

基于效用驱动的网格资源协同预留策略

丁长松^{1,2}, 王志英², 胡志刚³

(1. 湖南中医药大学 管理与信息工程学院, 湖南 长沙 410208;

2. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073; 3. 中南大学 软件学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对资源预留过程中价格对市场竞争力影响导致收益不确定性问题, 提出一种可量化分析价格、资源竞争力以及收益三者关系的协同预留策略。该策略基于本地任务的真实相关统计特性, 在有效保障网格任务 QoS 与本地任务 QoS 基础上, 通过价格调整来平衡资源提供方的市场竞争力与收益之间的冲突。理论分析给出了预留策略的有效性证明和预留算法, 仿真实验采用真实网格系统中任务负载信息作为实验负载, 并在模拟网格系统中对预留策略的性能表现进行了检验。实验结果表明, 该策略在均衡资源负载、平衡资源节点相对收益率以及保障任务 QoS 方面的性能表现显著优于传统的预留策略。

关键词: 网格计算; 效用驱动; 资源预留; 定价策略

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0101-07

Utility-driven based co-allocation resource reservation strategy in computational grid

DING Chang-song^{1,2}, WANG Zhi-ying², HU Zhi-gang³

(1. School of Administration and Information Engineering, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China;

2. College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. School of Software, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Profit of resource provider is always uncertain because price of resource has important impact on market competitiveness. A co-reservation strategy was presented, which could be used to quantitative analysis the relationship of reservation price, resource competitiveness and profit. Based on real statistical characteristic of local tasks, the model provides the grid job QoS guarantee and local job QoS guarantee, which balances the conflict between market competitiveness and profit of resource provider by efficient price adjustment. The validity of the model and its algorithm were presented theoretically. The performance of the proposed strategy was simulated in a grid simulation system using the real task load of the practical grid system. The results show that the proposed co-reservation strategy outperforms traditional reservation strategy in terms of balancing resource load, profit rate of resource node and QoS guarantee.

Key words: grid computing; utility-driven; resource reservation; pricing strategy

1 引言

随着网格技术的发展, 一些关键领域或业务应用场景对 QoS 提出了更为严格的要求, 并且 QoS 已成为用户使用服务时考虑的重要指标^[1]。Ian

Foster 等学者也曾提出“网格的核心目标之一是为用户提供非凡 (non-trivial) 的服务质量^[2]”。资源预留作为保障 QoS 的主要机制, 其有效性已在大量实际应用中得到验证^[3-5], 并已成为诸多流行网格中间件的一个基础性服务组件。

收稿日期: 2013-07-31; 修回日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272148); 博士点基金资助项目(20120162110061); 湖南省科技计划基金资助项目(2011RS4025, 2013GK3143); 湖南省教育厅科学研究优秀青年基金资助项目(13B079)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61272148); The Doctoral Program of Higher Education of China(20120162110061); The Science and Technology Projects Fund of Hunan Province(2011RS4025, 2013GK3143); Scientific Research Fund for Outstanding Young Teachers of Hunan Provincial Education Department(13B079)

资源预留通过预约的方式将资源在未来某一段时间段内的使用权预留给网格用户，以此保障动态网格环境下网格用户任务的 QoS 需求^[6]。已有的相关研究和性能评估结果显示，传统预留机制在为网格用户提供 QoS 保证和定价策略方面存在以下不足。1) 过多的资源预留容易产生较多的资源碎片，造成较高的服务请求拒绝率，导致资源利用率不高^[7]，从而违背资源提供者追求收益最大化的目标^[5]。2) 影响本地任务正常执行，使得本地任务 QoS（如任务完成时间）难以得到有效保障^[8,9]。3) 资源共享导致资源提供者的服务质量存在不确定性^[10]，使定价机制很难满足市场经济中价格的自适应性、动态性、公平性、与需求一致性等要求。因此，如何针对预留过程中 QoS 保障的不确定性和市场环境中定价机制的复杂性设计一个合理的预留方案成为一个亟待解决的问题。

