

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2023.01.001

考虑断链风险的供应链绩效测度与 Nash 谈判^①

陈金晓¹, 陈剑²

(1. 中国社会科学院, 北京 100732; 2. 清华大学经济管理学院, 北京 100084)

摘要: 供应链的任何局部变化都将影响整体绩效. 准确评估系统的绩效水平是应对断链风险、提高其稳定性的基础. 通过回顾三类常见的绩效测度, 指出现有的测度不适用于面临断链风险的供应链. 在区分中间产品和外向产出对上游绩效影响的基础上, 提出新的供应链绩效测度, 并论证了其对于识别断链情形的有效性. 基于新的测度, 进一步探讨供应链的绩效分配问题. 围绕安全库存的建立, 研究了上下游在应对断链风险的情况下如何实现效益共享. 采用 Nash 谈判法分别对集权系统的绩效分配和分权系统的绩效谈判进行分析. 研究表明, 分权供应链通过 Nash 谈判能够实现集权模式下的最优. 算例分析进一步验证了相关结论. 其结果显示, 安全库存的设置使上游避免因断链而绩效归零, 同时可以改进下游绩效从而提高需求的稳定性.

关键词: 供应链; 断链; 绩效; 测度; Nash 谈判

中图分类号: F224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2023)01-0001-18

0 引言

供应链的正常运营关乎链上所有成员的利益, 任一环节出现问题都将影响全局. 在经济全球化的背景下, 供应链中的分工更加紧密, 任一零部件的缺失都可能造成停产. 然而, 现实中的自然灾害^[1]、突发事件^[2]、贸易政策^[3]、产品问题^[4]等因素都会给供应链的正常运营带来不同形式和程度的干扰, 甚至直接导致断链. 在百年变局的大背景下, 供应链所处的环境愈加复杂, 面临更多不确定性^[5]. 大数据、物联网、区块链等新兴技术已在运营领域得到应用^[6, 7], 供应链的运作流程日趋智能化, 有效降低了风险水平^[8]. 肆虐全球的新型冠状病毒肺炎疫情给全球供应链带来严重冲击, 造成诸多产业短期内面临停摆或断链, 出现订单中断、供应短缺等问题. Euler Hermes 公司的调查显示^[9], 在 1 181 家受访的欧

美企业中, 有 94% 的企业因疫情而供应中断, 并且将近 1/5 的企业遭遇严重断链. 《哈佛商业评论》刊文分析新冠疫情下全球供应链的脆弱性, 指出断链通常不是供应商绩效指标的一部分^[10]. 文章回溯了 2011 年福岛地震事件, 指出尽管众多企业能够发现供应链中的潜在短板, 并快速评估灾害对其直接供应商的影响, 但对于二级以及更深层的供应商所受的影响却知之甚少.

受内外部因素的影响, 供应链的某些环节会面临原材料、零部件、中间产品以及资金等供应中断的风险, 进而威胁供应链整体运营的连续稳定性. 要抵御上述风险, 必须采取有效的应对措施, 避免断链的发生. 例如, 从系统的角度建立供应链风险管理计划和风险评估机制, 有效识别供应链的风险环节和不利因素并加以改善, 加强需求预测管理并实施安全库存, 建立有效的断链

① 收稿日期: 2020-05-23; 修订日期: 2022-01-02.

基金项目: 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2020AAA0103801); 国家自然科学基金资助项目(71702187); 清华大学经济管理学院“影响力”研究基金资助项目(2020051006).

作者简介: 陈金晓(1983—), 男, 浙江台州人, 博士, 助理研究员. Email: jincheng0830@126.com

风险应急机制等等^[11]。由于这些应对措施皆以准确掌握供应链的全局绩效为基础,而任何环节的风险都将对整体造成威胁,因此评估供应链的全局绩效对于应对断链风险至关重要。

全面的供应链绩效评估需要涵盖财务和非财务角度的诸多特征。供应链委员会(Supply Chain Council)发布的供应链运作参考模型(Supply Chain Operations Reference, SCOR)从成本、交货可靠性、响应能力、柔性、资产管理效率等5个绩效特征出发,采用物流成本、交货状况、订货完成率、响应时间、附加值生产率、资金周转时间等13个指标来衡量供应链的绩效,并在其上百个成员企业的供应链评估中发挥了富有成效的作用^[12]。可见,考察供应链绩效应综合多个维度和指标,并采用合理的测度方法进行系统的评价。对于涵盖多个投入和产出指标的供应链绩效评估问题,基于数据包络分析(DEA)^[13]的非参数绩效测度方法具有较高的相容性。Wong和Wong^[14]等文献通过概念阐述和文献调查,论证了DEA测度方法对于供应链绩效评估的适用性。

需要指出的是,现有的供应链绩效测度并未考虑断链的情形,因而只适用于正常运营的供应链,不适用于断链风险下的绩效评估。针对面临断链风险的供应链,有效的测度应将断链导致的供应链绩效变化准确地反映在全局绩效上。当某一环节发生供应中断时,该环节的上游无法将其产出供应给下游,这不仅导致局部的绩效归零,并且由于每个成员企业都是环环相扣实现供应链整体运营不可或缺的一部分,供应链的系统绩效也将随之归零。

早期的绩效测度将供应链整体视为“黑箱”^[15],这类被称为黑箱模型的测度由于只关注供应链整体的投入—产出情况,忽略了供应链内部的结构与环节,因此适用于上下游企业关系不清晰的情形。为了考察供应链的内部结构,诸多研究^[16-21]关注了由上游企业和下游企业构成的两级供应链。其中,上游企业将使用各种投入生产的中间产品供应给下游企业,下游企业则以中间产品为投入来生产最终产品。针对两级供应链的绩效测度主要可分为两类,即加法模型和乘法模型。

加法模型以成员企业绩效的算术(加权)平均来衡量供应链的绩效水平^[17, 18]。加法模型可

将中间产品等环节纳入考量的范围,但是对于断链的情形,会使系统绩效评估在很大程度上偏离实际。其原因在于,加法模型难以准确刻画断链事实基础上的供应链绩效归零。由供应中断导致的局部绩效骤降必然会给系统整体带来极大影响,若将供应链绩效视为所有成员的加性结果,则极有可能掩盖供应链已经中断的事实。此外,采用加法模型还需考虑上下游企业在供应链中的权重大小,不同的权重分配在多数情况下将得到不一致的评估结果。

乘法模型以成员企业绩效的乘积形式来衡量供应链的绩效水平^[19]。现有的乘法模型主要针对基本结构(上游没有外向产出且下游没有外源投入)的供应链,对于一般化结构(上游存在外向产出或(且)下游存在外源投入)的供应链则应用较少。Chen和Zhu^[20]、Guo等^[21]基于乘法模型分析一般化结构的供应链绩效,但是对断链的情形同样会作出误判。其原因在于,该乘法模型没有区分上游的外向产出和中间产品对绩效的影响。

基于上述分析,本文将在考虑断链风险的基础上提出一般化结构的供应链绩效测度。新的测度致力于合理刻画供应链局部与整体之间的关联关系,将内部环节的失效对整条链的影响体现在系统绩效的评估上,从而对断链情形给出直观准确的判断。

另一方面,供应链的绩效还涉及成员企业之间的分配问题。断链将导致供应链的整体绩效归零,这一客观事实显然不是成员企业乐见的结果。因此,成员企业需要采取积极的措施应对断链风险。相关研究表明,建立安全库存是防范化解供应链风险的有效举措^[22]。尽管会增加成本投入,但是安全库存的设置能够有效保障断链风险下运营的连续稳定性,使供应链的整体绩效维持在一定的水平上。

基于新的供应链绩效测度,本文将进一步研究安全库存保障下的供应链绩效分配问题。由于安全库存的额外成本,成员企业需要对这一成本如何承担进行协商。在绩效分配方面,一些文献将博弈分析引入研究,但缺乏对供应链系统全局的考量^[23],或者只专注于集权系统的分析^[24]。本文在全局考量的基础上,将Nash谈判^[25]引入

分权系统，同时分析集权系统中的绩效均衡分配，通过两者的比较探讨分权供应链能否达到集权模式下的最优。

1 考虑断链风险的供应链绩效测度

如前所述，现有测度在评估断链风险下的供应链绩效方面存在不足。本节将对其中常见的三类测度展开讨论，分析问题的成因，并进一步提出新的供应链绩效测度。

在实践中，前述的基本结构并不总是符合供应链的具体情况，外向产出和外源投入普遍存在于实际的供应链中。例如，芯片供应商生产不同

型号的芯片，其中某种型号的芯片供应给下游的手机生产商，而其余型号的芯片则供应给其他制造商。对于由芯片供应商与手机生产商组成的供应链，其余型号的芯片属于该供应链的上游（即芯片供应商）的外向产出。另一方面，手机生产商除了将所需型号的芯片（中间产品）作为投入之外，还需要人力、能源、设备等其他资源的投入，而这些则属于下游（即手机生产商）的外源投入。由此可见，有必要将基本结构拓展到更为一般化的供应链结构，将上游的外向产出与下游的外源投入纳入考量。考虑由上游卖方企业和下游买方企业构成的两级供应链，如图 1 所示。相关符号说明见表 1。

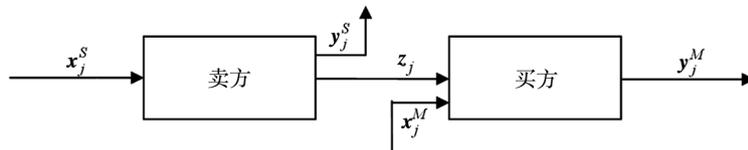


图 1 卖方—买方两级供应链

Fig. 1 A seller-buyer two-echelon supply chain

表 1 相关符号说明

Table 1 Description of relevant notations

符号	说明
$x_j^S = (x_{1j}^S, x_{2j}^S, \dots, x_{ij}^S)^T$	供应链 j 中卖方的投入向量 (T 表示向量转置, 下同)
$y_j^S = (y_{1j}^S, y_{2j}^S, \dots, y_{ij}^S)^T$	供应链 j 中卖方的外向产出向量
$z_j = (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{ij})^T$	供应链 j 的中间产品向量
$x_j^M = (x_{1j}^M, x_{2j}^M, \dots, x_{mj}^M)^T$	供应链 j 中买方的外源投入向量
$y_j^M = (y_{1j}^M, y_{2j}^M, \dots, y_{ij}^M)^T$	供应链 j 中买方的产出向量
$v_S = (v_1^S, v_2^S, \dots, v_i^S)^T$	卖方投入的权重向量
$u_S = (u_1^S, u_2^S, \dots, u_i^S)^T$	卖方外向产出的权重向量
$w = (w_1, w_2, \dots, w_q)^T$	中间产品的权重向量
$v_M = (v_1^M, v_2^M, \dots, v_m^M)^T$	买方外源投入的权重向量
$u_M = (u_1^M, u_2^M, \dots, u_s^M)^T$	买方产出的权重向量

若上游卖方没有外向产出 ($y_j^S = 0$) 且下游买方没有外源投入 ($x_j^M = 0$)，则图 1 呈现的是基本结构。因此，对图 1 的分析已涵盖基本结构的情形。

