文章编号: 1001-0920 (2013) 10-1465-08

供应商损失厌恶情形下组装供应链协调

付 红, 马永开, 唐小我
(电子科技大学 经济与管理学院，成都 610054)

摘 要: 鉴于决策者的风险偏好特性和产品内分工的迅速发展, 构建由多个损失厌恶零部件供应商和单个风险中性组装商构成的组装供应链模型, 其中各供应商均采用拉式契约向组装商提供一种互补性零部件. 首先, 给出拉式契约下各节点企业的最优策略, 发现拉式契约下各零部件的最优产量均小于集中化情形下的最优产量; 然后, 通过引入价格补贴策略设计契约协调机制; 最后, 通过数值分析验证了该契约协调机制的有效性.

关键词: 组装供应链；损失厌恶；价格补贴；协调
中图分类号: F273 **文献标志码:** A

Coordination of assembly supply chain with loss-averse suppliers

FU Hong, *MA Yong-kai*, *TANG Xiao-wo*
(School of Management and Economics，University of Electronic Science and Technology of China，Chengdu 610054，China．Correspondent：MA Yong-kai，E-mail：mayongkai@uestc.edu.cn)

Abstract: In view of the risk appetite characteristics of decision makers and the rapid development of intra-product specialization, an assembly supply chain model with multiple loss-averse component suppliers and a risk-neutral assembler is established. In the model, each supplier provides a complementary component to the assembler with a pull contract. Firstly, the study derives the optimal strategy of each enterprise under the pull contract, and finds that the optimal production quantity of each component under the pull contract is less than that of centralized system. Then, it designs the coordination mechanism by introducing the price subsidy policy. Finally, numerical analysis verifies the effectiveness of coordination mechanism.

Key words: assembly supply chain；loss-aversion；price subsidy；coordination

0 引 言

传统的供应链研究往往假设决策者是风险中性的, 即决策目标是最大化企业期望利润. 然而, 在市场需求不确定的情况下, 风险是客观存在的, 决策者会因为害怕风险而选择规避风险的行为. 因此, 近年来部分学者对有风险偏好决策者参与的供应链进行了研究. 文献 [1] 对报童的决策行为进行测试, 发现大多数报童的实际订货量都偏离了期望利润最大化所对应的决策点. 文献 [2] 在需求具有价格敏感性的前提下研究了风险厌恶零售商的订货量和销售价格决策问题. 文献 [3] 针对由两个风险规避供应商和两个风险规避零售商构成的供应链, 研究了零售商的风险规避系数对于供应链渠道结构和批发价格的影响. 文献 [4-6] 研究了由一个风险中性供应商和一个损失厌恶零售商构成的供应链的协调问题. 文献 [7] 研究了由一个风险中性供应商和一个风险厌恶零售商构成的供应链协调问题, 研究表明, 通过引入风险分担策略可使供应链达到协调. 文献 [8] 研究了由一个风险中性供应商和多个风险厌恶零售商构成的供应链的协调问题, 研究发现通过引入一个风险中性分销商可使供应链达到协调. 文献 [9-10] 研究了供应商为损失厌恶而零售商为风险中性的供应链协调问题. 此外, 文献 [11] 研究了由一个损失厌恶供应商和一个损失厌恶零售商构成的供应链的协调问题, 研究表明在批发价格契约基础上, 通过引入价格补贴策略可使供应链达到协调. 文献 [12] 基于均值方差理论研究了如何使用回购契约使由一个风险规避供应商和一个风险规避零售商构成的供应链达到协调. 文献 [13] 研究了

收稿日期: 2012-06-27；**修回日期:** 2012-11-14.
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(70932005)；国家自然科学基金项目(71101019)；教育部博士点基金项目(20100175110017).
作者简介: 付红(1986−), 男, 博士生, 从事供应链管理的研究；马永开(1963−), 男, 教授, 博士生导师, 从事资本市场与供应链管理等研究.

由一个供应商和两个零售商构成的供应链的协调问题, 给出了契约协调机制, 并分析了节点企业的风险偏好对供应链收益分配的影响. 上述关于有风险偏好决策者参与的供应链研究均假设整件产品的生产可由一个供应商单独完成, 不涉及组装供应链.

事实上, 随着市场竞争的推动, 早期的产业间分工已逐渐演变为如今的产品内分工[14]. 在该分工模式下, 一个供应商往往只生产整件产品中的某一种或几种零部件, 然后再由组装商将这些互补性零部件按一定的组装比例进行组装销售. 由于零部件间的互补性使得组装供应链研究较一般的供应链研究更加复杂, 如何实现各零部件供应商间的协调运作一直是组装供应链中存在的难题. 从非合作博弈角度: 文献[15] 研究了组装供应链的生产能力决策问题; 文献[16] 研究了组装供应链的产量和价格决策问题; 文献[17] 扩展了文献 [16] 的模型, 研究了每一种零部件都由多个供应商生产时的产量和价格决策问题; 文献[18] 研究了供应商间的合作定价对组装供应链效益的影响; 文献 [19] 研究了组装供应链的协调问题. 从合作博弈角度: 文献 [20] 研究了推式和拉式两种契约下供应商联盟形式问题; 文献 [21] 研究了不同类型的市场需求对供应商联盟形式的影响; 文献 [22] 研究了供应商主导、组装商主导、供应商和组装商市场力量相同 3 种情形下供应商可能结成的联盟形式. 然而, 上述关于组装供应链的研究均假设决策者以期望利润最大化为决策目标, 并没有考虑决策者的风险偏好.

鉴于此, 本文建立了由多个损失厌恶零部件供应商和单个风险中性组装商构成的组装供应链模型, 其中各供应商生产的零部件是互补的, 并假设组装商为主导者、供应商为跟随者, 组装商通过拉式契约向各零部件供应商采购零部件. 首先, 借鉴 Stackelberg 博弈的分析思路, 给出拉式契约下各节点企业的最优策略, 通过分析发现拉式契约下各零部件的最优产量均偏离了集中化情形下的最优产量; 然后, 引入价格补贴策略得到能够被组装商用来协调组装供应链的契约协调机制; 最后, 通过数值分析对该契约协调机制的有效性进行验证. 本文的主要贡献是: 1) 拓展了有风险偏好决策者参与的供应链研究, 而文献 [1-2, 4-13] 的研究只包含一个供应商, 文献 [3] 虽然考虑了两个供应商, 但两个供应商生产的产品是可替代的, 不同于本文各供应商提供的零部件是互补的; 2) 拓展了组装供应链的研究, 而文献 [15-22] 的研究均假设组装供应链决策者是风险中性的, 不同于本文各供应商均是损失厌恶的.