文中将资源提供方在网格用户进行资源预留决策时所表现出来的综合吸引力称为“资源竞争力”。为保障本地任务 QoS，文中基于本地任务请求日志的真实统计特性进行预留决策，利用市场中“价格”、“资源竞争力”、“收益”三者之间的关系，通过调节价格实现在任务费用约束下各资源提供方的利用率与收益相对平衡。

2 相关工作

相关研究^[7,11,12]显示，资源预留对系统的资源利用率、任务平均等待时间、任务拒绝率等方面带来了诸多负面影响。为了弱化资源预留产生的“资源碎片”问题，文献[13,14]提出了将预留时间限制做适当放松的灵活性资源预留；TOML 等人^[15-17]在量化分析“资源碎片”基础上，提出将任务在实际执行前进行调度，并在没有合适资源可以分配给新任务时，对已提前调度的任务和资源进行重新分配，以整合“资源碎片”提高资源利用率。文献[8,18]中研究表明，采用“回填技术”（backfilling）的调度策略能有效提高系统的资源利用率，但增加了任务的反应时间，其本质上是以前时间为代价换取资源利用率。针对网格任务预留请求拒绝率高的情况，文献[14]采用了“动态预留窗”技术，研究表明：通过调整预留窗口尺寸能有效改善网格任务预留请求拒绝率，当预留窗口尺寸接近系统的任务等待队列长度时，这种效果尤为明显，但“动态预留窗”技术没有考虑由此带来资源利用率低的问题。

上述资源预留的共同特点是，以优化系统性能

指标为目标对预留策略进行改进，较少考虑网格任务对 QoS 的实际需求。对此，Buyya 等人^[19]引入微观经济学理论，激励资源拥有者积极共享资源，促使网格用户有效优化利用资源以满足一些关键应用需求。网格经济理论以网格用户或资源提供方为中心，在满足网格用户 QoS 约束（如任务截止时间、任务费用）前提下最大化网格用户或资源提供方收益。Sulistio 等人^[20]针对用户对资源需求约束和变化，采用弹性网格预留系统的在线算法结合收益确定价格，需求约束越高其资源价格越高，忽略了预留对非预留任务的不利影响。在本地任务较多时，Singh 等人^[21]采取提高资源价格来保障本地任务 QoS，但在资源价格较高时该策略缺乏对网格任务 QoS 的有效保障，从而可能导致资源发生违约。

与传统资源预留策略不同，本文提出的协同预留策略没有偏袒资源提供方或网格用户，而是利用价格在市场中的杠杆作用，通过价格变化调整收益，使得协同资源预留达到网格任务 QoS、本地任务 QoS、资源利用率三者趋近平衡。

3 问题描述

设网格系统由 N 个资源节点组成，表示为集合 (SC_1, \dots, SC_N) 。网格任务 T 表示为二元组 $\langle Q, b \rangle$ ，其中， $Q = \{Q_i, 1 \leq i \leq m\}$ 为网格任务 QoS 约束集合， b 为任务费用预算。资源使用权的单位时间价格 p 由保障价格和利润价格两部分组成，其中，保障价格避免将资源使用权预留给网格任务导致降低本地任务 QoS 所带来的损失。因此，资源提供方 j 的单位时间价格和收益可分别表示为

$$p_j = p_j^0 + \Delta p_j \quad (1)$$

$$U_j = P_j t - \bar{p}(X_1 + X_2 + \dots + X_\mu)t \quad (2)$$

其中， p_j^0 为保障价格，由其资源代理根据负载情况确定； Δp_j 为利润价格，由网格信息服务（GIS, grid information service）在保障价格的基础上结合网格任务费用约束 b 确定。

式(2)中 \bar{p} 为资源使用权预留给网格任务造成本地任务的单位时间损失； μ 为时间段 t 内到达的本地任务数量，为简化问题，假定 μ 为常数； $X_i (1 \leq i \leq \mu)$ 为时间段 t 内到达的第 i 个本地任务正常执行所需时间。

定义 1 资源预留策略。网格任务到资源节点的一个映射，表示为

$$S: T \times \{SC_1, \dots, SC_N\} \rightarrow \{(c_1, P_1), \dots, (c_N, P_N)\}.$$

