

考虑成本信息不对称的闭环供应链网络均衡

赵京彪, 曲朋朋, 周岩*

(青岛大学商学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 为定性和定量分析成本信息不对称对闭环供应链网络均衡决策及利润的影响, 利用非合作博弈理论建立了闭环供应链网络均衡模型, 其中制造商隐瞒再制造成本信息且零售商隐瞒处理成本信息. 结果表明, 制造商或零售商低报其成本信息, 在增加利润的同时会损害不隐瞒成本信息决策者的利润; 反之, 高报时结果相反. 相比于制造商(零售商)单边成本信息不对称结果, 制造商和零售商的双边成本信息不对称对隐瞒成本信息的决策者自身以及供应链整体更有利. 选择合适的信息不对称策略对闭环供应链中各决策者及供应链整体都是有利的.

关键词: 闭环供应链; 再制造成本; 处理成本; 信息不对称

中图分类号: F274 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2022)06-0749-17

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2022.06.003

Equilibrium of a closed-loop supply chain network considering cost information asymmetry

Zhao Jingbiao, Qu Pengpeng, Zhou Yan*

(School of Business, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: An equilibrium model of a closed-loop supply chain network was established according to the non-cooperative game theory to qualitatively and quantitatively analyze the impact of asymmetric cost information on the equilibrium decisions and profits of the network, in which manufacturers conceal their remanufacturing cost information and retailers conceal their processing cost information. The results show that when manufacturers or retailers report lower than actual cost information, their profits increase at the expense of parties who do not hide cost information; otherwise, the results are the opposite in the over-reporting situation. Compared with the results of unilateral asymmetry cost information of either the manufacturer or the retailer, bilateral cost information asymmetry of both manufacturer and retailer is more beneficial to the decision maker who conceals the cost information and the whole supply chain. It is beneficial for decision makers and the whole supply chain to choose the right information asymmetry strategy.

Key words: closed-loop supply chain; remanufacture cost; handing cost; information asymmetry

1 引言

随着可持续发展理念的普及, 废旧产品中可利用资源的浪费以及对环境的污染引起了各国重视, 回收再利用废旧产品成为解决此问题的一个有效途径. 很多企业的回收再制造已比较成熟, 例如柯达公司生产再生循环相机, 惠普的可重复填充利用的打印机墨粉盒, IBM 和大众对产品零件的回收利用等^[1]. 这些企业产

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71901129; 71771129).

*通信作者

品回收再制造举措, 不仅能提高企业的经济效益, 降低生产成本, 也提升了企业的竞争能力, 对于合理利用资源和环境保护有重要意义. 因此, 研究闭环供应链的最优决策具有重要意义.

闭环供应链网络研究中 Hammond 等^[2]最早提出了立法下的均衡决策, 文献[3-5]进一步考虑了原材料商、不确定需求及时变需求对均衡决策的影响. 国内, 周岩等^[6]探究了政府宏观调控对均衡决策的影响, 文献[7, 8]分析了再制造水平、零售商后悔规避行为对均衡决策的影响, 文献[9-11]进一步分析了回收竞争、回收商公平关切以及碳减排对均衡决策的影响. 以上研究结论都是基于信息对称假设, 然而, 供应链成员为了谋取更多自身利益常常隐瞒其信息, 形成供应链成员信息不对称. 已有研究结果分析了制造成本^[12,13]、库存成本^[14]、生产成本^[15,16]信息不对称对供应链最优决策的影响, 文献[17-23]分析了信息不对称对最优契约设计、服务外包、制造商直销渠道及返利策略的影响. 以上分析看出信息不对称有利于企业更好地掌控竞争环境、降低生产成本. 然而, 这些文献主要分析信息不对称对正向供应链决策的影响. 在闭环和逆向供应链中, 由于行业垄断、贸易壁垒或利益冲突等因素, 各成员间信息不对称同样普遍存在, 例如开展回收制造业务的美的、海尔等企业, 回收成本信息不对称问题尤为突出. 吴忠和等^[24]探究了闭环供应链中回收成本信息不对称, 文献[25-29]进一步分析闭环供应链中销售成本、价格信息、回收努力水平和回收成本信息不对称问题, 研究发现闭环和逆向供应链中信息不对称不仅会影响供应链成员最优订购、定价决策, 阻碍供应链整体运转, 还会导致其效率及利润的减少. 从已有研究看出, 信息不对称因素对供应链最优决策的影响分析结果较多^[12-29], 但研究局限在供应链模式, 信息不对称因素对闭环供应链网络均衡决策的影响研究较少. 由多个制造商、多个零售商和多个需求市场构成的多层次网状结构更符合实际企业竞争合作环境, 制定网络均衡决策更能指导企业实际生产运营^[2-11].

本文研究由制造商负责生产新产品且回收废旧产品再制造的闭环供应链网络. 王文宾等^[30]研究表明双边成本信息不对称在闭环供应链是普遍现象. 制造商利润会受到多种成本的影响, 其中再制造成本对企业的利润影响较大. 同时, 零售商在销售产品过程中其处理成本对利润的影响也较大. 因此, 制造商和零售商为了自身利益, 会对其再制造成本和处理成本进行隐瞒, 形成双边成本信息不对称, 而在闭环供应链网络中双边信息不对称更具复杂性和现实性.

鉴于此, 本文考虑制造商隐瞒再制造成本和零售商隐瞒处理成本, 建立双边成本信息不对称闭环供应链网络均衡模型, 定性定量地分析双边成本信息不对称对供应链各成员均衡决策和利润的影响, 进一步对比分析制造商和零售商单边信息不对称和双边信息不对称对均衡决策和利润的影响. 所做研究可为多层次网状结构下负责产品回收再制造的企业有效利用双边成本信息提高竞争力以及废旧资源的循环再利用提供理论依据, 有助于各成员企业全面合理的制定最优决策.

2 双边信息不对称的闭环供应链网络均衡

2.1 模型描述及符号变量

本文研究的闭环供应链网络如图 1 所示, 上层为 N 个相互竞争的制造商, 中间为 J 个零售商, 下层为 M 个需求市场. 制造商 $i, i = 1, 2, \dots, N$, 通过加工原材料和再制造废旧产品来获得新产品, 批发给零售商 $j, j = 1, 2, \dots, J$, 获取利润, 且负责回收废旧产品. 零售商从制造商批发产品销售给需求市场 $k, k = 1, 2, \dots, M$, 顾客获取利润.

在生产的过程中, 与制造商相关的成本有加工原材料的生产、交易、回收、废旧产品再制造和丢弃废弃物成本. 在与制造商和需求市场交易中, 零售商相关的成本有交易和处理成本. 制造商和零售商为了在同层竞争者中获取更高的市场占有率, 提高产品竞争力, 增加与产品链合作者的谈判优势以谋取更多的利润, 会对其私有的成本信息进行隐瞒, 有可能高报或低报其成本信息. 在产品回收再制造过程, 制造商控制再制造成本会提高产品回收效率, 增加企业资源利用率; 零售商降低处理成本能缓解资金压力, 提高企业员工效率. 因此选择隐瞒再制造和处理成本信息会影响制造商和零售商的产品决策和企业战略. 本文建立考虑再

制造成本信息和处理成本信息不对称的闭环供应链网络均衡决策模型, 研究问题的结构图如图 2, 分析双边成本信息不对称对均衡决策和利润的影响, 并提出管理学建议. 需要的决策变量、参数和费用函数分别如表 1、表 2 和表 3 所示. 需要的假设如下:

- 1) 假设制造商需回购废旧产品再制造, 且再制造过程 β 比率回收的废旧产品可以转化为新产品, $(1 - \beta)$ 比率回收的废旧产品不能再制造形成废弃物, 制造商负责将这些废弃物运送到填埋场, 其单位成本为 $\bar{\rho}$;
- 2) 假设制造商由原材料获得的产品和加工废旧产品再制造生产的产品没有差别, 且顾客对新产品和再制品的购买意愿是相同的;
- 3) 假设所有的成本函数都为二次连续可微凸函数;
- 4) 假设生产周期为单周期.

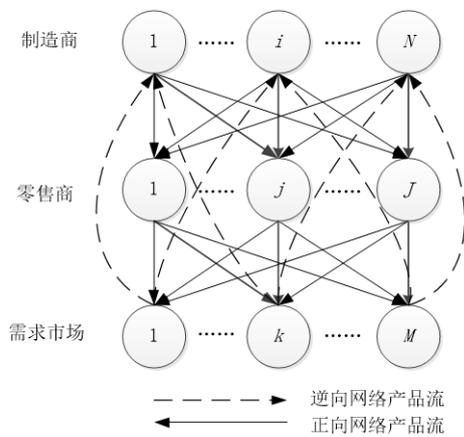


图 1 闭环供应链网络图

Fig. 1 Closed-loop supply chain network

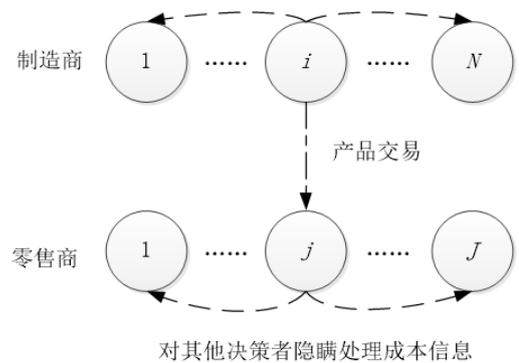


图 2 结构示意图

Fig. 2 The structure diagram

表 1 决策变量
Table 1 Decisions variables

变量	意义
q_i^v	制造商 i 由原材料获得产品的非负生产量
$q^v \in R_+^N$	N 个制造商的生产量构成列向量
q_{ij}^f	制造商 i 与零售商 j 产品的非负交易量
$Q^f \in R_+^{NJ}$	N 个制造商与 J 个零售商的交易量构成列向量
q_{jk}^s	零售商 j 与需求市场 k 产品的非负交易量
$Q^s \in R_+^{JM}$	J 个零售商与 M 个需求市场的交易量构成列向量
q_{ik}^r	制造商 i 从需求市场 k 废旧产品的非负回收量
$Q^r \in R_+^{NM}$	N 个制造商与 M 个需求市场的回收量构成列向量
ρ_k	需求市场 k 中顾客支付单位产品的非负价格
$\rho \in R_+^M$	M 个市场的价格构成列向量

