

## 基于非完全信息博弈的网格资源分配模型<sup>\*</sup>

李明楚, 许雷, 孙伟峰<sup>+</sup>, 陆坤, 郭成

(大连理工大学 软件学院 网络工程系, 辽宁 大连 116620)

### Grid Resource Allocation Model Based on Incomplete Information Game

LI Ming-Chu, XU Lei, SUN Wei-Feng<sup>+</sup>, LU Kun, GUO Cheng

(Department of Network Engineering, School of Software Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116620, China)

+ Corresponding author: E-mail: wfsun@dlut.edu.cn, http://home.ustc.edu.cn/~wfsun/

**Li MC, Xu L, Sun WF, Lu K, Guo C. Grid resource allocation model based on incomplete information game. Journal of Software, 2012, 23(2): 428-438. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3972.htm**

**Abstract:** Considering the characteristics of the grid computing environment, dynamic, heterogeneous and distributional, and the problem of the low utilization ratio of resources and benefit imbalance in the grid resource distribution, this paper proposes a grid resource auction model which is multi-winners and based on the microeconomics theory. The contributions of this paper are listed as follows: first the study predicts the status of consumer's bidding price using the hidden Markov model; second, the paper presents the multi-winners auction model using Nash equilibrium of the incomplete information game, where it could enhance the utilizable rate of resources; thirdly, the condition of dominant strategy incentive compatibility is analyzed; finally, the paper proves the profits both of buyers and the seller all are maximal. Moreover, the utilizable ratio of the resource is proved to be increased through the contradistinctive experiment with other algorithms.

**Key words:** hidden Markov prediction; uncompleted information game; Nash equilibrium; multi-winners auction; resource allocation

**摘要:** 针对网格计算环境动态、异构和分布的特性以及网格资源分配中资源利用率低、效益不均等问题,结合微观经济学理论,建立了一种多赢家式的网格资源拍卖模型(multi-winners auction model,简称 MWAM)。将隐马尔可夫模型应用在网格用户  $t$  时刻出价状态预测方面,并结合分配算法计算出能够获得所需资源的概率;并且在原有资源分配机制的基础上,结合非完全信息纳什均衡理论设计了一种多赢家拍卖算法,从理论上证明了资源分配结束后系统收益最大,且本模型符合微观经济学中的激励相容性与个人理性准则。实验模拟在验证了隐马尔可夫预测的可行性的同时,又与几种具有代表性的算法相比较,从资源利用率、系统总收益等方面突显了本模型的优势。

**关键词:** 隐马尔可夫预测;非完全信息博弈;纳什均衡;多赢家式拍卖;资源分配

**中图法分类号:** TP316      **文献标识码:** A

网格计算<sup>[1]</sup>是指在动态变化的、拥有多个部门或团体的虚拟组织<sup>[2]</sup>中进行安全、灵活的资源共享与问题

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61103233, 90715037); 国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金(200801410028); 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB714205); 重庆市自然科学基金(2007BA2024); NSFC-JST 重大国际(地区)合作项目(51021140004)

收稿时间: 2010-08-14; 定稿时间: 2010-11-24

求解;网格具有高度的多层次上的异构性、地理分布性、动态性与可扩展性.应用市场经济模型<sup>[3]</sup>,可以很好地模拟网格环境下用户与服务提供者的交互行为.网格环境下的资源管理<sup>[4]</sup>涉及到生产者与消费者的自主决策问题,同样地,在经济活动中也存在以分布式自主决策为依托的资源分配机制;市场资源分配效率观点为网格环境下用户需求的异构性进行了精确的刻画;另外,通过市场价格对网格资源供需的动态调节来达到最终的均衡状态,优化资源的配置;最后,竞争作为市场经济中的永恒主题,同样激励着网格环境中资源服务的高效优化.

拍卖<sup>[5]</sup>作为市场经济中的一种制度,通过制定明确的规则,让竞拍者通过价格竞争来确定最终竞拍价,本文将其看作一种非完全信息博弈过程.在资源提供者未能给待拍资源定价以及竞拍者彼此独立的情况下迅速、灵活地形成竞拍价,即纳什均衡解<sup>[6]</sup>,并且达到利益的最优化.其快速、公平、可靠、代价小、便于交易协议的开发等优点,便于异构与分布式的网格用户的使用.

隐马尔可夫模型(hidden markov model,简称 HMM)<sup>[7]</sup>通过观测向量序列,可发现每个观测向量都是以某一概率分布表示各种状态,每一个观测向量是由一个具有响应概率密度分布的状态序列产生.即隐马尔可夫模型是一个由具有一定状态数的马尔可夫链与一个可随机显示的可观测现象函数集组成的双随机过程.在网格计算这一高度动态、异构且随机的环境下,HMM 理论可对资源使用者与提供者的行为进行恰当的数学描述.

在网格环境中,各种自治资源和系统被高效地组合起来,以实现资源共享、协同工作和联合计算,为各种用户提供基于网络的“即连即用”的综合性服务.这些服务的依托于网格中的各种虚拟组织,虚拟化技术<sup>[8,9]</sup>为其提供了极大的便利.网格对于资源的虚拟化有两个主要方向:一类是将一个物理系统分割成多个虚拟的子系统;另一类是将多个子物理系统整合成一个大型的虚拟系统,作为一种更大的设备提供给对网络 QoS 要求更高的用户来使用.本文建立的资源分配模型中应用到前者的方法.

对于网格资源分配的研究,文献[10]提出了一种基于序贯博弈的优化用户时间的网格资源分配策略,在使用纳什均衡理论对资源负载加以预测的基础上,生成全体用户的出价优化组合与资源的最优价格,进而按比例分配资源.文献[11]中给出一种基于双向拍卖机制的计算网格资源分配方法,买卖双方都不只一个,他们同时向拍卖师提交价格与资源需求,交易双方可以灵活调节付费且最终成交价格不唯一.文献[12]从计量经济学的角度分析了网格环境下拍卖模型的资源分配效率.文献[13]提出了一个网格环境下基于博弈论的分层的模型,分析了资源代理方的自私行为对资源分配的影响.文献[14]将隐马尔可夫模型应用到对在线零售站点的购买路径分析中,解决了在线零售商务网站的群体自适应问题.文献[15]应用隐马尔可夫模型解决了大规模能量转移过程中的出错诊断问题.上述方法要么理想化地考虑了资源与用户之间的关系而没有考虑用户和用户之间的关系,形成的分配结果未能充分考虑用户的需要,要么对网格用户行为的预测缺乏灵活性、准确性.