其中, c_i 表示预留节点 i 的资源容量, 设 c 为网格任务申请预留的资源容量 ($c = \sum_{i=1}^N c_i$), p_i 表示节点 i 的价格。

定义 2 资源竞争力。资源预留决策过程中, 资源提供方吸引网格用户预留资源的综合能力。若网格用户进行资源预留决策时所依据的 QoS 指标集合为 $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, 资源竞争力表示为 QoS 指标的函数 $g(a_1, \dots, a_n)$ 。

资源竞争力作为衡量资源在网格任务运行时的综合性能表现指标, 不同的应用场境中网格用户关注资源性能的侧重点不同。如对网格市场中的任务来说, 衡量资源竞争力的重要指标通常是价格; 而对实时型任务来说, 任务能否在截止时间内得以顺利完成是网格用户最关心的。为简化问题, 文中忽略了性能指标之间相关性对资源竞争力的影响。

定义 3 QoS 满意函数。网格用户对资源提供服务的满意度与 QoS 指标之间的映射。

网格用户对资源 QoS 指标 a_i 的满意函数表示为 $f_i(a_i)$, 其值域为 $[0, 1]$, 网格任务在运行时指标 a_i 表现越好其函数值越接近 1, 反之越差越趋近于 0。

定义 4 设资源节点 i 的竞争力为 g_i , 网格任务资源需求容量为 c , 则资源单位竞争力 \bar{g} 与预留资源容量之间的映射为

$$\bar{g} = f(c, g_1, \dots, g_i, \dots, g_n) = \frac{c}{\sum g_i}$$

定义 5 相对收益率 ρ_i 。资源节点 i 提供单位资源进行预留所获得的收益与整个市场提供资源进行预留所获得的单位资源平均收益的比值。

定义 6 预留策略 S^* 若满足

$$\frac{p_1}{p_1^0} = \frac{p_2}{p_2^0} = \dots = \frac{p_n}{p_n^0}$$

则称在预留策略 S^* 下网格系统处于平衡态。

4 资源竞争力计算方法

根据用户满意函数 $f_i(a_i)$ 的值域情况, 将资源 QoS 指标集合 A 划分为 2 个子集 A_1 、 A_2 。子集 A_1 中 QoS 指标的用户满意函数 $f_i(a_i)$ 的取值为 $\{0, 1\}$, 该类指标有最小值 (或最大值) 要求, 用户满意度在 QoS 指标没达到最小值 (或超过最大值) 之前为 0;

子集 A_2 中 QoS 指标的用户满意函数 $f_i(a_i)$ 的值域为 $(0, 1)$, 该类指标的函数值越高 (或越低) 网格用户越满意。

因此, 资源竞争力函数可表示为

$$g(a_1, \dots, a_n) = g_1(a_1^*) g_2(a_2^{\hat{}}) \quad (3)$$

其中, $a_i^* \in A_1$ 、 $a_i^{\hat{}} \in A_2$ 、 $g_1(a_i^*) = f_1(a_1^*) \cdots f_l(a_l^*) \cdots f_l(a_l^*)$ 、 $g_2(a_i^{\hat{}}) = \sum \omega_l f_l(a_i^{\hat{}})$, l 为集合 A_1 中的元素个数, 参数 ω_l 为 QoS 指标 a_l 的满意度权重值, $\sum \omega_l = 1$ 。

5 基于效用驱动的协同预留策略

5.1 二阶段定价策略

定理 1 网格环境中, 若本地任务相互独立且执行时间 $x_i (1 \leq i \leq \mu)$ 均服从参数为 λ 的指数分布随机变量^[22], 其概率分布函数为 $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$, 随机变量 Y 为时间段 t 内本地任务执行时间之和, 则在给定随机变量 Y 的概率 Pr 下, 资源保障价格 p^0 为 $\frac{\bar{p}}{t} z(Pr) Pr$, 其中, z 为随机变量 Y 的概率分布函数的反函数。

