

# 控制与决策

Control and Decision

零售商定价/订货决策下竞争/互补制造商采用RFID的策略研究

张李浩, 张诚, 陈靖

引用本文:

张李浩, 张诚, 陈靖. 零售商定价/订货决策下竞争/互补制造商采用RFID的策略研究[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 331–343.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0584>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型](#)

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

[考虑成员企业风险态度的制造商资金约束闭环供应链定价与回收决策](#)

Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participators' risk attitudes and manufacturer capital constraint

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1305>

[模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型](#)

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

*控制与决策*. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

[风险规避制造商市场入侵策略](#)

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

*控制与决策*. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

[制造商竞争下创新投资对零售商信息分享策略的影响](#)

Optimal information sharing strategy for retailer under competitive manufacturers' innovation investment

*控制与决策*. 2020, 35(12): 3006–3016 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0377>

# 零售商定价/订货决策下竞争/互补制造商 采用 RFID 的策略研究

张李浩<sup>1†</sup>, 张 诚<sup>1</sup>, 陈 靖<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306; 2. 上海外国语大学 国际工商管理学院, 上海 200083)

**摘 要:** 以一个零售商主导的两级供应链为研究对象, 构建两个生产竞争性或互补性产品的制造商是否采用无线射频识别技术 (radio frequency identification, RFID) 时链上成员的收益模型, 分析求解出各种情景下零售商定价/订货决策时制造商的最优批发价和 RFID 标签成本分摊系数, 以及零售商的最优零售价/订货量, 进而得出链上各成员的最大收益, 并探讨两个制造商采用 RFID 的均衡策略. 研究发现: 相较于订货决策, 零售商采用定价决策能够促使制造商采用 RFID 技术; 当零售商采用定价决策时, 两种产品间的影响系数越大, 两个制造商越倾向于均采用 RFID 技术; 当 RFID 成本或产品错放率在某一范围内时, 若零售商选择定价 (订货) 决策且销售竞争 (互补) 性产品, 则制造商采用 RFID 技术能够提升零售商的收益.

**关键词:** 库存错放; 无线射频识别技术; 定价决策; 订货决策; Stackelberg; 均衡策略

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0584

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



**引用格式:** 张李浩, 张诚, 陈靖. 零售商定价/订货决策下竞争/互补制造商采用 RFID 的策略研究 [J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 331-343.

## Equilibrium strategies for RFID adoption of two competitive/complementary manufacturers with a retailer's pricing/ordering decision

ZHANG Li-hao<sup>1†</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>

(1. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. SISU School of Business and Management, Shanghai International Studies University, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** This paper considers a two-stage supply chain with two competitive or complementary manufacturers and a dominant retailer, who has an inventory misplacement problem. Based on whether the two manufacturers adopt RFID technology, we establish four revenue models and derive two manufacturers' optimal wholesale prices and RFID cost-sharing coefficient in each scenario, as well as the retailer's optimal retail prices or order quantities under the retailer's pricing or ordering decision. We obtain the supply chain players' optimal revenues and explore the equilibrium strategies for RFID adoption of the competitive or complementary manufacturers. We find that the retailer choosing the pricing decision can promote the manufacturers to adopt RFID technology compared with choosing the ordering decision. Moreover, when the retailer chooses the pricing decision, the higher the influence coefficient between the two products is, the more likely the two manufacturers are to adopt RFID technology. Furthermore, when the RFID cost or the misplacement rate is in a certain range, if the retailer chooses the pricing (ordering) decision and sells competitive (complementary) products, the retailer can obtain a higher revenue if the manufacturers adopt RFID technology.

**Keywords:** inventory misplacement; radio frequency identification; pricing decision; ordering decision; Stackelberg; equilibrium strategies

## 0 引 言

近年来, 供应链中涌现出越来越多的大型零售商, 如沃尔玛、家乐福等, 逐渐形成了以大型零售商

为核心的供应链. 这些大型零售商往往从多个制造商处采购产品, 改变了原有供应链上下游成员的权力结构, 使得零售商成为供应链中的 Stackelberg 博弈领

收稿日期: 2020-05-17; 录用日期: 2020-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71971137, 71601114, 71702106); 上海市“科技创新行动计划”软科学重点项目 (21692109300); 上海市“晨光计划”项目 (20CG56).

责任编辑: 李勇建.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lhzhang@shmtu.edu.cn.

导者,制造商成为博弈的跟随者<sup>[1]</sup>.与此同时,零售商因商品订购数量大以及顾客选购商品等原因,极易产生库存错放问题.库存错放是指一部分商品被放置在错误的位置,不能及时满足顾客的需求.库存错放导致商品的实际库存量存在不确定性,企业需要通过增加库存量以降低其因库存错放而引起的缺货损失,这无疑增大了供应链企业的库存成本. Cannella等<sup>[2]</sup>通过案例研究指出,库存错放会使零售商的收益减少10%左右.

RFID是解决零售企业库存错放问题最有效的技术<sup>[3]</sup>,其通过RFID扫描器能够实时监测商品的状态和位置,在零售行业得到了广泛应用.尽管沃尔玛、麦德龙等大型零售企业已要求其上游制造商采用RFID技术以消除商品的错放问题,然而供应链是否采用RFID一般由上游的制造商决定<sup>[4]</sup>,并且零售商对其销售的所有商品普及RFID技术也需耗时数十年甚至更久. Shin等<sup>[5]</sup>在研究中提及,沃尔玛从2003年开始将RFID技术应用于“托盘级”商品,直至2010年才开始将该技术应用于“物品级”商品,到目前为止沃尔玛仍有大量商品没有粘贴RFID标签.因此,零售商在完备RFID技术前必然会经历一段仅部分产品粘贴RFID标签的时期.当市场上存在两个制造商为一个主导供应链的零售商供货时,由于零售商存在库存错放问题并要求两个制造商采用RFID技术,此时两个制造商是否采用RFID技术存在4种情景:两个制造商均不采用RFID( $N$ 情景)、仅制造商采用RFID( $S_i$ 情景,  $i = 1, 2$ )以及制造商均采用RFID( $A$ 情景).此时,两个提供互补性或竞争性产品的制造商是否存在采用RFID的均衡策略?零售商能否通过选择定价决策或订货决策,以应对制造商的RFID均衡策略?零售商采用何种决策方式以及销售何种性质产品,更有利于RFID技术的推广?

关于RFID采用策略的文献十分丰富. Chen等<sup>[6]</sup>针对一个风险中性的制造商和一个风险规避的零售商组成的供应链,探讨链上企业采用RFID技术消除库存错放的投决策问题,并采用了收益共享契约对供应链进行协调; Fan等<sup>[7]</sup>考虑了一个由单供应商和一个向客户销售单一产品的零售商组成的供应链,研究发现当零售商和制造商共同分摊RFID技术成本时,零售商对RFID成本分摊比例更敏感,但他们仅以单个上游企业和单个零售商组成的两级供应链为研究对象,忽略了多个上游企业间的竞争或互补因素对供应链成员RFID技术采用决策的影响. 张李浩等<sup>[8-9]</sup>考虑了由一个垄断制造商和两个竞争零售商

组成的供应链以及两条竞争供应链,探讨了供应链采用RFID技术的均衡策略,但是他们均假设上游作为Stackelberg博弈的领导者且零售商作为跟随者,忽略了零售商作为供应链成员间博弈的领导者这一问题.事实上,近年来供应链的核心企业开始逐渐从上游企业转变为下游零售商.此外,以上文献仅以竞争零售商供应链或竞争供应链为研究对象并探讨链上成员RFID的采用策略,忽略了竞争或互补制造商供应链的RFID均衡策略问题,进一步地,没有考虑零售商能否通过选择定价决策或订货决策以应对制造商的RFID采用问题.

供应链成员的订货和定价决策一直是学术研究的热点问题. Hsieh等<sup>[10]</sup>研究了需求不确定下多渠道供应链销售竞争性产品的定价与订货决策问题. Wei等<sup>[11]</sup>考虑了一个供应商通过两个零售商向顾客提供有限服务量的供应链,探讨了定价、订货与服务量分配的两阶段博弈均衡. Chen等<sup>[12]</sup>研究了仅零售渠道、仅直销渠道和双渠道3种渠道结构供应链成员的最优定价决策,比较分析了不同渠道结构下各成员利润和消费者剩余等绩效. Kim等<sup>[13]</sup>以供应链物流网络中的不确定性为背景,探讨了零售商最优订购量.但上述文献忽略了零售商的库存错放问题,从而缺乏考虑供应链采用RFID技术的定价和订货决策问题.

本文以一个Stackelberg领导者的零售商和两个制造商组成的供应链为研究对象,构建两个生产竞争性或互补性产品的制造商是否采用RFID技术的收益模型,分析求解出零售商选择定价或订货决策时各成员的最优收益,得出两个制造商采用RFID的均衡策略,并探讨了零售商采用何种决策方式及销售何种性质产品更能促使制造商采用RFID技术.

## 1 模型描述及假设

以两个制造商和一个零售商组成的两级供应链为研究对象,制造商 $i$ 和制造商 $j$  ( $i = 1, 2$ 且 $j = 3 - i$ )分别通过零售商销售竞争性或互补性的短生命周期商品(如牛奶,面包,服装等).零售商作为供应链Stackelberg博弈的领导者,两个制造商作为跟随者.借鉴文献[14],假设供应链成员为风险中性,即此时供应链成员的收益等于其收益函数的期望值.此外,假设供应链成员完全理性,链上成员间的信息完全对称且均以自身收益最大化进行决策.

假设制造商的单位成本为 $c$ ,若其不采用RFID技术,则零售商的商品错放率为 $\alpha$ (为了确保产品的订货量为正,错放率需满足 $\alpha \in (0, \bar{\alpha})$ ,其中 $\bar{\alpha} = 1 - c/a$ ).此时,若零售商向制造商 $i$ 订购 $q_i$ 个商品时,则

仅有  $(1 - \alpha)q_i$  个商品能够正常销售,  $\alpha q_i$  个商品由于错放而无法进行销售. 由于本文考虑的是短生命周期的商品, 假设错放后的商品残值为零. 考虑零售商存在两种决策方式: 定价决策和订货决策. 在定价决策中, 为了弥补错放商品引起的缺货损失, 零售商根据以往的销售经验和统计数据, 修正商品  $i$  的订货量<sup>[15-16]</sup>为

$$q_i(p_i, p_j) = (a - p_i + dp_j)/(1 - \alpha). \quad (1)$$

在订货决策中, 零售商销售商品  $i$  的零售价格<sup>[17]</sup>为

$$p_i(q_i, q_j) = a - (1 - \alpha)q_i - d(1 - \alpha)q_j.$$

其中:  $a(a > 0)$  为商品的市场最大需求量,  $d(d \in (-1, 1))$  为两个产品间的影响系数.  $d \in (-1, 0)$  表示两个制造商生产互补性产品,  $d \in (0, 1)$  表示两个制造商生产竞争性产品,  $d = 0$  表示两个制造商生产不相关的产品, 本文不予考虑.  $d$  的绝对值越大, 表示两个产品的竞争性或互补性越强.