目前,尚未有研究将隐马尔可夫模型应用于市场网格,本文将其应用到对网格用户出价的预测上,建立了离散时间 HMM 模型对前  $t-1$  个时刻在以每个用户提交的资源需求为可观测状态序列条件下,对用户使用资源的单价出价状态进行预测,从而计算出其能获得所需资源的概率.同时,考虑到最大化用户与资源提供者利益,提出一种非完全信息博弈模型——多赢家拍卖模型(multi-winners auction model,简称 MWAM).证明了其存在纳什均衡解,且可以最大化系统收益.实验先从纵向上验证了 HMM 预测结果的准确性以及本模型在市场网格下的适用性;再从横向上与几种常见资源分配算法进行比较,突出了其特征性优势.

## 1 非完全信息博弈模型

非完全信息博弈模型主要由两部分构成:(1) 使用隐马尔可夫技术对每位竞拍者的单位竞拍价做出预测,以便推导对于某一竞拍者  $c$  来说,以单位竞拍价  $g^*(v_c)$  赢得所需资源的概率;(2) 改变以往竞拍的单用户获得资源,提出一种多赢家式拍卖机制,可通过竞拍者对出价策略的博弈,迅速形成均衡竞拍价,之后,资源代理根据多赢家拍卖算法将资源分配给若干竞拍者,最优化系统收益与资源利用率.

### 1.1 基于HMM的单位竞拍价预测

在网格计算环境中,任何一个节点都可以在适合的时间加入或退出网格环境.为配合多赢家式资源拍卖模型,诱导最优的竞拍价,本文利用隐马尔可夫模型(HMM)事先计算除资源请求者外的竞拍者对单位资源出价的

预测值,结合多赢家模型推导出纳什均衡解,最优化系统收益.从经济学的角度来看,竞拍者为了最大化自己的收益,希望预测有多少资源可以预留,本文所建立的模型能够帮助竞拍者预测资源的提前预留.

在本文的拍卖模型中,每轮拍卖竞拍者必须计算自身对所需资源的实际估计价值.每一时刻  $t$  拍卖,竞拍者都将自己的竞拍价  $g(v_i^{(c)})$  与资源请求数量  $r_i^{(c)}$  提交给资源代理,资源代理利用分配算法分配资源,公布分配结果与  $\{g(v_i^{(c)}), r_i^{(c)}\}$ . 竞拍价  $g(v_i^{(c)})$  是竞拍者  $c$  在实际估价  $v_i^{(c)}$  的基础上,同时考虑到其他竞拍者的预测估价,并且为了最大化拍卖收益,最终提交的对所需资源的受买价格,用  $g^*(v_i)$  表示.

本文建立一种隐马尔可夫模型来预测竞拍者单位资源的实际估价.该预测模型通过已知的资源请求序列  $R$  来计算  $t$  时刻任一竞拍者  $c$  对单位资源的最大可能竞拍价  $(g^{(c)}(v_i)/r_i^{(c)})$  及其概率.隐马尔可夫链可以用五元组  $\langle X_T^{(c)}, R_T^{(c)}, P, CP, \pi \rangle$  来表示.其中,

- (1)  $X_T^{(c)} = \{s_1^{(c)}, s_2^{(c)}, \dots, s_n^{(c)}\}$  为竞拍者的单位资源竞拍价的集合,  $X_t^{(c)} = s_i^{(c)}$  表示用户  $c$  在时刻  $t$  对所需资源的单位资源竞拍价为  $s_i^{(c)} = g^{(c)}(v_i)/r_i^{(c)}$ ,  $s_i^{(c)} - s_{i-1}^{(c)}$  为市场网络中资源交易的最小货币单位.对于用户来说,都有自己能够承受的单价上限  $price_{max}$ , 因此  $X_T^{(c)} = \{s_x^{(c)} | 0 \leq s_x^{(c)} \leq price_{max}, x \leq n\}$  (简称为  $X_T = s_i$ ).
- (2)  $R_T^{(c)} = \{r_1^{(c)}, r_2^{(c)}, \dots, r_m^{(c)}\}$  为竞标者可观测到的其他任何一个竞标者在  $t$  个时刻内  $m$  个需求资源数量的信号集合,  $r_j^{(c)}$  与  $s_i^{(c)}$  不存在一一对应的关系,但  $s_i^{(c)}$  可以一定的概率显示为  $r_j^{(c)}$  (简称为  $R_T = r_j$ ).
- (3)  $P = (p_{ij})_{n \times n}$  为对于某个竞拍者  $c_h (h=1, 2, \dots)$  来说,其  $X$  的  $n$  种状态之间相互转移的概率矩阵.其中,  $p_{ij} = P\{X_{t+1} = s_j | X_t = s_i\} (1 \leq i, j \leq n)$ .
- (4)  $CP = (cp_{lk})_{m \times n}$ , 其中,  $cp_{lk} = P(X_t = s_l | R_t = r_k), (1 \leq l \leq n, 1 \leq k \leq m)$ .
- (5)  $\pi$  为初始状态的概率分布,其中,  $\pi = \{\pi_i\}, \pi_i = P(X_1 = s_i) (1 \leq i \leq N)$ .

如图 1 所示,本文所建立的隐马尔可夫模型主要由两大部分组成:第 1 部分为所有资源请求者的单位竞拍价的集合,即马尔可夫链.其中,每个请求者有  $n$  个单价状态  $s_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,各自以  $p_{ij}$  的概率相互转换;第 2 部分为一组可观测的随机状态,由第 1 部分的  $s_i$  经过一定的概率  $P(X_t = s_i | R_t = r_j)$  显示为  $r_j^{(c)} (j=1, 2, \dots, m)$ .