证明 由于本地任务的执行时间 $x_i (1 \leq i \leq \mu)$ 为服从参数 λ 的指数分布随机变量, 根据数理统计与概率论知识可知在时间段 t 内到达的所有本地任务执行时间之和 $Y (Y = \sum_{i=1}^{\mu} X_i)$ 也为一随机变量, 设 Y 的分布函数为 $\Psi(y)$, 则式(2)可表示为

$$U = pt - \bar{p}Y = pt - \bar{p}y\Psi(y) \quad (4)$$

资源预留过程中, 资源提供者在保障网格用户 QoS 条件下追求收益最大化^[23]。因此, 资源提供方进行资源预留应满足预留效用不小于 0, 即

$$U = pt - \bar{p}Y = pt - \bar{p}y\Psi(y) \geq 0$$

求解该方程可得

$$p \geq \frac{\bar{p}}{t} y\Psi(y) \quad (5)$$

对于特定资源提供方, 给定参数 λ 和本地任务执行时间之和的概率 Pr , 可求得该概率下的本地任务运行时间 y , 故式(5)可改写为

$$p \geq \frac{\bar{p}}{t} z(Pr) Pr \quad (6)$$

其中, 资源提供方的预留效用不小于零的价格下限

为 $\frac{\bar{p}}{t}z(Pr)Pr$ ，即 $p^0 = \frac{\bar{p}}{t}z(Pr)Pr$ 。Pr 值实质为保障本地任务 QoS 的风险因子，Pr 值越高对应的资源保障价格 p^0 部分越高，其定价策略越偏向于保障本地任务 QoS。

定理 2 在平衡态下调整资源价格，各资源提供方的相对收益率保持一致的变化幅度。

设 U_1 、 U_2 为平衡态空间集合 Ω 中两任意状态，且 $\langle \rho_1^1, \rho_2^1 \dots \rho_n^1 \rangle$ 与 $\langle \rho_1^2, \rho_2^2 \dots \rho_n^2 \rangle$ 分别为状态 U_1 和状态 U_2 下的相对收益率向量，则 $\langle \rho_1^1, \rho_2^1, \dots, \rho_n^1 \rangle = \xi \langle \rho_1^2, \rho_2^2, \dots, \rho_n^2 \rangle$ ，其中 ξ 为一常数。

证明 设节点 i 在状态 U_1 、状态 U_2 的价格分别为 p_i^1 、 p_i^2 ，根据定义 6，令

$$\frac{p_1^1}{p_1^0} = \frac{p_2^1}{p_2^0} = \dots = \frac{p_n^1}{p_n^0} = k_1$$

$$\frac{p_1^2}{p_1^0} = \frac{p_2^2}{p_2^0} = \dots = \frac{p_n^2}{p_n^0} = k_2$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \xi$$

节点 i 在 U_1 、 U_2 2 种平衡态下的相对收益率分别为

$$\rho_i^1 = \frac{p_i^1 \sum c_i^1}{\sum p_i^1 c_i^1} \quad (7)$$

$$\rho_i^2 = \frac{p_i^2 \sum c_i^2}{\sum p_i^2 c_i^2} \quad (8)$$

式(7)、式(8)相除并结合 $\sum c_i^1 = \sum c_i^2 = c$ ， $\sum p_i^1 c_i^1 = \sum p_i^2 c_i^2 = b$ 可得

$$\frac{\rho_i^1}{\rho_i^2} = \frac{p_i^1}{p_i^2} \quad (9)$$

将 $p_i^1 = k_1 p_i^0$ ， $p_i^2 = k_2 p_i^0$ 代入式(9)可得

$$\frac{\rho_i^1}{\rho_i^2} = \frac{k_1 p_i^0}{k_2 p_i^0} = \frac{k_1}{k_2} \quad (10)$$

即 $\rho_i^1 = \xi \rho_i^2 \cap \langle \rho_1^1, \rho_2^1 \dots \rho_n^1 \rangle = \xi \langle \rho_1^2, \rho_2^2 \dots \rho_n^2 \rangle$ 。

根据定义 5 和定义 6 可知，当各资源价格不满足 $\frac{p_1^0}{p_1^0} = \frac{p_2^0}{p_2^0} = \dots = \frac{p_n^0}{p_n^0}$ 条件时，资源提供方中至少存在一个提供方的相对收益率变化幅度与其他提供方的不一致。由此，可以得出如下推论。

