

制造商资金约束的闭环供应链融资模式选择策略

刘春怡¹, 尤天慧¹, 曹兵兵²

(1. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 广州大学 管理学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 针对由零售商、回收商和资金约束的制造商构成的闭环供应链融资模式选择问题, 分别构建了考虑资金约束制造商向零售商融资(内部融资)和向银行融资(外部融资)时制造商、零售商、回收商和闭环供应链的收益函数, 并基于Stackelberg博弈的思想给出两种融资模式下的最优定价与回收率策略. 在此基础上, 通过对比不同融资模式下回收商、零售商、制造商和闭环供应链的最优决策和利润, 从不同角度给出了最优融资模式选择策略. 研究表明, 在一定条件下, 选择零售商进行融资对回收商、零售商、制造商和闭环供应链均有利.

关键词: 闭环供应链; 资金约束; 融资模式; 选择策略; Stackelberg 博弈

中图分类号: TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)05-0745-08

Financing Mode Selection Strategies of Closed-Loop Supply Chain with Capital Constrained Manufacturer

LIU Chun-yi¹, YOU Tian-hui¹, CAO Bing-bing²

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. School of Management, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China. Corresponding author: YOU Tian-hui, E-mail: thyou@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Aiming at the financing mode selection problem of a closed-loop supply chain consisting of a retailer, a recycler, and a capital constrained manufacturer, the revenue functions of the manufacturer, retailer, recycler, and closed-loop supply chain are constructed when the capital constrained manufacturer can get financing from the retailer (internal financing) or the bank (external financing), respectively, and based on the Stackelberg game, the optimal pricing and return rate strategies under two financing modes are given. On this basis, by comparing the optimal decisions and revenue of the recycler, retailer, manufacturer, and closed-loop supply chain under different financing modes, the financing mode selection strategies are given from different perspectives. The research results show that under certain conditions, the retailer providing financing services are beneficial for the manufacturer, retailer, recycler and closed-loop supply chain.

Key words: closed-loop supply chain; capital constraint; financing mode; selection strategy; Stackelberg game

近年来环境污染和资源短缺问题日益严重, 由于废旧物品回收再制造不仅可以减少环境污染, 实现资源循环利用, 还能够一定程度上降低企业的生产成本, 许多制造企业(如富士施乐、中国重汽、尼尔森)开始尝试产品再制造^[1-2]. 由于回收再制造涉及的环节众多, 需要大量前期投

入, 资金不足成为阻碍制造企业参与回收再制造业务的重要因素^[3]. 资金不足的制造商通常有两种融资方式, 即银行贷款^[4]和供应链内企业贷款^[5]. 银行贷款安全系数高且资金来源稳定, 但是融资门槛较高, 中小型企业往往难以获得银行贷款. 因此, 当制造商资金短缺时, 为了增强资金供

收稿日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72002054); 国家社会科学基金资助项目(18ZDA043).

作者简介: 刘春怡(1990-), 女, 山西偏关人, 东北大学博士研究生; 尤天慧(1967-), 女, 黑龙江宾县人, 东北大学教授, 博士生导师.

应的可靠性,下游买方企业往往愿意提供金融支持^[6].如海尔通过海融易平台为上游供应商提供应收账款保理业务等,沃尔玛、物美等大型零售企业为上游供货商提供提前支付服务.基于此,本文针对考虑资金约束制造商可以向下游零售商融资或者向银行贷款的情形,研究闭环供应链的融资模式选择策略.

针对制造商资金约束的供应链融资模式选择策略的研究已有相关成果. Qin 等^[7]针对考虑制造商可以通过向电商平台或者上游供应商融资的内部融资方式解决资金不足的问题,研究了供应链的融资模式选择策略. Li 等^[5]的研究结果表明资金约束的制造商与其竞争对手合作可以实现双赢. Jin 等^[8]考虑资金约束的供应商和零售商可以选择非合作融资(外部融资)或合作融资(内部融资与外部融资相结合),并从供应商、零售商和供应链的角度给出了最优融资策略.上述研究均是针对正向供应链中资金约束制造商/供应商的融资模式选择问题的,较少考虑闭环供应链的融资模式选择问题.

学者针对闭环供应链的融资问题进行了研究.石丹等^[9]研究了回收商资金约束的闭环供应链融资模式选择问题. Zheng 等^[10]针对零售商资金短缺的闭环供应链,考虑银行贷款和贸易信贷融资两种融资方式,研究了闭环供应链的融资决策问题. Zheng 等^[11]和 Zhang 等^[12]研究了制造商/

再制造商资金约束的融资问题.但是上述研究没有考虑制造商资金约束闭环供应链的融资模式选择问题.高攀等^[3]研究了再制造商资金约束的闭环供应链融资模式选择问题,但是该研究未考虑供应链内核心企业提供融资服务的情形.为了保证货源稳固,零售商往往会为资金不足的制造商提供有偿贷款^[5],因此针对制造商资金约束的闭环供应链,对于内部融资和外部融资两种模式,哪种融资模式对制造商、零售商、回收商或闭环供应链更有利是需要研究的问题.已有的研究无法直接解决考虑制造商资金约束闭环供应链的融资模式选择问题.

