文章编号: 1001-0920 (2016) 04-0678-07 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.0289

LR-型模糊需求下供应链的质量控制与成本分担

林 晶[1,2], 王 健[1]
(1. 福州大学 经济与管理学院，福州 350116；2. 福建江夏学院 数理教研部，福州 350108)

摘 要: 研究LR-型模糊需求下两级供应链中可变比例成本分担和质量控制的契约设计问题. 在召回成本无分担的分散模式下, 供应链成员努力投资不足, 集中式供应链努力选择互补, 互补程度关于单位召回成本和总缺陷率递增. 引入可变比例成本分担契约, 该契约能发挥制造商与供应商的努力选择互补效应, 且双方关于努力选择的博弈存在Nash均衡. 当缺陷分析成本为零时, 在契约 Φ 下供应链成员激励相容, 供应链的整体利润等于集中式最优利润. 确定可变分担比例解析解、缺陷率阈值. 验证结果表明, 契约 Φ 的成本无效指数和质量无效指数均低于固定比例成本分担合同, 契约 Φ 比固定比例成本分担合同更合理、有效.

关键词: LR-型模糊需求；可变比例成本分担；质量激励机制
中图分类号: F224.32 **文献标志码:** A

Quality control and cost sharing of the supply chain under LR-type fuzzy demand

LIN Jing[1,2], *WANG Jian*[1]
(1. School of Economics & Management，Fuzhou University，Fuzhou 350116，China；2. Actuarial-oriented of Mathematics and Physics，Fujian Jiangxia College，Fuzhou 350108，China．Correspondent：LIN Jing，E-mail: linjingxd2005@163.com)

Abstract: Under the LR-type fuzzy demand, the cost sharing contract with variable ratio and quality control in the two-stage supply chain are researched. In the condition of disaggregation mode without sharing recall cost, the supply chain members make their effort to insufficient investment, however, they try to make complementation in the central supply chain, and the degree of complementation is increasing with the growing of unit recall cost and total defect rate. Through importing cost sharing contract with the variable ratio, it is found that this contract can exert the manufacturers and suppliers to make their effort to choose the complementary effect, and it exists Nash equilibrium in making effort to choose the game between the two sides. When the defect analysis cost is zero, supply chain members are of incentive compatibility under the contract Φ, and the total profit of supply chain equals to the optimal profit in the central mode. The variable allocation proportion analytic solution and the defect rate threshold value are ensured. Verification results show that the invalid cost index and the invalid quality index of the contract Φ are both lower than the cost-sharing contract with the fixed ratio, and the contract Φ is more reasonable and more effective.

Keywords: LR-type fuzzy demand；variable ratio cost sharing；quality incentive system

0 引 言

随着市场经济的不断发展, 人们逐渐告别短缺经济. 在买方市场条件下, 只有提高产品质量、技术和服务, 保证企业占有市场才能使企业持续发展, 因质量缺陷引发的召回事件将对企业的效益产生持续的负面影响. 2015 年 5 月, 美国国家公路安全管理局 (NHTSA) 数据显示, 汽车零部件巨头高田公司已在美国追加召回26.4 万辆缺陷日产汽车; 2015 年 7 月, TCL 通讯宣布将召回 2.8 万台缺陷手机, 这也是国内手机行业首例产品召回事件; 2010 年丰田汽车和强生药品的大规模召回事件使企业遭受信任危机和经济损失.

OME 供应链上发生的质量事故, 究其原因, 一方面是信息不对称使得制造商难以观测供应商质量控

收稿日期: 2015-03-11；**修回日期:** 2015-07-21.
基金项目: 国家社会科学基金项目(12BJY069)；福建省教育厅项目(JB13281).
作者简介: 林晶(1982−), 女, 讲师, 博士生, 从事物流管理、供应链管理的研究；王健(1959−), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流管理、供应链管理等研究.

制的努力投资水平, 另一方面是制造商自身技术问题或设计缺陷. 因此, 研究供应链的召回成本分担契约, 控制质量风险并建立有效的产品质量协同机制具有重要意义.

目前, 供应链质量控制策略和质量契约设计的研究主要有两个视角: 一是基于质量控制模型的分析和实证分析; 二是研究质量控制契约和质量激励机制的设计. 在第1种视角下: Yehezkel[1]研究了非对称信息条件下, 考虑供应链中单、双边道德风险对零售商产品质量控制的影响; Federgruen[2]在收益不确定的情况下, 应用广义吸引力模型分析了供应商与制造商之间的质量竞争; 马士华等[3]构建两级装配系统中质量投资与价格决策模型, 研究了供应链结构对供应链绩效的影响, 研究发现集中决策优于独立决策; 刚号等[4]考察了非对称信息和对称信息两种不同情况对制造商和供应商决策的影响, 结果表明, 在两种情况下制造商均存在3种纳什均衡策略参与市场竞争, 而供应商存在选择单位成本的机会主义倾向. 在第2种视角下: Reybiers等[5]较早研究了供应商和生产商如何进行的契约设计和质量控制问题, 并建立了质量控制契约模型; Cachon等[6-7]通过设计供应链契约给予供应商固定支付来获取其个人信息, 确定了需求预测分享和收益共享契约, 以解决非对称信息条件下供应商与制造商之间的协调问题; 朱立龙等[8]研究了两级供应链中质量控制契约设计问题, 研究表明, 生产商的质量预防水平与其投资水平正相关, 随着购买商质检水平的提高, 生产商的外部损失分担比例将会下降, 供应链联合期望收益呈现“倒U型”; Chao等[9]设计了外部需求为常数的产品质量缺陷召回成本分担契约, 表明逆向选择和道德风险的混合模型可以提升产品质量; 在此基础上, 刘学勇等[10]考虑线性需求下召回成本分担合同对质量改进的协调作用, 运用上模博弈理论证明了分散式供应链中存在纳什最优均衡解.