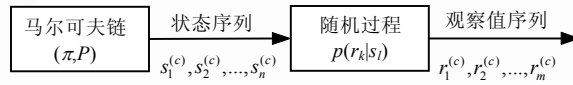


Fig.1 Theory of HMM configuration  
图 1 HMM 构成原理

为计算对资源请求者的预测单价状态  $s_j$ ,先计算条件概率  $cp_{ii} = P(X_t = s_i | R_t = r_i) (i=1, 2, \dots, n)$  的值;然后,从  $n$  个值中选取使  $P(X_t = s_i | R_t = r_i)$  最大的  $s_j$  作为最终结果.条件概率  $cp_{ii}$  为

$$P(X_t = s_i | R_t = r_i) = \frac{P\{X_t = s_i, R_t = r_i\}}{P(R_t = r_i)} \tag{1}$$

令  $Q_t(s_i, r_i) = P\{X_t = s_i, R_t = r_i\}$ , 代入贝叶斯公式(1)中得  $P(X_t = s_i | R_t = r_j) = \frac{Q_t(s_i, r_i)}{\sum_{s_j \in X} Q_t(s_j, r_i)}$ , 则

$$\begin{aligned} Q_t(s_i, r_i) &= \sum_{j=1}^n P\{R_{t-1} = r_{i-1}, X_{t-1} = s_j, X_t = s_i, R_t = r_i\} = \sum_{j=1}^n Q_{t-1}(s_j, r_{i-1}) P\{X_t = s_i, R_t = r_i | X_{t-1} = s_j\} \\ &= \sum_{j=1}^n Q_{t-1}(s_j, r_{i-1}) P_{ji} p(r_i | s_i) = p(r_i | s_i) \sum_{j=1}^n Q_{t-1}(s_j, r_{i-1}) P_{ji}. \end{aligned}$$

对于  $Q_t(s_j, r_i)$ ,推导出递推公式之后,由  $Q_1(s_j, r_1) = P\{X_1 = s_j, R_1 = r_1\} = \pi_j p(r_1 | s_j)$  得到  $Q_2(s_j, r_2), Q_3(s_j, r_3), Q_4(s_j, r_4), \dots$

在给定  $\{r_1^{(c)}, r_2^{(c)}, \dots, r_m^{(c)}\}$  的条件下,需要保证隐马尔可夫链在  $t$  时刻的最佳预测状态,并使正确预测的状态概率最大.每轮拍卖,竞拍者所请求的资源数量都作为其价值评估函数的参数之一,任何一个竞标者一组资源请求

的历史记录  $\{r_1^{(c)}, r_2^{(c)}, \dots, r_m^{(c)}\}$  与其出价状态  $s_j$  并非呈一一对应关系,但每个  $s_j$  总会以一定的概率形式显示为  $r_j$ . 那么,对于每一个  $j \leq n$ ,取使  $P(X_t = s_j | R_t = r_k) = \frac{P\{X_t = s_j, R_t = r_k\}}{P(R_t = r_k)}$  取得最大值的  $s_j$  为  $r_k$  条件下  $X_t$  的预测.由上文的假设可知:

$$P(X_t = s_j | R_t = r_t) = \frac{P\{X_t = s_j, R_t = r_t\}}{P(R_t = r_t)} = \frac{Q_t(s_j, r_t)}{\sum_{s_j \in X} Q_t(s_j, r_t)}$$

因此,使得  $Q_t(s_j, r_t) = \max_{s_j \in X} Q_t(s_j, r_t)$  的  $s_j$  就是此刻的最佳预测状态.通过依次计算  $Q_2(s_j), Q_3(s_j), \dots$  即可求解.因此,对于每一位竞拍者  $c$  来说,设  $\max_{s_j^{(c)} \in X} P(X_t = s_j^{(c)} | R_t = r_t) = p^{(c)}(s_j)$ ,这就计算出了  $t$  时刻对竞拍者  $c$  对单位资源竞拍价的预测值  $s_j$ .

已知竞拍者单位出价的概率,通过多赢家拍卖规则,即可推导出对于某一竞拍者  $c$  来说,以出价  $g(v_i)$  赢得所需资源的概率的表达式  $prob_{win}(r_i, g(v_i))$ ,从而可计算期望收益,得到非完全信息博弈中的稳定均衡竞拍价.该表达式以及推导过程将在实验参数设置中给予详细描述.

### 1.2 MWAM的结构及算法

基于市场中的供求关系,本文从资源的角度提出一种网格环境下的新型拍卖模型——多赢家式拍卖,使最终获得所需资源的用户数量为多个而不只是 1 个.整个过程可以看作是一种非完全信息博弈,竞拍者在彼此独立的条件下,通过一轮竞拍,以不同价格争夺网格资源,最终,资源代理依据特定的拍卖方式选择胜出者.它需要的信息量较少且具有很强的操作性,可以使系统形成稳定的均衡价.

#### 1.2.1 MWAM 的结构

依托于市场网格环境下的非完全信息博弈理论与虚拟化方法,本文提出一种多赢家式拍卖模型,其构成如图 2 所示.

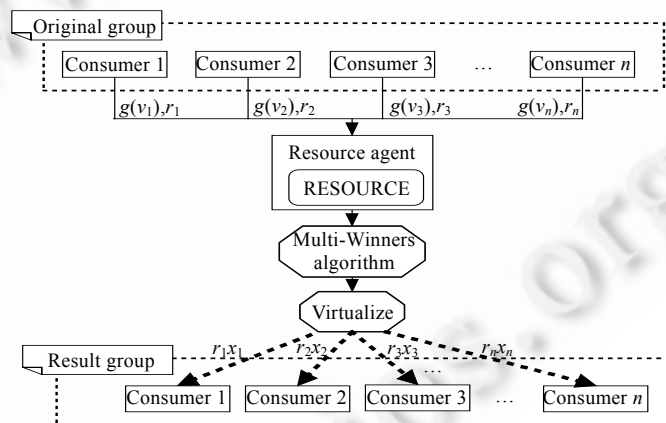


Fig.2 Architecture of multi-winners auction model

图 2 多赢家式拍卖模型结构

多赢家式拍卖模型按流程划分主要由 4 部分构成.竞拍开始后,初始集合(original group)中的每一位(consumer 1, consumer 2, ..., consumer n)竞拍者向资源代理(resource agent)提交本轮拍卖的竞拍价  $g(v_i)$  与请求资源量  $r_i$ ,资源代理依照多赢家式算法(multi-winners algorithm)将资源按比例虚拟化,分配给结果集(result group)中的竞拍者,本轮资源拍卖结束.各部分主要功能如下:

(1) Resource Agent:资源代理,负责发布资源属性,虚拟化分配资源.并且设定单位资源价格底线  $price_{min}$ ,单位竞拍价  $g(v_i)/r_i < price_{min}$  的竞拍者将不被纳入竞拍.

