

组合电子市场中多 Agent 联盟形成的动态特性分析*

龚勇⁺, 姚莉, 沙基昌

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

Dynamics of Multiagents Coalition Formation in Combinatorial Electronic Marketplaces

GONG Yong⁺, YAO Li, SHA Ji-Chang

(School of Information System and Management Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-731-4576292, E-mail: Lanny23@263.net

Gong Y, Yao L, Sha JC. Dynamics of multiagents coalition formation in combinatorial electronic marketplaces. *Journal of Software*, 2007,18(3):657-668. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/657.htm>

Abstract: A multiagents intermediary-driven combinatorial electronic market model is given. Applying multiagents coalition formation theory for it, a mathematical analysis methodology is used for customer coalition formation. At the macroscopic level of the marketplace, the combinatorial marketplace is described as a stochastic swarm system and the dynamics of multiagents coalition formation is studied. Based on the rate equation in swarm intelligence, a differential equation is derived, which gives the quantitative characteristic for coalition formation process of large-scale customers in the combinatorial market. Simulation experiments are performed to study the feasibility and validity of multiagents coalition formation in combinatorial trading. The global behavior of the system compared with correlative works proves the effective improvement of the dynamic process.

Key words: electronic commerce; combinatorial trading; multi-Agent system; coalition formation; swarm

摘要: 在给出一种多 Agent 中介系统控制的组合电子市场模型的基础上,利用基于群集智能的多 Agent 系统分析方法,针对中介主导的组合电子市场中大量消费者联盟形成的问题,从组合市场的宏观层次将其抽象为一个具有随机特性的群集系统,为多 Agent 间交互的动态特性作出宏观层次的定量分析.根据群集系统的速率方程,首先给出了一个反映组合市场中市场结构动态变化的微分方程,然后通过数值仿真,验证了组合贸易中多 Agent 联盟形成的可行性和有效性,分析了中介主导型商务系统这种新的电子市场模式存在的价值,并通过与相关工作的比较证明了多 Agent 中介系统控制的组合电子市场模型,提高了多 Agent 联盟形成的效率和效果.

关键词: 电子商务;组合贸易;多 Agent 系统;联盟形成;群集

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

随着信息技术的长期累积发展及其在商业上的持续应用,电子商务的出现划时代地改变了消费者和商家的交易方式,在推动经济和社会发展方面显示出了巨大的能量.组合市场与组合贸易就是目前逐渐成为研究热点的一个课题^[1,2].组合市场强调多种相关商品的贸易,商品以组合的形式参与分配,进行捆绑式购买和销售.如何提高该贸易形式的效率,使买卖双方均能从中获得更高的利益是组合贸易问题的研究重点.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.70371008 (国家自然科学基金)

Received 2005-05-12; Accepted 2005-12-31

在一般市场中,商家通常会提供价格折扣来吸引消费者进行批量购买.多个消费者之间可以通过结成联盟进行团体购买.而在组合市场中,商家一般还会为相关商品的配套购买提供价格优惠,消费者之间通过联盟形成组合他们的需求,就可以为无法达到配套购买要求的单个消费者提供获得这种优惠的机会.

给定组合贸易的一组买方和一组卖方,确定如何交易才能实现最高的消费者剩余是一个 NP 完全问题^[3].解决组合贸易问题的方法包括搜索算法^[1]、近似算法^[2,4]和受限拍卖方法^[3,5]等.其中:搜索算法可以获得最优解,但在最坏情况下,复杂度是指数级的;近似算法尽管通常是多项式级的,但解的质量不能得到保证;受限拍卖方法近乎苛刻的约束条件使得交易效率较低.这些方法在消费者规模巨大且具有高度动态性和开放性的电子商务环境中是无法取得良好效果的.

消费者之间的联盟形成已经引起了广泛关注^[6,7].如何在数量巨大且任务并发的消费者之间高效率地建立稳定的联盟关系是一个十分复杂的问题,学术界做了大量研究工作^[8-12],其中,多 Agent 系统的研究人员从多 Agent 环境的特殊性出发,探求在有限计算时间和通信花费的情况下如何形成稳定且有效的联盟的方法^[1].本文关注电子商务中代理消费者利益的多 Agent 间联盟形成的可行性及有效性研究,探讨中介型电子市场中的组合贸易问题,通过多 Agent 群集分析方法^[13]研究组合市场中消费者联盟形成的动态特性.

1 相关研究及本文研究思路

近年来,消费者联盟形成研究已经成为电子商务领域的一个热点.Lerman 等人研究了面向大型电子市场的联盟形成,提出一种物理驱动的联盟形成机制^[8];Tsvetovat 等人研究通过建立消费者联盟来获取批发所带来的折扣利益,依据不同的风险分布提出两种联盟形成协议^[9];Takayuki Ito 等人提出一种新的团体购买方案,用于以 Agent 为中介的电子商务市场^[10];Yamamoto 等人针对电子市场中的买方有权选择其偏好的问题,提出一种新的买方联盟形成策略 GroupBuyAuction^[11].

而组合市场中消费者联盟形成的研究从近几年起才逐渐引起相关领域专家的兴趣^[12,14],正在成为跨越电子商务和人工智能等多个学科的研究热点之一.

Li 等人研究了市场中每个消费者以一个总期望价格购买多个商品,而商家依据每种商品的购买数量为其提供折扣^[14].他们设计了一种在多项式时间内可以发现一个次优解和一个收益分割方案的算法,目标是寻找包含最多消费者且满足消费者各自期望价格的联盟.

Ye 等人在宏观层次研究了卖方控制型电子市场中的组合销售问题^[12],通过一个动态方程描述了 Agent 在不同大小的联盟间的移动,他们给出了一个市场框架,通过一个微分方程描述了市场结构随时间变化的特性,分析了达到稳定状态的市场结构与相关参数的关系,并给出了仿真实验的结果.

本文将采用一种基于物理性质的方法来研究组合贸易电子市场中消费者代理 Agent 的联盟形成过程.基于物理性质的方法对于研究大规模多 Agent 系统的动态特性颇具价值.例如:2000 年,Lerman 和 Shehory^[8]提出利用基于群集智能的数学分析方法研究大型电子市场中的多 Agent 联盟形成;Ye^[12]于 2003 年采用此方法分析了卖方主导市场中组合销售背景下的多 Agent 联盟形成的动态特性.本文的工作将进一步拓展和推进文献^[12]的工作:首先,摒弃文献^[12]中以商家利益为出发点的卖方主导市场的背景,给出一种中介性质的第三方平台模型,平台兼顾买卖双方的利益,并且自身可以在中介过程中获利.通过对贸易中利益分配的仿真实验结果,我们将验证第三方平台的存在对自身和买卖双方的意义和价值;其次,通过放松及修正文献^[12]中某些约束假设,使得市场模型更加合理,更具现实意义.本文将对市场达到稳定态的时间以及其他相关指标进行仿真,以来验证多 Agent 联盟形成效率和效果的提高.

