

一种新的经济网格计算任务调度控制模型^{*}

王璞 彭玲

(中南大学商学院 长沙 410083)

摘要 针对动态计算网格资源调度问题,基于多智能体协同技术和市场博弈机制,对计算网格资源分配技术进行了深入研究,提出了基于计算经济的网格资源调度模型,设计了消费者的效用函数,讨论了资源分配博弈中 Nash 均衡解,设计了一种网格资源调度算法。仿真实验表明,资源调度算法能够为消费者的资源数量提供参考,规范消费者行为,从而使得整个资源的分配趋于合理,促进交易量。

关键词 资源调度模型, Nash 均衡, 效用函数, 多智能体系统

Research on a Novel Resource Allocation Algorithm Based on MAS

WANG Pu PENG Ling

(Business School of Central South University, Changsha 410083)

Abstract With MAS(Multi Agent System) coordinated technology and market bidding game rules, a grid resource allocation model based on market economy was introduced, which could show the relation between supply and demand. The model could make use of the computing and negotiating power of the consumer well and could consider consumer behavior fully. It made the resource application and assignment of the consumer have the higher rationality and effectiveness. In the meantime the utility function of consumer was given; the entity and the uniqueness of Nash equilibrium in the resource allocation game and the Nash equilibrium solution were discussed. We designed a grid resource allocation algorithm which was based on the distilled resource allocation model. The results of emulation test showed that the resource allocation algorithm could be a reference to resources of consumers and standardized consumers' bidding, which made the allocation of the whole network resource tend to be more reasonable.

Keywords Multi-agent system (MAS), Resource allocation model, Computational economy, Nash equilibrium, Bidding, Utility function

1 引言

网格资源是由地理上分布的、隶属不同机构、异构的各类计算资源、存储资源等组成。传统的资源调度方法都是从资源提供方的角度,使用最优化理论集中地求解资源调度问题,决定消费者所能调度到的资源数量,但往往受到变量数不变的限制,而且运算量集中,不适应现代计算的负载均衡、高容错性等要求。从经济学的角度出发,对动态网格中计算资源进行调度是一种新的思维方式,基于微观经济学理论的分布式资源调度方法非常适合解决网格资源管理问题^[3],也可以实现诸如基于 QoS、Pareto 最优、公平性等优化目标,并取得了良好的效果^[2~5]。目前,运用经济学原理研究网格资源调度主要包括文^[2~9]采用的集中式调价方法。文^[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^[5]提出分布调价 WALRAS 算法,并讨论了其适用的条件。文^[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^[7]结合集中式同步调价算法速度快和分布调价 WALRAS 算法可扩展性优点,提出一种分布分组调价算法。文^[8]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^[9]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。

这些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)。本文希望运用 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,从而建立一种分布式的资源优化调度机制。

2 基于 MAS 的资源调度模型

在计算网格框架中,构建了两类 Agent:生产者 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 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。两类 Agent 通过交互协商资源价格及相应资源量,通过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。

基于 Agent 的资源调度框架分为三个层次,从底向上依此为资源层、MAS 层(即计算资源市场)和消费者层。资源层由众多的计算资源构成。多个计算资源构成一个自治计算系统,每一个自治计算系统在 MAS 层都有一个资源 Agent 与之对应,由该 Agent 负责自治计算系统内全部计算资源的调度和管理。按照应用领域、应用负载特性和消费者需求的不

^{*} 基金项目:湖南省教育厅科研项目资助(06C268);湖南省自然科学基金项目资助(06JJ2033)。王璞 博士生,主要从事智能计算、优化理论与应用研究;彭玲 硕士,主要从事经济理论与应用研究。

同,可以将计算网格应用划分为若干个应用类别。每一个应用类别都有一个或多个应用 Agent 与之对应。每个应用 Agent 按照应用类别的应用特性和资源的市场价格向特定的一组资源 Agent 购买计算资源,并通过一定的作业调度规则使用购得的计算资源,从而为本类别应用提供 QoS 保证的计算服务。

网格资源的定价方法有很多种,例如基于时间、基于代价、基于优化和边界价格的方法,而使用竞价的方式定价是其中最为公平的一种方式,因为资源的价格不仅取决于资源的数量,而且受消费者需求的影响。在竞价过程中,每个参与者以最大化收益为目标(如果参与者不能从竞价中获益,他们将拒绝加入竞价)。竞价应满足两个要求:(1)激励的兼容性(Incentive Compatibility),各参与者都有占优策略;(2)个体的理性(Individual Rationality),按照占优策略行动的参与者的收益总是最优收益。

