

供需链协同的定量评价

崔琳琳 柴跃廷 秦志宇

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘要: 供需链协同是供需链系统在某种契约或合作机制下, 在各成员企业个体利益满意的前提下达到整体利益最大化的状态。供需链系统并不是在任意合作机制下都可以达到协同状态。为了评价供需链系统的协同程度, 本文引入供需链协同度的概念及其计算方法, 并通过理论分析和数值仿真结果验证了其有效性。供需链协同度指标不仅反映供需链系统运作的资源利用率, 同时为改进契约设计, 提高供需链系统的协同性能指明了方向。

关键字: 供需链协同; 性能评价; 博弈论; 离散事件仿真

Quantitative Evaluation of the Supply Chain Collaboration

Linlin Cui, Yueting Chai, Zhiyu Qin

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084.)

Abstract: Supply Chain Collaboration (SCC) is defined as a status of optimized overall utility of the supply chain under the precondition of satisfactions of each supply chain member. The achievement of SCC is relative to the cooperation mechanisms or contracts among members. To evaluate the degree of SCC in different contracts, a quantitative index of Collaboration Percent (CP) is defined, which can be used to evaluate the efficiency of the supply chain resources usage and direct the design and improvement of the contracts among supply chain members. The results of theoretic analysis and numerical experiments proved the validation of the quantitative evaluation index CP.

Key words: supply chain collaboration; performance evaluation; game theory; discrete event simulation (DES)

0 引言

供需链[1]协同研究供需链整体利益和成员企业个体利益之间的冲突与平衡问题, 是近年来供需链管理领域的研究热点之一。文献[1]将供需链协同定义为在个体满意的前提下, 集体利益的最大化。文献[2]例证了供需链协同现象的存在性, 并以报童模型为例阐述了供需链协调和供需链协同的区别与联系。国内外大量的相关研究都属于文献[2]中定义的供需链协调范畴, 详细的综述文章见文献[3]。文献[4][5][6]都

基于契约研究了供需链各成员企业间的协作与竞争问题, 它们虽然都提及了对供需链整体利益最大化的问题, 但没有考虑如何处理供需链整体利益与成员企业个体利益之间的关系。文献[7][8]都明确提出了供需链管理研究的重点和难点是整体最优和个体满意之间矛盾的调和。但对于如何定义这种冲突现象, 以及如何定量评价这种矛盾的调和程度, 都缺乏分析和阐述。

崔琳琳 (1980.8-), 女, 汉族, 辽宁沈阳人, 清华大学博士研

本文第一部分阐述了供需链协同的内涵及其研究意义,分析了与供需链协同密切相关的全局最优解和 Nash 均衡解的区别与联系。文章第二部分指出了定量评价供需链协同的重要性,并给出评价指标及其计算方法。第三部分将供需链协同程度的评价指标应用于特定的契约场景,分别给出了供需链协同度的计算过程,并通过数值仿真验证了协同度指标的有效性。文章的最后给出了本文的研究结论。

1 供需链协同及相关概念

1.1 供需链协同

供需链管理的提出旨在打破企业间的壁垒,研究供需链整体性能的优化,从这个角度说,它与合作博弈中强调的集体理性是一致的。但在实际的供需链系统中,各成员企业之间,竞争与合作关系并存,单纯的集体理性假设缺乏实用性。但单独强调个体理性常常伴随着无效率的结果,著名的“囚徒困境”问题就是只强调个体理性而导致集体无效率的典型例证。因此,全面看来,供需链管理要研究的核心问题是企业群体的集体利益和成员企业个体利益的对立统一关系。

供需链协同问题是针对企业群体集体利益和成员企业个体利益之间的对立统一关系提出的,用以解决个体理性与集体理性之间的冲突和平衡问题。根据文献[1]和[2]中对供需链的全局最优和供需链协同的定义可知,存在这样一种现象,即在某种契约场景下,供需链中各成员企业可以自觉的选择某种策略,使供需链达到全局最优。而各成员企业能够自觉选择各自策略的原因是在该种契约场景下,其个体利益比没有该种契约约束时有所改善,即达到个体满意。因此,