(2) **Original group**:所有参加竞拍的竞拍人集合.拍卖开始之后,竞拍者计算可以赢得所需资源的概率,从而通过博弈确定竞拍价  $g(v_i)$ .接下来,向资源代理 Resource Agent 提交竞标价与实际需求量,即  $(g(v_i), r_i)$ .

(3) **Multi-winners Algorithm**:核心分配算法模块.设  $0 \leq x_i \leq 1$  为分配给竞拍者的资源量占其需求量的百分比,则资源代理分配给竞拍者的资源量为  $r_i x_i$ ;对用户提交的  $(g(v_i), r_i)$ ,对于任意的  $k \leq n$ ,在  $g(v_i)/r_i \geq price_{\min}$  且  $\sum_{j=1}^k r_j x_j \leq R$  的前提下,资源代理确定使得  $\sum_{j=1}^k g(v_j) x_j$  最大的  $X$  集合,即  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为竞拍中的资源分配比例集合.该模型可以表示为

$$\max_{0 \leq x_i \leq 1} \sum_{j=1}^n g(v_j) x_j \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} g(v_i)/r_i \geq price_{\min} \\ \sum_{j=1}^k r_j x_j \leq R \\ r_j \geq 0, R \geq 0, 0 \leq x_j \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

(4) **Result group**:拍卖结束后,每个竞拍者获得资源数量的集合  $\{(c_1, r_1 x_1), (c_2, r_2 x_2), \dots, (c_n, r_n x_n)\}$ .

### 1.2.2 MWAM 的核心算法

由模型假设可知,从最优分配结果中除去分配给用户  $i$  的资源量  $r_i x_i$ ,剩下的必须是从  $R - r_i x_i$  中取出并分配给  $n-1$  个用户的且使得总收益最大的资源分配量,因此它满足贪心算法的最优子结构;考虑到减慢  $R$  中剩余资源的消耗以及提高资源代理的收益增加速率,采用单位资源量的出价  $g(v_i)/r_i$  作为贪心选择标准.考虑到网格环境中申请资源节点的数量,使用快速排序法将  $g(v_i)/r_i$  排序,之后,按照  $g(v_i)/r_i$  的降序依次将资源分配给竞拍者,假设有  $g(v_1)/r_1 \geq g(v_2)/r_2 \geq \dots \geq g(v_n)/r_n$ .

设变量  $temp$  与  $profit$  表示已经分配的资源量和资源代理的最大收益,数组  $request[i]$  与  $value[i]$  分别表示竞拍者  $i$  的资源需求量和竞拍价,  $R$  表示资源总量,  $n$  表示竞拍者的数目.该算法如图 3 所示.

```

1: ResourceAssignment () {
   /* n 表示竞拍者的数目 */
   /* request[i] 表示竞拍者 i 的资源需求量 */
   /* value[i] 表示竞拍价, R 表示资源总量 */
2:   temp=0;
3:   for (i=1, 2, ..., n) {
4:     if ((request[i]+temp) ≤ 资源总量 R)
5:       {profit+=value[i];
6:        temp+=request[i];}
7:     else if ((request[i]+temp) > 资源总量 R) {
8:       int 剩余需求量 m=R-temp;
9:       double x_i=(double) 剩余需求量 m/request[i];
10:      profit+=value[i]*x_i;
11:      temp+=剩余需求量 m;
12:      end 分配结束;
13:    }
14:   return profit;
15: }

```

Fig.3 Algorithm of multi-winners auction model

图 3 多赢家资源分配算法

使用单位资源价格  $g(v_i)/r_i$  作为贪心选择的标准分配资源,一方面能够减慢分配过程中  $R$  中剩余资源的减少速度,充分利用了资源;另一方面,按照单位资源出价的降序来分配资源,能够最优化资源代理的最终收益.由此可得竞拍者以单位出价  $g(v_i)/r_i$  获取资源的概率的表达式  $prob_{win}(r_i, g(v_i))$ ,可以看作是竞拍者  $i$  的单价与全体竞拍者的单价之和的比值.

### 1.3 算法总体流程及时间复杂度分析

从竞拍者  $i$  对资源作出实际的价格估计  $v_i$ ,到资源代理(拍卖方)将资源分配给各申请者,该非完全信息纳什

均衡博弈模型主要由 HMM 预测过程与多赢家式拍卖两个部分组成,其主要流程如图 4 所示.

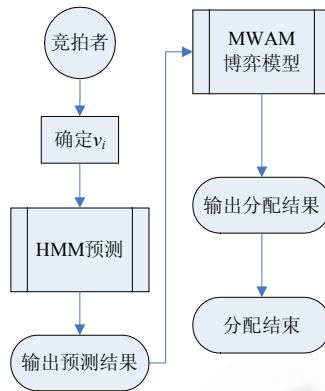


Fig.4 Process of Nash equilibrium on incomplete information game

图 4 非完全信息纳什均衡博弈的流程

由 HMM 预测模型可知,在  $X_T^{(c)}$  集合中,在状态数目(亦即每个竞拍者在之前参与竞价的次数)一定的情况下,其对于单个竞拍者的出价预测过程的时间复杂度是一个常量  $O(1)$ ,也就是说,与竞拍者数目  $n$  的多少无关.但当整个的 HMM 预测结束时,每位竞拍者都对其余  $n-1$  位参与者的出价做了预测.因此,设 HMM 预测模型的时间复杂度为  $T_1(n)$ ,则  $T_1(n)=n-1+c=O(n)$ ;接下来,MWAM 模型进行资源分配,其中包括了对单位资源竞价的排序与资源的分配.由图 3 可以明显地看出,其复杂度为  $O(n)$ .设此 MWAM 模型的时间复杂度为  $T_2(n)$ ,则  $T_2(n)=O(n\log n)+O(n)=O(n\log n)$ .因此,前后相加得出,此基于非完全信息纳什均衡的资源分配模型在  $X_T^{(c)}$  集合元素个数一定的情况下,其时间复杂度为  $T(n)=T_1(n)+T_2(n)=O(n)+O(n\log n)=O(n\log n)$ .