1 模型假设与集中化决策

1.1 模型假设

考虑市场上一种产品, 该产品由 $n (n \geqslant 2)$ 个供应商生产的 n 种不同零部件经惟一组装商组装而成, 其中各供应商是损失厌恶的, 组装商是风险中性的. 不失一般性, 假设各零部件的组装比例为 1:1:$\cdots$:1, 零部件 $i\,(1 \leqslant i \leqslant n)$ 的生产成本为 c_i, $C = \sum\limits_{i=1}^{n} c_i$ 为零部件的总生产成本, 产品的组装成本忽略不计[20-22], 产品的市场价格为 $P = 1$. 市场需求 X 是非负、连续的随机变量, 其概率分布函数与概率密度函数分别为 $F(x)$ 和 $f(x)$, 其中 $F(x)$ 连续可导, 记 $\hat{F}(x) = 1 - F(x)$.

组装商采用拉式契约[20,23]向各零部件供应商采购零部件, 在拉式契约下, 组装商首先给出各零部件的采购价格 (记零部件 i 的采购价格为 p_i, $p = \sum\limits_{i=1}^{n} p_i$ 为零部件总采购价格), 然后各供应商确定各自零部件的产量 (记零部件 i 的产量为 q_i), 当市场实际需求发生时, 由于各零部件的组装比例为 1:1:$\cdots$:1, 组装商对各零部件的采购量均为 $q = \min\{q_1, q_2, \cdots, q_n, X\}$. 因此, 在拉式契约下, 各零部件的库存风险由各供应商承担, 组装商不承担任何库存风险. 此外, 用 π 表示利润, U 表示效用, E 表示期望值, 右下标 $c, i, 0$ 分别表示集中化决策、供应商 i、组装商, 正上标“$-$”表示引入价格补贴策略后的情形.

针对各供应商的损失厌恶特性, 采用分段线性损失厌恶效用函数[1]对其进行刻画, 即

$$U(\pi_i) = \begin{cases} \lambda_i \pi_i,\ \pi_i < 0; \\ \pi_i,\ \pi_i \geqslant 0. \end{cases} \tag{1}$$

其中 λ_i 为供应商 i 的损失厌恶系数, $\lambda_i \geqslant 1$. λ_i 越大表示供应商 i 的损失厌恶程度越高, $\lambda_i = 1$ 表示供应商 i 是风险中性的.

1.2 集中化决策

当组装供应链是一个集中化决策系统时, 假设决策者是风险中性的, 其期望利润为

$$E(\pi_c) = E[\min(q, X)] - Cq = \int_0^q \hat{F}(x)\mathrm{d}x - Cq. \tag{2}$$

由式 (2), 对 $E(\pi_c)$ 分别求 q 的一阶导数和二阶导数, 得到

$$\frac{\partial E(\pi_c)}{\partial q} = \hat{F}(q) - C,\ \frac{\partial^2 E(\pi_c)}{\partial q^2} = -f(q) < 0,$$

即 $E(\pi_c)$ 是 q 的凹函数. 令 $\partial E(\pi_c)/\partial q = 0$, 得到集中化情形下各零部件的最优产量均为 $q_c^* = \hat{F}^{-1}(C)$.

以集中化情形下的最优产量作为检测组装供应链是否达到协调的标准, 下面对分散化组装供应链的决策问题展开分析.

2 分散化组装供应链决策

在拉式契约下, 组装商和供应商进行以组装商为主导的 Stackelberg 博弈. 面对组装商任意给定的一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 首先考虑当供应商 i 不考虑

零部件间的互补性时零部件 i 的最优产量.

在拉式契约下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其利润为

$$\pi_i = p_i \min\{q_i, X\} - c_i q_i = \begin{cases} p_i x - c_i q_i, \ x < q_i; \\ p_i q_i - c_i q_i, \ x \geqslant q_i. \end{cases} \tag{3}$$

令 $\pi_i = 0$, 可以求得供应商 i 的盈亏平衡需求量 $q_{i0} = c_i q_i / p_i$. 当 $x < q_{i0}$ 时, $\pi_i < 0$; 当 $q_{i0} \leqslant x \leqslant q_i$ 时, $\pi_i \geqslant 0$; 当 $x > q_i$ 时, $\pi_i > 0$. 因此, 在拉式契约下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其期望效用为

$$\begin{aligned} E(U(\pi_i)) &= \lambda_i \int_0^{q_{i0}} \pi_i f(x)\mathrm{d}x + \int_{q_{i0}}^{+\infty} \pi_i f(x)\mathrm{d}x = \\ &p_i \Big[q_i - \int_0^{q_i} F(x)\mathrm{d}x\Big] - c_i q_i - \\ &(\lambda_i - 1)p_i \int_0^{\frac{c_i q_i}{p_i}} F(x)\mathrm{d}x. \end{aligned} \tag{4}$$

由式 (4), 对 $E(U(\pi_i))$ 分别求 q_i 的一阶导数和二阶导数, 得到

$$\frac{\partial E(U(\pi_i))}{\partial q_i} = p_i \hat{F}(q_i) - c_i - (\lambda_i - 1)c_i F\Big(\frac{c_i q_i}{p_i}\Big), \tag{5}$$

$$\frac{\partial^2 E(U(\pi_i))}{\partial q_i^2} = -p_i f(q_i) - (\lambda_i - 1)\frac{c_i^2}{p_i} f\Big(\frac{c_i q_i}{p_i}\Big). \tag{6}$$

由式 (6) 可知, $\partial^2 E(U(\pi_i))/\partial q_i^2 < 0$, 即在拉式契约下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其期望效用是零部件 i 产量的凹函数. 因此, 在拉式契约下, 对于组装商任意给定的一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 零部件 i 的最优产量 q_i^* 满足

$$p_i \hat{F}(q_i^*) - c_i - (\lambda_i - 1)c_i F\Big(\frac{c_i q_i^*}{p_i}\Big) = 0. \tag{7}$$

式 (7) 给出了在拉式契约下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 零部件 i 的最优产量与供应商 i 的损失厌恶系数、零部件 i 的采购价格之间的关系. 具体描述为: 当零部件 i 的采购价格一定时, 供应商 i 的损失厌恶系数越大, 零部件 i 的最优产量越低; 当供应商 i 的损失厌恶系数一定时, 零部件 i 的采购价格越高, 其最优产量也越高. 因此, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 组装商可通过提高零部件 i 的采购价格来提高其产量.