供需链协同是指供需链系统在某种契约场景或合作机制下,在各成员企业个体利益满意的前提下达到整体利益最大化的状态,它刻画了供需链系统整体利益和其成员企业个体利益之间的关系。由于协同是在集体理性和个体理性两方面作用下实现的,其内涵与传统经济学中的利润最大化和博弈论中的 Nash 均衡等概念密切相关。

1.2 全局最优解、Nash 均衡解和协同解

全局最优解是指给定的供需链系统对于某种市场需求,各成员企业在确定的产能和成本条件下获取利益之和的最大值。

对于给定的供需链系统,它的全局最优解必然存在。因为供需链系统利润是其所拥有资源的函数,在有限资源的条件下,供需链系统不可能牟取到无穷大的利润,即“利润-资源”函数的一阶导数不可取得无穷大,因此供需链系统利润必有上确界,即全局最优解必然存在。

同时,全局最优解也是唯一的。假设存在两个以上互不相等的“全局最优利润”,则它们之间必有大小顺序,而其中只能有一个取最大值,即为全局最优解。因此,假设自相矛盾,即全局最优解具有唯一性。但是,实现全局最优可能存在多种途径或方式,对于给定的有限资源,在不同的配置方案下,可以达到相同的全局最优解。

Nash均衡解(Nash Equilibrium)是指在某种博弈规则下,各参与者获得的个体利益组成的 n 维利益向量。Nash均衡解是某种博弈规则下的博弈结果,该种博弈结果通过所有参与者的最优策略组成的一种策略组合取得,也就是说,给定别人策略的情况下,没有任何其它参与人有积极性选择其它策略,从而没有任何人有积极性打破这种均衡[9]。与全局最优解不

究生。主要从事敏捷供需链管理、电子商务、现代物流等研究。
E-mail: cuill05@mails.tsinghua.edu.cn

同，纳什均衡解中的“最优”与参与者间的合作机制（契约）有关。当供需双方的合作机制发生变化时，Nash均衡解也会随之改变。

协同解是指供需链系统在在某种契约场景下，在各成员企业个体利益满意的前提下达到整体利益最大化的协同状态时，各成员企业个体利益组成的n维向量。这里的n是参与供需链系统的成员企业个数。

“整体最大化”是指n个成员企业的利益之和与供需链系统的全局最优解相等；“个体利益满意”是协同解中各利益分量都不小于各自在“零契约”场景下的Nash均衡利润。

所谓“零契约”是指一种特殊的契约场景，该契约场景满足如下条件：（1）无决策权转移；（2）无信息共享；（3）即时交易；（4）无利益共享（5）无风险分担。无决策权转移是指供需双方独立对自己的交易行为进行决策，不受交易对方的支配。无信息共享是指供需双方除了交易必须的订单等信息以外，没有任何其它辅助信息沟通。即时交易是指供需双方在即时一次性支付条件下的现货交易。无利益共享是指供需双方单独享受各自的决策所带来的利润。无风险分担是指供需双方独立为自己的交易行为承担各自的风险，任何一方都不会对交易对方的交易行为承担风险。

由上述概念及其相互关联关系可知，供需链系统并不是在任意契约场景或合作机制下都可以达到协同状态。只有特定的合作机制可以使供需链系统在满足各成员企业个体利益的同时实现系统整体利益最大化。那么，当供需链系统处于非协同状态时，为分析和改善供需链系统的运作性能，需要对其协同的程度进行定量评价。