## 2 MWAM 的效用分析

MWAM 是场网格中以经济学理论为依托的模型.文将从激励相容性、个人理性、系统收益这几方面分析证明其效用.

(1) 激励相容性:在竞标者个人理性出价且个人利益不受到损失的同时,使得其他人的收益也有所增加,或者说使得各自标价能够达到一种均衡出价状态.对于任何一位竞拍者的任何一种出价类型  $g'(v_i)$ ,有

$$[v_i - g^*(v_i)]prob^* \geq [v_i - g'(v_i)]prob'$$

由于只有当在每组的竞拍中胜出,竞拍者的收益才会体现,否则收益为 0,因此本文定义竞拍者  $c$  的期望收益函数为  $E_i = [v_i - g(v_i)]prob_{win}(r_i, g(v_i))$ .其中,  $prob_{win}(r_i, g(v_i)) = \frac{g(v_i)/r_i}{g(v_i)/r_i + \sum_{j=1}^{n-1} p^{(c)}(s_j)g(v_j)/r_j}$  表示用户以出价  $g(v_i)$

赢得资源的概率,化简得  $prob_{win}(r_i, g(v_i)) = \frac{g(v_i)}{g(v_i) + r_i \sum_{j=1}^{n-1} p^{(c)}(s_j)g(v_j)/r_j}$ .由预测结果可知,  $r_i \sum_{j=1}^{n-1} p^{(c)}(s_j)g(v_j)/r_j$

为常数,将该常数设为  $A$ ,则  $E_i = [v_i - g(v_i)] \frac{g(v_i)}{g(v_i) + A}$ ,整理得  $E_i = - \left[ (g(v_i) + A) + \frac{A^2 + Av_i}{g(v_i) + A} \right] + (2A + v_i)$ .其中,  $g(v_i) \in$

$(0, v_i)$ .由  $E'_i(g(v_i) + A) = 0$  得  $g^*(v_i) = \sqrt{A^2 + Av_i} - A$ ,其中,  $A = r_i \sum_{j=1}^{n-1} p^{(c)}(s_j)g(v_j)/r_j$ .  $g^*(v_i)$  即纳什均衡解,也就是竞拍者最终的出价.由此可见,当每个竞拍者出价都达到了非完全信息静态博弈中的纳什均衡状态时,由定义可知,其满足激励相容策略约束.

(2) 个人理性:每个竞拍者的出价行为也要符合个人理性约束,即效用都为正  $v_i - g(v_i) > 0$ .

对于获得资源量为 0 的竞拍者来说,其收益可看作是 0;对于按比例获得所分配资源的竞拍者来说,

$v_i - g^*(v_i) = v_i - (\sqrt{A^2 + Av_i} - A) = (A + v_i) - \sqrt{A^2 + Av_i} > \sqrt{A^2 + Av_i} - A > 0$ .因此, $v_i - g^*(v_i) > 0$ .所有竞拍者的个人效用都为非负,多赢家拍卖模型是符合个人理性的.

(3) 最大收益.考虑的是系统收益.理想状态下,成交后,资源提供者的收益与网格用户的收益总和需要达到最大.上文已求出当竞标价为纳什均衡解  $g^*(v_i)$  时用户期望收益为最大值,因此该时刻所有赢家的收益总和也最大.设模型(2)的解为  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $j$  是使得  $x_j \neq 1$  的最小下标;为证明其为最优解的正确性,假设  $X$  不是最优解,

有另一可行解  $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ ,使得  $\sum_{j=1}^k g(v_j)y_j > \sum_{j=1}^k g(v_j)x_j, \sum_{j=1}^k r_j y_j = R, l$  是使得  $y_l \neq x_l$  的最小下标,则,

- (1) 当  $l < j$  时,由  $x_l = 1$  且  $y_l \neq x_l$ ,有  $y_l < x_l$ ;
- (2) 当  $l = j$  时,若  $y_l > x_l$ ,则对于  $j < i < n, x_i = 0, \sum_{j=1}^n r_j y_j > R$ , 故  $y_l < x_l$ ;
- (3) 当  $l > j$  时,有  $\sum_{j=1}^n r_j y_j > R$ , 与模型(2)限制条件矛盾.综上所述, $y_l < x_l$ .

假设  $y_l + \beta = x_l$ ,则为保证  $\sum_{j=1}^n r_j y_j = R$ , 需要从  $(y_{l+1}, y_{l+2}, \dots, y_n)$  中减去  $\beta$ .

这样,对于  $\sum_{l+1 \leq i \leq n} (y_i - x_i)r_i = (x_l - y_l)r = R$  且  $g(v_1)/r_1 \geq g(v_2)/r_2 \geq \dots \geq g(v_n)/r_n$ , 有

$$\begin{aligned} \sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)x_i &= \sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)y_i + (x_l - y_l)r_i g(v_l)/r_l - \sum_{l+1 \leq i \leq n} (y_i - x_i)r_i g(v_i)/r_i \Leftrightarrow \\ \sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)x_i - \sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)y_i &= (x_l - y_l)r_i g(v_l)/r_l - \sum_{l+1 \leq i \leq n} (y_i - x_i)r_i g(v_i)/r_i < 0 \Leftrightarrow \\ \sum_{l+1 \leq i \leq n} (y_i - x_i)r_i \cdot g(v_l)/r_l - \sum_{l+1 \leq i \leq n} (y_i - x_i)r_i g(v_i)/r_i &< 0 \Leftrightarrow \\ g(v_l)/r_l - g(v_i)/r_i < 0 & (\forall i, i \in Z \text{ 且 } i \in [l+1, n]). \end{aligned}$$

此结果与  $g(v_1)/r_1 \geq g(v_2)/r_2 \geq \dots \geq g(v_n)/r_n$  矛盾,  $\sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)x_i < \sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)y_i$  不成立.