2.2 制造商均衡

N 个制造商为了获取各自最大利润相互竞争, 其中制造商 i 决定其生产量 q_i^v , 与零售商 j 的交易量 q_{ij}^f 及从需求市场 k 废旧产品的回收量 q_{ik}^r ; 同时, 制造商也要决定其内生价格, 包括产品的批发价格 ρ_{ij} 和支付给需求市场 k 的废旧产品回收价格 ρ_{ik}^r . 在生产的过程中, 制造商 i 负责的成本有加工原材料生产、交易、回收、再制造和丢弃废弃物成本, 其中再制造成本对于制造商产品回收至关重要, 影响再制造成本的因素有很多, 如再制造技术水平以及企业的规模. 再制造成本信息是制造商的私人信息, 制造商可能对同层其他制造商隐瞒其再制造成本信息, 提高企业竞争力, 也可向下层零售商隐瞒来获取合作优势, 从而谋取更多的利润. 参数 θ_i 表示制造商 i 是否对其再制造成本信息进行隐瞒, $\theta_i = 1$ 表示其不隐瞒再制造成本信息, 即信

息对称情形, $\theta_i \neq 1$ 表示其对此信息进行隐瞒, 即信息不对称情形^[14]. 制造商隐瞒再制造成本信息分为两种, 一种是高报成本信息($\theta_i > 1$), 即报出的费用高于正常费用, 制造商夸大其成本; 另一种是低报成本信息($0 < \theta_i < 1$), 即报出的费用低于正常费用, 制造商压缩其成本. 基于以上分析, 再制造成本信息不对称的制造商 i 利润最大化模型为

表2 参数
Table 2 Parameters

参数	意义
β	制造商回收的废旧产品能够再制造转化为新产品的比率, 且 $0 < \beta < 1$
$\bar{\rho}$	单位废弃物的填埋成本, $\bar{\rho} \geq 0$
r_k	需求市场 k 中废旧产品可回收再利用的比率, 且 $0 < r_k < 1$
θ_i	制造商 i 的谎报因子
$\theta_i = 1$	制造商 i 不隐瞒其再制造成本信息, 即信息对称情形
$\theta_i \neq 1$	制造商 i 对其再制造成本信息进行隐瞒, 即信息不对称情形
η_j	零售商 j 的谎报因子
$\eta_j = 1$	零售商 j 不隐瞒其处理成本信息, 即信息对称情形
$\eta_j \neq 1$	零售商 j 对其处理成本信息进行隐瞒, 即信息不对称情形

表3 成本函数
Table 3 Cost functions

函数	意义
$f_i(q^v)$	制造商 i 加工原材料获得产品的生产成本
$f_i^r(\beta, Q^r)$	制造商 i 加工废旧产品获得产品的再制造成本
$c_{ij}^1(q_{ij}^f)$	制造商 i 与零售商 j 交易产品的交易成本
$c_{ik}^r(q_{ik}^r)$	制造商 i 与需求市场 k 交易产品的交易成本
$c_j^2(Q^f)$	零售商 j 产生的产品处理成本
$c_{ij}^3(q_{ij}^f)$	零售商 j 与制造商 i 交易产品的交易成本
$c_{jk}^4(q_{jk}^s)$	零售商 j 与需求市场 k 交易产品的交易成本
$c_{jk}^5(q_{jk}^s)$	需求市场 k 与零售商 j 交易产品的交易成本

$$\text{Max } \Pi_i = \rho_{ij}^* \sum_{j=1}^J q_{ij}^f - f_i(q^v) - \sum_{k=1}^M \rho_{ik}^{r*} q_{ik}^r - \sum_{k=1}^M c_{ik}^r(q_{ik}^r) - \sum_{j=1}^J c_{ij}^1(q_{ij}^f) - \theta_i f_i^r(\beta, Q^r) - \bar{\rho}(1 - \beta) \sum_{k=1}^M q_{ik}^r, \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^J q_{ij}^f \leq q_i^v + \beta \sum_{k=1}^M q_{ik}^r, \quad (2)$$

$$q_i^v \geq 0, \quad \forall i, \quad (3)$$

$$q_{ij}^f \geq 0, \quad \forall i, j, \quad (4)$$

$$q_{ik}^r \geq 0, \quad \forall i, k, \quad (5)$$

其中式(1)中制造商的利润等于销售收益减去生产、回收、交易、再制造以及处理废弃物的成本; 约束(2)表示制造商与所有零售商产品交易总量不能超过其生产量和从回收且可再制造产品数量的总和.

命题 1 制造商 i 利润是其决策变量 q_i^v , q_{ij}^f 和 q_{ik}^r 的凹函数. (证明见附录)

性质 1 制造商 i 的最优生产量, 最优交易量和最优回收量是谎报因子的减函数. (证明见附录)

性质 1 说明制造商 i 在产品回收再制造过程中如果低报其再制造成本信息, 同层其他制造商因其竞争力减弱而降低投入以节约相关成本, 势必会造成其产品质量下降, 使制造商 i 在实际生产中占据上风, 从而推动生产、交易和回收量的增大; 高报再制造成本信息时结果相反.

命题 2 所有制造商之间为 Nash 非合作竞争, 由成本函数的假设. 再制造成本信息不对称的所有制造商均衡策略 $(q^{V*}, Q^{f*}, Q^{s*}, \lambda^*) \in R_+^{N+NJ+NM+N}$ 满足下列变分不等式

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f_i(q^{V*})}{\partial q_i^V} - \lambda_i^* \right] [q_i^V - q_i^{V*}] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \left[-\rho_{ij}^* + \frac{\partial c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^f} + \lambda_i^* \right] [q_{ij}^f - q_{ij}^{f*}] + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \left[\frac{\theta_i \partial f_i^r(\beta, Q^{r*})}{\partial q_{ik}^r} + \frac{\partial c_{ik}^r(q_{ik}^{r*})}{\partial q_{ik}^r} + \rho_{ik}^{r*} + \bar{\rho}(1 - \beta) - \lambda_i^* \beta \right] [q_{ik}^r - q_{ik}^{r*}] + \\ & \sum_{i=1}^N \left[q_i^{V*} + \beta \sum_{k=1}^M q_{ik}^{r*} - \sum_{j=1}^J q_{ij}^{f*} \right] [\lambda_i - \lambda_i^*] \geq 0, \forall (q^V, Q^f, Q^s, \lambda) \in R_+^{N+NJ+NM+N}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中式(6)中 λ_i 是约束(2)的拉格朗日乘子变量. (证明见附录)

性质 2 均衡决策时, 如果 $q_{ij}^{f*} > 0$, 则内生价格变量 ρ_{ij}^* 满足 $\rho_{ij}^* = \frac{\partial c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^f} + \lambda_i^*$. (证明见附录)

2.3 零售商均衡

J 个零售商之间相互竞争, 零售商 j 为了获取最大利润决定与制造商 i 的交易量 q_{ij}^f , 销售给需求市场 k 顾客的交易量 q_{jk}^s ; 同时, 零售商也要决定其内生销售价格 ρ_{jk} . 在交易中, 零售商 j 负责的成本有与制造商的交易成本 c_{ij}^3 、与需求市场中顾客的交易成本 c_{jk}^4 , 这些成本取决于零售商与上下游决策者的交易量,

$$c_{ij}^3 = c_{ij}^3(q_{ij}^f), \quad \forall i, j, \quad (7)$$

$$c_{jk}^4 = c_{jk}^4(q_{jk}^s), \quad \forall j, k. \quad (8)$$

还有产品的处理成本, c_j^2 为零售商 j 的处理成本, 包括与产品相关的展示和存储费用, 由于竞争性, c_j^2 表示所有零售商产品交易量的函数^[2], 为

$$c_j^2 = c_j^2(Q^f), \quad \forall j, \quad (9)$$

其中处理成本对于零售商是很重要的, 影响处理成本的因素有很多, 如存储和展示产品费用的高低以及库存周转率的影响. 这些处理成本信息是零售商的私人信息, 零售商可能对同层竞争的其余零售商隐瞒其处理成本信息, 来谋取更多的利益. 参数 η_j 表示零售商 j 是否对其处理成本信息进行隐瞒, 其中 $\eta_j = 1$ 表示不隐瞒处理成本信息, 即信息对称情形, $\eta_j \neq 1$ 表示对成本信息进行隐瞒, 即信息不对称情形^[15]. 而零售商隐瞒处理成本信息分为两种, 一种是高报成本信息($\eta_j > 1$), 即报出的费用高于正常费用, 零售商夸大其成本; 另一种是低报成本信息 $0 < \eta_j < 1$, 即报出的费用低于正常费用, 零售商压缩其成本. 基于以上分析, 考虑处理成本信息不对称的零售商 j 利润最大化模型为

$$\text{Max } \Pi_j = \sum_{k=1}^M \rho_{jk}^* q_{jk}^s - \eta_j c_j^2(Q^f) - \sum_{i=1}^N c_{ij}^3(q_{ij}^f) - \sum_{k=1}^M c_{jk}^4(q_{jk}^s) - \sum_{i=1}^N \rho_{ij}^* q_{ij}^f, \quad (10)$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^M q_{jk}^s \leq \sum_{i=1}^N q_{ij}^f, \quad (11)$$

$$q_{jk}^s \geq 0, \quad \forall j, k, \quad (12)$$

$$q_{ij}^f \geq 0, \quad \forall i, j. \quad (13)$$

命题 3 零售商 j 利润函数是其决策变量 q_{ij}^f, q_{jk}^s 的凹函数.