现有文献在供应链质量契约设计问题上考虑市场需求的类型有: 1) 确定需求, 即市场需求可表示为产品的价格、质量、服务等参数的函数; 2) 随机需求, 通常假设市场需求服从某一概率分布, 并可通过历史数据得到随机变量的分布函数和密度函数. 随着科学技术的快速发展, 消费者偏好特征改变, 产品的生命周期不断缩短, 尤其是高新电子产品. 由于缺乏充足的历史数据和可靠信息, 此类产品变动的市场需求往往难以用确定的函数形式或概率分布来描述. 因此, 考虑用LR-型模糊集描述变动不确定的市场需求更切合实际情况. 桑圣举等[11-15]研究在三角模糊需求下, 通过收益共享契约模型实现供应链成员间的协调较为系统. 但研究模糊变动的市场需求下如何进行召回成本分担, 建立有效的产品质量激励协同机制的文献较少. 本文的主要创新点如下: 建立在LR-型模糊外部需求下可变的召回成本分担模型; 在非对称信息的情形下, 研究该模型如何发挥质量激励机制, 模型中可变的成本分担参数的解析解, 以及该模型下供应链协调机制; 通过Chao等[9]定义的成本无效指数和质量无效指数两个评价指标从成本和质量两个角度验证可知, 该模型下供应链总期望成本和最终产品缺陷率均优于固定比例成本分担合同.

1　模型假设与描述

本文考虑单阶段由一个供应商 (s) 和一个制造商 (m) 组成的两级供应链系统, 供应商为制造商提供配件, 制造商加工后销售给客户, 双方都根据期望利润最大化原则进行决策. 假设制造商和供应商提高努力水平可以提升产品质量, 根据Gurnani等[16]提出的假设, 制造商和供应商的努力成本函数分别为

$$C_m(\eta_m)=\frac{k_m\eta_m^2}{2},\ C_s(\eta_s)=\frac{k_s\eta_s^2}{2}.$$

其中: k 为质量努力成本参数; η 为质量努力水平, 且 η 为不对称信息. 假设 φ_m, φ_s 分别为制造商与供应商的原始缺陷率, 最终产品的寿命服从分布函数为 $F(q)=1-\mathrm{e}^{-q\varphi}$ 的指数分布[10]. 其中 q 为产品产量, $\varphi=\varphi_m(1-\eta_m)+\varphi_s(1-\eta_s)$. 假设市场上一旦发现缺陷产品即需召回所有产品, 并对其进行缺陷分析, 追认产品缺陷的责任方, 单位召回成本为 c_z, 单位产品缺陷分析成本为 c_r. 另外, p 为产品价格, w 为批发价格, c 为供应商单位生产成本, u 为单位缺货成本, h 为单位库存成本.

假设市场需求为LR-型模糊需求 $\tilde{D}=(d_l,m_l,m_r,m_r)$, 如图1所示, $\tilde{D}$ 具有文献[17]给出的隶属函数 $\tilde{D}(x)$ 和期望利润 $\mathrm{E}(\tilde{D})$, $\tilde{D}(x)$ 和 $\mathrm{E}(\tilde{D})$ 分别为

$$\tilde{D}(x)=\begin{cases}L(x),\ x\in[d_l,m_l);\\ 1,\ x\in[m_l,m_r];\\ R(x),\ x\in(m_r,d_r];\\ 0,\ x\notin[d_l,d_r];\end{cases}\tag{1}$$

$$\mathrm{E}(\tilde{D})=\int_0^1\frac{d_1(\lambda)+d_2(\lambda)}{2}\mathrm{d}\lambda.\tag{2}$$

其中 $[d_1(\lambda),d_2(\lambda)]$ 为 $\tilde{D}$ 的 λ- 截集.

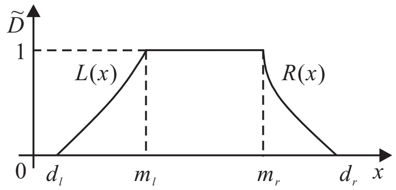

图1　LR-型模糊需求 $\tilde{D}$

下面分别研究集中式供应链 (C)、无成本分担分散式供应链 (N) 和可变比例成本分担的分散式供应链 (Φ).

2　集中式供应链 (C)

供应链的模糊利润为

$$\Pi^c = (p+h)\min\{q,\tilde{D}\} - u(\tilde{D}-q,0)^+ - (h+c)q - c_z\min\{q,\tilde{D}\}(1-\mathrm{e}^{-q\varphi}) - \frac{1}{2}(k_m\eta_m^2 + k_s\eta_s^2).$$

为了表示简便, 以下记

$$L^{-1} \triangleq L^{-1}(\lambda),\ R^{-1} \triangleq R^{-1}(\lambda).$$

1) 若 $q\in[d_l,m_l)$, 则由式 (1) 可得集中式供应链的期望利润为

$$\mathrm{E}(\Pi^c) = \frac{1}{2}\int_0^{L(q)}[(p+h-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi}))L^{-1} - uR^{-1}]\mathrm{d}\lambda - \frac{1}{2}\int_{L(q)}^1 u[L^{-1}+R^{-1}]\mathrm{d}\lambda + [p+u-c-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})]q - \frac{1}{2}[p+h+u-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})]qL(q) - \frac{1}{2}(k_m\eta_m^2+k_s\eta_s^2); \tag{3}$$

2) 若 $q\in[m_l,m_r]$, 则集中式供应链期望利润为

$$\mathrm{E}(\Pi^c) = \frac{1}{2}\int_0^1[(p+h-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi}))L^{-1} - uR^{-1}]\mathrm{d}\lambda - \frac{1}{2}[h+2c+c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})-u-p]q - \frac{1}{2}(k_m\eta_m^2+k_s\eta_s^2);$$

3) 若 $q\in(m_r,d_r]$, 则集中式供应链期望利润为

$$\mathrm{E}(\Pi^c) = \frac{1}{2}\int_0^1[p+h-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})]L^{-1}\mathrm{d}\lambda - \frac{1}{2}\int_0^{R(q)}uR^{-1}\mathrm{d}\lambda + \frac{1}{2}\int_{R(q)}^1[p+h-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})]R^{-1}\mathrm{d}\lambda + \frac{1}{2}[p+u+h-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})]qR(q) - (h+c)q - \frac{1}{2}(k_m\eta_m^2+k_s\eta_s^2).$$

本文定理、命题及推论仅给出 $q\in[d_l,m_l)$ 时的证明, 对于 $q\in[m_l,m_r]$ 和 $q\in(m_r,d_r]$ 的情形, 证明过程可类似推导.

