

基于RFID技术的风险规避型双渠道供应链投资决策研究

马卫民，李阿敏

同济大学经济与管理学院，上海

收稿日期：2023年11月13日；录用日期：2024年1月5日；发布日期：2024年1月16日

摘要

本文在单一零售商和制造商构成的双渠道供应链中仅零售渠道发生库存损耗，研究实施RFID技术消除库存损耗对定价及收益的影响，同时引入均值 - 方差理论研究零售商的风险厌恶偏好对实施RFID技术的决策影响。研究发现：1) 不采用RFID技术时零售商的库存损耗率、采用RFID技术后的单位标签成本均会影响零售价和批发价，且不影响直销价，进而影响各成员的期望收益；2) 不论是否采用RFID技术，零售商的风险厌恶程度均会影响零售价和批发价，且应用RFID技术后，零售价低于不采用时的零售价，批发价高于不采用时的批发价；3) 当零售商的风险厌恶程度给定时，当且仅当单位标签成本低于某一阈值，零售商和制造商均可从RFID技术中获益，且这个阈值与产品生产成本、零售商的库存损耗率有关。

关键词

风险规避，RFID技术，库存管理，博弈论

Research on Decision-Making of Dual-Channel Supply Chain with Risk-Averse Retailer Based on RFID Technology

Weimin Ma, Amin Li

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Nov. 13th, 2023; accepted: Jan. 5th, 2024; published: Jan. 16th, 2024

Abstract

In a dual-channel supply chain with a single retailer and a manufacturer, inventory loss occurs

only in the retail channel. This paper investigates the impact on pricing and revenue when implementing RFID technology to eliminate the inventory loss problem. Meanwhile, it also introduces the mean-variance theory to study the impact of retailers' risk averse preferences on the decision to implement RFID technology. It is found that: 1) retailers' inventory loss rate without RFID technology, unit tag cost with RFID technology affect retail and wholesale prices, and do not affect direct sale price, and then affect the expected returns of each member; 2) retailers' risk aversion affects retail and wholesale prices whether he adopts RFID technology or not. And after the application of RFID technology, the retail price is lower than that without adoption, and the wholesale price is higher than that without adoption; 3) when retailers' risk aversion is given, retailer and manufacturer can benefit from RFID technology only if the cost per unit of tags is below a certain threshold, which is related to the production cost of the product, and the retailer's inventory loss rate.

Keywords

Risk Aversion, RFID, Inventory Management, Game Theory

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着互联网与物流的快速发展，众多企业选择采用“线上 + 线下”销售模式以扩大销售范围并实现利润增长，以苹果、华为等为代表的电子产品公司、三只松鼠、良品铺子为代表的食品公司、优衣库、Zara 为代表的服饰公司等不仅在网上设有官方旗舰店，在线下的众多商场内也入驻各自的实体官方店铺，以此来运营各自的“交易型客户”和“关系型客户”。在线下渠道中，即传统供应链结构，零售商是制造商和终端市场的中介，顾客在实体店中以零售价获得所需商品，这种行为的发生前提是顾客到店后对产品产生兴趣并直接购买；在线上渠道中，产品可以通过网络直接从制造商处销售给顾客，顾客以直销价获得所需产品，此方式可以节约线下实体店门店租赁费、人员费等成本，并能打开传统供应链结构无法覆盖的市场需求。在双渠道供应链中，制造商和零售商的竞合关系促使两方的渠道冲突加深，进一步增加了双渠道供应链的复杂性。

供应链库存管理问题是许多学者的研究重点。相比于传统供应链结构，制造商即可将产品批发给零售商通过零售渠道进行销售，也可通过直销渠道直接销售产品，因此，双渠道供应链结构比传统供应链多一个库存存放点，库存需求在两个库存点中发生波动，如何高效的管理企业库存也成为了更复杂的问题。产品只有销售完才能发挥其使用价值，但现实却常常因商品错放、丢失等损失一部分产品，这部分产品在销售期内未售出不仅会损失制造商和零售商的利润，还是对资源的浪费。降低库存损耗、提高库存信息的准确性是供应链管理中亟待解决的重要问题。射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)是物联网的核心技术之一，它可以通过无线电讯号识别特定目标并读写相关数据，通过扫描器随时检测商品的状态与位置，有效降低库存损耗率[1]，供应链成员可以随时追踪各自的库存水平，包括库存位置、数量和状态，有效降低库存过剩和短缺的风险，此技术在供应链管理领域已得到广泛关注与应用。

然而 RFID 技术在降低或消除库存错放、提高供应链运作效率的同时，会增加企业的投入成本。RFID 技术较高的技术投入和不确定的投资回报率影响企业对该技术的投入决策。因此，本文考虑仅零售商库存存在损耗问题，研究供应链成员的风险厌恶程度对实施 RFID 技术的定价策略及激励条件。

2. 文献综述

2003 年, Walmart 宣布使用 RFID 技术后, 国内外许多学者开始研究 RFID 技术投入对供应链库存准确性和投资收益的影响。Heese [2] 在单周期两级供应链模型中假设 RFID 技术可以完全消除库存误差, 指出在分散型供应链中当技术成本低于某一阈值时实施 RFID 技术可以获得更多的收益, 并有利于供应链协调。Camdereli [3] 考虑需求不确定下的供应链发生库存错放时, 供应链各方对技术投资的激励条件不完全一致, 并得到一方或双方获益时的单位标签成本的阈值范围。Fan [4] 等利用报童模型分析 RFID 技术减少库存收缩问题, 结果表明是否部署 RFID 取决于订购数量的可用率。龚本刚[5]等研究制造商与零售商都不投资、只有一方投资和均投资 RFID 技术对双渠道供应链收益的影响与协调。王珊珊[6]等针对错放问题, 研究新渠道引入与渠道地位差异对渠道成员 RFID 技术投资策略的影响并揭示了渠道协调的条件。

