doi:10.3969/j.issn.1673-4785.2010.02.011

MAS 动态协作任务求解模型与算法

蒋伟进[1,2],骆　菲[2],史德嘉[1]
(1.湖南商学院 计算机应用研究所,湖南 长沙 410205;2.湘潭大学 信息工程学院,湖南 湘潭 4110006)

摘　要:针对网格环境的自治性、动态性、分布性和异构性等特征.提出基于多智能体系统(mutil agent system, MAS)博弈协作的资源动态分配和任务调度模型,建立了能够反映供求关系的网格资源调度动态任务求解算法,证明了资源分配博弈中 Nash 均衡点的存在性、惟一性和 Nash 均衡解.该方法能够利用消费者 Agent 的学习和协商能力,引入消费者的心理行为,使消费者的资源申请和任务调度具有较高的合理性和有效性.实验结果表明,该方法在响应时间的平滑性、吞吐率及任务求解效率方面比传统算法要好,从而使得整个资源供需合理、满足用户 QoS 要求.

关键词:资源优化调度;动态协作;博弈计算;MAS
中图分类号: TP393; TP311　**文献标识码**:A　**文章编号**:1673-4785(2010)02-0161-08

Modeling and solving dynamic collaborative tasks in a multi-Agent system

JIANG Wei-jin[1,2], LUO Fei[1], SHI De-jia[1]
(1.School of Computer, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China; 2.School of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411006, China)

Abstract: A grid environment is characterized by its autonomy, its dynamic properties, its distributive properties, and its heterogeneity. We proposed a model for dynamic resource distribution and task scheduling based on a multi-agent system (MAS) collaborative game. An algorithm for dynamically solving task scheduling of grid resources was developed. It reflected actual relationships between supply and demand. The existence and uniqueness of a Nash equilibrium point in the resource distribution game was proven, and then the Nash equilibrium solution presented. The proposed method can make full use of the learning and negotiating abilities of consumer agents and also introduces psychologically driven behavior. In this way the resource application and task scheduling of consumers became more reasonable and effective. Experimental results demonstrated that this approach improves smoothness, throughput capacity and task solving efficiency compared to traditional methods. Supply and demand became more manageable, meeting the requirements of quality of service (QoS).

Keywords: resource allocation model; dynamic collaboation; game compute; multi-Agent system (MAS)

随着网格技术的飞速发展,网格计算已成为解决大规模复杂的问题的有效手段. 高效的资源调度策略可以充分利用网格系统的处理能力[1],从而提高网格应用程序的性能,以便更好地利用网格资源. 然而要实现高效的网格计算需要处理许多复杂的问题,其中,资源调度问题是网格研究中所必须解决的一个关键问题. 由于网格环境中资源的多样性、自治性和动态性,使得网格环境下的资源调度比传统环境下的调度要复杂得多[2]. 虽然随着网格技术的发展以及资源服务化,出现了基于服务的网格标准[2],这在某种程度上统一了资源的呈现方式,简化了任务调度的接口,但网格环境中资源的自治性和动态性依然存在. 而且,在实际应用中,大量的资源并不是无偿使用的,要吸引资源的拥有者加入网格,就必须保证其利益. 面对不断变化的资源供求关系,网格资源的价格因素也变得尤为重要[3]. 因此,如何在一个异构、动态、自治的分布式计算环境中支持动态资源的共享和协同,已成为亟待解决的问题.

收稿日期:2009-12-20.
基金项目:湖南省自然科学基金重点资助项目(06JJ2033);湖南省社会科学基金资助项目(07YBB239).
通信作者:蒋伟进. E-mail: jlwxjh@163.com.