若制造商  $i$  采用 RFID 技术, 则零售商需要与其分摊 RFID 技术的成本<sup>[18]</sup>, 假设零售商的分摊比例为  $(1 - \varphi_i)$ , 则制造商  $i$  承担  $\varphi_i$  比例的 RFID 技术成本. 当制造商  $i$  采用 RFID 后, 其生产的每个产品均被贴上一个单位成本为  $c_t$  RFID 的标签. Wang 等<sup>[19]</sup> 通过案例分析发现, 企业采用 RFID 技术后, 可以使商品准确率提高至 95% 左右. 因此, 本文假设制造商  $i$  采用 RFID 技术后, 其销售的商品  $i$  不存在错放问题, 即  $\alpha = 0$ <sup>[4,20]</sup>.

供应链成员的决策顺序为: 1) 零售商要求制造商  $i$  采用 RFID 技术, 并分摊  $(1 - \varphi_i)$  比例的 RFID 成本; 2) 两个制造商同时决策是否采用 RFID 技术, 并承担  $\varphi_i$  比例的 RFID 成本; 3) 零售商决策商品  $i$  的零售

价格  $p_i$  (如果零售商采用定价决策) 或订货量  $q_i$  (如果零售商采用订货决策); 4) 两个制造商同时决策批发价格  $w_i$  (在现实生活中, 尽管同时做决策非常罕见, 但是当两个制造商独立制定批发价格时即可视为两个制造商同时决策批发价格<sup>[4,21]</sup>); 5) 两个制造商获得批发收益并将产品运送给零售商, 零售商销售产品后获得零售收益.

## 2 供应链成员的收益模型

本文的博弈分为两层: 第1层是零售商为主导与两个制造商间的 Stackelberg 主从博弈, 第2层是两个制造商之间的 Nash 均衡博弈. 首先联立求解两个制造商的收益模型, 得出各自的批发价格表达式; 然后采用逆向归纳法求解得出零售商的最优定价/订货量; 最后得到各成员的最大收益和最优策略, 具体表达式如表1和表2所示.

### 2.1 制造商均不采用 RFID( $N$ 情景) 的收益模型

当两个制造商均不采用 RFID 技术, 即  $N$  情景时, 两种产品均存在库存错放问题. 制造商  $i$  给零售商的批发价格为  $w_{i-x}^N$  (其中:  $x \in \{P, Q\}$ ,  $P$  表示零售商采用定价决策,  $Q$  表示零售商采用订货决策), 零售商制定商品  $i$  的零售价和订货量分别为  $p_{i-x}^N$  和  $q_{i-x}^N$ , 制造商  $i$  和零售商的收益函数分别为  $\pi_{i-x}^N$  和  $\pi_{r-x}^N$ , 则有

$$\begin{cases} \pi_{i-x}^N = (w_{i-x}^N - c)q_{i-x}^N, \\ \pi_{r-x}^N = \sum_{i=1}^2 (p_{i-x}^N(1 - \alpha)q_{i-x}^N - w_{i-x}^N q_{i-x}^N). \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} q_{i-P}^N &= (a - p_{i-P}^N + dp_{j-P}^N)/(1 - \alpha), \\ p_{i-Q}^N &= a - (1 - \alpha)q_{i-Q}^N - d(1 - \alpha)q_{j-Q}^N. \end{aligned}$$

表1 定价决策下供应链成员最优决策变量和最大收益表达式

最优解	$N$	$S_i$	$A$
$p_{1-P}^*$	$\frac{(3-\alpha-2d)a+c(1-d)}{2(1-d)(2-\alpha-d)}$	$\frac{[3(2-\alpha)-(1-\alpha)d-2d^2]a+(1-d)[(2-\alpha+d)c+(2-\alpha)c_t]}{2(1-d)(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{(3-2d)a+(1-d)(c+c_t)}{2(1-d)(2-d)}$
$p_{2-P}^*$	$\frac{(3-\alpha-2d)a+c(1-d)}{2(1-d)(2-\alpha-d)}$	$\frac{(6-2\alpha-d-2d^2)a+(1-d)[(2+d)c+dc_t]}{2(1-d)(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{(3-2d)a+(1-d)(c+c_t)}{2(1-d)(2-d)}$
$w_{1-P}^*$	$\frac{(1-\alpha)a+(3-2\alpha-d)c}{2(2-\alpha-d)}$	$\frac{[(2-\alpha+d)a+(6-3\alpha+d-d^2)c-(2-\alpha-d^2)c_t]/[2(4-2\alpha-d^2)]}{(1-\alpha)(2+d)a+[6-4\alpha+(1-\alpha)d-d^2]c+(1-\alpha)dc_t}$	$\frac{a+(3-d)c-(1-d)c_t}{2(2-d)}$
$w_{2-P}^*$	$\frac{(1-\alpha)a+(3-2\alpha-d)c}{2(2-\alpha-d)}$	$\frac{(1-\alpha)(2+d)a+[6-4\alpha+(1-\alpha)d-d^2]c+(1-\alpha)dc_t}{2(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{a+(3-d)c-(1-d)c_t}{2(2-d)}$
$\pi_{1-P}^*$	$\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)\left(\frac{(1-\alpha)a-(1-d)c}{2(2-\alpha-d)}\right)^2$	$\left(\frac{(2-\alpha+d)a-(2-\alpha-d-d^2)c-(2-\alpha-d^2)c_t}{2(4-2\alpha-d^2)}\right)^2$	$\left(\frac{a-(1-d)(c+c_t)}{2(2-d)}\right)^2$
$\pi_{2-P}^*$	$\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)\left(\frac{(1-\alpha)a-(1-d)c}{2(2-\alpha-d)}\right)^2$	$\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)\left(\frac{\{(1-\alpha)(2+d)a-[2-(1-\alpha)d-d^2]c\}+(1-\alpha)dc_t}{(1-\alpha)dc_t}/[2(4-2\alpha-d^2)]\right)^2$	$\left(\frac{a-(1-d)(c+c_t)}{2(2-d)}\right)^2$
$\pi_{r-P}^*$	$\frac{[(1-\alpha)a-(1-d)c]^2}{2(1-\alpha)(1-d)(2-\alpha-d)}$	$\left(\frac{a}{4(1-d)} - \frac{c+c_t}{4}\right)\left(\frac{[(2-\alpha+d)a-(2-\alpha-d-d^2)c-(2-\alpha-d^2)c_t]/(4-2\alpha-d^2)}{(1-\alpha)dc_t}/(4-2\alpha-d^2)\right)^2 + \left(\frac{a}{4(1-d)} - \frac{c}{4(1-\alpha)}\right)\left(\frac{\{(1-\alpha)(2+d)a-[2-(1-\alpha)d-d^2]c\}+(1-\alpha)dc_t}{(1-\alpha)dc_t}/(4-2\alpha-d^2)}{(1-\alpha)dc_t}/(4-2\alpha-d^2)}\right)^2$	$\frac{[a-(1-d)(c+c_t)]^2}{2(1-d)(2-d)}$

表2 订货决策下供应链成员最优决策变量和最大收益表达式

最优解	$N$	$S_i$	$A$
$q_{1-Q}^*$	$\frac{(1-\alpha)a-c}{2(1+d)(1-\alpha)(2-\alpha-d)}$	$\frac{(1-d)(2-\alpha+d)a-(2-\alpha-d-d^2)c-(2-\alpha-d^2)c_t}{2(1-d^2)(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{a-c-c_t}{2(2+d-d^2)}$
$q_{2-Q}^*$	$\frac{(1-\alpha)a-c}{2(1+d)(1-\alpha)(2-\alpha-d)}$	$\frac{(1-\alpha)(2-d-d^2)a-(2+\alpha d-d-d^2)c+(1-\alpha)dc_t}{2(1-\alpha)(1-d^2)(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{a-c-c_t}{2(2+d-d^2)}$
$w_{1-Q}^*$	$\frac{(1-d)(1-\alpha)a+(3-2\alpha-d)c}{2(2-\alpha-d)}$	$\frac{(1-d)(2-\alpha+d)a+(6-3\alpha+d-d^2)c-(2-\alpha-d^2)c_t}{2(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{(1-d)a+(3-d)c-(1-d)c_t}{2(2-d)}$
$w_{2-Q}^*$	$\frac{(1-d)(1-\alpha)a+(3-2\alpha-d)c}{2(2-\alpha-d)}$	$\frac{(1-\alpha)(2-d-d^2)a+[6-4\alpha+(1-\alpha)d-d^2]c+(1-\alpha)dc_t}{2(4-2\alpha-d^2)}$	$\frac{(1-d)a+(3-d)c-(1-d)c_t}{2(2-d)}$
$\pi_{1-Q}^*$	$(1-\alpha)(1-d^2)(q_{1-Q}^{N*})^2$	$(1-d^2)(q_{1-Q}^{S_i*})^2$	$(1-d^2)(q_{1-Q}^{A*})^2$
$\pi_{2-Q}^*$	$(1-\alpha)(1-d^2)(q_{2-Q}^{N*})^2$	$(1-\alpha)(1-d^2)(q_{2-Q}^{S_i*})^2$	$(1-d^2)(q_{2-Q}^{A*})^2$
$\pi_{r-Q}^*$	$\frac{[(1-\alpha)a-c]^2}{2(1+d)(1-\alpha)(2-\alpha-d)}$	$\frac{a-c-c_t}{2}q_{1-Q}^* + \frac{(1-\alpha)a-c}{2}q_{2-Q}^*$	$\frac{(a-c-c_t)^2}{2(2+d-d^2)}$

为了探讨库存错放率 $\alpha$ 和两个产品间的影响系数 $d$ 对供应链各成员最优决策变量和最大收益的影响,得到如下推论:

**推论1** 零售商采用定价决策时:

$$1) \frac{\partial p_{i-P}^{N*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial \pi_{r-P}^{N*}}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial w_{i-P}^{N*}}{\partial \alpha} < 0, \text{且有}$$

$$\frac{\partial \pi_{i-P}^{N*}}{\partial \alpha} \begin{cases} \geq 0, \alpha \in \left(0, 1 - \frac{c + \sqrt{(a+c)c}}{a}(1-d)\right]; \\ < 0, \alpha \in \left(1 - \frac{c + \sqrt{(a+c)c}}{a}(1-d), \bar{\alpha}\right). \end{cases}$$

$$2) \frac{\partial p_{i-P}^{N*}}{\partial d} > 0, \frac{\partial w_{i-P}^{N*}}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{i-P}^{N*}}{\partial d} > 0, \text{且有}$$

$$\frac{\partial \pi_{r-P}^{N*}}{\partial d} \begin{cases} \leq 0, d \in (-1, 1 - a(1-\alpha)/c]; \\ > 0, d \in (1 - a(1-\alpha)/c, 1). \end{cases}$$

