

控制与决策

Control and Decision

OEM再制造下双边资金约束闭环供应链生产与合作融资策略

张永明, 陈伟达, 李倩茹

引用本文:

张永明,陈伟达,李倩茹. OEM再制造下双边资金约束闭环供应链生产与合作融资策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1969–1978.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1715>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[带有订单转保理的供应链金融的收益共享博弈模型](#)

Revenue sharing game model of supply chain finance with order-to-factoring financing

控制与决策. 2023, 38(6): 1745–1752 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1656>

[基于零售商资金约束供应链采用RFID技术的决策及融资分析](#)

Equilibrium strategies of RFID adoption and financing in a supply chain with a capital-constrained retailer

控制与决策. 2022, 37(3): 701–711 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0930>

[考虑政府补贴及环境设计的再制造闭环供应链生产决策](#)

Production decision for remanufacturing closed-loop supply chain considering government subsidies and environment design

控制与决策. 2022, 37(10): 2637–2646 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1034>

[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>

[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>

OEM再制造下双边资金约束闭环供应链 生产与合作融资策略

张永明¹, 陈伟达^{1†}, 李倩茹²

(1. 东南大学 经济管理学院, 南京 211189;

2. 江苏科技大学 经济管理学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 构建由资金约束零部件供应商和负责废旧零部件再制造的资金约束原始设备制造商(OEM)组成的闭环供应链,并考虑3种融资策略:单独银行贷款(SBF)、银行贷款+供应商延迟支付(BF-with-SDP)、银行贷款+OEM提前支付(BF-with-OAP),前者属于不合作融资,后者属于合作融资.利用数值分析探讨不合作/合作融资下的再制造生产策略和OEM再制造下的合作融资策略.研究发现:合作融资更有利于促进制造/再制造生产和提升供应链整体绩效;为应对融资偏好冲突,供应商需主动寻求与OEM构建满足激励相容约束的契约;BF-with-SDP和BF-with-OAP策略间的具体选择依赖于担保比例的高低;相较于BF-with-OAP策略,BF-with-SDP策略更能实现促进再制造生产、提升供应链绩效、降低银行违约损失风险的协同.

关键词: 闭环供应链; OEM再制造; 资金约束; 不合作融资; 合作融资

中图分类号: TP272.3

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1715

引用格式: 张永明,陈伟达,李倩茹. OEM再制造下双边资金约束闭环供应链生产与合作融资策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1969-1978.

Production and collaborative financing strategies for a bilaterally capital-constrained closed-loop supply chain with OEM-remanufacturing

ZHANG Yong-ming¹, CHEN Wei-da^{1†}, LI Qian-ru²

(1. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: This paper constructs a closed-loop supply chain composed of a new key component supplier and an original equipment manufacturer (OEM) responsible for remanufacturing of old key components, both of which are financially constrained. There are three alternative financing strategies: separate bank financing (SBF), bank financing with supplier's delay-in-payment (BF-with-SDP), and bank financing with OEM's advance payment (BF-with-OAP). The former one is regarded as non-collaborative financing, while the latter two are collaborative. Through numerical analysis, we analyze the remanufacturing strategies under non-collaborative/collaborative financing, and the collaborative financing strategies under OEM remanufacturing. It is found that: collaborative financing is always more conducive to manufacturing/remanufacturing and contributes to the overall performance of the supply chain; to deal with the conflict in financing preferences, the supplier should actively seek to build contract with the OEM based on incentive compatibility rule; how to choose between the BF-with-SDP and the BF-with-OAP strategies will depend on the guarantee ratio allowed by the supplier; compared with the BF-with-OAP strategy, the BF-with-SDP strategy can better realize the synergy of promoting remanufacturing production, improving supply chain performance, and reducing the risk of bank default losses.

Keywords: closed-loop supply chain; OEM-remanufacturing; capital constraint; non-collaborative financing; collaborative financing

收稿日期: 2021-10-07; 录用日期: 2022-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71971058,71571042); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0138).

责任编辑: 唐万生.

†通讯作者. E-mail: cwd@seu.edu.cn.

*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

0 引言

当前,在碳达峰、碳中和战略目标下,我国正持续推进低碳转型。《“十四五”循环经济发展规划》亦强调,着力建设资源循环型产业体系,构建废旧物资循环利用体系。在此背景下,再制造,一种专业的废旧品修复加工再利用技术,已成为推动实现“双碳”目标和建立健全我国绿色低碳循环发展经济体系的重要举措之一。然而,在宏观层面,我国再制造产业尚处于萌芽期结束并进入成长期的阶段,未能形成产业规模,因而再制造企业数量多、规模小、布局分散。在微观层面,相较于全新制造,再制造涉及更多需进行前期投入的活动,如废旧品回收、分类、清洗、拆解等。由于规模小、成长快、前期投入大等宏观特征,营运资金不足正成为制约我国再制造产业发展的重要因素之一。

为克服资金困境,融资将是再制造企业的必然选择。根据资金来源,融资分为外部融资和内部融资。外部融资指通过外部资本市场或投资主体筹集资金的行为,而内部融资指通过供应链内部的其他成员筹集资金的行为。例如:唐山松汀钢铁公司为自身最大经销商——迁安联钢九江钢铁公司提供信用担保,以帮助其向华夏银行贷款;海尔集团利用自身的创新平台——海融易,为其上游供应商提供融资。但由于单渠道融资在可及性、成本、风险等方面的不足,企业(供应链)也可能以两种及以上融资渠道的组合方式筹集资金,即组合(合作)融资。例如,华夏幸福综合利用股权、债权、交易信用、资产证券化等融资渠道来支撑其战略扩张。

目前,学者们已从供应链的视角对融资策略优化问题进行了广泛研究。在外部融资方面, Yang 等^[1]研究了股权融资下由一供应商和两资金约束零售商构成的供应链的均衡决策;在内部融资方面, Chen^[2]对比分析了延迟支付和银行贷款两种融资模式下制造商和资金约束零售商组成的简单供应链的均衡决策,并探讨了收益分享合同对该供应链的协调效果。另外,针对组合或合作融资, Yang 等^[3]研究了资金约束零售商关于供应商交易信用和银行贷款的组合融资策略,揭示了交易信用的风险分担功能; Jin 等^[4]聚焦于由一供应商和一零售商组成的双边资金约束供应链,研究了两成员应以非合作还是合作方式进行融资。为确定合适的融资策略,学者们还探讨了企业或供应链关于内部融资、外部融资、组合融资的最优选择问题。例如: Shi 等^[5]探讨了隐性破产成本将如何影响资金约束零售商对银行信贷、供应商交易信用以

及两者的组合融资等融资策略的选择; Zhou 等^[6]探讨了双渠道供应链背景下资金约束制造商关于零售商提前支付、银行贷款及两者的组合融资等融资策略的选择; An 等^[7]在碳排放政策下,分析了资金约束制造商对绿色信贷和交易信用两融资策略的选择偏好。