本文针对由零售商、回收商和资金约束的制造商构成的闭环供应链,研究了闭环供应链的融资模式选择问题.分别构建了制造商向零售商融资(内部融资)和向银行贷款(外部融资)两种融资模式的决策模型.

1 问题描述、符号说明与模型假设

本文所考虑的闭环供应链结构如图 1 所示,制造商使用原材料生产新产品,并将回收商回收的废旧物品加工再制造为再制品,然后通过零售商将其销售给消费者.在产品生产之前,由于资金不足,制造商可以选择向银行融资或向零售商融资.

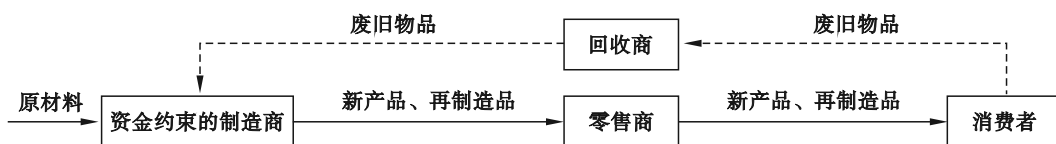


图 1 闭环供应链的结构

Fig. 1 Structure of the closed-loop supply chain

表 1 为本文涉及的一些变量、参数和函数的符号及其说明.

为了使模型构建符合现实情况且便于分析,作如下假设:

假设 1 零售商是 Stackelberg 博弈的领导者,制造商是次级领导者,回收商是跟随者,三者之间信息完全对称.

假设 2 新产品和再制品在功能、外观、质量等方面没有差异,消费者对其接受程度相同,即新产品和再制品的售价相等^[13].

假设 3 零售商的订货数量等于市场需求,而市场需求是零售价格的线性减函数,令 $p = m + w$,则市场需求函数为 $D(m) = a - \beta(m + w)$ ^[14].为

了保证模型的合理性和经济上的可行性,设 $D(m) \geq 0$,且 $w \geq c_n$,即 $a - \beta c_n \geq 0$.

假设 4 新产品的单位生产成本高于再制品的单位生产成本,即 $c_n > c_r$,且支付给消费者的单位回收价格 A 不高于再制造单位节约的成本 $c_n - c_r$ ^[13].

假设 5 回收商的回收成本为 $C(\tau) = C_L \tau^2 + A\tau D(m)$,其中 $C_L \tau^2$ 为回收成本中的固定成本, C_L 越小意味着在给定的投资下废旧物品回收效率越高,即废旧物品回收难度越小^[13].

假设 6 为了保证回收率满足 $0 < \tau < 1$,且文中函数存在唯一最优解,回收规模参数 C_L 应足够大,即 $C_L > \max \left\{ \Delta \left[2\beta\Delta(1+f_B) + a - \beta c_n(1+f_B) \right] / 16 \right.$

$\beta\Delta^2(1+f_R)/8, \Delta[\beta\Delta(2+f_R)+a-\beta c_n]/16\}$, 其中 $\Delta=c_n-c_r-A^{[13,15]}$.

表 1 符号与说明
Table 1 Symbols and instructions

符号	说明
τ	废旧物品回收率
b	制造商获得单位废旧物品支付的转移价格
w	单位产品的批发价格
m	零售商单位边际利润
a	所售产品的市场规模
β	描述需求随零售价格变化的弹性系数
p	零售价格
c_n	生产单位新产品的成本
c_r	生产单位再制造产品的成本
C_L	回收规模参数
A	回收商支付的单位回收价格
f_R	零售商公布的贷款利率
f_B	银行公布的贷款利率
$D(m)$	市场需求函数
$C(\tau)$	回收商的回收成本函数
Π_i	收益函数, $i=M, R, T, S$ 分别表示制造商、零售商、回收商和闭环供应链

2 收益函数

1) 内部融资模式. 内部融资模式下, 期初, 资金约束的制造商选择向零售商融资, 融资金额为其生产成本, 即 $[c_n(1-\tau)+(c_r+b)\tau]D(m)$, 期末, 需偿还零售商利息. 此时制造商的收益为销售收入减去生产成本减去融资利息, 则内部融资模式下制造商的收益函数 $\Pi_{M,I}$ 为

$$\Pi_{M,I}(w, b) = [w - c_n(1-\tau) - (c_r + b)\tau][a - \beta(m+w)] - f_R[c_n(1-\tau) + (c_r + b)\tau][a - \beta(m+w)]. \quad (1)$$