RFID 技术较高的技术投入和不确定的投资回报率影响企业对该技术的投入决策。现实中, 人群普遍存在着损失厌恶、规避风险的心理。风险厌恶决策者对应用 RFID 技术后未知的投资收益更敏感。陈双[7] 通过建立风险约束下的 Stackelberg 博弈模型研究发现风险厌恶型零售商在供应链中应用 RFID 技术会更谨慎。Xu 和 Zhao [8] 研究了风险厌恶型零售商的供应链中 RFID 技术对库存损耗的影响, 并指出当库存可用率和标签成本较低且回收率较高时, 应用 RFID 技术时获得利润显著提高。Chen [9] 等通过中心半离差衡量零售商的风险态度, 重点分析了风险态度对供应链成员采用 RFID 技术的动机影响, 以及相应的协调契约, 研究发现传统收益共享契约在不同的风险环境下无法协调供应链, 并提出了风险共担契约以协调供应链。

综上可知, 现有的 RFID 技术应用研究主要聚焦于传统供应链结构, 其中零售商在制造商和消费者之间扮演着中间商的角色, 将产品销售至终端市场。然而, 双渠道供应链的独特性质使其成为一个值得关注的领域。在这种结构中, 制造商和零售商既是合作关系的伙伴, 又是竞争关系的参与者。双方成员在同一市场销售产品, 拥有各自的库存, 这为库存管理带来了更大的挑战。由于零售商更接近终端市场, 且库存损耗的发生常常受人为操作的影响, 因此本文假设仅零售商的库存发生库存损耗, 且库存损耗率在供应链中是完全信息。为了提高库存准确性和可见性, 由零售商决策是否应用 RFID 技术, 零售商与制造商共同承担此部分技术成本, 此外假设零售商是风险厌恶决策者, 是否采用 RFID 技术也会受零售商的风险规避程度影响。

本文将以单个零售商和制造商构成的双渠道供应链为研究对象, 考虑零售渠道发生库存损耗问题, 且一旦发生损耗, 该产品将不可再销售, 同时, 本文考虑风险厌恶偏好在实施 RFID 技术以消除库存损耗时对供应链企业收益的影响。通过建立 Stackelberg 博弈模型, 零售商和制造商分散决策, 以实现自身利益最大化为决策目标, 分别分析未采用 RFID 技术和采用 RFID 技术后影响各成员定价决策和收益的因素, 并通过比较应用 RFID 技术前后收益的差异得到零售商和制造商从实施 RFID 技术中获益的激励条件。最后通过算例分析对结果进行数值验证, 从中获得管理启示。这一研究有助于为风险厌恶型双渠道供应链的决策者提供投资 RFID 技术的理论依据, 并且可以拓宽 RFID 技术在库存管理中的应用领域, 提高供应链的效率和可持续性。

3. 问题描述与假设

双渠道供应链由单个零售商(M)和单个制造商(R)构成(如图 1)。制造商既可将产品售卖给零售商, 也可以直接销售给消费者; 零售商从制造商处批发产品, 后销售给消费者。假设制造商是 Stackelberg 博弈的领导者, 零售商是跟随者; 供应链成员间信息完全且以自身利益最大化为决策目标。制造商以成本 c 生产短生命周期产品, 并以价格 p_D 通过直销渠道销售产品给消费者, 以批发价 w 通过零售渠道供应给零售商。零售商以价格 p_R 销售商品给消费者, 零售商从制造商处批发的产品与制造商直接销售的产品是相

同的。制造商在双渠道供应链中具有高权力属性, 库存管理能力较强, 可以应对双渠道市场需求变化对其库存的影响, 而零售商作为制造商的下游企业, 更直接面对终端市场, 且在搬运、存储、保留产品时面临更大风险, 因此假设仅零售商的库存发生损耗, 用 α 表示其库存损耗率, 即零售商的库存准确率为 $1-\alpha$, 发生损耗的产品不再继续销售, 不再获得额外收益, 即假设无产品残值, 且零售商的库存准确率是供应链结构的完全信息。双渠道供应链模型如下图 1。

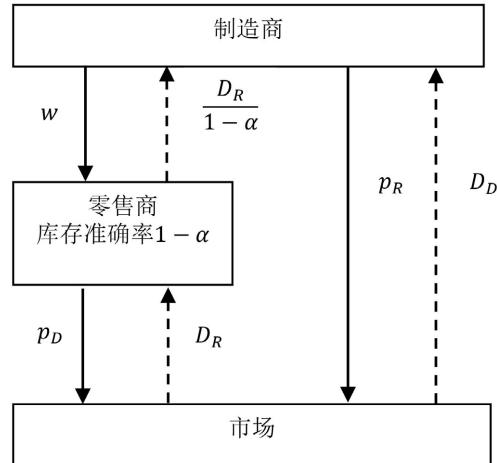


Figure 1. Dual-channel supply chain structure model with inventory inaccuracy

图 1. 发生库存损耗的双渠道供应链结构模型

假设市场需求是价格敏感型的线性函数, 且两条渠道的替代率相同。则两条渠道的需求函数分别为:

$$D_D = \theta a - p_D + \beta p_R \quad (1)$$

$$D_R = (1-\theta)a - p_R + \beta p_D \quad (2)$$

其中 D_D 和 D_R 分别表示直销渠道和零售渠道的市场需求量。式(1)和(2)表示各渠道的市场需求量由零售价 p_R 、直销价 p_D 决定。 a 表示市场总需求, 它是一个随机变量, 由潜在需求和随机波动两部分组成, 表示因经济或营商环境变动而导致的市场不确定性。 $a = a_0 + \tau$, a_0 是正常数, 表示潜在市场总需求, 而 $\tau \sim N(0, \varepsilon^2)$ 。参数 θ 表示直销渠道在市场中的占有率, $(1-\theta)$ 表示零售渠道在市场中的占有率, 其中 $0 < \theta < 1$ 。参数 β ($0 < \beta < 1$) 表示零售渠道和直销渠道的可替代性, 反映了渠道竞争的激烈程度。