2 一种中介主导的组合电子市场模型

与商家自己设立的电子市场相比,中介型电子商务平台的出现使得消费者能够以平等的贸易地位来面对商家,提高了消费者维护自身权利的能力,消费者获得更大利益的机会也大为增加.因而,数以亿万计的消费者涌向中介商务系统,随之产生的大量商机使得商家也对中介系统趋之若鹜,中介商务系统已经日益成为电子商

务中不可或缺的生力军.

图 1 给出了本文要讨论的组合电子市场模型.电子市场中除了中介系统以外,还包括商家和消费者两方.从电子市场的建立到一个贸易周期的完成,整个交易过程按时间顺序主要包括以下几个阶段:

(1) 销售需求收集阶段:商家将商品的价格计算公式提交给中介系统.为了节约交易成本,商家欢迎大批量购买和配套购买,并为其提供价格上的优惠.为了简化模型,假设市场中只有一个商家,他共有两种商品 A 和 B 待出售,并且假设商品不存在销售数量限制.

(2) 商品信息公开阶段:中介系统将商家的商品信息(包括价格计算公式)在商务网站公布.

(3) 购买需求收集阶段:对商品及其基本价格(中介系统承诺给消费者的价格上限,详见后文)满意并产生购买意图的每个消费者将其商品购买需求提交给中介系统,并假设提交后不能改变购买需求,然后,市场为每一个消费者自动生成一个 Agent 代表此消费者的利益.这里的 Agent(后文中的 Agent 若非特别指出,均指消费者代理 Agent)是具有自主性、反应性、预动性和社会性的计算实体^[15],能够在消费者不干预的情况下代理消费者的最大利益,自主地实现理性决策.购买需求收集通常持续一段时间.为了简化模型,假设市场中的 Agent 按其所代理消费者的购买目标分为两种,分别是只购买单位 A 和只购买单位 B,将上述两种 Agent 依次记为 a 型和 b 型.图 1 中的圆形代表消费者代理 Agent,圆形中的字母标示了该 Agent 的类型.我们假设在此阶段,市场中共生成了 m_a 个 a 型 Agent 和 m_b 个 b 型 Agent.

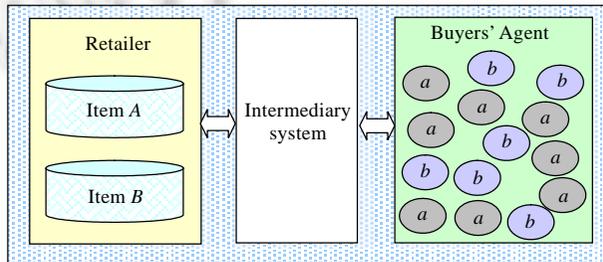


Fig.1 Combinatorial market model

图 1 组合市场模型

(4) 多 Agent 联盟形成阶段:代表不同消费者利益的 Agent 自动协作,通过自由交互结成联盟,为其各自代理的消费者获得商家提供的价格优惠.我们假设市场与 Agent 是完全连通的,但 Agent 缺乏关于市场全局态势的知识,只能根据本地态势进行关于联盟形成的决策:当一个 Agent 遇到另一个 Agent 或一个联盟时,为了获得价格优惠,它可能选择与这个 Agent 结成新联盟或加入原有联盟形成新联盟,但由于缺乏全局知识,它不知道这个新联盟对自己是否最有利,因此,可能在之后选择退出联盟以寻找更好的机会.包括所有消费者代理 Agent 在内的这个具有随机特性的群集多 Agent 系统^[13]就形成了由很多 Agent 个体和不同规模的多 Agent 联盟组成的整体,并在所有 Agent 不断地加入与退出联盟中逐渐达到市场结构的动态平衡.这里,我们假设在交互过程中,中介系统不接受市场外任何新消费者的注册请求,并假设在市场结构达到动态平衡后,中介系统停止联盟形成过程.

(5) 订单整合阶段:市场结构达到平衡状态后,中介系统便停止联盟过程,进入订单整合阶段.包括了两个步骤:首先是中介系统分别整合各 Agent 联盟(将未加入任何联盟的单个 Agent 视作最小联盟)内部的购买需求,计算每个联盟所需求的商品种类、数量及与之相对应的价格(此价格是联盟内 Agent 所代理的消费者将实际支付给中介系统的价格,注意:它不能高于基本价格);然后,中介系统整合所有联盟的购买需求,计算整个市场所需求的商品种类、数量以及与之相对应的价格(此价格是中介系统将实际支付给商家的价格),随后向商家发出订单.中介系统通过赚取消费者对自己的支付和自己对商家的支付之间的差额而从中赢利.

(6) 交易实施阶段:中介系统将订单提交给商家后,交易实施正式启动.中介系统需要在实际交易的资金流和物流中提供安全、信用、认证等中介服务.

将上述贸易过程分别从消费者、商家和中介系统三方的角度来看:

消费者必须信赖中介系统的中介作用,将其购买需求提交后,只需等待中介系统的付款通知,而后进行钱物

交易.在此过程中,消费者必须履行其购买承诺.

商家也必须信赖中介系统的中介作用,在将商品信息提交后,只需等待中介系统的订单,而后进行钱物交易.在此过程中,商家必须履行其销售承诺,尤其是商品质量和价格承诺.

作为独立于买卖双方的第三方,中介系统一面接受商家的销售需求,一面接受消费者的购买需求.在对买卖双方交易自动化的支持、通过利润分割使三方受益和对交易提供安全信用中介服务这 3 方面作用突出:首先,中介系统负担了目前传统商务交易惯例中原本应由买卖双方承担的大量繁琐任务;其次,中介系统通过启动消费者代理 Agent 间的联盟形成过程实现了消费者的集团购买,一方面为商家达成大批量销售和配套销售,另一方面为消费者降低支付价格,同时中介系统自身也可以获得中间利润,达到三方受益的目标;再次,通过保证金、信用机制或其他惩罚机制,中介系统一方面可以保证商家的商品供应及价格等销售承诺的兑现,另一方面也可以保证参与联盟的 Agent 所代理的消费者购买承诺的兑现.

本文主要关注贸易过程的多 Agent 联盟形成阶段和订单整合阶段.下面将探讨上述电子市场模型中多 Agent 联盟形成的效率和效果以及这种协作方法为消费者、商家和中介系统三方带来的收益.

