

一种基于双向拍卖机制的计算网格资源分配方法

翁楚良 陆鑫达

(上海交通大学计算机科学与工程系 上海 200030)

摘 要 针对计算网格资源的特点以及运用经济机制进行网格资源管理所具有的灵活性及有效性,提出一种改进的基于双向拍卖机制的网格资源分配方法.首先,描述了基于双向拍卖机制的资源分配框架,整个系统由买方、卖方和计算资源经纪人组成.然后,针对网格中的 CPU 资源,提出一种改进的双向拍卖机制,采用统一拍卖方式,可以灵活调节交易双方的付费.进而,分析了该双向拍卖机制满足优势策略激励相容、预算平衡以及个人理性的特点,并定义了拍卖机制的效率.最后,通过实验分析了双向拍卖分配机制的效率.

关键词 计算网格;资源分配;双向拍卖;效率;仿真
中图法分类号 TP311

A Double Auction Method for Resource Allocation on Computational Grids

WENG Chu-Liang LU Xin-Da

(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract Considering dynamic, heterogeneous and autonomous characteristics of computing resources in the computational grid environment and the flexibility and effectivity of economics methods applied to solve the problem of resource management, a modified double auction method for resource allocation on computational grids is presented. Firstly, a double auction framework for resource allocation in the computational grid environment is described, which consists of buyers, sellers and one market maker. Secondly, a modified double auction mechanism is presented, where the uniform auction is adopted aiming at CPU resources, and the transaction fee can be adjusted flexibly. Thirdly, the property of the presented double auction mechanism is discussed, and the presented double auction mechanism proves to satisfy dominant strategy incentive compatibility, budget balance, and individual rationale, in addition the efficiency of the double auction mechanism is defined. Finally, the efficiency of the presented double auction mechanism is analyzed through experiments, and experimental results show that the efficiency of the presented double auction mechanism increases as the number of buyers and sellers increases, and indicate that the presented double auction mechanism is suitable for large-scale grid computing systems. Moreover, the difference between the number of sellers and the number of buyers can also have influence on the efficiency.

Keywords computational grid; resource allocation; double auction; efficiency; simulation

1 引 言

网格资源是由地理上分布的、隶属不同机构的、

异构的计算资源组成.资源构成的复杂性使网格环境下的资源管理存在以下难点:资源隶属于不同的机构,不同机构对于本地计算资源具有不同的使用策略,因而在网格环境下资源管理不存在统一的管

理策略;网格中资源是动态存在的,即资源动态加入和退出,网格资源管理需要向用户屏蔽这种动态性,有效利用当前可用资源;网格中资源是异构的,各种计算资源的性能及负载情况等存在差异。

网格资源的自治性、动态性及异构性决定了需要一种合适的网格资源管理方法,对于这样一个大规模、开放式的网络环境,系统未来的负载情况、计算进程和通信所需时间等都是不确定的,因此不宜采用资源的静态分配方式,相反经济机制由于其灵活性和有效性而受到关注。在资源分配中采用的经济机制包括市场机制、拍卖机制和合同网等。

经济机制中的拍卖机制是通过多个资源需求者以不同的价格竞争资源,最后由“拍卖师”依据不同的准则(英式拍卖、Vickrey 拍卖、荷兰拍卖、双向拍卖等)选定中标人并确定资源成交的价格。与单向拍卖不同,双向拍卖的市场结构是“多对多”,即买卖双方都不止一个,买卖双方同时失去了各自在单向拍卖中的相对优势,他们之间的关系变为一种供给和需求的平等关系。近些年来,双向拍卖在经济学研究领域备受关注。

在双向拍卖机制中,买卖双方针对某一资源向“拍卖师”提交供需的数量及相应的价格,由“拍卖师”根据具体的策略对买卖双方进行匹配,然后买卖双方进行交易。在一次拍卖中资源成交价格可以相同也可以不相同,若在一次拍卖中所有交易价格相同,则拍卖为统一拍卖(uniform auction),而不同买卖方的成交价格不相同,则拍卖为辨识拍卖(discrimination auction)。双向拍卖还可分为 SDA(Single-unit Double Auction)方式和 MDA(Multi-unit Double Auction)方式,在 SDA 方式中,买卖双方在一次拍卖中最多只能交易一个单位的资源,而在 MDA 方式中,买卖双方在一次拍卖中可以交易多个单位的资源。