性质 3 零售商 j 与制造商 i 的最优交易量和与需求市场 k 的最优交易量是谎报因子的减函数.

命题 3 和性质 3 的证明见附录.

性质 3 说明零售商 j 在产品交易过程中如果低报其处理成本, 同层其他零售商因其竞争力减弱也随之降低相关成本, 会影响产品的展示和存储进而影响产品交易, 使零售商 j 在实际生产中占据产品优势, 进而

促进交易量增加;高报处理成本信息时结果相反.

由命题 3 的证明得到零售商利润关于最优交易量和最优拉格朗日乘子的一阶最优性条件转化为式(14),即命题 4.

命题 4 由成本函数的假设,处理成本信息不对称的所有零售商均衡策略 $(Q^{f*}, Q^{s*}, \mu^*) \in R_+^{NJ+JM+J}$ 满足下列变分不等式

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \left[\rho_{ij}^* + \frac{\eta_j \partial c_j^2(Q^{f*})}{\partial q_{ij}^f} + \frac{\partial c_{ij}^3(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^f} - \mu_j^* \right] [q_{ij}^f - q_{ij}^{f*}] + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M \left[-\rho_{jk}^* + \frac{\partial c_{jk}^4(q_{jk}^{s*})}{\partial q_{jk}^s} + \mu_j^* \right] \times [q_{jk}^s - q_{jk}^{s*}] + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=1}^N q_{ij}^{f*} - \sum_{k=1}^M q_{jk}^{s*} \right] [\mu_j - \mu_j^*] \geq 0, \forall (Q^f, Q^s, \mu) \in R_+^{NJ+JM+J}. \quad (14)$$

性质 4 均衡决策时,如果 $q_{jk}^{s*} > 0$,则内生价格变量 ρ_{jk}^* 满足 $\rho_{jk}^* = \frac{\partial c_{jk}^4(q_{jk}^{s*})}{\partial q_{jk}^s} + \mu_j^*$. (证明见附录)

2.4 需求市场均衡

需求市场存在正向供应链(购买产品)和逆向供应链(回收废旧产品).每个需求市场必须决定顾客愿意支付购买产品的价格 ρ_k 以及与制造商 i 关于废旧产品的回收数量 q_{ik}^r .在正向供应链,需求市场 k 的顾客作为产品的购买者会产生一个愿意支付的价格 ρ_k ,与零售商 j 交易的过程还会产生交易成本 $c_{jk}^5(q_{jk}^s)$. $d_k(\rho)$ 为需求市场 k 产品的需求函数,不仅取决于需求市场 k 产品的价格,而且还受其他市场价格的影响,是价格向量 ρ 的单调减函数.正向供应链中需求市场 k 的均衡为

$$\begin{cases} \rho_{jk}^* + c_{jk}^5(q_{jk}^{s*}) = \rho_k^*, & \text{若 } q_{jk}^{s*} > 0 \\ \rho_{jk}^* + c_{jk}^5(q_{jk}^{s*}) \geq \rho_k^*, & \text{若 } q_{jk}^{s*} = 0, \end{cases} \quad (15)$$

且

$$\begin{cases} d_k(\rho^*) = \sum_{j=1}^J q_{jk}^{s*}, & \text{若 } \rho_k^* > 0 \\ d_k(\rho^*) \geq \sum_{j=1}^J q_{jk}^{s*}, & \text{若 } \rho_k^* = 0, \end{cases} \quad (16)$$

其中式(15)表示如果在需求市场 k 的顾客愿意从零售商 j 购买产品,则购买价格加上交易费用等于顾客在需求市场 k 愿意支付该产品的价格;式(16)表示如果顾客在需求市场 k 愿意支付购买产品的价格是正的,则购买产品的数量恰好等于产品需求.

在逆向供应链网络,需求市场 k 的废旧产品被制造商 i 回收. ρ_{ik}^{r*} 表示制造商从需求市场回收废旧产品的回收价格. $a_k(Q^r)$ 表示需求市场 k 的顾客把其废旧产品出售给制造商的意愿度,不仅取决于需求市场 k 废旧产品的数量,还取决于其他市场废旧产品的数量.逆向供应链中需求市场 k 的回收行为可以通过式(17)来描述,其约束条件为式(18),即

$$\begin{cases} a_k(Q^{r*}) = \rho_{ik}^{r*}, & \text{若 } q_{ik}^{r*} > 0 \\ a_k(Q^{r*}) \geq \rho_{ik}^{r*}, & \text{若 } q_{ik}^{r*} = 0, \end{cases} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{ik}^{r*} \leq r_k \sum_{j=1}^J q_{jk}^s, \quad (18)$$

其中式(17)表示如果顾客在需求市场 k 出售其废旧产品给制造商 i ,则出售废旧产品意愿度等于制造商 i 提供回收价格 ρ_{ik}^{r*} ;约束(18)表示需求市场 k 获得的废旧产品数量不超过可回收的正向产品数量.

由式(15)、式(16)、式(7)和变分不等式的等价性^[31]得到式(19), 即命题 5.

命题 5 所有需求市场的均衡策略 $(Q^{s*}, Q^{r*}, \rho^*, \gamma^*) \in R_+^{JM+NM+2M}$ 满足下列变分不等式

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M [\rho_{jk}^* + c_{jk}^5(q_{jk}^{s*}) - \rho_k^* - r_k \gamma_k^*] [q_{jk}^s - q_{jk}^{s*}] + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M (a_k(Q^{r*}) - \rho_{ik}^{r*} + \gamma_k^*) (q_{ik}^r - q_{ik}^{r*}) + \sum_{k=1}^M \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{s*} - d_k(\rho^*) \right) (\rho_k - \rho_k^*) + \\ & \sum_{k=1}^M \left(r_k \sum_{j=1}^J q_{jk}^{s*} - \sum_{i=1}^N q_{ik}^{r*} \right) (\gamma_k - \gamma_k^*) \geq 0, \quad \forall (Q^s, Q^r, \rho, \gamma) \in R_+^{JM+NM+2M}, \end{aligned} \tag{19}$$

其中式(19)中 γ_k 是约束(18)的拉格朗日乘子.

性质 5 均衡决策时, 如果 $q_{ik}^{r*} > 0$, 则内生回收价格变量 ρ_{ik}^{r*} 为 $\rho_{ik}^{r*} = a_k(Q^{r*}) + \gamma_k^*$.

证明 由式(19)的第二项可等价于互补条件^[31]: 如果 $q_{ik}^{r*} > 0$, 则 $a_k(Q^{r*}) - \rho_{ik}^{r*} + \gamma_k^* = 0$. 因此, 内生价格变量 ρ_{ik}^{r*} 可表示为 $\rho_{ik}^{r*} = a_k(Q^{r*}) + \gamma_k^*$.

2.5 闭环供应链整体均衡

命题 6 闭环供应链整体均衡策略 $(q^{v*}, Q^{f*}, Q^{s*}, Q^{r*}, \rho^*, \mu^*, \gamma^*) \in R_+^{N+NJ+JM+NM+N+J+2M}$ 满足下列变分不等式

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i(q^{v*})}{\partial q_i^v} - \lambda_i^* \right) (q_i^v - q_i^{v*}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \left(\frac{\partial c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^f} + \frac{\eta_j \partial c_j^2(Q^{f*})}{\partial q_{ij}^f} + \frac{\partial c_j^3(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^f} + \lambda_i^* - \mu_j^* \right) \times \\ & (q_{ij}^f - q_{ij}^{f*}) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M \left(\frac{\partial c_{jk}^4(q_{jk}^{s*})}{\partial q_{jk}^s} + \mu_j^* + c_{jk}^5(q_{jk}^{s*}) - \rho_k^* - r_k \gamma_k^* \right) (q_{jk}^s - q_{jk}^{s*}) + \\ & \sum_{k=1}^M \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{s*} - d_k(\rho^*) \right) (\rho_k - \rho_k^*) + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \left(\frac{\theta_i \partial f_i^r(\beta, Q^{r*})}{\partial q_{ik}^r} + \frac{\partial c_{ik}^r(q_{ik}^{r*})}{\partial q_{ik}^r} + \bar{\rho}(1 - \beta) - \lambda_i^* \beta + a_k(Q^{r*}) + \gamma_k^* \right) (q_{ik}^r - q_{ik}^{r*}) + \\ & \sum_{i=1}^N \left(q_i^{v*} + \beta \sum_{k=1}^M q_{ik}^{r*} - \sum_{j=1}^J q_{ij}^{f*} \right) (\lambda_i - \lambda_i^*) + \sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^N q_{ij}^{f*} - \sum_{k=1}^M q_{jk}^{s*} \right) (\mu_j - \mu_j^*) + \\ & \sum_{k=1}^M \left(r_k \sum_{j=1}^J q_{jk}^{s*} - \sum_{i=1}^N q_{ik}^{r*} \right) (\gamma_k - \gamma_k^*) \geq 0, \\ & \forall (q^v, Q^f, Q^s, Q^r, \rho, \mu, \gamma) \in R_+^{N+NJ+JM+NM+N+J+2M}. \end{aligned} \tag{20}$$

证明 闭环供应链整体均衡策略必须同时满足式(6)、式(14)和式(19), 将式(6)、式(14)和式(19)相加约去内生价格变量得到式(20).