回收商的收益为其销售收入减去回收成本, 即 $b\tau D(m) - C(\tau)$, 则内部融资模式下回收商的收益函数 $\Pi_{T,I}$ 为

$$\Pi_{T,I}(\tau) = (b - A)[a - \beta(m+w)]\tau - C_L\tau^2. \quad (2)$$

零售商的收益为其销售收入减去订货成本加融资利息, 则内部融资模式下零售商的收益函数 $\Pi_{R,I}$ 为

$$\Pi_{R,I}(m) = f_R[c_n(1-\tau) + (c_r + b)\tau][a - \beta(m+w)] + m[a - \beta(m+w)]. \quad (3)$$

依据式(1)~式(3), 可以确定内部融资模式下闭环供应链的收益函数 $\Pi_{S,I}$ 为

$$\Pi_{S,I} = [m+w-c_n(1-\tau)-(c_r+A)\tau][a-\beta(m+w)]-C_L\tau^2. \quad (4)$$

2) 外部融资模式. 外部融资模式下, 资金约束的制造商选择向银行融资, 融资金额仍为生产成本, 期末需偿还银行利息为 $[c_n(1-\tau)+(c_r+b)\tau]D(m)f_B$. 则外部融资模式下, 制造商、回收商、零售商的收益函数 $\Pi_{M,E}, \Pi_{T,E}, \Pi_{R,E}$ 分别为

$$\Pi_{M,E}(w, b) = [w - c_n(1-\tau) - (c_r + b)\tau][a - \beta(m+w)] - f_B[c_n(1-\tau) + (c_r + b)\tau][a - \beta(m+w)], \quad (5)$$

$$\Pi_{T,E}(\tau) = (b - A)[a - \beta(m+w)]\tau - C_L\tau^2, \quad (6)$$

$$\Pi_{R,E}(m) = m[a - \beta(m+w)]. \quad (7)$$

进一步地, 依据式(5)~式(7), 可以确定外部融资模式下, 闭环供应链的收益函数 $\Pi_{S,E}$ 为

$$\Pi_{S,E} = [m+w-c_n(1-\tau)-(c_r+A)\tau][a-\beta(m+w)]-C_L\tau^2-f_B[c_n(1-\tau)+(c_r+b)\tau][a-\beta(m+w)]. \quad (8)$$

3 最优解及其分析

以下将分别给出内部融资模式和外部融资模式下制造商、零售商和回收商的最优决策结果, 并分析相关参数对最优决策结果的影响. 在求解过程中, 依据 Stackelberg 博弈的思想, 博弈顺序为: 首先, 零售商决定其单位边际利润; 然后, 制造商决定产品的批发价格和废旧物品的转移价格; 最后, 回收商决定废旧物品回收率. 采用逆序求解法, 依据式(1)~式(3)和式(5)~式(7), 可以分别得到两种融资模式下的最优解.

3.1 内部融资模式

定理 1 在内部融资模式下, 存在阈值 $C_{L,1}$ 和 $C_{L,2}$, $C_{L,1} = \beta\Delta^2(1+f_R)/8$, $C_{L,2} = \Delta[\beta\Delta(2+f_R)+a-\beta c_n]/16$, 当 $C_L > \max\{C_{L,1}, C_{L,2}\}$ 时, 模型存在最优解且最优回收率满足 $0 < \tau_1^* < 1$. 此时, 零售商最优单位边际利润 m_1^* , 制造商的最优批发价格 w_1^* , 支付给回收商的最优转移价格 b_1^* 和回收商的最优回收率 τ_1^* 分别为

$$m_1^* = \frac{8C_L[a-\beta c_n(1+2f_R)]-\beta\Delta^2[a-\beta c_n(1+f_R)]^2}{\beta[16C_L-\beta\Delta^2(2+f_R)]}, \quad (9)$$

$$w_1^* = \frac{4C_L[a+\beta c_n(3+4f_R)]}{\beta[16C_L-\beta\Delta^2(2+f_R)]} - \frac{\beta\Delta^2(1+f_R)[a+\beta c_n(1+f_R)]}{\beta[16C_L-\beta\Delta^2(2+f_R)]}, \quad (10)$$

$$b_1^* = \frac{c_n - c_r + A}{2}, \quad (11)$$

$$\tau_i^* = \frac{\Delta(a - \beta c_n)}{16C_L - \beta \Delta^2(2 + f_R)} \quad (12)$$

依据式(2),可知 $\partial^2 \Pi_{T,i}(\tau) / \partial \tau^2 = -2C_L < 0$, 因此 $\Pi_{T,i}(\tau)$ 是 τ 的凹函数. 令 $\partial \Pi_{T,i}(\tau) / \partial \tau = 0$ 可得回收

$$H_1 = \begin{bmatrix} -\frac{[a - (m+w)\beta]^2(f_R+1)}{C_L} & -\frac{\beta[a - (m+w)\beta](c_n - c_r + A - 2b)(f_R+1)}{C_L} \\ -\frac{\beta[a - (m+w)\beta](c_n - c_r + A - 2b)(f_R+1)}{C_L} & -\frac{\beta[2C_L - \beta(b-A)(c_n - c_r - b)(f_R+1)]}{C_L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