零售商采用订货决策时:

$$1) \frac{\partial \pi_{r-Q}^{N*}}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial w_{i-Q}^{N*}}{\partial \alpha} < 0, \text{且有}$$

$$\frac{\partial q_{i-Q}^{N*}}{\partial \alpha} \begin{cases} \geq 0, \alpha \in \left(0, 1 - \sqrt{\frac{c(3-d-2\alpha)}{a}}\right]; \\ < 0, \alpha \in \left(1 - \sqrt{\frac{c(3-d-2\alpha)}{a}}, \bar{\alpha}\right); \end{cases}$$

$$\frac{\partial \pi_{i-Q}^{N*}}{\partial \alpha} \begin{cases} \geq 0, \alpha \in (0, 1 - \sqrt{c(3-d-2\alpha)/a}); \\ < 0, \alpha \in (1 - \sqrt{c(3-d-2\alpha)/a}, \bar{\alpha}). \end{cases}$$

$$2) \frac{\partial w_{i-Q}^{N*}}{\partial d} > 0, \text{且有}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial q_{i-Q}^{N*}}{\partial d} \leq 0 \text{ 且 } \frac{\partial \pi_{r-Q}^{N*}}{\partial d} \leq 0, d \in (-1, (1-\alpha)/2]; \\ \frac{\partial q_{i-Q}^{N*}}{\partial d} > 0 \text{ 且 } \frac{\partial \pi_{r-Q}^{N*}}{\partial d} > 0, d \in ((1-\alpha)/2, 1); \end{cases}$$

$$\frac{\partial \pi_{i-Q}^{N*}}{\partial d} \begin{cases} \leq 0, d \in (-1, (1 - \sqrt{4\alpha - 3})/2]; \\ > 0, d \in ((1 - \sqrt{4\alpha - 3})/2, 1). \end{cases}$$

由推论1可以发现:当零售商选择定价决策时,随着产品错放率的上升,零售商的收益下降,零售价

格上升,批发价格下降.这是因为错放产品引起的浪费势必会降低零售商的收益;错放的产品增加了可正常销售产品的实际成本,从而零售商需要提高零售价格以应对成本的上涨;错放问题降低了下游企业可销售产品的数量,此时制造商通过降低批发价格以鼓励零售商多订货.当错放率较低 $\left(\alpha \in \left(0, 1 - \frac{c + \sqrt{(a+c)c}}{a}(1-d)\right)\right)$ 时,零售商愿意订购更多的产品,从而制造商的收益会随着错放率的增大而上升;当错放率很高 $\left(\alpha \in \left(1 - \frac{c + \sqrt{(a+c)c}}{a}(1-d), \bar{\alpha}\right)\right)$ 时,错放问题使得零售商的损失太大,即使制造商设定很低的批发价格也无法促使零售商订货量的增加,从而制造商的收益下降.同理,零售商选择订货决策时,其订货量和制造商的收益均随着错放率的上升先增大后减小,零售商的收益和批发价格均随着错放率的上升而下降.

零售商选择定价决策时,随着 $d$ 的增大,即产品的同质化上升,产品的批发价格和零售价格也增大,这是因为两个同质化的制造商与主导供应链的零售商在博弈中拥有了更多的权力,因此获取了更高的批发价格.零售商选择订货决策时,随着产品互补程度的降低,制造商的收益、零售商的订货量和收益也随之下降,这是因为零售商销售互补程度越高的两种产品时,顾客同时购买这两种产品的可能性越大,从而产品间的彼此促销作用增强,最终增加了零售商的订货量和链上成员的收益.

## 2.2 仅制造商采用RFID( $S_i$ 情景)的收益模型

由于两个Nash博弈的制造商拥有相同的市场地位,仅制造商1或仅制造商2生产的产品粘贴RFID标签是对称的,本文仅探讨制造商1采用RFID技术,即 $S_1$ 情景.此时,产品1在销售的过程中不存在错放问

题,但是零售商需要为制造商1分摊 $(1 - \varphi_x^{S_1})$ 比例的RFID成本,制造商1承担 $\varphi_x^{S_1}$ 比例的RFID成本;商品2在销售的过程中仍存在错放问题. 假设制造商*i*给零售商的批发价为 $w_{i-x}^{S_1}$ ,零售商制定商品*i*的零售价格和订货量分别为 $p_{i-x}^{S_1}$ 和 $q_{i-x}^{S_1}$ . 记 $\pi_{i-x}^{S_1}$ 和 $\pi_{r-x}^{S_1}$ 分别为制造商*i*和零售商的收益函数,有

$$\begin{cases} \pi_{1-x}^{S_1} = (w_{1-x}^{S_1} - \varphi_x^{S_1} c_t - c)q_{1-x}^{S_1}, \\ \pi_{2-x}^{S_1} = (w_{2-x}^{S_1} - c)q_{2-x}^{S_1}, \\ \pi_{r-x}^{S_1} = (p_{1-x}^{S_1} - (1 - \varphi_x^{S_1})c_t - w_{1-x}^{S_1})q_{1-x}^{S_1} + \\ \quad p_{2-x}^{S_1}(1 - \alpha)q_{2-x}^{S_1} - w_{2-x}^{S_1}q_{2-x}^{S_1}. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} q_{1-P}^{S_1} &= a - p_{1-P}^{S_1} + dp_{2-P}^{S_1}, \\ q_{2-P}^{S_1} &= (a - p_{2-P}^{S_1} + dp_{1-P}^{S_1}) / (1 - \alpha), \\ p_{1-Q}^{S_1} &= a - q_{1-Q}^{S_1} - d(1 - \alpha)q_{2-Q}^{S_1}, \\ p_{2-Q}^{S_1} &= a - (1 - \alpha)q_{2-Q}^{S_1} - dq_{1-Q}^{S_1}. \end{aligned}$$

依据第2.1节的博弈思路,可以得到 $S_1$ 情景时链上成员最优决策变量和最大收益表达式. 尽管制造商1制定的批发价格为 $w_{1-x}^{S_1}$ ,但是每单位产品制造商1需要承担 $\varphi_x^{S_1} c_t$ 的RFID成本,因此其销售每单位产品的实际批发价格为 $w'_{1-x}^{S_1} = w_{1-x}^{S_1} - \varphi_x^{S_1} c_t$ ,后续仅对实际批发价格 $w'_{1-x}^{S_1}$ 进行分析讨论,相关表达式如表1所示. 进一步地,探讨库存错放率 $\alpha$ 和RFID成本 $c_t$ 对供应链各成员最优决策变量和最大收益的影响,如推论2所示.

**推论2** 零售商采用定价决策时:

$$1) \frac{\partial p_{1-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial p_{2-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial \pi_{r-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial w'_{1-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial w_{2-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial \pi_{1-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \text{且有}$$

$$\frac{\partial \pi_{2-P}^{S_1*}}{\partial \alpha} \begin{cases} > 0, \alpha \in (0, \bar{\alpha}_P^{S_1}); \\ < 0, \alpha \in (\bar{\alpha}_P^{S_1}, \bar{\alpha}). \end{cases}$$

$$2) \frac{\partial p_{1-P}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0, \frac{\partial p_{2-P}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0, \frac{\partial \pi_{r-P}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial w'_{1-P}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial w_{2-P}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0, \frac{\partial \pi_{1-P}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial \pi_{2-P}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0.$$

零售商采用订货决策时:

$$1) \frac{\partial q_{1-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial \pi_{r-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial w'_{1-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial w_{2-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial \pi_{1-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} > 0, \text{且有}$$

$$\frac{\partial q_{2-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} \begin{cases} > 0, \alpha \in (0, \bar{\alpha}_{Q1}^{S_1}); \\ < 0, \alpha \in (\bar{\alpha}_{Q1}^{S_1}, \bar{\alpha}); \end{cases}$$

$$\frac{\partial \pi_{2-Q}^{S_1*}}{\partial \alpha} \begin{cases} > 0, \alpha \in (0, \bar{\alpha}_{Q2}^{S_1}); \\ < 0, \alpha \in (\bar{\alpha}_{Q2}^{S_1}, \bar{\alpha}). \end{cases}$$

$$2) \frac{\partial q_{1-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial q_{2-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0, \frac{\partial \pi_{r-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial w'_{1-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0; \frac{\partial w_{2-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0, \frac{\partial \pi_{1-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial \pi_{2-Q}^{S_1*}}{\partial c_t} > 0.$$

推论2中

$$\bar{\alpha}_P^{S_1} = \frac{\sqrt{2(a+c) + (a+c+c_t)d} - (4-d^2)\sqrt{c}}{\sqrt{4(a+c) + 2(a+c+c_t)d} - 2\sqrt{c}},$$

$$\bar{\alpha}_{Q1}^{S_1} = \frac{\sqrt{2(2-d-d^2)a + (4+2d)c + 2dc_t} - (4-d^2)\sqrt{c}}{\sqrt{4(2-d-d^2)a + 2(4+2d)c + 4dc_t} - 2\sqrt{c}},$$

$$\bar{\alpha}_{Q2}^{S_1} = \frac{\lambda_{\alpha-S_1}^{Q_1} - (2-d^2)\sqrt{\lambda_{\alpha-S_1}^{Q_2} \lambda_{\alpha-S_1}^{Q_3}}}{4a(2-d-d^2) + 4(c+c_t)d},$$

$$\lambda_{\alpha-S_1}^{Q_1} = (4-2d-d^3-d^4)a - (2+d)[6 - (4+d)d]c + (2+d^2)dc_t,$$

$$\lambda_{\alpha-S_1}^{Q_2} = (2-d-d^2)a + (2+d)c + dc_t,$$

$$\lambda_{\alpha-S_1}^{Q_3} = (2-d-d^2)a + (18+d)c + dc_t.$$

由推论2可以发现:当零售商采用定价决策时,随着产品2的错放率上升,制造商2将降低批发价格以促使零售商增大产品2的订货量,此时零售商为了弥补产品2的错放损失,将提高产品2的零售价格;与此同时,制造商1采用RFID技术消除了产品1的错放问题,使得产品1相对于产品2更有竞争力,因此制造商1将提高产品1的批发价格,导致产品1的零售价格上升. 当零售商采用订货决策时,随着产品2的错放率增大,促使零售商倾向于订购无错放问题的产品1,从而产品1的订货量及其批发价均与产品2的错放率呈正相关关系. RFID成本的升高对采用该技术的制造商1和零售商产生负面影响,使得他们的收益下降,制造商1也会因RFID技术的优势下降而选择降低产品1的批发价格;与此同时,RFID成本的升高对不采用该技术的制造商2产生正向作用,使得制造商2的收益上升. 当零售商采用定价决策时,为了弥补RFID技术带来的额外成本,零售商将提高其销售的两种产品的零售价格;当零售商采用订货决策时,其会减少产品1的订货量,转而增加产品2的订货量.

### 2.3 制造商均采用RFID(A情景)的收益模型

当两个制造商均采用RFID技术(即A情景)时,两个制造商生产的产品均贴有RFID标签,因此两种产品在销售的过程中均不存在错放问题. 此时,零售商需要为制造商*i*分摊 $(1 - \varphi_{i-x}^A)$ 比例的RFID成本,制造商*i*承担 $\varphi_{i-x}^A$ 比例的RFID成本. 假设制造商给零售商的批发价为 $w_{i-x}^A$ ,零售商制定商品*i*的零售价格和订货量分别为 $p_{i-x}^A$ 和 $q_{i-x}^A$ . 记 $\pi_{i-x}^A$ 和 $\pi_{r-x}^A$ 分别为制造商*i*和零售商的收益函数,有

$$\begin{cases} \pi_{i-x}^A = (w_{i-x}^A - \varphi_{i-x}^A c_t - c)q_{i-x}^A, \\ \pi_{r-x}^A = \sum_{i=1}^2 (p_{i-x}^A - w_{i-x}^A - (1 - \varphi_{i-x}^A)c_t)q_{i-x}^A. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $q_{i-P}^A = a - p_{i-P}^A + dp_{j-P}^A$ ,  $p_{i-Q}^A = a - q_{i-Q}^A - dq_{j-Q}^A$ .