近年来,鉴于我国低碳转型的战略背景和我国再制造的宏微观特征,一些学者开始从闭环供应链金融的视角探讨再制造运作和融资策略的优化问题。其中: Wang 等^[8]对有无融资下资金约束再制造商的最优生产决策做了研究和对比; Liu 等^[9]考虑由从事制造/再制造混合生产的资金约束制造商、零售商和回收商构成的闭环供应链,研究了各成员的风险规避态度对供应链定价和回收决策的影响; Gao 等^[10]探讨了由制造商和资金约束经销商构成的闭环供应链关于银行贷款和股权融资的选择策略; Zheng 等^[11]研究了与 OEM 竞争的资金约束再制造商的市场进入和产品定价策略; Zhang 等^[12]针对由一资金约束制造商和一零售商构成的闭环供应链,考虑3种融资策略:银行融资、零售商信用、两者的混合融资,进而研究了该供应链的最优运营和融资策略; Zhang 等^[13]针对由资金约束 OEM 和 TPR (第三方再制造商)构成的闭环供应链,研究了组合融资下该供应链关于外包和授权两种第三方再制造模式的选择问题。

当然,现有闭环供应链金融视角下的再制造研究还存在一些不足:首先,这些研究都只考虑了单一供应链成员的自有资金状态对运营和融资的影响。然而,作为一个整体,在动态运营中,供应链内成员的自有资金将相互影响,联合作用于供应链整体绩效。基于我国再制造供应链脆弱且快速成长的现状,更应兼顾各成员的自有资金状态,实现各成员在融资上的协调与合作。其次,这些研究都考虑的是整机层面的再制造。然而,由于技术复杂性、商誉顾虑等,再制造活动大多被限制在部分高价值、高可再制造性的关键零部件层面。目前,我国已推出8批再制造产品目录,其中,产品以发动机、变速箱、电动机等关键部件为主,少有涉及整机。这一方面意味着供应商的供应行为将对再制造活动形成直接而重要的约束作用,而非 OEM 本身的新品生产;另一方面,这意味着再制品对新品的竞争替代作用应直接体现在零部件层面,而非整机层面。

基于此,本文考虑 OEM 向供应商采购新关键零部件并对废旧关键零部件进行回收再制造,从而生产成品的闭环供应链。其中,供应商和 OEM 都被赋予

有限的自有资金. 进一步, 借鉴Jin等^[4]的研究, 本文考虑分属不合作与合作两种类型的3种融资策略, 探讨不合作/合作融资下的制造/再制造生产策略, 分析成员对两类型融资的选择偏好.

1 问题描述和模型假设

本文考虑由一资金约束供应商和一资金约束OEM构成的闭环供应链. 其中: 供应商以单位成本 c_n 生产新关键零部件, 并将其以批发价格 w 销售给OEM; OEM基于新关键零部件的采购生产全新产成品, 同时, 基于对废旧关键零部件的回收和再制造生产再制造产成品. 假设OEM对单位废旧关键零部件进行回收和再制造的成本为 c_r ($c_r \leq c_n$), 组装单位产成品的成本为 c . 在完成生产后, OEM将 q_n 单位的全新产成品和 q_r 单位的再制造产成品销往同一随机市场 D . 两种产品的价格统一定为 p . 以惠普为例, 其将采用再制造墨盒或硒鼓的打印机和全新打印机一同销往市场, 而消费者往往难以作出区分^[14]. 此外, 假设关键零部件与产成品之间存在1:1的数量关系, 如

发动机与机动车.

供应商和OEM分别拥有有限的自有资金 b_s 和 b_m . 为满足营运资金需求, 供应商和OEM可选择以不合作或合作模式进行融资. 在不合作融资即单独银行融资策略(SBF)下, 供应商和OEM将独立就自身资金需求向银行借贷, 并凭借各自销售收入偿还自身银行债务. 合作融资包括两种具体融资策略: 银行贷款+供应商延迟支付(BF-with-SDP)和银行贷款+OEM提前付款(BF-with-OAP). 其中, 在BF-with-SDP策略下, 供应商将向银行借贷以满足新关键零部件生产的资金需求, 并允许OEM延迟支付所有采购货款至销售期末, 因而OEM只需就废旧关键零部件的回收再制造成本和产成品的组装成本向银行借贷; 在BF-with-OAP策略下, OEM将向银行借贷以满足自身采购、废旧关键零部件回收及再制造、产成品组装等资金需求, 并向供应商预先支付全部采购货款, 同时, 供应商将为OEM提供 δ 比例的信用担保服务. 上述3种融资策略下的闭环供应链结构及其物流和资金流如图1所示.

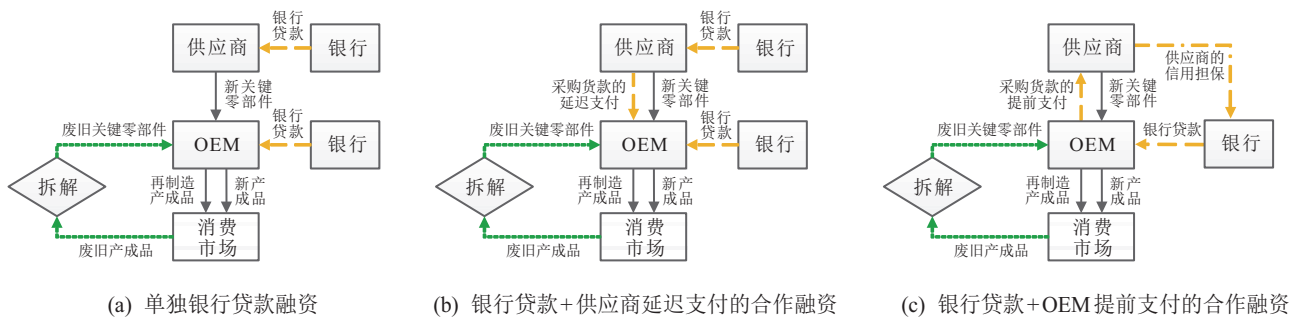


图1 SBF、BF-with-SDP、BF-with-OAP等3种融资策略下的供应链结构及相应的物流和资金流

模型的主要假设如下:

1) 将随机需求 D 的概率密度函数和累积分布函数分别表示为 $f(\cdot)$ 和 $F(\cdot)$. 定义失效率函数 $h(D) = f(D)/\bar{F}(D)$, 广义失效率函数 $g(D) = Df(D)/\bar{F}(D)$, 其中 $\bar{F}(D) = 1 - F(D)$. 为保证最优解的唯一性, 假设 $h(D)$ 和 $g(D)$ 皆是关于 D 的单调递增函数^[2,15].

2) 参照Ferrer等^[16]的研究可知, 在多阶段的决策过程中, 制造/再制造生产计划会渐至稳定状态. 因此, 本文聚焦于该稳态阶段中的一个时间周期, 构建单周期决策模型. 同时, 假设当期废旧品回收的基础为前一期销售的新品, 而再制品不具有重复再制造的价值. 因此, 当回收率 ρ 为外生时, 再制品生产量 $q_r = \rho q_n$.