当 $2C_L - \beta(f_{MR}+1)[\Delta^2 - 3(b-A)(c_n - c_r - b)] > 0$ 时, 海塞矩阵 H_1 负定. 令 $\partial \Pi_{M,i}(w, b) / \partial w = 0$, 且 $\partial \Pi_{M,i}(w, b) / \partial b = 0$, 可得制造商的反应函数 b_i 和 $w_i(m)$ 分别如式(14)和式(15)所示.

$$b_i = \frac{c_n - c_r + A}{2}, \quad (14)$$

$$w_i(m) = \frac{4C_L\{a + \beta[c_n(1 + f_R) - m]\}}{\beta[8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1 + f_R)]} - \frac{\beta(c_n - c_r - A)^2(1 + f_R)(a - \beta m)}{\beta[8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1 + f_R)]} \quad (15)$$

将式(14)和(15)代入回收商反应函数 $\tau_i(m, w, b)$, 则回收商的反应函数 $\tau_i(m, w, b)$ 可转换为 $\tau_i(m)$:

$$\tau_i(m) = \frac{\{a - \beta[c_n(1 + f_R) + m]\}(c_n - c_r - A)}{8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1 + f_R)} \quad (16)$$

将式(14)~(16)代入式(3), 可得 $\Pi_{R,i}(m)$ 对 m 的二阶导数为

$$\frac{\partial^2 \Pi_{R,i}(m)}{\partial m^2} = -\frac{4\beta C_L[16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2 + f_R)]}{[8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1 + f_R)]^2} \quad (17)$$

由式(17)可知, 当 $16C_L \geq \beta(c_n - c_r - A)^2(2 + f_R)$ 时, $\Pi_{R,i}(m)$ 是 m 的凹函数, 此时 $\Pi_{R,i}(m)$ 存在唯一确定的最优解 m_i^* , 令 $\partial \Pi_{R,i}(m) / \partial m = 0$, 可得 m_i^* , 将其代入式(15)和式(16)后, 可得最优批发价格 w_i^* 和最优回收率 τ_i^* . 将 w_i^* 和 τ_i^* 代入海塞矩阵, 可知存在阈值 $C_{L1,i}$, 其中 $C_{L1,i} = \beta \Delta^2(1 + f_R) / 8$. 当 $C_L > C_{L1,i}$ 时, 海塞矩阵 H_1 负定, 即 $\Pi_{M,i}(w, b)$ 是 (w, b) 的凹函数, 而此时零售商最优解存在条件 $16C_L \geq \beta(c_n - c_r - A)^2(2 + f_R)$ 也成立. 因此, 内部融资模式下最优解存在条件为 $C_L > C_{L1,i}$. 此外最优回收率需满足 $0 < \tau_i^* < 1$, 因此 C_L 需满足 $C_L > \max\{C_{L1,i}, C_{L2,i}\}$, 其中: $C_{L1,i} = \beta \Delta^2(1 + f_R) / 8$, $C_{L2,i} = \Delta[\beta \Delta(2 + f_R) + a -$

商反应函数 $\tau_i(m, w, b) = (b - A)[a - \beta(w + m)] / 2C_L$. 将其代入式(1)可得 $\Pi_{M,i}(w, b)$ 关于 (w, b) 的海塞矩阵 H_1 :

$\beta c_n] / 16$. 证毕.

依据式(9)和式(10), 可得最优零售价格 p_i^* 和市场需求 D_i^* 分别为

$$p_i^* = \frac{4C_L(3a + \beta c_n) - a\beta(c_n - c_r - A)^2(2 + f_R)}{\beta[16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2 + f_R)]}, \quad (18)$$

$$D_i^* = \frac{4C_L(a - \beta c_n)}{16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2 + f_R)} \quad (19)$$

依据式(9)~式(12), 式(18)和式(19), 可得性质1.

性质1 在内部融资模式下, 零售商单位边际利润、批发价格、转移价格、回收率、零售价格和市场需求与 f_R 存在如下关系:

1) f_R 对零售商单位边际利润 m_i^* 和批发价格 w_i^* 的影响与回收难度相关. 当回收难度较大时, m_i^* 与 f_R 负相关, w_i^* 与 f_R 正相关; 当回收难度较小时, m_i^* 与 f_R 正相关, w_i^* 与 f_R 负相关. 转移价格 b_i^* 与 f_R 无关; 回收率 τ_i^* 与 f_R 正相关.

2) 零售价格 p_i^* 与 f_R 负相关, 市场需求 D_i^* 与 f_R 正相关.

由性质1可知, 转移价格不受零售商贷款利率变化的影响, 零售商单位边际利润和批发价格随零售商贷款利率的变化趋势与产品回收难度相关. 尽管零售商单位边际利润和批发价格是零售商贷款利率的非单调函数, 但是产品零售价格会随零售商贷款利率的增加而降低, 并导致市场需求随之增高. 这意味着, 零售商贷款利率的增加会使消费者获利. 究其原因, 贷款利率的增加会增加制造商融资成本, 为了获得更多收益, 制造商在零售商单位边际利润公布后会调整其批发价格, 使市场零售价格降低, 从而获得更多订货.