同理,根据第2.1节的博弈思路,可以得到A情景时链上成员最优决策变量和最大收益表达式. 尽管制造商*i*制定的批发价格为 $w_{i-x}^A$ ,但是每单位产品制造商*i*需要承担 $\varphi_{i-x}^A c_t$ 的RFID成本,因此其销售每单位产品的实际批发价格为 $w_{i-x}^A = w_{i-x}^A - \varphi_{i-x}^A c_t$ . 后续以实际批发价格 $w_{i-x}^A$ 进行分析讨论,相关表达式如表1所示. 为了探讨RFID成本 $c_t$ 和两个产品间的影响系数 $d$ 对供应链各成员最优决策变量和最大收益的影响,给出如下推论:

**推论3** 零售商采用定价决策时:

$$\begin{aligned} 1) & \frac{\partial p_{i-P}^{A*}}{\partial c_t} > 0, \frac{\partial \pi_{r-P}^{A*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial w_{i-P}^{A*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial \pi_{i-P}^{A*}}{\partial c_t} < 0; \\ 2) & \frac{\partial p_{i-P}^{A*}}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{r-P}^{A*}}{\partial d} > 0, \frac{\partial w_{i-P}^{A*}}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{i-P}^{A*}}{\partial d} > 0. \end{aligned}$$

零售商采用订货决策时:

$$\begin{aligned} 1) & \frac{\partial q_{i-Q}^{A*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial \pi_{r-Q}^{A*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial w_{i-Q}^{A*}}{\partial c_t} < 0, \frac{\partial \pi_{i-Q}^{A*}}{\partial c_t} < 0. \\ 2) & \frac{\partial w_{i-Q}^{A*}}{\partial d} < 0, \frac{\partial \pi_{i-Q}^{A*}}{\partial d} > 0, \text{且有} \\ & \begin{cases} \frac{\partial q_{i-Q}^{A*}}{\partial d} \leq 0 \text{ 且 } \frac{\partial \pi_{r-Q}^{A*}}{\partial d} \leq 0, d \in (-1, 1/2]; \\ \frac{\partial q_{i-Q}^{A*}}{\partial d} > 0 \text{ 且 } \frac{\partial \pi_{r-Q}^{A*}}{\partial d} > 0, d \in (1/2, 1). \end{cases} \end{aligned}$$

由推论3可以发现,随着RFID成本升高,产品批发价格降低,两个制造商和零售商的收益均下降. 此时,当零售商采用定价决策时,为了弥补RFID技术带来的额外成本,零售商将提高产品的零售价格;当零售商采用订货决策时,其会减少产品的订货量.

零售商选择定价决策时,随着 $d$ 的增大,商品的同质化上升,产品的批发价格和零售价格也增大,链上成员的收益均提升. 零售商选择订货决策时,随着产品互补性程度的降低,零售商的订货量和收益下降;随着产品竞争强度的上升,零售商的订货量和收益增大.

## 2.4 各情景证明过程

### 2.4.1 N情景证明

1) 零售商采用定价决策. 将 $q_{i-P}^N = (a - p_{i-P}^N + dp_{j-P}^N)/(1 - \alpha)$ 和 $p_{i-P}^N = w_{i-P}^N + m_{i-P}^N$ 代入式(1), 其中 $m_i$ 表示零售商销售产品*i*的单位利润. 由于 $\partial^2 \pi_{i-P}^N / \partial (w_{i-P}^N)^2 < 0$ ,制造商*i*的收益函数是关于批

发价格的凹函数,存在最优批发价格. 制造商*i*的最优决策条件是其收益函数对批发价格的一阶导数为0,令 $\partial \pi_{i-P}^N / \partial w_{i-P}^N = 0$ ,联立求解得到制造商*i*的批发价格 $w_{i-P}^N(m_{i-P}^N, m_{j-P}^N)$ ,代入零售商的收益函数,得到海塞矩阵

$$|H_P^N| = \begin{vmatrix} \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial (m_{1-P}^N)^2 & \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial m_{1-P}^N \partial m_{2-P}^N \\ \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial m_{2-P}^N \partial m_{1-P}^N & \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial (m_{2-P}^N)^2 \end{vmatrix} = \frac{4(1-d^2)[(2-x)^2 - d^2]}{(1-\alpha)^2(4-d^2)^2}.$$

其中: $\alpha \in (0, 1)$ ,  $d \in (-1, 1)$ . 可知 $(2-x)^2 - d^2 > 0$ ,  $1-d^2 > 0$ ,  $(4-d^2)^2 > 0$ ,  $(1-\alpha)^2 > 0$ ,则 $|H_P^N| > 0$ . 又因为

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial m_{1-P}^N \partial m_{2-P}^N &= \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial m_{2-P}^N \partial m_{1-P}^N = \\ & [8 - 2(1+\alpha)d^2]d / [(1-\alpha)(4-d^2)^2], \\ \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial (m_{2-P}^N)^2 &= \partial^2 \pi_{r-P}^N / \partial (m_{1-P}^N)^2 = \\ & -2[2 + (1-\alpha)(4-3d^2) + (1-d^2)(2-d^2)] / \\ & [(1-\alpha)(4-d^2)^2] < 0, \end{aligned}$$

即海塞矩阵负定,故存在最优解. 当 $\partial \pi_{i-P}^N / \partial m_{i-P}^N = 0$ 时,可得产品*i*的最优零售价格 $m_{i-P}^{N*}$ . 将 $m_{i-P}^{N*}$ 代入 $w_{i-P}^N(m_{i-P}^N, m_{j-P}^N)$ 可得到最优的批发价格 $w_{i-P}^{N*}$ ,从而零售商的最优定价可由 $p_{i-P}^N = w_{i-P}^{N*} + m_{i-P}^{N*}$ 得出. 将最优变量 $w_{i-P}^{N*}$ 和 $p_{i-P}^{N*}$ 代入式(1),得到定价决策下的制造商和零售商的最大收益表达式.

2) 零售商采用订货决策. 将 $p_{1-Q}^N = a - q_{1-Q}^N(1-\alpha) - dq_{2-Q}^N(1-\alpha)$ 和 $p_{2-Q}^N = a - q_{2-Q}^N(1-\alpha) - dq_{1-Q}^N(1-\alpha)$ 转换成 $q_{1-Q}^N = [(1-d)a - p_{1-Q}^N + dp_{2-Q}^N] / [(1-\alpha)(1-d^2)]$ 和 $q_{2-Q}^N = [(1-d)a - p_{2-Q}^N + dp_{1-Q}^N] / [(1-\alpha)(1-d^2)]$ ,与 $p_{i-Q}^N = w_{i-Q}^N + m_{i-Q}^N$ 一并代入式(1),其中 $m_{i-Q}^N$ 表示零售商销售单位产品的利润. 由于 $\partial^2 \pi_{i-Q}^N / \partial (w_{i-Q}^N)^2 < 0$ ,制造商的收益函数为批发价格的凹函数,存在最优解. 令 $\partial \pi_{i-Q}^N / \partial w_{i-Q}^N = 0$ ,联立求解可得到制造商*i*的批发价格 $w_{i-Q}^N(m_{i-Q}^N, m_{j-Q}^N)$ ,代入零售商的收益函数 $\pi_{r-Q}^N$ 中,得到海塞矩阵

$$|H_Q^N| = \begin{vmatrix} \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial (m_{1-Q}^N)^2 & \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial m_{1-Q}^N \partial m_{2-Q}^N \\ \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial m_{2-Q}^N \partial m_{1-Q}^N & \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial (m_{2-Q}^N)^2 \end{vmatrix} = \frac{4[(2-\alpha)^2 - d^2]}{(1-d^2)(1-\alpha)^2(4-d^2)^2}.$$

其中: $\alpha \in (0, 1)$ ,  $d \in (-1, 1)$ . 可知 $(1-\alpha)^2 > 0$ ,  $1-d^2 > 0$ ,  $(4-d^2)^2 > 0$ ,  $4[(2-\alpha)^2 - d^2] > 0$ ,则 $|H_Q^N|$

> 0. 因为

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial m_{1-Q}^N \partial m_{2-Q}^N &= \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial m_{2-Q}^N \partial m_{1-Q}^N = \\ &[8 - 2(1 - \alpha)d^2]d / [(1 - \alpha)(1 - d^2)(4 - d^2)^2], \\ \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial (m_{2-Q}^N)^2 &= \partial^2 \pi_{r-Q}^N / \partial (m_{1-Q}^N)^2 = \\ &-2[2 + (1 - \alpha)(4 - 3d^2) + (1 - d^2)(2 - d^2)] / \\ &[(1 - \alpha)(1 - d^2)(4 - d^2)^2] < 0, \end{aligned}$$

即海塞矩阵负定, 故存在极大值. 当  $\partial \pi_{r-Q}^N / \partial m_{i-Q}^N = 0$  时, 可得零售商的订货量  $m_{i-Q}^{N*}$ . 将  $m_{i-Q}^{N*}$  代入  $w_{i-Q}^N(m_{i-Q}^N, m_{j-Q}^N)$  可得到最优批发价格  $w_{i-Q}^{N*}$ . 将最优决策变量  $w_{i-Q}^{N*}$  和  $m_{i-Q}^{N*}$  代入  $p_{i-Q}^N = w_{i-Q}^N + m_{i-Q}^N$  可得  $p_{i-Q}^{N*}$ , 从而最优订货量  $q_{i-Q}^{N*}$  亦可知. 将最优决策变量  $w_{i-Q}^{N*}$  和  $q_{i-Q}^{N*}$  代入式(1), 得到订货决策下制造商和零售商的最大收益表达式.