$\sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)x_i > \sum_{1 \leq i \leq n} g(v_i)y_i, X$  是该问题的最优解.系统总收益为赢得资源的竞标者总收益与资源代理收益之和,二者均为最大,因此系统收益为最大.

由上述推导证明可见,HMM 的引入使其预测结果一方面为最终竞拍价的形成提供了适合的理论依据;另一方面,从经济学的拍卖行为的角度来看,也为竞拍者自身收益预算的优化以及拍卖方对网格资源的优势分配、资源的提前预留都有帮助;另外,非完全信息博弈理论促使本模型能够形成较稳定的纳什均衡解,即最终竞拍价,使竞拍者出价满足激励相容性与个人理性,且最优化了收益;从系统收益上来看,使用本文的分配算法,能够为其带来最优收益.

### 3 实验模拟

模拟实验先对多赢家资源分配算法中 HMM 预测的可行性以及多赢家模型在市场网格中的适用性做了纵向的实验分析.然后,分别选取序贯博弈资源分配算法<sup>[10]</sup>、双向拍卖分配算法<sup>[11]</sup>、基于 QoS 的资源分配算法<sup>[16]</sup>以及经济学中常见的第一价格拍卖算法、第二价格拍卖算法与本文的多赢家算法进行横向比较,主要比较的指标有:资源利用率、系统总收益和算法执行时间.

#### 3.1 参数设置

HMM 模型建立之后,需要给定初始化参数,通过状态预测算法得到参数的收敛值.在实验模拟中,假设网格资源货币单位为 1GC(grid currency),选取 20 台 PC 机,将其整合为容量为 100G 的存储资源,另选一台 PC 机作为资源代理,发布的资源属性见表 1.

Table 1 Resource attributes

表 1 资源属性

资源名称	容量(GB)	类型	传输标准	实际频率(MHz)	等效频率	传输率	最低价格(GC/GB)
内存	100	DDR400	PC3200	200	400	3 200MB/s	5

本文中,设定竞标者个数为 20,实验分为 50 组。

每组中,竞拍者  $c$  所能承受的单价上限为  $price_{max}^{(c)}$ , 且  $price_{max}^{(c)} > price_{min}^{(c)}$ , 则状态数为  $price_{max}^{(c)} - price_{min}^{(c)}$ , 设  $price_{min}^{(c)} = 5$ 。设定每组模拟仿真 100 轮拍卖。其中,竞标者  $c$  的需求量为一个集合  $(r_1^{(c)}, r_2^{(c)}, \dots, r_{100}^{(c)})$ , 其中,  $r_i^{(c)}$  为区间  $[0, 100]$  上的一个随机整数;  $price_{max}^{(c)} \geq 5$ ,  $price_{max}^{(c)}$  亦为一个随机整数。

针对竞拍者需求的异构性,采用效用函数描述竞拍者对资源属性的偏好,从而直接体现为其自身对资源价值的实际评估。在网格环境下的资源供求关系中,用户对资源的需求量越大,最终的竞标价往往越高;同时,用户渴望占用资源完成任务的执行时间越长,资源相对开销就越高,最终标价也就相应地升高。本文中主要考虑参数资源需求量对函数的影响。在本文的拍卖模型中,实际价值评估函数为

$$v_i(T, R, \alpha) = \eta((1-\alpha)\ln T + \alpha \ln R) \tag{3}$$

其中,  $T$  是期望使用资源的时间;  $R$  为资源的需求量;  $\alpha$  是竞标者对上述两种属性的各自偏好程度,  $\alpha \in (0, 1)$ ;  $\eta$  为单位效用所带来的收益。这里设定  $\eta = 20$ ,  $\alpha = 0.9$ 。

设竞标者在已预测其他估价  $v_i$  的基础上能赢得所需资源量的概率为  $prob_{win}(r_i, v_i)$ 。单位价格  $g(v_i)/r_i$  相对越大,得到资源的概率越大,因此,本文中  $prob_{win}(r_i, v_i)$  的值为竞拍者单位竞拍价格与其他竞拍者的预测单位拍价之和的比值。剩余  $n-1$  个竞拍者的预测单位价格之和为  $\sum_{j=1}^{n-1} p^{(c)}(s_j)g(v_j)/r_j$ , 则

$$prob_{win}(r_i, v_i) = \frac{g(v_i)/r_i}{g(v_i)/r_i + \sum_{j=1}^{n-1} p^{(c)}(s_j)g(v_j)/r_j} \tag{4}$$

将公式(4)代入  $g^*(v_i)$  表达式中即可计算  $g^*(v_i)$  的值,求得最终的均衡竞拍价,由竞拍者提交给资源代理。

### 3.2 模拟结果及分析

自行编写仿真程序模拟上述拍卖过程。经过样本训练后,对于其中任意一位竞标者  $c$ ,  $price_{max}^{(c)} = 15$ , 需求量  $r_i^{(c)}$  依次取  $[0, 100]$  上的随机值。其中,竞拍价  $g^{(c)}(v_i)$  为预测单价  $s_i^{(c)}$  与需求量  $r_i^{(c)}$  的积。经过 32 轮模拟拍卖后,所得的预测估价与实际估价的对比如图 5 所示。由对比结果可以看出,使用 HMM 模型预测的竞拍价曲线与竞拍者实际竞拍价曲线有较大的相似度。在网格计算高度动态、异构且随机的环境下,本文建立的 HMM 除了可以对资源使用者与提供者的行为进行恰当的数学描述以外,还可以比较准确地反映实际的竞拍价,具有较好的适用性。

接下来考虑当竞标者总数与资源总量  $R$  逐步增加时,算法的执行时间与资源代理总体收益的变化情况。分别取竞拍者数目  $n$  为 80, 120, 160, 200, 变化情况如图 6 所示。当资源总量增加时,资源代理的收益呈现增加的趋势;当竞标者数目增多时,资源代理的收益亦有较快增长,即资源代理方收益与资源总量和竞拍者数量基本上都成正比关系。由此可见,该 MWAM 算法能够较好地适应市场经济网格的特点。