将式(9)~式(12)分别代入式(1)~式(4), 可得内部融资模式下制造商、回收商、零售商、闭环供应链的最优收益函数 $\Pi_{M,i}^*$, $\Pi_{T,i}^*$, $\Pi_{R,i}^*$, $\Pi_{S,i}^*$ 分别为

$$\Pi_{M,I}^* = \frac{2C_L(a-\beta c_n)^2 [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_R)]}{\beta [16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2+f_R)]^2}, \quad (20)$$

$$\Pi_{T,I}^* = \frac{C_L(c_n - c_r - A)^2(a - \beta c_n)^2}{[16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2+f_R)]^2}, \quad (21)$$

$$\Pi_{R,I}^* = \frac{2C_L(a - \beta c_n)^2}{\beta [16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2+f_R)]}, \quad (22)$$

$$\Pi_{S,I}^* = \frac{C_L(a - \beta c_n)^2 [48C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(5+4f_R)]}{\beta [16C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(2+f_R)]^2}. \quad (23)$$

3.2 外部融资模式

定理 2 在外部融资模式下, 存在阈值 $C_{L,E}$, $C_{L,E} = \Delta [2\beta\Delta(1+f_B) + a - \beta c_n(1+f_B)] / 16$, 当 $C_L > C_{L,E}$ 时模型存在最优解且回收率满足 $0 < \tau_E^* < 1$. 其中, 零售商最优单位边际利润 m_E^* , 制造商最优批发价格 w_E^* , 支付给回收商的最优转移价格 b_E^* 和回收商最优回收率 τ_E^* 分别为

$$m_E^* = \frac{a - \beta c_n(1+f_B)}{2\beta}, \quad (24)$$

$$w_E^* = \frac{4C_L[a + 3\beta c_n(1+f_B)]}{2\beta [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]} - \frac{\beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)[a + \beta c_n(1+f_B)]}{2\beta [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]}, \quad (25)$$

$$b_E^* = \frac{c_n - c_r + A}{2}, \quad (26)$$

$$\tau_E^* = \frac{(c_n - c_r - A)[a - \beta c_n(1+f_B)]}{2[8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]}. \quad (27)$$

证明过程与内部融资模式相似, 不再赘述.

依据式(24)和式(25), 可得最优零售价格 p_E^* 和市场需求 D_E^* 分别为

$$p_E^* = \frac{4C_L[3a + \beta c_n(1+f_B)] - 2a\beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)}{2\beta [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]}, \quad (28)$$

$$D_E^* = \frac{2C_L[a - \beta c_n(1+f_B)]}{8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)}. \quad (29)$$

依据式(24)~式(29), 可得性质 2.

性质 2 外部融资模式下, 零售商单位边际利润、批发价格、转移价格、回收率、零售价格和市场需求与 f_B 存在如下关系:

1) 零售商单位边际利润 m_E^* 与 f_B 负相关; 转移价格 b_E^* 与 f_B 无关. f_B 对批发价格 w_E^* 和回收率 τ_E^* 的影响与回收难度相关: 当回收难度较大时, 批

发价格 w_E^* 与 f_B 正相关, 回收率 τ_E^* 与 f_B 负相关; 当回收难度较小时, 批发价格 w_E^* 与 f_B 负相关, 回收率 τ_E^* 与 f_B 正相关.

2) 当回收难度较大时, 零售价格 p_E^* 与 f_B 正相关, 市场需求 D_E^* 与 f_B 负相关; 当回收难度较小时, 零售价格 p_E^* 与 f_B 负相关, 市场需求 D_E^* 与 f_B 正相关.

由性质 2 可知, 转移价格不受银行贷款利率变化影响, 零售商单位边际利润随银行贷款利率的增加而降低. 对于回收难度较大的产品, 由于银行贷款利率的增加导致融资成本增加, 制造商会制定较高批发价格, 从而使产品零售价格上涨, 市场需求和回收率降低; 对于回收难度较小的产品, 由于再制造节约的成本能够抵消上涨的融资成本, 此时制造商会制定较低的批发价格, 从而导致较低的市场价格, 市场需求和回收率增加.