正常运营时，供应链上下游的投入向量和产出向量均大于零，即 $x_j^S, y_j^S, z_j, x_j^M, y_j^M > 0$ ，而断链将导致部分向量为零。在图 1 中，若卖方生产的中间产品 z_j 因故未能供应给买方，即 $z_j = 0$ ，则出现了供应中断。

设有 n 条如图 1 所示的供应链。对于其中的任一条供应链 j ，若将其视为黑箱，基于 Charnes

等^[13]，可给出其绩效表达式如下

$$\theta_j = \frac{u_S^T y_j^S + u_M^T y_j^M}{v_S^T x_j^S + v_M^T x_j^M}, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

设上下游的投入产出指标具有正的权重，即 $v_S, u_S, w, v_M, u_M \geq \epsilon e$ ，其中， $\epsilon > 0$ 为非阿基米德无穷小量， e 是元素均为 1 的向量。不失一般性，对供应链 $o (o \in \{1, 2, \dots, n\})$ 的绩效进行评估，可给出如下黑箱模型^[13]

$$\theta_o^* = \max_{v_S, u_S, v_M, u_M \geq \epsilon e} \{ \theta_o \mid \theta_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \} \quad (2)$$

卖方未能将中间产品供应给下游时，有 $z_o^{(S)} = 0$ 。此时若买方有相应的替代货源，其中间产品投入

可保持一定的水平 $z_o^{(M)} > 0$, 或可维系后续一段时间的运营和产出. 对于原有供应链, 其绩效因断链事实上已为零. 若采用式(2)的黑箱模型, 将忽视中间产品 $z_o^{(S)} = 0$ 对原有供应链的影响, 而 $z_o^{(M)} > 0$ 将使买方的产出 $y_o^M > 0$. 这意味着, 在断链情形下式(2)给出的原有供应链的绩效 $\theta_o^* > 0$. 由此可见, 黑箱模型不适用于考虑断链情形的供应链绩效评估.

若从成员企业的角度分析供应链的绩效, 卖方和买方的绩效可分别表示为

$$\theta_j^S = \frac{u_S^T y_j^S + w^T z_j}{v_S^T x_j^S}, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\theta_j^M = \frac{u_M^T y_j^M}{w^T z_j + v_M^T x_j^M}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

相应的加法模型如下^[18]

$$\theta_o^{add*} = \max_{v_S, u_S, w, v_M, u_M \geq \epsilon \epsilon} \left\{ \omega^S \theta_o^S + \omega^M \theta_o^M \mid \theta_j^S \leq 1, \theta_j^M \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (5)$$

其中 $\omega^S, \omega^M (> 0)$ 分别为卖方和买方的权重参数, 且 $\omega^S + \omega^M = 1$.

加法模型虽然考虑了中间产品 $z_o^{(S)} = 0$ 对原有供应链的影响, 但由于卖方的外向产出 $y_o^S > 0$ 使其绩效 $\theta_o^S > 0$ (若卖方没有外向产出即 $y_o^S = 0$, 断链时有 $\theta_o^S = 0$), 而 $z_o^{(M)} > 0$ 又令买方的绩效 $\theta_o^M > 0$, 因此若采用加法模型即式(5), 原有供应链中断时的绩效 $\theta_o^{add*} > 0$. 这一结果同样有悖于断链绩效归零的事实, 表明加法模型无法准确识别断链的发生.

对于乘法模型^[19]

$$\theta_o^{mul*} = \max_{v_S, u_S, w, v_M, u_M \geq \epsilon \epsilon} \left\{ \theta_o^S \cdot \theta_o^M \mid \theta_j^S \leq 1, \theta_j^M \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (6)$$

其与式(5)的区别仅在于目标函数, 前者是两个成员企业绩效的乘积, 而后者是绩效的加权平均. 若卖方没有外向产出即 $y_o^S = 0$, 中间产品 $z_o^{(S)} = 0$ 将使卖方的绩效 $\theta_o^S = 0$, 此时采用乘法模型即式(6), 原有供应链的绩效 $\theta_o^{mul*} = 0$; 当存在外向产出即 $y_o^S > 0$ 时, 卖方的绩效 $\theta_o^S > 0$, 并且由于买方的绩效 $\theta_o^M > 0$, 有 $\theta_o^{mul*} > 0$. 可见, 对于存在外向产出的情形, 现有的乘法模型同样会对断链作出误判.

对断链情形的误判会夸大供应链绩效的实际情况, 给决策者传递错误信号, 导致预警失灵、响应延迟, 是应急管理力求避免的. 面临断链时, 拥有替代货源的买方可能会对其下游客户隐瞒断链的信息, 以免后者以供货不稳为由转而寻求其他合作伙伴. 但从下游客户的角度, 如能尽早掌握其深层供应商的断供信息, 则可及时采取应对措施, 降低缺货的风险.

可以看到, 黑箱模型忽略了中间产品对供应链的影响, 而加法模型则掩盖了局部绩效归零对供应链整体的影响. 这两类测度因其固有的特性使之难以准确刻画断链情形下的供应链绩效. 现有的乘法模型作出误判的原因在于未将外向产出和中间产品对上游绩效的贡献进行区分. 事实上, 如图1所示的供应链, 其上游卖方的外向产出并非下游买方的投入, 因此严格来说, 这些外向产出并未涉及这条供应链的运营, 对该供应链的绩效也没有贡献. 由此可见, 合理评估供应链的绩效, 需要将外向产出从卖方的绩效中分离出来.

卖方的产出包括中间产品 z_j 和外向产出 y_j^S , 因此在其全部的投入 x_j^S 中, 有一部分用于生产中间产品 z_j , 而剩余的部分则用于外向产出 y_j^S 的生产. 例如, 医疗物资供应商使用熔喷布生产口罩和防护服, 供应给不同的地点. 由于生产每批口罩或防护服所需的熔喷布数量可以比较清晰地掌握, 因此能够确定流向不同需求点的物资分别消耗的熔喷布数量. 在实践中, 也存在一些投入变量不可分的情形. 譬如, 在煤化工企业与燃气公司组成的供应链中, 上游的煤化工企业使用原煤生产煤制天然气, 在这一生产工艺中又同时得到硫磺、焦油等副产品. 煤制天然气作为中间产品供应给下游的燃气公司, 而焦油、硫磺等副产品则作为外向产出供应给其他企业. 由于根据产出情况不易衡量分别用于煤制天然气和副产品生产的原煤量, 因此原煤可视为煤化工企业的不可分投入.

不失一般性, 设卖方的投入向量 $x_j^S = (x_{1j}^S, x_{2j}^S, \dots, x_{ij}^S)^T$ 的前 i 个变量为可分投入 $x_j^{\prime S} = (x_{1j}^S, x_{2j}^S, \dots, x_{ij}^S)^T$, 后 $l - i$ 个变量为不可分投入 $x_j^{\prime\prime S} = (x_{i+1,j}^S, x_{i+2,j}^S, \dots, x_{lj}^S)^T$. 可分投入与不可分投入对于生产中间产品 z_j 的权重向量分别为 $v_{S(z)} = (v_1^{S(z)}, v_2^{S(z)}, \dots, v_i^{S(z)})^T$ 和 $v_{S(z)}'' = (v_{i+1}^{S(z)}, v_{i+2}^{S(z)}, \dots, v_l^{S(z)})^T$,

对于生产外向产出 y_j^S 的权重向量分别为 $v_{S(y)}' = (v_1^{S(y)}, v_2^{S(y)}, \dots, v_i^{S(y)})^T$ 和 $v_{S(z)}'' = (v_{i+1}^{S(z)}, v_{i+2}^{S(z)}, \dots, v_l^{S(z)})^T$.

记 α_k 为卖方生产中间产品使用可分投入 $k (k \in \{1, 2, \dots, i\})$ 的比例, 则其用于生产中间产品的可分投入为 $x_j^{S(z)} = (\alpha_1 x_{1j}^S, \alpha_2 x_{2j}^S, \dots, \alpha_i x_{ij}^S)^T$, 用于生产外向产出的可分投入为 $x_j^{S(y)} = ((1 - \alpha_1) x_{1j}^S, (1 - \alpha_2) x_{2j}^S, \dots, (1 - \alpha_i) x_{ij}^S)^T$.

据此, 卖方生产中间产品的绩效可表示为

$$\theta_j^{S(z)} = \frac{w^T z_j}{v_{S(z)}' x_j^{S(z)} + v_{S(z)}'' x_j^{S''}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

卖方生产外向产出的绩效可表示为

$$\theta_j^{S(y)} = \frac{u_S^T y_j^S}{v_{S(y)}' x_j^{S(y)} + v_{S(y)}'' x_j^{S''}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

记 W_z 和 W_y 分别为中间产品和外向产出在卖方绩效评估中的重要性. 卖方的总绩效可表示为

$$\theta_j^{S(z,y)} = W_z \theta_j^{S(z)} + W_y \theta_j^{S(y)}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

关于 W_z (W_y) 的取值, 可根据生产中间产品 (外向产出) 所占用的投入份量大小来确定^[26]. 在卖方总的资源投入中, 贡献于中间产品 (外向产出) 生产的资源投入占比越大, 则中间产品 (外向产出) 的重要性越高, 即

$$W_z = \frac{v_{S(z)}' x_j^{S(z)} + v_{S(z)}'' x_j^{S''}}{(v_{S(z)}' x_j^{S(z)} + v_{S(z)}'' x_j^{S''}) + (v_{S(y)}' x_j^{S(y)} + v_{S(y)}'' x_j^{S''})},$$

$$W_y = \frac{v_{S(y)}' x_j^{S(y)} + v_{S(y)}'' x_j^{S''}}{(v_{S(z)}' x_j^{S(z)} + v_{S(z)}'' x_j^{S''}) + (v_{S(y)}' x_j^{S(y)} + v_{S(y)}'' x_j^{S''})} \quad (10)$$

于是, 式(9)可转化为

$$\theta_j^{S(z,y)} = \frac{w^T z_j + u_S^T y_j^S}{(v_{S(z)}' x_j^{S(z)} + v_{S(z)}'' x_j^{S''}) + (v_{S(y)}' x_j^{S(y)} + v_{S(y)}'' x_j^{S''})}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

关于卖方生产中间产品使用可分投入的比例 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i)^T$ 如何确定, 一种可供选择的方法是 α 的取值应使该企业的绩效最大化^[26].

基于这一考量, 问题可描述为

$$\max_{\substack{v_{S(z)}', v_{S(y)}'', u_S, w \geq \epsilon \epsilon, \\ \alpha \geq 0,}} \left\{ \theta_o^{S(z,y)} \mid \begin{array}{l} \theta_j^{S(z)} \leq 1, \theta_j^{S(y)} \leq 1, \\ \alpha_k \leq 1, k = 1, 2, \dots, i, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (12)$$

令 $\hat{v}_k^{S(z)} = \alpha_k v_k^{S(z)}, \hat{v}_k^{S(y)} = \alpha_k v_k^{S(y)}, k = 1, 2, \dots, i$, 通过 Charnes-Cooper 变换^[27], 令目标函数的分母等于 1, 可将式(12)转化为线性规划. 记 $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_i^*)^T$ 为式(12)的最优解, 有 $\alpha_k^* = \frac{\hat{v}_k^{S(y)*}}{v_k^{S(y)*}}, k = 1, 2, \dots, i, i(v_k^{S(z)*}, \hat{v}_k^{S(y)*})$ 为该线性规划的决策变量最优值). 卖方据此可以区分用于生产中间产品的可分投入

$$x_j^{S(z)}(\alpha^*) = (\alpha_1^* x_{1j}^S, \alpha_2^* x_{2j}^S, \dots, \alpha_i^* x_{ij}^S)^T \quad (13)$$

和用于生产外向产出的可分投入

$$x_j^{S(y)}(\alpha^*) = ((1 - \alpha_1^*) x_{1j}^S, (1 - \alpha_2^*) x_{2j}^S, \dots, (1 - \alpha_i^*) x_{ij}^S)^T \quad (14)$$

前者因中间产品 z_j 供应给下游买方而涉及该供应链的绩效评估, 后者则没有涉及.