分布式系统上的资源调度就是为系统的每一个

计算任务分配一定的资源,并指派占用这些资源的起止时间,以尽可能早地完成任务.资源调度实际上是根据任务和资源的特性采用不同的算法将任务映射到相应的资源上执行的过程.围绕着网格中的资源调度,国内外已做了许多研究工作,先后提出了多种调度算法.从博弈经济学的角度出发,对供需状态始终处于动态变化中的计算网格资源进行调度是一种良好的思维方式.文献[4]在基于经济学原理的资源调度实验中,由于资源价格是根据资源的重要性事先指定,因此很难保证其资源配置分布决策的最优性;文献[5]提出分布调价 WALRAS 算法,并讨论了其适用的条件;文献[6]对集中式调价算法和分布调价 WALRAS 算法的性能进行了比较;文献[7]结合集中式同步调价算法速度快和分布调价 WALRAS 算法可扩展性的优点,提出一种分布分组调价算法;Buyya 和 Abramson 等人[8-12]讨论了各种有代表性的基于经济网格资源管理原理,如拍卖模型、多商品交换模型、合同模型、议价模型等,提出了一种基于经济理论的以服务为中心、可扩展的网格体系结构(grid architecture for computational economy,GRACE),并给出了基于现有网格技术的实现方法,介绍了资源调度的物品交易模型和拍卖模型,以及物品经济模型在计算网格和数据网格的资源管理和调度中的应用;文献[13]应用微观经济学理论提出了一种基于日用品市场的网格资源定价算法,使供求曲线快速收敛,很快达到均衡价格;文献[14]以一般均衡理论为基础,依靠市场机制,提出了一种基于市场机制的资源调度方法,实现的计算网格资源的优化调度是一种分布式资源调价方法;Wolski[15]从计算经济的角度研究网格资源的分配问题,研究了商品市场模型和拍卖模型的资源分配效率;Chun 等人[16]采用拍卖—投标(auction-biding)模型,其目标是在资源交换的市场竞争中买卖资源,匹配请求的资源和可用的资源,最大化资源的聚合效用;Feldman 等人[17]假定消费者预先描述了对资源的偏好,采用最佳响应(best response)算法获取更多的效用;Abramson[18]给出了一个网格资源代理,利用经济模型动态选择资源.但是,这些方法在很多情况下是理想化的,因为只考虑了资源和用户之间的关系,没有考虑用户和用户之间的相互影响.这样确定的资源均衡价格即使能达到帕累托(Pareto)最优,也难以满足实际网格环境的需要.Kwok[19]提出了一个层次化网格的博弈论模型,考虑了资源的自私行为对整个网格作业执行性能的影响,但没有考虑用户的自私行为;Bredin[20]研究了具有串行任务的多个网格用户竞争同一资源的博弈问题,提出了以预算为约束的优化作业执行时间的资源分配策略;文献[21-22]提出了基于 Nash 均衡的拍卖可划分资源的优化用户费用的资源分配策略,然而,他们的分配策略都是基于历史的 CPU 负载信息进行用户决策,没有考虑未来资源负载的变化,不能得到合理的资源价格,因而也就无法有效地实现资源优化分配;文献[23]提出一种支持并行任务执行的多 Agent 系统,Spawn、Agent 要求在给定预算的条件下完成计算任务,Spawn 的关键是 Agent 如何把资金分配到不同的子任务中,即控制并发计算;文献[24]提出一个 D' Agent 系统,其关键是通过限制贪心用户的请求达到系统内部的稳定,实现用户之间资源分配的均衡.上述研究工作主要应用经济学原理研究了网格资源框架结构、定价策略、交易算法等问题,没有涉及网格资源性质分析及相关市场模型的研究,尤其这些调度方法都没有足够地考虑消费者被动地得到资源分配(这种调度通常通过集中式计算而实现).而且在竞争使用有限的网格资源过程中,消费者不合理的背离行为使得资源调度问题的研究更为复杂.

Agent 技术是近年发展起来的分布式人工智能的最新的前沿研究成果,具有自主性、反应性、社会性和自适应性等诸多特点,为大规模复杂任务求解提供了一种新的途径[25-26].博弈计算方法是资源配置任务求解的有效方法之一,是解决多个自利个体间资源调度问题的有效机制.同时,市场博弈理论也为多 Agent 系统(MAS)动态协作问题的研究提供了坚实的数学基础.多 Agent 技术与演化博弈理论的有机结合,可为复杂网格计算资源的动态调度开启一种新的理念和思路.本文运用 MAS 市场博弈机制规范消费者在资源调度中的贪婪行为,并以 Nash 均衡理论为基础,建立一种分布式的资源优化调度机制和任务求解方法,在该机制下,消费者的资源申请和调度具有较高的合理性和有效性.

1 MAS 博弈协作任务求解模型

在动态开放的计算网格环境中,理性的 Agent 代表了用户的意志,其目标是使自身利益最大化.网格资源的提供与使用通过市场买卖的方式来实现,市场参与者分为 2 种角色:任务代理(资源买方)和

资源代理(资源卖方),双方的目的是最大化各自收益. 在计算网格框架中,构建了 2 类 Agent:资源提供者 Agent(资源 Agent)负责管理网格资源,网格资源的拥有者通过此 Agent 给资源定价及进行资源调度;消费者 Agent(任务 Agent)负责管理用户的计算任务,网格用户(消费者)通过此 Agent 将所需完成的任务分配到合适的资源上. 2 类 Agent 通过交互协商资源价格及相应资源量,根据资源市场的供需情况调整价格,最后达到供需平衡的资源分配. 这种分配是在满足用户 QoS 的基础上,最大化全体用户的效用和,即满意度,且保持全局负载均衡.

1.1　调度模型

假设网格中存在 N 个非合作的消费者,他们竞价使用网格资源,这些网格用户需要购买网格资源才能完成作业(一个类型各异的任务序列). 作业由一个任务序列构成,作业的执行时间为所有任务的执行时间之和.

定义 1　资源调度非合作博弈模型为一个三元组 $G=(N,S_i,S_i)$,其中:

1) N 为非合作的消费者(任务 Agent)集,记为 $N=\{J_1,J_2,\cdots,J_n\}$,消费者(任务 Agent) J_i 包含 JN_i 个子任务(序列),记 $O_{i,j}$为任务 Agent J_i 的第 j 个子任务,则 $J_i=\{O_{i,1},O_{i,2},\cdots,O_{i,\mathrm{JN}_i}\}$.