### 2.4.2 S<sub>i</sub> 情景证明

1) 零售商采用定价决策. 将  $q_{1-P}^{S_1} = a - p_{1-P}^{S_1} + dp_{2-P}^{S_1}$ ,  $q_{2-P}^{S_1} = (a - p_{2-P}^{S_1} + dp_{1-P}^{S_1}) / (1 - \alpha)$  和  $p_{i-P}^{S_1} = w_{i-P}^{S_1} + m_{i-P}^{S_1}$  ( $i = 1, 2$ ) 代入式(2), 其中  $m_i$  表示零售商销售商品  $i$  的单位利润. 由于  $\partial^2 \pi_{i-P}^{S_1} / \partial (w_{i-P}^{S_1})^2 < 0$ , 制造商  $i$  的收益函数都为凹函数, 存在最优解. 制造商  $i$  的最优决策条件是其收益函数对批发价格的一阶导数为0, 令  $\partial \pi_{i-P}^{S_1} / \partial w_{i-P}^{S_1} = 0$ , 联立求解得到制造商  $i$  的批发价格  $w_{i-P}^{S_1}(m_{1-P}^{S_1}, m_{2-P}^{S_1})$ , 代入零售商的收益函数, 得到海塞矩阵

$$\begin{aligned} |H_P^{S_1}| &= \\ &\begin{vmatrix} \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial (m_{1-P}^{S_1})^2 & \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial m_{1-P}^{S_1} \partial m_{2-P}^{S_1} \\ \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial m_{2-P}^{S_1} \partial m_{1-P}^{S_1} & \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial (m_{2-P}^{S_1})^2 \end{vmatrix} = \\ &\frac{4(1 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2)}{(1 - \alpha)(4 - d^2)^2}. \end{aligned}$$

其中:  $\alpha \in (0, 1)$ ,  $d \in (-1, 1)$ . 所以  $|H_P^{S_1}| > 0$ . 又

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial m_{1-P}^{S_1} \partial m_{2-P}^{S_1} &= \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial m_{2-P}^{S_1} \partial m_{1-P}^{S_1} = \\ &\frac{2d(4 - 2\alpha - d^2)}{(1 - \alpha)(4 - d^2)^2}, \end{aligned}$$

$$\partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial (m_{2-P}^{S_1})^2 = \frac{-2(2 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2)}{(1 - \alpha)(4 - d^2)^2},$$

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-P}^{S_1} / \partial (m_{1-P}^{S_1})^2 &= \\ &\frac{-2[d^2 + (1 - \alpha)(8 - 7d^2 + d^4)]}{(1 - \alpha)(4 - d^2)^2} < 0, \end{aligned}$$

即海塞矩阵负定, 因此存在最优解. 令  $\partial \pi_{i-P}^{S_1} / \partial m_{i-P}^{S_1} = 0$ , 联立求解可得商品  $i$  的最优单位利润  $m_{i-P}^{S_1*}$ . 将  $m_{i-P}^{S_1*}$  代入  $w_{i-P}^{S_1}(m_{1-P}^{S_1}, m_{2-P}^{S_1})$ , 可得到制造商的最优批发价格  $w_{i-P}^{S_1*}$ , 从而零售商的最优定价可由  $p_{i-P}^{S_1*} = w_{i-P}^{S_1*} + m_{i-P}^{S_1*}$  得出. 将最优决策变量  $w_{i-P}^{S_1*}$

和  $p_{i-P}^{S_1*}$  代入式(2), 得到定价决策下的制造商和零售商的最大收益表达式.

2) 零售商采用订货决策. 将  $p_{1-Q}^{S_1} = a - q_{1-Q}^{S_1} - d(1 - \alpha)q_{2-Q}^{S_1}$  和  $p_{2-Q}^{S_1} = a - (1 - \alpha)q_{2-Q}^{S_1} - dq_{1-Q}^{S_1}$  转换成

$$\begin{aligned} q_{1-Q}^{S_1} &= \frac{(1 - d)a - p_{1-Q}^{S_1} + dp_{2-Q}^{S_1}}{1 - d^2}, \\ q_{2-Q}^{S_1} &= \frac{(1 - d)a - p_{2-Q}^{S_1} + dp_{1-Q}^{S_1}}{(1 - \alpha)(1 - d^2)}. \end{aligned}$$

与  $p_{i-Q}^{S_1} = w_{i-Q}^{S_1} + m_{i-Q}^{S_1}$  一并代入式(2), 其中  $m_{i-Q}^{S_1}$  表示零售商销售单位产品的利润. 由于  $\partial^2 \pi_{i-Q}^{S_1} / \partial (w_{i-Q}^{S_1})^2 < 0$ , 制造商  $i$  的收益函数是批发价格的凹函数, 存在最优解. 制造商  $i$  的最优决策条件是其收益函数对批发价格的一阶导数为0, 令  $\partial \pi_{i-Q}^{S_1} / \partial w_{i-Q}^{S_1} = 0$ , 联立求解得到制造商  $i$  的批发价格  $w_{i-Q}^{S_1}(m_{1-Q}^{S_1}, m_{2-Q}^{S_1})$ , 代入零售商的收益函数, 得到海塞矩阵

$$\begin{aligned} |H_Q^{S_1}| &= \\ &\begin{vmatrix} \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial (m_{1-Q}^{S_1})^2 & \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial m_{1-Q}^{S_1} \partial m_{2-Q}^{S_1} \\ \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial m_{2-Q}^{S_1} \partial m_{1-Q}^{S_1} & \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial (m_{2-Q}^{S_1})^2 \end{vmatrix} = \\ &\frac{4(4 - 2\alpha - d^2)}{(1 - \alpha)(1 - d^2)(4 - d^2)^2}. \end{aligned}$$

其中:  $\alpha \in (0, 1)$ ,  $d \in (-1, 1)$ . 所以  $|H_Q^{S_1}| > 0$ . 又

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial m_{1-Q}^{S_1} \partial m_{2-Q}^{S_1} &= \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial m_{2-Q}^{S_1} \partial m_{1-Q}^{S_1} = \\ &\frac{2d(4 - 2\alpha - d^2)}{(1 - \alpha)(1 - d^2)(4 - d^2)^2}, \\ \partial^2 \pi_{r-Q}^{S_1} / \partial (m_{2-Q}^{S_1})^2 &= -\frac{2(2 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2)}{(1 - \alpha)(1 - d^2)(4 - d^2)^2} < 0, \end{aligned}$$

即海塞矩阵负定, 因此存在最优解. 令  $\partial \pi_{i-Q}^{S_1} / \partial m_{i-Q}^{S_1} = 0$ , 联立求解可得商品  $i$  的最优单位利润  $m_{i-Q}^{S_1*}$ . 将  $m_{i-Q}^{S_1*}$  代入  $w_{i-Q}^{S_1}(m_{1-Q}^{S_1}, m_{2-Q}^{S_1})$ , 可得到制造商的最优批发价格  $w_{i-Q}^{S_1*}$ , 零售商的最优售价  $p_{i-Q}^{S_1*}$ , 将其回代可得零售商最优订货量  $q_{i-Q}^{S_1*}$ . 将最优决策变量  $w_{i-Q}^{S_1*}$  和  $q_{i-Q}^{S_1*}$  代入式(2), 得到订货决策下的制造商和零售商的最大收益表达式.

### 2.4.3 A 情景证明

1) 零售商采用定价决策.

将  $q_{i-P}^A = a - p_{i-P}^A + dp_{i-P}^A$  和  $p_{i-P}^A = w_{i-P}^A + m_{i-P}^A$  代入式(3), 其中  $m_{i-P}^A$  表示零售商销售商品  $i$  的单位利润. 由于  $\partial^2 \pi_{i-P}^A / \partial (w_{i-P}^A)^2 < 0$ , 制造商  $i$  的收益函数是批发价格的凹函数, 存在最优解. 制造商  $i$  的最优决策条件是其收益函数对批发价格的一阶导数为0, 令  $\partial \pi_{i-P}^A / \partial w_{i-P}^A = 0$ , 联立求解得到制造商  $i$  的批发价格  $w_{i-P}^A(m_{1-P}^A, m_{2-P}^A)$ , 代入零售商的收益

函数,得到海塞矩阵

$$|H_P^A| = \begin{vmatrix} \partial^2 \pi_{r-P}^A / \partial (m_{1-P}^A)^2 & \partial^2 \pi_{r-P}^A / \partial m_{1-P}^A \partial m_{2-P}^A \\ \partial^2 \pi_{r-P}^A / \partial m_{2-P}^A \partial m_{1-P}^A & \partial^2 \pi_{r-P}^A / \partial (m_{2-P}^A)^2 \end{vmatrix} = \frac{4(1-d^2)}{(4-d^2)} > 0.$$

又

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-P}^A / \partial m_{1-P}^A \partial m_{2-P}^A &= \frac{2d}{(4-d^2)}, \\ \partial^2 \pi_{r-P}^A / \partial (m_{2-P}^A)^2 &= \frac{-4-2d^2}{(4-d^2)} < 0, \end{aligned}$$

即海塞矩阵负定,因此存在最优解. 令  $\partial \pi_{i-P}^A / \partial m_{i-P}^A = 0$ , 联立求解得到商品  $i$  的最优单位利润  $m_{i-P}^{A*}$ . 将  $m_{i-P}^{A*}$  代入  $w_{i-P}^A(m_{1-P}^A, m_{2-P}^A)$ , 可得到制造商的最优批发价格  $w_{i-P}^{A*}$ , 从而零售商的最优定价可由  $p_{i-P}^{A*} = w_{i-P}^{A*} + m_{i-P}^{A*}$  得出. 将最优决策变量  $w_{i-P}^{A*}$  和  $p_{i-P}^{A*}$  代入式(3), 得到定价决策下的制造商和零售商的最大收益表达式.

2) 零售商采用订货决策.

将  $p_{1-Q}^A = a - q_{1-Q}^A - dq_{2-Q}^A$  和  $p_{2-Q}^A = a - q_{2-Q}^A - dq_{1-Q}^A$  转换成

$$\begin{aligned} q_{1-Q}^A &= \frac{(1-d)a - p_{1-Q}^A + dp_{2-Q}^A}{1-d^2}, \\ q_{2-Q}^A &= \frac{(1-d)a - p_{2-Q}^A + dp_{1-Q}^A}{(1-d^2)}. \end{aligned}$$

与  $p_{i-Q}^A = w_{i-Q}^A + m_{i-Q}^A$  一并代入式(3), 其中  $m_{i-Q}^A$  表示零售商销售单位产品的利润. 由于  $\partial^2 \pi_{i-Q}^A / \partial (w_{i-Q}^A)^2 < 0$ , 制造商  $i$  的收益函数是批发价格的凹函数, 存在最优解. 制造商  $i$  的最优决策条件是其收益函数对批发价格的一阶导数为0, 令  $\partial \pi_{i-Q}^A / \partial w_{i-Q}^A = 0$ , 联立求解得到制造商  $i$  的批发价格  $w_{i-Q}^A(m_{1-Q}^A, m_{2-Q}^A)$ , 代入零售商的收益函数, 得到海塞矩阵

$$|H_Q^A| = \begin{vmatrix} \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial (m_{1-Q}^A)^2 & \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial m_{1-Q}^A \partial m_{2-Q}^A \\ \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial m_{2-Q}^A \partial m_{1-Q}^A & \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial (m_{2-Q}^A)^2 \end{vmatrix} = \frac{(2-d^2)^2 - d^2}{4}.$$

其中:  $\alpha \in (0, 1)$ ,  $d \in (-1, 1)$ ,  $(2-d^2)^2 - d^2 > 0$ ,  $|H_Q^A| > 0$ . 又

$$\partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial m_{1-Q}^A \partial m_{2-Q}^A = \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial m_{2-Q}^A \partial m_{1-Q}^A = \frac{2d}{(2-d^2)^2 - d^2},$$

$$\begin{aligned} \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial (m_{2-Q}^A)^2 &= \partial^2 \pi_{r-Q}^A / \partial (m_{1-Q}^A)^2 = \\ &= -\frac{2(2-d^2)}{(2-d^2)^2 - d^2} < 0, \end{aligned}$$

即海塞矩阵负定, 因此存在最优解. 令  $\partial \pi_{i-Q}^A / \partial m_{i-Q}^A = 0$ , 联立求解得到商品  $i$  的最优单位利润  $m_{i-Q}^{A*}$ . 将  $m_{i-Q}^{A*}$  代入  $w_{i-Q}^A(m_{1-Q}^A, m_{2-Q}^A)$ , 可得到制造商的最优批发价格  $w_{i-Q}^{A*}$ , 零售商的最优售价  $p_{i-Q}^{A*}$ , 将其回代可得零售商最优订货量  $q_{i-Q}^{A*}$ . 将最优决策变量  $w_{i-Q}^{A*}$  和  $q_{i-Q}^{A*}$  代入式(3), 得到订货决策下的制造商和零售商的最大收益表达式.