根据上述分析, 评估图 1 所示的供应链绩效, 应将卖方生产中间产品的绩效

$$\theta_j^{S(z)}(\alpha^*) = \frac{w^T z_j}{v_{S(z)}' x_j^{S(z)}(\alpha^*) + v_{S(z)}'' x_j^{S''}} \quad (15)$$

纳入考量的范围. 在断链情形下, 中间产品 $z_o^{(S)} = 0$ 将使卖方的绩效 $\theta_o^{S(z)}(\alpha^*) = 0$. 若买方拥有替代货源, 则其绩效 $\theta_o^M > 0$, 因此原有供应链的加性绩效仍大于零. 考虑乘法模型, 定义新的测度如下

$$\theta_o^{new*} = \max_{\substack{v_{S(z)}', v_{S(z)}'', \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon \epsilon}} \left\{ \theta_o^{S(z)}(\alpha^*) \times \left. \begin{array}{l} \theta_j^{S(z)}(\alpha^*) \leq 1, \\ \theta_j^M \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (16)$$

发生断链时, 新的测度给出原有供应链的绩效 $\theta_o^{new*} = 0$. 由于将中间产品和外向产出对卖方绩效的贡献进行区分, 新的测度能够合理刻画供应链的绩效, 并对其是否断链作出直观准确的判断.

供应链正常运营时, 由于式(16)的目标函数为分式, 可将其转化为

$$\min_{\substack{v_{S(z)}', v_{S(z)}'', \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon \epsilon}} \left\{ \frac{1}{\theta_o^{S(z)}(\alpha^*)} \times \frac{1}{\theta_o^M} \mid \begin{array}{l} \theta_j^{S(z)}(\alpha^*) \leq 1, \\ \theta_j^M \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (17)$$

通过 Charnes-Cooper 变换, 令 $\tau = \frac{1}{u_M^T y_o^M}, \tilde{v}_{S(z)}' =$

$\tau v'_{S(z)}, \tilde{v}''_{S(z)} = \tau v''_{S(z)}, \tilde{w} = \tau w, \tilde{v}_M = \tau v_M, \tilde{u}_M = \tau u_M$.
 采用二阶锥规划方法^[20, 21, 28], 引入变量 ρ 并作上镜图(epigraph)变换, 可将式(17)进一步转化为

$$\begin{aligned} & \min \quad \rho \\ & \tilde{v}_{S(z)}, \tilde{v}''_{S(z)}, \\ & \tilde{w}, \tilde{v}_M, \tilde{u}_M \geq \epsilon e \\ & \rho \text{ free} \\ \text{s. t. } & (\tilde{v}'_{S(z)} x'_o{}^{S(z)}(\alpha^*) + \tilde{v}''_{S(z)} x''_o{}^S) \times \\ & (\tilde{w}^T z_o + \tilde{v}_M^T x_o^M) \leq \rho \tilde{w}^T z_o, \\ & \tilde{w}^T z_j - \tilde{v}_{S(z)}^T x_j{}^{S(z)}(\alpha^*) - \tilde{v}_{S(z)}^T x_j{}^S \leq 0, \\ & j = 1, 2, \dots, n, \tilde{u}_M^T y_j^M - \tilde{w}^T z_j - \tilde{v}_M^T x_j^M \leq 0, \\ & j = 1, 2, \dots, n, \tilde{u}_M^T y_o^M = 1 \end{aligned} \quad (18)$$

由于 $\tilde{v}'_{S(z)}, \tilde{v}''_{S(z)}, \tilde{w}, \tilde{v}_M, \tilde{u}_M > 0, \rho > 0$ (由第一个约束可得), 式(18)中的第一个约束等价于如下半正定矩阵

$$\begin{bmatrix} \rho & \tilde{w}^T z_o + \tilde{v}_M^T x_o^M \\ \tilde{v}_{S(z)}^T x_o{}^{S(z)}(\alpha^*) + \tilde{v}_{S(z)}^T x_o{}^S & \tilde{w}^T z_o \end{bmatrix} \succ = 0 \quad (19)$$

其中 $\succ =$ 表示其左边的矩阵为半正定. 令 $\mu = (\tilde{v}_{S(z)}^T x_o{}^{S(z)}(\alpha^*) + \tilde{v}_{S(z)}^T x_o{}^S + \tilde{w}^T z_o + \tilde{v}_M^T x_o^M) / 2$, $\sigma = \tilde{w}^T z_o$. 式(19)中的方阵与式(20)中的方阵具有相同的特征多项式和特征值, 因此式(19)与式(20)等价

$$\begin{bmatrix} \rho & \mu \\ \mu & \sigma \end{bmatrix} \succ = 0 \quad (20)$$

式(20)表明 $\rho\sigma - \mu^2 \geq 0$, 于是有 $(\frac{\rho - \sigma}{2})^2 + \mu^2 \leq (\frac{\rho + \sigma}{2})^2$, 这与 $\rho + \sigma \geq \left\| \begin{matrix} 2\mu \\ \rho - \sigma \end{matrix} \right\|_2$ 在 l_2 范数下等价. 所以, 式(18)中的第一个约束等价于 $\rho + \tilde{w}^T z_o \geq$

$$\left\| \begin{matrix} \tilde{v}_{S(z)}^T x_o{}^{S(z)}(\alpha^*) + \tilde{v}_{S(z)}^T x_o{}^S + \tilde{w}^T z_o + \tilde{v}_M^T x_o^M \\ \rho - \tilde{w}^T z_o \end{matrix} \right\|_2 \quad (21)$$

除第一个约束外, 式(18)中的其他约束均为线性. 用式(21)替换式(18)中的第一个约束, 可将式(18)转化为一个带二阶锥约束的线性规划, 因而是凸优化问题, 可求解其全局最优解 ρ^* , 进

而得到新的供应链绩效测度即式(16)的最优解

$$\theta_o^{new*} = \frac{1}{\rho^*}.$$

在断链情形下, 若下游买方放弃原有供应链转而寻求替代货源, 则买方与替代货源构成了新的供应链. 将图 1 中的上游卖方替换为新的货源, 可采用新的测度衡量该供应链的绩效. 这对原有供应链中的卖方无疑是不利的消息, 因此其需要采取措施防御断链风险以留住下游买方, 确保需求的稳定性. 然而, 下游同样也可能会面临不利的境况, 例如新冠疫情就反映出一些情况下甚至出现替代困难. 突发的疫情导致口罩等防疫物资短期内需求激增, 平常的防护物资供应在巨大缺口面前难免杯水车薪, 一旦面临供应中断要寻求替代货源并非易事. 因此, 快速应对突发状况需要供应链上下游的共同努力. 如果下游企业意识到存在替代困难, 就会寻求与上游卖方共同抵御可能出现的危机. 应对断链风险将增加运营的成本, 这个成本由谁来承担, 考虑这一成本后成员企业应该如何进行利益分配, 是需要进一步协调的问题.

2 考虑断链风险的供应链绩效 Nash 谈判

如何协调成员企业之间的利益, 关乎系统全局绩效的实现, 是供应链绩效评估的重要内容. 成员企业作为独立主体, 追求自身利益的最大化, 寻求绩效的均衡分配符合各利益主体的目标. 另一方面, 对集权系统的评估是一种全局考量, 因而其绩效水平通常高于分权系统. 如何使分权供应链达到或趋近于全局最优, 是供应链协调的主要目标之一^[29].

合作博弈理论从静态公理化和动态策略式等路径提出了诸多博弈解概念, 这些解概念从均衡的角度为主体间的利益分配提供了方案参考. 对于供应链的协调问题, Nash 谈判理论在利益共享机制设计方面得到了广泛应用. Lovejoy^[30]指出, 在诸多供应链环境下, Nash 谈判框架的应用是一种合适的选择. Li 和 Hua^[31]提出基于 Nash 谈判的制造商与零售商利润共享机制, 并指出分权供应链在收益共享协议和均衡支付方案下可以得到

协调. 杜少甫等^[32]基于 Nash 谈判思想建立公平参考框架研究供应链的优化问题, 分析零售商的公平关切行为如何影响供应链. 安庆贤等^[33]针对中间产品目标的设定问题, 提出基于公平考虑的两阶段 DEA 模型, 并论证得出的设定方案是一个 Nash 均衡解. 林强和叶飞^[34]针对农产品供应链提出基于 Nash 谈判的收益共享契约机制, 指出这一机制不但可以协调公司与农户的利益, 而且能够实现社会福利的增加.

应对断链风险需要付出一定的成本. 供应链协调要考虑这一成本前提下的效益共享问题. 安全库存的建立可在一定程度上抵御断链的风险. 例如, 由卖方设置安全库存并替代买方进行管理, 从而保障原有供应链的持续运营. Dong 和 Xu^[35]通过博弈分析认为, 供应商管理库存 (VMI) 能够增加下游企业的收益, 但供应商会因库存成本增加而利益受损, 导致责任与收益不平衡, 因此需要重新协调成员企业的利益. Lovejoy^[30]指出, 基于买卖双方谈判能力的 Nash 谈判框架, 能够合理反映 VMI 中供应商与下游企业的地位, 因而具有一定的适用性.

由图 1 知, 中间产品的正常需求量为 z_j . 记实际供应量 $z_j^{(S)} = r z_j$, $0 \leq r \leq 1$, 则满足正常需求的安全库存量应为 $z_j - z_j^{(S)}$. 记安全库存的维持成本向量 $z_j^c = c(z_j - z_j^{(S)})$, 其中 $c (> 0)$ 为维持成本系数. 记卖方分摊安全库存维持成本的比例为 $\delta \in [0, 1]$. 基于式 (15), 建立安全库存的卖方绩效可表示为

$$\tilde{\theta}_j^S = \frac{w^T z_j}{v_{S(z)}^T x_j^{S(z)}(\alpha^*) + v_{S(z)}^T x_j^S + w^T \delta z_j^c}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

基于式 (4), 建立安全库存的买方绩效可表示为

$$\tilde{\theta}_j^M = \frac{u_M^T y_j^M}{w^T z_j + v_M^T x_j^M + w^T (1 - \delta) z_j^c}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

通过设置安全库存, 成员企业致力于在断链风险下保障供应链的正常运营, 进而实现效益共享. 基于新的绩效测度即式 (16), 给出建立安全库存的供应链绩效测度如下

$$\tilde{\theta}_o^{new*} = \max_{\substack{v_{S(z)}, v_{S(z)}, \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon e}} \left\{ \tilde{\theta}_o^S \cdot \tilde{\theta}_o^M \mid \tilde{\theta}_j^S \leq 1, \tilde{\theta}_j^M \leq 1, \right. \\ \left. j = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (24)$$

特别地, 当 $r = 1$ 时, 供应链处于正常运营状态, 有 $z_j^{(S)} = z_j, z_j^c = 0$, 式 (24) 与式 (16) 等价. 当 $r = 0$ 时, 供应链处于断链状态, 有 $z_j^{(S)} = 0$. 此时若未建安全库存, 由式 (16) 可得供应链的绩效 $\theta_o^{new*} = 0$; 若建有安全库存保障供应, 则库存量为 z_j , 库存维持成本 $z_j^c = c z_j$.