在微观经济学中,买方出价高于卖方的定价时,产生交易。在我们的定价机制中,由两部分实体完成网格资源的定价:生产者和消费者。消费者向生产者申请使用某项资源,生产者根据消费者竞价的价格和数量来决定资源的价格,同时为那些报价不小于该价格的消费者调度资源。依据供求关系,在资源匮乏(供不应求)时,资源的价格理应高一些;在资源丰富(供大于求)时,价格则应低一些。

下面,我们研究这样一个网格环境:假设网格中存在 N 个非合作的消费者,集合为 $\mathcal{N}=\{1, \dots, N\}$,他们竞价使用网格资源,消费者的竞价集合为 $S=\{s_i \mid s_i=(p_i, q_i), i=1 \dots N\}$,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。不失一般性,我们假设消费者的竞价满足 $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_N$,定义网格资源的价格为:

假设消费者的报价集合中,申请的网格资源数量满足:

$$\sum_{j=1}^y q_j \leq Q \leq \sum_{j=1}^{y+1} q_j \quad (1)$$

那么,我们定义此时消费者 y 的价格 P_y 为网格资源的价格。对于定义中,资源申请数量的另外两种情况:(1)当 $\sum_{j=1}^N q_j \leq Q$ 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,此时我们可以以 $\sum_{j=2}^1 q_j \leq Q \leq \sum_{j=2}^1 q_j$ 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 1 条件的消费者。

从上面的定价机制我们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 $\bar{p}_i = m_i / q_i$,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),因而我们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得过高或过低;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”,因此下面我们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两部分组成:(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:

在资源调度博弈中,我们使用 CES 效用函数变形得到消费者 i 的效用函数:

$$U_i(S) \triangleq U_i(s_i, S_{-i}) = (1-r_i) \cdot q_i \cdot (Q-q_i) \quad (2)$$

其中, s 为整个系统的竞价策略向量; s_i 为系统 i 的竞价向量; 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危险,对此我们取 $y_i = e^{-p_i/p_y}$ 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 2 定义的消费者 i 的效用函数为:

$$U_i(S) \triangleq U_i(s_i, s_{-i}) = (1-e^{-p_i/p_y}) \cdot q_i \cdot (Q-q_i) \quad (3)$$

不难看出, $U_i(S)$ 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 $U_i(S)$ 是连续递增单调函数。

下面,根据式(3)的效用函数来讨论资源调度博弈中 Nash 均衡点的定义、存在性和唯一性。

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 $(s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_N^*)$ 构成一个 Nash 均衡点,当且仅当 $\forall i \in N; \forall s_i \in S_i, U_i(s_i^*, s_{-i}^*) \leq U_i(s_i, s_{-i}^*)$,其中, 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 S' ,其效用将不大于在 $S^*(s_1^*, \dots, s_N^*)$ 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 ,使其效用最大,即 $\max_{s_i \in S_i} U_i(s_i^*, s_{-i}^*)$ 。

因为消费者都是以 $\max_{s_i \in S_i} U_i(s_i^*, s_{-i}^*)$ 为目标竞价,所以消费者 i 在制定竞价时需要考虑两个方面的内容:资源价格 p_i 和数量 q_i 。由于消费者 i 的最大支付能力 m_i 都是确定的,且 $p_i q_i \leq m_i$,故竞价中价格和数量是相互矛盾的参数。

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。

资源调度算法的设计目标:(1)各消费者都是以自己的效用最大为目标来竞价,申请资源;(2)通过资源调度算法的执行,资源能够获得一个合理的定价,且资源的消费者上的调度能够收敛于 Nash 均衡点时的资源调度结果。

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 $P_R \geq \Delta$,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

- ①提供者通告消费者资源销售底价 B_p 。
- ②如果 $R_c \cdot B_p \leq B_c$,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 $B_p = B_p + \epsilon$ (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}, \dots 按从高到低顺序排列为： B_p^1, B_p^2, \dots 。

⑤令 $i=1$ 。

⑥给接受售价 B_p^i 的消费者分配 R_i 个基本单位资源 (R_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：