推论 1 网络系统处于平衡态是资源提供方的相对收益率变化幅度一致的充分必要条件。

基于式(1)，将利润价格 Δp 表示为保障价格 p^0 的相关数 $\gamma (\gamma \geq 0)$ ，则资源价格为

$$p = p^0 + \Delta p = (1 + \gamma)p^0 \quad (11)$$

从式(11)可以看出，在各资源提供方的相对收益率 ρ 相同条件下，根据任务费用约束 b 与资源节点的保障价格 p^0 可以确定 γ ，从而可推导出符合市场规律的定价策略。

5.2 预留算法

基于效用驱动的资源协同预留算法(UACRR, utility-driven-based algorithm for co-allocation resource reservation)伪码如图 1 所示。UACRR 算法首先计算各资源节点的保障价格 p^0 及其相应的竞争力图 1 中 4)，并在此基础上根据定义 4 计算资源单位竞争力 \bar{g} 图 1 中 6)，然后结合网格任务申请预留的资源总容量 c 确定各节点的预留容量 c_i 图 1 中 8)，并根据网格任务费用约束与候选资源的保障价格确定相关数 γ 图 1 中 10)，从而确定资源预留方案。

```

输入：预留任务信息  $T = \langle t_{sta}, t_{end}, c, b \rangle$ 
      资源节点信息  $\Phi = \langle z_i, p_i, p_i \rangle$ 
输出：预留策略  $(R, P^*)$ 
Begin
1) 初始化数组  $NRQ$  ( $NRQ = Null$ )，并筛选出符合用户需求的候选资源队列  $RQ$ ；
2) while ( $RQ \neq empty$ ) && ( $b > 0$ ) do
3)   for  $i = 0$  to  $sizeof(RQ)$  do
4)     根据定义 2 和定理 1 计算各资源节点的  $p_i^0$  和竞争力
5)   end for
6)   根据定义 4 计算  $\bar{g}$ 
7)   for  $i = 0$  to  $sizeof(RQ)$  do
8)     计算各资源节点的预留容量  $c_i$ 
9)   end for
10)  计算保障价格  $p^0$  的相关数  $\gamma$ 
11)  if ( $\exists RQ_{[i]}.c_i^0 < c_i$ ) then // 判断是否存在资源所能提供容量不能满足预留容量的情况
12)    将  $RQ_{[i]}.c_i^0$  加入  $NRQ$  中
13)  end if
14)  if  $NRQ \neq Null$  then
15)    计算数组  $NRQ$  中所能提供的资源容量之和  $s = \sum c_i^0$ 
16)    计算所需的费用  $b_0 = \sum c_i^0 P_i(t_{end} - t_{sta})$ 
17)    保存数组  $NRQ$  中资源节点的预留方案 ( $NRQ, P^*$ )
18)    将数组  $NRQ$  中资源节点从数组  $RQ$  删除
19)     $c = c - s$  ;  $b = b - b_0$ 
20)  end if
21) end while
22) output  $(R, P^*) = \{(c_i, p_i), \dots, (c_n, p_n)\}$ 
End
    
```

图 1 算法伪码

算法考虑了资源节点所能提供的资源容量不足的情况 ($c_0 < c_i$)。当 $c_0 < c_i$ 时, 用数组 NRQ 存储不满足理想条件的资源节点 i (图 1 中 12), 根据资源提供方所能提供的实际容量确定 NRQ 中各节点的预留策略图 1 中 17), 并将网络任务预留申请所缺的资源容量 ($c = c - s$) 和所剩的费用 ($b = b - b_0$) 纳入到 RQ 中进行重新分配图 1 中 19)。考虑到 NRQ 中节点的预留资源缺口 ($c_i - c_0$) 增加到了 RQ 中节点上, 由此可能导致 RQ 中出现节点不能满足新的平衡态条件的情况, 因此引入了循环 (图 1 中 2)~21)。假定网络系统共有 n 个节点参与资源预留, UACRR 算法最多进行 n 次循环, 各次循环最多需要进行的操作次数依次为 $n, n-1, n-2, \dots, 1$, 故 UACRR 算法的复杂度约为 $n(n-1)/2$ 。