3 算例分析

本节分析制造商和零售商隐瞒其成本信息导致的制造商再制造成本和零售商处理成本双边信息不对称对均衡决策及利润的影响. 主要分析如下:

1) 制造商单方隐瞒其再制造成本信息, 零售商不隐瞒其处理成本信息(即信息对称), 分析制造商单边再制造成本信息不对称对均衡决策及利润的影响。

2) 零售商单方隐瞒其处理成本信息, 制造商不隐瞒其再制造成本信息(即信息对称), 分析零售商单边处理成本信息不对称对均衡决策及利润的影响。

3) 制造商低报其再制造成本信息, 同时, 零售商低报其处理成本信息, 分析制造商和零售商双边成本信息不对称对决策变量以及利润的影响。

根据文献[2]中算例 1, 算例中网络由 2 个制造商、2 个零售商和 2 个需求市场组成(图3), 通过 MATLAB 编程, 利用修正投影法^[32]求解式(20)得到均衡决策、制造商及零售商的利润, 其中生产成本 $f_i(q_i^v) = 3(q_i^v)^2 + q_i^v + 5$, 再制造成本 $f_i(\beta, Q^r) = 1.5(\beta q_i^r)^2 + 2\beta q_i^r + 2$, 处理成本 $c_j^2(Q^f) = 0.5 \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 q_{ij}^f \right)^2 + 3$, 需求 $d_1(\rho) = -2\rho_1 - 1.5\rho_2 + 1\,000$, $d_2(\rho) = -2\rho_1 - 1.5\rho_2 + 1\,000$, 顾客意愿度 $a_k(Q^r) = 0.5 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M q_{ik}^r \right) + 5$, 废弃物填埋成本 $\bar{\rho} = 2$, 废旧产品转化为新产品比率 $\beta = 0.5$, 回收再利用率 $r_k = 0.5$, 其它费用都为 0。

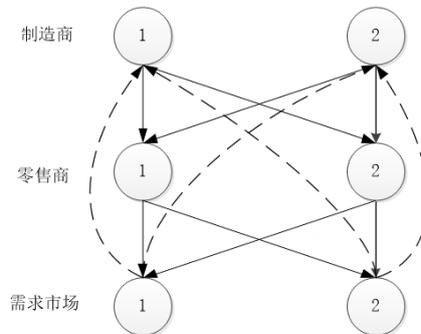


图 3 算例网络图

Fig. 3 The network in the example

算例 1 制造商单方隐瞒其再制造成本导致的成本信息不对称结果分析

算例 1 着重分析制造商单方隐瞒其再制造成本的结果, 因此假设 2 个零售商不隐瞒其处理成本信息, 即 $\eta_{1,2} = 1$. 假设制造商 1 隐瞒其再制造成本信息, 但是制造商 2 不隐瞒其再制造成本信息, 即 $\theta_2 = 1$, 分析由制造商 1 隐瞒其再制造成本导致的成本信息不对称对各决策者均衡决策及利润的影响。

设置制造商 1 低报时的谎报因子 θ_1 从 1 减小到 0.5, 高报时的谎报因子 θ_1 从 1 增大到 1.5, 通过 MATLAB 仿真求式(20), 得到制造商 1 低报时均衡决策如表 4, 制造商、零售商利润变化如图 4、图 5; 制造商 1 高报时结果在表 5、图 6 和图 7。

表 4 算例 1 低报成本信息时均衡决策

Table 4 Equilibrium decision of example 1 in low-reporting cost information situation

参数	$\eta_{1,2} = 1, \theta_2 = 1$					
	$\theta_1 = 1$	$\theta_1 = 0.9$	$\theta_1 = 0.8$	$\theta_1 = 0.7$	$\theta_1 = 0.6$	$\theta_1 = 0.5$
q_1^v	40.872 2	41.033 9	41.222 9	41.442 8	41.668 0	41.940 5
q_2^v	40.872 2	41.038 8	41.227 7	41.429 0	41.675 2	41.942 0
$q_{1j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	27.761 6	28.320 0	28.884 6	29.549 5	30.384 3
$q_{2j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	27.037 2	26.707 2	26.402 3	26.040 1	25.549 7
$q_{jk}^s, j, k = 1, 2$	27.307 7	27.412 2	27.522 6	27.649 6	27.799 4	27.967 9
$q_{1k}^r, k = 1, 2$	13.678 9	14.467 3	15.341 8	16.344 7	17.464 2	18.757 4
$q_{2k}^r, k = 1, 2$	13.678 9	12.990 3	12.213 2	12.213 2	10.346 4	9.218 1

表 5 算例 1 高报成本信息时均衡决策

Table 5 Equilibrium decision of example 1 in high-reporting cost information situation

参数	$\eta_{1,2} = 1, \theta_2 = 1$					
	$\theta_1 = 1$	$\theta_1 = 1.1$	$\theta_1 = 1.2$	$\theta_1 = 1.3$	$\theta_1 = 1.4$	$\theta_1 = 1.5$
q_1^v	40.872 2	40.732 5	40.604 1	40.486 3	40.388 0	40.294 2
q_2^v	40.872 2	40.726 5	40.604 0	40.495 9	40.382 8	40.287 1
$q_{1j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	26.863 6	26.450 8	26.135 1	25.820 5	25.472 8
$q_{2j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	27.527 0	27.757 5	27.906 9	28.074 6	28.284 3
$q_{jk}^s, j, k = 1, 2$	27.307 7	27.208 4	27.114 8	27.029 6	26.955 2	26.883 8
$q_{1k}^r, k = 1, 2$	13.678 9	12.965 1	12.313 1	11.717 2	11.187 4	10.698 3

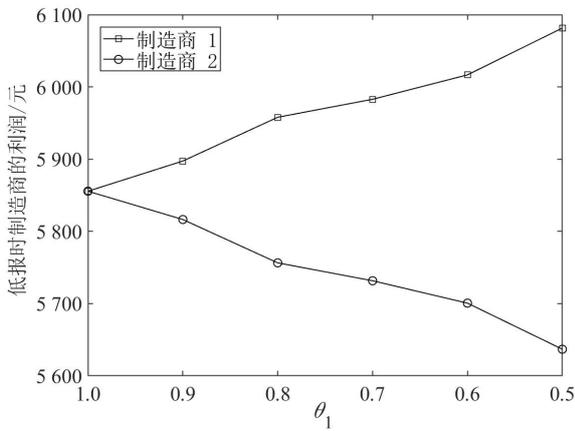


图 4 低报时制造商利润变化图

Fig. 4 Change of manufacturer's profit in low-reporting situation

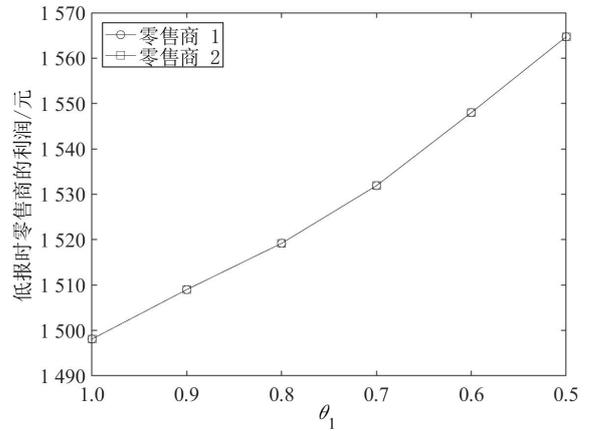


图 5 低报时零售商利润变化图

Fig. 5 Change of retailer's profit in low-reporting situation

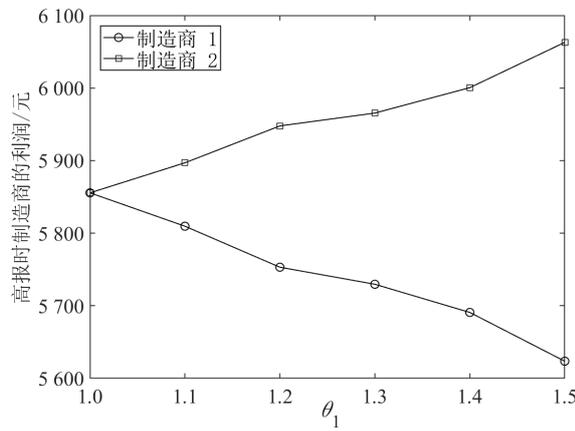


图 6 高报时制造商利润变化图

Fig. 6 Change of manufacturer's profit in high-reporting situation

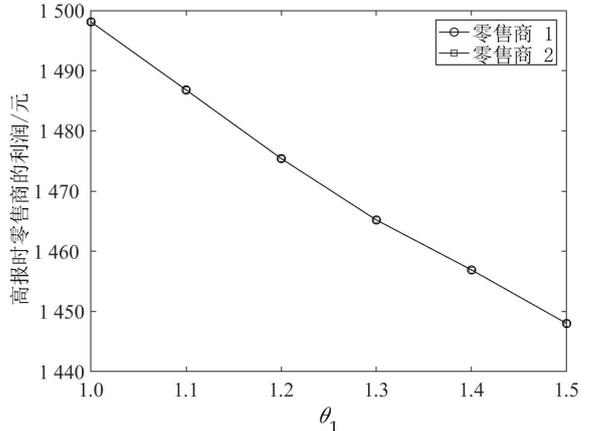


图 7 高报时零售商利润变化图

Fig. 7 Change of retailer's profit in high-reporting situation

与信息对称的结果进行比较, 即 $\theta_1 = 1$ 时, 制造商 1 低报其再制造成本信息时结果可从表 4、图 4 和图 5 看出:

1) 低报再制造成本信息的 制造商 1 的生产量、与零售商的交易量、回收量都高于信息对称的结果, 且随 制造商 1 谎报因子的减小而不断增大, 数值结果与性质 1 相同. 同层不隐瞒再制造成本信息 制造商 2 的生产量也高于信息对称的结果, 其与零售商的交易量和回收量低于信息对称的结果, 且随 制造商 1 谎报因子的减小, 生产量不断增大, 与零售商的交易量和回收量不断减小.