为了下文研究方便, 当 λ_i 一定时, 记 q_i^* 与 p_i 间的函数关系为 $q_i^* = \psi_{i,\lambda_i}(p_i)$. 由式 (7) 可知, q_i^* 是 p_i 的增函数, 对应的反函数记为 $p_i = \psi_{i,\lambda_i}^{-1}(q_i^*)$, 并且 p_i 也是 q_i^* 的增函数.

对于组装商而言, 由于各零部件的组装比例为 1:1:$\cdots$:1, 组装商对各零部件的最大采购量均不会超过 $\min\{\psi_{i,\lambda_i}(p_i), 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 再结合拉式契约下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其期望效用是零部件 i 产量的凹函数性质, 可以得到如下结论:

结论 1　在拉式契约下, 对于组装商任意给定的一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 各零部件的最优产量均为

$$q^* = \min\{\psi_{i,\lambda_i}(p_i), 1 \leqslant i \leqslant n\}. \tag{8}$$

结论 1 表明, 在拉式契约下, 组装商只提高部分零部件的采购价格未必能提高各零部件的产量, 这是因为各零部件的最优产量是由 $\{\psi_{i,\lambda_i}(p_i), 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 中的最小值确定的. 接下来对组装商的最优采购价格策略进行分析.

风险中性组装商的决策目标是: 在已知各零部件的最优产量 q^*、各供应商损失厌恶系数 λ_i 和采购价格 p_i 满足式 (8) 的前提下, 设定一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 使自己的期望利润最大.

在拉式契约下, 组装商的期望利润为

$$\begin{aligned} &E(\pi_0) = \\ &(1-p)E[\min(q^*, X)] = (1-p)\int_0^{q^*} \hat{F}(x)\mathrm{d}x. \end{aligned} \tag{9}$$

为了得到组装商的最优采购价格策略, 首先给出组装商确定一组最优采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 所需满足的必要条件, 即如下引理:

引理 1　作为理性的组装商, 从自身期望利润最大化角度考虑, 设定采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 使得 $\psi_{1,\lambda_1}(p_1) = \psi_{2,\lambda_2}(p_2) = \cdots = \psi_{n,\lambda_n}(p_n)$.

证明　假设 $\psi_{1,\lambda_1}(p_1) = \min\{\psi_{i,\lambda_i}(p_i), 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 若组装商对 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 的设定不能使得 $\psi_{1,\lambda_1}(p_1) = \psi_{2,\lambda_2}(p_2) = \cdots = \psi_{n,\lambda_n}(p_n)$ 成立, 则必然存在 $p_j (2 \leqslant j \leqslant n)$ 使得 $\psi_{j,\lambda_j}(p_j) > \psi_{1,\lambda_1}(p_1)$.

考虑组装商减小 p_j 直到 $\psi_{j,\lambda_j}(p_j) = \psi_{1,\lambda_1}(p_1)$ 的过程中, 组装商的期望利润变化情况. 由于 $\psi_{j,\lambda_j}(p_j)$ 是 p_j 的增函数, 有: 1) $q^* = \min\{q_i^* = \psi_{i,\lambda_i}(p_i), 1 \leqslant i \leqslant n\} = \psi_{1,\lambda_1}(p_1)$ 的取值不变; 2) $1 - p$ 的取值增大. 由 1) 和 2) 再结合式 (9) 可知, 组装商在减小 p_j 直到使得 $\psi_{j,\lambda_j}(p_j) = \psi_{1,\lambda_1}(p_1)$ 的过程中, 组装商的期望利润将会增加. 因此, 组装商从自身期望利润最大化角度考虑, 必然会设定 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 使得 $\psi_{1,\lambda_1}(p_1) = \psi_{2,\lambda_2}(p_2) = \cdots = \psi_{n,\lambda_n}(p_n)$. □

根据引理 1, 组装商对 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 一组变量的决策可简化为对 p_1 一个变量的决策, 然后设定 $p_i = \psi_{i,\lambda_i}^{-1}[\psi_{1,\lambda_1}(p_1)]$ 即可. 将 $p_i = \psi_{i,\lambda_i}^{-1}[\psi_{1,\lambda_1}(p_1)]$ 代入式 (8) 可以得到 $q^* = \psi_{1,\lambda_1}(p_1)$, 因此, 组装商的期望利润可以改写为

$$\begin{aligned} &E(\pi_0) = \\ &\Big(1 - \sum_{i=1}^{n} \psi_{i,\lambda_i}^{-1}[\psi_{1,\lambda_1}(p_1)]\Big) \int_0^{\psi_{1,\lambda_1}(p_1)} \hat{F}(x)\mathrm{d}x. \end{aligned} \tag{10}$$

根据式 (10), 可以得到如下结论:

结论 2 在拉式契约下, 零部件 i 的最优采购价格为 $p_i^* = \psi_{i,\lambda_i}^{-1}[\psi_{1,\lambda_1}(p_1^*)]$, 各零部件的最优产量为 $q^{**} = \psi_{1,\lambda_1}(p_1^*)$, 其中 $p_1^* = \arg\max\limits_{p_1} E(\pi_0)$.

证明 由式 (10) 可知 $E(\pi_0)$ 是 p_1 连续函数, 其中 p_1 的定义域为 $[c_1, 1]$, 因此, 存在 p_1^* 使得 $E(\pi_0)$ 最大. 再结合引理 1 和式 (8), 结论 2 得证. □

将 p_i^* 和 q^{**} 分别代入式 (4) 和 (10), 得到拉式契约下, 供应商 i 的期望效用和组装商的期望利润, 分别记为 $E(U(\pi_i^*))$ 和 $E(\pi_0^*)$.