类似于式 (16), 式 (24) 可转化为如下二阶锥规划问题.

$$\begin{aligned} & \min \quad \rho \\ & \substack{v_{S(z)}, v_{S(z)}, w, v_M, u_M \geq \epsilon e \\ \rho \text{ free}} \\ \text{s. t. } & \rho + \tilde{w}^T z_o \geq \\ & \left\| \begin{array}{c} v_{S(z)}^T x_o^{S(z)}(\alpha^*) + v_{S(z)}^T x_o^S + \tilde{w}^T z_o^c + \tilde{w}^T z_o + v_M^T x_o^M \\ \rho - \tilde{w}^T z_o \end{array} \right\|_2, \\ & \tilde{w}^T z_j - v_{S(z)}^T x_j^{S(z)}(\alpha^*) - v_{S(z)}^T x_j^S - \tilde{w}^T \delta z_j^c \leq 0, \\ & j = 1, 2, \dots, n, u_M^T y_j^M - \tilde{w}^T z_j - v_M^T x_j^M - \tilde{w}^T (1 - \delta) z_j^c \leq 0, \\ & j = 1, 2, \dots, n, u_M^T y_o^M = 1 \end{aligned} \quad (25)$$

式 (25) 中的第一个约束为二阶锥约束, 其余约束为带参数 δ 的线性约束, 因此式 (25) 是带参数 δ 的凸优化问题. 对 δ 在 $[0, 1]$ 区间内作启发式搜索可得式 (25) 的最优解 $\{\rho^*, \delta^*\}$. 于是, 供应链的整体绩效即式 (24) 的最优解为 $\tilde{\theta}_o^{new*} = \frac{1}{\rho^*}$, δ^* 为安全库存维持成本的最优分摊比例.

进一步分析成员企业之间的绩效分配. 当系统绩效为 $\tilde{\theta}_o^{new*}$ 时, 记卖方能够达到的最高绩效和最低绩效分别为 $\tilde{\theta}_o^{S+}$ 和 $\tilde{\theta}_o^{S-}$, 有

$$\tilde{\theta}_o^{S+} / \tilde{\theta}_o^{S-} = \max / \min_{\substack{v_{S(z)}, v_{S(z)}, \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon e}} \left\{ \tilde{\theta}_o^S \mid \begin{array}{l} \tilde{\theta}_o^S \cdot \tilde{\theta}_o^M = \tilde{\theta}_o^{new*}, \\ \tilde{\theta}_j^S \leq 1, \tilde{\theta}_j^M \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (26)$$

类似地, 系统绩效为 $\tilde{\theta}_o^{new*}$ 时, 买方能够达到的最高绩效 $\tilde{\theta}_o^{M+}$ 和最低绩效 $\tilde{\theta}_o^{M-}$ 为

$$\tilde{\theta}_o^{M+} / \tilde{\theta}_o^{M-} = \max / \min_{\substack{v_{S(z)}, v_{S(z)}, \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon e}} \left\{ \tilde{\theta}_o^M \mid \begin{array}{l} \tilde{\theta}_o^S \cdot \tilde{\theta}_o^M = \tilde{\theta}_o^{new*}, \\ \tilde{\theta}_j^S \leq 1, \tilde{\theta}_j^M \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (27)$$

由此可得系统中卖方的绩效区间 $[\tilde{\theta}_o^{S-}, \tilde{\theta}_o^{S+}]$ 和买

方的绩效区间 $[\hat{\theta}_o^{M-}, \hat{\theta}_o^{M+}]$. 式(26)和式(27)可基于式(25)的二阶锥转化得到求解.

考虑采用 Nash 谈判法分析双方如何在安全库存的保障下, 通过谈判实现供应链绩效的均衡分配. 具体地, 将分析(i)集权供应链绩效的均衡分配方案; (ii)分权供应链绩效的 Nash 谈判解; (iii)该谈判解能否使分权系统达到集权模式下的最优.

Nash 谈判可描述为如下问题^[25]

$$\max_{u \in S, u \geq b} \prod_{i=1}^2 (u_i - b_i) \quad (28)$$

其中 $u = (u_1, u_2)$ 为谈判双方的效用对, 可行集 S 为紧致凸集, 谈判起点 $b = (b_1, b_2)$ 位于可行集内.

供应链成员之间通常存在势力不均等的情形, 因此考虑更为一般化的形式, 即双方的谈判力量非对称的情况. 基于 Harsanyi 和 Selten^[36], 引入谈判力因素 $\lambda_S, \lambda_M (> 0)$. 对于集权系统中的绩效分配, 在系统优化的基础上, 构建绩效分配模型如下

$$\max_{\substack{v_S^S(z), v_S^M(z), \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon e}} \left\{ \begin{array}{l} (\hat{\theta}_o^S - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \times \\ (\hat{\theta}_o^M - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M} \end{array} \left| \begin{array}{l} \hat{\theta}_o^S \geq \underline{\theta}_o^S, \hat{\theta}_o^M \geq \underline{\theta}_o^M, \\ \hat{\theta}_o^S \cdot \hat{\theta}_o^M = \hat{\theta}_o^{new*}, \\ \hat{\theta}_j^S \leq 1, \hat{\theta}_j^M \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \right\} \quad (29)$$

其中 $(\underline{\theta}_o^S, \underline{\theta}_o^M)$ 为双方的谈判起点. 因为 $\hat{\theta}_o^{S-}$ 和 $\hat{\theta}_o^{M-}$ 分别是卖方和买方在系统中达到的最低绩效, 任一方都不愿接受更低的绩效, 所以有 $\underline{\theta}_o^S \geq \hat{\theta}_o^{S-}, \underline{\theta}_o^M \geq \hat{\theta}_o^{M-}$. 由于 $\hat{\theta}_o^{new*}$ 是系统能够达到的最高绩效, 双方选择的谈判起点应满足 $\underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M \leq \hat{\theta}_o^{new*}$. 由此可得 $\underline{\theta}_o^S \in [\hat{\theta}_o^{S-}, \hat{\theta}_o^{S+}], \underline{\theta}_o^M \in [\hat{\theta}_o^{M-}, \hat{\theta}_o^{M+}]$. 记

$$\Gamma_o = \left\{ \begin{array}{l} (\underline{\theta}_o^S, \underline{\theta}_o^M) \left| \begin{array}{l} \underline{\theta}_o^S \in [\hat{\theta}_o^{S-}, \hat{\theta}_o^{S+}], \\ \underline{\theta}_o^M \in [\hat{\theta}_o^{M-}, \hat{\theta}_o^{M+}], \\ \underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M \leq \hat{\theta}_o^{new*} \end{array} \right. \right\}$$

在实践中, 一些突发因素造成的偶然的供应

中断, 不会轻易让上下游企业彻底打破原来的供应链关系去组建新的供应链. 但是, 当断供情形经常发生时, 原来的供应商则极有可能被移出供应链, 下游买方将重新选择上游供应商, 形成新的供应链. 因此, 当买方拥有备选货源的优势时, 上游卖方有动力设置安全库存, 以降低断供的风险. 卖方除了需要承担安全库存的费用外, 还需确保买方的绩效不低于其启用备选货源后的绩效. 由于断链之前买方选择上游卖方作为首选货源, 可认为原有供应链能够正常运营时, 选择上游卖方而非其他备选货源能使买方获得更高的绩效. 因此, 卖方设置的安全库存若能确保买方的绩效不低于其在原有供应链正常运营时的绩效, 则可维持原有的供应链. 据此, 若买方拥有备选货源, 则买方的谈判起点 $\underline{\theta}_o^M$ 应不低于其在 $r = 1$ 时的绩效谈判解. 类似地, 当卖方拥有备选客户的优势时, 为维持原有供应链, 买方除了承担安全库存的费用外, 还需确保卖方的绩效不低于其在原有供应链正常运营时的绩效, 此时卖方的谈判起点 $\underline{\theta}_o^S$ 应不低于其在 $r = 1$ 时的绩效谈判解.

在分权供应链中, 中间产品作为卖方的产出和买方的投入, 导致上下游之间潜在的利益冲突, 一方绩效的提高可能会以另一方绩效的降低为条件. 另一方面, 设置安全库存后, 其维持成本如何分摊也需要通过协商确定, 因此双方之间存在博弈. 考虑分权系统中的 Nash 谈判, 建立如下绩效谈判模型

$$\max_{\substack{v_S^S(z), v_S^M(z), \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon e}} \left\{ \begin{array}{l} (\hat{\theta}_o^S - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \times \\ (\hat{\theta}_o^M - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M} \end{array} \left| \begin{array}{l} \hat{\theta}_o^S \geq \underline{\theta}_o^S, \hat{\theta}_o^M \geq \underline{\theta}_o^M, \\ \hat{\theta}_j^S \leq 1, \hat{\theta}_j^M \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \right\} \quad (30)$$

分权供应链中缺少统一的决策主体对系统进行全局谋划, 因此式(30)中没有 $\hat{\theta}_o^S \cdot \hat{\theta}_o^M = \hat{\theta}_o^{new*}$ 这一约束, 即分权系统中的谈判不以全局绩效的优化为前提.