2) 低报再制造成本信息的 制造商 1 的利润高于信息对称结果, 且随其谎报因子的减小而不断增大, 是

因为其与零售商的交易量增大带来收益增加,但其成本费用增加不明显,造成其利润随之不断增加.同层不隐瞒再制造成本信息 制造商 2 的利润低于信息对称的结果,且随 制造商 1 谎报因子的减小而不断减少,是因为与零售商的交易量降低导致收益减小,成本费用变化较小,最终造成其利润不断降低.

3) 下游不隐瞒成本信息 零售商 1 和零售商 2,其与制造商和需求市场的总交易量都高于信息对称的结果,且随 制造商 1 谎报因子的减小而增大,其利润都高于信息对称结果,且随 制造商 1 谎报因子的减小而不断增加.主要是因为 制造商 1 低报成本信息,导致零售商与制造商交易量增加带来收益的增加超过了其成本费用增加造成的损失,因此 2 个零售商的利润都随 制造商 1 的谎报因子的减小而增大.

与信息对称的结果比较,制造商 1 高报其再制造成本信息时结果可从表 5、图 6 和图 7 看出;高报再制造成本信息时,制造商和零售商的所有决策变量与低报再制造成本信息时的结果变化趋势相反,数值结果与性质 1 相同;高报其再制造成本信息 制造商 1 的利润低于信息对称的结果,且随制造商 1 谎报因子的增大而不断减小,同层不隐瞒再制造成本信息的 制造商 2 的利润结果与之相反;下游不隐瞒成本信息的零售商 1 和零售商 2 的利润都低于信息对称的结果,且随 制造商 1 谎报因子的增大而不断减小.

算例 1 说明,当制造商单方隐瞒其成本信息时,为了谋取更高的利润,制造商会选择低报其再制造成本信息,来达到增加其利润的目的,利润会随谎报程度的增大而不断增加,但会损害其他不隐瞒再制造成本信息的制造商利润,下游所有零售商的利润会增加,即对下游零售商是有利的.

算例 2 零售商单方隐瞒其处理成本导致的成本信息不对称结果分析

算例 2 着重分析零售商单方隐瞒处理成本的结果,因此假设两个制造商不隐瞒其再制造成本,即 $\theta_{1,2} = 1$. 假设 零售商 1 隐瞒其处理成本信息,但是 零售商 2 不隐瞒其处理成本信息,即 $\eta_2 = 1$,分析 零售商 1 隐瞒其处理成本导致的成本信息不对称对均衡决策及利润的影响.

设置 零售商 1 低报时的谎报因子 η_1 从 1 减小到 0.75,高报时的谎报因子 η_1 从 1 增大到 1.5,通过 MATLAB 仿真求解式(20)得到 零售商 1 低报时均衡决策如表 6,制造商和零售商利润变化如图 8 和图 9;零售商 1 高报时结果如表 7、图 10 和图 11 所示.

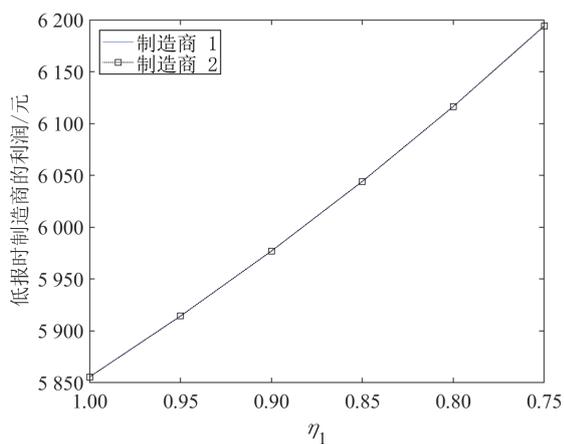


图 8 低报时制造商利润变化图

Fig. 8 Change of manufacturer's profit in low-reporting situation

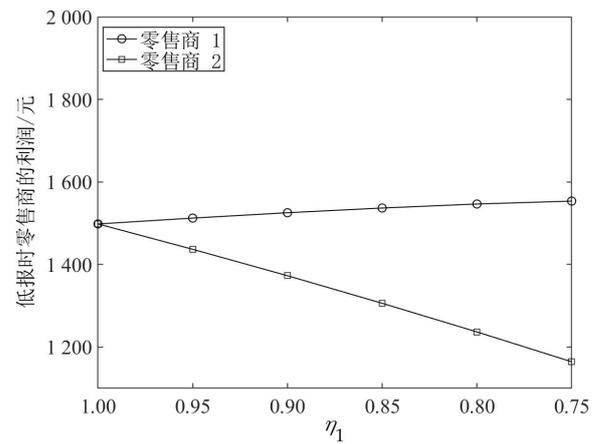


图 9 低报时零售商利润变化图

Fig. 9 Change of retailer's profit in low-reporting situation

与信息对称情形结果比较,即 $\eta_1 = 1$,零售商 1 低报其处理成本信息时结果可从表 6、图 8 和图 9 看出:

1) 低报其处理成本信息的 零售商 1 与制造商和需求市场的交易量都高于信息对称的结果,且随 零售商 1 谎报因子的减少而不断增大,数值结果与性质 3 相同,其利润高于信息对称的结果,且随其谎报因子的增大不断增大,是因为与需求市场的交易量增加,使其收益增加明显,超过了其成本费用的增大,导致利润不断增大.

2) 同层不隐瞒其处理成本信息的 零售商 2 的决策变量变化趋势与 零售商 1 相反,其利润低于信息对称

的结果, 且随零售商 1 谎报因子的增大不断减小, 主要是因为与需求市场的交易量减小, 造成收益损失明显, 导致的利润不断降低.

3) 上游不隐瞒成本信息的制造商 1 和制造商 2 的生产量、与零售商的交易量、回收量都高于信息对称的结果, 且随零售商 1 谎报因子的减少而不断增大. 制造商 1 和制造商 2 的利润都高于信息对称的结果, 且随谎报因子的减少呈相同趋势增大. 零售商低报其处理成本会使 2 个制造商的生产量、与零售商的交易量、回收量都增大, 交易量增大带来的销售收益的增加明显超过了其成本费用增加带来的损失, 造成制造商利润都会随谎报因子的减小而不断增大.

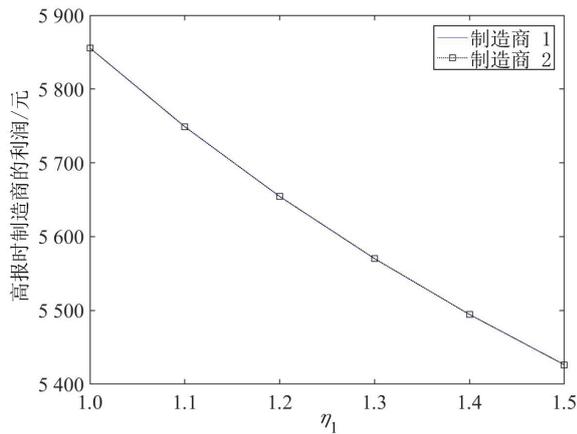


图 10 高报时制造商利润变化图

Fig. 10 Change of manufacturer's profit in high-reporting situation

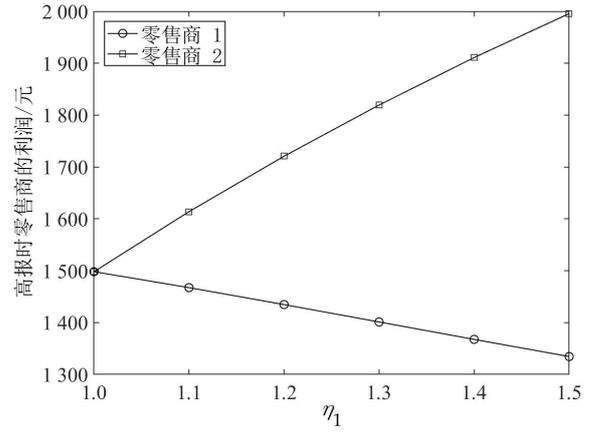


图 11 高报时零售商利润变化图

Fig. 11 Change of retailer's profit in high-reporting situation

表 6 算例 2 低报成本信息均衡决策

Table 6 Equilibrium decision of example 2 in low-reporting cost information situation

参数	$\theta_{1,2} = 1, \eta_2 = 1$					
	$\eta_1 = 1$	$\eta_1 = 0.95$	$\eta_1 = 0.9$	$\eta_1 = 0.85$	$\eta_1 = 0.8$	$\eta_1 = 0.75$
q_i^v	40.872 2	41.076 6	41.294 0	41.525 8	41.773 2	42.038 1
$q_{1j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	28.133 2	29.026 0	29.977 4	30.993 2	32.080 4
$q_{2j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	26.726 7	26.123 6	25.481 0	24.794 8	24.060 4
$q_{1k}^s, k = 1, 2$	27.307 7	28.147 7	29.041 0	29.992 8	31.009 3	32.096 9
$q_{2k}^s, k = 1, 2$	27.307 7	26.740 3	26.136 8	25.493 5	24.806 6	24.071 3
$q_{ik}^r, i, k = 1, 2$	13.678 9	13.747 1	13.819 6	13.896 8	13.979 2	14.067 4

与信息对称情形结果比较, 零售商 1 高报处理成本信息时结果可从表 7、图 10 和图 11 看出.