2) S_i 为消费者(任务 Agent) J_i 的竞价可选资源集,同时设面向任务 Agent 集 N 的所有可选资源的集合为 M,则 $M=\{f_1,f_2,\cdots,f_m\}$,共 m 个资源,故可得出:$S_i\subset M$,从而有 $M=S=S_1\times S_2\times\cdots\times S_n$.

3) U_i 为 Agent J_i 的收益函数,在给出收益函数的表达式前,给出如下定义:① 设 $\mathrm{pt}_{i,j}(f_k)$ 为任务 Agent J_i 的子任务 $O_{i,j}$使用资源 f_k 的时间,这里 $f_k\in S_i$. ② 设 $\mathrm{tt}_{i,j}(f_k,f_{k-1})$ 为任务 Agent J_i 在 2 个资源间的传输时间. ③ 设 $\mathrm{st}_{i,j}(f_k)$ 为任务 Agent J_i 的子任务 $O_{i,j}$占用资源 f_k 的开始时间.

基于以上定义,可得出 Agent J_i 的收益函数 U_i:

$$U_i(s)=\frac{1}{st_{i,JN_i}(f_k)+pt_{i,JN_i}(f_k)}.\tag{1}$$

式中:$s=(s_1,\cdots,s_i,\cdots,s_n)$, $s_i\in S_i$,并受如下约束:

$$st_{i,j}(f_k)-tt_{i,j}(f_k,f_{k-1})\geqslant st_{i,j-1}(f_{k-1})+\mathrm{pt}_{i,j-1}(f_{k-1}),\tag{2}$$

$$st_{i,j}(f_k)\geqslant st_{x,y}(f_k),\tag{3}$$

式中:$i,x=1,2,\cdots,n$; $j=1,2,\cdots,JN_i$; $y=1,2,\cdots,JN_x$.

根据上述非合作博弈模型,资源调度问题即为基于相应约束的 Nash 均衡点求解,即满足

$$U_i(s_i^*,s_{-i}^*)\geqslant U_i(s_i,s_{-i}^*).\tag{4}$$

式中:$\forall s_i\in S_i,s_{-i}^*=(s_1^*,\cdots,s_{i-1}^*,s_i^*,\cdots,s_n^*)$, $i=1,\cdots,n$.

定义 2　设消费者的竞价集合为 $S=\{s_i\mid s_i=(p_i,q_i),i=1,\cdots,N\}$,其中,$p_i$ 为消费者 i 愿意为使用资源而出的资源单价,q_i 为消费者 i 要使用的资源数量,且消费者的竞价满足 $p_1\geqslant p_2\geqslant\cdots\geqslant p_N$,假设消费者的报价集合中,申请的网格资源数量满足:

$$\sum_{j=1}^{r}q_j\leqslant Q<\sum_{j=1}^{r+1}q_j.\tag{5}$$

那么,定义此时消费者 y 的价格 P_y 为网格资源的价格.

对于定义 2 中,资源申请数量的另外 2 种情况:①当$\sum_{j=1}^{N}q_j\leqslant Q$ 时,即现有的网格状况可以满足所有的资源请求,此时资源的价格 $p_y=0$. ②当 $q_1>Q$ 时,出价最高消费者的资源请求不能被满足,此时可以以$\sum_{j=2}^{r}q_j\leqslant Q<\sum_{j=2}^{r+1}q_j$ 开始定价,如果 $q_2>Q$ 也成立,依次类推,调度资源给满足定义 2 条件的消费者.

定义 3　定义 1 的模型中有 N 个网格消费者竞争一个有限的计算资源,假设有 K 个类型的资源,每个用户在一个特定类型的资源上只能完成一个任务,定义如下参数:

$\{q_k^i\}_{k=1}^{K}$:网格消费者的任务序列,任务必须按顺序执行(即任务之间有数据依赖),其中 q_k^i 是第 i 个网格用户的第 k 个类型任务的大小.

c_k^i:第 i 个网格消费者为了完成 k 类型任务而选择资源的能力.

b_k^i:第 i 个网格消费者为使用 k 类型资源每秒的出价.

A_k:网格消费者集合.

B_k:类型 k 的网格资源从 A_k 中接收的总的消费者出价.

B_k^{-i}:除第 i 个消费者以外所有网格消费者对第 k 个类型资源的出价集合,即 $B_k^{-i}=\sum_{j\in A_k,j\neq i}b_k^j$.

因为第 i 个网格消费者分到的资源数量与整个资源的比例等于它的出价相对于所有消费者出价的比例,所以,第 i 个网格消费者分到的资源数量是

$$r_k^i=c_k^i\left(\frac{b_k^i}{B_k^i}\right)=c_k^i\left(\frac{b_k^i}{b_k^i+B_k^{-i}}\right).\tag{6}$$

假定网格消费者具有各种资源价格状态的完美信息,即 B_k^{-i} 已知. 既然 b_k^i 不依赖于 B_k^{-i},$(B_k^{-i}+b_k^i)$ 可以替代 B_k,那么,第 i 个网格消费者为完成 k 类型

任务所需的时间就是

$$t_k^i = \frac{q_k^i}{r_k^i} = \frac{q_k^i(b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i b_k^i}, \tag{7}$$

且费用是

$$e_k^i = t_k^i \cdot b_k^i = \frac{q_k^i(b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i}. \tag{8}$$

1.2　模型分析

从上面的定价机制知道网格系统的资源申请可以得到满足,消费者可以通过提高竞价获得资源的使用. 消费者对这个资源的使用都有一定支付能力 m_i 和最低数量要求 q_i,因此消费者所承受的最高资源价格为 $p_{i\_\max} = m_{i\_\max}/q_i$,高于这个价格消费者将无法承担使用该资源的支付.