3) 供应商和OEM将对自身债务承担有限的偿还责任^[2,4,17]. 具体而言, 在需求实现后, 供应商和OEM将利用各自销售收入偿还自身债务, 而对仍无

法偿还的剩余债务将不再承担偿还责任.

4) 考虑完全竞争的外部资本市场, 则银行提供贷款的期望回报率将等于无风险利率 r_f ^[4]. 基于假设3), 银行实际贷款利率 r 的确定条件可表示为 $E \min\{\text{借贷方的销售收入}, \text{银行贷款本金} \times (1+r)\} = \text{银行贷款本金} \times (1+r_f)$. (1)

5) 根据破产法的规定, 银行债务的偿还顺序优先于交易信用债务^[3,17]. 因此, 在BF-with-SDP策略下, 假设OEM按照先银行债务后交易信用债务的顺序履行偿债责任.

6) 供应商和OEM对市场需求和自有资金等拥有对称的信息. 同时, 供应商和OEM皆为理性决策者, 不存在道德风险^[4].

此外, 为简化计算, 将统一零售价格规范化为1^[2,17]. 同时, 假设供应商为主导者. 3种具体融资策略下的博弈事件顺序如图2所示.

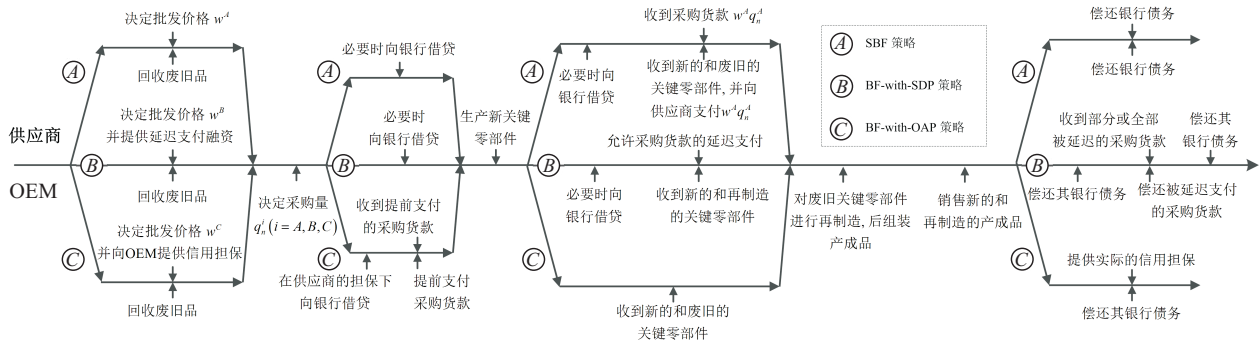


图2 SBF、BF-with-SDP和BF-with-OAP等融资策略下两级博弈的事件顺序

最后,为方便下文表述,使用下标 s 和 m 分别表示供应商和 OEM,且使用上标 A 、 B 和 C 分别表示 SBF、BF-with-SDP、BF-with-OAP 等策略情形。

2 模型

本节将构建3种融资策略下资金约束供应商和资金约束OEM的博弈模型并求解相应的均衡决策。

2.1 单独银行融资策略(SBF策略)

在 SBF 策略下,供应商和 OEM 将分别独立向银行进行借贷,以满足各自营运的资金需求。SBF 策略下两级博弈的具体事件顺序如图2中①所示。

已知供应商的自有资金水平为 b_s 且新关键零部件的生产总成本为 $c_n q_n^A$, 则 SBF 策略情形下供应商需向银行借贷的金额为 $(c_n q_n^A - b_s)$ 。同时,在 SBF 策略情形下,OEM 将在收到采购的新关键零部件时向供应商支付全部的采购货款 $w^A q_n^A$ 。因此,SBF 策略下供应商的实际利润函数可表示为 $\Pi_s^A = (w^A q_n^A - \Lambda^A)^+ - b_s$ 。其中:参数 $\Lambda^A = (c_n q_n^A - b_s)(1 + r_s^A)$ 表示供应商的银行贷款本息和,符号 $(x)^+ = \max\{x, 0\}$ 表示供应商对自身银行债务承担有限的偿还责任。基于完全竞争资本市场的假设,根据式(1),可得 SBF 策略下供应商向银行借贷的实际利率 r_s^A 的确定条件为 $E \min\{w^A q_n^A, \Lambda^A\} = (c_n q_n^A - b_s)(1 + r_f)$ 。因此,可得 SBF 策略下供应商的决策问题为

$$\begin{aligned} \max_{w^A} E(\Pi_s^A) &= E(w^A q_n^A - \Lambda^A)^+ - b_s; \\ \text{s.t. } E \min\{w^A q_n^A, \Lambda^A\} &= (c_n q_n^A - b_s)(1 + r_f). \end{aligned} \quad (2)$$

OEM 以统一价格 p 将新产成品和再制造产成品销售至同一随机市场 D , 且该统一价格 p 被规范化为1, 因此, OEM 的销售收入为 $\min\{D, q_n^A + \rho q_n^A\}$ 。同时, OEM 的自有资金水平为 b_m , 且其新关键零部件采购、废旧关键零部件再制造以及产成品组装等的总成本为 $(w^A q_n^A + c_r \rho q_n^A + c(q_n^A + \rho q_n^A) - b_m)$ 。基于有限偿还责任的假设, SBF 策略下 OEM 的实际利润函数可表示为 $\Pi_m^A = (\min\{D, q_n^A + \rho q_n^A\} - \Omega^A)^+ - b_m$ 。其中参数 $\Omega^A = (w^A q_n^A + c_r \rho q_n^A + c(q_n^A + \rho q_n^A) - b_m)(1 +$

$r_m^A)$ 表示 OEM 的银行贷款本息和。根据式(1),可得 SBF 策略下 OEM 向银行借贷的实际利率 r_m^A 的确定条件为 $E \min\{\min\{D, q_n^A + \rho q_n^A\}, \Omega^A\} = (w^A q_n^A + c_r \rho q_n^A + c(q_n^A + \rho q_n^A) - b_m)(1 + r_f)$ 。因此,可得 SBF 策略下 OEM 的决策问题为

$$\begin{aligned} \max_{q_n^A} E(\Pi_m^A) &= (\min\{D, q_n^A + \rho q_n^A\} - \Omega^A)^+ - b_m; \\ \text{s.t. } E \min\{\min\{D, q_n^A + \rho q_n^A\}, \Omega^A\} &= \\ &= (w^A q_n^A + c_r \rho q_n^A + c(q_n^A + \rho q_n^A) - b_m)(1 + r_f). \end{aligned} \quad (3)$$

基于逆向归纳方法,求解由式(2)和(3)构成的两级博弈模型,进而可得 SBF 策略情形下两级博弈的最优决策 (w^{A*}, q_n^{A*}) , 具体如命题1所示。