表 7 算例 2 高报成本信息均衡决策

Table 7 Equilibrium decision of example 2 in high-reporting cost information situation

参数	$\theta_{1,2} = 1, \eta_2 = 1$					
	$\eta_1 = 1$	$\eta_1 = 1.1$	$\eta_1 = 1.2$	$\eta_1 = 1.3$	$\eta_1 = 1.4$	$\eta_1 = 1.5$
q_i^v	40.872 2	40.497 7	40.163 3	39.862 9	39.591 3	39.344 8
$q_{1j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	25.756 5	24.383 3	23.148 9	22.033 5	21.020 5
$q_{2j}^f, j = 1, 2$	27.293 7	28.332 0	29.259 5	30.093 1	30.846 5	31.530 7
$q_{1k}^s, k = 1, 2$	27.307 7	25.770 0	24.396 5	23.162 3	22.047 5	21.035 4
$q_{2k}^s, k = 1, 2$	27.307 7	28.346 5	29.274 2	30.107 6	30.860 5	31.543 9
$q_{ik}^r, i, k = 1, 2$	13.678 9	13.554 2	13.442 7	13.342 3	13.251 8	13.169 4

高报处理成本信息时制造商和零售商的决策变量数值结果与低报处理成本信息时的结果变化趋势相反, 数值结果与性质 3 相同; 高报其处理成本信息零售商 1 的利润低于信息对称的结果, 且而不断减小, 同

层不隐瞒处理成本信息零售商 2 的利润结果与之相反;上游不隐瞒成本信息制造商 1 和制造商 2 的利润都低于信息对称的结果,且随零售商 1 谎报因子的增大而不断减小。

算例 2 说明,当零售商单方隐瞒其成本信息时,为了谋取更高的利润,零售商会选择低报其处理成本信息,来达到增加其利润的目的,利润会随谎报程度的增大而不断增加,但会损害其他不隐瞒成本信息的零售商利润,上游所有制造商的利润会增加,即对上游制造商是有利的。

算例 3 制造商和零售商双边成本信息不对称结果分析

算例 1 和算例 2 都是分析单方成员成本信息不对称的结果。然而现实生活中,常常会出现制造商和零售商双方都隐瞒其成本信息情形,形成双边成本信息不对称情形。由算例 1 和算例 2 分析发现,制造商和零售商选择低报其成本信息时才能获得更大的利益,因此算例 3 着重分析制造商和零售商同时低报成本信息导致的双边成本信息不对称对各决策者利润的影响。

假设制造商 2 和零售商 2 不隐瞒其成本信息,即 $\theta_2, \eta_2 = 1$ 。假设制造商 1 低报其再制造成本信息,同时零售商 1 低报其处理成本信息,分析制造商和零售商双边成本信息不对称对其均衡决策及利润的影响。因此设置制造商 1 的谎报因子 θ_1 取值从 1 减小到 0.6,且零售商 1 的谎报因子 η_1 取值也从 1 减小到 0.6,得到制造商和零售商的利润变化如图 12~图 15 所示。

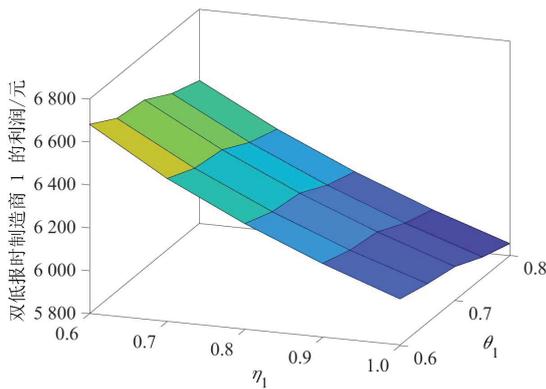


图 12 制造商 1 的利润变化图

Fig. 12 The change of manufacturer 1's profit

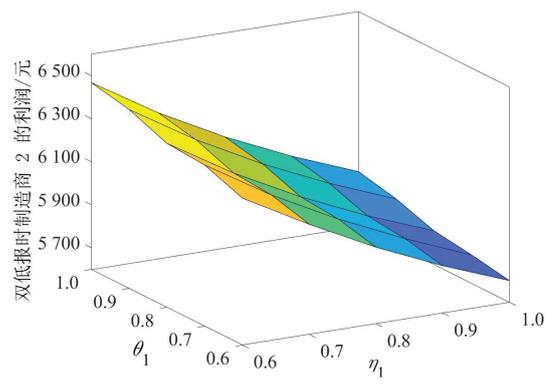


图 13 制造商 2 的利润变化图

Fig. 13 The change of manufacturer 2's profit

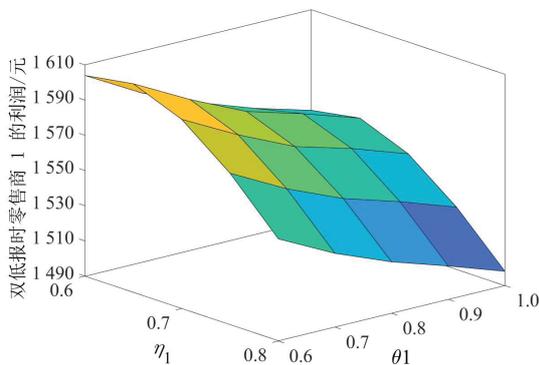


图 14 零售商 1 的利润变化图

Fig. 14 The change of retailer 1's profit

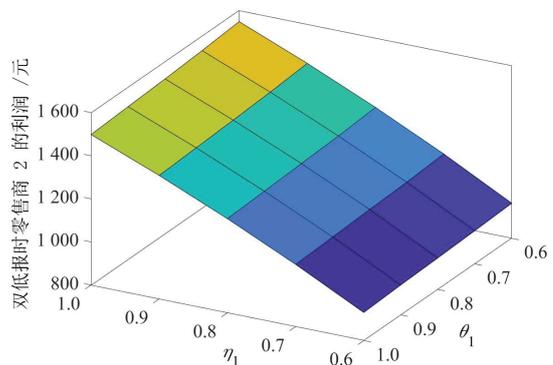


图 15 零售商 2 的利润变化图

Fig. 15 The change of retailer 2's profit

为了更好的探究制造商和零售商单边成本信息不对称与双边成本信息不对称对制造商和零售商以及供应链整体利润的影响程度,选取某一低报程度来比较决策者以及供应链整体的利润,比较结果见表 8。从图 12~图 15 看出:

- 1) 低报成本信息的 制造商 1 和 零售商 1 的利润整体都高于信息对称的结果(即图中 $\theta_1 = 1, \eta_1 = 1$ 的点), 且都随谎报因子的减小而不断增大, 与算例 1 和算例 2 低报时 零售商 1 和 制造商 1 的变化结果一致.
- 2) 不隐瞒再制造成本信息 制造商 2 的利润随 制造商 1 谎报因子的减小而不断降低, 但随 零售商 1 谎报因子的减小而不断增大, 与算例 1 和算例 2 低报时 制造商 2 的变化结果一致.
- 3) 不隐瞒处理成本信息 零售商 2 的利润随 制造商 1 谎报因子的减小而不断增大, 但随 零售商 1 谎报因子的减小而不断降低, 与算例 1 和算例 2 低报时 零售商 2 的变化结果一致.
- 4) 零售商 1 谎报因子相比于 制造商 1 谎报因子对制造商和零售商的利润影响更大.

表 8 单边低报与双边低报利润结果比较

参数	$\theta_2 = 1, \eta_2 = 1$		
	$\theta_1 = 0.8, \eta_1 = 1$	$\theta_1 = 1, \eta_1 = 0.8$	$\theta_1 = 0.8, \eta_1 = 0.8$
制造商 1 的利润	5 958.0	6 116.4	6 225.8
制造商 2 的利润	5 756.4	6 116.4	6 013.9
零售商 1 的利润	1 519.2	1 546.4	1 566.3
零售商 2 的利润	1 519.2	1 236.4	1 255.4
供应链利润	14 752.8	15 015.6	15 061.4

从表 8 看出, 与制造商(零售商)单方低报成本信息时的利润比较, 制造商和零售商双边低报成本信息可以使低报成本信息的制造商和零售商自身获得更高的利润, 且供应链的整体利润也更高.

算例 3 说明, 上下游制造商和零售商既低报再制造成本又低报其处理成本导致双边成本信息不对称, 对低报成本信息的制造商和零售商自身是有利的, 且相比于单边成本信息不对称, 双边成本信息不对称对低报成本信息的决策者自身以及闭环供应链整体更有利. 这种情况下, 制造商和零售商会选择继续低报其成本信息来谋取更高利益.

从本节分析可知, 制造商和零售商低报其成本信息时会增大其利润, 但会损害其他不隐瞒成本信息的决策者利润, 对低报成本信息的决策者自身是有利的, 但对同层不谎报其他成本信息的决策者是不利的; 制造商和零售商单方高报其成本信息时, 与低报成本信息时的结果相反. 与制造商(零售商)单方低报其成本信息时的利润比较, 制造商和零售商双方同时低报其成本信息可以使低报成本信息的决策者自身获得更高的利润, 且供应链整体利润更高.

4 结束语

本文研究了制造商再制造成本、零售商处理成本双边成本信息不对称的均衡决策, 分析双边成本信息不对称对均衡决策及利润的影响, 研究发现供应链各成员要选择合适的成本信息不对称策略, 不仅对自身有利, 而且对供应链整体利润也是有利的. 但是, 企业利润的影响因素并不只有成本信息, 未来可以考虑其他信息不对称情形, 如需求、价格以及质量等不对称因素对供应链决策的影响.