为了便于数理分析, 本文假设不采用 RFID 技术时零售商的库存损耗持续发生, 且损耗率不变, 不考虑发生损耗的产品残值, 即零售商方仅 $(1-\alpha)$ 的库存可用于销售。采用 RFID 技术后, 零售商的库存损耗可完全消除, 即 $\alpha=0$ 。

当零售商决定采用 RFID 技术时, 将产生单位标签成本和基础设施等固定成本。商品数量较多时, 固定成本仅占总技术成本的小部分, 为了限制模型中的参数数量, 本文仅考虑 RFID 技术的单位标签总成本, 此部分技术成本由零售商和制造商共同承担。因为应用 RFID 技术后, 不仅能直接降低零售商的库存不准确性, 也可以降低市场的波动性, 供应链的整体绩效得到改善, 零售商和制造商双方均可获益。本文假设零售商是风险厌恶决策者, 制造商为风险中性决策者。本文采用均值-方差模型刻画零售商的风险厌恶程度, 用效用函数刻画零售商的风险偏好对采用 RFID 技术时的期望利润:

$$U(\pi) = E(\pi) - k\sqrt{\text{VAR}(\pi)} \quad (3)$$

其中, $k(k > 0)$ 表示零售商的风险厌恶程度, k 越大, 说明零售商越厌恶风险。

4. 模型建立与描述

在双渠道供应链模型中, 假设制造商是 Stackelberg 博弈的领导者, 零售商是跟随者。零售商首先从自身的风险厌恶程度出发决定是否实施 RFID 技术解决库存损耗问题, 随后制造商确定产品批发价和直销价, 最后零售商确定零售价。销售周期结束后, 计算制造商和零售商的销售利润。通过逆序归纳法求解上述博弈过程。

4.1. 未采用 RFID 技术的双渠道供应链模型

当不采用 RFID 技术时, 为了满足市场的零售渠道的需求, 则零售商必须订购 $Q_R^N = \frac{D_R^N}{1-\alpha}$ 单位的商品。

零售商虽然尚未投入 RFID 的技术成本, 但面临变化多端的市场营商环境及市场竞争力等风险影响, 零售商的风险厌恶程度需持续关注。本文用 k 表示零售商的风险厌恶程度, $k > 0$ 表示零售商厌恶风险, k 越大, 则零售商越厌恶风险。使用效用函数表示零售商的期望收益, 使用期望利润函数表示制造商的期望收益。

制造商的期望收益函数为:

$$E(\pi_M^N) = (p_D^N - c)D_D^N + (w^N - c)Q_R^N \quad (4)$$

零售商的期望收益函数为:

$$U(\pi_R^N) = p_R^N D_R^N - w^N Q_R^N - k \left(p_R^N - \frac{w^N}{1-\alpha} \right) (1-\theta) \varepsilon \quad (5)$$

$U(\pi_R^N)$ 关于 p_R^N 求一阶导, 并令 $\frac{\partial U(\pi_R^N)}{\partial p_R^N} = 0$, 得到使零售商利润最大化的最优零售价:

$$p_R^{N*} = \frac{1}{2} \left[(1-\theta)a_0 + \beta p_D^N + \frac{w^N}{1-\alpha} - bk \right] \quad (6)$$

其中, $b = (1-\theta)\varepsilon$ 。

将(6)式代入(4)式, 对 $E(\pi_M^N)$ 分别关于 w^N 和 p_D^N 求一阶导数, 令 $\frac{\partial E(\pi_M^N)}{\partial w^N} = 0$ 和 $\frac{\partial E(\pi_M^N)}{\partial p_D^N} = 0$ 可得制造商的最优批发价和最优直销价。且 $E(\pi_M^N)$ 关于 w^N 和 p_D^N 求二阶导数得到的 Hessian 矩阵

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E(\pi_M^N)}{\partial w^{N2}} & \frac{\partial^2 E(\pi_M^N)}{\partial w^N \partial p_D^N} \\ \frac{\partial^2 E(\pi_M^N)}{\partial p_D^N \partial w^N} & \frac{\partial^2 E(\pi_M^N)}{\partial p_D^{N2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 + \beta^2 & \frac{\beta}{1-\alpha} \\ \frac{\beta}{1-\alpha} & -\frac{1}{(1-\alpha)^2} \end{pmatrix}$$

H 是负定矩阵且 $\frac{\partial^2 E(\pi_M^N)}{\partial w^{N2}} < 0$, 所以 $E(\pi_M^N)$ 是 w^N 和 p_D^N 的严格凹函数。由此, 可得到

$$w^{N*} = \frac{1}{2} \left[c + (1-\alpha) \left(\frac{\beta a_1 a_2}{1-\beta^2} + bk \right) \right] \quad (7)$$

$$p_D^{N*} = \frac{1}{2} \left(c + \frac{a_1 + \beta a_2}{1 - \beta^2} \right) \quad (8)$$

其中, $a_1 = \theta a_0$, $a_2 = (1 - \theta)a_0$ 。

将式(7)和式(8)代入式(6)中, 化简可得, 零售商的最优零售价 p_R^{N*} :

$$p_R^{N*} = \frac{1}{4} \left[\left(\beta + \frac{1}{1 - \alpha} \right) c + 2N + a_2 - bk \right] \quad (9)$$

最后将式(7)、(8)和(9)代入式(4)、(5)中, 可得制造商和零售商的最优期望利润:

$$E(\pi_M^{N*}) = \frac{1}{8} \left[P_1(T - c) + (Q_1 - bk) \left(N + bk - \frac{c}{1 - \alpha} \right) \right] \quad (10)$$

$$U(\pi_R^{N*}) = \frac{1}{16} (Q_1 - 3bk)^2 \quad (11)$$

注: $P_1 = c \left[\beta \left(\frac{1}{1 - \alpha} + \beta \right) - 2 \right] + 2a_1 + \beta(a_2 - bk)$, $Q_1 = c \left(\frac{1}{\alpha - 1} + \beta \right) + a_2$, $T = \frac{a_1 + \beta a_2}{1 - \beta^2}$, $N = \frac{\beta a_1 + a_2}{1 - \beta^2}$ 。