结论 2 给出了拉式契约下, 各节点企业的最优策略, 由结论 2 可以得到如下推论:

推论 1 在拉式契约下, 对于有损失厌恶供应商参与的组装供应链, 各零部件的最优产量均小于集中化情形下的最优产量.

证明 对于组装商任意给定的一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 将式 (8) 中的 q^* 分为两类, 一类是 λ_i 全为零, 即各供应商都是风险中性的, 记 q^* 为 Q_0^*; 另一类是 λ_i 不全为零, 即至少有一个供应商是损失厌恶的, 记 q^* 为 Q_λ^*.

1) 考虑对于组装商任意给定的一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$, Q_0^* 的最大取值. 由式(7) 和 (8) 得到 $Q_0^* = \min\{\hat{F}^{-1}(c_i/p_i),\ 1 \leqslant i \leqslant n\}$. 再由 $\hat{F}^{-1}(c_i/p_i)$ 是 p_i 的增函数可知, 当且仅当 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 的设定满足方程组

$$\begin{cases} \hat{F}^{-1}(c_1/p_1) = \hat{F}^{-1}(c_2/p_2) = \cdots = \hat{F}^{-1}(c_n/p_n), \\ p = 1 \end{cases}$$

时, Q_0^* 取最大值, 求解该方程组, 得到 $p_i = c_i/C$. 将 $p_i = c_i/C$ 代入 $Q_0^* = \min\{\hat{F}^{-1}(c_i/p_i),\ 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 中, 可得到 Q_0^* 的最大取值为 q_c^*.

2) 由式 (7) 和 (8) 可知, 对于组装商任意给定的一组采购价格 $\{p_i, 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 均有 $Q_\lambda^* < Q_0^*$ 成立.

综上两方面可知 $Q_\lambda^* < Q_0^* \leqslant q_c^*$. □

3 契约协调机制

在第 2 节中, 给出了拉式契约下各节点企业的最优策略, 并指出了各零部件的最优产量均小于集中化情形下的最优产量. 为了激励各供应商生产更多的零部件, 考虑契约 $\{[p_i, s_i], 1 \leqslant i \leqslant n\}$. 该契约表示: 对于零部件 i, 在采购价格 p_i 的基础上, 组装商对未采购的零部件每单位支付一个价格补贴 s_i (限定 $s_i < c_i$, 因为若 $s_i \geqslant c_i$, 则零部件 i 的产量为无穷大). 与第 2 节的分析思路一致, 首先分析当供应商不考虑零部件间的互补性时零部件 i 的最优产量.

在契约 $\{[p_i, s_i], 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其利润为

$$\overline{\pi}_i = p_i \min\{q_i, X\} - c_i q_i + s_i \max\{q_i - X, 0\} = \begin{cases} p_i x - c_i q_i + s_i(q_i - x),\ x < q_i; \\ p_i q_i - c_i q_i,\ x \geqslant q_i. \end{cases} \tag{11}$$

令 $\overline{\pi}_i = 0$, 可以求得供应商 i 的盈亏平衡需求量 $\overline{q}_{i0} = (c_i - s_i)q_i/(p_i - s_i)$. 当 $x < \overline{q}_{i0}$ 时, $\overline{\pi}_i < 0$; 当 $\overline{q}_{i0} \leqslant x \leqslant q_i$ 时, $\overline{\pi}_i \geqslant 0$; 当 $x > q_i$ 时, $\overline{\pi}_i > 0$. 因此, 在契约 $\{[p_i, s_i], 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其期望效用为

$$\begin{aligned} E(U(\overline{\pi}_i)) = {}& \lambda_i \int_0^{\overline{q}_{i0}} \overline{\pi}_i f(x)\mathrm{d}x + \int_{\overline{q}_{i0}}^{+\infty} \overline{\pi}_i f(x)\mathrm{d}x = \\ & -(\lambda_i - 1)(p_i - s_i) \int_0^{\frac{(c_i - s_i)q_i}{p_i - s_i}} F(x)\mathrm{d}x + \\ & p_i \int_0^{q_i} \hat{F}(x)\mathrm{d}x - c_i q_i + s_i \int_0^{q_i} F(x)\mathrm{d}x. \end{aligned} \tag{12}$$

组装商的期望利润为

$$E(\overline{\pi}_0) = (1-p)E[\min(q, X)] - \sum_{i=1}^{n} s_i E[\max(q - X, 0)]. \tag{13}$$

由式 (12), 对 $E(U(\overline{\pi}_i))$ 分别求 q_i 的一阶导数和二阶导数, 得到

$$\frac{\partial E(U(\overline{\pi}_i))}{\partial q_i} = p_i - c_i - (p_i - s_i)F(q_i) - (\lambda_i - 1)(c_i - s_i)F\Big[\frac{(c_i - s_i)q_i}{p_i - s_i}\Big], \tag{14}$$

$$\frac{\partial^2 E(U(\overline{\pi}_i))}{\partial q_i^2} = -(p_i - c_i)f(q_i) - (\lambda_i - 1)\times \frac{(c_i - s_i)^2}{p_i - s_i} f\Big[\frac{(c_i - s_i)q_i}{p_i - s_i}\Big] < 0. \tag{15}$$

由式 (15) 可知, 在契约 $\{[p_i, s_i], 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其期望效用是零部件 i 产量的凹函数. 因此, 在契约 $\{[p_i, s_i], 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 零部件 i 的最优产量 $\overline{q}_i^*$ 满足

$$p_i - c_i - (p_i - s_i)F(\overline{q}_i^*) - (\lambda_i - 1)(c_i - s_i)F\Big[\frac{(c_i - s_i)\overline{q}_i^*}{p_i - s_i}\Big] = 0. \tag{16}$$

式 (16) 给出了在契约 $\{[p_i, s_i], 1 \leqslant i \leqslant n\}$ 下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 零部件 i 的最优产量与供应商 i 的损失厌恶系数、零部件的采购价格和价格补贴之间的关系. 具体描述为: 当零部件的采购价格与价格补贴一定时, 供应商 i 的损失厌恶系数越大, 零部件 i 的最优产量越低; 当零部件的价格补贴与供应商 i 的损失厌恶系数一定时, 零部件 i 的采购价格越高, 其最优产量也越高 (由式 (16), 通过隐函数求导可得 $\partial\overline{q}_i^*/\partial p_i > 0$); 当供应商 i 的损失厌恶系数与零部件 i 的采购价格一定时, 零部件 i 的价格补贴越高, 其最优产量也越高 (由式 (16), 通过隐函数求导可得 $\partial\overline{q}_i^*/\partial s_i > 0$). 因此, 当供应商 i 不考虑零部件

间的互补性时, 组装商可通过提高零部件 i 的采购价格或价格补贴来提高其产量.