参考文献:

- [1] Harold H, Ieke L B, Steef V D V. Product modularity and the design of closed-loop supply chains. *California Management Review*, 2004, 46(2): 23-39.
- [2] Hammond D, Beullens P. Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(2): 895-908.
- [3] Yang G F, Wang Z P, Li X Q. The optimization of the closed-loop supply chain network. *Transportation Research, Part E*, 2009, 45(1): 16-28.

- [4] Qiang Q, Ke K, Anderson T, et al. The closed-loop supply chain with competition, distribution channel investment, and uncertainties. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2013, 41(2): 186–194.
- [5] Chan C K, Zhou Y, Wong K H. A dynamic equilibrium model of the oligopolistic closed-loop supply chain network under uncertain and time-dependent demands. *Transportation Research, Part E*, 2018, 118: 325–354.
- [6] 周岩, 蒋京龙, 孙浩, 等. 面向能源和低碳发展的多准则供应链网络均衡. *系统工程学报*, 2014, 29(5): 652–661.
Zhou Y, Jiang J L, Sun H, et al. Multi criteria supply chain network equilibrium with energy and low carbon development. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(5): 652–661. (in Chinese)
- [7] 张桂涛, 曲箫宇, 戴更新, 等. 考虑再制造设计水平的多期闭环供应链网络均衡. *中国管理科学*, 2018, 26(8): 54–66.
Zhang G T, Qu X Y, Dai G X, et al. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with design level for remanufacture ability. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(8): 54–66. (in Chinese)
- [8] 徐明娇, 周岩. 考虑后悔规避零售商的闭环供应链网络均衡研究. *软科学*, 2018, 32(9): 138–144.
Xu M J, Zhou Y. The equilibrium of a closed-loop supply chain network considering retailers' regret aversion. *Soft Science*, 2018, 32(9): 138–144. (in Chinese)
- [9] 姚锋敏, 滕春贤. 零售商主导第三方回收竞争闭环供应链的决策与协调. *系统工程学报*, 2019, 34(1): 91–101.
Yao F M, Teng C X. Decision and coordination for competitive closed-loop supply chains with third-party collector dominated by a retailer. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(1): 91–101. (in Chinese)
- [10] 王文宾, 张梦, 赵蕾, 等. 第三方回收商公平关切下闭环供应链决策模型. *系统工程学报*, 2019, 34(3): 409–421.
Wang W B, Zhang M, Zhao L, et al. Decision-making model of closed-loop supply chain based on third-party collector's fairness concern. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(3): 409–421. (in Chinese)
- [11] 程发新, 袁猛, 孙立成, 等. 复合碳减排政策下闭环供应链网络均衡决策. *系统工程学报*, 2019, 34(4): 483–496.
Cheng F X, Yuan M, Sun L C, et al. Equilibrium decision research of closed-loop supply chain network with compound carbon emission reduction policy. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(4): 483–496. (in Chinese)
- [12] Lau A H L, Lau H S, Wang J C. Pricing and volume discounting for a dominant retailer with uncertain manufacturing cost information. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(2): 848–870.
- [13] Leung C M, Kwok Y K. Patent-investment games under symmetric information. *European Journal of Operational Research*, 2012, 223(2): 441–451.
- [14] Korpeoglu E, Sen A, Guler K. Non-cooperative joint replenishment under asymmetric information. *European Journal of Operational Research*, 2013, 227(3): 434–443.
- [15] 颜波, 刘艳萍, 李鸿媛. 成本信息不对称下零售商主导的混合渠道供应链决策分析. *中国管理科学*, 2015, 23(12): 124–134.
Yan B, Liu Y P, Li H Y. Decision analysis of retailer-dominated hybrid channel supply chain under the asymmetric cost information. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(12): 124–134. (in Chinese)
- [16] 张欢, 刘洋. 双边信息不对称下供应链契约研究. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(6): 1570–1580.
Zhang H, Liu Y. Supply chain contract with double sided asymmetric information. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(6): 1570–1580. (in Chinese)
- [17] Pishchulov G, Richter K. Optimal contract design in the joint economic lot size problem with multi-dimensional asymmetric information. *European Journal of Operational Research*, 2016, 253(3): 711–733.
- [18] 徐和, 彭伟真. 信息不对称下制造商激励合同及价格策略研究. *系统工程学报*, 2017, 32(4): 474–485.
Xu H, Peng W Z. The optimal price decision and incentive contract design under a symmetric information. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(4): 474–485. (in Chinese)
- [19] 刘浪, 吴双胜, 史文强. 信息不对称下价格随机的应急数量折扣契约研究. *中国管理科学*, 2018, 26(3): 169–176.
Liu L, Wu S S, Shi W Q. Research on emergency quantity discount contract with stochastic price under asymmetric information. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(3): 169–176. (in Chinese)
- [20] Mahadevan B, Hazra J, Jain T. Services outsourcing under asymmetric cost information. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(2): 456–467.
- [21] Zhang S C, Zhang J X. Contract preference with stochastic cost learning in a two-period supply chain under asymmetric information. *International Journal of Production Economics*, 2018, 196: 226–247.
- [22] 慕艳芬, 聂佳佳, 石纯来. 市场需求和成本信息不对称对制造商开通直销渠道的影响. *管理评论*, 2018, 30(9): 145–153.
Mu Y F, Nie J J, Shi C L. Effects of asymmetric information about the demand and the cost on the manufacturer's direct sale channel strategy. *Management Review*, 2018, 30(9): 145–153. (in Chinese)

[23] 林志炳. 信息不对称下的制造商返利策略研究. 系统工程理论与实践, 2020, 40(2): 324–333.
 Lin Z B. Research on manufacturer rebate strategy with information asymmetry. Systems Engineering: Theory & Practice, 2020, 40(2): 324–333. (in Chinese)

[24] 吴忠和, 陈宏, 赵千. 非对称信息下闭环供应链回购契约应对突发事件策略研究. 中国管理科学, 2013, 21(6): 97–106.
 Wu Z H, Chen H, Zhao Q. Closed-loop supply chain coordination under asymmetric information and disruptions with buy back contract. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(6): 97–106. (in Chinese)

[25] Zhang P, Xiong Y, Xiong Z K, et al. Designing contracts for a closed-loop supply chain under information asymmetry. Operations Research Letters, 2014, 42(2): 150–155.

[26] 曹晓刚, 郑本荣, 闻卉, 等. 非对称信息和模糊需求下的闭环供应链协调决策研究. 运筹与管理, 2014, 23(5): 27–34.
 Cao X G, Zheng B R, Wen H, et al. The coordination of supply chain with bilateral asymmetric information by considering risk aversion of retailer. Operations Research and Management Science, 2014, 23(5): 27–34. (in Chinese)

[27] Zheng B R, Yang C, Yang J, et al. Pricing collecting and contract design in a reverse supply chain with incomplete information. Computers Industrial Engineering, 2017, 111: 109–122.

[28] Wang W B, Zhang Y, Li Y Y, et al. Closed-loop supply chains under reward-penalty mechanism: retailer collection and asymmetric information. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(20): 3938–3955.

[29] 张盼, 熊中楷. 制造商回收成本信息不对称下零售商激励合同设计. 管理工程学报, 2019, 33(4): 144–150.
 Zhang P, Xiong Z K. Designing incentive contract for a retailer under asymmetric information of manufacturer's collection cost. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2019, 33(4): 144–150. (in Chinese)

[30] 王文宾, 赵学娟, 张鹏, 等. 双重信息不对称下闭环供应链的激励机制研究. 中国管理科学, 2016, 24(10): 69–77.
 Wang W B, Zhao X J, Zhang P, et al. Incentive mechanism of closed-loop supply chain under double information asymmetry. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(10): 69–77. (in Chinese)

[31] Kinderlehrer D, Stampacchia G. An Introduction to Variational Inequalities and Their Applications. Academic Press, 1980.

[32] Korpelevich G M. The extragradient method for finding saddle points and other problems. Matekon, 1976, 12: 747–756.

作者简介:

赵京彪(1995—), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: 1085949539@qq.com;
 曲册册(1994—), 男, 山东烟台人, 硕士生, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: 1515240639@qq.com;
 周岩(1979—), 女, 山东青岛人, 博士, 教授, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: yanyanz22@hotmail.com.

附录

命题 1 的证明 将最大化问题(1)取相反数, 与约束(2)及其拉格朗日乘子变量 λ_i 构成拉格朗日函数

$$L_i(q_i^y, q_{ij}^f, q_{ik}^r, \lambda_i) = -\rho_{ij}^* \sum_{j=1}^J q_{ij}^f + f_i(q^y) + \sum_{k=1}^M \rho_{ik}^{r*} q_{ik}^r + \sum_{k=1}^M c_{ik}^r(q_{ik}^r) + \sum_{j=1}^J c_{ij}^1(q_{ij}^f) + \theta_i f_i^r(\beta, Q^r) + \bar{\rho}(1 - \beta) \sum_{k=1}^M q_{ik}^r + \lambda_i \left(\sum_{j=1}^J q_{ij}^f - q_i^y - \beta \sum_{k=1}^M q_{ik}^r \right). \tag{21}$$

对该函数求其四阶 Hesse 矩阵

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_i(q^y)}{\partial (q_i^y)^2} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \frac{\partial^2 c_{ij}^1(q_{ij}^f)}{\partial (q_{ij}^f)^2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{\partial^2 c_{ik}^r(Q^r)}{\partial (q_{ik}^r)^2} + \frac{\theta_i \partial^2 f_i(\beta, Q^r)}{\partial (q_{ik}^r)^2} & -\beta \\ -1 & 1 & -\beta & 0 \end{bmatrix}. \tag{22}$$

由费用函数的凸假设可知 Hesse 矩阵为半正定, 该拉格朗日函数为决策变量的凸函数, 则其原问题(1)为决策变量的凹函数. 证毕.