命题1 当资金约束的供应商和资金约束的 OEM 分别单独向银行借贷以满足自身营运资金需求时,最优决策 (w^{A*}, q_n^{A*}) 可由如下方程组确定:

$$\begin{cases} (1 + \rho)\bar{F}(q_n^A + \rho q_n^A) - (w^A + c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f) = 0, \\ (1 + \rho)^2 q_n^A f(q_n^A + \rho q_n^A) - (w^A - c_n(1 + r_f))(1 + r_f) = 0. \end{cases}$$

2.2 银行融资 + 供应商延迟支付的合作融资策略(BF-with-SDP策略)

在 BF-with-SDP 策略下,供应商将向银行借贷并允许 OEM 延迟支付全部的采购货款至销售期末,而 OEM 将只需就废旧关键零部件再制造和产成品组装的成本向银行借贷。BF-with-SDP 策略下的具体博弈事件顺序如图2中②所示。

BF-with-SDP 策略下供应商允许 OEM 延迟支付全部采购货款,因此, OEM 需向银行借贷的金额为 $(c_r \rho q_n^B + c(q_n^B + \rho q_n^B) - b_m)$ 。由于银行债务的偿还顺序优先于交易信用债务, OEM 偿还完自身银行债务后的剩余销售收入为 $(\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - (c_r \rho q_n^B + c(q_n^B + \rho q_n^B) - b_m))(1 + r_m^B)^+$ 。同时,供应商期末需偿还的银行贷款本息和为 $(c_n q_n^B - b_s)(1 + r_s^B)$ 。因此,基于有限偿还责任的假设, BF-with-SDP 策略下供应商

的实际利润函数可表示为

$$\Pi_s^B = (\min\{\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - \Omega^B\}^+, w^B q_n^B - \Lambda^B)^+ - b_s.$$

其中: $\Omega^B = (c_r \rho q_n^B + c(q_n^B + \rho q_n^B) - b_m)(1 + r_m^B)$ 表示 OEM 银行贷款本息和, 而 $\Lambda^B = (c_n q_n^B - b_s)(1 + r_s^B)$ 表示供应商银行贷款本息和. 依据式 (1), 可得 BF-with-SDP 策略下供应商向银行借贷的实际利率 r_s^B 的确定条件为

$$E \min\{\min\{\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - \Omega^B\}^+, w^B q_n^B\}, \Lambda^B\} = (c_n q_n^B - b_s)(1 + r_f).$$

因此, 可得 BF-with-SDP 策略下供应商的决策问题为

$$\begin{aligned} \max_{w^B} E(\Pi_s^B) &= (\min\{\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - \Omega^B\}^+, w^B q_n^B - \Lambda^B)^+ - b_s; \\ \text{s.t. } E \min\{\min\{\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - \Omega^B\}^+, w^B q_n^B\}, \Lambda^B\} &= (c_n q_n^B - b_s)(1 + r_f). \end{aligned} \quad (4)$$

相应地, 在销售期末, OEM 需偿还的银行贷款本息和为 Ω^B , 且需偿还被延迟支付的采购货款

$w^B q_n^B$. 因此, 基于 OEM 对自身债务承担有限责任的假设, BF-with-SDP 策略下 OEM 的实际利润函数可表示为

$$\Pi_m^B = (\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - \Omega^B - w^B q_n^B)^+ - b_m.$$

依据式 (1), 可得 BF-with-SDP 策略下 OEM 向银行借贷的实际利率 r_m^B 的确定条件为

$$E \min\{\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\}, \Omega^B\} = (c_r \rho q_n^B + c(q_n^B + \rho q_n^B) - b_m)(1 + r_f).$$

因此, 可得 BF-with-SDP 策略下 OEM 的决策问题为

$$\begin{aligned} \max_{q_n^B} E(\Pi_m^B) &= E(\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\} - \Omega^B - w^B q_n^B)^+ - b_m; \\ \text{s.t. } E \min\{\min\{D, q_n^B + \rho q_n^B\}, \Omega^B\} &= (c_r \rho q_n^B + c(q_n^B + \rho q_n^B) - b_m)(1 + r_f). \end{aligned} \quad (5)$$

基于逆序计算的方法, 求解由式 (4) 和 (5) 构成的两级博弈模型, 可得 BF-with-SDP 策略情形下的最优决策 (w^{B*}, q_n^{B*}) , 具体如命题 2 所示.

命题 2 当供应商向银行借贷并允许 OEM 延迟支付全部的采购货款, 而 OEM 将只需就自身的废旧关键零部件再制造成本和产成品组装成本向银行借贷时, 最优决策 (w^{B*}, q_n^{B*}) 可由如下方程组确定:

$$\left\{ \begin{aligned} (1 + \rho) \bar{F}(q_n^B + \rho q_n^B) - \left(\frac{(c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f)}{\bar{F}(\Omega^B)} + w^B \right) \bar{F}(\Omega^B + w^B q_n^B) &= 0, \\ - \frac{(1 + \rho)^2 f(q_n^B + \rho q_n^B)}{\bar{F}(\Omega^B + w^B q_n^B)} \frac{\partial q_n^B}{\partial w^B} - \frac{((c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f))^2 f(\Omega^B)}{(\bar{F}(\Omega^B))^3} \frac{\partial q_n^B}{\partial w^B} + \\ \left(\frac{(c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f)}{\bar{F}(\Omega^B)} + w^B \right)^2 h(\Omega^B + w^B q_n^B) \frac{\partial q_n^B}{\partial w^B} &= \\ 1 - \left(\frac{(c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f)}{\bar{F}(\Omega^B)} + w^B \right) h(\Omega^B + w^B q_n^B) q_n^B, \\ \bar{F}(\Omega^B + w^B q_n^B) \left[\left(\frac{(c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f)}{\bar{F}(\Omega^B)} - \frac{(c_n + c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f)}{\bar{F}(\Omega^B + w^B q_n^B)} + w^B \right) \frac{\partial q_n^B}{\partial w^B} + q_n^B \right] &= 0. \end{aligned} \right.$$

2.3 银行融资 + OEM 提前支付的合作融资策略 (BF-with-OAP 策略)

在 BF-with-OAP 策略下, OEM 将向银行借贷并预先向供应商支付全部的采购货款, 且主导者供应商将为 OEM 提供比例为 δ 的信用担保. BF-with-OAP 策略下的具体博弈事件顺序见图 2 中 ©.