将式(24)~式(27)分别代入式(5)~式(8), 可得外部融资模式下, 制造商、回收商、零售商、闭环供应链的最优收益函数 $\Pi_{M,E}^*$, $\Pi_{T,E}^*$, $\Pi_{R,E}^*$, $\Pi_{S,E}^*$ 分别为

$$\Pi_{M,E}^* = \frac{C_L[a - \beta c_n(1+f_B)]^2}{2\beta [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]}, \quad (30)$$

$$\Pi_{T,E}^* = \frac{C_L(c_n - c_r - A)^2[a - \beta c_n(1+f_B)]^2}{4[8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]^2}, \quad (31)$$

$$\Pi_{R,E}^* = \frac{C_L[a - \beta c_n(1+f_B)]^2}{\beta [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]}, \quad (32)$$

$$\Pi_{S,E}^* = \frac{[48C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(5+6f_B)]}{4\beta [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1+f_B)]^2} \times C_L[a - \beta c_n(1+f_B)]^2. \quad (33)$$

4 融资模式选择策略

对两种融资模式下闭环供应链内企业的最优决策和收益进行比较, 分别从社会效益、回收商、零售商、制造商和整个供应链的角度给出融资模式选择策略.

定理 3 存在阈值 J_p , 当 $J_p \geq 0$ 时, 内部融资模式下的最优零售价格低于外部融资模式下的最优零售价格, 最优回收率和最优市场需求高于外部融资模式下的最优回收率和最优市场需求; 当 $J_p < 0$ 时, 内部融资模式下的最优零售价格高

于外部融资模式下的最优零售价格,最优回收率和最优市场需求低于外部融资模式下的最优回收率和最优市场需求.其中, $J_p = 16f_B c_n C_L - \Delta^2 [a(2f_B - f_R) + \beta c_n f_R(1 + f_B)]$.

定理3表明,融资模式对最优决策的影响还与银行贷款利率、零售商贷款利率、回收规模等参数相关.

推论1 当两种融资模式的贷款利率相等时,内部融资模式下的最优零售价格低于外部融资模式下的最优零售价格,最优回收率和最优市场需求则高于外部融资模式下的最优回收率和最优市场需求.

推论1表明,当两种融资模式的贷款利率相等时,相较于外部融资模式,内部融资模式会导致更高的回收率和更低的零售价格,进而带来更高的市场需求.这是因为内部融资模式下零售商能够获得更多额外利息收入,因此会制定较低的零售价格,以获得较高的市场需求,回收商也会因此获得较高收益从而制定较高的回收率.这说明,当外部融资利率等于内部融资利率时,内部融资模式能够带来更高的社会效益.

定理4 对于回收商,当 $J_p \geq 0$ 时,制造商选择内部融资模式会使回收商获得的收益更高;当 $J_p < 0$ 时,制造商选择外部融资模式会使回收商获得的收益更高.

定理4表明,回收商的最优融资模式与银行贷款利率、零售商贷款利率、回收规模等参数相关.

推论2 对于回收商,当外部融资的利率等于内部融资的利率时,制造商选择内部融资模式会使回收商获得的收益更高.

推论2表明,当外部融资的利率等于内部融资的利率时,回收商更希望制造商选择内部融资模式.这是由于内部融资模式下回收率更高且市场需求量更大,导致内部融资模式下回收数量更多,因而内部融资模式下回收商获利更多.

定理5 对于零售商,当阈值 $J_R \geq 0$ 时,制造商选择内部融资模式会使零售商获得的收益更高;当 $J_R < 0$ 时,制造商选择外部融资模式会使零售商获得的收益更高,其中, $J_R = 2\alpha_2 f_B c_n [8C_L - \beta \Delta^2 (f_B + 1)] + \alpha_1 J_p$.

定理5表明,零售商的最优融资模式与银行贷款利率、零售商贷款利率、回收规模参数等相关.

推论3 对于零售商,当外部融资的利率等于内部融资的利率时,零售商在内部融资模式下获得的收益更高.

推论3表明,若两种融资模式的贷款利率相等,则零售商总是能够从内部融资模式中获得更多收益.究其原因,当两种融资模式的贷款利率相等时,制造商在两种融资模式下的融资成本相同,因此不同融资模式对闭环供应链定价与回收率决策的影响较小.相较于外部融资模式,零售商能够从内部融资模式获得额外的利息收入,因此内部融资模式下零售商获得的收益更高,零售商愿意为资金约束的制造商提供融资服务.

定理6 对于制造商,当阈值 $J_M \geq 0$ 时,选择内部融资模式更有利;当 $J_M < 0$ 时,选择外部融资模式更有利,其中, $J_M = 2\alpha_1^2 [8C_L - \beta(c_n - c_r - A)^2(1 + f_R)] - \alpha_2 [a - \beta c_n(1 + f_B)]$.

定理6表明,制造商的最优融资模式与银行贷款利率、零售商贷款利率、回收规模等参数相关.

推论4 对于制造商,当外部融资的利率等于内部融资的利率时,选择内部融资模式更有利.

推论4表明,若两种融资模式的贷款利率相等,则制造商总是能够从内部融资模式中获得更多收益.虽然制造商在两种融资模式下的融资成本相同,但是内部融资模式下,零售商因为能够获得一部分利息收入而愿意降低零售价格,从而使回收率和市场需求增加,降低制造商成本并增加销量.因此内部融资模式下制造商获得的收益更高.