6 仿真实验与性能评估

6.1 实验环境设计

在 Lenovo Intel P8600 2.4 GHz, 2 GB RAM 硬件平台下, 基于 GridSim5.0 模拟器构建了一个多集群的计算网格环境。实验设置了 10 个高性能计算集群(Site_1~Site_10)作为基本的资源节点, 各集群的性能参数设置参考大型网格测试床 DAS-2^[24]的配置, 资源节点为全连通方式, 每个网络任务都能在这些资源节点上执行。任务预留请求序列 (即任务负载) 包括 10 000 个任务, 用 Lublin-Feitelson 模型^[22]生成。考虑到生成的任务负载中单个任务预留资源容量偏小, 为模拟大规模多资源协同预留, 对所有任务申请的预留容量随机放大了 m 倍, m 在区间[10,30]内均匀分布。假定任务的费用预算与其预留资源容量相关, 并设定费用预算为其预留资源容量的 k 倍, k 均匀分布于 [5,10] 区间。

6.2 实验结果与性能评估

为验证效用驱动(UD, utility-driven)资源预留策略的本地任务 QoS 保障情况和资源节点的收益情况, 实验首先对 UD 策略下资源提供方的主要性能指标进行了检验。基于“第二竞价拍卖”(SPA, second-price auction)模型^[25]和“松弛时间预留”(RTR, relaxation time of reservation)模型^[13]已在实际网格系统中广泛应用, 实验选择这 2 种模型与 UD 策略进行比较。实验结果如表 1 所示。

模型	接纳任务数	违约率	资源利用率	系统总收益
UD	9326	5.61%	64.38%	8.64×10^6
SPA	6784	13.21%	35.68%	4.47×10^6
RTR	7654	8.94%	57.32%	4.96×10^6

实验统计了接纳任务数、违约率、资源利用率和系统总收益 4 个系统指标, 其中, 违约率采用资源提供方无法履行预留合约的概率^[6]来衡量, 资源利用率反映模拟起止时间段内所有节点 CPU 繁忙程度, 系统总收益为所有资源节点提供资源使用权所获得的收益总和。从表 1 的数据可以看出, SPA 策略的性能指标表现较差。究其原因在于: SPA 策略的定价偏袒资源提供方, 从而导致在费用约束下出现网络任务无法获得顺利执行所需资源的情况, 而且协同预留所涉及到的节点越多, 这种情况会更加明显。RTR 策略对任务接纳条件进行了相应松弛, 使得在预留协商过程中具有较强的灵活性, 然而由于没有考虑资源负载的动态性, 从而导致其定价机制缺乏相应的动态自适应调整能力。表 1 的数据显示, 虽然 RTR 策略的违约率和资源利用率都明显优于 SPA 策略, 但在系统总收益指标方面两者却十分相近。通过进一步分析可知, 该现象正是由于 SPA 策略的定价机制偏袒资源提供方以及 RTR 策略的定价机制存在局限性所致。对 UD 策略而言, 由于在确定效益函数时考虑了资源负载的动态性, 因而其定价机制实质上具有一定的负载感知能力 (workload-aware)。实验数据同时显示, UD 策略的任务接纳率可超过 90%, 其原因在于 UD 策略内置的定价机制是在优先考虑资源利用率的前提下优化资源提供方收益, 因此 UD 策略的资源利用率可以达到 60% (实验对资源数量设置偏大)。从资源利用率指标来看, RTR 策略和 UD 策略的差别仅约 7%, 如前文所述, RTR 策略的资源利用率高是由于预留协商具有较强的灵活性, 然而协商增加了额外的通信开销, 但 UD 策略未提供额外的协商机制, 因而不需要额外的通信开销。为了分析 UD 策略与 RTR 策略两者的资源利用率相近这一实验现象, 在整个模拟实验过程中笔者对 UD 策略的平均资源利用率(MUR, mean utilization rate)、资源平均价格(MP, mean price)、资源代理平均收益(MPB, mean profit of brokers) 3 个指标进行了相应统计, 结果如表 2 所示。