命题 1 对于 $\forall(\eta_m,\eta_s)\in[0,1]\times[0,1]$, 如果

$$\begin{cases} \dfrac{\varphi_m^2}{k_m}+\dfrac{\varphi_s^2}{k_s} < c_z^{-1}m_l^{-3},\ q\in[d_l,m_l); \\ \dfrac{\varphi_m^2}{k_m}+\dfrac{\varphi_s^2}{k_s} < c_z^{-1}m_r^{-3},\ q\in[m_l,m_r]; \\ \dfrac{\varphi_m^2}{k_m}+\dfrac{\varphi_s^2}{k_s} < c_z^{-1}d_r^{-3},\ q\in(m_r,d_r]. \end{cases}$$

则制造商和供应商均存在唯一的最优努力水平 $(\eta_m^{c*},\eta_s^{c*})$ 和最优生产决策 q^{c*}.

证明 目标函数 $\mathrm{E}(\Pi^c)$ 关于 (η_m,η_s,q) 的海瑟阵为 $M(\eta_m,\eta_s,q)$, $M_i\ (i=1,2,3)$ 为 M 的 i 阶主子式.

若 $q\in[d_l,m_l)$, 则由式 (3) 可得

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m^2} = Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m^2 - k_m,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_s^2} = Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_s^2 - k_s,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m\partial\eta_s} = Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m\Gamma_s,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q^2} = c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\varphi[L(q)-2+A\varphi] - \frac{1}{2}[p+u+h-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})]L'(q),$$

$$M_2 = -Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}(k_m\Gamma_m^2+k_s\Gamma_s^2)+k_mk_s.$$

其中

$$A = \frac{1}{2}\int_0^{L(q)}L^{-1}\mathrm{d}\lambda + q - \frac{1}{2}qL(q) = \frac{1}{2}\int_0^{L(q)}L^{-1}\mathrm{d}\lambda - \frac{1}{2}\int_0^{L(q)}q\mathrm{d}\lambda + q = q + \frac{1}{2}\int_0^{L(q)}(L^{-1}-q)\mathrm{d}\lambda < q.$$

由命题 1 的条件 $\dfrac{\varphi_m^2}{k_m}+\dfrac{\varphi_s^2}{k_s} < c_z^{-1}m_l^{-3}$ 和 $\mathrm{e}^{-q\varphi}<1$ 可得

$$M_1 < c_z\varphi_m^2m_l^3 - k_m < 0,$$

$$M_2 = k_mk_s\Big[1 - Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}q^2\Big(\frac{\varphi_m^2}{k_m}+\frac{\varphi_s^2}{k_s}\Big)\Big] > k_mk_s\Big[1-\Big(\frac{q}{m_l}\Big)^3\Big] > 0.$$

观察 $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q^2}$ 的右端第 1 项 $c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\varphi[L(q)-2+A\varphi] < c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\varphi[L(q)-2+q\varphi] < 0$, 可以得到 $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q^2} < 0$, 故 $M_3<0$, 从而 M 负定, 存在唯一的最优努力水平 $(\eta_m^{c*},\eta_s^{c*})$ 和最优生产决策 q^{c*}. □

3 无成本分担的分散式供应链 (N)

在分散式供应链中, 制造商和供应商的模糊利润分别为

$$\Pi_m^N = (p+h)\min\{q,\tilde{D}\} - u(\tilde{D}-q,0)^+ - (h+w)q - c_z\min\{q,\tilde{D}\}(1-\mathrm{e}^{-q\varphi}) - \frac{1}{2}k_m\eta_m^2,$$

$$\Pi_s^N = (w-c)q - \frac{1}{2}k_s\eta_s^2.$$

4 无成本分担的分散式与集中式供应链比较

定理 1 1) 最优的生产决策 $q^{c*}>q^{N*}$, 最优努力水平 $\eta_s^{c*}>\eta_s^{N*}$, $\eta_m^{c*}>\eta_m^{N*}$;

2) 在集中式供应链中, 制造商最优努力选择 $\eta_m^{c*}(\eta_s)$ 与供应商的最优努力选择 $\eta_s^{c*}(\eta_m)$ 正相关, 且正相关程度关于单位召回成本 c_z 和总缺陷率 Γ_m、Γ_s 递增, 其中 $\Gamma_m=q\varphi_m$、$\Gamma_s=q\varphi_s$ 分别为制造商和供应商的总缺陷率.

证明 1) 集中式供应链中最优的生产决策满足一阶条件 $\dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q}(q^{c*})=0$, 分散式供应链最优的生产决策满足一阶条件 $\dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial q}(q^{N*})=0$, 由于 $\dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q} > \dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial q}$, $\dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q}(q^{N*}) > \dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial q}(q^{N*}) = 0 = \dfrac{\partial\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q}(q^{c*})$. 命题 1 中已证得 $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial q^2}<0$, 因此 $q^{c*}>q^{N*}$.

2) 令

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m\partial\eta_s}=\begin{cases}Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}q\Gamma_m\Gamma_s,\ q\in[d_l,m_l);\\ \frac{1}{2}c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m\Gamma_s\Big(\int_0^1L^{-1}\mathrm{d}\lambda+q\Big),\ q\in[m_l,m_r];\\ \frac{1}{2}c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m\Gamma_s\Big(\int_0^1L^{-1}\mathrm{d}\lambda+\int_{R(q)}^1R^{-1}\mathrm{d}\lambda+qR(q)\Big),\\ \quad q\in(m_r,d_r].\end{cases}$$

其中 $A=\frac{1}{2}\int_0^{L(q)}L^{-1}\mathrm{d}\lambda+q-\frac{1}{2}qL(q)$. 由 $\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m\partial\eta_s}>0$ 可知, 制造商和供应商的努力水平决策互补, 且 $\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m\partial\eta_s}$ 为 c_z 和 $\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m\Gamma_s$ 的增函数. 由 $\frac{\partial(\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m)}{\partial\Gamma_m}=\mathrm{e}^{-q\varphi}[1-\Gamma_m(1-\eta_m)]>0$ 以及 $\frac{\partial(\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_s)}{\partial\Gamma_s}>0$ 可知, $\frac{\partial^2\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m\partial\eta_s}$ 关于 c_z、Γ_m、Γ_s 递增.