资源的价格不是由单一消费者的出价决定,而是由多个消费者竞价决定(博弈决定),因而需要围绕以下问题研究资源调度的博弈模型:按照博弈理论公平定价;资源的价格不会被恶性竞争抬的过高或过低;资源的价格能恰当地反映大多数参与竞价消费者的理性需求.

在资源调度博弈中,消费者也是以自己效用最大为目标进行竞价的,此外,消费者的资源占用对其他消费者效用的潜在影响也是需要考虑的问题. 例如,用户传输数据对其他用户传输产生的“外部效用”,因此下面研究依据消费者效用最大的竞价标准. 在资源调度中,消费者的效用函数应由2部分组成:1)消费者使用该资源而获得的收入,这部分主要涉及消费者获得的资源数量和剩余的资源数量;2)消费者为使用资源而必须的支出,这部分主要涉及资源的价格和消费者申请的资源数量,效用函数定义如下:

定义4　在资源调度博弈中,使用CES效用函数的变形得到消费者 i 的效用函数:

$$U_i(\boldsymbol{S}) \triangleq U_i(\boldsymbol{S}_i, \boldsymbol{S}_{-i}) = (1 - r_i) \cdot q_i(Q - q_i). \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{S}$ 为整个系统的竞价策略向量;$\boldsymbol{S}_i$ 为系统 i 的竞价向量;$\boldsymbol{S}_{-i}$ 为除系统 i 外,其他消费者的竞价向量;$i \in N$; $U_i(\cdot)$ 为消费者 i 使用资源的效用;r_i 为消费者 i 的风险系数;q_i 为消费者 i 的资源需求量.

对消费者效用函数的分析如下:$q_i(Q - q_i)$ 为系统使用数量为 q_i 资源的效用;$(1 - r_i)$ 为竞得概率,r_i 为不能竞得资源的风险系数. 如果竞价小于 p_y(本次竞价后,资源的价格),消费者将无法负担使用该资源的支付,不能获得对资源的使用,此时消费者效用为0. 为了使出价为 p_i 的消费者能衡量因为其竞价达不到资源价格而导致申请不到资源的风险,对此取 $r_i = \mathrm{e}^{-p/p_y}$ 来衡量竞价风险,即出价为 p_i 的消费者,不能获得资源使用的概率,所以 $(1 - r_i)$ 代表消费者在出价 p_i 时能够竞得资源使用的概率,这样定义4定义的消费者 i 的效用函数为

$$U_i(\boldsymbol{S}) \triangleq U_i(S_i, S_{-i}) = (1 - \mathrm{e}^{-p/p_y}) \cdot q_i(Q - q_i). \tag{10}$$

式中:$U_I(\boldsymbol{S})$ 是一个值域为 $[0, \infty)$ 的连续单调增函数,且二阶连续可微,$U_i(\cdot) = 0$. 同时,$U'_i(\cdot) > 0$, 即 $U_i(\boldsymbol{S})$ 是连续递增单调函数.

下面,根据式(10)的效用函数来讨论资源调度博弈中Nash均衡点的定义、存在性和惟一性.

定义5　如果在非合作资源调度博弈中,$U_i(s_i, s_{-i})$ 为消费者 i 的效用函数,那么 $(s_1^*, \cdots, s_i^*, \cdots, s_N^*)$ 构成一个Nash均衡点,当且仅当 $\forall i \in N$, $\forall \boldsymbol{s}_i \in \boldsymbol{S}_i$, $U_i(s_i^*, s_{-i}^*) \leqslant U_i(s_i, s_{-i}^*)$, 其中,$\boldsymbol{S}_i$ 为消费者 i 所有竞价向量的空间.

由上可知,系统达到Nash均衡点,系统的任何偏离Nash均衡点的竞价向量 $\boldsymbol{S}'$,其效用将不大于在 $\boldsymbol{S}^*(s_1^*, \cdots, s_N^*)$ 时的效用. 而且Nash均衡点的充要条件表明按照资源调度向量 s_i^* 对资源竞价是消费者 i 的占优策略,同时,也说明了资源调度博弈中求解Nash均衡点的方法为消费者选择 s_i,使得其效用最大,即 $\max\limits_{s_i \in S_i} U_i(s_i^*, s_{-i}^*)$.

因为消费者都是以 $\max\limits_{s_i \in S_i} U_i(s_i^*, s_{-i}^*)$ 为目标竞价,因此消费者 i 在制定竞价时需要考虑2个方面的内容:资源价格 p_i 和数量 q_i. 由于消费者 i 的最大购买能力 $m_{i\_\max}$ 都是确定的,且 $p_i q_i \leqslant m_{i\_\max}$,故竞价中价格和数量是相互矛盾的参数.