3 组合市场中多 Agent 联盟形成的数学分析

在交易过程的订单整合阶段,中介系统分别整合每一个多 Agent 联盟各自的购买需求以及整个市场的购买需求,每个联盟及市场整体可获得的商品价格由商家提供的价格计算公式给出.在组合市场中,商家给出的商品价格除了与购买数量有关以外,通常还希望配套商品 A 和 B 以一定的比率出售,对于只单独购买其中一种商品或者商品 A 和 B 的购买数量不符合期望比率的购买行为进行一定的价格惩罚.本文沿袭文献[12]的表示方法,假设商家对于同时购买 n_A 数量的商品 A 以及 n_B 数量的商品 B 的购买需求,给出商品 A 的价格 $P_A(n_A, n_B)$ 和商品 B 的价格 $P_B(n_A, n_B)$ 如下:

$$P_A(n_A, n_B) = P_A^0 - \Delta P_A \times n_A + q_A \times |n_A - r \times n_B| \quad (1)$$

$$P_B(n_A, n_B) = P_B^0 - \Delta P_B \times n_B + q_B \times |n_A - r \times n_B| \quad (2)$$

其中: P_A^0 和 P_B^0 分别是商品 A 和 B 的基本价格,是中介系统承诺给消费者的价格上限; ΔP_A 和 ΔP_B 分别是商品 A 和 B 的价格降低率,目的是为了鼓励消费者进行大批量购买提供价格上的优惠; r 给出了卖方对 n_A/n_B 的期望比率值, q_A 和 q_B 是 n_A/n_B 不符合期望比率值 r 时卖方对商品 A 和 B 分别设定的价格惩罚率.如果商家认为商品 A 和 B 之间不存在配套销售的需要,则设定 q_A 和 q_B 为 0.

这种配套销售在传统市场中已相当普遍,在电子市场中也越来越受到重视.例如:瓷器商可能希望一个茶壶搭配 4 个茶杯一起出售,而对单买茶壶或茶杯的顾客,开出的价格一般都高于配套购买的相应价格.而另一方面,只对配套商品中的某一种商品感兴趣的消费者在市场中也是大量存在的,如果个人和商家进行交易,由于价格惩罚的存在,这种消费显然是很不划算的,加上商家为大批量购买提供的价格优惠,使得消费者与购买意图相同及互补的其他消费者结成联盟进行集团购买是很有利可图的.但在传统市场中,这种联盟的形成过程是很困难并且很耗时的,而且利益不同的多个消费者之间很难达成使每个消费者都满意的联盟协议.但是,在以 Agent 为中介的组合贸易电子市场中,市场可以不受时空限制地收集 Internet 上任何消费者提交的购买需求,被赋予不同任务的 Agent 可以实现自动协作,而且 Agent 之间的交互协议可以清楚地加以设定,正如本文设定的由代理 Agent 自动为消费者完成联盟形成的过程一样.此外,中介系统作为买卖双方之间的第三方存在,通过保证金、信用机制或其他惩罚机制,可以保证参与联盟的 Agent 所代理的消费者购买承诺的兑现,也解决了消费者之间的信任危机问题.

为了研究上述联盟形成过程的动态特性,本文沿袭文献[12]的表示方法,以 (i, j) 表示包含 i 个 a 型 Agent 和 j 个 b 型 Agent 的一种联盟类型,而用 $N(i, j, t)$ 表示在时刻 t 这种类型联盟在市場中的数量.图 2 给出了共有 5 个 a 型 Agent 和 5 个 b 型 Agent 的一个简单多 Agent 系统的联盟网格示意图.联盟网格的每个节点上标注的是 t 时刻该类型联盟在市場中的数量(图中将 $N(i, j, t)$ 简称为 $N(i, j)$),因此,联盟网格代表了 t 时刻市場的宏观状态.不同类型联盟的数量随时间在不断变化,直至系统达到宏观上的动态平衡.下面研究这个过程的动态特性.

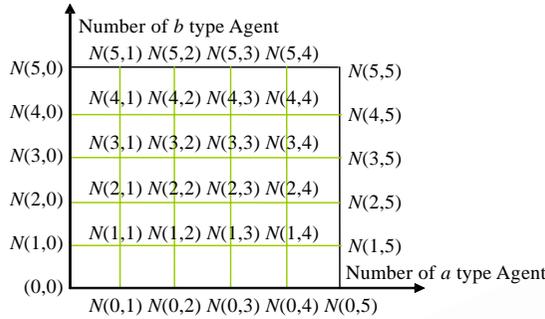


Fig.2 Coalition lattice in a marketplace

图 2 联盟网格示意图

文献[12]假设对于一个给定的联盟,一次至多只有一个 Agent 加入或退出联盟,但 Agent 不能在联盟间转移. 本文认为:上述假设尽管可以简化联盟过程,但是,允许一个 Agent 退出一个联盟,而可能在随后的过程中加入比原联盟对此 Agent 带来的利益更小的联盟,这是不合理的,同时也是低效率的.因为在市场中,消费者(或代表其利益的 Agent)一般只有在发现更好的机会时才会脱离原联盟,而不是随意放弃目前的利益而冒着降低获利的风险来等待更好的机会.因此,我们对文献[12]的上述假设作出修正,假设对于一个给定的联盟,一次至多只有一个 Agent 加入联盟,但是,一个 Agent 一旦进入一个联盟,它就不能退出联盟而独立存在.只能进入比原联盟更优(即可以使此 Agent 所代表的消费者支付降低)的联盟,并假设更优的联盟不包括原联盟类型的联盟(最小的联盟(1,0)和(0,1)除外).因此,不同类型联盟间的转换包括且仅包括以下 4 种:

$$\begin{aligned}
 (1,0)+(n_a,n_b) &\Rightarrow (n_a+1,n_b); & (0,1)+(n_a,n_b) &\Rightarrow (n_a,n_b+1); \\
 \left\{ \begin{array}{l} (n_a,n_b) \Rightarrow (n_a-1,n_b) \\ \downarrow (1,0) \\ (n'_a,n'_b) \Rightarrow (n'_a+1,n'_b) \end{array} \right. &; & \left\{ \begin{array}{l} (n_a,n_b) \Rightarrow (n_a,n_b-1) \\ \downarrow (0,1) \\ (n'_a,n'_b) \Rightarrow (n'_a,n'_b+1) \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

在上述转换 ~ 转换 中,表示联盟类型的每个(g,h)都满足 0≤g≤m_a,0≤h≤m_b 且 g+h>0.并且,转换 和转换 中都有 n_a=n'_a 且 n_b=n'_b 不同时成立.此外,转换 中,根据价格计算式(1),有 P_A(n_a,n_b)>P_A(n'_a+1,n'_b);转换 中,根据价格计算式(2),有 P_B(n_a,n_b)>P_A(n'_a,n'_b+1).

转换 表示当一个独立存在的 a 型 Agent 加入一个(n_a,n_b)类型的联盟时,则生成一个新的(n_a+1,n_b)类型的联盟;转换 表示当一个独立存在的 b 型 Agent 加入一个(n_a,n_b)类型的联盟时,则生成一个新的(n_a,n_b+1)类型的联盟;转换 表示当一个 a 型 Agent 退出一个(n_a,n_b)类型的联盟同时进入一个比原联盟更优的(n'_a,n'_b)类型的联盟时,则此(n_a,n_b)类型的联盟转变为一个新的(n_a-1,n_b)类型的联盟,而此(n'_a,n'_b)类型的联盟转变为一个新的(n'_a+1,n'_b)类型的联盟;转换 表示当一个 b 型 Agent 退出一个(n_a,n_b)类型的联盟同时进入一个比原联盟更优的(n'_a,n'_b)类型的联盟时,则此(n_a,n_b)类型的联盟转变为一个新的(n_a,n_b-1)类型的联盟,而此(n'_a,n'_b)类型的联盟转变为一个新的(n'_a,n'_b+1)类型的联盟.