双向拍卖特别适合于网络环境下众多买卖方的交易,在网格资源管理中具有广阔的前景。为此,本文提出了一种基于双向拍卖机制的计算网格资源分配方法,实现网格资源灵活有效的管理。

2 相关工作

在网络环境下基于经济机制进行计算机资源管理的研究工作已有很多^[1~8],GRACE^[1]给出了基于经济学的网格资源管理体系结构,综述了用于网格资源管理的各种经济模型,但对于具体的资源定价

方法未有具体的论证。文献^[2,3]基于经济学中的一般均衡理论,针对网格资源采用集中方式进行定价。文献^[4]提出了基于市场机制的网格资源分配方法,论证了基于市场机制资源管理的优点,其中资源价格采用一般均衡理论通过各资源代理分布独立确定。文献^[9]从理论上论及了基于一般均衡理论的分布定价方法。Spawn^[5]是采用单向 Vickery 拍卖模型管理异构工作站网络的资源(Vickery 拍卖,即选取最高标价的投标人为中标人,成交价格采用次高标价),而 Popcorn^[6]是基于 Web 采用单向和双向拍卖模型实现 Internet 上的资源在线分配。JaWS^[7]基于双向拍卖模型,买方与卖方提交定单到匹配器,定单可以随时更新,匹配器一旦匹配到买方与卖方定单,交易即可完成。文献^[5~7]研究工作侧重于资源分配系统的实现,其中拍卖机制采用基本的方法,对拍卖机制本身未作深入研究。文献^[8]提出了一种基于证券市场的计算网格环境下的资源分配模型,其采用了连续双向拍卖方法。

在经济学研究领域,双向拍卖早期研究工作包括文献^[10,11],其研究的双向拍卖是 SDA 方式。文献^[12]研究的双向拍卖机制仍是 SDA 方式,但在拍卖参与方的策略行为方面作了更进。文献^[13]研究 k-双向拍卖。文献^[14]针对电子市场,提出一种 MDA 方式的双向拍卖,其交易价格是固定的。文献^[15]改进 Vickery 拍卖,其交易价格可以变动,其中双向拍卖机制为 SDA 方式。以上的研究工作还包括从优势策略激励相容、预算平衡、个人理性和效率等方面研究双向拍卖。

针对网格资源的特点,结合文献^[14,15]中提出的有效方法,本文提出了一种适用于计算网格资源分配的双向拍卖定价机制,实现网格资源灵活有效的管理。该机制采用 MDA 方式以便于表达 CPU 资源交易量,交易价格采用统一拍卖方式,可以灵活调节交易双方的付费,考虑了优势策略激励相容、预算平衡和个人理性,并通过实验分析了机制的效率。

3 系统框架

本文侧重分析系统中计算资源分配的特性,并设定相应的网格应用为计算密集型应用。从计算资源配置的角度看,计算网格由计算资源买方和计算资源卖方以及为买方与卖方提供交易机制的计算资源管理者组成。本文采用双向拍卖机制。在这个系统中,设定计算资源为 CPU,计算资源的单位为

Mflops(每秒百万次浮点运算)。

计算资源管理者(我们称之为计算资源经纪人)以固定时间间隔组织双向拍卖. 买方和卖方分别根据自身的需要确定在下一个时间段内它们能够提供的 CPU 资源, 或者它们需求的 CPU 资源, 以及为相应 Mflops 所报的价格. 计算资源经纪人根据双向拍卖机制确定成交的买方和卖方, 以及成交的 CPU 资源数量和成交价格. 然后, 成交的买方和卖方分别根据双向拍卖机制确定的资源数量和成交价格完成系统的资源配置. 如图 1 所示.

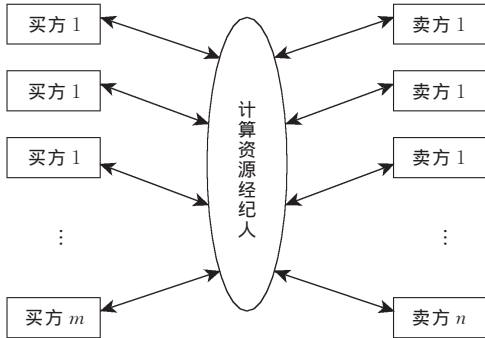


图 1 双向拍卖系统框架

4 拍卖机制

计算资源买方的个数记为 m , 计算资源卖方的个数记为 n . 买方 i 向计算资源经纪人提交的计算资源需求量记为 D_i , 向计算资源经纪人提交的单位计算资源标价(bidding price)记为 b_i ; 卖方 j 向计算资源经纪人提交的计算资源供给量记为 P_j , 向计算资源经纪人提交的单位计算资源开价(asking price)记为 a_j .