记式(29)的最优解为 $(\hat{\theta}_o^{S*}, \hat{\theta}_o^{M*})$, 式(30)的最优解为 $(\hat{\theta}_o^{S**}, \hat{\theta}_o^{M**})$, 可得如下结论(定理证明见附录, 下同):

定理 1 若谈判起点 $(\underline{\theta}_o^S, \underline{\theta}_o^M) \in \Gamma_o$ ，则分权供应链通过 Nash 谈判能够达到集权模式下的最优。

定理 1 表明，基于新的绩效测度，分权系统中的双方通过 Nash 谈判不仅可以达成绩效的均衡分配，而且能够实现供应链的全局优化。并且，当 $\lambda_S, \lambda_M > 0$ 时，这一结论不随双方谈判力量的变化而改变，即在不同的谈判力量对比下，分权模式都有机会实现供应链的全局最优。这也意味着，关于安全库存的设置，分权系统中的双方通过协商确定的成本分摊比例符合供应链全局优化的要求。

当双方的谈判起点 $\underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M = \tilde{\theta}_o^{new*}$ 时，集权系统和分权系统的绩效分配结果均为 $(\tilde{\theta}_o^S = \underline{\theta}_o^S, \tilde{\theta}_o^M = \underline{\theta}_o^M)$ 。当双方的谈判起点 $\underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M < \tilde{\theta}_o^{new*}$ 时，令

$$\begin{aligned} \Theta &= \ln((\tilde{\theta}_o^S - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\tilde{\theta}_o^M - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M}) \\ &= \lambda_S \ln(\tilde{\theta}_o^S - \underline{\theta}_o^S) + \lambda_M \ln(\tilde{\theta}_o^M - \underline{\theta}_o^M) \end{aligned} \quad (31)$$

由于函数 $\ln(\cdot)$ 单调递增，当 $(\tilde{\theta}_o^S - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\tilde{\theta}_o^M - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M}$ 取最大值时， Θ 也取到最大值。因此，可将式(29)和式(30)的目标函数替换为 Θ 。

令 $\phi = \frac{1}{(\hat{w}^T z_o + v_M^T x_o^M + w^T(1-\delta)z_o^c)}$ ， $\psi = \frac{1}{(v_{S(z)}^T x_o^{S(z)}(\alpha^*) + v_{S(z)}^T x_o^S + w^T \delta z_o^c)}$ ， $\hat{v}_{S(z)} = \psi v_{S(z)}$ ， $\hat{v}_{S(z)}'' = \psi v_{S(z)}''$ ， $\hat{w} = \psi w$ ， $\hat{v}_M = \psi v_M$ ， $\hat{v}_M = \phi \psi v_M$ ， $\hat{u}_M = \phi \psi u_M$ ，通过两次 Charnes-Cooper 变换，式(30)可转化为

$$\begin{aligned} &\max_{\substack{\hat{v}_{S(z)}, \hat{v}_{S(z)}'', \\ \hat{w}, \hat{v}_M, \hat{u}_M \geq \epsilon \epsilon \\ P_S, P_M \geq 0}} \lambda_S \ln P_S + \lambda_M \ln P_M \\ \text{s. t. } &P_S \leq \hat{w}^T z_o - \underline{\theta}_o^S, P_M \leq \hat{u}_M^T y_o^M - \underline{\theta}_o^M, \\ &\hat{w}^T z_j - \hat{v}_{S(z)}^T x_j^{S(z)}(\alpha^*) - \hat{v}_{S(z)}^T x_j^S - \\ &\hat{w}^T \delta z_j^c \leq 0, j = 1, 2, \dots, n, \\ &\hat{u}_M^T y_j^M - \hat{w}^T \phi z_j - \hat{v}_M^T x_j^M - \hat{w}^T \phi(1-\delta)z_j^c \leq 0, \\ &j = 1, 2, \dots, n, \hat{v}_{S(z)}^T x_o^{S(z)}(\alpha^*) + \\ &\hat{v}_{S(z)}^T x_o^S + \hat{w}^T \delta z_o^c = 1, \hat{w}^T \phi z_o + \hat{v}_M^T x_o^M + \\ &\hat{w}^T \phi(1-\delta)z_o^c = 1 \end{aligned} \quad (32)$$

由 $\lambda_S, \lambda_M > 0$ 可知式(32)的目标是凹函数求最大化，再由其约束条件是带参数 ϕ, δ 的线性约束可知，式(32)是带参数 ϕ, δ 的凸优化问题。对于 ϕ 的取值范围，由于 $\phi < \frac{1}{\hat{w}^T z_o}$ ，为求 $\hat{w}^T z_o$ 的下限，给定 δ 的某个值 $\delta^\circ \in [0, 1]$ ，可通过如下两步确定。先将买方看作单个企业进行绩效评估，即

$$\hat{\theta}_o^{M*} = \max_{w, v_M, u_M \geq \epsilon \epsilon} \{ \hat{\theta}_j^M \mid \hat{\theta}_j^M \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \} \quad (33)$$

在买方的绩效保持 $\hat{\theta}_o^{M*}$ 的条件下，再求卖方能够达到的最高绩效

$$\tilde{\theta}_o^{S*} = \max_{\substack{v_{S(z)}, v_{S(z)}'', \\ w, v_M, u_M \geq \epsilon \epsilon}} \left\{ \tilde{\theta}_o^S \mid \begin{cases} \hat{\theta}_o^M = \hat{\theta}_o^{M*}, \tilde{\theta}_j^S \leq 1, \\ \hat{\theta}_j^M \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \right\} \quad (34)$$

因为 $\phi < \frac{1}{\hat{w}^T z_o}$ ，所以当 $\delta = \delta^\circ$ 时有 $\phi \in (0, \frac{1}{\hat{w}^T z_o})$ 。在 ϕ, δ 的取值范围内作启发式搜索可得 θ_o^{S*}

式(30)的最优解，即分权系统中的绩效谈判结果 $(\tilde{\theta}_o^{S**}, \tilde{\theta}_o^{M**})$ 。类似地，基于式(25)的二阶锥转化可得式(29)的最优解，即集权系统中的绩效分配方案 $(\hat{\theta}_o^{S*}, \hat{\theta}_o^{M*})$ 。由定理 1 可知， $(\hat{\theta}_o^{S*}, \hat{\theta}_o^{M*}) = (\tilde{\theta}_o^{S**}, \tilde{\theta}_o^{M**})$ 。

特别地，当双方的谈判力量势均力敌即 $\lambda_S = \lambda_M$ 时，有：

定理 2 若 $\lambda_S = \lambda_M$ 且谈判起点 $(\underline{\theta}_o^S, \underline{\theta}_o^M) \in \Gamma_o$ ，则两种模式下的最优绩效分配为 $(\sqrt{\underline{\theta}_o^S \tilde{\theta}_o^{new*} / \underline{\theta}_o^M}, \sqrt{\underline{\theta}_o^M \tilde{\theta}_o^{new*} / \underline{\theta}_o^S})$ 。

当双方力量悬殊即一方过强而占据支配地位时，弱的一方将处于从属地位。例如，强势的大型零售商主导其上游的供应商，成为供应链的领导者。令弱的一方谈判力 $\lambda_S = 0$ ，可略去式(30)中关于其谈判起点的约束 $\tilde{\theta}_o^S \geq \underline{\theta}_o^S$ ，式(30)由此可转化为式(33)，即下游买方作为供应链领导者的绩效测度。在买方绩效最大化的基础上，再通过式(34)得到其追随者即上游卖方的绩效。式(33)和式(34)构成了“领导者——追随者”模式^[17]的供应链绩效测度。需要指出的是，在这种

情形下，由于领导者优先考虑自身的绩效，分权系统无法确保实现集权模式下的最优。类似地，当下游买方处于从属地位时，令其谈判力 $\lambda_M = 0$ 并略去其谈判起点约束 $\hat{\theta}_o^M \geq \theta_o^M$ ，式(30)可转化成卖方作为供应链领导者的绩效测度

$$\hat{\theta}_o^{S*} = \max_{v_S(z), v_S(z), w \geq \varepsilon e} \{ \hat{\theta}_j^S \mid \hat{\theta}_j^S \leq 1, j=1,2,\dots,n \} \quad (35)$$

在卖方绩效最大化的基础上，可进一步得出买方绩效

$$\tilde{\theta}_o^M = \max_{v_S(z), v_S(z), w, v_M, \mu_M \geq \varepsilon e} \left\{ \tilde{\theta}_o^M \mid \begin{cases} \hat{\theta}_o^S = \hat{\theta}_o^{S*}, \hat{\theta}_j^S \leq 1, \\ \tilde{\theta}_j^M \leq 1, j=1,2,\dots,n \end{cases} \right\} \quad (36)$$

关于安全库存维持成本的分摊，除了通过上述优化问题得到最优分摊比例外，在某些情况下也存在特定的安排。例如，若买方拥有备选货源的优势，则卖方为避免断链带来的亏损将考虑由其设置安全库存即 $\delta = 1$ 。在这种情况下，卖方尽管因承担安全库存的维持成本而在一定程度上影响其自身的绩效，但可以确保继续向下游买方供货。事实上，若卖方设置安全库存能够改进买方的绩效，则可有效保障下游客户的稳定。在下一节算例分析中将进一步探讨这种可能性。相反地，当买方没有备选货源而卖方拥有替代客户时，买方将考虑由其设置安全库存即 $\delta = 0$ 以避免断供。此时，买方的绩效尽管也会受到影响，但可以保障来自上游的供货。

本文讨论的绩效测度是基于观测数据的评估，对于生产能力和存货能力等因素，其观测数据反映的情况应在企业的最大能力范围之内。可

将这些因素作为产出变量，其对企业 and 供应链整体绩效的影响能在给定的测度中得以体现。从绩效的角度，生产能力是其中的一个方面，但还需考虑投入的情况，以及两者之间的关系。仅凭生产能力的大小不足以判断绩效水平的高低。然而，从改进的角度，可将生产能力和存货能力等因素纳入生产可能集的分析。通过与生产前沿面上的标杆比较，可在生产可能集内衡量这些能力的提升空间，及其对于改善供应链绩效的作用。

3 算例分析

本节将通过算例对供应链的绩效评估进行数值分析。该算例涉及 10 条供应链，包括上游的三项投入、两项中间产品以及下游的三项产出。相关数据(见表 2)曾应用于 Seiford 和 Zhu^[16] 等研究。

表 3 给出了采用不同测度评估供应链绩效的结果。可以看到，在正常运营和断链两种情形下，黑箱模型给出了完全一致的结果，表明其对于断链情形的不适用性。关于加法模型，参考了 Chen 等^[18] 的加权算术平均。结果显示，供应链正常运营时的绩效高于断链时的绩效。但是，由于后者在区间 (0, 1) 内，无法据此判断是断链还是一定程度的绩效衰退。本文提出的测度基于乘法模型，结果显示断链时所有供应链的绩效均为零。相比于前两种测度，新的测度能够直观地反映断链的情况。

表 2 算例数据

Table 2 Data of the illustrative example

供应链	x_{1j}^S	x_{2j}^S	x_{3j}^S	z_{1j}	z_{2j}	y_{1j}^M	y_{2j}^M	y_{3j}^M
A	13 231	33 874	2 725	3 328.3	568.1	8 304	4.19	54.3
B	95 288	232 446	20 222	20 386	2 664	27 148.6	6.49	69.4
C	35 328	122 002	8 450	10 681	1 150	12 351.1	3.45	50
D	14 000	104 000	5 000	8 600	215	5 252.4	2.03	28.3
E	33 365	121 173	9 134	11 336	1 165	12 616.4	5.76	82.4
F	30 800	84 432.2	6 364.8	7 919.4	610	10 428.7	1.57	31.8
G	28 905	66 339.1	5 152.5	6 054	825	86 71.2	3.45	51.6
H	46 900	90 454	8 197.5	8 970.9	1 277.9	14 807.4	2.91	54.9
I	45 404	72 134.4	5 312.1	7 582.3	956	12 268.6	2.76	45.5
J	20 767	36 199	2 921	3 449.9	465.1	4 912.2	3.03	33.9

表 3 不同绩效测度的评估结果比较

Table 3 Comparisons of the evaluation results of different performance measures

供应链	θ_o^*		θ_o^{add*}		θ_o^{neu*}	
	正常	断链	正常	断链	正常	断链
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.584 5	1.000 0	0.000 0
B	0.476 4	0.476 4	0.721 2	0.278 2	0.476 4	0.000 0
C	0.557 0	0.557 0	0.766 2	0.306 1	0.557 0	0.000 0
D	0.597 8	0.597 8	0.798 9	0.372 0	0.597 8	0.000 0
E	0.602 5	0.602 5	0.799 1	0.325 6	0.602 5	0.000 0
F	0.539 5	0.539 5	0.753 6	0.350 4	0.539 5	0.000 0
G	0.552 3	0.552 3	0.758 6	0.307 6	0.552 3	0.000 0
H	0.667 8	0.667 8	0.831 2	0.357 9	0.667 8	0.000 0
I	0.757 9	0.757 9	0.878 9	0.397 7	0.757 9	0.000 0
J	0.676 7	0.676 7	0.831 5	0.381 0	0.676 7	0.000 0