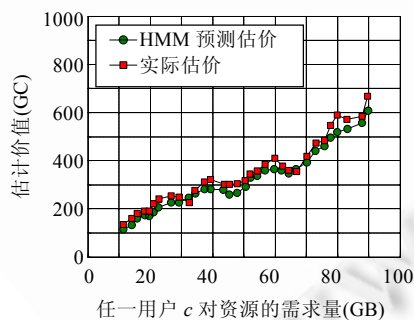


Fig.5 Comparison of auction price computed by HMM prediction to the real auction process

图 5 HMM 预测竞拍价与实际竞拍价的对比

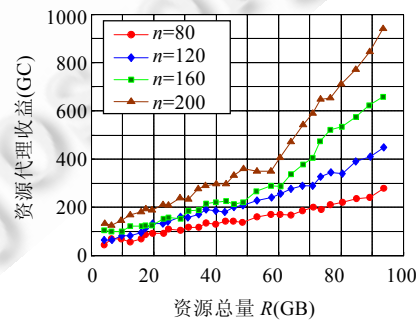


Fig.6 Profit influenced by the amount of auctioneers

图 6 竞拍者数目变化对收益的影响

为了突出本模型的特性,选取几种经典的资源分配算法,并分别以资源利用率与系统收益为指标与本文提



出的算法进行比较.其中,参加资源分配的网格用户数量 $n$ 分别等于20,40,80,120,160,200.资源利用率=用户使用资源量/资源总量,其中,设多赢家式拍卖的资源利用率为 100%.图中显示的数据是其他算法的资源利用率与本文算法相比的结果.系统总收益=资源提供者收益+资源使用者收益总和.图 7、图 8 分别是对各项指标的实验模拟结果,其中,每项数据为经 100 次模拟后的平均值.

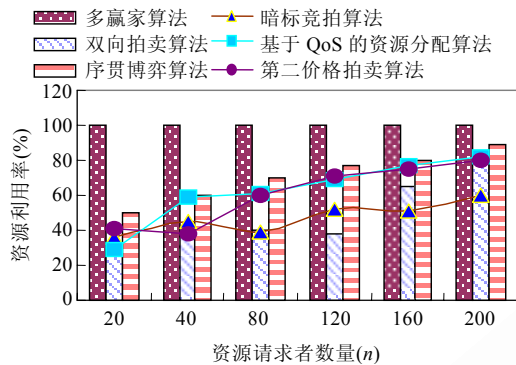


Fig.7 Comparison of resource utilization ratio  
图 7 资源利用率对比

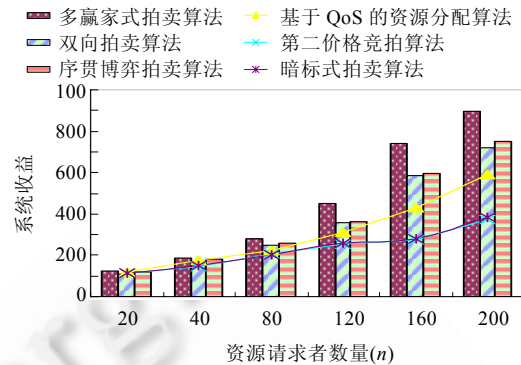


Fig.8 Comparison of each system's profit  
图 8 系统收益的差异比较

对多赢家分配算法的时间复杂度与其他 3 种算法(序贯博弈算法、基于 QoS 的资源分配算法、双向拍卖算法)进行实验对比.竞拍中,每个竞拍者的历史出价状态(即  $X_i^{(c)}$  集合中的元素)数目会影响到 HMM 预测过程的执行时间.设  $n$  为竞拍者数目,先对 4 种算法的时间复杂度加以比较,进而对基于 QoS 的资源分配算法和多赢家资源分配算法的执行时间加以对比, $m$  表示  $X_i^{(c)}$  集合元素个数, $n=200$ .实验模拟结果如表 2 和图 9 所示.

Table 2 Comparison of algorithms' time complexity

表 2 算法时间复杂度比较

算法	时间复杂度
多赢家资源算法	$O(n \log n)$
双向拍卖算法	$O(n^2)$
序贯博弈算法	$O(n^2)$
基于 QoS 的资源分配算法	$O(n \log n)$
第二价格算法	$O(n^2)$
暗标拍卖算法	$O(n^2)$

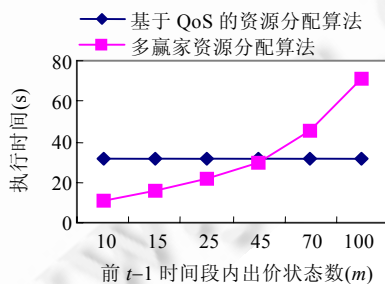


Fig.9 Comparison of algorithms' execution time when  $n=200$   
图 9  $n=200$  时算法执行时间对比

由实验结果可以看出,本模型中,HMM 可以较准确地对竞拍者的实际竞拍价做出预测,从而形成稳定的均衡出价,最大化系统收益;且随着竞拍者数量的增长,资源总量的不断增加,系统总收益亦呈指数增长,能够较好

地适应市场经济网格的特性.与几种经典算法相比,本文的多赢家算法在资源利用率与系统收益方面都有较大的优势.从执行时间来看,当  $m=70$  时,本算法的时间复杂度才开始高于所选算法.而在实际的网格计算环境中,只要  $m$  满足  $m \in (10,25)$  且  $m \in \mathbb{Z}$ ,即可确保 HMM 预测过程的准确性与稳定性.由此可见,本算法的执行时间与同类算法相比具有一定的优势.本算法在网格上的应用包含两个主要步骤:首先,用户利用 HMM 模型预测估价,从而确定竞拍价  $g^*(v_i)$ ;接下来,资源代理利用多赢家资源分配方法在网格环境下分配资源.