### 3 均衡策略分析

基于两个制造商的最优收益表达式, 分别得出零售商选择定价决策和订货决策时两个制造商的RFID采用均衡策略.

#### 3.1 定价决策时制造商采用RFID的均衡策略

当零售商采用定价决策时, 两个制造商的RFID采用均衡策略.

**定理1** 1) 产品间的竞争强度/互补程度  $d \in (0, \bar{d}_P^1] / d \in (-1, \bar{d}_P^2]$ : 当  $c_t \in (0, \bar{c}_{t-P}^A]$  时,  $A$  情景是两个制造商采用RFID的均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^A, \bar{c}_{t-P}^N]$  时,  $S_i$  情景是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^N, +\infty)$  时,  $N$  情景是均衡策略. 2)  $d \in (\bar{d}_P^1, 1) / d \in (\bar{d}_P^2, 0)$ : 当  $c_t \in (0, \bar{c}_{t-P}^N]$  时,  $A$  情景是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^N, \bar{c}_{t-P}^A]$  时,  $A$  和  $N$  情景均是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^A, +\infty)$  时,  $N$  情景是均衡策略.

**证明** 两个制造商之间存在Nash博弈, 分别求解4种情景成立的条件: 若  $N$  情景为均衡策略, 则需同时满足  $\pi_{1-P}^{N*} > \pi_{1-P}^{S_1*}$ ,  $\pi_{2-P}^{N*} > \pi_{2-P}^{S_2*}$ , 其中  $\pi_{1-P}^{N*} = \pi_{2-P}^{N*}$ ,  $\pi_{1-P}^{S_1*} = \pi_{2-P}^{S_2*}$ . 因此当  $\pi_{1-P}^{N*} - \pi_{1-P}^{S_1*} = (1-\alpha) \times (q_{1-P}^{N*})^2 - (q_{1-P}^{S_1*})^2 = (\sqrt{1-\alpha}q_{1-P}^{N*} + q_{1-P}^{S_1*})(\sqrt{1-\alpha}q_{1-P}^{N*} - q_{1-P}^{S_1*}) > 0$  时,  $N$  情景为均衡策略. 由于订货量大于零, 即  $\sqrt{1-\alpha}q_{1-P}^{N*} + q_{1-P}^{S_1*} > 0$ , 有  $\pi_{1-P}^{N*} > \pi_{1-P}^{S_1*}$  等价于  $\sqrt{1-\alpha}q_{1-P}^{N*} - q_{1-P}^{S_1*} > 0$ , 可得唯一解  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^N, +\infty)$ . 同理可证,  $A$  情景为均衡策略时, 需同时满足  $\pi_{1-P}^{A*} > \pi_{1-P}^{S_2*}$  和  $\pi_{2-P}^{A*} > \pi_{2-P}^{S_1*}$ , 解得  $c_t \in [0, \bar{c}_{t-P}^A]$ .  $S_1$  情景为均衡策略时, 需同时满足  $\pi_{1-P}^{S_1*} > \pi_{1-P}^{N*}$  和  $\pi_{2-P}^{S_1*} > \pi_{2-P}^{A*}$ , 解得  $c_t \in [0, \bar{c}_{t-P}^N]$ ,  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^A, +\infty)$ .  $S_2$  情景为均衡策略时, 需同时满足  $\pi_{1-P}^{S_2*} > \pi_{1-P}^{A*}$  和  $\pi_{2-P}^{S_2*} > \pi_{2-P}^{N*}$ , 解得  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^A, +\infty)$ ,  $c_t \in [0, \bar{c}_{t-P}^N]$ . 此外, 通过对阈值  $\bar{c}_{t-P}^N$  与  $\bar{c}_{t-P}^A$  比较大小, 可得当  $d \in (0, \bar{d}_P^1]$  或  $d \in (-1, \bar{d}_P^2]$  时,  $\bar{c}_{t-P}^N > \bar{c}_{t-P}^A$ ; 当  $d \in (\bar{d}_P^1, 1)$  或  $d \in (\bar{d}_P^2, 0)$  时,  $\bar{c}_{t-P}^N < \bar{c}_{t-P}^A$ . 为了保证订货量为正, 即  $q_{i-Q}^{N*} = \frac{(1-\alpha)a - c}{2(1+d)(1-\alpha)(2-\alpha-d)} > 0$ , 得到  $\frac{a}{c} > \frac{1}{1-\alpha}$ , 因此  $\bar{d}_P^2 < 0$ . 其中

$$\bar{d}_P^1 = 1 - \sqrt{1 - \alpha} > 0, \bar{d}_P^2 = 1 - (1 - \alpha)\frac{a}{c},$$

$$\bar{c}_{t-P}^N = \frac{\lambda_{c_t-N}^{P1}a + \lambda_{c_t-N}^{P2}c}{\sqrt{1 - \alpha}(2 - \alpha - d)(2 - \alpha - d^2)},$$

$$\bar{c}_{t-P}^A = \frac{\lambda_{c_t-N}^{P3}a + \lambda_{c_t-N}^{P4}c}{\sqrt{1 - \alpha}(4 - 2\alpha - d^2)(1 - d) + (1 - \alpha)(2 - d)d},$$

$$\lambda_{c_t-N}^{P1} = \sqrt{1 - \alpha}(2 - \alpha - d)(2 - \alpha + d) - (1 - \alpha)(4 - 2\alpha - d^2),$$

$$\lambda_{c_t-N}^{P2} = (1 - d)(4 - 2\alpha - d^2) - \sqrt{1 - \alpha}(2 - \alpha - d) \times (2 - \alpha - d - d^2),$$

$$\lambda_{c_t-N}^{P3} = \sqrt{1 - \alpha}(4 - 2\alpha - d^2) - (1 - \alpha)(4 - d^2),$$

$$\lambda_{c_t-N}^{P4} = (2 - d)[2 - (1 - \alpha)d - d^2] - \sqrt{1 - \alpha}(4 - 2\alpha - d^2)(1 - d).$$

由此定理得证. □

基于定理1的结论2)可以发现,若两个制造商销售竞争性产品且竞争强度  $d \in (\bar{d}_P^1, 1)$ ,或销售互补性产品且互补程度  $d \in (\bar{d}_P^2, 0)$ ,则当RFID成本  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^N, \bar{c}_{t-P}^A)$ 时,两个制造商存在A和N两个RFID采用均衡策略. 分别比较两个制造商在A和N策略下的收益大小,得到Pareto改进策略,如推论4所示.

**推论4** 当  $c_t \leq \bar{c}_{t-P}^{N-A}$ 时,A情景是Pareto改进均衡策略;当  $c_t > \bar{c}_{t-P}^{N-A}$ 时,N情景是Pareto改进均衡策略.

**证明** 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-P}^N, \bar{c}_{t-P}^A)$ 时,制造商存在A/N两种RFID最优选择策略,进一步比较  $\pi_{i-P}^{N*}$ 与  $\pi_{i-P}^{A*}$ 的收益大小. 假设

$$\Delta_P^{N-A} = \pi_{i-P}^{N*} - \pi_{i-P}^{A*} = (1 - \alpha)(q_{i-P}^{N*})^2 - (q_{i-P}^{A*})^2 = (\sqrt{1 - \alpha}q_{i-P}^{N*} + q_{i-P}^{A*})(\sqrt{1 - \alpha}q_{i-P}^{N*} - q_{i-P}^{A*}),$$

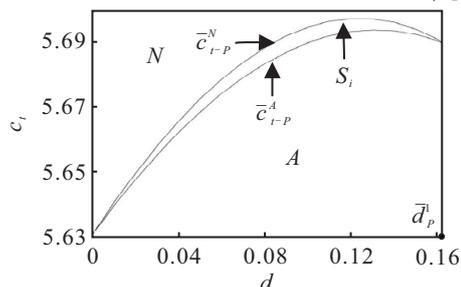
令  $\Delta_P^{N-A} = 0$ ,其中  $\sqrt{1 - \alpha}q_{i-P}^{N*} + q_{i-P}^{A*} > 0$ . 即  $\Delta_P^{N-A} = 0$ 等价于求解  $\sqrt{1 - \alpha}q_{i-P}^{N*} - q_{i-P}^{A*} = 0$ ,得到方程的根  $\bar{c}_{t-P}^{N-A}$ . 当  $c_t \leq \bar{c}_{t-P}^{N-A}$ 时,  $\pi_{i-P}^{A*} \geq \pi_{i-P}^{N*}$ ;当  $c_t > \bar{c}_{t-P}^{N-A}$ 时,  $\pi_{i-P}^{N*} > \pi_{i-P}^{A*}$ . 其中

$$\bar{c}_{t-P}^{N-A} = \frac{([\sqrt{1 - \alpha}(2 - \alpha - d) - (1 - \alpha)(2 - d)]a + [(1 - d)(2 - d) - \sqrt{1 - \alpha}(2 - \alpha - d)(1 - d)]c}{\sqrt{1 - \alpha}(2 - \alpha - d)(1 - d)}. \quad \square$$

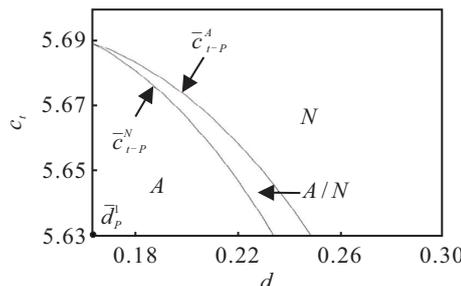
为了直观展示定理1和推论4的结论,假设  $a = 100, c = 10, \alpha = 0.3$ ,绘制了零售商采用定价决策时两个制造商销售竞争/互补性产品的RFID均衡策略图,如图1和图2所示,可以发现:

1) 当RFID成本很低时,两个制造商均采用RFID技术;当RFID成本很高时,两个制造商均不采用该技术. 此时两个制造商采用RFID的均衡策略与其销售的产品类型无关.