4.2. 采用 RFID 技术的双渠道供应链模型

本节讨论当零售商决定采用 RFID 技术以减少或消除其库存损耗后对制造商和零售商定价与收益的影响。假设实施 RFID 技术后零售商的库存损耗可完全消除, 即 $\alpha = 0$, 则零售渠道的订购量与零售市场需求相同, 为 D_R , 直销渠道的市场需求保持不变。零售商的风险厌恶偏好如上 3.1 节, 加入模型中刻画其规避风险的能力。零售商厌恶风险的程度在双渠道供应链结构中是完全信息。实施 RFID 技术的固定成本相比于总标签成本占比较小, 为了约束变量数量, 本节仅考虑单位标签成本在制造商和零售商中分摊, 零售商分摊 λt , 制造商分摊 $(1 - \lambda)t$ 。采用式(3)的效用函数表示零售商的期望利润, 制造商依旧用期望收益函数表示期望利润。

制造商的期望收益函数:

$$E(\pi_M^F) = (p_D^F - c)D_D^F + (w^F - c - (1 - \lambda)t)D_R^N \quad (12)$$

零售商的效用函数:

$$U(\pi_R^F) = (p_R^F - w^F - \lambda t)D_R^N - k(p_R^F - w^F - \lambda t)(1 - \theta)\varepsilon \quad (13)$$

与不采用 RFID 技术的供应链模型求解过程类似, 可以得到采用 RFID 技术后双渠道供应链的最优定价决策和均衡收益汇总如下。

$$p_D^{F*} = \frac{1}{2}(c + T) \quad (14)$$

$$w^{F*} = \frac{1}{2} [c + (1 - 2\lambda)t + bk + N] \quad (15)$$

$$p_R^{F*} = \frac{1}{4} [t + c(1 + \beta) - bk + a_2 + 2N] \quad (16)$$

$$E(\pi_M^{F*}) = \frac{1}{8} [P_2(T - c) + (Q_2 + bk)(bk + N - c - t)] \quad (17)$$

$$U(\pi_R^{F*}) = \frac{1}{16} (Q_2 - 3bk)^2 \quad (18)$$

注: $P_2 = c(\beta + \beta^2 - 2) + 2a_1 + \beta(a_2 - bk + t)$, $Q_2 = c(\beta - 1) - t + a_2$, $T = \frac{a_1 + \beta a_2}{1 - \beta^2}$, $N = \frac{\beta a_1 + a_2}{1 - \beta^2}$ 。

由式(7)~式(18)可得命题 1。

命题 1 在批发价契约下,

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_R^{N*}}{\partial \alpha} &> 0; \quad \frac{\partial w^{N*}}{\partial \alpha} < 0; \quad \text{且 } p_D^{N*} \text{ 与 } \alpha \text{ 无关。} \\ \frac{\partial p_R^{F*}}{\partial t} &> 0; \quad \text{当 } \lambda < \frac{1}{2}, \quad \frac{\partial w^{F*}}{\partial t} > 0, \quad \text{当 } \lambda < \frac{1}{2}, \quad \frac{\partial w^{F*}}{\partial t} > 0; \quad \text{且 } p_D^{F*} \text{ 与 } t \text{ 无关。} \\ \frac{\partial p_R^{j*}}{\partial k} &< 0; \quad \frac{\partial w^{j*}}{\partial k} > 0; \quad \text{且 } p_D^{j*} \text{ 与 } k \text{ 无关, } j = N, F, \quad \text{且 } p_D^{N*} = p_D^{F*}. \end{aligned}$$

命题 1.1 表明零售商不采用 RFID 技术时, 零售商的零售价 p_R^N 随其库存损耗率 α 的增加而增加; 制造商的批发价 w^N 会受零售商的库存准确率 α 影响, 且随准确率的增加而减少, 而直销价则不受零售商的库存损耗问题影响。库存损耗会给零售商和制造商都带来不确定性, 零售商为了减低库存损耗对其的影响, 选择保守的定价策略以此确保足够的利润应对潜在的损失, 而制造商为了降低这种不确定性则会设定较高的批发价以获得足够的回报。而直销渠道不经过零售商的库存, 所以直销价不受零售商的库存损耗影响。

命题 1.2 表明零售商采用 RFID 技术后, 零售商的零售价 p_R^F 受技术成本的影响, 表现为零售价随单位标签成本的增加而增加。制造商的批发价 w^F 与单位标签成本的关系与如何在零售商和制造商间进行分摊有关, 当 $\lambda < \frac{1}{2}$, 即制造商分摊较多的技术成本时, 批发价随单位标签成本的增加而增加; 当 $\lambda > \frac{1}{2}$,

此时零售商分摊较多的技术成本, 批发价随单位标签成本的增加而减少。直销价则与 RFID 的技术成本无关。零售商采用 RFID 技术后, 通过提高零售价将部分技术成本转嫁给顾客, 以维护自身的盈利能力; 当零售商分摊较大比例的应用技术成本时, 从合作角度出发制造商会降低批发及以减轻零售商的成本负担, 而当制造商承担较大比例的应用技术成本时, 制造商倾向于将部分 RFID 技术成本纳入批发价中以维护自己的盈利能力。