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

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。

在该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，实现双赢。

3 例子

下面通过仿真对资源调度算法的性能进行评价，基于 NS2^[19] 仿真系统实现了上述动态计算资源调度模型。

图 1 表示消费者的竞价与实际资源的价格之间的关系，可以看出，消费者的竞价都在资源价格的附近浮动，而在资源的价格确定后，消费者申请的资源数也根据其最大支付能力相应确定。因此消费者能够较好地围绕实际的资源价格竞价，有效地避免了消费者的恶意竞价行为，且用户所得的资源数量高于用户的最低 QoS 要求。

图 2 反映了在博弈模式下供求因子 $\delta=0.6$ 时，供求关系对资源售价的影响情况。当 $\delta < 0.6$ 时，资源售价随之变化不大；反之，随之急剧变化。因此，在博弈模式下供求关系对资源售价的影响比较灵敏。

表 1 竞价算法和定价算法对比

Res. number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bid price	2	2	0	2	3	2	3	1	4	1
Pricing	0	0	4	0	5	0	5	1	5	0

我们再将竞价算法与文[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。表明，竞价算法在负载平衡方面表现比定价算法要好，这是因为竞价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。

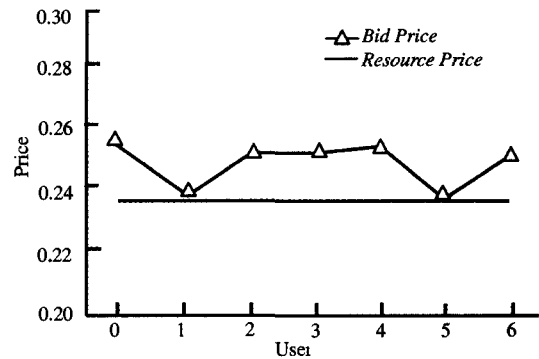


图 1 消费者出价

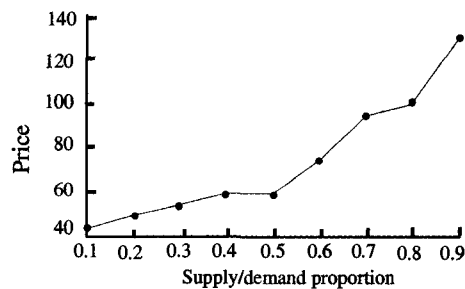


图 2 供求关系与售价

总结 本文将计算经济机制和多 Agent 协同技术相结合引入网格资源管理，提出了网格资源的定价机制，研究了网格资源调度的市场博弈模型；论证了非合作(自私的或贪婪的)用户竞价行为下整个博弈系统 Nash 均衡解的存在性和唯一性；讨论了 Nash 均衡点上用户的竞价行为，最后基于上述模型设计了网格资源调度算法。仿真实验表明该算法能够有效地规范消费者申请网格资源的竞价，避免恶意竞价行为，能实现资源的合理调度、动态负载平衡和有效共享，提高系统资源使用率，最大优化生产者和消费者效益目标。

参考文献

- Baruah S K, Cohen N K, Plaxton in resource allocation. Algorithmic a, 1996, 15(6): 600~625
- Wolski R, Plank J S, Brevik J, et al. Analyzing market-based resource allocation strategies for the computational grid. International of High Performance Computing Applications, 2001, 15(3): 258~281
- Subramoniam K, Maheswaran M, Toulouse M. Towards a misty economic model for resource allocation I grid computing system. In: The 2002 IEEE Canadian Conf. on Electrical & Computer Engineering, Manitoba, 2002
- Buyya R. Economic-based distributed resource management and scheduling for grid computing; [Ph D dissertation]. Melbourne, Australia; Monash University, 2002
- Cheng J Q, Wellman M P. The WALRAS algorithm; convergent distributed implementation of general equilibrant outcomes. Computational Economics, 1998, 12(1): 1~24
- Ygge F. Market-oriented programming and its application power load management; [Ph D dissertation]. Lund, Sweeten Lund University, 1998
- Weng Chuliang, Lu Xinda. Pricing algorithm for market-based resource management on grid computing systems. Journal of Computer Research and Development (in Chinese), 2004, 41(7): 1151~1156
- Buyya R, Abramson D, Venugopal S. The grid economy. In: Proceedings of the IEEE, Special issue on grid computing, 2005, 93(3): 698~714
- Buyya R, Vazhkudai S. Compute power market: Towards a market-oriented grid. CCGRID, 2001, 574~581
- Jiang Weijin, Wang Pu. Research on Distributed Solution and Correspond Consequence of Complex System Based on MAS. Journal of Computer Research and Development (in Chinese), 2006, 43(9): 1615~1623