制造商和零售商组成的二级闭环供应链进行讨论，而现实中的闭环供应链往往有多个成员共同组成，特别是第三方物流对整个闭环供应链的利润分配有很大变化；其次，本文研究的博弈关系是在

完全对称信息下, 信息不对称将导致回收率降低, 考虑信息因素对闭环供应链系统产生何种影响是一个值得探讨的问题; 还有, 干扰事件影响的因素是多方面的, 本文只讨论了三个因素的扰动情形, 对其他多个因素扰动对闭环供应链利润产生的影响, 以及对这些因素的相关性机理的研究也将成为今后一个重要的研究方向。

参 考 文 献

- [1] GUIDE V, HARRISON T, WASSENHOVE L N V. The challenge of closed-loop supply chain[J]. *Interfaces*, 2003, 33(6): 3-6.
- [2] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN W L. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [3] 王玉燕, 李帮义. 供应链、逆向供应链系统的定价策略模型 [J]. *中国管理科学*, 2006, 14(4): 40-45.
WANG Yuyan, LI Bangyi. The price decision model for the system of supply chain and reverse supply chain[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2006, 14(4): 40-45.
- [4] 李新军, 达庆利. 再制造条件下闭环供应链效益分析 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 170-174.
LI Xinjun, DA Qingli. Benefit ananalysis of closed-loop supply chain under remanufacturing condition[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 170-174.
- [5] 葛静燕, 黄培清. 基于博弈论的闭环供应链定价策略分析 [J]. *系统工程学报*, 2008, 23(1): 111-115.
GE Jingyan, HUANG Peiqing. Price decision analysis for closend-loop supply chain based on game theory [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2008, 23(1): 111-115.
- [6] 包晓英, 唐志英, 唐小我. 基于回收再制造的闭环供应链差异定价策略及协调 [J]. *系统管理学报*, 2010, 19(9): 546-552.
BAO Xiaoying, TANG Zhiying, TANG Xiaowo. Coordination and differential price strategy of closed-loop supply chain with product remanufacturing [J]. *Journal of Systems & Management*, 2010, 19(9): 546-552.
- [7] QI X T, BARD J F, YU G. Supply chain coordination with demand disruptions [J]. *Omega*, 2004, 32(4): 301-312.
- [8] XIAO T J, YU G, SHENG Z H, et al. Coordination of a supply chain with one-manufacturer and two-retailers under demand promotion and disruption management decisions[J]. *Annals of Operations Research*, 2005, 135(1): 87-109.
- [9] XU M H, QI X T, YU G, et al. Coordinating dyadic supply chains when production costs are disrupted[J]. *IIE Transaction*, 2006, 38 (9): 765-775.
- [10] XIAO T J, QI X T, YU G. Coordination of supply chain after demand disruptions when retailers compete[J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 109 (1): 162-179.
- [11] XIAO T J, QI X T. Price competition, cost and demand disruptions and coordination of a supply chain with one manufacture and two competing retailers[J]. *Omega*, 2008, 36(5): 741-753.
- [12] CHEN K B, XIAO T J. Demand disruption and coordination of the supply chain with a dominant retailer[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 197(1): 225-234.
- [13] 王传涛, 申金升, 纪寿文. 生产成本和需求同时扰动下供应链的协调[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(6): 1307-1312.
WANG Chuantao, SHEN Jinsheng, JI Shouwen. Supply chain coordination under production cost and demand disruptions[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(6): 1307-1312.
- [14] 庞庆华. 收益共享契约下三级供应链应对突发事件的协调研[J]. *中国管理科学*, 2010, 18(4): 101-106.
PANG Qinghua. Three level supply chain coordination under disruption with revenue sharing contract[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2010, 18(4): 101-106.
- [15] 高波, 石书生, 韦诗韵. 需求和价格时间敏感下供应链应对突发事件[J]. *控制与决策*, 2011, 26(9): 1363-1366.
GAO Bo, SHI Shusheng, WEI Shiyun. Supply chain disruptions management when both demand and price are response time sensitive[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(9): 1363-1366.
- [16] 王玉燕. 回购契约下闭环供应链对突发事件的协调应对[J]. *运筹与管理*, 2009, 18(6): 46-52.
WANG Yuyan. Closed-loop supply chain coordination under disruptions with buy back contract[J]. *Operations Research and Management Science*, 2009, 18(6): 46-52.
- [17] 王玉燕. 收益共享契约下闭环供应链应对突发事件的协调分析[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(6): 78-83.

- WANG Yuyan. Closed-loop supply chain coordination under disruptions with revenue-sharing contract[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(6): 78-83.
- [18] CACHON G P, LARIVIERE M A. Supply chain coordination with revenue sharing contracts: Strength and limitations[J]. Management Science, 2005, 51(1): 30-44.
- [19] 郑惠莉, 达庆利. 移动互联网供应链协调机制研究[J]. 管理科学学报, 2005, 8(5): 31-37.
- ZHENG Huili, DA Qingli. Supply chain coordination mechanism of mobile internet [J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(5): 31-37.
- [20] 陈菊红, 郭福利, 史成东. 需求具有价格敏感性的供应链收益共享契约设计研究[J]. 中国管理科学, 2008, 16(3): 78-83.
- CHEN Juhong, GUO Fuli, SHI Chengdong. On supply chain revenue sharing contract design under price sensitive demand[J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(3): 78-83.
-
- 作者简介:** 王银河, 男, 1976 年出生, 博士研究生。主要研究方向为供应链管理和应急管理。
E-mail: wangyinhe0371@yahoo.com.cn
- 王旭, 女, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为物流与供应链管理。
E-mail: wx921@163.com