命题 1.3 表明不论零售商是否采用 RFID 技术, 零售价和批发价均会受零售商的风险厌恶程度的影响, 直销价则不受影响。零售价与风险厌恶程度成负相关, 即零售商越厌恶风险, 其在零售渠道的定价越低, 这与 Liu [10] 等人的研究结果相同, 面对市场的不确定性, 零售商作为风险厌恶决策者会不愿意冒险, 期望通过降低价格来吸引顾客, 纠夺更多的销售市场份额; 而批发价则与零售商的风险厌恶程度成正相关, 这与王婷婷[11]证明的批发价不受零售商的风险厌恶程度影响的结论不同, 原因可能是零售商在降低零售价来增加零售渠道市场需求量时, 直销渠道需求减少, 制造商作为理性人, 就会通过提高批发价增加其在零售渠道的收益, 弥补直销渠道的损失。

4.3. 风险厌恶对应用 RFID 技术的影响分析

综合 3.1 和 3.2 所得制造商和零售商的最优期望利润, 本节主要探讨双渠道供应链中风险厌恶偏好对 RFID 应用的影响。零售商和制造商 ($i = R, M$) 愿意采用 RFID 技术的激励函数定义如下:

$$Inc_R = U(\pi_R^{F*}) - U(\pi_R^{N*}) \tag{19}$$

$$Inc_M = E(\pi_M^{F*}) - E(\pi_M^{N*}) \tag{20}$$

当且仅当 $Inc_i^* > 0$, 供应链成员愿意采用 RFID 技术, 其中 $i = R, M$ 。

根据 3.1 和 3.2 所得结果, 代入即可得零售商和制造商的激励函数, 化简后分别为:

$$Inc_R = U(\pi_R^{F*}) - U(\pi_R^{N*}) = \frac{1}{16} \left(t - \frac{c\alpha}{1-\alpha} \right) \left[t - 2a_2 + 6bk - c \left(2\beta - 1 - \frac{1}{1-\alpha} \right) \right]$$

$$Inc_M = E(\pi_M^{F*}) - E(\pi_M^{N*}) = \frac{1}{8} \left(t - \frac{c\alpha}{1-\alpha} \right) \left[t - 2a_2 - 2bk - c \left(2\beta - 1 - \frac{1}{1-\alpha} \right) \right]$$

令 $Inc_R = 0$, 可得

$$t_{R1} = \frac{c\alpha}{1-\alpha}$$

$$t_{R2} = 2a_2 - 6bk + c \left(2\beta - 1 - \frac{1}{1-\alpha} \right)$$

令 $Inc_M = 0$, 可得

$$t_{M1} = \frac{c\alpha}{1-\alpha}$$

$$t_{M2} = 2a_2 + 2bk + c \left(2\beta - 1 - \frac{1}{1-\alpha} \right)$$

命题 2 对于给定的 k , $Inc_i^* > 0$ 当且仅当 $t < \frac{c\alpha}{1-\alpha}$, $i = R, M$ 。

命题 2 表明, 当零售商的风险厌恶程度固定时, 制造商和零售商采用 RFID 技术的激励条件一致。

当且仅当单位标签成本低于 $\frac{c\alpha}{1-\alpha}$ 时, 供应链成员 i 都愿意采用 RFID 技术, 各成员均可从中获得比不采用

时更大的收益。一旦单位标签成本超过此阈值, 采用 RFID 技术所花费的成本将会超过该技术带来的利润, 制造商的批发价定价和收益也会受到单位标签成本的影响, 零售商和制造商将宁可承担库存不准确带来的损失也不愿意采用 RFID 技术。

5. 算例分析

为了进一步分析关键参数对决策变量的影响, 本节通过 Matlab 从零售商的库存准确率、单位标签成本、零售商的风险厌恶程度三个维度对定价、收益及采用 RFID 的决策进行敏感性分析。模型参数设置如下: $a = 100, \theta = \beta = 0.5, c = 2, \varepsilon = 10$ 。

图 2 表示不采用 RFID 技术时, 零售商的库存损耗率对供应链成员定价和收益的影响。从图表可知, 当零售商的风险厌恶程度固定 ($k = 2$) 时, 零售商的库存损耗越大, 即零售商的库存准确率越低, 零售价越高, 制造商的批发价越低, 但直销价不受影响; 零售商的利润随库存损耗率的增加而减少, 制造商的利润则提高。这种情况说明零售渠道的库存管理问题不影响直销渠道, 此外, 零售商为了应对库存损耗问题, 当库存准确率较低时, 零售商会订购更多的产品以满足零售渠道的市场需求, 与此同时, 零售商也会损失多于零售市场需求的产品成本, 零售商会选择增加零售价以弥补此部分损失成本, 但同时零售渠道的需求降低, 因此, 整体上零售商的利润降低。制造商在零售渠道的批发价降低也符合规模经济原理, 当零售商订购越多的产品, 批发价会越低, 此外, 由于零售渠道的市场需求减少, 在市场总需求不变的情况下, 顾客会选择直销渠道购买产品, 因此, 制造商的总利润会提高。

图 3 表示当零售商采用 RFID 技术以消除其库存损耗问题时, RFID 的单位标签成本 t 对各供应链成员定价及收益影响。当零售商的风险厌恶程度固定 ($k = 2$) 时, 随着单位标签成本的提高, 零售价提高, 直销价不受影响, 批发价的变化趋势与技术成本在零售商和供应商之间的分摊比例有关, 当制造商承担较多技术成本时, 批发价随单位标签成本的增加而增加, 当零售商承担较多技术成本时, 批发价随单位