在 BF-with-OAP 策略情形下, OEM 需就新关键零部件采购成本、废旧关键零部件再制造成本、产成品组装成本等向银行借贷, 即 OEM 的银行贷款额度为 $(w^C q_n^C + c_r \rho q_n^C + c(q_n^C + \rho q_n^C) - b_m)$. 相比之下, 由于 OEM 预先支付了全部的采购货款, 供应商无需向银行借贷, 但供应商将为 OEM 无法偿还的剩余债务

提供比例为 δ 的信用担保, 于是供应商需支付的信用担保赔偿金额为 $G = \delta(\Omega^C - \min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\})^+$, 其中参数 $\Omega^C = (w^C q_n^C + c_r \rho q_n^C + c(q_n^C + \rho q_n^C) - b_m)(1 + r_m^C)$ 表示 BF-with-OAP 策略下 OEM 的银行贷款本息和. 因此, 基于理性决策者和有限偿还责任的假设, BF-with-OAP 策略下供应商的决策问题可表示为

$$\max_{w^C} E(\Pi_s^C) = E((w^C - c_n) q_n^C + b_s - G)^+ - b_s. \quad (6)$$

在 BF-with-OAP 策略情形下, OEM 期末可用于偿还银行债务的资金包括自身的销售收入和供应商

提供的信用担保额度,即 $\min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\} + G$, 而期末需偿还的银行贷款本息和为 Ω^C . 因此, 依据式(1), 可得BF-with-OAP策略下OEM向银行借贷的实际利率 r_m^C 的确定条件为

$$E \min\{\min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\} + G, \Omega^C\} = (w^C q_n^C + c_r \rho q_n^C + c(q_n^C + \rho q_n^C) - b_m)(1 + r_f).$$

但是, OEM的销售收入将首先被用于偿还OEM自身的银行债务, 而供应商提供的信用担保只针对OEM无法偿还的剩余债务部分. 因此, 基于有限偿还责任假设, BF-with-OAP策略下OEM的实际利润函数可表示为

$$\Pi_m^C = (\min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\} - \Omega^C)^+ - b_m.$$

因此, BF-with-OAP策略下OEM的决策问题可表示

$$\begin{cases} (1 + \rho)\bar{F}(q_n^C + \rho q_n^C)[1 - (1 - \delta)F(\Omega^C)] - \bar{F}(\Omega^C)(w^C + c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f) = 0, \\ -(1 + \rho)^2 f(q_n^C + \rho q_n^C)[1 - (1 - \delta)F(\Omega^C)] \frac{\partial q_n^C}{\partial w^C} - (1 + \rho)\bar{F}(q_n^C + \rho q_n^C)(1 - \delta)f(\Omega^C) \frac{\partial \Omega^C}{\partial w^C} + \\ f(\Omega^C)(w^C + c_r \rho + c(1 + \rho))(1 + r_f) \frac{\partial \Omega^C}{\partial w^C} - \bar{F}(\Omega^C)(1 + r_f) = 0, \\ \left[\bar{F}(\Omega^C) - \bar{F}\left(\frac{\delta \Omega^C - (w^C - c_n)q_n^C - b_s}{\delta}\right) \right] \frac{\partial \Omega^C}{\partial w^C} + \frac{q_n^C + (w^C - c_n)}{\delta} \frac{\partial q_n^C}{\partial w^C} \bar{F}\left(\frac{\delta \Omega^C - (w^C - c_n)q_n^C - b_s}{\delta}\right) = 0. \end{cases}$$

3 数值分析

本节将以数值方式分析融资策略对制造/再制造生产的影响以及供应链成员的融资策略选择偏好. 同时, 将供应商和OEM都无信用违约的概率定义为银行无违约损失概率 P , 从而比较各融资策略下银行所面临的违约损失风险. 从而有

$$P^A = \bar{F}(\Omega^A), P^B = \bar{F}(\Omega^B + \Lambda^B), P^C = \bar{F}(\Omega^C).$$

定义参数 $\eta = c_r/c_n$. 再制造被认为可节约成本

为

$$\begin{aligned} \max_{q_n^C} &= E(\Pi_m^C) = (\min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\} - \Omega^C)^+ - b_m; \\ \text{s.t.} &\begin{cases} G = \delta(\Omega^C - \min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\})^+, \\ E \min\{\min\{D, q_n^C + \rho q_n^C\} + G, \Omega^C\} = \\ (w^C q_n^C + c_r \rho q_n^C + c(q_n^C + \rho q_n^C) - b_m)(1 + r_f). \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

基于逆向归纳法, 计算由式(6)和(7)构成的两级博弈模型, 可得BF-with-OAP策略情形下两级博弈的最优决策 (w^{C*}, q_n^{C*}) , 具体如命题3所示.

命题3 当OEM向银行借贷并向供应商预先支付全部的采购货款, 而供应商为OEM无法偿还的剩余银行债务提供部分信用担保时, 两级博弈的最优决策 (w^{C*}, q_n^{C*}) 可由如下方程组确定:

50%, 设置 $\eta = 0.5$. 假设需求 D 服从均值为100的指数分布, 即 $\bar{F}(D) = \exp(-0.01D)^{[4,15]}$. 参考Jin等^[4]的研究, 设置 $r_f = 0.02$. 其他参数的基础值设置为 $\rho = 0.06, c_n = 0.1, c = 0.3$. 各命题将通过Matlab R2017a中的 f solve函数来求解.

3.1 3种融资策略下新关键零部件批发价格的对比

本节将比较3种融资策略下新关键零部件的批发价格, 结果见图3. 观察图3, 可得如下结论1.

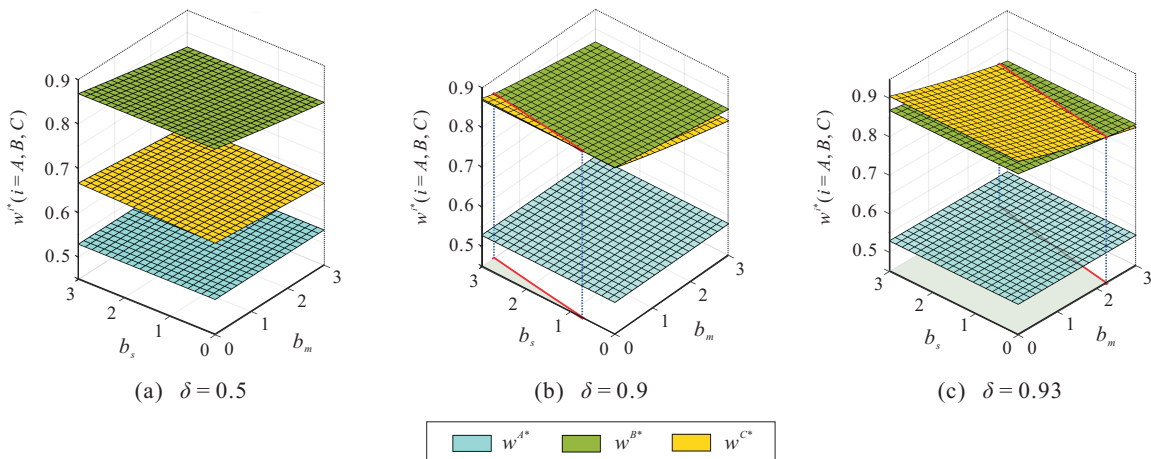


图3 3种融资策略下新关键零部件批发价格的对比分析

结论1 1)当担保比例较低时,BF-with-SDP策略下的新关键零部件批发价格最高;2)随着担保比例的提升,BF-with-OAP策略下的新关键零部件批发价格将逐步高于BF-with-SDP策略情形;3)SBF策略下的新关键零部件批发价格始终最低。

不同于不合作融资,合作型融资下供应商将部分地承担OEM的信贷风险.为抵消这种风险,供应商倾向于制定更高的新关键零部件批发价格.在BF-with-OAP策略下,担保比例 δ 的上升意味着供应商将承担

更多OEM的信贷风险,因此,随着 δ 的提高,供应商选择不断增加新关键零部件批发价格.受上述启示,由于供应商会利用风险分担来索取更高批发价格,对OEM而言,合作融资的经济性将弱于单独向完全竞争的外部资本市场进行融资。

3.2 3种融资策略下新品和再制品稳态产量的对比

图4和5比较了3种融资策略下新品和再制品的稳态生产量.结合图4和图5可得结论2.