定理1　在资源调度博弈问题中,N 个消费者竞价获得资源的使用,如果消费者 i 的效用函数由式(10)定义,那么整个博弈系统的Nash均衡点存在且惟一.

证明　在定理给出的条件下,消费者 i 制定博弈策略可以用如下优化问题表示:

$$\max_{s_i \in S_i} U_i(s_i^*, s_{-i}^*), \text{ s.t. } \sum_{i \in N} p_i \cdot q_i \leqslant m_{i\_\max}. \tag{11}$$

对于上述非线性优化问题,可以构造如下的拉格朗日函数:

$$L_i(s, w) = U_i(s_i, s_{-i}) - w\Big(\sum_{i \in N} p_i q_i - m_{i\_\max}\Big). \tag{12}$$

式(12)的 K-T 条件为

$$\begin{cases}\partial L_i(\cdot)/\partial p_i = \partial U_i(\cdot)/\partial p_i - wq_i = 0, \\ \partial L_i(\cdot)/\partial q_i = \partial U_i(\cdot)/\partial q_i - wp_i = 0, \\ w(\sum_{i \in N} p_i q_i - m_{i\_\max}) = 0, w \leqslant 0.\end{cases} \quad (13)$$

记$\nabla_i(\boldsymbol{S}) = \partial U_i(\cdot)/\partial p_i$,同时结合式(11),则 K-T 条件式(13)可以化为:如果$\sum_{i \in N} p_i \cdot q_i \leqslant m_{i_\max}$,那么 $w = \nabla_i(S)/q_i$. 如果$\sum_{i \in N} p_i \cdot q_i > m_{i_\max}$,那么 $w = 0$.

另外,由于$\partial^2 U_i(\cdot)/\partial p_i^2 > 0$, $\partial^2 U_i(\cdot)/\partial q_i^2 < 0$,那么效用函数 $U_i(\cdot)$在 $s_i = p_i q_i$ 处的 Hessian 矩阵为

$$\nabla \boldsymbol{U}_i^2(\cdot) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 U_i(\cdot)}{\partial p_i^2} & \dfrac{\partial^2 U_i(\cdot)}{\partial p_i \partial q_i} \\ \dfrac{\partial^2 U_i(\cdot)}{\partial q_i \partial p_i} & \dfrac{\partial^2 U_i(\cdot)}{\partial q_i^2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

显然,$|\nabla \boldsymbol{U}_i^2(\cdot)| < 0$,即$\nabla \boldsymbol{U}_i^2(\cdot)$为负定矩阵,所以效用函数 $U_i(\cdot)$是凹函数,式(11)所述的优化问题有惟一的极大值,即博弈的 Nash 均衡点存在且惟一. 证毕.

下面,通过研究 Nash 均衡点上竞价,讨论消费者的竞价方法.

定理 2　在上述资源调度博弈的 Nash 均衡点,消费者 i 竞价应在 $p_i q_i = m_{i_\max}$时取得.

证明　假设在式(11)描述的优化问题中,当 $p_i q_i \leqslant m_{i_\max}$时 $U_i(\cdot)$取得最大值,那么有 $w = 0$,将 w 代入式(13),可得:

① $\partial U_i(\cdot)/\partial p_i = 0$,需有 $p_i = 0$ 或 $Q - q_i = 0$;

② $\partial U_i(\cdot)/\partial q_i = 0$,需有 $p_i = 0$ 或 $Q - 2q_i = 0$;

将 $p_i = 0$ 代入式(10)可得 $U_i(\cdot) = 0$,故 $p_i \neq 0$;另外,条件 $Q - q_i = 0$ 与 $Q - 2q_i = 0$ 矛盾,所以 $p_i q_i < m_{i_\max}$不能取得最大值.

这样只有在 $p_i q_i = m_{i_\max}$时,$U_i(\cdot)$取得最大值,联合式(13)中的方程组,不难求出最大值点(p_i^*, q_i^*),即均衡点. 证毕.

从上面的讨论可知,消费者的竞价高低反映了其对资源需求的迫切程度,而博弈使得资源的价格更能够反映消费者的需求和当前网格的状况.

1.3　算　法

资源调度任务求解算法实际上就是一个竞价博弈的过程.

消费者的功能主要包括:计算竞价、网格分析、信息收集模块. 其中,信息收集模块收集资源的信息,包括:资源信息(如资源价格、分配指令等)和其他消费者信息(如出价信息和申请资源的数量等);网格分析模块提取分析收集来的信息,根据资源价格判断资源的使用状况和其他消费者对资源的需求情况,解析并保存资源的价格;计算竞价模块根据当前的资源信息计算竞价,按照资源分配算法,向资源提供者提交竞价.