#### 4 结 论

本文结合非完全信息博弈理论,提出了一种多赢家式网格资源的分配模型(MWAM).与以往算法相比,更充分利用了网格资源,优化交易双方的收益,能更好地适应市场网格环境.与传统的分配方法相比,本模型首次将隐马尔可夫模型理论应用到市场网格中用户出价预测中,通过已知竞标者的资源需求,成功地预测了其最终单位标价,并以实验的方式证实了预测结果的准确性;另外,本文将原有资源拍卖机制中的单一用户获得资源的机制拓展为多个竞拍者同时获得所需资源的多赢家算法;同时,竞标者通过对自身期望收益的计算,能够形成稳定的均衡价,满足微观经济学中的激励相容性与个人理性,最优化系统收益与资源利用率,使其达到双赢.

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行以及为本文的不断完善给予真知灼见的审阅者们表示衷心的感谢.

#### References:

- [1] Chervenak A, Foster I, Kesselman C, Salisbury C, Tuecke S. The data grid: Towards an architecture for the distributed management and analysis of largescientific datasets. *Journal of Network and Computer Applications*, 2000,23(3):187–200. [doi: 10.1006/jnca.2000.0110]
- [2] Foster I, Kesselman C, Tuecke S. The anatomy of the grid: Enabling scalable virtual organizations. *Int'l Journal of Supercomputer Applications*, 2001,15(3):200–222. [doi: 10.1177/109434200101500302]
- [3] Cao HQ, Xiao N, Lu XC, Liu Y. A market-based approach to allocate resources for computational grids. *Journal of Computer Research and Development*, 2002,39(8):913–916 (in Chinese with English abstract).
- [4] Krauter K, Buyya R, Maheswaran M. A taxonomy and survey of grid resource management systems for distributed computing. *Software: Practice and Experience*, 2002,32(2):135–164. [doi: 10.1002/spe.432]
- [5] Maheswaran RT, Başar T. Nash equilibrium and decentralized negotiation in auctioning divisible resources. *Group Decision and Negotiation*, 2003,12(5):361–395. [doi: 10.1023/B:GRUP.0000003745.98183.8d]
- [6] Nash JF. Non-Cooperative games. *The Annals of Mathematics*, 1951,54(2):286–295. [doi: 10.2307/1969529]
- [7] Rabiner, LR. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proc. of the IEEE*, 1989,77(2): 257–286. [doi: 10.1109/5.18626]
- [8] Zhang Y, Sun ZG. Virtualization technology for trustworthy network research. *Chinese Journal of Computers*, 2009,32(3):417–423 (in Chinese with English abstract). [doi: CNKI:SUN:JSJX.0.2009-03-005]
- [9] Roscoe T. The end of Internet architecture. In: *Proc. of the 5th Workshop on Hot Topics in Networks*. Irvine: ACM Press, 2006. 55–60.
- [10] Li ZJ, Cheng CT, Huang FX, Li X. A sequential game-based resource allocation strategy in grid environment. *Journal of Software*, 2006,17(11):2373–2383 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2373.htm> [doi: 10.1360/jos172373]
- [11] Weng CL, LU XD. A double auction method for resource allocation on computational grids. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(6):1004–1009 (in Chinese with English abstract).
- [12] Wolski R, Plank JS, Brevik J, Bryan T. Analyzing Market-based resource allocation strategies for the computational grid. *Int'l Journal of High Performance Computing Applications*, 2001,15(3):258–281. [doi: 10.1177/109434200101500305]

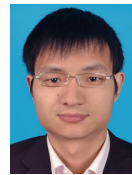
- [13] Kwok YK, Song SS, Hwang K. Selfish grid computing: Game-theoretic modeling and NAS performance results. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005. 1143–1150. [doi:10.1109/CCGRID.2005.1558688]
- [14] Wang S, Gao W, Huang TJ, Ma JY, Li JT. Adaptive online retail Web site based on hidden Markov model. Journal of Software, 2001,12(4):599–606 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12/599.htm>
- [15] Qian SX, Jiao WD, Hu HS, Yan GB. Transformer power fault diagnosis system design based on the HMM method. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Automation and Logistics. Ji'nan: IEEE Computer Society Press, 2007. 1077–1082. [doi: 10.1109/ICAL.2007.4338728]
- [16] Zhang HY, Wu CL, Ye G, Wu LB, Xiong Q. Research on an effective grid-based mechanism of task-scheduling and resource allocation. Journal of Chinese Computer Systems, 2007,28(7):1169–1172 (in Chinese with English abstract). [doi: CNKI:SUN:XXWX.0.2007-07-002]

#### 附中文参考文献:

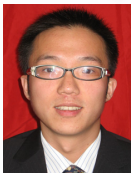
- [3] 曹鸿强,肖依,卢锡城,刘艳.一种基于市场机制的计算网格资源分配方法.计算机研究与发展,2002,39(8):913–916.
- [8] 张怡,孙志刚.面向可信网络研究的虚拟化技术.计算机学报,2009,32(3):417–423. [doi: CNKI:SUN:JSJX.0.2009-03-005]
- [10] 李志洁,程春田,黄飞雪,李欣.一种基于序贯博弈的网格资源分配策略.软件学报,2006,17(11):2373–2383. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2373.htm> [doi: 10.1360/jos172373]
- [11] 翁楚良,陆鑫达.一种基于双向拍卖机制的计算网格资源分配方法.计算机学报,2006,29(6):1004–1009.
- [14] 王实,高文,黄铁军,马继勇,李锦涛.基于隐马尔可夫模型的在线零售站点的自适应.软件学报,2001,12(4):599–606. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12/599.htm>
- [16] 张沪寅,吴产乐,叶刚,吴黎兵,熊卿.基于网格的任务调度与资源分配有效机制的研究.小型微型计算机系统,2007,28(7):1169–1172. [doi: CNKI:SUN:XXWX.0.2007-07-002]



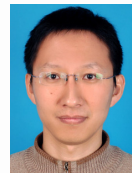
李明楚(1963—),男,江西萍乡人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为网格计算,网络安全.



陆坤(1980—),男,博士生,讲师,主要研究领域为网格计算,信任和信誉.



许雷(1984—),男,硕士,主要研究领域为网格资源管理,博弈论.



郭成(1980—),男,博士,主要研究领域为密码学与信息安全,网格计算.



孙伟峰(1978—),男,博士,讲师,主要研究领域为分布式计算,移动计算,网络 QoS.