表 4 给出了正常运营时集权系统的绩效以及上下游的绩效分配结果。可以看到，仅有供应链 A 的评估结果为有效（绩效值为 1）。对于其他 9 条供应链，为识别非有效的环节，可用式 (26) 和式 (27) 检验上下游的绩效在集权模式下达到的最高和最低水平。从结果来

看，这 9 条供应链的上下游基本上都存在不同程度的非有效。对于供应链 D 和供应链 I 的上游，以及供应链 F 的下游，尽管其可达的最高绩效为 1，但最低绩效却小于 1。可达的最高绩效与最低绩效不等，意味着存在多种绩效分配方案。

表 4 正常运营时集权系统的绩效分配结果

Table 4 Performance distribution results of the centralized system during normal operations

供应链	集权最优	上游		下游		均衡分配	
		最高	最低	最高	最低	上游	下游
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	0.476 4	0.840 4	0.712 5	0.668 6	0.566 9	0.773 8	0.615 7
C	0.557 0	0.894 9	0.820 0	0.679 3	0.622 5	0.856 6	0.650 3
D	0.597 8	1.000 0	0.648 4	0.921 9	0.597 8	0.805 2	0.742 4
E	0.602 5	0.978 8	0.888 2	0.678 4	0.615 5	0.932 4	0.646 2
F	0.539 5	0.634 1	0.539 5	1.000 0	0.850 8	0.584 9	0.922 4
G	0.552 3	0.854 9	0.795 1	0.694 6	0.646 0	0.824 4	0.669 9
H	0.667 8	0.967 7	0.865 7	0.771 4	0.690 1	0.915 3	0.729 6
I	0.757 9	1.000 0	0.905 8	0.836 7	0.757 9	0.951 8	0.796 3
J	0.676 7	0.919 1	0.775 9	0.872 1	0.736 3	0.844 5	0.801 3

将 Nash 谈判引入供应链的绩效分配, 假设双方的谈判力量对称. 由于上下游的谈判起点不会低于其在系统中各自能够达到的最低绩效, 不妨以双方的最低绩效为谈判起点, 得到集权模式下的均衡绩效分配. 结果显示, 除供应链 F 外, 其他供应链的上游绩效分配均高于下游, 这与上游的可达绩效区间普遍高于下游有关. 对于供应链 D、供应链 F 和供应链 I, 尽管其上游或下游的最高绩效达到有效, 但均衡分配结果表明, 相应的环节同样呈现一定程度的非有效.

对于正常运营时分权模式下的绩效分配, 表 5 给出了双方的 Nash 谈判解. 分权模式下的谈判结果与集权模式下的分配结果一致, 表明在正常

运营的情况下, 分权供应链通过 Nash 谈判能够实现全局优化.

若考虑“领导者—追随者”模式, 相应的绩效分配结果见表 5. 当领导者达到最优绩效时, 追随者只能取得次优的结果. 将其与 Nash 谈判结果比较可知, 该模式下各条供应链的系统绩效都不高于谈判解的系统绩效. 具体地, 上游为领导者时供应链 B、供应链 C、供应链 E、供应链 F、供应链 G、供应链 H、供应链 J 的系统绩效, 以及下游为领导者时供应链 D、供应链 E、供应链 G 的系统绩效, 都低于谈判解的系统绩效. 可见, 当某一成员企业占据支配地位时, 不能确保供应链达到系统最优.

表 5 正常运营时分权系统的绩效分配比较

Table 5 Comparisons of the performance distributions of the decentralized system during normal operations

供应链	分权谈判解			上游为领导者			下游为领导者		
	上游	下游	系统	上游	下游	系统	上游	下游	系统
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	0.773 8	0.615 7	0.476 4	0.887 6	0.533 8	0.473 8	0.712 5	0.668 6	0.476 4
C	0.856 6	0.650 3	0.557 0	0.945 8	0.465 4	0.440 2	0.820 0	0.679 3	0.557 0
D	0.805 2	0.742 4	0.597 8	1.000 0	0.597 8	0.597 8	0.592 3	1.000 0	0.592 3
E	0.932 4	0.646 2	0.602 5	1.000 0	0.536 3	0.536 3	0.848 0	0.709 6	0.601 8
F	0.584 9	0.922 4	0.539 5	0.971 5	0.527 8	0.512 8	0.539 5	1.000 0	0.539 5
G	0.824 4	0.669 9	0.552 3	0.919 0	0.574 1	0.527 6	0.789 9	0.695 9	0.549 6
H	0.915 3	0.729 6	0.667 8	0.973 0	0.661 6	0.643 7	0.865 7	0.771 4	0.667 8
I	0.951 8	0.796 3	0.757 9	1.000 0	0.757 9	0.757 9	0.905 8	0.836 7	0.757 9
J	0.844 5	0.801 3	0.676 7	0.920 7	0.697 7	0.642 3	0.775 9	0.872 1	0.676 7

对于存在的断链风险, 考虑下游有备选货源的情形. 上游为避免绩效归零而设置安全库存, 并承担了其维持成本 ($\delta = 1$). 设安全库存的维持成本系数 $c = 0.1$, 表 6 ~ 表 8 给出了不同 r 水平下上下游的 Nash 谈判解和系统绩效. 从系统绩效来看, 供应链 A 在不同的 r 水平下均保持有效, 而其余 9 条供应链则存在不同程度的非有效. 从上下游的绩效博弈来看, 分权模式下的谈判解与集权模式下的分配结果相同, 表明在上游设置安全库存的情况下, 分权供应链通过 Nash 谈判可以实现全局优化.

对不同 r 水平下的结果进行比较, 图 2 ~ 图 4

分别给出了供应链的系统绩效, 以及上游和下游的绩效分配情况. 图 2 显示, 各条供应链的系统绩效随 r 的改变没有呈现出显著变化, 表明安全库存的设置没有降低供应链的系统绩效. 这反映出安全库存的设置没有扩大其余 9 条供应链与有效供应链 A 的相对绩效差距, 因此通过建立安全库存应对系统的断链风险是可行的.

图 3 显示, 在安全库存保障下, 上游在供应链非正常运营 ($r < 1$) 时相比于正常运营 ($r = 1$) 有一定程度的绩效下降, 这主要归因于上游承担了安全库存的维持成本. 图 4 表明, 下游在供应链非正常运营时相比于正常运营有一定程度的绩

效提升. 其原因在于, 供应链的系统绩效没有受到明显影响, 但上游因设置安全库存绩效受损, 而下游在安全库存方面没有承担成本, 因此下游绩效得到了相对改进.

上述结果表明, 上游通过建立安全库存抵御风险, 虽然影响到自身的绩效水平, 但避免了绩

效归零. 上游的努力不仅保障了对下游的供货, 而且使下游的绩效得以提高. 在这种情形下, 由于受到绩效改进的激励, 即使存在断链的风险, 下游也不会优先考虑启用备选货源, 而是与设置安全库存的上游保持合作, 上游因此可以确保下游需求的稳定性.

表 6 不同 r 水平下的上下游绩效 Nash 谈判解与系统绩效 ($r = 0, 0.1, 0.2, 0.3$)

Table 6 Nash bargaining solutions for the upstream and downstream performances and the system performance at different r levels ($r = 0, 0.1, 0.2, 0.3$)

供应链	$r = 0$			$r = 0.1$			$r = 0.2$			$r = 0.3$		
	上游	下游	系统	上游	下游	系统	上游	下游	系统	上游	下游	系统
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	0.733 6	0.668 6	0.490 5	0.731 5	0.668 6	0.489 1	0.729 3	0.668 6	0.487 6	0.727 2	0.668 6	0.486 2
C	0.835 1	0.679 3	0.567 3	0.833 5	0.679 3	0.566 2	0.832 0	0.679 3	0.565 2	0.830 5	0.679 3	0.564 2
D	0.672 0	0.921 9	0.619 6	0.669 6	0.921 9	0.617 3	0.667 1	0.921 9	0.615 1	0.664 7	0.921 9	0.612 9
E	0.861 1	0.709 6	0.611 1	0.859 8	0.709 6	0.610 1	0.858 4	0.709 6	0.609 2	0.857 1	0.709 6	0.608 2
F	0.565 5	1.000 0	0.565 5	0.562 8	1.000 0	0.562 8	0.560 1	1.000 0	0.560 1	0.557 5	1.000 0	0.557 5
G	0.811 7	0.694 6	0.563 8	0.810 0	0.694 6	0.562 6	0.808 3	0.694 6	0.561 5	0.806 7	0.694 6	0.560 3
H	0.877 5	0.771 4	0.676 9	0.876 3	0.771 4	0.675 9	0.875 1	0.771 4	0.675 0	0.873 9	0.771 4	0.674 1
I	0.914 4	0.836 7	0.765 1	0.913 6	0.836 7	0.764 4	0.912 7	0.836 7	0.763 6	0.911 8	0.836 7	0.762 9
J	0.793 7	0.872 1	0.692 2	0.791 9	0.872 1	0.690 6	0.790 1	0.872 1	0.689 1	0.788 3	0.872 1	0.687 5

表 7 不同 r 水平下的上下游绩效 Nash 谈判解与系统绩效 ($r = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$)

Table 7 Nash bargaining solutions for the upstream and downstream performances and the system performance at different r levels ($r = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$)

供应链	$r = 0.4$			$r = 0.5$			$r = 0.6$			$r = 0.7$		
	上游	下游	系统									
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	0.725 1	0.668 6	0.484 8	0.722 9	0.668 6	0.483 4	0.720 8	0.668 6	0.482 0	0.718 7	0.668 6	0.480 6
C	0.829 0	0.679 3	0.563 1	0.827 5	0.679 3	0.562 1	0.826 0	0.679 3	0.561 1	0.824 5	0.679 3	0.560 1
D	0.662 4	0.921 9	0.610 7	0.660 0	0.921 9	0.608 5	0.657 6	0.921 9	0.606 3	0.655 3	0.921 9	0.604 1
E	0.855 8	0.709 6	0.607 3	0.854 5	0.709 6	0.606 4	0.878 1	0.689 5	0.605 5	0.877 0	0.689 5	0.604 7
F	0.554 8	1.000 0	0.554 8	0.552 2	1.000 0	0.552 2	0.549 6	1.000 0	0.549 6	0.547 0	1.000 0	0.547 0
G	0.805 0	0.694 6	0.559 1	0.803 3	0.694 6	0.558 0	0.801 7	0.694 6	0.556 8	0.800 0	0.694 6	0.555 7
H	0.872 7	0.771 4	0.673 2	0.871 5	0.771 4	0.672 3	0.870 4	0.771 4	0.671 4	0.869 2	0.771 4	0.670 5
I	0.911 0	0.836 7	0.762 2	0.910 1	0.836 7	0.761 5	0.909 3	0.836 7	0.760 8	0.908 4	0.836 7	0.760 0
J	0.786 5	0.872 1	0.685 9	0.784 7	0.872 1	0.684 4	0.782 9	0.872 1	0.682 8	0.781 2	0.872 1	0.681 3