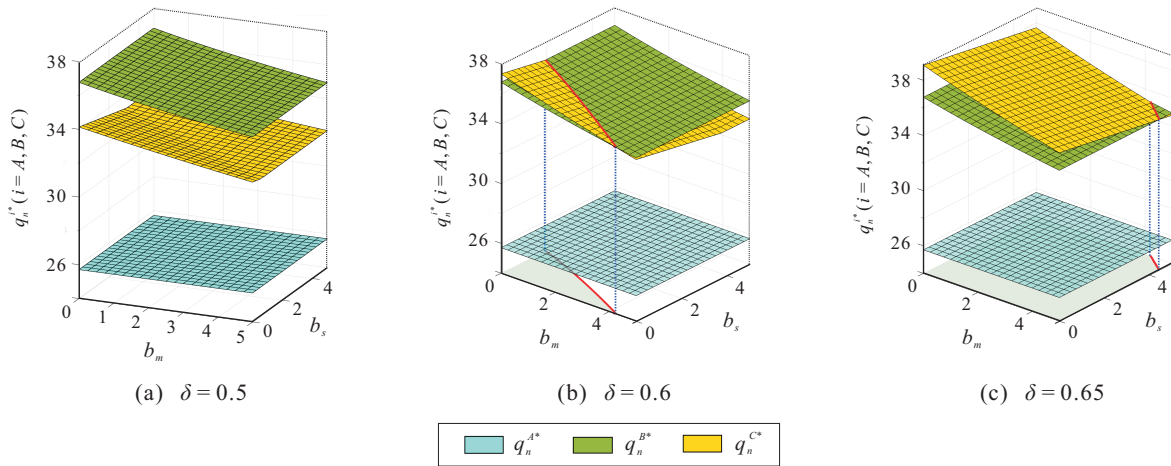


图4 3种融资策略下新品的稳态生产量的对比分析

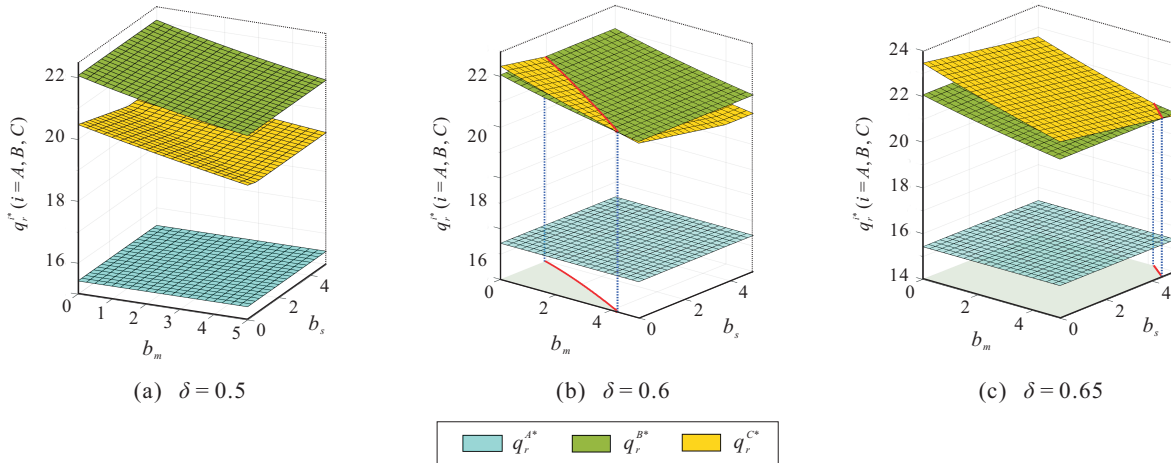


图5 3种融资策略下再制品的稳态生产量的对比分析

结论2 1)当担保比例较低时,BF-with-SDP策略最有利于促进新品和再制品生产;2)随着担保比例的提高,BF-with-OAP将逐步取代BF-with-SDP,成为最有利于促进新品和再制品生产的融资策略。

合作融资下供应商向OEM提供的延迟支付亦或是信用担保使得供应商分担了OEM的信贷风险,从而起到了对OEM的保护作用.因此,合作融资下OEM倾向于采用更加冒险、激进的制造/再制造生产策略.在BF-with-OAP策略下,更高的担保比例 δ 意味着OEM将享受来自供应商的更深层次的保护,

因此, δ 越高,OEM将越无顾忌地扩大新品/再制品产量.当担保比例 δ 较高时,BF-with-OAP策略下的新品/再制品稳态生产量将完全超越BF-with-SDP策略下的新品稳态生产量。

结合图3~图5,可得供应商和OEM的自有资金水平对最优决策的影响,具体如结论3所示。

结论3 1)不合作融资下供应商和OEM的自有资金不影响最优的新关键零部件批发价格和新品/再制品生产量;2)合作融资下最优的新关键零部件批发价格、新品/再制品生产量与OEM的自有资金负相

关;3) BF-with-SDP策略下供应商的自有资金对最优新关键零部件批发价格、新品/再制品生产量不产生影响. 在BF-with-OAP策略下,最优新关键零部件批发价格与供应商的自有资金微弱正相关,而新品/再制品生产量只在两成员自有资金之和低于特定阈值时才与供应商的自有资金负相关.

结论3的1)与Zhang等^[12]、Wang等^[8]的研究发现一致,其原因在于不合作融资下的供应链决策实质等同于无资金约束情形^[2].然而在合作融资下,由于供应商的风险分担,OEM偏向于激进的制造/再制造生产策略,但当其自有资金增加时,OEM因顾及自有资金的折损而转向相对保守的生产策略.相应地,供应商承担的风险相对减少,故相对降低新关键零部件的批发价格.在BF-with-OAP策略下,随着其自有资金的增加,供应商将更加顾及自有资金的折损,故选择相对增加批发价格.相应地,OEM则一定程度降低生产量.

上述启示,合作融资下供应商和OEM自有资金的增加将一定程度地抑制内部融资所导致的激进运营行为,促使供应链的生产运营决策趋于理性.

最后,通过进一步分析参数 ρ 和 η 的不同组合情形下的均衡决策,验证了结论1~结论3的稳健性.

3.3 3种融资策略下供应链成员均衡利润的对比

图6分析了担保比例 δ 对供应链成员均衡利润及银行无违约损失概率的影响,进而得出如下结论4和结论5.