图 3 给出了联盟网格中一个(n_a,n_b)类型的联盟可能发生的转换,当(n_a,n_b)在联盟网格的边界点上时,图中有些转换不会发生.根据群集系统的速率方程^[13],除了联盟网格的边界点(1,0)和(0,1),对所有的(n_a,n_b),联盟转换的动态特性可由下面的等式给出:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N(n_a,n_b,t)}{\partial t} &= K_1'N(n_a+1,n_b,t) + K_2N(n_a-1,n_b,t) + K_3'N(n_a,n_b+1,t) + K_4N(n_a,n_b-1,t) \\
 &\quad - K_1N(n_a,n_b,t) - K_2'N(n_a,n_b,t) - K_3N(n_a,n_b,t) - K_4'N(n_a,n_b,t) \tag{3}
 \end{aligned}$$

其中:系数 K_i 及 K'_i (i=1,...,4) 依赖于联盟发生转换时所引发的价格变化;式中有 0≤n_a≤m_a 和 0≤n_b≤m_b, 且 n_a+n_b≥2; 而且市场中 Agent 的总数在过程中保持不变.当(n_a,n_b)超出了联盟网格的边界时,式(3)中的相关项为 0,即当 0≤n_a≤m_a 和 0≤n_b≤m_b 中有任何一项不被满足或者 n_a=n_b=0 时,有 N(n_a,n_b)=0.

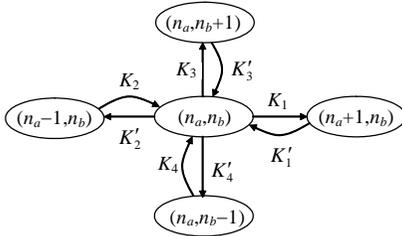


Fig.3 Coalition transitions
图 3 联盟转换

式(3)中,项 $K'_1N(n_a+1, n_b, t)$ 给出了 (n_a+1, n_b) 类型的联盟在时刻 t 变为 (n_a, n_b) 类型联盟的机率,即 (n_a+1, n_b) 类型的联盟中的一个 a 型 Agent 在时刻 t 转移到比原联盟更优的联盟的机率。

项 $K_2N(n_a-1, n_b, t)$ 给出了时刻 t 一个 a 型 Agent 加入 (n_a-1, n_b) 类型联盟的机率,即 (n_a-1, n_b) 类型的联盟在时刻 t 变为 (n_a, n_b) 类型联盟的机率,这其中包括两种转换:一种是一个独立存在的 a 型 Agent 加入 (n_a-1, n_b) 类型联盟;另一种是不比 (n_a, n_b) 类型联盟更优的联盟中一个 a 型 Agent 转移到 (n_a-1, n_b) 类型联盟。

项 $K_1N(n_a, n_b, t)$ 给出了一个 a 型 Agent 在时刻 t 加入 (n_a, n_b) 类型联盟的机率,即 (n_a, n_b) 类型的联盟在时刻 t 变为 (n_a+1, n_b) 类型联盟的机率,这其中也包括两种转换:一种是一个独立存在的 a 型 Agent 加入 (n_a, n_b) 类型联盟;另一种是不比 (n_a+1, n_b) 类型联盟更优的联盟中一个 a 型 Agent 转移到 (n_a, n_b) 类型联盟。

项 $K'_2N(n_a, n_b, t)$ 给出了 (n_a, n_b) 类型联盟中的一个 a 型 Agent 在时刻 t 退出联盟的机率,即 (n_a, n_b) 类型的联盟中的一个 a 型 Agent 在时刻 t 转移到比原联盟更优联盟的机率。

式(3)中关于 b 型 Agent 的 4 个相关项可以类似地加以解释,这里不再赘述。

下面研究动态方程式(3)中各系数的实际意义,首先要给出下面两个基本假设:

假设 1. 假设一个独立存在的 a 型 Agent 加入一个联盟的机率仅与其加入联盟这个动作所引发的该联盟内商品 A 的价格(由价格计算公式(1)可得)变化相关,并且当价格变化大于或等于 0(即价格不变或升高)时,加入联盟的机率为 0;而当价格变化小于 0(即价格降低)时,加入联盟的机率随价格变化的升高呈线性降低(如图 4 所示,图中 k 为转移率常数,其取值必须使在绝对值最大的 ΔP 下, r 值都不能大于 1);类似地,一个独立存在的 b 型 Agent 加入一个联盟的机率仅与其加入联盟这个动作所引发的该联盟内商品 B 的价格(由价格计算公式(2)可得)变化相关,并且当价格变化大于或等于 0 时,加入联盟的机率为 0;而当价格变化小于 0 时,加入联盟的机率随价格变化的升高呈线性降低。

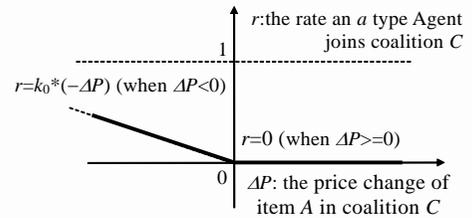


Fig.4 Relation between price change and the rate an Agent join a coalition

图 4 价格变化与 Agent 加入联盟机率的关系

假设 2. 假设一个联盟中的一个 a 型 Agent 退出此联盟,而转移到另一个比原联盟更优联盟的机率与一个独立存在的 a 型 Agent 进入这个更优的联盟的机率相等;类似地,一个联盟中的一个 b 型 Agent 退出此联盟,而转移到另一个比原联盟更优联盟的机率与一个独立存在的 b 型 Agent 进入这个更优的联盟的机率相等。

假设 3. 基于假设 1,我们要假设根据价格计算公式(1)和公式(2), $P_A(1,0) > P_A(2,0)$, $P_B(0,1) > P_B(0,2)$, $P_A(1,0) > P_A(1,1)$ 和 $P_B(0,1) > P_B(1,1)$ 这 4 个不等式中必须至少有一个是成立的,否则,整个市场状态将始终维持在 0 时刻的原始状态而不发生任何变化。

下面介绍系数 K'_1 的计算。

由于系数 K'_1 是一个 (n_a+1, n_b) 类型的联盟中的一个 a 型 Agent 向更优联盟的转移机率,因此与市场内所有比 (n_a+1, n_b) 类型联盟更优的联盟都相关。根据假设 2,上述机率与一个独立存在的 a 型 Agent 进入比 (n_a+1, n_b) 类型联盟更优的联盟的机率相等。而一个独立存在的 a 型 Agent 进入一个 (i, j) 类型的联盟(其中, $m_a-1 \geq i$ 且 $m_b \geq j$ 且 $P_A(n_a+1, n_b) > P_A(i+1, j)$)时,此 (i, j) 类型的联盟变为一个 $(i+1, j)$ 类型的联盟。