2) 当RFID成本适中时,两个制造商采用RFID技术的决策与产品间的影响程度相关. i) 制造商销售竞争性产品:当产品间的竞争强度较弱 ( $d \in (0, \bar{d}_P^1)$ )时,两个制造商采用相反的RFID策略,此时  $S_i$  情景将会出现,即仅一个制造商选择采用RFID技术,而另一制造商因为较高标签成本而放弃采用该技术(如图1(a)所示);当产品间的竞争强度较强 ( $d \in (\bar{d}_P^1, 1)$ )时,

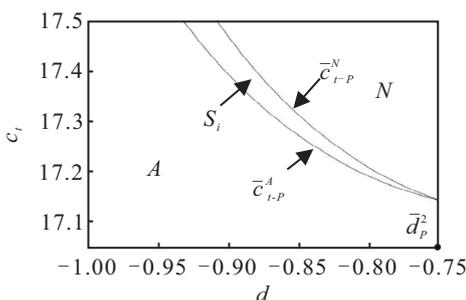


(a) 竞争性产品  $d \in (0, \bar{d}_P^1]$

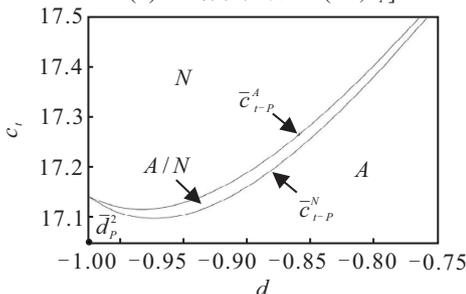


(b) 竞争性产品  $d \in (\bar{d}_P^1, 1)$

图1 定价决策时销售竞争性产品RFID均衡策略图



(a) 互补性产品  $d \in (-1, \bar{d}_P^2]$



(b) 互补性产品  $d \in (\bar{d}_P^2, 0)$

图2 定价决策时销售互补性产品RFID均衡策略图

两个制造商采用相同的RFID策略,即两个制造商均(不)采用RFID技术(如图1(b)所示). ii) 制造商销售互补性产品:当产品间的互补强度较高( $d \in (-1, \bar{d}_P^2)$ )时,两个制造商采用相反的RFID策略(如图2(a)所示);当产品间的互补强度较弱( $d \in (\bar{d}_P^2, 0)$ )时,两个制造商采用相同的RFID策略(如图2(b)所示).

3) 零售商采用定价决策时,销售互补性产品时的A区域面积大于销售竞争性产品. 这表明零售商选择定价决策时,两个销售互补性产品的制造商能够承担更高的RFID标签成本,从而更能促进RFID技术的推广应用. 此外,随着产品竞争强度的增加,制造商能够承担的最大RFID成本阈值先上升后下降,表明产品间的竞争强度影响两个制造商的RFID采用策略,适度的竞争有益于制造商采用RFID技术;随着产品互补程度的减弱,制造商能够承担的最大RFID成本阈值先下降后上升,表明产品的互补程度处于两个极端时有利于制造商采用RFID.

4) Pareto改进后的均衡分别对应图1(b)和图2(b)中A/N区域:当两个制造商销售竞争性产品且产品竞争较强时,图1(b)的A/N区域变成N区域,即两个制造商倾向于不采用RFID策略;当两个制造商销售互补性产品且互补程度较弱时,图2(b)的A/N区域变成A区域,即两个制造商倾向于采用RFID的策略.

### 3.2 订货决策时制造商采用RFID的均衡策略

当零售商采用订货决策时,两个制造商的RFID采用均衡策略,如定理2所示.

**定理2** 1) 两个制造商生产竞争性产品时: i)  $d \in (0, \bar{d}_Q]$ : 当  $c_t \in (0, \bar{c}_{t-Q}^A]$  时, A 情景是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^A, \bar{c}_{t-Q}^N]$  时,  $S_i$  情景是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^N, +\infty)$  时, N 情景是均衡策略. ii)  $d \in (\bar{d}_Q, 1)$ : 当  $c_t \in (0, \bar{c}_{t-Q}^N]$  时, A 情景是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^N, \bar{c}_{t-Q}^A]$  时, A 和 B 情景均是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^A, +\infty)$  时, N 情景是均衡策略. 2) 两个制造商生产互补性产品时: 当  $c_t \in [0, \bar{c}_{t-Q}^N]$  时, A 情景是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^N, \bar{c}_{t-Q}^A]$  时, A 和 N 情景均是均衡策略; 当  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^A, +\infty)$  时, N 情景是均衡策略.

**证明** 与定理1证明类似,其中

$$\bar{d}_Q = 1 - \sqrt{1 - \alpha},$$

$$\bar{c}_{t-Q}^N = \frac{\lambda_{c_t-N}^{Q_1} a + \lambda_{c_t-N}^{Q_2} c}{\sqrt{1 - \alpha}(1 + d)(2 - \alpha - d)(2 - \alpha - d^2)},$$

$$\bar{c}_{t-Q}^A = \frac{\lambda_{c_t-A}^{Q_1} a + \lambda_{c_t-A}^{Q_2} c}{\sqrt{1 - \alpha}(1 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2) + (1 - \alpha)(2 + d - d^2)d},$$

$$\lambda_{c_t-N}^{Q_1} = \sqrt{1 - \alpha}(1 - d^2)[(2 - \alpha)^2 - d^2] -$$

$$(1 - \alpha)(1 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2),$$

$$\lambda_{c_t-N}^{Q_2} = (1 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2) -$$

$$\sqrt{1 - \alpha}(1 + d)(2 - \alpha - d)(2 - \alpha - d - d^2),$$

$$\lambda_{c_t-A}^{Q_1} = \sqrt{1 - \alpha}(1 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2) -$$

$$(1 - \alpha)[(2 - d^2)^2 - d^2],$$

$$\lambda_{c_t-A}^{Q_2} = (2 + d - d^2)(2 + \alpha d - d - d^2) -$$

$$\sqrt{1 - \alpha}(1 - d^2)(4 - 2\alpha - d^2).$$

由此定理得证.  $\square$

由定理2可以发现,若两个制造商销售竞争性产品且竞争强度  $d \in (\bar{d}_Q, 1)$ , 或销售互补性产品, 当RFID成本  $c_t \in (\bar{c}_{t-Q}^N, \bar{c}_{t-Q}^A]$  时, 两个制造商存在A和N两个RFID采用均衡策略. 分别比较两个制造商在A和N策略下的收益大小, 得到Pareto改进策略, 如推论5所示.

**推论5** 当  $c_t \leq \bar{c}_{t-Q}^{N-A}$  时, A 情景是 Pareto 改进均衡策略; 当  $c_t > \bar{c}_{t-Q}^{N-A}$  时, N 情景是 Pareto 改进均衡策略.

**证明** 与推论4证明类似, 其中

$$\bar{c}_{t-Q}^{N-A} = \frac{\lambda_{c_t-N-A}^{Q_1} a + \lambda_{c_t-N-A}^{Q_2} c}{\sqrt{1 - \alpha}(1 + d)(2 - \alpha - d)},$$

$$\lambda_{c_t-N-A}^{Q_1} = \sqrt{1 - \alpha}(1 + d)(2 - \alpha - d) -$$

$$(1 - \alpha)(2 + d - d^2),$$

$$\lambda_{c_t-N-A}^{Q_2} = (2 + d - d^2) - \sqrt{1 - \alpha}(1 + d)(2 - \alpha - d).$$

由此定理得证.  $\square$

为了直观地展示定理2和推论5的结论, 同样假设  $a = 100, c = 10, \alpha = 0.3$ , 绘制了零售商订货决策下两个制造商的RFID采用均衡策略图如图3所示. 可以发现:

1) 当RFID成本很低时, 两个制造商均采用RFID技术; 当RFID成本很高时, 两个制造商均不采用该技术. 此时两个制造商采用RFID的均衡策略与其销售的产品类型无关.

2) 当RFID成本适中时, 两个制造商采用RFID技术的决策与产品间的影响程度相关: i) 制造商销售竞争性产品: 当产品间的竞争强度较弱 ( $d \in (0, \bar{d}_Q]$ ) 时, 两个制造商采用相反的RFID策略, 此时  $S_i$  情景将会出现(如图3(a)所示); 当产品间的竞争强度较强 ( $d \in (\bar{d}_Q, 1)$ ) 时, 两个制造商采用相同的RFID策略, 即两个制造商均(不)采用RFID技术(如图3(b)所示). ii) 制造商销售互补性产品, 两个制造商采用相同的RFID策略(如图3(c)所示).

3) 零售商采用订货决策时, 销售互补性产品时的A区域面积大于销售竞争性产品. 这表明零售商

选择订货决策时,两个销售互补性产品的制造商能够承担更高的RFID标签成本,从而更能促进RFID技术的推广应用.此外,随着产品竞争强度的增加,制造商能够承担的最大RFID成本阈值先下降后上升,表明产品的竞争强度处于两个极端时有益于制造商采用RFID;随着产品互补程度的减弱,制造商能够承担的最大RFID成本阈值先上升后下降,表明两个生产互补性适中产品的制造商更愿意同时采用RFID.

4) Pareto改进均衡分别对应图3(b)和图3(c)中A/N区域:当两个制造商销售竞争性产品且产品竞争较强时,图3(b)的A/N区域变成N区域,即两个制造商倾向于不采用RFID策略;当两个制造商销售互补性产品时,图3(c)的A/N区域变成A区域,即两个制造商倾向于采用RFID的策略.

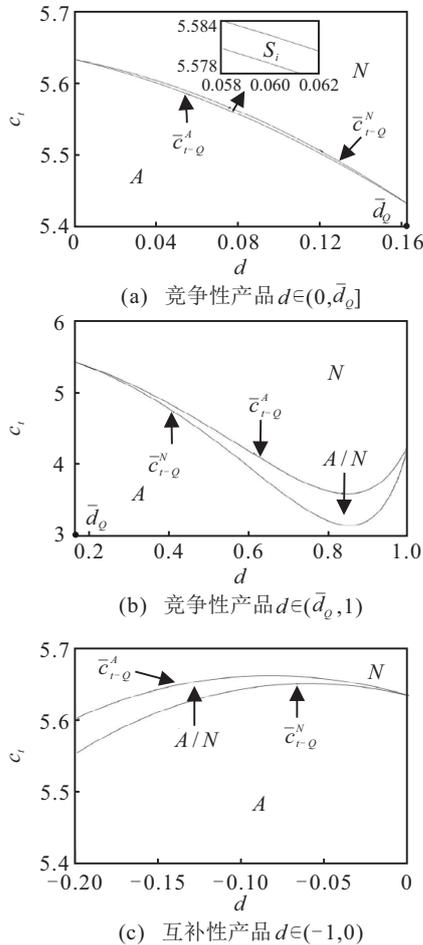


图3 订货决策时两个制造商RFID均衡策略

### 3.3 对比分析

当零售商销售竞争性产品时,将定价决策与订货决策时的RFID采用均衡进行比较,如图1(a)和图3(a)所示,Pareto改进后如图1(b)和图3(b)所示.可以发现:定价决策时的A区域面积大于订货决策,此时零售商采用定价决策的方式更利于两个竞争制造商同时采用RFID技术.产品间的竞争强度由弱到强的过

程中,定价决策方式下制造商可承担的RFID成本阈值先增大后减小,订货决策下制造商可承担的RFID成本阈值均先减小后增大.这意味着当两种商品的同质化过高时,零售商选择订货决策能够促使制造商采用RFID技术;当两种商品的同质化很低时,零售商选择定价决策更利于竞争制造商采用RFID技术.

当零售商销售互补性产品时,将定价决策与订货决策均衡进行比较,如图2(a)所示,Pareto改进后如图2(b)和图3(c).可以发现:随着产品间的互补性减弱,不同的决策方式将对制造商可承担的RFID阈值造成相反的变化.定价决策下,阈值迅速下降后上升;订货决策下,阈值缓慢上升后下降.此外,定价决策的A区域面积大于订货决策,即零售商采用定价决策的方式更利于两个制造商均采用RFID技术.

## 4 不同参数对零售商收益的影响分析

本节对各情景下零售商的收益进行数值模拟,分析两种决策方式下,零售商销售竞争性或互补性产品时,产品间的影响系数、RFID成本及错放率对零售商收益的影响.

