# 企业群体协同机制的形式化建模及存在性研究

崔琳琳，柴跃廷

（清华大学 自动化系，国家 CIMS 工程技术研究中心，北京 100084）

**摘　要** 针对企业群体合作机制研究缺乏形式化定义的问题，基于对供需链协调问题没有从对策论的角度出发，显式地考虑集体理性的局限性分析，提出企业群体（供需链）协同问题，并对其进行形式化定义及协同机制的存在性证明。该文将企业群体协同定义为企业群体在某种合作机制下，各成员企业在个体满意的前提下，达到整体效用最大化的状态。进而建立了企业群体长期交易的重复博弈模型，并基于无名氏定理证明了协同解的存在性。理论证明指出，只要企业足够关注长远目标，供需链（企业群体）总可以实现协同。

**关键词** 供需链;协同;博弈论; 重复博弈

**中图分类号** F 224.32; TP 14

**文献标识码** A

**Research on the Formal Modeling and Existence of Mechanisms for Enterprises' Synergy**

**Abstract:** To define the cooperation between enterprises formally, based on analyzing the state of the art of supply chain coordination, the formal definition of the enterprises' synergy problem (ESP) and the existence of mechanism for ESP are brought out. The ESP is defined as the optimal status of the overall supply chain under a certain set of mechanism, on the condition that each enterprise in the chain gains its satisfied utility. The proof of existence of the certain set of mechanism is given out, which reveals that arbitrary supply chain can achieve synergy as long as its members concern long-term target enough.

**Key words:** supply chain; synergy; game theory; repeated gaming

供需链管理[1]研究的热点问题之一是企业联盟集体利益和企业个体利益之间矛盾的调和，传统的供需链协调问题是研究如何通过契约设计使得供需链上的各个企业所做出的决策与优化整个供需链的目标达到一致[2]。从已有文献上看，针对供需链协调问题的研究大多从决策论的角度出发，分析某种契约如何保证企业群体中的某一方在最大化自身利益的同时与优化整个供需链的目标达成一致。比如 Lariviere[3]研究了报童模型下，回购契约对零售商的订货激励，而没有谈及制造商为此承担的风险；Tomlin[4]研究了数量折扣契约，证明对于供应商来说，分段线性的批发价要优于线性的批发价，而分销商的获利情况并未得到分析；Hsiao[5]研究信息共享为供应商带来的优势，而没有考虑其对分销商是否存在足够的激励。

随着博弈理论的深入人心，研究者逐渐开始从对策论的视角出发分析企业群体之间的合作，即供需链协同。与协调问题相比，供需链协同问题的内涵主要有两点不同。首先，协同问题明确是从对策论的角度出发，研究利益相互冲突的理性个体在决策相互影响下最大化自身的收益；另外，协同问题显式地强调了集体理性，研究如何通过机制设计，不仅使联盟中每个个体基于个体理性的努力方向都与集体理性相一致，而且使每个个体获得的收益都比不参与这种机制，即不合作状态下，有所改善，从而达到整体（合作下的）大于局部和（不合作下的）的效果。 可以说，供需链协同描述了一个更加具有现实意义的企业群体合作问题，尝试对该问题的研究和解决可以从更加全面和系统性的角度考察企业群体合作的机制，并在推动企业合作方面获得更有效的结论。

本文首先给出了供需链协同问题的形式化定义，并定义了与其相关的整体最优解、个体满意解、协同解、零契约等概念，进而给出了协同解存在性证明，从理论上指出了实现企业群体协同的方向。

---

收稿日期: 2007-03-07

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAH02A05)

**作者简介:** 崔琳琳(1980-) , 女(汉) , 沈阳, 博士研究生。

**通讯联系人:** 柴跃廷, 研究员, 博士生导师

E-mail: chaiyt@mail. tsinghua. edu. cn

## 1 供需链协同的定义

### 1．1 整体最优解

整体最优解是供需链面向最终市场需求时，各个企业成员在明确的产能和成本下，利润之和的最大值。对于给定的供需链系统，利润的全局最优值是确定的,它与企业之间的合作契约无关。