计算资源经纪人对买方的标价进行排序, 不失一般性, 设为

$$b_1 \geq b_2 \geq \dots \geq b_m \tag{1}$$

计算资源经纪人对卖方的开价进行排序, 不失一般性, 设为

$$a_n \geq a_{n-1} \geq \dots \geq a_1 \tag{2}$$

根据买方标价降序排序和卖方开价升序排序作图 2, 得到二者的交点 $C(q, p)$ (若二者相交为一线段, 则取其中点). 交点 $C(q, p)$ 存在于两种情况:

$$a_F \geq b_E \geq a_{F-1}, \text{ 同时, } \sum_{i=1}^E D_i \geq \sum_{j=1}^{F-1} P_j \geq \sum_{i=1}^{E-1} D_i \tag{3}$$

$$b_{E-1} \geq a_F \geq b_E, \text{ 同时, } \sum_{j=1}^F P_j \geq \sum_{i=1}^{E-1} D_i \geq \sum_{j=1}^{F-1} P_j \tag{4}$$

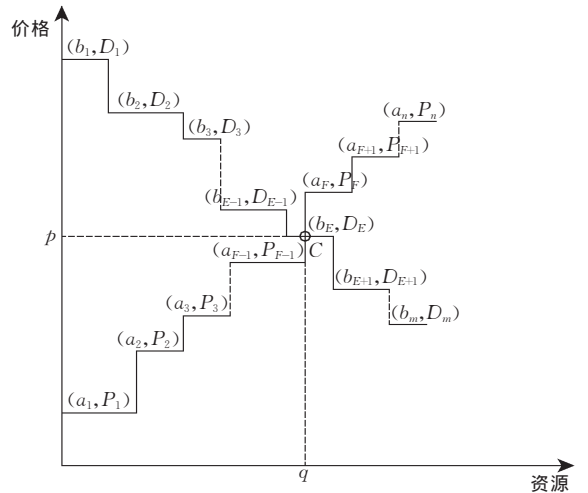


图 2 匹配示意图

按式(1)和式(2)排序后, 由交点 $C(q, p)$ 位置可以确定成交买卖双方的上限值 E, F (如图 2 所示), 买方 $i (i < E)$ 和卖方 $j (j < F)$ 在此轮拍卖中成交. 买方的成交标价定为 $p^b = \max\{a_{F-1}, b_E\}$, 卖方的成交开价定为 $p^a = \min\{a_F, b_{E-1}\}$.

此轮拍卖成交双方对单位 CPU 资源的付费: 卖方付费记为 ϕ^a , 且

$$p^a - p \leq \phi^a \leq p^a - a_{F-1} \tag{5}$$

买方付费记为 ϕ^b , 且

$$p - p^b \leq \phi^b \leq b_{E-1} - p^b \tag{6}$$

本轮拍卖的交易量对应于式(3), (4) 两种情况分别为(i)和(ii):

(i) 买方 $i (i < E)$ 的成交量 V_i^b 为它们竞标时提交的 CPU 资源数量, 即 $V_i^b = D_i$; 卖方 $j (j < F)$ 的成交量 $V_j^a = P_j \times (\sum_{k=1}^{E-1} D_k / \sum_{k=1}^{F-1} P_k)$;

(ii) 卖方 $j (j < F)$ 的成交量 V_j^a 为它们竞标时提交的 CPU 资源数量, 即 $V_j^a = P_j$; 买方 $i (i < E)$ 的成交量 $V_i^b = D_i \times (\sum_{k=1}^{F-1} P_k / \sum_{k=1}^{E-1} D_k)$;

买方 i 对应单位 CPU 资源的边际收入 (marginal revenue), 即单位 Mflops 对该买方所能产生的最大收益, 记其为 r_i ; 卖方 j 对应单位 CPU 资源的边际成本 (marginal cost), 即向外界提供单位 Mflops 所需的成本, 记其为 c_j .