定理7 对于整个供应链,当阈值 $J_S \geq 0$ 时,选择内部融资模式更有利;当 $J_S < 0$ 时,选择外部融资模式更有利,其中, $J_S = \alpha_1^2 [48C_L - \beta \Delta^2 (4f_R + 5)] - \alpha_2^2 [48C_L - \beta \Delta^2 (6f_B + 5)]$.

定理3~定理7表明,当参数满足 $J_p \geq 0, J_M \geq 0, J_S \geq 0$ 时,选择内部融资模式对社会效益、回收商、零售商、制造商和整个供应链更有利.当参数满足 $J_R < 0, J_M < 0, J_S < 0$ 时,则选择外部融资模式对社会效益、回收商、零售商、制造商和整个供应链更有利.

推论5 对于整个供应链,当外部融资的利率等于内部融资的利率时,选择内部融资模式更有利.

推论5表明,若两种融资模式的贷款利率相

等,则内部融资模式对整个供应链更有利.这是因为,当贷款利率相等时,回收商、零售商和制造商都能从内部融资模式中受益.

为了更直观地展示供应链企业在不同融资模式下最优收益的差异,下面给出贷款利率对闭环供应链融资模式选择影响的具体数值分析.依据模型假设,参数取值为: $a=50, \beta=3, A=1, c_n=7, c_r=2.5, C_L=13$.令 f_r 和 f_b 的取值在0~1之间,其他参数取值不变.

如图2所示,内部融资模式下回收商、零售商和闭环供应链的收益高于外部融资模式.当贷款利率(f_b, f_r)落在曲线的左上部分,则制造商在内部融资模式下获得的收益更高;若落在曲线的右下部分,则制造商在外部融资模式下获得的收益更高.图2意味着,在大部分情况下,内部融资模式对制造商、零售商、回收商和闭环供应链均有利.

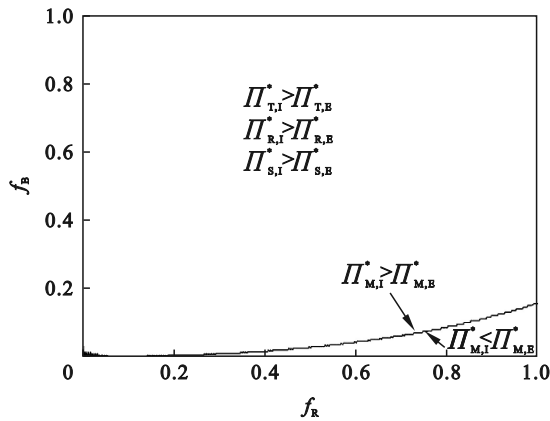


图2 最优融资模式

Fig. 2 Optimal financing modes

5 结 语

本文针对由零售商、回收商以及资金约束的制造商构成的闭环供应链系统,研究了融资模式选择问题.分别构建内部融资和外部融资两种融资模式下的决策模型,对比两种融资模式下闭环供应链企业的最优决策和收益,从不同角度给出了最优融资模式选择策略.研究表明,贷款利率对制造商、零售商和回收商的最优定价与回收率决策的影响与融资方式和回收难度有关.对于社会效益、回收商、零售商、制造商和供应链而言,最优的融资模式选择策略取决于银行贷款利率、零售商贷款利率和回收难度等.当两种贷款利率满足一定条件下(如贷款利率相等)时,选择内部融资模式对社会效益、回收商、零售商、制造商和闭环供应链均有利.

参考文献:

- [1] Liu W P, Li B Y, Wang Z, et al..Consequence analysis for integrating remanufactured products for social donation (RSD) under mandatory take-back regulation [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 171: 108468.
- [2] Zheng B R, Jin L. Relicensing scheme selection in closed-loop supply chains with differentiated new and remanufactured products [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 171: 108443.
- [3] 高攀, 丁雪峰, 覃若兰. 资金约束条件下再制造商的融资策略研究[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 240-249. (Gao Pan, Ding Xue-feng, Qin Ruo-lan. Financing strategies of the remanufacturer under the condition of capital constraints[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(1): 240-249.)
- [4] 唐丹, 庄新田. 制造商融资决策: 银行、商业信用或区块链供应链金融[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(8): 1202-1209. (Tang Dan, Zhuang Xin-tian. Manufacturers' financing strategy: bank credit, retailer credit or blockchain-driven SCF [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(8): 1202-1209.)
- [5] Li R, Yan J J, Wang X Y. Horizontal cooperation strategies for competing manufacturers in a capital constrained supply chain [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 181: 103369.
- [6] Jiang Z Z, Feng G Q, Yi Z L. How should a capital-constrained servicing manufacturer search for financing? The impact of supply chain leadership [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 145: 102162.
- [7] Qin J J, Fu H P, Wang Z P, et al. Financing and carbon emission reduction strategies of capital-constrained manufacturers in E-commerce supply chains [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 241: 108271.
- [8] Jin W, Zhang Q H, Luo J W. Non-collaborative and collaborative financing in a bilateral supply chain with capital constraints [J]. *Omega*, 2019, 88: 210-222.
- [9] 石丹, 魏超, 戴明宏. 闭环供应链回收企业两种融资模式下决策分析[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2017, 19(2): 66-74. (Shi Dan, Wei Chao, Dai Ming-hong. Decision-making analysis of recycling enterprises in closed-loop supply chain under two financing modes [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications (Social Sciences Edition)*, 2017, 19(2): 66-74.)
- [10] Zheng Y Y, Zhao Y X, Wang N M, et al. Financing decision for a remanufacturing supply chain with a capital constrained retailer: a study from the perspective of market uncertainty [J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 245: 108397.
- [11] Zheng Y Y, Zhao Y X, Meng X G. Market entrance and pricing strategies for a capital-constrained remanufacturing supply chain: effects of equity and bank financing on circular economy [J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(21): 6601-6614.
- [12] Zhang Y M, Chen W D, Li Q R. Third-party remanufacturing mode selection for a capital-constrained closed-loop supply chain under financing portfolio [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 157: 107315.
- [13] Mondal C, Giri B C. Pricing and bundling strategies for complementary products in a closed-loop green supply chain under manufacturers' different behaviors [J]. *Expert*