**【定义1】**整体最优解定义为

$$P^o = \mathrm{Max}_{\mathrm{S}} \sum_{i=1}^{n} u_i(\boldsymbol{S}),$$

其中$\boldsymbol{S}$是供需链的各种决策变量组成的向量，从决策向量到实数集合的映射$u_i(\boldsymbol{S}): \boldsymbol{S} \longrightarrow \mathbf{R}$表示供需链中的企业$i$通过决策所获得的收益（效用）。

### 1．2 零契约

零契约是对供需双方采用“非合作”方式进行交易的一种确切描述。现实中，供需双方总是通过某种方式进行贸易联系,并通过决策权转移、信息共享、赊账付款、风险分担、利益共享这 5 个方面进行合作。我们引入“零契约”的概念，利用它描述性地定义不具有任何合作行为的交易双方进行交易的方式。

**【定义2】**“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。

无决策权转移是指交易各方独立对自己的买卖行为进行决策，不受交易伙伴的支配。

无信息共享是指供需双方除了交易完成必须的订单信息以外，没有任何其他信息沟通，诸如共享生产数据、共享需求信息的行为都违反了该项限制。

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经营决策所带来的利润。现实中常见的利益共享契约和销售回扣契约分别是需方给供方分享利益和供方给需方分享利益的典型。

无风险分担是指供需双方独立为自己的买卖行为承担各自的风险，任何一方都不会对其他参与人的交易行为承担风险。现实中常见的回购契约、数量弹性契约和数量折扣契约都是供方完全保护需方的部分订货或供方部分保护需方的全部订货的行为，是典型的风险分担型契约。

### 1．3 个体满意解

“个体满意”是指供需链中每个成员的收益都不小于各方在非合作博弈下的纳什（Nash）均衡收益。这里“非合作”就是指供需双方依照“零契约”进行交易。

使用记号$u_0 = (u_{10}, u_{20}, ..., u_{n0})$表示零契约下的纳什均衡收益，$u_{i0}$是供需链成员$i$达到个体满意的下界。

**【定义 3】**供需链成员的收益组成的$n$维向量被称为“个体满意解”，当且仅当该向量的各个分量都不小于$u_0$中相应的各个分量，即$u_c = (u_{1c}, u_{2c}, ... u_{nc})$满足$u_{ic} \ge u_{i0}$，其中$i = 1, 2, ..., n$。

用符号$U_c$表示个体满意解组成的集合。

### 1．4 协同解

协同解是指供需链系统在某种契约场景下，各成员企业在个体满意的前提下达到整体效用最大化的协同状态时，各成员企业个体收益组成的$n$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$n$个成员企业的收益之和与供需链系统的整体最优解相等；“个体满意”是协同解中的各分量都不小于各自在“零契约”场景下的Nash均衡收益。

**【定义4】**供需链成员的收益组成的$n$维向量$u_s = (u_{1s}, u_{2s}, ..., u_{ns})$被称为供需链协同解，当且

仅当$\| u_s \| = P^o$且$u_s \in U_c$。

可见，一个收益向量可以称为协同解必须满足以下3个条件：

1) 是某种契约场景下的纳什均衡支付。

2) 各分量之和等于整体最优解。

3) 各分量不小于各自在零契约下的纳什均衡收益。

**2 供需链（企业群体）交易的重复博弈模型**

以销售季为周期划分供需链成员间的不同次交易，每次交易都是各参与人之间的一次阶段博弈，而长期合作关系下的供需链交易可以看作一个重复博弈过程。博弈的参与人是供需链中的各企业成员，用$i$表示，$i = 1, 2, ..., n$，$n \in N$。