2 供需链协同的定量评价

在供需链管理的概念提出之后，很多研究人员试

图给出可以反映供需链整体性能的评价指标，

Graves[10]定义了供需链过程柔性的定量评价指标，SCOR[11]给出了对供需链的可靠性、反应性、柔性、成本和资产的评价指标，并分层次定义了其计算方法。也有研究人员通过对单个成员企业指标的加和或平均，定义供需链系统整体的经济性能指标。这些指标并不能真正反映供需链系统整体利益和成员企业个体利益之间的对立统一关系，因此不能用于衡量供需链协同的性能。

我们引入供需链协同度指标来解决上述问题。该指标的实质是衡量在供需链成员企业个体利益满意的前提下，供需链整体利益的优化程度。这种优化程度是相对于供需链系统全局最优解而言的。

供需链协同度定义为：在某种契约场景或合作机制下，供需链成员企业的的利润和与零契约下成员企业利润和之差，与供需链系统全局最优解与零契约下成员企业利润和之差的比值。其中，成员企业利润和是该种契约场景下Nash均衡解。式（1）给出了供需链协同度的计算公式。

$$C(M) = \frac{\|N(M)\| - \|\underline{N}\|}{P^o - \|\underline{N}\|} \quad (1)$$

其中，

$C(M)$ 是在合作机制M下的供需链协同度；

$N(M)$ 是在合作机制M下的Nash均衡解，它是一个n维向量，第i个分量是成员企业i的Nash均衡利润；

\underline{N} 是零契约下的Nash均衡解，即企业利润的下界组成的n维向量，当每个企业的赢利都大于此下界时，就称该合作机制使得“个体满意”；

P^o 是供需链系统全局最优解；

向量的范数 $\|\cdot\|$ 定义为向量中各分量的代数和。

图1给出了由两个企业组成供需链时（即（1）式中的向量维数等于2），协同度指标的几何含义。

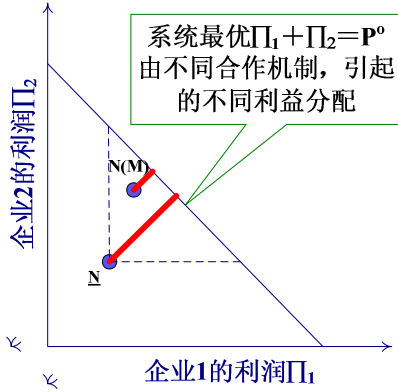


图1. 供需链协同度的定义

如图1所示，图中实直线被称为全局最优线（当维度 >2 时，则是一个平面或高维平面），由不同利益分配方案下的全局最优解构成，这条直线上所有点的坐标分量之和都是相同的，而且都与全局最优解相等。点 N 是零契约下的Nash均衡解，表示双方利润达到满意的下界，因此，两条虚线右上部分是个体满意区，它们与实直线围成的三角区域称为协同区。因此，实直线被两条虚线截成的那部分全局最优解，就是在个体满意的前提下达到全局最优的点集，即供需链系统的协同状态集。协同度的几何意义是： $1 - (\text{当前机制下的Nash均衡解到全局最优解的距离} / \text{点}N\text{到全局最优解的距离})$ 。它的取值范围在 $0 \sim 1$ 之间。当协同度为1时，称供需链实现协同。

由上述定义可知，在协同区内，与全局最优线（平面或高维平面）平行的线段（平面或高维平面）上的点，它们的协同度取值相同。这些不同点所代表的供需链系统整体利益是相同的，只是利益分配方式不同。由于供需链协同度指标用于衡量在供需链成员企业个体利益满意的前提下，供需链整体利益的优化程

度，因此，对于整体利益相同的点，其协同度取值应该是相同的。这种一对多的映射关系恰好说明了该指标定义的合理性。

供需链协同度可以清晰反应当前契约 或合作机制下供需链的协同程度，并为契约的改进设计指明了方向。此外，用供需链协同度来评价供需链协同的程度，实际上是对供需链系统的资源利用率的一种度量。对于同一个供需链系统，不同的合作机制可以使成员企业稳定在不同的协同点上，协同度可以评价各种机制对供需链系统资源的利用率。对于不同的供需链系统，协同度相当于归一化处理后的Nash均衡，它的大小表征了不同企业或行业的供需链系统对其资源的利用情况及可挖掘的潜力。