为了下文研究方便, 当 λ_i 一定时, 记 $\overline{q}_i^*$ 与 p_i 和 s_i 间的函数关系为 $\overline{q}_i^*=\varphi_{i,\lambda_i}(p_i,s_i)$.

由于组装商对各零部件的最大采购量均不会超过 $\min\{\varphi_{i,\lambda_i}(p_i,s_i),1\leqslant i\leqslant n\}$, 再结合契约 $\{[p_i,s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 当供应商 i 不考虑零部件间的互补性时, 其期望效用是零部件 i 产量的凹函数性质, 可以得到如下结论:

结论 3　在契约 $\{[p_i,s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 各零部件的最优产量均为

$$\overline{q}^*=\min\{\varphi_{i,\lambda_i}(p_i,s_i),1\leqslant i\leqslant n\}. \tag{17}$$

结论 3 表明, 在契约 $\{[p_i,\ s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 组装商只提高部分零部件的采购价格或价格补贴未必能提高各零部件的产量, 这是因为各零部件的最优产量是由 $\{\varphi_{i,\lambda_i}(p_i,s_i),1\leqslant i\leqslant n\}$ 中的最小值确定的.

由结论 3 可以得到如下推论:

推论 2　作为理性的组装商, 从自身期望利润最大化角度考虑, 将会设定 p_i 和 s_i 使得 $\varphi_{1,\lambda_1}(p_1,s_1)=\varphi_{2,\lambda_2}(p_2,s_2)=\cdots=\varphi_{n,\lambda_n}(p_n,s_n)$.

推论 2 的证明过程与引理1的证明过程类似, 此处不再赘述. 为了得到契约协调机制, 给出如下引理:

引理 2　当市场需求的分布函数 $F(x)$ 与供应商 i 的损失厌恶系数 λ_i 一定时, 存在惟一的常数 $\theta_i^*\in(0,\ C]$ 使得 $C-\theta_i^*-(\lambda_i-1)\theta_i^*F(\theta_i^*q_c^*)=0$.

证明　记 $h_i(\theta_i)=C-\theta_i-(\lambda_i-1)\theta_iF(\theta_iq_c^*)$, 容易得知 $h_i(\theta_i)$ 是 θ_i 的减函数, 且 $h_i(0)=C>0$, $h_i(C)\leqslant 0$. 因此, 存在惟一的 $\theta_i^*\in(0,\ C]$. □

根据引理 2 可以得到如下结论:

结论 4　在契约 $\{[p_i,s_i(p_i)],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 组装供应链可以实现协调, 其中 $s_i(p_i)=(c_i-\theta_i^*p_i)/(1-\theta_i^*)$.

证明　将 $s_i(p_i)$ 代入式 (14), 得到

$$\frac{\partial E(U(\overline{\pi}_i))}{\partial q_i}=[p_i-s_i(p_i)][1-\theta_i^*-F(q_i)-(\lambda_i-1)\theta_i^*F(\theta_i^*q_i)]. \tag{18}$$

由式 (18) 可知 $\partial E(U(\overline{\pi}_i))/\partial q_i$ 是 q_i 的单调减函数, 且有

$$\lim_{q_i\to 0}\frac{\partial E(U(\overline{\pi}_i))}{\partial q_i}>0,\quad \lim_{q_i\to +\infty}\frac{\partial E(U(\overline{\pi}_i))}{\partial q_i}<0.$$

另外, 当 $q_i=q_c^*$ 时, $\partial E(U(\overline{\pi}_i))/\partial q_i=0$. 即 $\overline{q}_i^*=q_c^*$, 因此, $\overline{q}^*=\min\{\overline{q}_i^*,1\leqslant i\leqslant n\}=q_c^*$. □

由结论 4 可知: 1) 组装商在设定契约参数时, 对零部件 i 无需单独设定其采购价格 p_i 和价格补贴 s_i, 只需设定其采购价格 p_i, 再由 $s_i(p_i)$ 的表达式可以确定对应的价格补贴 s_i; 2) 由 $s_i(p_i)$ 的表达式可知 s_i 的设定与其他零部件的采购价格无关, 这表示组装商在设定契约参数时不需考虑零部件间的互补性, 可直接与各供应商单独协商契约参数; 3) 当供应商 i 的损失厌恶系数一定时, 零部件 i 的采购价格越高, 其价格补贴越低, 且价格补贴与其他供应商的损失厌恶系数无关; 4) 当零部件 i 的采购价格一定时, 供应商 i 的损失厌恶系数越大, 零部件 i 的价格补贴越高 (利用链式求导法则可知

$$\frac{\partial s_i(p_i)}{\partial\lambda_i}=\frac{\partial s_i(p_i)}{\partial\theta_i^*}\frac{\partial\theta_i^*}{\partial\lambda_i},$$

其中 $\partial s_i(p_i)/\partial\theta_i^*<0$, $\partial\theta_i^*/\partial\lambda_i<0$, 因此 $\partial s_i(p_i)/\partial\lambda_i>0$), 且价格补贴与其他供应商的损失厌恶系数也无关.