由一阶条件 $\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi_s^N)}{\partial\eta_s}=-C_s'(\eta_s)=0$ 可得 $\eta_s^{N*}=0$.

当 $q\in[d_l,m_l)$ 时, 令一阶条件 $\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m}(\eta_m^{c*},\eta_s^{c*})=0$, $\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial\eta_m}(\eta_m^{N*},\eta_s^{N*}=0)=0$. 由于 $\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi^c)}{\partial\eta_m}=Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi}\Gamma_m-k_m\eta_m$, 且有 $\mathrm{e}^{-[\Gamma_m(1-\eta_m^{c*})+\Gamma_s(1-\eta_s^{c*})]}>\mathrm{e}^{-[\Gamma_m(1-\eta_m^{c*})+\Gamma_s]}$, 可得

$$\frac{\partial E(\Pi^c)}{\partial\eta_m}(\eta_m^{c*},\eta_s^{N*}=0)<\frac{\partial E(\Pi^c)}{\partial\eta_m}(\eta_m^{c*},\eta_s^{c*})=0,$$

从而 $\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial\eta_m}(\eta_m^{c*},\eta_s^{N*}=0)<\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial\eta_m}(\eta_m^{N*},\eta_S^{N*}=0)=0$.

由命题 1 可知, 制造商的期望利润关于其努力水平 η_m 为凹的, 说明 $\frac{\partial\mathrm{E}(\Pi_m^N)}{\partial\eta_m}$ 关于 η_m 单调递减, 从而 $\eta_m^{c*}>\eta_m^{N*}$. □

定理 1 表明: 在分散式供应链中, 如果供应商不分担缺陷产品的召回成本, 供应商仅从自身利益最大化考虑, 则其努力水平为零; 而对于制造商而言, 尽管需完全内化与自身努力选择相关的质量缺陷成本, 制造商仍选择削减努力投资. 但集中式供应链可发挥制造商与供应商的努力选择互补效应, 且互补程度关于单位召回成本和总缺陷率递增.

为了提高产品质量, Chao 等[9]设计了共享产品召回成本的契约来激励供应链成员改进产品质量. 受此启发, 引入下述可变分担比例契约 Φ, 探讨制造商和供应商期望利润最大化决策目标下的最优努力选择, 质量激励机制, 可变成本分担参数的解析解, 缺陷率阈值的设定, 以及供应链的协调等问题, 并从供应链总期望成本和最终产品缺陷率两个维度表明, 契约 Φ 比固定比例成本分担合同更合理.

5　产品缺陷损失分担模型 (Φ)

制造商作为供应链的领导者, 提出如下产品缺陷损失分担模型 Φ: 在缺陷率阈值 $\bar\varphi$ 内 ($\bar\varphi=k\varphi$, $k\in[0,1]$, φ 为产品缺陷率); 制造商和供应商承担的召回成本比例为 $\vartheta:(1-\vartheta)$, ϑ 为契约参数; 缺陷率超过阈值 $\bar\varphi$, 召回成本和缺陷分析成本全部由质量缺陷的责任方承担.

制造商和供应商的模糊利润分别为

$$\Pi_m^\Phi=(p+h-H_1-H_2)\min\{q,\tilde D\}-u(\tilde D-q,0)^+-(h+w)q-\frac{1}{2}k_m\eta_m^2,$$

$$\Pi_s^\Phi=(w-c)q-(H_3+H_4)\min\{q,\tilde D\}-\frac{1}{2}k_s\eta_s^2,$$

且有

$$H_1=\vartheta c_z(1-\mathrm{e}^{-q\bar\varphi}),$$
$$H_2=\rho(c_z+c_r)(\mathrm{e}^{-q\bar\varphi}-\mathrm{e}^{-q\varphi}),$$
$$H_3=(1-\vartheta)c_z(1-\mathrm{e}^{-q\bar\varphi}),$$
$$H_4=(1-\rho)(c_z+c_r)(\mathrm{e}^{-q\bar\varphi}-\mathrm{e}^{-q\varphi}),$$

其中 $\rho=\varphi_m(1-\eta_m)/\varphi$ 为由制造商造成产品质量缺陷的概率. 易得 $H_i\,(i=1,2,3)$ 关于 q、w 的二阶偏导数为正.

当 $q\in[d_l,m_l)$ 时, 仍记 $A=\frac{1}{2}\int_0^{L(q)}L^{-1}\mathrm{d}\lambda+q-\frac{1}{2}qL(q)$, 此时有

$$\mathrm{E}(\Pi_m^\Phi)=\frac{1}{2}\int_0^{L(q)}[(p+h-H_1-H_2)L^{-1}-uR^{-1}]\mathrm{d}\lambda-\frac{1}{2}\int_{L(q)}^1u(L^{-1}+R^{-1})\mathrm{d}\lambda+(p+u-w-H_1-H_2)q-\frac{1}{2}(p+h+u-H_1-H_2)qL(q)-\frac{k_m\eta_m^2}{2},\tag{4}$$

$$\mathrm{E}(\Pi_s^\Phi)=(w-c)q-(H_3+H_4)A-\frac{k_s\eta_s^2}{2};\tag{5}$$

当 $q\in[m_l,m_r]$ 时, 有

$$\mathrm{E}(\Pi_m^\Phi)=\frac{1}{2}\int_0^1[(p+h-H_1-H_2)L^{-1}-uR^{-1}]\mathrm{d}\lambda-\frac{1}{2}(h+2w+H_1+H_2-u-p)q-\frac{k_m\eta_m^2}{2},$$

$$\mathrm{E}(\Pi_s^\Phi)=(w-c)q-\frac{1}{2}q(H_3+H_4)-\frac{1}{2}(H_3+H_4)\int_0^1L^{-1}\mathrm{d}\lambda-\frac{k_s\eta_s^2}{2};$$

当 $q\in(m_r,d_r]$ 时, 有

$$\mathrm{E}(\Pi_m^\Phi)=\frac{1}{2}(p+h-H_1-H_2)\Big[\int_0^1L^{-1}\mathrm{d}\lambda+\int_{R(q)}^1R^{-1}\mathrm{d}\lambda\Big]-\frac{1}{2}\int_0^{R(q)}uR^{-1}\mathrm{d}\lambda+\frac{1}{2}(p+h+u-H_1-H_2)qR(q)-(h+w)q-\frac{k_m\eta_m^2}{2},$$

$$\mathrm{E}(\Pi_s^\Phi)=(w-c)q-\frac{1}{2}qR(q)(H_3+H_4)-\frac{1}{2}(H_3+H_4)\Big[\int_0^1L^{-1}\mathrm{d}\lambda+\int_{R(q)}^1R^{-1}\mathrm{d}\lambda\Big]-\frac{k_s\eta_s^2}{2}.$$

制造商的产品质量决策控制模型如下:

$$\max_{q,\eta_m,\vartheta}: \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi}),$$
$$\text{s.t. (IR)}\mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi}) \geqslant R_s. \tag{6}$$

其中: R_s 为供应商的保留效用, 且有 (IC)$\{w,\eta_s\} \in \arg\max \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})$.