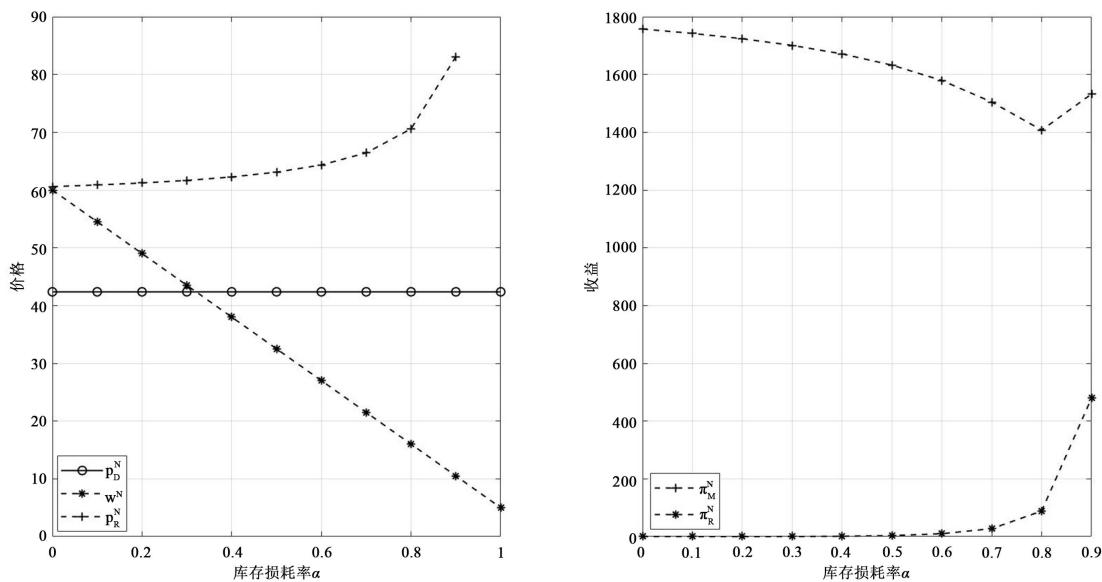


Figure 2. Impact of inventory inaccuracy rate on pricing and revenue
图 2. 库存损耗率对定价及收益的影响

标签成本的增加而减少；零售商和制造商的总利润与单位标签成本成反比例关系。当零售商决定采用RFID技术后，比不采用时投入更多的成本，为了弥补这部分技术投入，零售商将增加零售价以将部分增加的成本转移给终端市场客户。为了增加供应链整体绩效，制造商愿意与零售商共同承担RFID技术成本，当制造商承担较多技术成本时，通过将部分成本纳入批发价最终导致批发价增加，当零售商分摊较多技术成本时，制造商降低批发价减轻零售商的成本负担，并且可以增加零售商的订购量。由于零售价增加导致零售渠道的需求量降低，零售商的利润降低，虽然直销渠道的需求增加，由于供应商多付出的技术成本，及零售渠道的订购量减少，制造商的利润整体上也呈现减少的趋势。

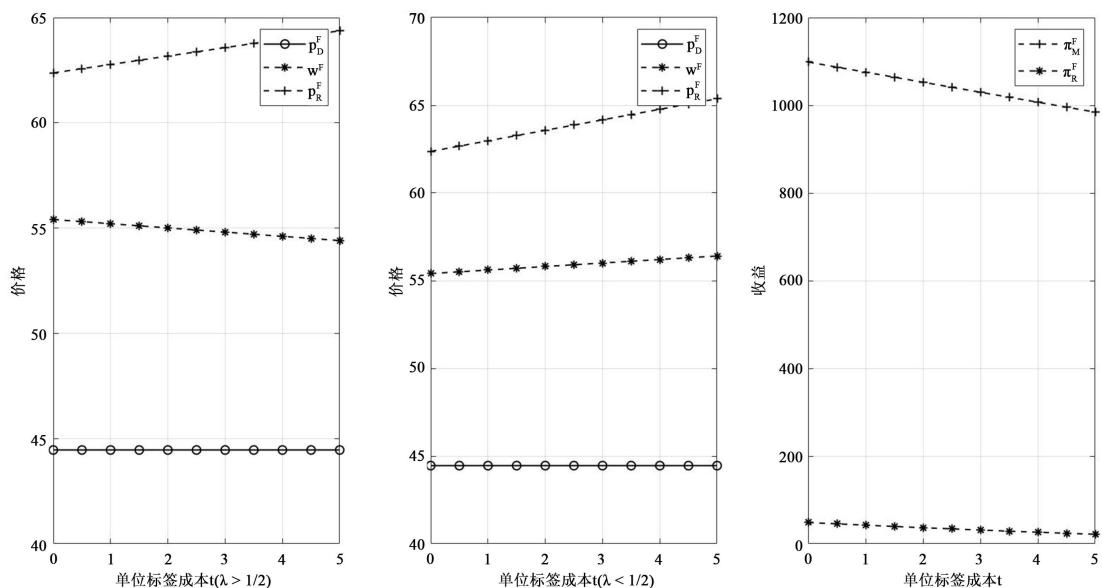


Figure 3. Impact of unit tag cost on pricing and revenue
图 3. 单位标签成本对定价及收益的影响

图 4 表示当单位标签成本 t 固定时, 不采用和采用 RFID 技术两种情况下供应链成员定价与零售商风险厌恶程度 k 的关系, 其中假设不采用 RFID 技术时, 零售商的库存准确率为 50% (即 $\alpha = 0.5$)。首先, 制造商的直销价不受零售商的风险厌恶程度影响, 且不受零售商是否采用 RFID 技术的影响。其次, 零售价与风险厌恶程度 k 成负相关, 批发价与 k 成正相关。通过对比是否采用 RFID 技术前后零售价与批发价的大小发现, 采用 RFID 技术后, 批发价高于不采用时的批发价, 零售价则低于不采用时的零售价。原因是采用 RFID 技术后, 由于零售商的库存准确率提高, 导致其从制造商处订购的产品数量减少, 根据经济学中的规模经济理论, 制造商会增加其售卖给零售商的批发价。对于零售商而言, 投入技术成本并且从制造商处订购产品批发价增加, 但零售价却降低, 原因可能是不采用 RFID 技术时由于库存不准导致订购的超过零售市场需求的产品成本增加值大于采用 RFID 技术后投入的技术成本与制造商增加的批发价, 零售商反而不需要增加更多的零售价以弥补其投入的各项成本。这一结论的原因需进一步挖掘。