3 供需链协同度指标的应用验证

本章节将供需链协同度 指标应用于契约设计场景中，说明供需链协同度的定量计算方法。案例采用一个供应商一个零售商的供需链模型：供应商以单位成本 c 从外部购买产品。在每个销售季开始之前的时刻零售商向供应商订货，然后以价格 p 向市场销售产品。零售商上一个销售季的库存剩余产品可以在以后的销售季中继续销售。模型研究的是长期交易中，多个销售季之后供需双方的累积利润，订货量是模型的决策变量。

3.1 全局最优解

给定供需链系统的全局最优解是一个确定值，它与成员企业间的合作机制无关。供需链系统的全局利润 $\Pi(i)$ 如（2）式中所示。

$$\Pi(i) = p \cdot S(i) - c \cdot q(i) \quad (2)$$

其中，

p 是零售商的市场零售价格；

c 是供应商的产品成本;

$q(i)$ 是第 i 个销售季零售商订货数量;

$S(i)$ 代表第 i 个销售季中零售商销量的期望, 它与需求和订货量之间满足 (3) 式中的关系。

$$\begin{aligned} S(i) &= q(i) \cdot P(D_i(\omega) \geq q(i)) \\ &+ \int_0^{q(i)} y f_i(y) dy \\ &= q(i) - \int_0^{q(i)} F_i(y) dy \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$D_i(\omega)$ 是销售季 i 的终端市场需求量, 是一个随机事件;

$f_i(y)$ 和 $F_i(y)$ 分别为第 i 个销售季随机需求的概率密度函数和累积密度函数。

利用一阶条件我们求得使 $\Pi(i)$ 取得最优的订货量 $q^o(i)$ 应该满足 (4) 式中的关系。

$$F_i(q^o) = \frac{p-c}{p} \quad (4)$$

当 N 个销售季内所有订货量均取最优订货量时, 系统达到全局最优解, 此全局最大利润值 P^o 由 (5) 式给出。

$$\begin{aligned} P^o &= \sum_{i=1}^N \Pi^o(i) \\ &= \sum_{i=1}^N (p-c) \cdot F_i^{-1}\left(\frac{p-c}{p}\right) \\ &\quad - \int_0^{F_i^{-1}\left(\frac{p-c}{p}\right)} F_i(y) dy \end{aligned} \quad (5)$$

假设各销售季需求服从正态分布 $N(50, 5)$, 市场销售价格为 $p=4$, 供应商进价 $c=1$, 周期总数 $N=365$, 则供需链系统的全局最大利润 $P^o = 52426$ 。

3. 2 零契约下的纳什均衡解及供需链协同度

零契约下的纳什均衡确定了达到个体满意的下限。在上述供需模型中, 以批发契约进行交易的双方符合无决策权转移、无信息共享、即时交易、无利益共享、无风险分担的零契约条件, 因此批发契约下双方的纳什均衡解即为该系统成员企业个体利益满意下限 \underline{N} 。

我们利用离散事件仿真方法求得订货批量固定时, 多销售季批发契约的 Nash 均衡解。这里, 由于只有零售商以订货量为决策变量寻求自身利润的最大化, 所以供需过程实际上是一个单人博弈过程, 那么零售商会自觉自愿地采用使自身利益达到最大的订货量, 而此时的供应商和零售商利润就是系统的 Nash 均衡解, 即 (Π_s, Π_r) 。多销售季仿真结果如表 1 所示。