当买方 i 参与拍卖并取得成功, 则它的效用为 $U_i^b = (r_i - p^b - \phi^b) \cdot V_i^b$, 而没有成功时, 则 $U_i^b = 0$. 当卖方 j 参与拍卖并取得成功, 则它的效用为 $U_j^a = (p^a - c_j - \phi^a) \cdot V_j^a$, 而没有成功时, 则 $U_j^a = 0$.

5 性质

本文主要考虑双向拍卖的以下性质^[16]：激励相容、个人理性、预算平衡和效率。在双向拍卖过程中，边际收入和边际成本分别是买方与卖方的私人信息，即不被外界所知，外界所知的只是买方标价和卖方开价。一种有效的拍卖机制能够通过制定相应的规则，使得拍卖参与方向计算资源经纪人提供边际成本或边际收入是其自身的优势策略，则该拍卖机制满足优势策略激励相容。同时参与方的决策应保证其效用为非负，即个人理性。拍卖机制还应保证整个系统的预算平衡，当所有参与方的支出和收入总和为零时，则该机制为精确预算平衡，而当所有参与方的支出和收入总和大于零时，则该机制实现弱预算平衡。同时，拍卖机制应使得拍卖参与双方在整体上的获利最大，即需要保证机制的效率。

定理 1. 在买方和卖方关于计算资源供需量为公共知识的情况下，前文所述的双向拍卖机制满足优势策略激励相容、预算平衡和个人理性。

证明. 因为边际成本与边际收入是私有信息，因此每个拍卖参与方都只能根据自身的边际信息及供需量的公共知识进行决策，因此点 $C(q, p)$ (图 2) 的位置独立于某一拍卖参与者，而是由所有参与拍卖的买卖双方共同确定，且拍卖成交之前不被拍卖参与者所知。

当 $r_i \geq p$ 时，如果取 $b_i > r_i$ ，标价为 b_i 所获得的效用与标价为 r_i 时所获得的效用相同；若取 $b_i < r_i$ ，买方将可能在这次拍卖中失败，而即使成功，其所获得的效用与标价为 r_i 时仍是相同。当 $r_i < p$ 时，若取 $b_i > r_i$ ，标价为 b_i 可能在拍卖中成交，但获得效用为负，否则与标价为 r_i 相同，即效用为零；若取 $b_i < r_i$ ，其效用与标价为 r_i 相同，即效用为零。综合上述情况，可知买方标价的优势策略为 $b_i = r_i$ ，即买方对计算资源经纪人提供自身的边际收入是优势策略。

当 $c_j \leq p$ 时，如果取 $a_j > c_j$ ，卖方将可能在这次拍卖中失败，而即使成功，开价为 a_j 所获得的效用与开价为 c_j 时所获得的效用相同；若取 $a_j < c_j$ ，卖方能获得的效用与开价为 c_j 相同。当 $c_j > p$ 时，若取 $a_j < c_j$ ，即使成功，开价为 a_j 所获得的效用为负，否则与开价为 c_j 相同，即效用为零；若取 $a_j > c_j$ ，卖方获得的效用与开价为 c_j 时相同，即效用为零。综合上述情况，可知卖方开价的优势策略为 $a_j = c_j$ ，即卖方对计算资源经纪人提供自身的边际成本是优势策略。

虽然买方的成交标价 p^b 小于卖方的成交开价 p^a ，但可以通过成交双方的付费调节预算平衡，由 $\phi^a + \phi^b \geq p^a - p^b$ 可知该机制满足预算平衡，当等号成立时即为精确预算平衡。

参与拍卖的买方和卖方的效用，或为正、或为零，因此该机制满足个人理性。证毕。

一轮拍卖的市场总价值为

$$T = \sum_{i=1}^{E-1} (r_i - p^b) \cdot D_i + \sum_{j=1}^{F-1} (p^a - c_j) \cdot P_j \quad (7)$$

买方和卖方所获得的效用总和为

$$\begin{aligned} U &= \sum_{i=1}^{E-1} U_i^b + \sum_{j=1}^{F-1} U_j^a \\ &= \sum_{i=1}^{E-1} (r_i - p^b - \phi^b) \cdot V_i^b + \sum_{j=1}^{F-1} (p^a - c_j - \phi^a) \cdot V_j^a \end{aligned} \quad (8)$$