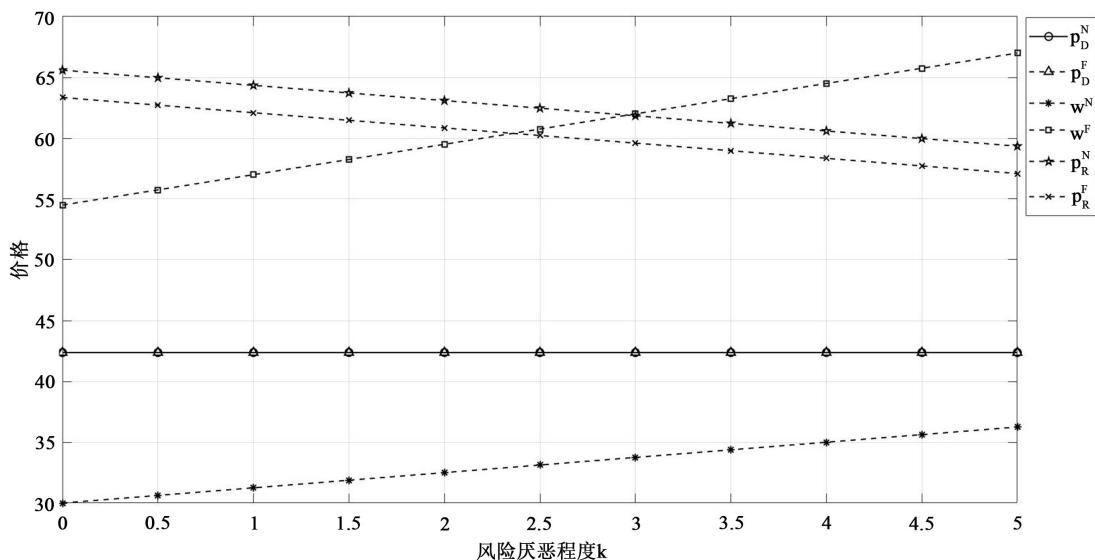
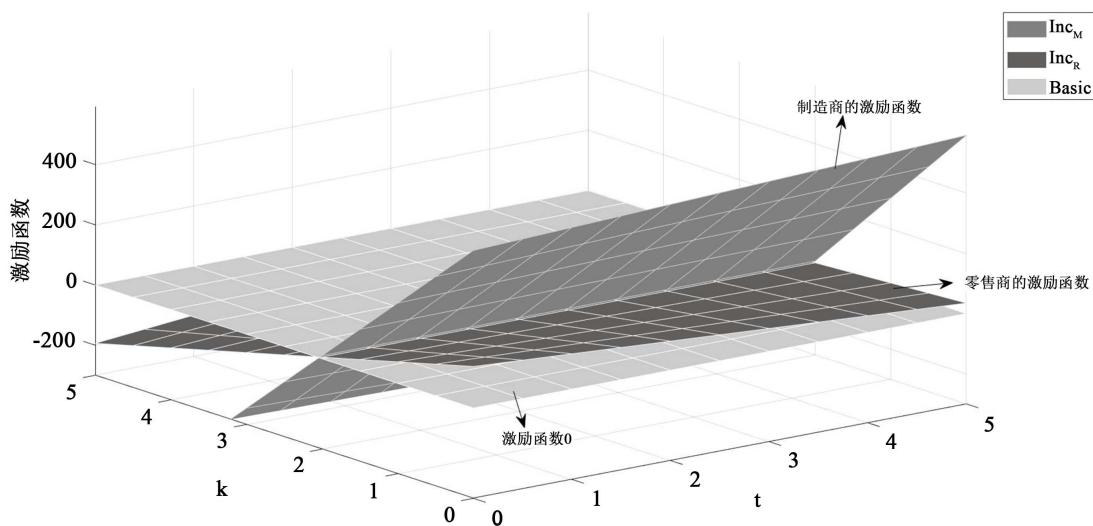


Figure 4. Impact of risk aversion on pricing

图 4. 风险厌恶程度对定价的影响

图 5 描绘了对于不同的风险厌恶程度 k 和单位标签成本 t , 供应链成员采用 RFID 技术的激励变化, 其中假设不采用 RFID 技术时, 零售商的库存准确率为 50% (即 $\alpha = 0.5$)。当零售商的风险厌恶程度固定时, 零售商和制造商的激励函数均随单位标签成本 t 的增加而减少。当 k 和 t 的值较小时, 两个供应链成员都更愿意采用 RFID 技术。即存在合适的区域 (k, t) , 使得零售商和制造商均可从应用 RFID 的决策中获益。

通过算例来研究零售商的风险厌恶程度和单位标签成本对供应链成员采用 RFID 的影响, 相应值得结果总结在表 1 中。参数设置如下: $a = 100, \theta = \beta = 0.5, c = 2, \varepsilon = 10, \alpha = 0.5$ 。从表 1 中可知, 当 $t < 2$ 时, 零售商采用 RFID 的激励函数随其风险厌恶程度 k 的增加而降低, 制造商的激励函数则随 k 的增加而增加; 而当 $t > 2$ 时, 零售商采用 RFID 的激励函数随其风险厌恶程度 k 的增加而增加, 制造商的激励函数则随 k 的增加而降低。通过 3.3 节模型的推导, 可知 $t = \frac{c\alpha}{1-\alpha} = 2$, 即当零售商的风险厌恶程度较小时, 零售商、制造商从 RFID 技术中获益的激励条件除与单位标签成本有直接关系外, 还与产品成本 c 和零售商的库存准确率 α 有间接关系。