由式(1)可得,一个 (i, j) 类型的联盟可获得商品 A 的价格为

$$P_A(i, j) = P_A^0 - \Delta P_A \times i + q_A \times |i - r \times j|,$$

而一个 $(i+1, j)$ 类型的联盟可获得商品 A 的价格为

$$P_A(i+1, j) = P_A^0 - \Delta P_A \times (i+1) + q_A \times |i+1 - r \times j|.$$

因此,一个独立存在的 a 型 Agent 进入一个 (i,j) 类型的联盟所引发该联盟内商品 A 的价格变化为

$$P_A(i+1,j)-P_A(i,j)=-\Delta P_A+q_A\times(|i+1-r\times j|-|i-r\times j|).$$

因此,根据假设 1 和假设 2 并考虑到边界情况,可得转移率为

$$K'_1 = \begin{cases} K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a-1, m_b} [N(i, j, t) \times (\Delta P_A - q_A \times (|i+1-r\times j|-|i-r\times j|): 0) \times (P_A(n_a+1, n_b), \\ &P_A(i+1, j): 1, 0)] - N(n_a+1, n_b, t) \times (\Delta P_A - q_A \times (|n_a+2-r\times n_b|- \\ &|n_a+1-r\times n_b|): 0) \times (P_A(n_a+2, n_b), P_A(n_a+1, n_b): 1, 0) \end{aligned} \right\}, & \text{当 } n_a \leq m_a - 2 \text{ 时,} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $(e, f: g, h) = \begin{cases} g, & \text{当 } e > f \\ h, & \text{当 } e \leq f \end{cases}; (g: h) = \begin{cases} g, & \text{当 } g > h \\ h, & \text{当 } g \leq h \end{cases}; K_0$ 是转移率常数.下同.

类似地,我们可以得到其他参数如下:

$$K_2 = \begin{cases} K_0 \times N(1, 0, t) \times (\Delta P_A - q_A (|n_a - r \times n_b| - |n_a - 1 - r \times n_b|: 0)), & \text{当 } n_a + n_b = 2 \text{ 时} \\ K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} [N(i, j, t) \times (P_A(n_a, n_b), P_A(i, j): 0, 1) - N(n_a - 1, n_b, t) \times \\ &(P_A(n_a, n_b), P_A(n_a - 1, n_b): 0, 1) \end{aligned} \right\} \times & ; \\ (\Delta P_A - q_A (|n_a - r \times n_b| - |n_a - 1 - r \times n_b|): 0), & \text{其他} \end{cases}$$

$$K_1 = \begin{cases} K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} [N(i, j, t) \times (P_A(n_a+1, n_b), P_A(i, j): 0, 1) - N(n_a, n_b, t) \times \\ &(P_A(n_a+1, n_b), P_A(n_a, n_b): 0, 1) \end{aligned} \right\} \times & ; \\ (\Delta P_A - q_A (|n_a+1-r\times n_b|-|n_a-r\times n_b|): 0), & \text{当 } n_a \geq 1 \text{ 时} \\ K_0 \times N(1, 0, t) \times (\Delta P_A - q_A (|1-r\times n_b|-|r\times n_b|): 0), & \text{当 } n_a = 0 \text{ 时} \end{cases}$$

$$K'_2 = \begin{cases} K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a-1, m_b} [N(i, j, t) \times (\Delta P_A - q_A \times (|i+1-r\times j|-|i-r\times j|): 0) \times (P_A(n_a, n_b), \\ &P_A(i+1, j): 1, 0)] - N(n_a, n_b, t) \times (\Delta P_A - q_A \times (|n_a+1-r\times n_b|- \\ &|n_a-r\times n_b|): 0) \times (P_A(n_a, n_b), P_A(n_a+1, n_b): 1, 0) \end{aligned} \right\}, & \text{当 } n_a < m_a - 1 \text{ 时;} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$K'_3 = \begin{cases} K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a-1, m_b} [N(i, j) \times (\Delta P_B - q_B \times (|i-r\times j-r|-|i-r\times j|): 0) \times (P_B(n_a, n_b+1), \\ &P_B(i, j+1): 1, 0)] - N(n_a, n_b+1, t) \times (\Delta P_B - q_B \times (|n_a-r\times n_b-2r|- \\ &|n_a-r\times n_b-r|): 0) \times (P_B(n_a, n_b+2), P_B(n_a, n_b+1): 1, 0) \end{aligned} \right\}, & \text{当 } n_b \leq m_b - 2 \text{ 时;} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$K_4 = \begin{cases} K_0 \times N(1, 0, t) \times (\Delta P_B - q_B \times (|n_a - r \times n_b| - |n_a - r \times n_b + r|): 0), & \text{当 } n_a + n_b = 2 \text{ 时} \\ K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} [N(i, j, t) \times (P_B(n_a, n_b), P_B(i, j): 0, 1) - N(n_a, n_b - 1, t) \times \\ &(P_B(n_a, n_b), P_B(n_a, n_b - 1): 0, 1) \end{aligned} \right\} \times & ; \\ (\Delta P_B - q_B (|n_a - r \times n_b| - |n_a - r \times n_b + r|): 0), & \text{其他} \end{cases}$$

$$K_3 = \begin{cases} K_0 \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} [N(i, j, t) \times (P_B(n_a, n_b+1), P_B(i, j): 0, 1) - N(n_a, n_b, t) \times \\ &(P_B(n_a, n_b+1), P_B(n_a, n_b): 0, 1) \end{aligned} \right\} \times & ; \\ (\Delta P_B - q_B (|n_a - r \times n_b - r| - |n_a - r \times n_b|): 0), & \text{当 } n_b \geq 1 \text{ 时} \\ K_0 \times N(1, 0, t) \times (\Delta P_B - q_B (|n_a - r| - |n_a|): 0), & \text{当 } n_b = 0 \text{ 时} \end{cases}$$

$$K'_4 = \begin{cases} K_0 \times \begin{cases} \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b-1} [N(i, j) \times (\Delta P_B - q_B \times (|i-r \times j-r| - |i-r \times j|) : 0) \times (P_B(n_a, n_b), \\ P_B(i, j+1) : 1, 0)] - N(n_a, n_b, t) \times (\Delta P_B - q_B \times (|n_a - r \times n_b - r| - \\ |n_a - r \times n_b|) : 0) \times (P_B(n_a, n_b+1), P_B(n_a, n_b+1) : 1, 0) \end{cases}, & \text{当 } n_b < m_b - 1 \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由于 P_A^0 和 P_B^0 没有出现在任意参数中,因此,商品 A 和 B 的原始价格对动态方程式(3)没有影响。

在确定所有的系数并获得系统在时刻 t 的即时状态后, $N(n_a, n_b, t)$ 的变化即可求得。

为了研究上述群集多 Agent 系统的动态特性,我们将通过仿真实验分析在不同的参数值下, $N(n_a, n_b, t)$ 随时间 t 从初始状态至平衡状态下的动态演化过程。

根据上面的推导,除了联盟网格的边界点(1,0)及(0,1),对所有的 (n_a, n_b) ,联盟的数量可用下式更新:

$$N(n_a, n_b, t + \Delta t) \leftarrow N(n_a, n_b, t) + \left[\frac{\partial N(n_a, n_b, t)}{\partial t} \right] \Delta t.$$