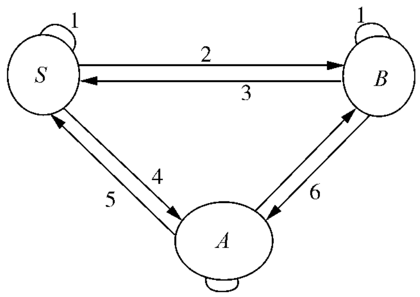
资源提供者主要包括:资源定价模块和资源分配模块. 其中,资源定价模块按照定义 2 计算资源的价格,并广播资源价格;资源分析模块判断哪些消费者可以获得资源的使用,分配相当数量的资源. 此外,资源分配模块将周期性地收回资源,并广播分配指令,开始新一轮竞价过程.

图 1 反映了消费者 Agent 的 3 个状态:S(稳定状态)、B(竞价状态)和 A(网格分析状态). 初始情况下,消费者的状态为 S,消费者 Agent 将以某个初始策略行动,同时周期性地向网格其他消费者 Agent 发布本系统的竞价信息(即使没有进行策略调整也需要定时发布本系统的决策信息,以便让新加入的消费者能够及时地了解各消费者的当前状态);当收集到其他消费者 Agent 的状态信息和网格状态信息时,消费者将根据这些信息判断网格运行的情况,此时进入状态 A;在分析后,如无拥塞发生,消费者 Agent 将记录这些信息以供竞价使用,同时返回到状态 S;当到达某一时刻(该时刻周期性地发生或诊测到网格拥塞时发生),消费者将根据收集到的其他消费者的信息(各消费者的竞价信息)和网格状况进行动态地竞价,此时消费者进入状态 B;新的竞价生成后,消费者 Agent 的状态将回到 S,消费者将以新生成的行动工作[33].

在基于市场博弈机制的资源分配任务求解算法中,消费者的核心模块为竞价计算模块. 根据定理 2,可以计算消费者在 Nash 均衡点的竞价,将$q_i = m_{i_\max}/p_i$ 时,代入式(10),可得

$$\frac{\partial U_i(\cdot)}{\partial p_i} = \frac{1}{p_y} e^{-p/p_y - 1}(m_{i\_\max} Q - \frac{m_{i\_\max}}{p_i}) + (1 - e^{-p/p_y})(\frac{2m_{i\_\max}^2}{p_i^3} - \frac{m_{i\_\max}}{p_i} Q) = 0. \quad (15)$$

式中:p_y 为资源的价格,这里可以使用上次竞价后资源的价格指导本次消费者竞价. 显然,通过式(15)很难求出 p_i 的解析解,但是可以求 p_i 在$[m_{i_\max}/Q, m_{i_\max}/q_i]$范围内的近似解(本文将不花过多篇幅介绍复杂方程的求解方法). 然后,通过求出价为 p_i 的消费者申请资源数量的近似解 q_i,这样就可以求得消费者 i 的本次竞价.



状态：S(稳定)，B（竞价），A(分析)事件
1)发布竞介信息; 2)到达竞价周期; 3)确定新的策略; 4)记录分析结果; 5)收集竞价信息; 6)分析网格状态

图 1　消费者状态变迁

Fig. 1　Consumers state transition

设消费者 c 向提供者 p 申请的资源量为 R_c 个基本单位，预算费用为 B_c. 设提供者 p 当前可用资源数量是 P_R 个基本单位. 在进行资源调度时，提供者首先将目前可用资源量与一预设阈值 Δ 比较. 如果 $P_R \geqslant \Delta$，则认为当前可用资源丰富，采用博弈模式分配资源；否则，认为当前可用资源短缺，采用竞价模式. Δ 值由提供者根据其资源使用历史纪录确定.

算法 1　消费者竞价算法.

输入：资源提供者给出的底价、消费者的最大支付能力、所需资源数量；

输出：最终成交价.

1）提供者通告消费者资源销售底价 B_p.

2）如果 $R_c \cdot B_p \leqslant B_c$，则消费者通告提供者“愿接受该售价”；反之，通告提供者“不接受该售价”.

3）提供者在收到所有消费者响应后，计算愿意接受当前售价的消费者数量 N_A. 如果 $N_A > 0$，则提高售价 $B_p = B_p + \varepsilon$（ε 是提价步长），并通告消费者资源最新售价，转 2）；否则转 4）.

4）提供者把所有已知的消费者愿接受的最高售价 $B_{p1}, B_{p2}, \cdots$ 按从高到低顺序排列为：$B_p^1, B_p^2, \cdots$.

5）令 $i = 1$.

6）给接受售价 B_p^i 的消费者分配 R_c^i 个基本单位资源（R_c^i 是该消费者申请的资源量）.

7）如果提供者仍有可用资源且还有待分配资源的已接受售价的消费者，则 $i = i + 1$，转 6）.

8）对于刚性需求的消费者，若其需求未得到满足，则提供者与其协商；若协商失败，则其退出竞价.

9）根据消费者资源占用量和其接受的最高售价计算其实际付费，结束.

上述竞价协商模型定义如下：

$$M = \langle \mathrm{Ag}, A, \Theta, \mathrm{Te}, S, \mathrm{Protocol} \rangle$$

其中，Ag 为协商参与者 Agent i,j，它在协商中表示生产者或消费者；A 为协商双方可行行动组合；Θ 为协商对象类型组合；Te 为协商双方的协商最终期限；S 为协商策略；Protocol 为协商协议，协商时协商参与者所遵循的协商规则.