命题 2 的证明 由命题 1 的证明得到制造商利润关于最优生产量、与零售商最优交易量、最优回收量和最优拉格朗日乘子的一阶最优性条件转化为式(6). 证毕.

性质 1 的证明 由式(21)的一阶条件极值 $\frac{\partial L_i}{\partial q_i^{v*}} = 0$ 两边求 θ_i 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{v*} \partial \theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^v \partial q_i^v} \frac{dq_i^{v*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{f*} \partial q_i^f} \frac{dq_i^{f*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{r*} \partial q_i^r} \frac{dq_i^{r*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^* \partial \lambda_i} \frac{d\lambda_i^*(\theta_i)}{d\theta_i} = 0, \quad (23)$$

同理, 由式(21)一阶条件极值 $\frac{\partial L_i}{\partial q_i^{f*}} = 0$ 两边求 θ_i 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{f*} \partial \theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{f*} \partial q_i^v} \frac{dq_i^{v*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{f*} \partial q_i^f} \frac{dq_i^{f*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{f*} \partial q_i^r} \frac{dq_i^{r*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{f*} \partial \lambda_i} \frac{d\lambda_i^*(\theta_i)}{d\theta_i} = 0, \quad (24)$$

由式(21)一阶条件极值 $\frac{\partial L_i}{\partial q_i^{r*}} = 0$ 两边求 θ_i 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{r*} \partial \theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{r*} \partial q_i^v} \frac{dq_i^{v*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{r*} \partial q_i^f} \frac{dq_i^{f*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{r*} \partial q_i^r} \frac{dq_i^{r*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial q_i^{r*} \partial \lambda_i} \frac{d\lambda_i^*(\theta_i)}{d\theta_i} = 0, \quad (25)$$

由式(21)一阶条件极值 $\frac{\partial L_i}{\partial \lambda_i^*} = 0$ 两边求 θ_i 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_i}{\partial \lambda_i^* \partial \theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial \lambda_i^* \partial q_i^v} \frac{dq_i^{v*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial \lambda_i^* \partial q_i^f} \frac{dq_i^{f*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial \lambda_i^* \partial q_i^r} \frac{dq_i^{r*}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{\partial^2 L_i}{\partial \lambda_i^* \partial \lambda_i} \frac{d\lambda_i^*(\theta_i)}{d\theta_i} = 0. \quad (26)$$

联立方程(23)~方程(26)得

$$\begin{aligned} \frac{dq_i^{f*}(\theta_i)}{d\theta_i} &= - \left(\frac{\beta^2 \frac{\partial^2 c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial (q_{ij}^{f*})^2} + \beta \frac{\partial f_i^r(\beta, Q^{r*})}{\partial q_{ik}^r}}{\frac{\partial^2 c_{ik}^r(Q^r)}{\partial (q_{ik}^r)^2} + \frac{\theta_i \partial^2 f_i^r(\beta, Q^{r*})}{\partial (q_{ik}^r)^2}} + \frac{\partial^2 c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial (q_{ij}^{f*})^2} \frac{\partial^2 q_i^v}{\partial f_i(q^{v*})^2} \right), \\ \frac{d\lambda_i^*(\theta_i)}{d\theta_i} &= - \frac{\partial^2 c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial (q_{ij}^{f*})^2}, \\ \frac{dq_i^{r*}(\theta_i)}{d\theta_i} &= - \frac{\beta \frac{\partial^2 c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial (q_{ij}^{f*})^2} + \beta \frac{\partial f_i^r(\beta, Q^{r*})}{\partial q_{ik}^r}}{\frac{\partial^2 c_{ik}^r(Q^r)}{\partial (q_{ik}^r)^2} + \frac{\theta_i \partial^2 f_i^r(\beta, Q^{r*})}{\partial (q_{ik}^r)^2}}, \\ \frac{dq_i^{v*}(\theta_i)}{d\theta_i} &= - \frac{\partial^2 c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial (q_{ij}^{f*})^2} \frac{\partial^2 (q_i^v)}{\partial f_i(q^{v*})^2}. \end{aligned}$$

由费用函数的凸假设可得 $\frac{dq_{ik}^{r*}(\theta_i)}{d\theta_i} \leq 0$, $\frac{dq_{ij}^{f*}(\theta_i)}{d\theta_i} \leq 0$, $\frac{d\lambda_i^*(\theta_i)}{d\theta_i} \leq 0$, $\frac{dq_i^{v*}(\theta_i)}{d\theta_i} \leq 0$. 证毕.

命题 3 的证明

将最大化问题(10)取相反数, 对约束(11)及其拉格朗日乘子变量 μ_j 构成拉格朗日函数

$$L_j(q_{ij}^f, q_{jk}^s, \mu_j) = - \sum_{k=1}^M \rho_{jk}^* q_{jk}^s + \eta_j c_j^2(Q^f) + \sum_{i=1}^N c_{ij}^3(q_{ij}^f) + \sum_{k=1}^M c_{jk}^4(q_{jk}^s) + \sum_{i=1}^N \rho_{ij}^* q_{ij}^f + \mu_j \left(\sum_{k=1}^M q_{jk}^s - \sum_{i=1}^N q_{ij}^f \right). \quad (27)$$

对该函数求三阶 Hessian 矩阵

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 c_{ij}^3(q_{ij}^f)}{\partial (q_{ij}^f)^2} + \frac{\eta_j \partial^2 c_j(Q^f)}{\partial (q_{ij}^f)^2} & 0 & -1 \\ 0 & \frac{\partial^2 c_{jk}^4(q_{jk}^s)}{\partial (q_{jk}^s)^2} & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

由费用函数的凸假设可知 Hesse 矩阵为半正定, 该拉格朗日函数为决策变量的凸函数, 则其原问题(10)为决策变量的凹函数. 证毕.

性质 2 的证明

由式(6)的第二项等价于互补问题^[31], 即如果 $q_{ij}^{f*} > 0$, 则 $\frac{\partial c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^{f*}} + \lambda_i^* - \rho_{ij}^* = 0$. 因此, 内生价格变量 ρ_{ij}^* 可表示为 $\rho_{ij}^* = \frac{\partial c_{ij}^1(q_{ij}^{f*})}{\partial q_{ij}^{f*}} + \lambda_i^*$. 证毕.

性质 3 的证明

由式(27)的一阶条件极值 $\frac{\partial L_j}{\partial q_{ij}^{f*}} = 0$ 等式两边求 η_j 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{ij}^{f*} \partial \eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{ij}^{f*} \partial q_{ij}^f} \frac{dq_{ij}^f(\eta_j)}{d\eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{ij}^{f*} \partial q_{jk}^f} \frac{dq_{jk}^f(\eta_j)}{d\eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{ij}^{f*} \partial \mu_j} \frac{d\mu_j(\eta_j)}{d\eta_j} = 0, \quad (29)$$

同理, 由式(27)一阶条件极值 $\frac{\partial L_j}{\partial q_{jk}^{s*}} = 0$ 等式两边求 η_j 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{jk}^{s*} \partial \eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{jk}^{s*} \partial q_{ij}^f} \frac{dq_{ij}^f(\eta_j)}{d\eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{jk}^{s*} \partial q_{jk}^s} \frac{dq_{jk}^s(\eta_j)}{d\eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial q_{jk}^{s*} \partial \mu_j} \frac{d\mu_j(\eta_j)}{d\eta_j} = 0, \quad (30)$$

由式(27)一阶条件极值 $\frac{\partial L_j}{\partial \mu_j^*} = 0$ 等式两边求 η_j 的全导数, 得

$$\frac{\partial^2 L_j}{\partial \mu_j^* \partial \eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial \mu_j^* \partial q_{ij}^f} \frac{dq_{ij}^f(\eta_j)}{d\eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial \mu_j^* \partial q_{jk}^s} \frac{dq_{jk}^s(\eta_j)}{d\eta_j} + \frac{\partial^2 L_j}{\partial \mu_j^* \partial \mu_j} \frac{d\mu_j(\eta_j)}{d\eta_j} = 0. \quad (31)$$

联立方程(29)和方程(31)得

$$\frac{dq_{ij}^{f*}(\eta_j)}{d\eta_j} = \frac{dq_{jk}^{s*}(\eta_j)}{d\eta_j} = -\frac{\partial^2 c_j^2(Q^f)}{\partial q_{ij}^{f*2}} \left(\frac{\eta_j \partial^2 c_j^2(Q^f)}{\partial (q_{ij}^f)^2} + \frac{\partial^2 c_{ij}^3(q_{ij}^{f*})}{\partial (q_{ij}^f)^2} \right)^{-1}.$$

由费用函数的凸假设可得 $\frac{dq_{ij}^{f*}(\eta_j)}{d\eta_j} \leq 0$, $\frac{dq_{jk}^{s*}(\eta_j)}{d\eta_j} \leq 0$.

证毕.

性质 4 的证明

由式(14)的第二项等价于互补问题^[31]: 如果 $q_{jk}^{s*} > 0$, 则 $\rho_{jk}^* - \frac{\partial c_{jk}^4(q_{jk}^{s*})}{\partial q_{jk}^s} - \mu_j^* = 0$. 因此, 内生价格变量 ρ_{jk}^* 可表示为 $\rho_{jk}^* = \frac{\partial c_{jk}^4(q_{jk}^{s*})}{\partial q_{jk}^s} + \mu_j^*$.

证毕.