假设  $a = 10, c = 2, c_t = 1, \alpha = 0.3$ , 绘制产品间的影响系数对零售商收益的影响如图4所示.

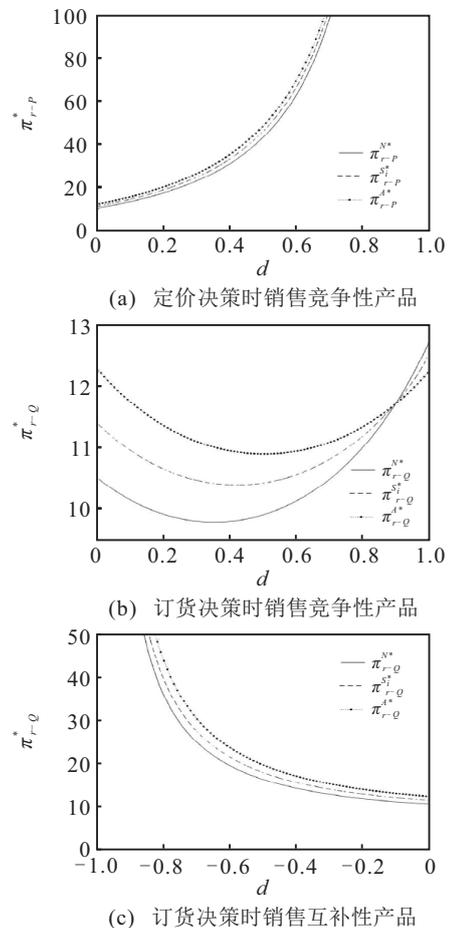
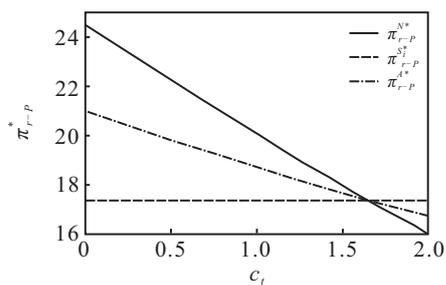


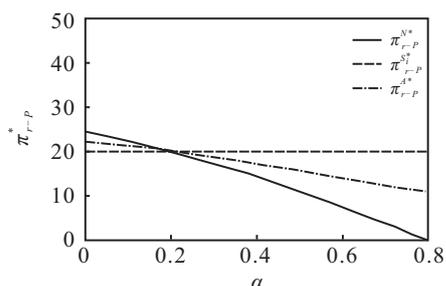
图4 产品间的影响系数对零售商收益的影响

由图4可以发现:在定价决策下,随着两种产品的影响系数增大,零售商的收益呈现上升趋势,此时无论零售商销售竞争性产品还是互补性产品,两个制造商均采用RFID技术的决策始终使零售商受益(以竞争性产品为例即图4(a)所示);在订货决策下,若零售商销售竞争性产品(如图4(b)所示),则随着两种产品的影响系数增大(竞争性增强),零售商的收益逐渐降低,当竞争强度高于某一阈值时,零售商的收益逐渐上升.两个制造商的竞争强度较小时,投资RFID技术能够提升零售商的收益;反之,当制造商间的竞争强度较大时,零售商偏好上游企业不采用RFID技术;若零售商销售互补性产品(如图4(c)所示),随着产品间的互补性减弱,零售商的收益呈下降趋势,但是零售商偏好上游企业采用RFID技术.

假设 $a = 10, c = 2, \alpha = 0.3$ ,以定价决策下销售竞争性产品为例绘制图5曲线,发现无论是定价或订货决策,亦或是销售竞争或互补性产品,RFID成本对零售商收益造成的趋势具有一致性的结论(以图5(a)为例):当RFID成本在一定范围内,制造商采用RFID技术使零售商的收益大幅度上升,且两个制造商均采用RFID技术使零售商获益最大,这是因为较低的RFID成本能够消除零售商因库存错放带来的收益损失.随着RFID成本的上升,制造商采用RFID技术使得零售商的收益逐渐降低;当RFID成本高于某一阈值时,制造商采用RFID技术反而使零售商的收益受损.另外,通过数值模拟对比可以发现:在定价决策下,零售商销售竞争性产品的获益最大;在订货决策下,零售商销售互补性产品对其自身更有利.



(a) RFID成本对零售商收益的影响



(b) 产品错放率对零售商收益的影响

图5 RFID成本和产品错放率对零售商收益的影响

假设 $a = 10, c = 2, c_t = 1$ ,同样发现一致性的结论(以图5(b)为例):当库存错放率较低时,制造商采用RFID技术将会使零售商收益降低.这是因为较低的错放率引起零售商的收入损失,低于制造商采用RFID技术时零售商分摊的RFID成本.随着错放率的上升,若制造商不采用RFID技术,则此时零售商的收益呈下降趋势.当错放率高于某一阈值时,制造商采用RFID技术能够提升零售商的收益,并且上游企业均采用该技术时零售商可以获得更高的收益.在定价决策下,零售商销售竞争性产品的获益最大;在订货决策下,零售商销售互补性产品对其自身更有利.

## 5 结论

本文考虑了由两个制造商和一个零售商组成的两级供应链结构,零售商作为供应链的领导者且存在产品错放问题,构建了两个制造商是否采用RFID技术的收益模型,分别探讨了零售商销售竞争性或互补性产品时的定价或订货决策,得出了各成员的最优决策变量和最大收益,并探讨了两个制造商采用RFID的均衡策略.

零售商采用定价决策时:当RFID成本很低时,两个制造商均采用RFID技术;当RFID成本很高时,两个制造商均不采用该技术;当RFID成本适中时,两个制造商采用RFID技术的决策与产品间的影响程度相关.零售商销售竞争性产品时,随着产品竞争强度的增加,制造商能够承担的最大RFID成本阈值先上升后下降;零售商销售互补性产品时,随着产品互补程度的减弱,制造商能够承担的最大RFID成本阈值先下降后上升.

零售商采用订货决策时:无论销售何种产品,产品间的影响系数对制造商的RFID采用策略均有较大的影响.若产品间互补性较弱,则制造商均采用RFID技术的可能性较大;若产品竞争强度低于某一阈值,则随着产品同质性的上升,制造商越均采用RFID技术的可能性变小;若产品间竞争性过强,则制造商均采用RFID的可能性变大.与定价决策相同,零售商销售互补性产品时,制造商更倾向于采用RFID技术.

相较于订货决策,定价决策更有利于促使制造商采用RFID技术.如果RFID成本或错放率控制在一定范围内,当零售商采用定价决策时:若两个制造商生产竞争性产品,则制造商投资RFID技术能够使得零售商受益;若两个制造商生产互补性产品,则产品的互补性较弱时,投资RFID技术对零售商更有利.当

零售商采用订货决策时:若两个制造商生产互补性产品,则制造商投资RFID技术能够使得零售商受益;若两个制造商生产竞争性产品,则产品的竞争强度较弱时,投资RFID技术对零售商更有利。

本文的模型具有一定的局限性,没有考虑产品的错放率与订货总量的相关性。此外,实际运作中会涉及多个零售企业,探讨其RFID投资及定价或订货方式的偏好可以作为进一步研究的方向,在以后的工作中继续完善。

#### 参考文献(References)

- [1] 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[J].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[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(12): 124-134.)
- [2] Cannella S, Dominguez R, Framinan J M. Inventory record inaccuracy — The impact of structural complexity and lead time variability[J]. Omega, 2017, 68: 123-138.
- [3] Hardgrave B C, Aloysius J A, Goyal S. RFID-enabled visibility and retail inventory record inaccuracy: Experiments in the field[J]. Production and Operations Management, 2013, 22(4): 843-856.
- [4] Zhang L H, Wang S S. Strategic analysis of RFID adoption sequences in a supply chain with Cournot competition: Effects of ordering-timing strategies[J]. Annals of Operations Research, 2020: 1-40.
- [5] Shin S, Eksioglu B. An empirical study of RFID productivity in the US retail supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 163: 89-96.
- [6] Chen S, Wang H W, Xie Y, et al. Mean-risk analysis of radio frequency identification technology in supply chain with inventory misplacement: Risk-sharing and coordination[J]. Omega, 2014, 46: 86-103.
- [7] Fan T J, Tao F, Deng S, et al. Impact of RFID technology on supply chain decisions with inventory inaccuracies[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159: 117-125.
- [8] 张李浩,范体军,刘斌.基于库存错放的供应链RFID投资均衡策略[J].系统工程理论与实践,2017,37(12):3079-3087.  
(Zhang L H, Fan T J, Liu B. Equilibrium strategies of RFID adoption in the supply chain with inventory misplacement[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(12): 3079-3087.)
- [9] 张李浩,刘斌.供应链企业投资RFID技术的博弈均衡研究[J].中国管理科学,2018,26(10):132-139.  
(Zhang L H, Liu B. Research on the game equilibrium of RFID adoption among supply chain enterprises[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(10): 132-139.)
- [10] Hsieh C C, Chang Y L, Wu C H. Competitive pricing and ordering decisions in a multiple-channel supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 154: 156-165.
- [11] Wei Y H, Hu Q Y, Xu C. Ordering, pricing and allocation in a service supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(2): 590-598.
- [12] Chen J X, Liang L, Yao D Q, et al. Price and quality decisions in dual-channel supply chains[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 259(3): 935-948.
- [13] Kim H, Lu J C, Kvam P H, et al. Ordering quantity decisions considering uncertainty in supply-chain logistics operations[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 134(1): 16-27.
- [14] Bian J S, Lai K K, Hua Z S, et al. Bertrand vs. Cournot competition in distribution channels with upstream collusion[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 204: 278-289.
- [15] Cai G, Dai Y, Zhou S X, et al. Exclusive channels and revenue sharing in a complementary goods market[J]. Marketing Science, 2012, 31(1): 172-187.
- [16] Shen B, Liu S Y, Zhang T, et al. Optimal advertising and pricing for new green products in the circular economy[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 314-327.
- [17] Chod J, Lyandres E, Yang S A. Trade credit and supplier competition[J]. Journal of Financial Economics, 2019, 131(2): 484-505.
- [18] Zhang L H, Li T, Fan T J. Radio-frequency identification (RFID) adoption with inventory misplacement under retail competition[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 270(3): 1028-1043.
- [19] Wang H W, Chen S, Xie Y. An RFID-based digital warehouse management system in the tobacco industry: A case study[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(9): 2513-2548.
- [20] Yang H X, Chen W B. Game modes and investment cost locations in radio-frequency identification (RFID) adoption[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 286(3): 883-896.
- [21] Wang J B, Zhang T, Fan X J. Reverse channel design with a dominant retailer and upstream competition in emerging markets: Retailer- or manufacturer- collection? [J]. Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 137: 101924.

#### 作者简介

张李浩(1990—),男,副教授,博士生导师,从事博弈论、供应链管理研究, E-mail: lhzhang@shmtu.edu.cn;

张诚(1996—),男,博士生,从事博弈论、供应链管理研究, E-mail: Foolerzc@163.com;

陈靖(1985—),女,副教授,博士生导师,从事生鲜产品供应链决策研究, E-mail: Jingchen@shisu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)