供应商的产品质量决策控制模型如下:

$$\max_{w,\eta_s} \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi}),$$
$$\text{s.t. (IR)}\mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi}) \geqslant R_m. \tag{7}$$

其中: R_m 为制造商的保留效用, 且有 (IC)$\{q,\eta_m,\vartheta\} \in \arg\max \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})(q,\eta_m,\vartheta)$.

定理 2 在契约 $\varPhi$ 下的最优批发价格高于契约 N 下的最优批发价格, 否则供应商无激励性动机参与质量缺陷成本的分担.

证明 当 $q \in [d_l, m_l)$ 时, 有

$$\mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi}) = \mathrm{E}[\varPi_s^N - (H_3 + H_4)A],$$
$$A = \frac{1}{2}\int_0^{L(q)} L^{-1}\mathrm{d}\lambda + q - \frac{1}{2}qL(q),$$
$$\frac{\partial[(H_3+H_4)A]}{\partial w} =$$
$$A[(1-\vartheta)c_z\mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}}\bar{\varphi} + (1-\rho)(\mathrm{e}^{-q\varphi}\varphi - \mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}}\bar{\varphi})]\frac{\partial q}{\partial w} +$$
$$(H_3+H_4)\Big[1 - \frac{1}{2}L(q)\Big]\frac{\partial q}{\partial w}.$$

因为 $(\mathrm{e}^{-qx}x)' = (1-qx)\mathrm{e}^{-qx} > 0$, 故 $\mathrm{e}^{-q\varphi}\varphi > \mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}}\bar{\varphi}$, $\dfrac{\partial[(H_3+H_4)A]}{\partial w} < 0$. 由 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial w} = \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^N)}{\partial w} - \dfrac{\partial[(H_3+H_4)A]}{\partial w}$ 可得 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial w} > \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^N)}{\partial w}$. 令一阶条件 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial w}(w^{\varPhi *}) = 0$ 且 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^N)}{\partial w}(w^{N*}) = 0$, 则有 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial w}(w^{N*}) > \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^N)}{\partial w}(w^{N*}) = \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial w}(w^{\varPhi *}) = 0$. 因为 $\dfrac{\partial^2(H_3+H_4)}{\partial w^2} > 0$, $\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial w^2} < 0$, 故 $w^{\varPhi *} > w^{N*}$. □

下面将检验契约 $\varPhi$ 能否激励制造商和供应商提高质量努力水平, 从而提高最终产品的质量.

引理 1[18] 超模博弈的纯策略 Nash 均衡存在, 且对于策略空间上给定的序结构, 最大最小的纯策略 Nash 均衡存在.

定理 3 在契约 $\varPhi$ 下, 若 $\varphi_m(1-\eta_m) = \varphi_s(1-\eta_s)$, 则供应链成员关于努力选择的博弈存在 Nash 均衡, 且成员间的最优努力选择正相关.

证明 当 $q \in [d_l, m_l)$ 时, 有

$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})}{\partial \eta_m \partial \eta_s} =$$
$$A\Big\{\vartheta c_z q^2 \varGamma_m \varGamma_s \mathrm{e}^{-qk\varphi} - \frac{(c_z+c_r)\varGamma_m^2\varphi_s(1-\eta_m)}{\varphi}\times$$
$$(k^2\mathrm{e}^{-qk\varphi} - \mathrm{e}^{-q\varphi}) + \frac{(c_z+c_r)\varphi_m\varphi_s}{\varphi}\Big[\frac{\mathrm{e}^{-qk\varphi}}{\varphi} +$$
$$qk\mathrm{e}^{-qk\varphi} - \frac{\mathrm{e}^{-q\varphi}}{\varphi} - q\mathrm{e}^{-q\varphi}\Big]\Big(1 - \frac{2\varphi_m(1-\eta_m)}{\varphi}\Big)\Big\},$$
$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial \eta_m \partial \eta_s} =$$
$$A\Big\{(1-\vartheta)c_z q^2 \varGamma_m \varGamma_s \mathrm{e}^{-qk\varphi} - \frac{(c_z+c_r)\varGamma_s^2\varphi_m(1-\eta_s)}{\varphi}\times$$
$$(k^2\mathrm{e}^{-qk\varphi} - \mathrm{e}^{-q\varphi}) + \frac{(c_z+c_r)\varphi_m\varphi_s}{\varphi}\Big[\frac{\mathrm{e}^{-qk\varphi}}{\varphi} +$$
$$qk\mathrm{e}^{-qk\varphi} - \frac{\mathrm{e}^{-q\varphi}}{\varphi} - q\mathrm{e}^{-q\varphi}\Big]\Big(1 - \frac{2\varphi_s(1-\eta_s)}{\varphi}\Big)\Big\}.$$

由于 $(k^2\mathrm{e}^{-qk\varphi})'_k = k\mathrm{e}^{-qk\varphi}(2-qk\varphi) > 0$, $k^2\mathrm{e}^{-qk\varphi} \leqslant \mathrm{e}^{-q\varphi}$, $k \in [0,1]$, 当 $\varphi_m(1-\eta_m) = \varphi_s(1-\eta_s)$ 时, 可同时满足 $\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})}{\partial \eta_m \partial \eta_s}$ 和 $\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial \eta_m \partial \eta_s}$, 则期望利润 $\mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})$、$\mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})$ 关于努力水平 η_m、η_s 具有递增差分的性质, 即 $\mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})$、$\mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})$ 关于二元结构 (η_m,η_s) 单调递增, 而制造商和供应商努力选择 $\eta \in [0,1]$, 故制造商和供应商关于努力选择的博弈是超模的, 再由引理 1 可得存在最大最小纳什均衡. □

定理 3 表明: 契约 $\varPhi$ 亦能发挥制造商与供应商的努力选择互补效应, 且双方关于努力选择的博弈存在 Nash 均衡. $\mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})$、$\mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})$ 关于二元结构 (η_m,η_s) 递增性质确保了制造商和供应商在均衡博弈时, 为了获取更大的期望利润而选择高的努力水平.