**Figure 5.** Impact of different k and t on RFID adoption decisions of supply chain members**图 5.** 不同 k 和 t 对供应链成员采用 RFID 决策的影响**Table 1.** Optimal decision and incentive function under different k and t **表 1.** 不同的 k 与 t 下的最优决策及激励函数变化

k	t	$U(\pi_R^{N*})$	$U(\pi_R^{F*})$	$E(\pi_M^{N*})$	$E(\pi_M^{F*})$	Inc_R^*	Inc_M^*
2	1	37.8	42.6	1476.5	1507.0	4.8	30.5
2	2	37.8	37.8	1476.5	1476.5	0.0	0.0
2	3	37.8	34.8	1476.5	1456.5	-3.0	-20.0
3	1	0.8	1.6	1623.7	1656.8	0.8	33.1
3	2	0.8	0.8	1623.7	1623.7	0.0	0.0
3	3	0.8	0.4	1623.7	1601.9	-0.4	-21.8
4	1	18.9	15.8	1783.1	1818.9	-3.1	35.8
4	2	18.9	18.9	1783.1	1783.1	0.0	0.0
4	3	18.9	21.2	1783.1	1759.6	2.2	-23.5

6. 结语

本文针对双渠道供应链中仅零售渠道发生库存损耗的情景进行了深入考察, 研究在未采用 RFID 技术的情况下零售商的库存损耗率和采用 RFID 技术后单位标签成本对定价及利润的影响, 并运用均值-方差模型构建效用函数以刻画采用 RFID 技术前后零售商的风险厌恶程度对定价、利润等决策的影响, 通过比较实施 RFID 前后的利润做差获得供应链成员的激励函数, 进一步揭示了供应链成员从 RFID 技术中获益的激励条件以实现供应链协调。最后, 结合算例分析对相关结论进行验证。研究结论与启示如下:

- 1) 当不采用 RFID 技术时, 零售商的库存损耗率影响零售商的零售价和制造商的批发价, 不影响直销价, 并进一步影响供应链内各成员的利润。随着零售商库存损耗率的增加, 零售渠道的零售价增加, 而制造商的批发价减少, 直销价不变, 并且零售商的期望利润随之增加, 制造商的期望利润降低。
- 2) 当采用 RFID 技术时, RFID 技术的单位标签成本对零售价和批发价有影响, 却不影响制造商的直销价, 进而影响市场对各渠道的需求量及供应链中的成员利润。随着单位标签成本的增加, 零售渠道的

零售价增加, 制造商制定的批发价变化趋势则与技术成本在供应链成员中的分摊比例有关, 零售商和制造商的期望利润均呈降低趋势。

3) 不论零售商是否采用 RFID 技术, 零售商的风险厌恶程度对定价和收益均有影响。零售商越厌恶风险, 规避风险的能力越弱, 其在零售渠道的定价会越低, 以弥补风险的不确定性对其利润的影响。制造商则会提高其批发价以减少利润的损失。此外, 通过算例分析可以比较出应用 RFID 技术前后的价格差异, 采用 RFID 技术后, 批发价高于不采用时的批发价, 而零售价低于不采用时的零售价, 导致此现象的原因待进一步讨论。

4) 对于给定的零售商风险厌恶程度, 零售商和制造商可从 RFID 技术获益的激励条件一致, 即当单位标签成本低于某一阈值时, 供应链成员必可从 RFID 技术实施中获益, 供应链整体绩效最优。此阈值与产品生产成本、零售商的库存准确率有关。

本研究限定了仅零售商的库存发生库存损耗, 采用 RFID 技术仅能改善零售商方的库存水平, 因此单位标签成本仅由零售商承担。然而实际供应链系统中, 制造商的库存产品既提供给零售商, 也会直接销售给顾客, 制造商的库存也会存在错放、丢失等损耗问题。在这种情况下, 制造商和零售商都有潜在机会采用 RFID 技术提高各自的库存准确率和可见性。在这一情况下, 应用 RFID 技术的成本分摊问题也是一个研究重点。如何合理分摊额外的技术成本, 供应链各方在何种条件下获得潜在效益, 这种成本分摊问题在实际供应链中具有实际意义, 对于提高库存管理和降低损耗风险至关重要。

基金项目

国家社会科学基金资助项目(20BGL115)。

参考文献

- [1] Shin, S. and Eksioglu, B. (2015) An Empirical Study of RFID Productivity in the U.S. Retail Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, **163**, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.016>
- [2] Heese, H.S. (2007) Inventory Record Inaccuracy, Double Marginalization, and RFID Adoption. *Production and Operations Management*, **16**, 542-553. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2007.tb00279.x>
- [3] Camdereli, A.Z. and Swaminathan, J.M. (2010) Misplaced Inventory and Radio-Frequency Identification (RFID) Technology: Information and Coordination. *Production and Operations Management*, **19**, 1-18. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01057.x>
- [4] Fan, T.-J., Chang, X.-Y., Gu, C.-H., et al. (2014) Benefits of RFID technology for reducing inventory shrinkage. *International Journal of Production Economics*, **147**, 659-665. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.007>
- [5] 龚本刚, 汤家骏, 张孝琪, 等. 基于 RFID 技术的双渠道供应链投资收益与协调[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(9): 2068-2080.
- [6] 王珊珊, 范小军, 郭鑫. 考虑不同渠道优势的 RFID 技术的投资均衡策略[J]. 管理学报, 2022, 19(6): 919-927.
- [7] 陈双. 供应链中 RFID 技术应用的风险分析[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] Xu, C. and Zhao, D. (2016) Optimal Decisions for Adoption of Item-Level RFID in a Retail Supply Chain with Inventory Shrinkage under CVaR Criterion. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **2016**, Article ID: 7834751. <https://doi.org/10.1155/2016/7834751>
- [9] Chen, S., Wang, H., Xie, Y., et al. (2014) Mean-Risk Analysis of Radio Frequency Identification Technology in Supply Chain with Inventory Misplacement: Risk-Sharing and Coordination. *Omega*, **46**, 86-103. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.001>
- [10] Liu, M., Cao, E. and Salifou, C.K. (2016) Pricing Strategies of a Dual-Channel Supply Chain with Risk Aversion. *Transportation Research Part E*, **90**, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.11.007>
- [11] 汪婷婷. 物联网环境下供应链中 RFID 应用的决策分析及协调研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.