定义拍卖机制的效率为

$$EA = \frac{U}{T} \times 100 \quad (9)$$

6 实验及结果

为验证提出的双向拍卖机制效率，自行编制了仿真程序进行仿真实验。买方边际收入 r_i 和卖方边际成本 c_j 分别服从均匀分布 f_r 和 f_c ；买方的需求量 D_i 和卖方的供给量 P_j 分别服从均匀分布 f_D 和 f_P ；根据式(5)和式(6)，成交双方付费的取值分别设为

$$\begin{aligned} \phi^a &= \max \left\{ \frac{2}{3} (p^a - a_{F-1}), (p^a - p) \right\}, \\ \phi^b &= \max \left\{ \frac{2}{3} (b_{E-1} - p^b), (p - p^b) \right\}. \end{aligned}$$

首先，考察买卖双方个数相等时参与者个数对效率的影响。在实验中，买方对 CPU 资源的需求量和卖方对 CPU 资源的供给量分别服从均匀分布 $f_D = f_P = U(1000, 10000)$ (单位: Mflops)。卖方边际成本服从均匀分布 $f_c = U(40, 80)$ (单位: Grid\$/1000Mflops)，买方边际收入 f_r 分别服从均匀分布 $U(20, 60), U(40, 80), U(60, 100)$ 。买方和卖方个数相等，即 $m = n$ ，取值分别为 10, 20, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000。每种情况的效率取 10000 次实验的平均值。实验结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，随着参与拍卖的买方和卖方个数增加时，效率趋于 100%，说明该拍卖机制适用于大量拍卖参与者的情况，这非常符合网格计算的要求。随着买方边际收入由 $U(20, 60)$ 变化到 $U(40, 80)$ ，再变化到 $U(60, 100)$ ，相应的效率在不

断增加,这说明当买方边际收入相对卖方边际成本在升高时,成交的机率增大,相应地效率也增加,这符合经济活动中的实际情况.

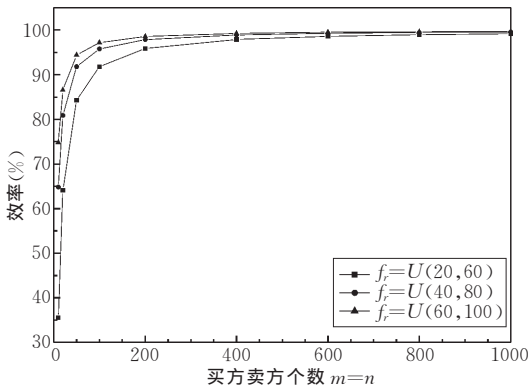


图 3 买卖双方个数及买方边际收入对效率的影响

其次,考察买方与卖方个数不相等对效率的影响. 买方边际收入和卖方边际成本分别服从均匀分布 $f_r = f_c = U(20, 100)$, 买方对 CPU 资源需求量和卖方对 CPU 资源的供给量分别服从均匀分布 $f_D = f_P = U(1000, 10000)$. 买方和卖方个数 (m, n) 的取值分别为 $(20, 180), (40, 160), (60, 140), (80, 120), (100, 100), (120, 80), (140, 60), (160, 40), (180, 20)$. 每种情况的效率取 10000 次实验的平均值. 实验结果如表 1 所示.

表 1 买方和卖方个数不相等对效率的影响

(m, n)	效率	(m, n)	效率
$(20, 180)$	88.475470	$(180, 20)$	88.562353
$(40, 160)$	93.305182	$(160, 40)$	93.231787
$(60, 140)$	94.944146	$(140, 60)$	94.944007
$(80, 120)$	95.606399	$(120, 80)$	95.616426

从表 1 可知,当参与拍卖的买卖双方个数不相等时,对效率有较明显的影响,影响的程度随着二者个数相差的程度增加而增加,即当个数相差最大时机制的效率最低,当二者的个数相等时效率最高. 其中,当 (m, n) 取 $(100, 100)$ 时,效率为 95.793436.

7 结 论

运用经济机制进行网格资源管理是一种非常灵活有效的方法,本文着重讨论双向拍卖机制在网格资源分配中的应用.