我们用$G = \{S_1, S_2, ..., S_n; f_1, f_2 ..., f_n\}$表示一次交易的阶段博弈。其中：$S_i$表示参与人$i$的策略集合；$s_i$表示参与人的某种策略，$s_i \in S_i$。一个零售商可选择的订货量取值所组成的集合，一个分销商的价格策略集合，或一个制造商的可选产量集合，都是$S_i$的具体表现。$f_i$是参与人$i$的支付函数，$f_i : S = S_1 \times S_2 \times ... \times S_n \longrightarrow R$表示$n$个参与人策略（策略组合）到参与人$i$所获支付的映射。用符号$u_i$表示参与人$i$所获得的支付，即$u_i = f_i(s_1, s_2, ... s_n)$。供需链成员通过达成某种契约定义了参与人的各种行为所对应的支付，即支付函数。

长期合作下的供需链在多个销售季中进行交易，可以看作上述博弈在周期$t$上的重复，其中$t = 0, 1, ..., T$（$T$可以取无穷大）。考虑到资金的时效性，用未来周期支付的折现值之和作为此重复博弈的支付，折现因子$\alpha_i = (1 + r_i)^{-1}$，$r_i \geq 0$，$i = 1, 2, ..., n$表示不同参与人对时间的不同偏好，实际上是反映了参与人对未来收益的重视程度。如果参与人$i$在周期$t$使用策略$s_{it} \in S_i$，则其在整个博弈过程中的支付（效用）为

$$\sum_{t=0}^{T} \alpha_i^{\,t} \bullet f_i(s_{1t}, ..., s_{nt})。$$

对于有限的$T$，$\alpha_i$可以等于1；对于$T = \infty$的情况，$0 < \alpha_i < 1$。

供需链长期交易还必须描述参与人是如何根据已经发生的交易来对下一次交易进行决策的。参与人$i$在周期$t$的策略$s_{it} \in S_i$（$i = 1, 2, ..., n$）形成策略组合$s_t = (s_{1t}, ..., s_{nt}) \in S = S_1 \times ... \times S_n$是$t$时刻下参与人的策略选择。我们用$h_t = (s_0, s_1, ... s_{t-1})$表示历史，$H_t$是在时刻$t$（$t = 0, 1, ..., T$）所有可能的历史集合。

定义$H^t = \prod_{\tau=0}^{t-1} H_\tau$，

则$v_{it} : H^t \longrightarrow S_i$，（$t = 0, 1, ..., T$），

是参与人$i$在时刻$t$的决策函数，它将阶段博弈$G$中的策略赋予每个可能的历史。用$V_{it}$代表所有决策函数$v_{it}$组成的集合，向量$\sigma_i = (v_{i0}, ..., v_{iT})$，$v_{it} \in V_{it}$，$t = 0, 1, ..., T$是重复博弈$G^*$中参与人$i$的一个完全策略描述。用$\sum_i$表示参与人$i$的完全策略集合，$\sum$表示各参与人的完全策略集合组成的策略空间，定义重复博弈$G^*$下参与人$i$的支付函数为：

$$g_i : \sum = \sum_1 \times \sum_2 \times ... \times \sum_n \longrightarrow \mathbf{R},$$

$$g_i(\sigma_1, ..., \sigma_n) = \sum_{t=0}^{T} \alpha_i^{\,t} \bullet f_i(v_{1t}(h_t), ..., v_{nt}(h_t)),$$

（$i = 1, 2, ..., n$）。

至此，供需链（企业群体）的长期合作可以描述为一个重复博弈过程，

$$G^* = \{\sum_1, \sum_2, ..., \sum_n; g_1, g_2 ..., g_n\}。$$

该博弈的参与人是供需链中的各企业成员，策略集是各参与人的完全策略集合组成的策略空间$\sum$，从策略空间到累积支付的函数由参与人达成的契约定义。由于需要考虑长期合作对资金时效性的影响，契约中定义的支付函数受到折现因子的控制。