表8 不同 r 水平下的上下游绩效 Nash 谈判解与系统绩效 ($r = 0.8, 0.9, 1.0$)

Table 8 Nash bargaining solutions for the upstream and downstream performances and the system performance at different r levels ($r = 0.8, 0.9, 1.0$)

供应链	$r = 0.8$			$r = 0.9$			$r = 1.0$		
	上游	下游	系统	上游	下游	系统	上游	下游	系统
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	0.716 7	0.668 6	0.479 2	0.714 6	0.668 6	0.477 8	0.773 8	0.615 7	0.476 4
C	0.823 0	0.679 3	0.559 1	0.821 5	0.679 3	0.558 1	0.856 6	0.650 3	0.557 0
D	0.653 0	0.921 9	0.602 0	0.650 7	0.921 9	0.599 9	0.805 2	0.742 4	0.597 8
E	0.875 9	0.689 5	0.604 0	0.874 8	0.689 5	0.603 2	0.932 4	0.646 2	0.602 5
F	0.544 5	1.000 0	0.544 5	0.542 0	1.000 0	0.542 0	0.584 9	0.922 4	0.539 5
G	0.798 4	0.694 6	0.554 5	0.796 7	0.694 6	0.553 4	0.824 4	0.669 9	0.552 3
H	0.868 0	0.771 4	0.669 6	0.866 8	0.771 4	0.668 7	0.915 3	0.729 6	0.667 8
I	0.907 5	0.836 7	0.759 3	0.906 7	0.836 7	0.758 6	0.951 8	0.796 3	0.757 9
J	0.779 4	0.872 1	0.679 8	0.777 7	0.872 1	0.678 2	0.844 5	0.801 3	0.676 7

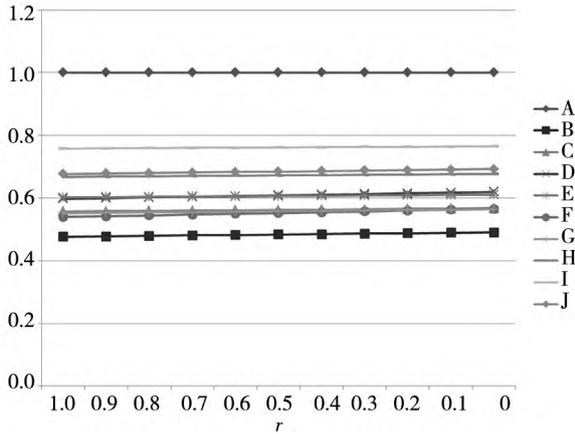


图2 不同 r 水平下的供应链系统绩效

Fig. 2 System performances of supply chains at different r levels

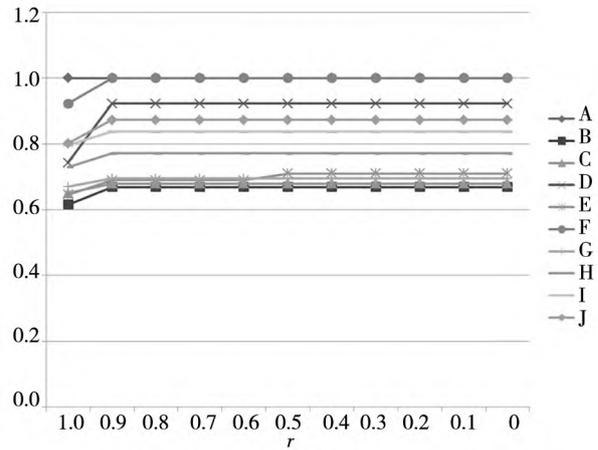


图4 不同 r 水平下的供应链下游绩效 Nash 谈判解

Fig. 4 Nash bargaining solutions for the downstream performances of supply chains at different r levels

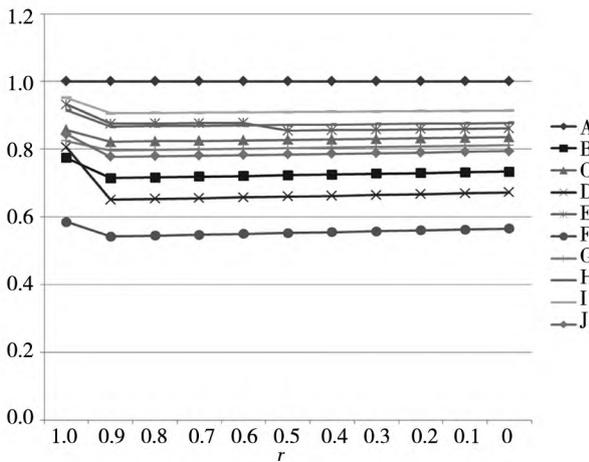


图3 不同 r 水平下的供应链上游绩效 Nash 谈判解

Fig. 3 Nash bargaining solutions for the upstream performances of supply chains at different r levels

4 结束语

供应链的运营受到内外部各种因素的共同影响,任何环节出现问题都将对整体造成损失.面对断链风险,必须及时发现风险环节,准确掌握供应链的全局绩效.面向供应链的绩效测度方法众多,但鲜有考虑其断链风险.本文针对一般化结构的两级供应链提出了新的绩效测度.该测度区分了中间产品和外向产出对上游绩效的影响,对供应链绩效的刻画更为合理,能够准确识别断链的情形.基于新的测度,进一步研究了安全库存保障下的供应链绩效评估与分配问题,指出分

权系统通过 Nash 谈判能够实现全局最优. 相关结论通过算例分析得到了验证. 算例结果表明, 安全库存的建立不仅帮助上游企业规避断链风险, 而且可以改善下游绩效以提高客户的稳定性.

精益化经营理念深刻影响了众多供应链的设计, 准时制(just-in-time)生产方式更是致力于实现零库存. 然而, 过于追求精益却使供应链在遇到“黑天鹅事件”时更易遭受冲击. 出于低成本目的而激进削减库存的惯常做法, 在风险来袭时往往令决策者措手不及. 因此, 在快速变化与动荡中的供应链, 需要重新审视以往被视为冗余的各种因素, 在战略上更加重视弹性与柔性, 针对不同的情况和产品, 灵活推行准事制(just-in-case)生产方式^[37], 从而在收益与风险之间取得平衡.

断链风险促使企业愈加重视供应链生态, 尤其是通过掌握供应链结构了解多级供应商和客户

的相关信息, 实现供应链可视化. 数字智能技术在运营领域的应用, 有效提升了供应链的可视化与柔性化能力^[38, 39], 也为企业间的交流与创新提供了有力支撑^[40]. 供应链弹性也要求企业开发更多的备选供应商, 积极构建安全可控的供应网络^[41]. 以图 1 所示的结构为基础, 可以衍生出不同的供应链结构, 以及更为复杂的网络结构^[42]. 考虑断链风险的研究可进一步拓展到多级和网络结构的供应链. 对于面向复杂结构的供应链绩效测度, 以及位于不同节点的成员企业之间的绩效博弈, 需要延伸探讨. 当下游存在多个需求方时, 上游企业如何区分不同流向的中间产品对其绩效的贡献, 值得关注. 此外, 本文未考虑生产的周期性和浮动性等因素的影响, 对于如何更好地管理安全库存并提升供应链绩效, 有待进一步深入.

参 考 文 献:

- [1] 曹策俊, 李从东, 屈挺, 等. 救援物资跨区域调度双层规划模型——考虑幸存者感知满意度和风险可接受度[J]. 管理科学学报, 2019, 22(9): 113-128.
Cao Cejun, Li Congdong, Qu Ting, et al. A bi-level programming model for relief trans-regional scheduling: Taking into consideration survivors' perceived satisfaction and risk acceptability[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(9): 113-128. (in Chinese)
- [2] 张梦玲, 王晶, 黄钧, 等. 基于手机定位数据的突发事件下道路修复和物资配送集成优化研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(3): 133-142.
Zhang Mengling, Wang Jing, Huang Jun, et al. Research on the integrated optimization of road repair and relief distribution based on mobile phone location data[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(3): 133-142. (in Chinese)
- [3] 刘景卿, 车维汉, 夏方杰. 全球价值链贸易网络分析与国际风险传导应对[J]. 管理科学学报, 2021, 24(3): 1-17.
Liu Jingqing, Che Weihang, Xia Fangjie. Network analysis of global value chain and coping with international risk transmission[J]. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(3): 1-17. (in Chinese)
- [4] 黄河, 曾能民, 徐鸿雁. 独占、授权还是共享?——存在随机产出风险的高技术企业专利运作战略研究[J]. 管理科学学报, 2020, 23(6): 1-17.
Huang He, Zeng Nengmin, Xu Hongyan. Monopoly, licensing or sharing: Patent operation strategy for high-tech firms with random yield[J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(6): 1-17. (in Chinese)
- [5] 陈金晓, 陈剑. 从优化到重塑——大变局中的供应链高质量发展[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(3): 545-558.
Chen Jinxiao, Chen Jian. From optimization to reinvention: High-quality development of supply chains in great changes[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2022, 42(3): 545-558. (in Chinese)
- [6] 陈剑, 肖勇波, 朱斌. 大数据视角下的采购风险评估——基于某服务采购企业的案例分析[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(3): 596-612.
Chen Jian, Xiao Yongbo, Zhu Bin. Procurement risk evaluation from a big-data perspective: A case study of a procurement service company[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2021, 41(3): 596-612. (in Chinese)
- [7] Adamopoulos P, Todri V, Ghose A. Demand effects of the internet-of-things sales channel: Evidence from automating the purchase process[J]. Information Systems Research, 2021, 32(1): 238-267.