将$s_i(p_i)$代入式 (12) 和 (13), 得到契约$\{[p_i,s_i(p_i)],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 供应商 i 的期望效用和组装商的期望利润分别为

$$E(U(\overline{\pi}_i))=(p_i-c_i)q_c^*-\frac{p_i-c_i}{1-\theta_i^*}\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x-\frac{(\lambda_i-1)(p_i-c_i)}{1-\theta_i^*}\int_0^{\theta_i^*q_c^*}F(x)\mathrm{d}x, \tag{19}$$

$$E(\overline{\pi}_0)=(1-p)q_c^*-\Big(1-\sum_{i=1}^n\frac{p_i-c_i}{1-\theta_i^*}\Big)\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x. \tag{20}$$

根据式 (19) 和 (20) 可以得到如下结论:

结论 5　在契约 $\{[p_i,s_i(p_i)],\ 1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 各供应商的期望效用均随各自零部件的采购价格增大而增大; 组装商的期望利润随各零部件的采购价格增大而减小.

证明　由式 (19) 对 $E(U(\overline{\pi}_i))$ 求 p_i 的一阶导数得到

$$\begin{aligned}&\partial E(U(\overline{\pi}_i))/\partial p_i=\\&\frac{1}{1-\theta_i^*}\Big[q_c^*(1-\theta_i^*)-\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x-(\lambda_i-1)\int_0^{\theta_i^*q_c^*}F(x)\mathrm{d}x\Big]=\\&\frac{1}{1-\theta_i^*}\Big[q_c^*F(q_c^*)(\lambda_i-1)\theta_i^*q_c^*F(\theta_i^*q_c^*)-\\&\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x-(\lambda_i-1)\int_0^{\theta_i^*q_c^*}F(x)\mathrm{d}x\Big]=\\&\frac{1}{1-\theta_i^*}\{q_c^*[F(q_c^*)-F(\alpha q_c^*)]+(\lambda_i-\\&1)\theta_i^*q_c^*[F(\theta_i^*q_c^*)-F(\beta\theta_i^*q_c^*)]\}\geqslant 0.\end{aligned} \tag{21}$$

式 (21) 中第 2 个等式可以根据引理 2 得到 $(1-\theta_i^*)=F(q_c^*)+(\lambda_i-1)\theta_i^*F(\theta_i^*q_c^*)$; 第 3 个等式可以根据积分中值定理得到, 存在 $\alpha\in[0,1]$ 使得

$$\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x=q_c^*F(\alpha q_c^*),$$

存在 $\beta\in[0,1]$ 使得

$$\int_0^{\theta_i^*q_c^*}F(x)\mathrm{d}x=\theta_i^*q_c^*F(\beta q_c^*).$$

由式 (20) 对 $E(\overline{\pi}_0)$ 求 p_i 的一阶导数, 得到

$$\frac{\partial E(\overline{\pi}_0)}{\partial p_i}=\frac{-(1-\theta_i^*)q_c^*+\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x}{1-\theta_i^*},$$

由于 $\theta_i^*\leqslant C$, 有

$$\frac{\partial E(\overline{\pi}_0)}{\partial p_i}\leqslant\frac{-F(q_c^*)q_c^*+\int_0^{q_c^*}F(x)\mathrm{d}x}{1-\theta_i^*}\leqslant 0.\qquad\square$$

在实际情况中, 要使得契约 $\{[p_i,s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 能够得以实施, 需保证各节点企业的收益不会减小(使得 $E(U(\overline{\pi}_i))\geqslant E(U(\pi_i^*))$ 和 $E(\overline{\pi}_0)\geqslant E(\pi_0^*)$ 同时成立). 由结论 5 可知, 在契约 $\{[p_i,s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下, 各供应商的期望效用是各自零部件采购价格的增函数, 组装商的期望利润是各零部件采购价格的减函数. 又因为本文中组装商处于主导地位, 所以令 $E(U(\overline{\pi}_i))=E(U(\pi_i^*))$, 可求解得到契约 $\{[p_i,s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下零部件 i 的最优采购价格(对于组装商而言), 记为 $\overline{p}_i^*$. 再将 $\overline{p}_i^*$ 代入式 (20), 得到契约 $\{[p_i,s_i],1\leqslant i\leqslant n\}$ 下组装商的期望利润, 记为 $E(\overline{\pi}_0^*)$.

4 数值分析

在第 2 节和第 3 节中, 通过理论分析方法分别对拉式契约下各节点企业的决策问题和契约协调机制问题进行了研究. 本节将通过数值分析的方法进一步探讨决策变量和目标函数与相应参数之间的关系.

假设市场需求服从均匀分布 $U\in[0,1\,000]$. 零部件种类数 $n=2$, 零部件 1 和零部件 2 的生产成本分别为 $c_1=0.2$ 和 $c_2=0.3$, 供应商 1 的损失厌恶系数 λ_1 分别为 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 供应商 2 的损失厌恶系数 λ_2 分别为 1.2, 1.5, 2.0, 3.0. 因此, 集中化情形下各零部件的最优产量均为 $q_c^*=500$.

根据结论 2, 借助 Mathematica 数学软件得到拉式契约下各结点企业的最优策略, 见表 1 和表 2. 由表 1 可见, 当供应商 1 的损失厌恶系数一定时, 供应商 2 的损失厌恶系数越大, 零部件 1 的最优采购价格越低, 零部件 2 的最优采购价格越高; 当供应商 2 的损失厌恶系数一定时, 供应商 1 的损失厌恶系数越大, 零部件 1 的最优采购价格越越高, 零部件 2 的最优采购价格越低. 这表明: 在拉式契约下, 零部件的最优采购价格与该零部件供应商的损失厌恶系数正相关, 与其他零部件供应商的损失厌恶系数负相关. 由表 2 可见, 当供应商 1 的损失厌系数一定时, 供应商 2 的损失厌恶系数越大, 各零部件的最优产量越低; 当供应商 2 的损失厌系数一定时, 供应商 1 的损失厌恶系数越大, 各零部件的最优产量也越低. 这表明: 在拉式契约下, 各零部件的最优产量与各供应商的损失厌恶系数均负相关.

由式 (10) 可以得到拉式契约下, 组装商的期望利润见表 3. 当供应商 1 的损失厌恶系数一定时, 供应商 2 的损失厌恶系数越大, 组装商的期望利润越低; 当供应商 2 的损失厌恶系数一定时, 供应商 1 的损失厌恶系数越大, 组装商的期望利润也越低. 这表明: 在拉式契约下, 组装商的期望利润与各供应商的损失厌恶系数均负相关.