## 3 协同解存在性证明

### 3．1 无名氏定理

协同解存在性的证明基于博弈论中的无名氏定理,下面首先简要介绍一下无名氏定理的内容。

**【无名氏定理】**[6][7] 在无限次重复博弈中，对每个满足条件“$u_i > \underline{u}_i$ 对所有参与人成立”的收益向量$\boldsymbol{u}$，存在$\underline{\alpha}_i < 1$使由所有$\alpha_i \in [\underline{\alpha}_i, 1)$组成的贴现因子向量$\boldsymbol{\alpha}$下的重复博弈存在纳什均衡$G^*(\boldsymbol{\alpha})$有收益$u$。

定理中的$\underline{u}_i$是参与人$i$的最小最大支付，它定义为：

$$\underline{u}_i = \mathrm{Min}_{s_{-i}}(\mathrm{Max}_{s_i} \ u_i(s_i, s_{-i}))\text{。}$$

最小最大支付（也称保留支付）实际上是参与人$i$所有最优战略支付中的最小值，大于最小最大支付的可行支付称为个人理性支付。这里的可行支付是阶段博弈$G$中纯战略支付的凸组合（即加权平均)。无名氏定理要说明的问题是，在无限次重复博弈中，只要参与人足够有耐心（贴现因子接近于 1）或对不合作行为的惩罚足够严厉，阶段博弈中任何可行的个人理性支付都能在均衡中得以实施。由此，只要证明满足条件$\| u_c \| \le P^o$的个体满意解是可行的个人理性支付，就可以利用无名氏定理的结论对协同解的存在性进行证明。

### 3．2 协同解存在性证明

**【引理 1】**对于任意给定的供需链系统，存在个体满意解$\overline{u}_c$，使得$\| \overline{u}_c \| = P^o$。向量的范数$\|\bullet\|$定义为向量中各分量的代数和。

**证明：**

因为$P^o \ge \| u_0 \|$且$\forall i = 1, 2, \ldots, n, \quad u_{ic} \ge u_{i0}$；

又因为$P^o \ge \| u_c \|$ （因为$P^o$是整体最优解)。

所以存在个体满意解$\overline{u}_c$，使得$\| \overline{u}_c \| = P^o$ 。■

**【引理 2】**对于任意个体满意解$u_c$，只要满足$\| u_c \| \le P^o$，就存在合作机制（契约）$M$，使得长期合作下的供需链系统（企业群体）在该机制下的纳什均衡有收益$u_c$。

**证明：**

1) 首先证明个体满意解都是个人理性支付

先考察零契约下的纳什均衡支付$u_0$，根据文[6]对纳什均衡的定义可知，纳什均衡支付向量的第$i$个分量是参与人$i$在给定其他参与人策略情况下的最优战略支付，即

$u_i(\sigma_i^*, \sigma_{-i}^*) \ge u_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^*), \forall \sigma_i \in \sum_i, \forall i$。

因为，最小最大支付是参与人$i$所有最优战略支付中的最小值，即

$$\underline{u}_i = \mathrm{Min}_{\sigma_{-i}}(\mathrm{Max}_{\sigma_i} \ u_i(\sigma_i, \sigma_{-i}))$$

所以不等式$u_{i0} \ge \underline{u}_i$，对所有的$i = 1, 2, \ldots, n$成立。

又因为个体满意解满足$u_{ic} \ge u_{i0}$，其中$i = 1, 2, \ldots, n$，

所以$u_{ic} \ge \underline{u}_i$，其中$i = 1, 2, \ldots, n$， 即个体满意解都是个人理性支付。

2) 再证明满足条件$\| u_c \| \le P^o$的个体满意解都是可行支付，如前定义$\| u_c \| = \sum_{i=1}^{n} u_{ic}$，满足条件$\| u_c \| \le P^o$的个体满意解在$n$维空间中形成的图形是以向量$\boldsymbol{u_0}$（$n$维空间中的一个点）为顶点，以$\sum_{i=1}^{n} u_{ic} = P^o$（$u_{ic} \ge 0$，$i = 1, 2, \ldots, n$）（高维平面）为底面的高维棱锥。