仿真 365 个销售季后, 系统的 Nash 均衡解 $N(M_0) = (16790, 16390)$, 系统总利润 $P=33180$ 。根据供需链协同度的定义经计算可得, 此种情况下的供需链协同度为零, 见式 (6), 这也是“零契约”的名称由来。此时, 系统的纳什均衡解和供需双方获得利润的下限重合。

$$\begin{aligned} C(M_0) &= \frac{\|N(M_0)\| - \|\underline{N}\|}{P^o - \|\underline{N}\|} \\ &= \frac{33180 - 33180}{52426 - 33180} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

表 1 零契约下的纳什均衡

订货量 q	38	40	42	44	46	48	50	52
供应商利润 Π_s	13870	14600	15330	16060	16790	17520	18250	18980
零售商利润的期望 Π_r	13864	14583	15280	15919	16390	16146	15523	-11777

3.3 不同契约参数下的供应链协同度

由供应链协同度定义可知,该评价指标是供需合作方式(即契约)的函数,它不仅随着契约的结构发生变化,对于相同的契约,不同的参数设置下供应链协同度是不同的。图2给出了多销售季回购契约中不同批发价格(w_b)和回购价格(b)下的供应链协同度。其场景和参数设置与前面的实验相同,只是供需双方依照回购契约进行交易。其中,图(a)是固定销售价格 w_b 时,协同度随回购价格 b 变化的曲线;图(b)是固定回购价格 b 时,协同度随销售价格 w_b 变化的曲线。

两图中分别标识出的圆点,是系统实现协同的地方,此时, $p=4$, $c=1$, $b=2.7$, $w_b=3$ 。取不同参数(w_b 和 b)值进行实验,可以得到类似的结果(如表2所示),即只有当批发价格和回购价格满足(7)式时,才能使系统实现协同。这与理论研究结果是相一致的。

$$\frac{p-b}{p} = \frac{w_b-b}{c} \quad (7)$$

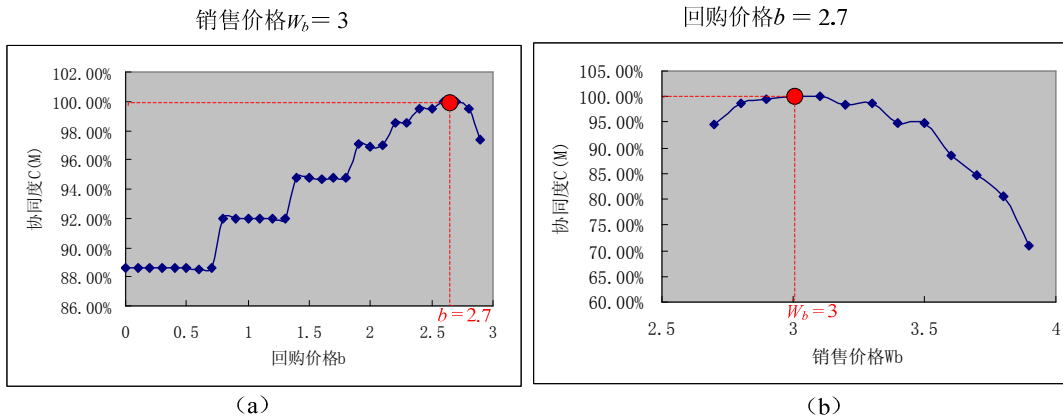


图2 不同契约参数下的供应链协同度

表2中加重的数据项表示在满足(7)式关系的契约参数下,系统实现协同。由此可以看出供应链协同解有可能是一个集合,不具有唯一性。本例中,这些不同的契约参数都使零售商自觉选择可以使系统达到最优的订货量,但供需双方的利益分配不同。

任取表2中的两组数据,如 $b=1.5$ 时总利润值为51420,和 $b=2.7$ 时总利润为52426,演算协同度的计算如式(8)、式(9)所示。协同度为1意味着在个体满意的前提下,集体利益达到的最优;协同度在0-1之间意味着供应链成员企业的纳什均衡解处