令 $E(U(\overline{\pi_i}))=E(U(\pi_i^*))$, 可求解得到契约 $\{[p_i,s_i(p_i)],1\leqslant i\leqslant 2\}$ 下各零部件的最优采购价格与对应的价格补贴, 见表 4 和表 5. 由表 4 和表 5 可见: 当供应商 1 的损失厌恶系数一定时, 供应商 2 的损失厌恶系数越大, 零部件 1 的最优采购价格越低, 零部件 2 的最优采购价格越高, 两种零部件的价格补贴都越高; 当供应商 2 的损失厌恶系数一定时, 供应商 1 的损失厌恶系数越大, 零部件 2 的最优采购价格越低, 零部件 1 的最优采购价格越高, 两种零部件的价格补贴也都越高. 这表明: 在契约 $\{[p_i,s_i(p_i)],1\leqslant i\leqslant 2\}$ 下, 零部件的最优采购价格与该零部件供应商的损失厌恶系数正相关, 与其他零部件供应商的损失厌恶系数负

表 1 零部件 1 与零部件 2 最优采购价格组 $\{p_1^*,p_2^*\}$

λ_2	λ_1			
	1.5	2.0	3.0	5.0
1.2	$\{0.288\,9,0.413\,5\}$	$\{0.302\,4,0.406\,2\}$	$\{0.323\,3,0.395\,2\}$	$\{0.351\,7,0.380\,4\}$
1.5	$\{0.283\,3,0.425\,0\}$	$\{0.296\,4,0.417\,4\}$	$\{0.316\,6,0.405\,9\}$	$\{0.344\,5,0.390\,3\}$
2.0	$\{0.275\,9,0.440\,3\}$	$\{0.288\,3,0.432\,4\}$	$\{0.307\,7,0.420\,3\}$	$\{0.334\,7,0.403\,8\}$
3.0	$\{0.265\,1,0.462\,8\}$	$\{0.276\,5,0.454\,5\}$	$\{0.294\,6,0.441\,9\}$	$\{0.320\,1,0.424\,3\}$

表 2 各零部件最优产量 q^{**}

λ_2	λ_1			
	1.5	2.0	3.0	5.0
1.2	248	236	216	188
1.5	235	223	205	179
2.0	218	207	190	166
3.0	191	181	167	147

表 3 组装商的期望利润 $E(\pi_0^*)$

λ_2	λ_1			
	1.5	2.0	3.0	5.0
1.2	64.719	60.578	54.241	45.637
1.5	60.590	56.820	51.029	43.139
2.0	55.059	51.771	46.696	39.738
3.0	47.040	44.425	40.350	34.699

表 4　零部件 1 的最优采购价格与对应的价格补贴 $[\overline{p}_1^*, s_1(\overline{p}_1^*)]$

λ_2	λ_1			
	1.5	2.0	3.0	5.0
1.2	[0.244 1, 0.164 0]	[0.248 3, 0.165 9]	[0.253 2, 0.169 3]	[0.257 1, 0.174 5]
1.5	[0.239 2, 0.168 0]	[0.243 1, 0.169 6]	[0.247 8, 0.172 0]	[0.251 6, 0.176 9]
2.0	[0.233 0, 0.173 0]	[0.236 5, 0.174 2]	[0.240 8, 0.176 4]	[0.244 6, 0.180 0]
3.0	[0.224 9, 0.179 7]	[0.227 8, 0.180 3]	[0.231 6, 0.181 8]	[0.235 2, 0.184 3]

表 5　零部件 2 的最优采购价格与对应的价格补贴 $[\overline{p}_2^*, s_2(\overline{p}_2^*)]$

λ_2	λ_1			
	1.5	2.0	3.0	5.0
1.2	[0.356 3, 0.248 6]	[0.350 0, 0.254 3]	[0.341 1, 0.262 5]	[0.330 3, 0.272 4]
1.5	[0.358 8, 0.252 0]	[0.352 4, 0.257 2]	[0.343 3, 0.264 6]	[0.332 2, 0.273 7]
2.0	[0.361 1, 0.256 8]	[0.354 7, 0.261 3]	[0.345 6, 0.267 7]	[0.334 4, 0.275 7]
3.0	[0.362 2, 0.264 1]	[0.356 2, 0.267 6]	[0.347 4, 0.272 6]	[0.336 4, 0.279 0]

相关(两种契约下, 零部件的采购价格与各供应商的损失厌恶系数之间的函数关系是一致的); 零部件的价格补贴与各供应商的损失厌恶系数均正相关.

将 p_1^* 与 p_2^* 代入式 (20), 得到契约 $\{[p_i, s_i(p_i)], 1 \leqslant i \leqslant 2\}$ 下组装商的期望利润, 见表 6. 通过对比表 6 和表 3 可以发现, 组装商在拉式契约下的期望利润总是小于契约 $\{[p_i, s_i(p_i)], 1 \leqslant i \leqslant 2\}$ 下的期望利润, 即组装商通过引入价格补贴策略可以在不降低各供应商期望效用的前提下提高自身期望利润.

表 6　组装商的期望利润 $E(\overline{\pi_0^*})$

λ_2	λ_1			
	1.5	2.0	3.0	5.0
1.2	98.254	98.108	98.154	98.900
1.5	98.253	98.354	98.710	99.738
2.0	98.481	98.857	99.559	100.90
3.0	99.359	100.02	101.08	102.73

5　结　论

本文基于拉式契约将供应商的损失厌恶偏好纳入组装供应链中进行了研究. 得到的结论是: 在拉式契约下, 各零部件的最优产量都偏离了集中化情形下的最优产量, 组装商通过引入价格补贴策略可使各供应商作出使整个组装供应链最优的产量决策, 从而实现组装供应链协调. 最后通过数值分析对价格补贴策略在协调组装供应链中的有效性进行了验证. 本文研究可为有损失厌恶偏好供应商参与的组装供应链决策者提供决策参考.

下一步研究的方向有: 推式契约下, 有风险偏好决策者参与的组装供应链契约协调机制的设计; 推式与拉式契约并存情形下(一部分零部件通过推式契约采购, 另一部分零部件通过拉式契约采购), 有风险偏好决策者参与的组装供应链契约协调机制的设计.