因为高维棱锥是$n$维空间中的凸多面体，所以，棱锥内的任意点都是其顶点的凸组合。因此，欲证明满足条件$\| u_c \| \le P^o$的个体满意解都是可行支付，只需证明棱锥的各顶点是纯战略支付即可。

棱椎的$n+1$个顶点分别为

$$V_0 = (u_{10}, u_{20}, \ldots, u_{n0}),$$

$$V_1 = (P^o, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{n-1个}) \text{，…，}$$

$$V_n = (\underbrace{0, 0, \dots, 0}_{n-1个}, P^o)$$

。

对于$i = 1, 2, \dots, n$，$V_i$的第$i$个分量为$P^o$，其他分量为零。其中，顶点$V_0$是零契约下的纳什均衡支付，因为混合战略均衡与不完全信息下的纯战略均衡等价，所以总可以通过定义某种契约场景，找到一个纯战略实现支付$V_0$。而对于顶点$V_i$，$i = 1, 2, \dots, n$，在任何契约场景下，总可以设置一种纯战略，使供需链的整体利益集中在某一个成员身上。

因此满足条件$\| u_c \| \le P^o$的个体满意解都是可行支付。■

**【定理】**（协同解的存在性定理）存在合作机制（契约）$M$，使得长期合作下的供需链系统（企业群体）在该机制下的纳什均衡收益为供需链系统的协同解$u_s$。

证明：因为$u_s \in U_c$且$\| u_s \| = P^o$（引理 1 保证了该等式成立的合理性），则由引理 2 得证，存在合作机制（契约）$M$，使得长期合作下的供需链系统（企业群体）在该机制下的纳什均衡收益为供需链系统的协同解$u_s$。■

## 4 结论与展望

本文在分析了供需链协调问题研究的片面性和局限性之后，给出了供需链协同问题的形式化定义，为从更加全面和具有现实意义的角度研究企业群体合作提出了清晰的目标。文章基于博弈论中的无名氏定理，证明了协同解的存在性，从理论上指出，只要企业联盟中的个体足够关注长远目标，企业联盟总可以通过某种合作机制实现协同。该理论结果的现实意义在于，在实际企业合作中，可以通过合理的机制设计，激励企业更加关注长远目标，从而促进协同，使企业联盟获得更大的收益。

围绕企业群体协同问题的研究在理论和应用上都有值得进一步探索的地方。理论上可以尝试在不同假设前提下证明协同解的存在性。应用上，通过调研或实验的方法验证协同解存在性的理论结论，以增强理论的可靠性。

## 参考文献（References）


[1] 柴跃廷,刘义.敏捷供需链管理[M].北京:清华大学出版社,2000
CHAI Yueting, LIU Yi. Agile Supply Chain Management [M]. Beijing: Tsinghua University, 2000. (In Chinese)

[2] 张龙,宋士吉,刘连臣等. 带有供需双方促销努力的供需链合同问题研究[J].清华大学学报(自然科学版), 2003, **43**(9):1226-1229
ZHANG Long, SONG Shiji, LIU Lianchen, et al. Supply chain contract model with supplier and retailer effort effects [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, **43**(9):1226-1229. (In Chinese)

[3] Lariviere M, Porteus E. Selling to the newsvendor: an analysis of price-only contracts [J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2001, **3**(4): 293-305.

[4] Tomlin Brian. Capacity investments in supply chain: sharing-the-gain rather than sharing-the-pain [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2003, **5** (4): 317-333

[5] Hsiaom J M, Shieh C J. Evaluating the value of information sharing in a supply chain using an ARIMA model [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, **27**(5/6):604-609

[6] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海:上海人民出版社, 2004.
ZHANG Weiying. Game Theory and Information Economics [M]. Shanghai: Shanghai Renming Press, 2004 (In Chinese)

[7] Drew Fudenberg, Jean Tirole. Game theory [M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, c1992. p186.