在更新过程中,时间步长 Δt 应该取得足够小,并且市场中任何一种类型联盟的数量都不能小于 0。

对联盟网格的边界点(1,0)及(0,1),即所有多 Agent 联盟外独立存在的两类 Agent 个体数目的更新可在上述所有其他 $N(n_a, n_b, t)$ 更新后用下面的等式进行更新:

$$\sum_{n_a, n_b=0}^{m_a, m_b} n_a N(n_a, n_b, t + \Delta t) = m_a; \quad \sum_{n_a, n_b=0}^{m_a, m_b} n_b N(n_a, n_b, t + \Delta t) = m_b.$$

4 仿真实验结果及分析

下面将通过几个仿真实验来分析上一节组合贸易电子市场模型中多 Agent 联盟形成过程的宏观特性以及这种协作方法为消费者、商家和中介系统三方带来的收益,以验证这种协作方法在组合市场中的可行性和有效性以及中介型电子商务系统这种市场模式存在的价值。

在仿真实验中,我们设置 $m_a = m_b = 50$,在初始状态即 $t=0$ 时, $N(1,0,0) = m_a$, $N(0,1,0) = m_b$,除此以外,其他所有 $N(n_a, n_b, 0) = 0$ 。

首先研究市场状态随时间的演化。下面给出仿真实验中使用的参数值: $r=0.5$, $\Delta P_A = \Delta P_B = 0.05$, $q_A = q_B = 0.1$ 。

图 5(a)和图 5(b)给出了迭代 10 次和 1 000 次后的市场状态(即不同联盟的数量),图 5(c)给出了达到平衡态后(约在 1.3 万次迭代后达到平衡态)的市场状态,其中水平的两个坐标轴围成联盟网格(如图 2 所示),每个 (n_a, n_b) 点 $(n_a, n_b$ 为自然数且 $n_a \leq m_a, n_b \leq m_b)$ 表示一种联盟类型,而纵坐标为每种类型联盟的即时数量,即 $N(n_a, n_b, t)$ 。如图 5 所示,在联盟过程开始时,大部分 Agent 都在包含较少 a 型 Agent 和 b 型 Agent 的规模较小的联盟中,而随着迭代次数的增加,规模较小的联盟数量减少,而包含较多 a 型 Agent 和 b 型 Agent 的规模较大的联盟增加,直至市场达到平衡状态。

在多 Agent 联盟形成过程中,本文设定联盟中的 Agent 不能退出联盟而独立存在,只能转移进入更优的联盟;而文献[12]中假设 Agent 不能在联盟之间转移,退出联盟的 Agent 是独立存在的,只能在下一次迭代中参与联盟。本文的参数值采用了与文献[12]中仿真实验同样的参数值,而文献[12]的仿真结果是在迭代大于 10 万次后才达到系统的平衡态,本文的仿真达到平衡态的速度比文献[12]快了近 10 倍。因此,与文献[12]相比,本文的设定提高了联盟形成的效率。

通过对图 5 的观察,我们注意到,由于设定的 r 值为 0.5 而不是 1,市场中 a 型 Agent 和 b 型 Agent 的分布并不是对称的。因为包含的 b 型 Agent 数量是 a 型 Agent 数量的两倍的联盟受到的价格惩罚最小(为 0),因此,虽然直观上考虑在平衡状态时似乎大部分 Agent 应该集中在规模较大的联盟,但实际并非如此,图 6 给出的平衡态下不同类型联盟中的 Agent 数量说明了这一点。这个结果与文献[8]中大部分 Agent 都参与了最大规模的联盟不同,原因是,我们研究的组合市场中商家的价格设定与文献[8]中非组合市场有较大差异,不仅与联盟内两种 Agent 的数量有关,而且与两种 Agent 数量的比例有关。