协商过程为在协商最终期限内任意 Agent i 在时刻 t 出价，如果 Agent $j(i \neq j)$ 不接受则根据自身的策略 s^j 在 $t+1$ 时刻还价，然后轮到 i 决定是否接受 j 的还价，然后再到 j 决定，这样多次交替出价还价. 如果 j 接受 i 的出价，则行动 accept，协商结束，如果 j 选择退出协商，则行动 quit，协商结束.

在上述模式下的资源调度过程实际上是消费者和提供者间的竞价博弈过程，目的是在为消费者确定合适资源占用量的同时，也为提供者确定合适的售价，达到 Nash 均衡下的 Pareto 最优.

2　仿真分析

为验证本文方法的有效性，将本文算法与文献[8]中针对日用品市场模型提出的费用优先算法进行负载平衡比较，实验结果如表 1. 表 1 表明，本文算法在负载平衡方面表现比定价算法要好，这是因为本文算法在每个作业协商完成后协商双方都对协商策略进行调整. 当资源利用不充分时，资源提供者调整策略在后面的协商中降低成交价格以竞争到作业. 这样通过竞争使系统中的资源负载较平衡. 而定价算法中，由于在一段时间内资源的价格是不变的，资源代理都选择价格便宜的资源执行作业，这造成了一些资源负载过大，而另一些资源得不到利用.

表 1　竞价算法和定价算法对比

Table 1　Comparison of loads balance between the bidding algorithms and the pricing algorithm

资源号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
出价	2	2	0	2	3	2	3	1	4	1
定价	0	0	4	0	5	0	5	1	5	0

同时，还在 PC 机模拟了本文算法和蛛网模型. 每个资源提供者可为多个用户服务，每个用户有不同的需求. 用户总需求资源数量为 32 个标准任务，图 2 比较了本文算法和蛛网算法的资源利用率. 资源提供者资源数量小于 32 时，如果供不应求，资源提供者满足部分用户的需求，本文模型资源利用率高于蛛网模型；供大于求时，蛛网模型经过反复迭代，达到平衡点，满足部分用户的需求，竞价模型此时满足所有用户的需求，资源利用率高于蛛网模型.

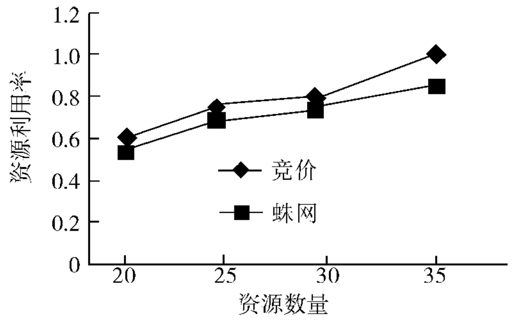


图 2　资源的利用率对比

Fig. 2　Comparison of resource utilization

图 3 是蛛网模型和本文模型达到均衡价格的迭代次数. 从图中可知,本文模型的均衡价格为 6,资源的总供给为 35. 改变资源的初始报价,蛛网模型中初始报价离均衡价格越远,迭代次数越多. 本文模型每次迭代根据供需差调整:供需差越大,调价幅度越大,很快达到均衡状态.

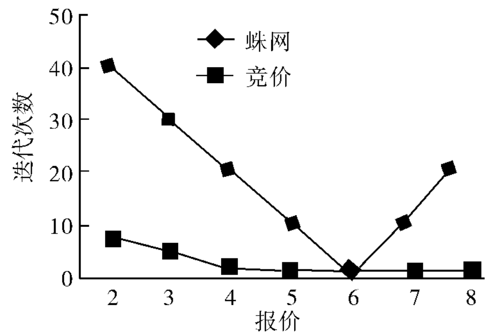


图 3　迭代次数

Fig. 3　Iterations

3　结束语

本文提出了一种基于博弈经济机制和多 Agent 动态协作的计算网格资源分配任务求解方法. 它通过效用函数刻画用户需求的异构性,以一般均衡理论为基础,依靠市场机制实现资源的优化分配. 采用 MAS 博弈经济机制进行资源调度和任务求解有着许多独特的优点,动态的资源配置提高了系统的自适应性,采用博弈经济原则能够鼓励资源拥有者贡献他们的空闲资源并从中获利,有助于建立大规模的网格应用系统.

参考文献:

[1] BARUAH S K, COHEN N K. Plaxton in resource allocation [J]. Algorithmica, 1996, 15(6): 600-625.

[2] WOLSKI R, PLANK J S, BREVIK J, et al. Analyzing market-based resource allocation strategies for the computational grid[J]. International of High Performance Computing Applications, 2001,15(3):258-281.

[3] SUBRAMONIAM K, MAHESWARAN M, TOULOUSE M. Towards a micro economic model for resource allocation in grid computing system[C]//The 2002 IEEE Canadian Conf on Electrical & Computer Engineering. Manitoba, Canada, 2002:782-785.

[4] BUYYA R. Economic-based distributed resource management and scheduling for grid computing [D]. Melbourne, Australia: Monash University, 2002.