定理 4 如果不计缺陷分析成本, 则 $\mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi}) + \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi}) = \mathrm{E}(\varPi^c)$, $\eta_m^{\varPhi *} = \eta_m^{c*}$, $\eta_s^{\varPhi} = \eta_s^{c*}$, $q^{\varPhi *} = q^{c*}$, 供应链协调.

证明 当 $c_r = 0$ 时, 易得 $\mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi}) + \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi}) = \mathrm{E}(\varPi^c)$, $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi^c)}{\partial \eta_m}(\eta_m^{c*}) = \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{c*}) + \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{c*}) = 0$.

将式 (5) 与 (6) 联立, 对 η_m 求一阶最优化, 可得 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{\varPhi *}) + \dfrac{\partial \mathrm{E}(\varPi_s^{\varPhi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{\varPhi *}) = 0$, 从而 $\eta_m^{\varPhi *} = \eta_m^{c*}$.

同理 $q^{\varPhi *} = q^{c*}$, 将式 (4) 与 (7) 联立, 对 η_s 求一阶最优化, 可得 $\eta_s^{\varPhi *} = \eta_s^{c*}$.

结合定理 3 与定理 4 可得, 如果缺陷分析成本为零, 则契约 $\varPhi$ 下供应链成员激励相容, 同时契约 $\varPhi$ 确保供应链的整体利润等于集中式的最优利润. □

定理 5 契约 $\varPhi$ 下存在唯一的协同阈值 $\bar{\varphi}^*$ 和召回成本分担比例 ϑ^*, 使得制造商和供应商都取得最优的期望利润和最优的努力水平.

证明 当 $q \in [d_l, m_l)$ 时, 令一阶条件

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\varPi_m^{\varPhi})}{\partial \eta_m} =$$
$$\Big[\vartheta c_z \varGamma_m k\mathrm{e}^{-qk\varphi} + \frac{(c_z+c_r)\varphi_m\varphi_s(1-\eta_s)}{\varphi^2}(\mathrm{e}^{-qk\varphi} -$$
$$\mathrm{e}^{-q\varphi}) - \frac{(c_z+c_r)\varGamma_m^2(1-\eta_m)}{q\varphi}(\mathrm{e}^{-qk\varphi}k - \mathrm{e}^{-q\varphi})\Big]A -$$
$$k_m\eta_m = 0, \tag{8}$$

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\Pi_s^{\Phi})}{\partial \eta_s}=$$
$$\Big[(1-\vartheta)c_z\Gamma_s k\mathrm{e}^{-qk\varphi}+\frac{(c_z+c_r)\varphi_m\varphi_s(1-\eta_m)}{\varphi^2}\times$$
$$(\mathrm{e}^{-qk\varphi}-\mathrm{e}^{-q\varphi})-\frac{(c_z+c_r)\Gamma_s^2(1-\eta_s)}{q\varphi}(\mathrm{e}^{-qk\varphi}k-$$
$$\mathrm{e}^{-q\varphi})\Big]A-k_s\eta_s=0, \tag{9}$$

其中 $A=\dfrac{1}{2}\displaystyle\int_0^{L(q)}L^{-1}\mathrm{d}\lambda+q-\dfrac{1}{2}qL(q)$.

集中式供应链中 $k_m\eta_m^{c*}=Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}\Gamma_m^{c*}$, $k_s\eta_m^{c*}=Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}\Gamma_s^{c*}$, 代入 $\dfrac{1}{\Gamma_m}\times\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m}+\dfrac{1}{\Gamma_s}\times\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_s^{\Phi})}{\partial \eta_s}=0$ 后化简可得

$$\frac{(c_z+c_r)}{q\varphi}(\mathrm{e}^{-qk\varphi}-\mathrm{e}^{-q\varphi})+\mathrm{e}^{-q\varphi}(c_r-c_z)-$$
$$c_r\mathrm{e}^{-qk\varphi}k=0. \tag{10}$$

令 $f(k)=\dfrac{(c_z+c_r)}{q\varphi}(\mathrm{e}^{-qk\varphi}-\mathrm{e}^{-q\varphi})+\mathrm{e}^{-q\varphi}(c_r-c_z)-c_r\mathrm{e}^{-qk\varphi}k$, $k\in[0,1]$, 有 $f'(k)=\mathrm{e}^{-qk\varphi}[-c_z-(2-kq\varphi)c_r]<0$, 由 $\mathrm{e}^{-q\varphi}<\dfrac{1}{1+q\varphi}$ 可得 $f(0)=\dfrac{(c_z+c_r)}{q\varphi}(1-\mathrm{e}^{-q\varphi})+\mathrm{e}^{-q\varphi}(c_r-c_z)>\dfrac{c_z+c_r}{q\varphi}-\dfrac{1}{1+q\varphi}\Big[\dfrac{c_z+c_r}{q\varphi}-c_r\Big]-c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}=\dfrac{c_z+2c_r}{1+q\varphi}-c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}>\dfrac{c_z}{1+q\varphi}-c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}>0$, $f(1)=-c_z\mathrm{e}^{-q\varphi}<0$, 故存在唯一的 $k\in(0,1)$, 使得 $f(k)=0$, 从而缺陷率阈值 $\bar{\varphi}^*=k^*\varphi$, 其中 k^* 满足式 (10).

将式 (9) 减式 (8) 即可解得 ϑ^*, 契约参数

$$\vartheta^*=\frac{1}{2}-((c_z+c_r)[\varphi_s(1-\eta_s)-\varphi_m(1-\eta_m)][1+$$
$$q\bar{\varphi}-(1+q\varphi)\mathrm{e}^{q(\bar{\varphi}-\varphi)}])/(2c_zq\bar{\varphi}\varphi).$$
□

推论 1　当缺陷分析成本为零时, 有: 1) $\bar{\varphi}^*=\varphi-\dfrac{1}{q}\ln(1+q\varphi)$, 且 $\bar{\varphi}^*(\varphi)$ 递增; 2) $\vartheta^*=\dfrac{\varphi_m(1-\eta_m)}{\varphi}$.