- [8]陈 剑, 黄 朔, 刘运辉. 从赋能到使能——数字化环境下的企业运营管理[J]. 管理世界, 2020, (2): 117 – 128.
Chen Jian, Huang Shuo, Liu Yunhui. Operations management in the digitization era: From empowering to enabling[J].
Management World, 2020, (2): 117 – 128. (in Chinese)
- [9]Euler Hermes. Global supply chain survey: In search of post-COVID-19 resilience[EB/OL]. https://www.eulerhermes.com/en_global/news-insights/economic-insights/Global-Supply-Chain-Survey-In-search-of-post-Covid-19-resilience.html, 2020.
- [10]Choi T Y, Rogers D, Vakil B. Coronavirus is a wake-up call for supply chain management[J/OL]. Harvard Business Review, 2020, March 27.
- [11]吴 军, 李 健, 汪寿阳. 供应链风险管理中的几个重要问题[J]. 管理科学学报, 2006, 9(6): 1 – 12.
Wu Jun, Li Jian, Wang Shouyang. Some key problems in supply chain risk management[J]. Journal of Management Sciences in China, 2006, 9(6): 1 – 12. (in Chinese)
- [12]Huan S H, Sheoran S K, Wang G. A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model[J]. Supply Chain Management: An International Journal, 2004, (9): 23 – 29.
- [13]Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429 – 444.
- [14]Wong W P, Wong K Y. A review on benchmarking of supply chain performance measures[J]. Benchmarking: An International Journal, 2008, 15(1): 25 – 51.
- [15]Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Evaluating program and managerial efficiency: An application of data envelopment analysis to program follow through[J]. Management Science, 1981, 27(6): 668 – 697.
- [16]Seiford L M, Zhu J. Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks[J]. Management Science, 1999, 45(9): 1270 – 1288.
- [17]Liang L, Yang F, Cook W D, et al. DEA models for supply chain efficiency evaluation[J]. Annals of Operations Research, 2006, (145): 35 – 49.
- [18]Chen Y, Cook W D, Li N, et al. Additive efficiency decomposition in two-stage DEA[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(3): 1170 – 1176.
- [19]Liang L, Cook W D, Zhu J. DEA models for two-stage processes: Game approach and efficiency decomposition[J]. Naval Research Logistics, 2008, 55(7): 643 – 653.
- [20]Chen K, Zhu J. Second order cone programming approach to two-stage network data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(1): 231 – 238.
- [21]Guo C, Wei F, Chen Y. A note on second order cone programming approach to two-stage network data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2017, (263): 733 – 735.
- [22]Graves S C, Willems S P. Supply chain design: Safety stock placement and supply chain configuration[J]. Handbooks in Operations Research and Management Science, 2003, (11): 95 – 132.
- [23]Du J, Liang L, Chen Y, et al. A bargaining game model for measuring performance of two-stage network structures[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 210(2): 390 – 397.
- [24]Zhou Z, Sun L, Yang W, et al. A bargaining game model for efficiency decomposition in the centralized model of two-stage systems[J]. Computers and Industrial Engineering, 2013, 64(1): 103 – 108.
- [25]Nash J F. Two-person cooperative games[J]. Econometrica, 1953, 21(1): 128 – 140.
- [26]Cook W D, Zhu J. Multiple variable proportionality in data envelopment analysis[J]. Operations Research, 2011, 59(4): 1024 – 1032.
- [27]Charnes A, Cooper W W. Programming with linear fractional functionals[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1962, 9(3 – 4): 181 – 186.
- [28]Lobo M S, Vandenberghe L, Boyd S, et al. Applications of second-order cone programming[J]. Linear Algebra and its Applications, 1998, 284(1 – 3): 193 – 228.
- [29]陈 剑. 低碳供应链管理研究[J]. 系统管理学报, 2012, 21(6): 721 – 728, 735.
Chen Jian. Study on supply chain management in a low-carbon era[J]. Journal of Systems & Management, 2012, 21(6): 721 – 728, 735. (in Chinese)
- [30]Lovejoy W S. Bargaining chains[J]. Management Science, 2010, 56(12): 2282 – 2301.
- [31]Li S, Hua Z. A note on channel performance under consignment contract with revenue sharing[J]. European Journal of Operational Research, 2008, (184): 793 – 796.

- [32] 杜少甫, 朱贾昂, 高冬, 等. Nash 讨价还价公平参考下的供应链优化决策[J]. 管理科学学报, 2013, 16(3): 68–72, 81.
Du Shaofu, Zhu Jiaang, Gao Dong, et al. Optimal decision-making for Nash bargaining fairness concerned newsvendor in two-level supply chain[J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(3): 68–72, 81. (in Chinese)
- [33] 安庆贤, 陈晓红, 余亚飞, 等. 基于 DEA 的两阶段系统中间产品公平设定研究[J]. 管理科学学报, 2017, 20(1): 32–40.
An Qingxian, Chen Xiaohong, Yu Yafei, et al. Fair setting for intermediate products in two-stage system based on DEA [J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(1): 32–40. (in Chinese)
- [34] 林强, 叶飞. “公司+农户”型订单农业供应链的 Nash 协商模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(7): 1769–1778.
Lin Qiang, Ye Fei. Coordination for “company + farmer” contract-farming supply chain under Nash negotiation model [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2014, 34(7): 1769–1778. (in Chinese)
- [35] Dong Y, Xu K. A supply chain model of vendor managed inventory[J]. Transportation Research Part E, 2002, 38(2): 75–95.
- [36] Harsanyi J C, Selten R. A generalized Nash solution for two-person bargaining games with incomplete information[J]. Management Science, 1972, 18(5): 80–106.
- [37] Martha J, Subbarkrishna S. Targeting a just-in-case supply chain for the inevitable next disaster[J]. Supply Chain Management Review, 2002, 6(5): 18–23.
- [38] Olsen T L, Tomlin B. Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(1): 113–122.
- [39] Babich V, Hilary G. Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(2): 223–240.
- [40] Foerderer J. Interfirm exchange and innovation in platform ecosystems: Evidence from Apple’s worldwide developers conference[J]. Management Science, 2020, 66(10): 4772–4787.
- [41] Cohen M A, Lee H L. Designing the right global supply chain network[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(1): 15–24.
- [42] Wang J, Wu X, Krishnan V. Decision structure and performance of networked technology supply chains[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2018, 20(2): 199–216.

Supply chain performance measurement and Nash bargaining considering the risk of chain break

CHEN Jin-xiao¹, CHEN Jian²

1. Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China;
2. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Any local change in supply chains will affect the overall performance. An accurate performance evaluation of the system is the basis to deal with the risk of chain break and improve its stability. The paper, through a review of three types of common performance measures, points out that the existing measures are not suitable for supply chains with the risk of chain break. Distinguishing the impacts of intermediate products and export-oriented outputs on the upstream performance, a new performance measure for supply chains is proposed and its effectiveness in identifying broken chains is demonstrated. Based on the new measure, the distribution of supply chain performance is further discussed. By establishing safety stocks in response to the risk of chain break, how the upstream and downstream realize benefit sharing is investigated. Nash bargaining method is employed to analyze the performance decomposition in the centralized system and the performance negotiation in the decentralized system. It is shown that the decentralized supply chain can achieve the centralized op-

tinality through Nash bargaining. An illustrative example further verifies the relevant conclusions. The results show that the setting of safety stocks can prevent the upstream performance from declining to zero due to chain break, and that it can also improve the downstream performance so as to enhance the stability of demands.

Key words: supply chain; chain break; performance; measurement; Nash bargaining

附录:

定理 1 证明 需要证明当 $(\underline{\theta}_o^S, \underline{\theta}_o^M) \in \Gamma_o$ 时, 式(30)与式(29)等价. 比较两式可知, 式(30)的可行域包含式(29)的可行域, 因此式(29)的任一可行解都是式(30)的可行解, 于是有 $(\hat{\theta}_o^{S*} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\hat{\theta}_o^{M*} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M} \leq (\hat{\theta}_o^{S**} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\hat{\theta}_o^{M**} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M}$. 由于 $\hat{\theta}_o^{new*}$ 是供应链系统能够达到的最高绩效, 故而在分权模式下有 $\hat{\theta}_o^{S**} \cdot \hat{\theta}_o^{M**} \leq \hat{\theta}_o^{new*} = \hat{\theta}_o^{S*} \cdot \hat{\theta}_o^{M*}$; 又因为 $\hat{\theta}_o^{M**} \geq \underline{\theta}_o^M \geq \hat{\theta}_o^{M-}$, 所以 $\hat{\theta}_o^{S-} \leq \underline{\theta}_o^S \leq \hat{\theta}_o^{S**} \leq \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^M} \leq \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^{M-}} = \hat{\theta}_o^{S+}$. 基于式(25), 式(29)因约束 $\hat{\theta}_o^S \cdot \hat{\theta}_o^M = \hat{\theta}_o^{new*}$ 而有 $\delta = \delta^*$, 因此式(29)的可行域经二阶锥转化后是由线性约束和二阶锥约束构成的凸集; 并且由于 $\underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M \leq \hat{\theta}_o^{new*}$, 所以式(29)存在可行解 $(\hat{\theta}_o^{S**}, \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^{S**}})$. 又因为 $(\hat{\theta}_o^{S*}, \hat{\theta}_o^{M*})$ 是式(29)的最优解, 由此可得 $(\hat{\theta}_o^{S*} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\hat{\theta}_o^{M*} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M} \geq (\hat{\theta}_o^{S**} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^{S**}} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M} \geq (\hat{\theta}_o^{S**} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\hat{\theta}_o^{M**} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M}$. 于是有 $(\hat{\theta}_o^{S*} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\hat{\theta}_o^{M*} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M} = (\hat{\theta}_o^{S**} - \underline{\theta}_o^S)^{\lambda_S} \cdot (\hat{\theta}_o^{M**} - \underline{\theta}_o^M)^{\lambda_M}$, 表明式(29)与式(30)的最优解相同. 证毕.

定理 2 证明 由定理 1 的证明可知, 式(29)的可行域经二阶锥转化是凸集. 当 $\lambda_S = \lambda_M$ 时, 根据 Nash 谈判定理, 谈判问题存在最优解. 因为 $\underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M \leq \hat{\theta}_o^{new*}$, 所以对于任一 $\hat{\theta}_o^S \in [\underline{\theta}_o^S, \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^M}]$, 存在式(29)的可行解 $(\hat{\theta}_o^S, \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^S})$. 由于 $\lambda_S = \lambda_M$, 且 $\hat{\theta}_o^S \cdot \hat{\theta}_o^M = \hat{\theta}_o^{new*}$, 式(29)的目标函数可表示为 $\hat{\theta}_o^{new*} - \hat{\theta}_o^S \underline{\theta}_o^M - \frac{\hat{\theta}_o^S \hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^S} + \hat{\theta}_o^S \underline{\theta}_o^M$. 当 $\hat{\theta}_o^S = \sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^S \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^M}}$ 时, 目标函数取得最大值 $(\sqrt{\hat{\theta}_o^{new*}} - \sqrt{\underline{\theta}_o^S \underline{\theta}_o^M})^2$, 并有 $\hat{\theta}_o^M = \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\hat{\theta}_o^S} = \sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^M \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^S}}$. 因为 $\underline{\theta}_o^S \in [\hat{\theta}_o^{S-}, \hat{\theta}_o^{S+}]$, $\underline{\theta}_o^M \in [\hat{\theta}_o^{M-}, \hat{\theta}_o^{M+}]$, 所以 $\frac{\hat{\theta}_o^S}{\underline{\theta}_o^M} \in [\frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{(\hat{\theta}_o^{M+})^2}, \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{(\hat{\theta}_o^{M-})^2}]$, 于是有 $\hat{\theta}_o^{S-} \leq \sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^S \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^M}} \leq \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^M} \leq \hat{\theta}_o^{S+} \leq 1$, $\hat{\theta}_o^{M-} \leq \sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^M \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^S}} \leq \frac{\hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^S} \leq \hat{\theta}_o^{M+} \leq 1$. 因为 $\underline{\theta}_o^S \cdot \underline{\theta}_o^M \leq \hat{\theta}_o^{new*}$, 所以 $\sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^S \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^M}} \geq \underline{\theta}_o^S$, $\sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^M \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^S}} \geq \underline{\theta}_o^M$. 由此可得, 式(29)的最优解为 $\hat{\theta}_o^{S*} = \sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^S \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^M}}$, $\hat{\theta}_o^{M*} = \sqrt{\frac{\hat{\theta}_o^M \hat{\theta}_o^{new*}}{\underline{\theta}_o^S}}$. 由定理 1 知, 式(30)的最优解与之相同. 证毕.