- Systems with Applications*, 2024, 238: 121960.
- [14] 马勇, 张翠华. 考虑产品质量决策的平台销售契约和物流模式选择策略[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 880-888.
(Ma Yong, Zhang Cui-hua. Platforms' selection strategies of sales contracts and logistics modes considering product quality decision [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(6): 880-888.)
- [15] Choi T M, Li Y J, Xu L. Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains [J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(1): 371-380.

(上接第 744 页)

- [10] 安鹏, 曹丹平, 赵宝银, 等. 基于 LSTM 循环神经网络的储层物性参数预测方法研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1849-1858.
(An Peng, Cao Dan-ping, Zhao Bao-yin, et al. Reservoir physical parameters prediction based on LSTM recurrent neural network [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(5): 1849-1858.)
- [11] 冯德成, 吴刚. 混凝土结构基本性能的可解释机器学习建模方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 228-238.
(Feng De-cheng, Wu Gang. Interpretable machine learning-based modeling approach for fundamental properties of concrete structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(4): 228-238.)
- [12] 金浏, 赵瑞, 杜修力. 混凝土抗压强度尺寸效应的神经网络预测模型[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(3): 260-268.
(Jin Liu, Zhao Rui, Du Xiu-li. Neural network prediction model of concrete compressive strength size effect [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(3): 260-268.)
- [13] Khatib J M, Hibbert J J. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(6): 460-472.
- [14] 何渐渐, 郑学成, 林社勇. 粉煤灰混凝土强度统计特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(sup1): 59-65.
(He Xi-xi, Zheng Xue-cheng, Lin She-yong. The experimental studies on the statistical characteristics of fly ash concrete strength [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(sup1): 59-65.)
- [15] Özcan F, Atis C D, Karahan O, et al. Comparison of artificial neural network and fuzzy logic models for prediction of long-term compressive strength of silica fume concrete [J]. *Advances in Engineering Software*, 2009, 40(9): 856-863.
- [16] 王亚云, 娄宗科, 张帮强, 等. 三级配混凝土抗压强度尺寸效应的试验研究[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 64-68, 102.
(Wang Ya-yun, Lou Zong-ke, Zhang Bang-qiang, et al. Experimental study on size effect of compressive strength of three graded concrete [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(1): 64-68, 102.)
- [17] Chopra P, Sharma R K, Kumar M. Prediction of compressive strength of concrete using artificial neural network and genetic programming [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 7648467.
- [18] 季韬, 林挺伟, 林旭健. 基于人工神经网络的混凝土抗压强度预测方法[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 677-681.
(Ji Tao, Lin Ting-wei, Lin Xu-jian. Prediction method of concrete compressive strength based on artificial neural network [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(6): 677-681.)
- [19] 毛明杰, 韩鹏飞, 杨秋宁, 等. 基于正交试验粉煤灰细骨料混凝土抗压强度研究[J]. 混凝土, 2019(9): 88-91.
(Mao Ming-jie, Han Peng-fei, Yang Qiu-ning, et al. Study on compressive strength of fly ash instead of fine aggregate concrete based on orthogonal test [J]. *Concrete*, 2019(9): 88-91.)
- [20] Oner A, Akyuz S. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(6): 505-514.
- [21] Shahriari B, Swersky K, Wang Z Y, et al. Taking the human out of the loop: a review of Bayesian optimization [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(1): 148-175.
- [22] Snoek J, Larochelle H, Adams R P. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012(2): 2951-2959.
- [23] 资艳玲. 基于特征提取与贝叶斯优化的电力负荷组合预测研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
(Zi Yan-ling. Research on power load combination forecasting based on feature extraction and Bayesian optimization [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.)