推论 1 表明, 随着制造商和供应商缺陷率的减少, 产品质量不断提升, 阈值 $\bar{\varphi}^*$ 减小, 契约 Φ 倾向于由质量缺陷的责任方承担全部召回成本.

推论 2　当 $\bar{\varphi}=\varphi$ 时, 即为固定比例成本分担模型 (F): 1) 供应链双方成员均存在削减努力投资的道德风险; 2) 供应商的努力水平 η_s^F 是 ϑ 的减函数; 3) 供应链双方成员的努力投资是原始缺陷率增函数.

证明　当 $q\in[d_l,m_l)$ 时, 若 $\bar{\varphi}=\varphi$, 则 $H_2=H_4=0$. 其中 $H_2=\rho(c_z+c_r)(\mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}}-\mathrm{e}^{-q\varphi})$, $H_4=(1-\rho)(c_z+c_r)(\mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}}-\mathrm{e}^{-q\varphi})$, $\rho=\varphi_m(1-\eta_m)/\varphi$.

1) 设 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^F)}{\partial \eta_m}(\eta_m^{F*},\eta_s^{F*})=0$, 将 $k_m\eta_m^{c*}=Ac_z\times\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}\Gamma_m^{c*}$, $k_s\eta_m^{c*}=Ac_z\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}\Gamma_s^{c*}$, $k=1$ 代入式 (8), 有

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^F)}{\partial \eta_m}(\eta_m^{c*},\eta_s^{c*})=Ac_z\Gamma_m^{c*}\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}(\vartheta-1)<0.$$

其中: $A=\dfrac{1}{2}\displaystyle\int_0^{L(q)}L^{-1}\mathrm{d}\lambda+q-\dfrac{1}{2}qL(q)$, $\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m^2}<0$. 则有 $\eta_m^{F*}<\eta_m^{c*}$. 同理, 可得 $\eta_s^{F*}<\eta_s^{c*}$.

2) 供应商的最优努力水平满足 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_s^F)}{\partial \eta_s}=(1-\vartheta)Ac_z\Gamma_s\mathrm{e}^{-q\varphi}-k_s\eta_s=0$, 由

$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}(\Pi_s^F)}{\partial \eta_s\partial\vartheta}=-Ac_z\Gamma_s\mathrm{e}^{-q\varphi}<0,\ \frac{\partial^2 \mathrm{E}(\Pi_s^F)}{\partial \eta_s^2}<0,$$

可得 $\dfrac{\partial \eta_s}{\partial\vartheta}=-\Big[\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\Pi_s^F)}{\partial \eta_s\partial\vartheta}\Big/\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\Pi_s^F)}{\partial \eta_s^2}\Big]<0$.

3) 证明方法与 2) 一致, 此处不再赘述. □

推论 2 表明: 在固定比例成本分担模型 (F) 中, 供应链双方均存在削减努力投资的道德风险. 随着产品质量不断提高, 供应链成员更应注意对对方努力水平的监督. 提高缺陷率阈值 $\bar{\varphi}$ 内供应商召回成本的承担比例, 将促使供应商提高努力投资水平.

推论 3　若 $\bar{\varphi}=0$, 则供应链成员双方均投资过剩[10].

证明方法与推论 2 的 1) 一致.

最后引入 Chao 等[9]定义的成本无效指数及质量无效指数, 从供应链总期望成本和质量努力后最终的产品缺陷率两个维度进一步比较模型 Φ 与模型 (F).

定义 1[9]　模型 K 的成本无效指数表示为 $C^K=\dfrac{\mathrm{SC}^K-\mathrm{SC}^c}{\mathrm{SC}^c}\times100\%$, 模型 K 的质量无效指数为 $Q^K=\dfrac{\Lambda_\Gamma^K-\Lambda_\Gamma^c}{\Lambda_\Gamma^c}\times100\%$. 其中: SC^K 和 Λ_Γ^K 分别为模型 K 下的供应链总期望成本和最终产品缺陷率; SC^c 和 Λ_Γ^c 分别为集中式供应链 C 下的供应链总期望成本和最终产品缺陷率.

由如上定义的成本无效指数和质量无效指数可知, $|C^K|$、$|Q^K|$ 的值越趋于零, 模型 K 越接近集中式供应链 C.

定理 6　$|C^{\Phi}|<|C^F|$, $|Q^{\Phi}|<|Q^F|$.

证明　$\mathrm{SC}^F-\mathrm{SC}^c=c_z(\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}-\mathrm{e}^{-q\varphi^{F*}})$, 由推论 2 中的 1) 可得 $\eta_m^{F*}<\eta_m^{c*}$, 即 $\mathrm{e}^{-q\varphi^{c*}}<\mathrm{e}^{-q\varphi^{F*}}$, $\mathrm{SC}^F-\mathrm{SC}^c>0$.

$$\mathrm{SC}^{\Phi}-\mathrm{SC}^c=c_z(1-\mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}})+(c_z+c_r)(\mathrm{e}^{-q\bar{\varphi}}-$$
$$\mathrm{e}^{-q\varphi^*})-c_z(1-\mathrm{e}^{-q\varphi}).$$

若 $c_r=0$, 则由定理 4 可得 $\eta_m^{\Phi*}<\eta_m^{c*}$, $\eta_s^{\Phi*}<\eta_s^{c*}$, 故 $\varphi^*=\varphi^{c*}$, $\mathrm{SC}^{\Phi}-\mathrm{SC}^c=0$, 显然 $|C^{\Phi}|<|C^F|$;

若 $c_r\neq0$, $\bar{\varphi}=k\varphi$, 则有 $\mathrm{SC}^F>\mathrm{SC}^{\Phi}$, 从而 $|C^{\Phi}|<|C^F|$, $|Q^F|=\Big|\dfrac{\varphi_m(\eta_m^{c*}-\eta_m^{F*})+\varphi_s(\eta_s^{c*}-\eta_s^{F*})}{\Lambda_\Gamma^{c*}}\Big|\times100\%$, 其中 k 应满足式 (10).