参考文献(References)

[1] Schweitzer M E, Cachon G P. Decision bias in the newsvendor problem with a known demand distribution: Experimental evidence[J]. Management Science, 2000, 46(3): 404-420.

[2] Agrawal V, Seshadri S. Impact of uncertainty and risk aversion on price and order quantity in the newsvendor problem[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2000, 2(4): 410-423.

[3] Xiao T J, Choi T M. Purchasing choices and channel structure strategies for a two-echelon system with risk-averse players[J]. Int J of Production Economics, 2009, 120(1): 54-65.

[4] 索寒生, 储洪胜, 金以慧. 带有风险规避型销售商的供需链协调[J]. 控制与决策, 2004, 19(9): 1042-1044.
(Suo H S, Chu H S, Jin Y H. Supply chain coordination with risk aversion retailers[J]. Control and Decision, 2004, 19(9): 1042-1044.)

[5] Wang C X, Webster S. Channel coordination for a supply chain with a risk-neutral manufacturer and a loss-averse retailer[J]. Decision Sciences, 2007, 38(3): 361-389.

[6] 刘珩, 潘景铭, 唐小我. 基于损失厌恶型零售商的易逝品供应链价格补贴契约研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1149-1154.
(Liu H, Pan J M, Tang X W. Research on perishable product supply chain markdown money contract with a loss-averse retailer[J]. Control and Decision, 2010, 25(8): 1149-1154.)

[7] Gan X H, Sethi S P, Yan H M. Channel coordination with a risk-neutral supplier and a downside-risk-averse retailer[J]. Production and Operations Management, 2005, 14(1): 80-89.

[8] Agrawal V, Seshadri S. Risk intermediation in supply chains[J]. IIE Trans, 2000, 32(9): 819-831.

[9] 庞庆华. 供应商具有损失厌恶的收益共享契约模型研究[J]. 统计与决策, 2009, 299(23): 44-46.
(Pang Q H. Research on revenue-sharing contract with a loss-averse supplier[J]. Statistics and Decision, 2009, 299(23): 44-46.)
[10] 孙多青, 张欢, 马晓英, 等. 基于LA型供应商的易逝品供应链价格补贴契约[J]. 控制工程, 2012, 19(2): 360-364.
(Sun D Q, Zhang H, Ma X Y, et al. Perishable product supply chain markdown money contract with a loss-averse supplier[J]. Control Engineering of China, 2012, 19(2): 360-364.)
[11] 刘珩, 潘景铭, 唐小我. 基于损失厌恶型参与者的易逝品供应链价格补贴契约研究[J]. 管理工程学报, 2011, 25(3): 24-30.
(Liu H, Pan J M, Tang X W. Perishable supply chain markdown money contract with a loss-averse retailer and a loss-averse supplier[J]. J of Industrial Engineering/Engineering Management, 2011, 25(3): 24-30.)
[12] Choi T M, Li D, Yan H M. Mean-variance analysis of a single supplier and retailer supply chain under a returns policy[J]. European J of Operational Research, 2008, 184(1): 356-376.
[13] 周永务, 王圣东. 随机需求下单制造商两零售商合作广告协调模型[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 203-210.
(Zhou Y W, Wang S D. Coordination models of cooperative advertising under stochastic demand in a one-manufacturer two-retailer supply chain system[J]. J of Systems Engineering, 2011, 26(2): 203-210.)
[14] 卢锋. 产品内分工[J]. 经济学季刊, 2004, 4(1): 55-82.
(Lu F. Intra-product specialization[J]. China Economic Quarterly, 2004, 4(1): 55-82.)
[15] Wang Y, Gerchak Y. Capacity games in assembly systems under uncertain demand[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2003, 5(3): 252-267.
[16] Wang Y Z. Joint pricing-production decisions in supply chains of complementary products with uncertain demand[J]. Operations Research, 2006, 54(6): 1110-1127.
[17] Jiang L, Wang Y Z. Supplier competition in decentralized assembly systems with price-sensitive and uncertain demand[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2010, 12(1): 93-101.
[18] 罗定提, 仲伟俊, 梁美华. 合作定价对装配式供应链运作效益影响的研究[J]. 系统工程学报, 2002, 17(4): 374-378.
(Luo D T, Zhong W J, Liang M H. Research on operation results effect of assemble-type supply chain through cooperative pricing[J]. J of Systems Engineering, 2002, 17(4): 374-378.)
[19] Gurnani H, Gerchak Y. Coordination in decentralized assembly systems with uncertain component yields[J]. European J of Operational Research, 2007, 176(3): 1559-1576.
[20] Granot D, Yin S Y. Competition and cooperation in decentralized push and pull assembly systems[J]. Management Science, 2008, 54(4): 733-747.
[21] Yin S Y. Alliance formation among perfectly complementary suppliers in a price-sensitive assembly system[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2010, 12(3): 527-544.
[22] Sošić G. Impact of demand uncertainty on stability of supplier alliances in assembly models[J]. Production and Operations Management, 2011, 20(6): 905-920.
[23] Cachon G P. The allocation of inventory risk in a supply chain: Push, pull and advance-purchase discount contracts[J]. Management Science, 2004, 50(2): 222-238.

(上接第1464页)

[20] Pao H T, Fu H C, Tseng C L. Forecasting of CO2 emissions, energy consumption and economic growth in China using an improved grey model[J]. Energy, 2012, 40(1): 400-409.
[21] 王正新, 党耀国, 练郑伟. 无偏GM(1,1)幂模型及其应用[J]. 中国管理科学, 2011, 19(4): 144-151.
(Wang Z X, Dang Y G, Lian Z W. Unbiased GM(1,1) model and its application[J]. Chinese J of Management Science, 2011, 19(4): 144-151.)
[22] 王正新, 党耀国, 裴玲玲. 基于GM(1,1)幂模型的振荡序列建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(11): 2440-2444.
(Wang Z X, Dang Y G, Pei L L. Modeling approach for oscillatory sequences based on GM(1,1) power model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(11): 2440-2444.)
[23] Xu X Y, Qi Y Q, Hua Z S. Forecasting demand of commodities after natural disasters[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37: 4313-4317.