在图1中的三角区(协同区)内,虽满足个体满意,但集体利益尚未达到最优,可以通过尝试不同的契约参数,改进协同性能。

$$C(M_0) = \frac{\|N(M_0)\| - \|N\|}{P^o - \|N\|} \quad (8)$$

$$= \frac{51420 - 33180}{52426 - 33180} = 94.77\%$$

$$C(M_0) = \frac{\|N(M_0)\| - \|N\|}{P^o - \|N\|} \quad (9)$$

$$= \frac{52426 - 33180}{52426 - 33180} = 100.00\%$$

表 2 不同契约参数下的供需链协同度

(W_b, b)	(3.0, 0.0)	(3.0, 0.1)	(3.0, 0.3)	(3.0, 0.5)	(3.0, 0.7)	(3.0, 0.9)	(2.2, 1.6)
总利润 P	50235	50228	50235	50233	50233	50876	52426
协同度 C	88.61%	88.58%	88.62%	88.61%	88.61%	91.94%	100.00%
(W_b, b)	(3.0, 1.0)	(3.0, 1.1)	(3.0, 1.3)	(3.0, 1.5)	(3.0, 1.7)	(3.0, 1.9)	(3.4, 3.2)
总利润 P	50877	50872	50874	51420	51418	51857	52426
协同度 C	91.95%	91.93%	91.93%	94.77%	94.76%	97.04%	100.00%
(W_b, b)	(3.0, 2.0)	(3.0, 2.1)	(3.0, 2.3)	(3.0, 2.5)	(3.0, 2.7)	(3.0, 2.9)	(3.7, 3.6)
总利润 P	51827	51840	52135	52335	52426	51922	52426
协同度 C	96.89%	96.96%	98.49%	99.53%	100.00%	97.38%	100.00%

4 结论

本文首先阐述了供需链协同的内涵,进而分析了供需链协同解与供需链系统全局最优解以及 Nash 均衡解的区别和联系。从理论上分析了供需链系统全局最优解的存在性和唯一性。为评价供需链系统达到协同的程度,本文首次给出了供需链协同度 $C(M)$ 的概念。它既可以为契约改进设计指明方向,又可以反映供需链系统资源利用的效率。文章通过仿真实验,将协同度指标应用于不同契约场景,数值仿真结果验证了该指标的有效性。

对于实际生产经营中更多复杂情况的分析和评价,该指标的应用还有待进一步深入和推广。

参考文献

- [1] 柴跃廷,刘义.敏捷供需链管理[M].北京:清华大学出版社,2001. p. 1
- [2] 宁琳,柴跃廷.供需链协调与协同.Tsinghua Univ. working paper,2006
- [3] G.P. Cachon. Supply chain coordination with contracts, Handbooks in Operation and Managements Science:Supply Chain Management[M].North-Holland, 2003.

p. 229-324

- [4] 索寒生,金以慧.非对称信息下供需链中供应商的回购决策分析[J].控制与决策,2004(3):p. 64-68.
- [5] 王勇,陈俊芳.供应链契约机制选择研究[J].运筹与管理,2005(2):p. 2-6.
- [6] 柳键,马士华.供应链合作及其契约研究[J].管理工程学报,2004(1):p. 13-18.
- [7] 王自勤.供应链剩余与供应链合作机制[A].中国物流学术前沿报告[C],北京:中国物资出版社,2006. p. 398-407
- [8] 汪旭晖.约束理论在供应链协作中的应用[A].中国物流学术前沿报告[C],北京:中国物资出版社,2006. p. 408-412
- [9] 张维迎.博弈论与信息经济学[M].上海:上海三联书店,上海人民出版社,2004. p. 8
- [10] Graves, S.C. and B.T. Tomlin, Process Flexibility in Supply Chains [J]. Management Science, 2003. 49(7): 907-919.
- [11] Supply Chain Council. Supply-Chain Operations Reference-Model(SCOR)7.0. 2004.