在式 (8) 中有 $\mathrm{e}^{-qk\varphi}>\mathrm{e}^{-q\varphi}$, $\mathrm{e}^{-qk\varphi}k>\mathrm{e}^{-q\varphi}$, 固定比例成本分担模型中 $\bar{\varphi}=\varphi$, 由此可得 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m}>\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^F)}{\partial \eta_m}$.

令 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{\Phi*})=\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^F)}{\partial \eta_m}(\eta_m^{F*})=0$, 则有 $\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{F*})>\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^F)}{\partial \eta_m}(\eta_m^{F*})=0=\dfrac{\partial \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m}(\eta_m^{\Phi*})$,

又因为 $\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}(\Pi_m^{\Phi})}{\partial \eta_m^2} < 0$, 故有 $\eta_m^{F*} < \eta_m^{\Phi*}$. 同理, 可得 $\eta_s^{F*} < \eta_s^{\Phi*}$, 因此 $|Q^{\Phi}| < |Q^F|$. □

6 结 论

本文分析了LR-型模糊外部需求下, 如果供应商不分担缺陷产品的召回成本, 则供应链成员努力投资不足. 通过引入可变比例成本分担契约 Φ, 发现在分散模式下制造商和供应商的努力选择互补, 且努力选择博弈存在Nash均衡. 在不计缺陷分析成本时, 契约 Φ 实现供应链成员激励相容、供应链协调. 另外, 确定了可变分担比例解析解, 缺陷率阈值. 在固定比例成本承担契约中, 供应链成员均存在削减努力投资的道德风险, 随着产品质量的不断提高, 更应注意对对方努力水平的监督. 契约 Φ 的成本无效指数和质量无效指数均低于固定比例成本分担合同, 契约 Φ 比固定比例成本分担合同更有效. 本文是基于制造商和供应商风险中性的假设, 后续的研究可以考虑供应链成员风险偏好特征或者服务水平选择的收益共享模型等.

参考文献(References)

[1] Yehekel Y. Retailer’s choice of product variety and exclusive dealing under asymmetric information[J]. RAND J of Economics, 2008, 39(1): 115-143.

[2] Federgruen A. Competition under generalized attraction models: Applications to quality competition under yield uncertainty[J]. Management Science, 2009, 55(12): 2028-2043.

[3] 马士华, 于建红. 产品定价及质量投资决策序列对两级装配系统的影响研究[J]. 管理学报, 2012, 9(11): 1697-1705.
(Ma S H, Yu J H. Impact of pricing and decision sequence of quality investment on two-echelon assembly system[J]. Chinese J of Management, 2012, 9(11): 1697-1705.)

[4] 刚号, 唐小我. 基于制造商“努力”的供应链最优策略选择[J]. 中国管理科学, 2014, 22(4): 36-41.
(Gang H, Tang X W. The analysis of supply chain optimal strategy based on manufacturers’ effort[J]. Chinese J of Management Science, 2014, 22(4): 36-41.)

[5] Reybiers D J, Tapiero C S. The delivery and control of quality in supplier producer contracts[J]. Management Science, 1995, 41(10): 1581-1589.

[6] Cachon G P, Larivice M A. Contracting to assure supply: How to share demand forecasts in a supply chain[J]. Management Science, 2001, 47(5): 629-646.

[7] Cachon G P, Larivice M A. Supply chain coordination with revenue sharing contracts: Strengths and limitations[J]. Management Science, 2005, 51(1): 30-44.

[8] 朱立龙, 于涛, 夏同水. 两级供应链产品质量控制契约模型分析[J]. 中国管理科学, 2012, 21(1): 71-79.
(Zhu L L, Yu T, Xia T S. Product quality control model in a two-echelon supply chain[J]. Chinese J of Management Science, 2012, 21(1): 71-79.)

[9] Chao G H, Iravani S M R, Savaskan R C. Quality improvement incentives and product recall cost sharing contracts[J]. Management Science, 2009, 55(7): 1122-1138.

[10] 刘学勇, 熊中楷, 熊榆. 线性需求下的产品召回成本分担和质量激励[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(7): 1400-1407.
(Liu X Y, Xiong Z K, Xiong Y. Cost sharing and quality improvement incentives in the products recall considering the linear demand[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2012, 32(7): 1400-1407.)

[11] 桑圣举, 张强, 武建章. 模糊需求下的供应链收益共享契约模型[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(1): 145-152.
(Sang S J, Zhang Q, Wu J Z. Revenue sharing contract of supply chain with fuzzy demand[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(1): 145-152.)

[12] 桑圣举, 张强. 模糊需求下 n 级供应链的收益共享契约机制研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(9): 127-136.
(Sang S J, Zhang Q. Revenue sharing contract forn-echelon supply chain with fuzzy demand[J]. Chinese J of Management Science, 2013, 21(9): 127-136.)

[13] 桑圣举, 张强, 武建章. 模糊需求环境下供应链成员间的协调机制分析[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 356-379.
(Sang S J, Zhang Q, Wu J Z. Coordination mechanism analysis for supply chain with fuzzy demand[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(2): 356-379.)

[14] 桑圣举, 张强. 模糊需求环境下的供应链契约协调机制研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(3): 63-72.
(Sang S J, Zhang Q. Coordinating supply chain contracts with fuzzy demand[J]. J of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(3): 63-72.)

[15] 桑圣举. 模糊需求下供应链合作博弈的收益分配策略[J]. 电子科技大学学报: 社科版, 2014, 16(1): 39-44.
(Sang S J. Profit allocation in supply chain cooperative games with fuzzy demand[J]. J of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition, 2014, 16(1): 39-44.)

[16] Gurnani H, Erkoc M. Supply contracts in manufacturer retailer interaction with manufacture quality and retailer effort induced demand[J]. Naval Research Logistics, 2008, 55(3): 200-217.

[17] Dubois D, Pzade H. Fuzzy sets and systems: Theory and applications[M]. New York: Academic Press, 1980: 53-54.

[18] Vives X. Nash equilibrium in oligopoly games with monotone best responses[Z]. CARESS Working Paper, University of Pennsylvania, 1985.

(责任编辑：闫 妍)