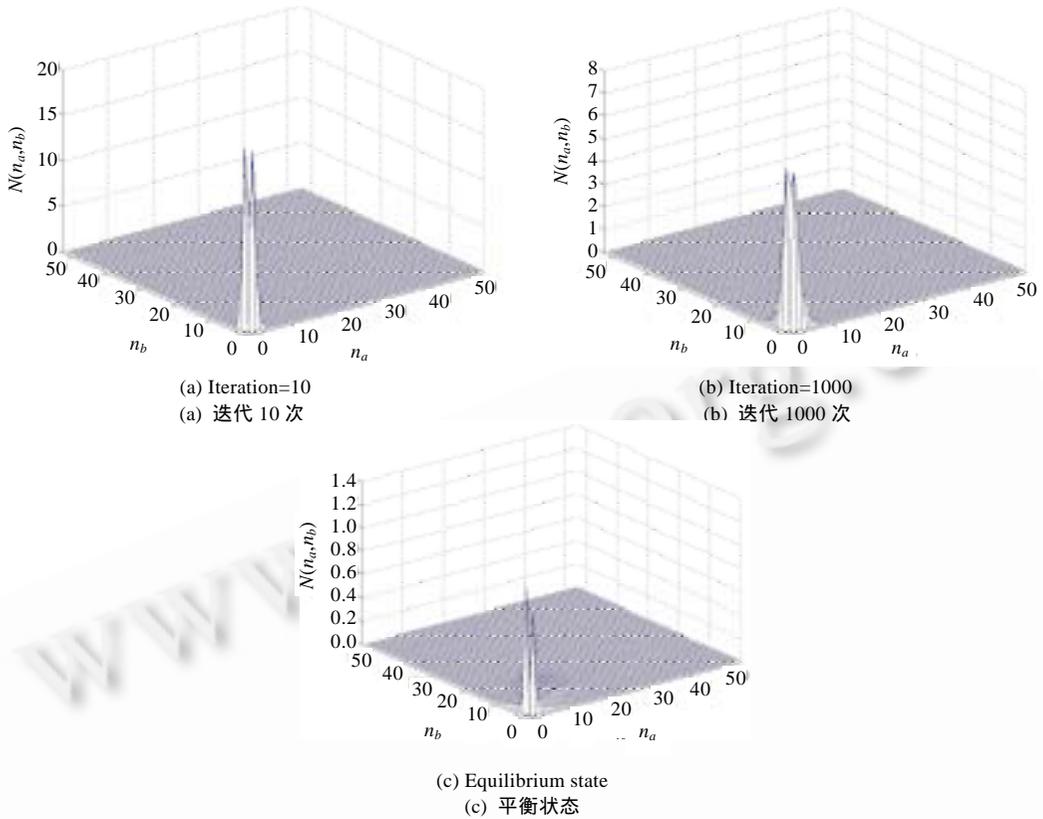


Fig.5 Coalitions change as a function of iterations

图 5 不同迭代次数下的联盟状态变化

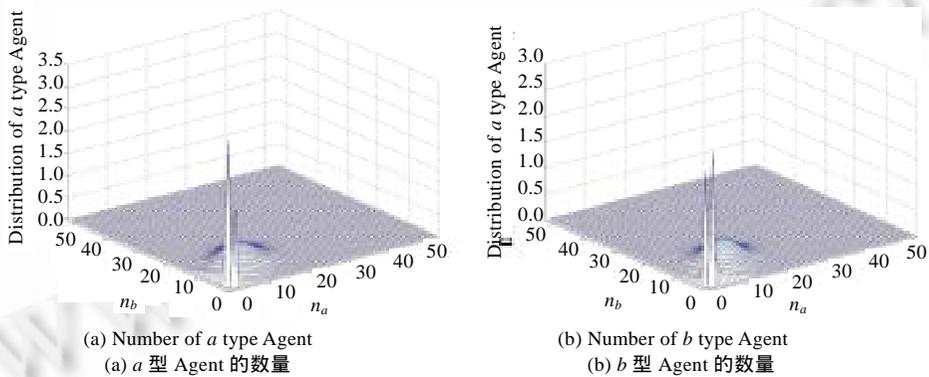


Fig.6 Number of Agent in different coalitions at equilibriums state

图 6 平衡态下不同类型联盟中的 Agent 数量

图 7 给出了系统的熵(在封闭体系中对无序和随机的计量单位)随迭代次数的变化.以下设置商品 A 和商品 B 的基本价格 $P_A^0 = 2.85$ 和 $P_B^0 = 5.1$.为根据各种类型联盟的数量计算系统的熵,我们首先计算系统中一种给定类型联盟存在的概率:

$$P_{N(i, j, t)} = N(i, j, t) / \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} N(i, j, t).$$

整个多 Agent 系统在时刻 t 关于联盟规模的熵可由下式给出:

$$H_N = - \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} P_{N(i, j, t)} \log(P_{N(i, j, t)}) .$$

类似地,时刻 t 对不同类型联盟中 a 型 Agent 和 b 型 Agent 的熵可由下面两个等式给出:

$$H_A = - \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} \frac{i \times N(i, j, t)}{m_a} \log\left(\frac{i \times N(i, j, t)}{m_a}\right); H_B = - \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} \frac{j \times N(i, j, t)}{m_b} \log\left(\frac{j \times N(i, j, t)}{m_b}\right) .$$

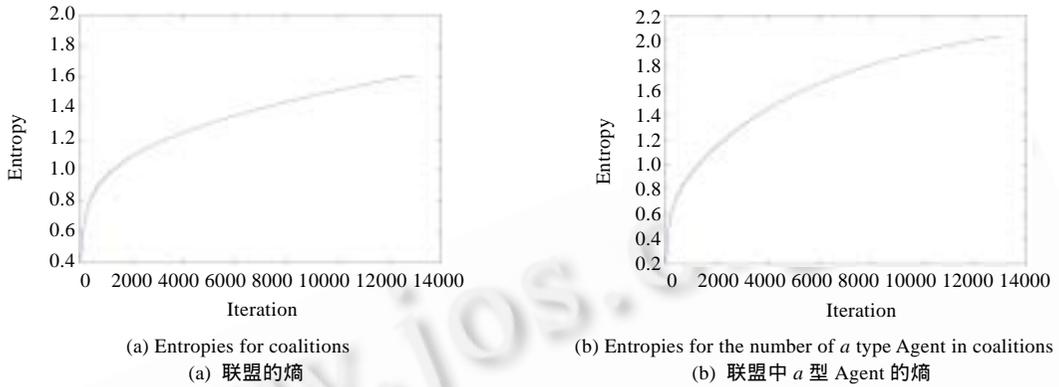


Fig.7 The entropies for coalitions and the number of a type Agent in coalitions

图 7 联盟及联盟中 a 型 Agent 的熵

从图 7 可见:无论是联盟的熵还是 a 型 Agent 的熵,随着迭代次数的增加也都在增加,直至系统达到平衡态.

系统中所有 a 型 Agent 所获得商品 A 的平均价格和所有 b 型 Agent 所获得商品 B 的平均价格是衡量整个组合市场中多 Agent 联盟形成效果的重要指标.这两个平均价格可由下面的等式分别给出:

$$AveragePa = \frac{\sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} P'_A(i, j) \times i \times N(i, j, t)}{m_a}; AveragePb = \frac{\sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} P'_B(i, j) \times j \times N(i, j, t)}{m_b} .$$

其中, $P'_A(i, j) = \min(P_A(i, j), P_A^0)$, $P'_B(i, j) = \min(P_B(i, j), P_B^0)$,这是因为中介系统承诺消费者支付的最高价格为商品的基本价格.

图 8 给出了市场中所有 Agent 所获得商品 A 和 B 的平均价格的演化过程,可以发现:这两个平均价格持续降低直至系统达到平衡态.在采用同样参数值的情况下,在文献[12]达到平衡态时,市场中所有 Agent 所获得商品 A 和 B 的平均价格约为 2.45 和 4.5,均高于图 8 中我们获得的平衡态时的平均价格.因此,与文献[12]相比,本文对 Agent 间交互协议的设定不仅提高了联盟形成的效率,也提高了联盟形成的效果.

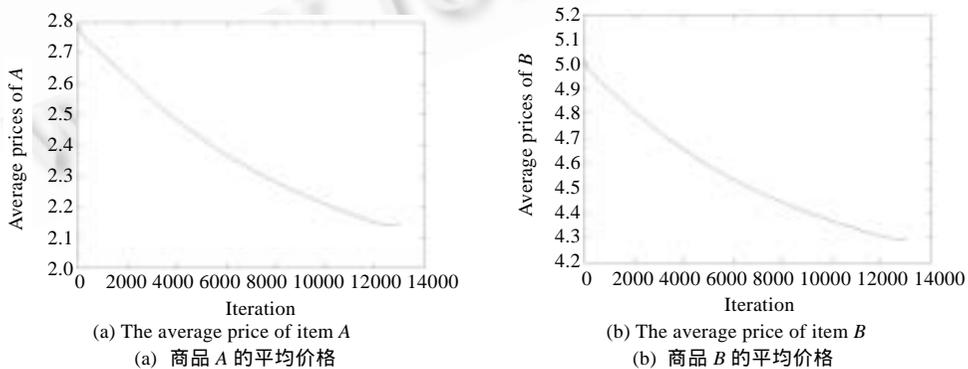


Fig.8 The average prices of item A and B for all Agent in the market

图 8 市场中所有 Agent 所获得商品 A 和 B 的平均价格

在交易过程的订单整合阶段,首先中介系统分别整合各 Agent 联盟(这里将未加入任何联盟的单个 Agent 视作最小联盟)内部的购买需求,计算每个联盟所需求的商品种类、数量及与之相对应的价格(此价格是联盟内 Agent 所代理的消费者将实际支付给中介系统的价格,注意,它不能高于基本价格),然后中介系统整合所有联盟的购买需求,计算整个市场所需求的商品种类、数量及与之相对应的价格(此价格是中介系统将实际支付给商家的价格).中介系统通过赚取消费者对自己的支付和自己对商家的支付之间的差额从中赢利.此利润可由下面的等式给出:

$$Gain = \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} P'_A(i, j) \times i \times N(i, j, t) + \sum_{i=0, j=0}^{m_a, m_b} P'_B(i, j) \times j \times N(i, j, t) - m_a \times P_A(m_a, m_b) - m_b \times P_B(m_a, m_b).$$

其中, $P'_A(i, j) = \min(P_A(i, j), P_A^0)$, $P'_B(i, j) = \min(P_B(i, j), P_B^0)$.