针对计算网格 CPU 资源,提出了一种改进的基于双向拍卖机制的网格资源分配方法,采用统一拍卖价格. 与已有基于拍卖机制的资源分配方法相比,本文提出的方法具有以下特点:

(1) 交易双方的付费可以进行调节,因而可以在实际应用中根据需要调节交易双方的付费,增强了方法的灵活性及适用范围.

(2) 满足优势策略激励相容、预算平衡和个人理性,因此是一种有效的拍卖机制.

(3) 随着参与拍卖的买卖双方个数增加,其效率随之增加,非常适合于由大量买卖双方参与的情况,因此非常适合于网格环境.

本文立足拍卖的瞬时过程,下一步研究工作包括选取合适方法分析拍卖参与方参与拍卖的持续过程,进一步研究基于双向拍卖机制的网格资源分配方法.

参 考 文 献

- Buyya R.. Economic-based distributed resource management and scheduling for grid computing [Ph. D. dissertation]. Monash University, Australia, 2002
- Wolski R., Plank J. *et al.* Analyzing market-based resource allocation strategies for the computational grid. The International Journal of High Performance Computing Applications, 2001, 15(3): 258~281
- Subramoniam K., Maheswaran M. *et al.* Towards a micro-economic model for resource allocation in grid computing system. In: Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, Manitoba, 2002, 782~785
- Cao Hong-Qiang, Xiao Nong, Lu Xi-Cheng *et al.* A market-based approach to allocate resources for computational grids. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(8): 913~916(in Chinese)
(曹鸿强, 肖 依, 卢锡城等. 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)
- Waldspurger C., Hogg T. *et al.* Spawn: A distributed computational economy. IEEE Transactions on Software Engineering, 1992, 18(2): 103~117
- Regev O., Nisan N.. The Popcorn market — An online markets for computational resources. In: Proceedings of the 1st International Conference on Information and Computation Economics, Charleston, 1998, 148~157
- Lalis S., Karipidis A.. JaWS: An open market-based framework for distributed computing over the Internet. In: Proceeding of the 1st IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing, Bangalore, India, 2000, 36~46
- Ding Qing, Chen Guo-Liang *et al.* A securities market model for resource allocation in grid environments. Mini-Micro Systems, 2003, 24(1): 14~16(in Chinese)
(丁 箐, 陈国良等. 一个基于证券市场的计算网格环境下的资源分配模型. 小型微型计算机系统, 2003, 24(1): 14~16)

- 9 Cheng J. , Wellman M. . The WALRAS algorithm: A convergent distributed implementation of general equilibrium outcomes. *Computational Economics*, 1998, 12(1): 1~24
- 10 Satterthwaite M. , Williams S. . The rate of convergence to efficiency in the buyer's bid double auction as the market becomes large. *The Review of Economic Studies*, 1989, 56(4): 477~498
- 11 Williams S. . Existence and convergence of equilibria in the buyer's bid double auction. *The Review of Economic Studies*, 1991, 58(2): 351~374
- 12 McAfee R. . A dominant strategy double auction. *Journal of Economic Theory*, 1992, 56(2): 434~450
- 13 Rustichini A. , Satterthwaite M. *et al.* Convergence to efficiency in a simple market with incomplete information. *Econometrica*, 1994, 62(5): 1041~1063
- 14 Huang P. , Scheller-Wolf A. *et al.* Design of a multi-unit double auction E-market. *Computational Intelligence*, 2002, 18(4): 596~617
- 15 Yoon K. . The modified vickrey double auction. *Journal of Economic Theory*, 2001, 101(2): 572~584
- 16 Fudenberg D. , Tirole J. . *Game Theory*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1991



WENG Chu-Liang, born in 1976, Ph. D. , lecturer. His research interest includes parallel and distributed computing, grid computing, wireless sensor network.

LU Xin-Da, born in 1938, M. S. , professor, Ph. D. supervisor. His research interest includes parallel and distributed computing, high performance computing.

Background

This paper is supported by the National Natural Science Foundation of China under grant Nos. 60173031, 60503043, which titles are “The Key Technology to Adaptive Metacomputing Systems in Campus Network Environment” and “The Key Technology to Economic Models in the Grid Context”, respectively. The two projects focus on resource management

and task scheduling in the grid context, in which the adaptive method and the economic mechanism are adopted respectively. Authors had made some work on resource management strategies and task scheduling algorithms. This paper focuses on applying the double auction mechanism to resource allocation in the grid environment.