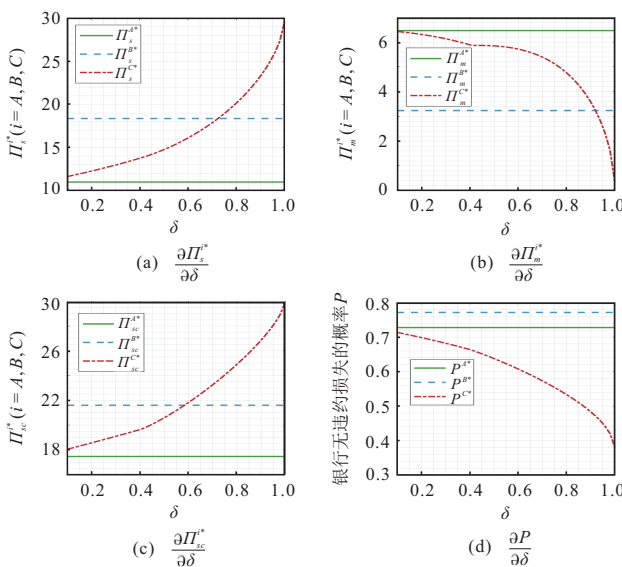


图6 担保比例 δ 对供应链成员均衡利润及银行无违约损失概率的影响

结论4 在BF-with-OAP策略下,随着供应商提供的担保比例的上升,供应商的均衡利润增加,OEM的均衡利润减少,而供应链整体绩效将提升,此外,银

行免受违约损失的概率却是降低的.

结论4表明,在BF-with-OAP策略下,担保比例 δ 的上升将对供应商和供应链整体有利,而对OEM和银行不利.这与直觉相异.其原因如下:主导者供应商可利用提供更高比例的信用担保增强自身的定价权,从而攫取更多的利润;相较于完全竞争的外部资本市场,担保比例 δ 的上升将降低供应商信用担保融资的经济性,从而对OEM利润产生不利影响;担保比例 δ 的上升促使OEM采取更为激进、冒险的制造/再制造生产策略,从而抬升了银行面临的损失风险.

上述启示,BF-with-OAP将导致供应商和OEM在均衡利润上的急剧失衡,并加剧供应链与银行的利益冲突,进而不利于供应链内部以及供应链与外部金融机构间的合作关系.

结论5 1)当担保比例 δ 较低时,供应商最偏好BF-with-SDP策略,而随着担保比例 δ 的提高,供应商将转向偏好BF-with-OAP策略;2)OEM始终最偏好SBF策略,且担保比例 δ 较高时,BF-with-OAP策略下的OEM均衡利润最低;3)当担保比例 δ 较低时,供应链整体最偏好BF-with-SDP策略,反之,其将转而最为偏好BF-with-OAP策略;4)BF-with-SDP策略下银行将最大可能地免受违约损失.

上述表明,供应商和供应链整体更偏好合作融资,而具体选择哪一种合作融资策略将依赖于担保比例 δ 的高低.虽然合作融资下供应商分担了OEM的信贷风险,但供应商会借此索取更高的批发价格,从而在抵消风险的同时获得超额利润.在BF-with-OAP策略下,担保比例 δ 的上升亦将给予供应商更强的定价权,因而担保比例 δ 越高,供应商的均衡利润越高.由此,作为竞争者的OEM将选择不合作融资策略.此外,BF-with-SDP策略在实现融资风险分担的同时又避免了批发价格对贷款额度的直接影响,从而使银行面临最低的损失风险.相较而言,Zhang等^[12]针对制造商单边资金约束的闭环供应链的研究表明,零售商信用融资较银行贷款、组合融资更有利于提升供应链整体绩效.

上述启示,合作融资虽可实现最高的供应链绩效,但单纯的内部融资无法实现供应商和OEM在均衡利润上的帕累托改进,因此,还需由占主导的关键零部件供应商牵头构建满足激励相容约束的供应链契约,以限制内部融资利率和高定价行为,实现合理分担融资风险和分享利润增值.

图7进一步分析了自有资金 b_s 和 b_m 对均衡利润和银行无违约损失概率的影响,并得出如下结论6和结论7.

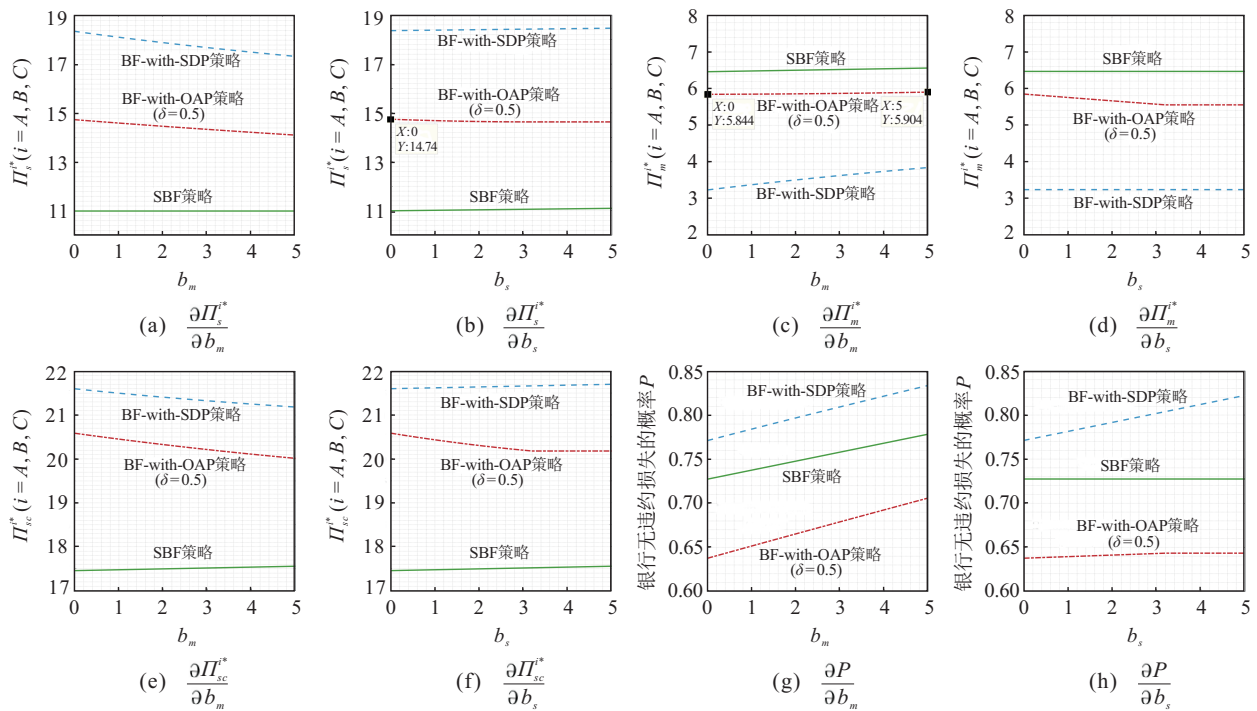


图7 初始资金 b_m 和 b_s 对供应链成员的均衡利润及银行无违约损失概率的影响

结论6 在不合作融资下: 1) 供应商(OEM)均衡利润将随其自有资金的增加而微弱增加, 而与OEM(供应商)的自有资金无关; 2) 供应商和OEM自有资金的增加都会有助于供应链绩效微弱提升; 3) 银行无违约损失概率随OEM自有资金的增加而提升, 而与供应商的自有资金无关。