图9给出了中介系统的获利曲线.可以发现,中介系统所能获得的利润持续降低直至系统达到平衡态.但是,尽管中介系统所能获得的利润在联盟形成过程中有所降低,但达到平衡态时中介系统最终可以获得的利润仍然是很可观的.因此,我们可以分析中介系统、消费者和商家三方的收益情况:

对消费者来说,在满意的商品基本价格基础上,通过向中介系统提交需求,消费者可能获得更优惠的价格,至少也能够得到基本价格的保证,因此中介系统对消费者是非常有利可图的.

对中介系统来说,尽管对已经提交购买需求的消费者不进行任何的联盟形成对中介系统自身的短期效用(即获利)最高,但是,通过联盟形成,将一部分利益转移给消费者,一方面自身仍可以获得可观的利润(尽管比不进行联盟形成所获得的利润要低),另一方面却能极大地提高对消费者的吸引力,从中介系统发展的长期利益来看,这对中介系统是非常有益的.

对商家来说,尽管表面上来看,中介系统进行的多 Agent 联盟形成过程并没有增加商家的销售量和收益,但是通过上面的分析可知:由于大批量销售和配套销售对商家来说是有利可图的,因此,对消费者有很大吸引力的中介系统所能聚集的大量客源仍是任何商家争取的目标;此外,由于中介系统负担了目前传统商务交易惯例中原本应由商家承担的大量繁琐任务,商家需要亲力亲为的工作已经压缩到尽量少,这对于商家也是大有裨益的.

通过上面的分析可见:中介系统所进行的多 Agent 联盟形成这种协作方法对消费者、商家和中介系统三方均是有利可图的,这正是中介型商务系统这种新的电子市场模式存在的价值.

5 结 论

本文采用了一种基于物理性质的方法来研究组合贸易电子市场中消费者代理 Agent 的联盟形成过程,给出了一种中介主导的组合电子市场模型,定义了从电子市场的建立到一个贸易周期的完成.其整个过程主要包括了各交易阶段及其贸易参与各方的权责,并针对大量消费者代理 Agent 的联盟形成过程,在宏观层次通过一个微分方程给出了对市场结构动态特性的描述.通过数值仿真实验分析了多 Agent 联盟形成过程的宏观特性以及这种协作方法为消费者、商家和中介系统三方带来的收益,验证了多 Agent 联盟形成在组合市场中的可行性和有效性,以及中介型商务系统这种新的电子市场模式存在的价值.通过与相关工作的比较,证明了本文提出的中介主导的组合电子市场模型提高了多 Agent 联盟形成的效率和效果.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是国防科学技术大学信息系统与管理学院姚莉教授领导的课题小组的同学和老师们表示感谢.

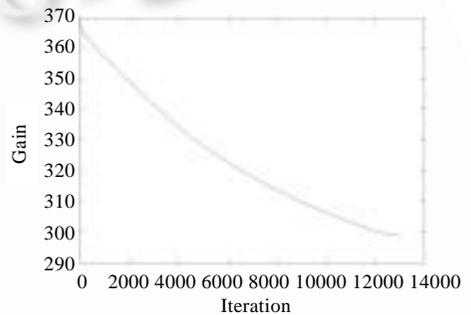


Fig.9 Gain of the intermediary system

图9 中介系统获利曲线

References:

- [1] Sandholm T. An algorithm for optimal winner determination in combinatorial auction. In: Dean T, ed. Proc. of the 16th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI'99). Stockholm: Morgan Kaufmann, 1999. 542-547.
- [2] Lehmann D, ItaO'Callaghan L, Shoham Y. Truth revelation in approximately efficient combinatorial auction. In: Proc. of the 1st ACM Conf. on Electronic Commerce (EC'99). 1999. 96-102. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=336992.337016>
- [3] Rothkopf MH, Pecek A, Harstad RM. Computationally manageable combinatorial auctions. Management Science, 1998,44(8): 1131-1147.
- [4] Hoos H, Boutilier C. Solving combinatorial auctions using stochastic local search. In: Proc. of the National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI). 2000. 22-29. <http://www.cs.ubc.ca/~hoos/Publ/aaai00-ca.pdf>
- [5] Sandholm T, Suri S. Improved algorithms for optimal winner determination in combinatorial auctions and generalizations. In: Proc. of the National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI). 2000. 90-97. <http://wireless.fcc.gov/auctions/conferences/combin2001/papers/sandholm4.pdf>
- [6] He MH, Jennings NR, Leung HF. On Agent-mediated electronic commerce. 2006. <http://ecommerce.media.mit.edu>
- [7] Shehory O, Kraus S. Methods for task allocation via Agent coalition formation. Artificial Intelligence, 1998,101(1-2):165-200.
- [8] Lerman K, Shehory O. Coalition formation for large-scale electronic markets. In: Proc. of the Int'l Conf. on Multi-Agent Systems (ICMAS 2000). 2000. 167-174. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICMAS.2000.858449>
- [9] Tsvetovat M, Sycara K. Customer coalitions in electronic markets. In: Proc. of the ACM Conf. on Electronic Commerce 2000. 2000. 121-138. <http://link.springer.de/link/service/series/0558/bibs/2003/20030121.htm>
- [10] Ito T, Ochi H, Shintani T. A group buy protocol based on coalition formation for Agent-mediated E-commerce. Int'l Journal of Computer & Information Science (IJCIS), 2002,3(1):31-37.
- [11] Yamamoto J, Sycara K. A stable and efficient buyer coalition formation scheme for E-marketplaces. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Autonomous Agents (Agents 2001). 2001. 576-583. <http://portal.acm.org/>
- [12] Ye YM, Tu YH. Dynamics of coalition formation in combinatorial trading. In: Gottlob G, Walsh T, eds. Proc. of the 18th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2003). Acapulco: Morgan Kaufmann, 2003. 625-630.
- [13] Lerman K, Galstyan A. A general methodology for mathematical analysis of multi-Agent systems. Technology Report, 529, Information Science Institute, University of Southern California, 2001.
- [14] Li CH, Sycara K. Algorithm for combinatorial coalition formation and payoff division in an electronic marketplace. AAMAS-02. 2002. 120-127. <http://doi.acm.org/10.1145/544741.544771>
- [15] Yao L, Zhang WM. Intelligent and Cooperative Information Technology. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [15] 姚莉,张维明.智能协作信息技术.北京:电子工业出版社,2002.



龚勇(1977 -),男,山东泰安人,博士,主要研究领域为多 Agent 联盟,电子商务.



沙基昌(1945 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为系统工程,军事运筹.



姚莉(1965 -),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能,智能决策.