[5] CHENG J Q, WELLMAN M P. The WALRAS algorithm: convergent distributed implementation of general equilibrant outcomes[J]. Computational Economics, 1998,12(1):1-24.

[6] YGGE F. Market-oriented programming and its application power load management[D]. Lund, Sweeten:Lund University, 1998.

[7] WENG C L, LU X D. A double auction method for resource allocation on computational grids[J]. Chinese Journal of Computers, 2006,43(6):1004-1009.

[8] BUYYA R, ABRAMSON D, VENUGOPAL S. The grid economy[J]. Special Issue on Grid Computing, 2005,93(3):698-714.

[9] BUYYA R, VAZHKUDAI S. Compute power market: Towards a market-oriented grid[C]. Washington. CCGRID 2001:574-581

[10] BUYYA R, ABRAMSON D, GIDDY J. A case for economy grid architecture for service-oriented grid computing [C]//Proc of the 10th IEEE Int'l Heterogeneous Computing Workshop. Washington: IEEE Computer Society, 2001:776-790.

[11] BUYYA R, MURSHED M. GRIDSIM: a toolkit for modeling and simulation of grid resource management and scheduling[J]. Journal of Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2002,14(13/15):1175-1220.

[12] ABRAMSON D, BUYYA R, GIDDY J. A computational economy for grid computing and its implementation in the nimrod-G resource broker[J]. Future Generation Computer Systems, 2002,18(8):1061-1074.

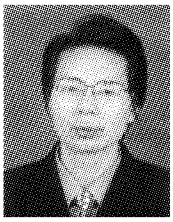
[13] SUBRAMONIAM K, MAHESWARAN M, TOULOUSE M. Towards a microeconomic model for resource allocation in grid computing system[C]//The 2002 IEEE Canadian Conf. on Electrical & Computer Engineering. Manitoba, Canada, 2002:373-391.

[14] CAO H Q, XIAO N, LU X C, et al. A market-based approach to allocate resources for computational grids[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(8):913-916.

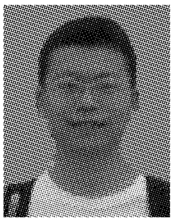
[15] WOLSKI R, PLANK J S, BREVIK J, BRYAN T. Analy-

zing market-based resource allocation strategies for the computational grid[J]. Journal of High Performance Computing Applications, 2001,15(3):258-281.
[16]CHUN B N, NG J, PARKES D C. Computational resource exchanges for distributed resource allocation[R]. Harvard University, 2004.
[17]FELDMAN M, LAI K, ZHANG L. A price-anticipating resource allocation mechanism for distributed shared clusters[C]//Proc of the 6th ACM Conf on Electronic Commerce. New York: ACM Press, 2005:127-136.
[18]NASH J F. Non-cooperative games[J]. Annals of Mathematics, 1951,54(2):286-295.
[19]KWOK Y K, SONG S S, HWANG K. Selfish grid computing: game-theoretic modeling and NAS performance results[C]//Proc of the IEEE Int'l Symp on Cluster Computing and the Grid. Washington:IEEE Computer Society, 2005:349-356.
[20]BREDIN J, KOTZ D, RUS D, MAHESWARAN R T, IMER C, BASAR T. Computational markets to regulate mobile-agent systems[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2003,6(3):235-263.
[21]MAHESWARAN R T, BAAR T. Nash equilibrium and decentralized negotiation in auctioning divisible resources[J]. Group Decision and Negotiation, 2003,12(5):361-395.
[22]JIN Y, KESIDIS G. Nash equilibrium of a generic networking game with applications to circuit-switched networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. San Francisco, USA: IEEE Computer Society Press, 2003:1242-1249.
[23]WAIDSPURGER C, HOGG T. Spawn: a distributed computational economy[J]. IEEE Trans on Softw Eng, 1992, 18(2):18-32.
[24]BREDIN J, KOTZ D, RUS D. Utility driven mobile Agent scheduling CS-TR98-331[R]. Hanover, NH: Dartmouth College,1998:191-206.
[25]ARCHER A, TARDOS E. Truthful mechanisms for one-parameter Agents[C]//Proceedings of the 42nd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. Lasvegas, USA: IEEE Computer Society Press, 2001:482-491.
[26]JIANG W J, WANG P. Research on distributed solution and correspond consequence of complex system based on MAS[J]. Journal of Computer Research and Development, 2006,43(9):1615-1623.

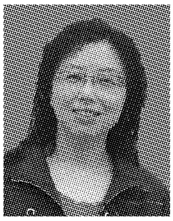
作者简介:



蒋伟进,男,1964 年生,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为智能计算、Agent 计算、复杂自适应系统. 发表学术论文 30 余篇. 获省市科技奖励 10 项.



骆　菲,男,1986 年生,硕士研究生,主要研究方向为 Agent 计算、智能决策与方法、复杂系统建模.



史德嘉,女,1963 年生,教授. 主要研究方向分布式人工智能、多主体系统、智能控制. 主持国家科技部、省级重点项目 2 项. 发表学术论文 20 余篇,被 EI 检索 10 篇.