在不合作融资下, 供应商和OEM将相互独立地通过外部渠道融资. 因此, 供应链成员自有资金的增加将减少其自身融资利息的支出, 而不会对另一成员的均衡利润产生影响. 同时, 在不合作融资下, OEM将基于银行借贷向供应商全额支付采购货款, 故不会出现供应商信用违约的情况. 因此, 供应商的自有资金不会对银行的损失风险产生影响。

结论7 在合作融资下: 1) 供应商均衡利润与OEM自有资金负相关, 同时作为担保者时, 供应商均衡利润随其自有资金的增加而略微降低; 2) OEM均衡利润与其自有资金正相关, 而与供应商自有资金无关或负相关; 3) OEM自有资金的增加将降低供应链绩效, 同时作为担保者时, 供应商自有资金的增加亦将降低供应链绩效; 4) 供应商和OEM自有资金的增加都有助于银行避免违约损失。

OEM自有资金的增加将减少其贷款额度, 从而减少其融资利息支出, 也压缩了供应商利用风险分担获取强定价权的空间. 在BF-with-OAP策略下, 随着自身自有资金的增加, 供应商将因顾虑自有资金的折损在提供担保方面趋向保守, 从而也压缩了供应商获得超额利润的空间. 同时, 在合作融资下, OEM和供

应商自有资金的增加将不同程度地抑制制造/再制造生产, 从而限制了供应链整体绩效。

上述启示, 在合作融资下, 供应链成员自有资金水平差距的扩大将对供应链整体不利. 此外, 两者自有资金的增加一方面使贷款方的贷款额度降低, 另一方面抑制了融资上的搭便车所导致的激进运作行为, 从而降低了银行遭受信用违约的风险。

通过观察对比图7中3种融资策略下的供应链均衡利润并结合结论5, 可得如下结论。

结论8 不管自有资金水平如何变动: 1) 供应商将始终偏好合作融资; 2) OEM将始终偏好不合作融资; 3) 合作融资始终对供应链整体更有利。

最后, 通过进一步梳理分析参数 ρ 和 η 的不同组合情形下的供应链成员均衡利润和银行无违约损失概率, 验证了结论4~结论8的稳健性。

4 结论

本文考虑由一资金约束新关键零部件供应商和一资金约束OEM构成的OEM再制造供应链, 着重分析了不合作融资策略(SBF策略)和合作融资策略(BF-with-SDP、BF-with-OAP策略)对制造/再制造生产的影响, 并对比分析了不同融资策略下的供应链成员均衡利润和银行损失风险。

主要结论如下: 1) 合作融资下供应商对OEM信贷风险的分担将促使供应商索取更高的批发价格, 同时, 也促使OEM显著提高新品和再制品的生产量, 即采取更激进的制造/再制造生产策略; 2) 合作融

资有助于实现更高的供应链整体绩效,但关于BF-with-SDP和BF-with-OAP策略的具体选择将依赖于担保比例的高低;3) 供应商和OEM在不合作与合作融资策略选择上存在冲突,因此,针对合作融资下供应链整体的利润增值,占主导的供应商应主动寻求与OEM构建满足激励相容约束的利润增值分配方案;4) 相较于BF-with-OAP策略,在BF-with-SDP策略下,再制造成本节约率和回收率的提升对再制造生产、供应链绩效、银行无违约损失概率的影响作用的一致性更强。

管理启示如下: 供应链成员间的融资协作和融资风险分担将促进新品和再制品生产; 单纯的内部融资将引发高定价行为, 无法实现供应链成员利益的帕累托改进, 因而供应商与OEM间还需签订限制内部融资利息及高定价行为, 合理分担融资风险和分享利润增值的附加契约, 从而实现利益协调; 在担保比例较高时, 虽然BF-with-OAP策略可以实现最高的供应链整体绩效, 但也导致供应商和OEM在均衡利润上的急剧失衡, 并使供应链成员面临高破产风险, 因此, BF-with-OAP策略将对供应链的持续稳定健康发展不利, 其实际应用价值有限; BF-with-SDP策略能更好实现供应链整体绩效, 促进再制造生产, 降低银行违约损失风险等的协调, 具有较BF-with-OAP策略更强的实际应用价值。

参考文献(References)

- [1] Yang H L, Zhuo W Y, Shao L S. Equilibrium evolution in a two-echelon supply chain with financially constrained retailers: The impact of equity financing[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 185: 139-149.
- [2] Chen X F. A model of trade credit in a capital-constrained distribution channel[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159: 347-357.
- [3] Yang S A, Birge J R. Trade credit, risk sharing, and inventory financing portfolios[J]. *Management Science*, 2018, 64(8): 3667-3689.
- [4] 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.
- [5] Shi J Z, Guo J E, Du Q, et al. Optimal financing mode selection for a capital-constrained retailer under an implicit bankruptcy cost[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 228: 107657.
- [6] Zhou Y W, Zhang X, Li L. Dual-channel supply chain pricing and financing decision with manufacturer's capital constraint[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(5): 670-688.
- [7] An S M, Li B, Song D P, et al. Green credit financing versus trade credit financing in a supply chain with carbon emission limits[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 292(1): 125-142.
- [8] Wang Y J, Chen W D. Integrated research on production and financing decisions of remanufacturing enterprise considering capital constraint[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2017, 31(4): 140-146.
- [9] Liu C Y, You T H, Cao B B. Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participants' risk attitudes and manufacturer capital constraint[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(5): 1239-1248.
- [10] Gao P, Ding X F, Qin R L. Financing strategies of closed-loop supply chain for the capital-constrained dealer[J]. *Management Review*, 2021, 33(4): 306-314.
- [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 Z C, Xu H Y, Chen K B. Operational decisions and financing strategies in a capital-constrained closed-loop supply chain[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(15): 4690-4710.
- [13] 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.
- [14] de Giovanni P, Reddy P V, Zaccour G. Incentive strategies for an optimal recovery program in a closed-loop supply chain[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 249(2): 605-617.
- [15] Yan N N, Jin X Y, Zhong H C, et al. Loss-averse retailers' financial offerings to capital-constrained suppliers: Loan vs. investment[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 227: 107665.
- [16] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 15-26.
- [17] Jing B, Chen X F, Cai G G. Equilibrium financing in a distribution channel with capital constraint[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(6): 1090-1101.

作者简介

张永明(1993—), 男, 博士生, 从事再制造运作、供应链金融等研究, E-mail: ecupl_student_1010@126.com;

陈伟达(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事再制造运作管理、低碳运作管理等研究, E-mail: cwd@seu.edu.cn;

李倩茹(1988—), 女, 讲师, 博士, 从事逆向供应链、低碳运作管理等研究, E-mail: liqr0421@163.com.