表 2 UD 策略性能指标统计

策略指标	任务数				
	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000
MUR/%	37.23	71.37	87.54	71.79	53.97
MP	27.32	46.26	51.39	55.46	54.27
MPB/%	19.10	25.36	10.23	5.16	3.72

为了动态追踪 UD 策略在整个实验过程中的实时性能表现,表 2 的实验数据按照“每 2 000 个任务执行完毕后进行一次统计”来记录。表 2 中数据显示:资源利用率在运行前 6 000 个任务过程中逐渐升高,超过 6 000 个任务后回落。究其原因在于:实验起始阶段,到达的任务相对于系统的资源而言较少,该阶段系统处于比较空闲状态,因而资源利用率较低。随着实验的进行,资源利用率显著增加并在完成 6 000 个任务时超过了 85%,此时系统处于负载过重的状态。与此对应,资源代理的平均收益也呈现相似变化,两者差别在于资源代理的收益峰值出现在第 2 000~4 000 个任务之间而平均资源利用率峰值出现在第 6 000 个任务附近。导致该现象的原因在于:UD 策略趋向于资源代理的收益为零。通过对设置的系统初始参数进行分析发现:UD 策略与 SPA 策略在调价理念上存在较大的差别,UD 策略调价趋向保守,正是这种相对保守的调价策略,使得 UD 策略在面对预算费用较低的任务时,仍能满足其预留需求。

最后,在实验过程中发现了一个比较有趣的现象:在整个模拟实验过程中,UD 从来没有达到定理 2 所描述的全局均衡状态。分析其原因是定理 2 的全局均衡状态是一种理想的状态,由于资源代理数目较多,存在有些资源所能提供的容量 c_0 达不到均衡态下应提供的容量 c_i 的情况(即 $c_0 < c_i$),因而很难实现所有资源节点的相对收益率相同。表 2 中实验数据同时证明,只要 UD 策略中的预留算法能保证系统向全局均衡态逼近,系统总收益就趋向于最大化,结合表 1 的实验数据刚好实证了 UACRR 算法的收敛性。

综上所述可知:1) UD 策略能够有效地提高资源利用率;2) 在处理网格用户的任务费用和资源提供方的收益这一对立矛盾时,UD 策略显示了较好的稳定性和公平性;3) 基于 UD 策略的定价机制相对公平,避免了预留策略偏袒资源提供方或网格用户的现象发生,而且这种公平性还体现在资源利用

率方面,避免资源空闲或负载过重的极端情况发生,这为分析各类基于计算经济的调度算法的性能提供了很好的保证。

7 结束语

量化资源预留价格、资源竞争力、资源收益三者之间的关系是资源预留的一个难点。本文在保障本地任务 QoS 前提下,根据价格对资源竞争力的影响,通过价格调整均衡各资源提供方收益,并在此基础上,建立了一种多节点的资源协同预留策略。基于 GridSim 模拟器对文中提出的 UD 策略进行仿真实验表明,UD 策略在保障本地任务 QoS、提高资源利用率方面都有很好表现。下一步工作主要集中于考虑多维 QoS 指标对资源竞争力影响情况下的协同预留策略研究。

参考文献:

- [1] 邓水光, 黄龙涛, 吴斌等. 一种 QoS 最优的语义 Web 服务自动组方法. 计算机学报, 2013, 36(5): 1015-1030.
DENG S G, HUANG L T, WU B, *et al.* QoS optimal automatic composition of semantic Web services[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(5): 1015-1030.
- [2] FOSTER I. What is the grid? a three point checklist[J]. GRID Today, 2002, 1(6): 20-27.
- [3] TAKEFUSA A, NAKADA H, KUDOH T, *et al.* An advance reservation-based co-allocation algorithm for distributed computers and network bandwidth on QoS guaranteed grids[A]. Job Scheduling Strategies for Parallel Processing, Ser Lecture Notes in Computer Science[C]. Springer Berlin/Heidelberg, 2010. 16-34.
- [4] MAKHLOUF S A, YAGOUBI B. Resources co-allocation strategies in grid computing[A]. Proceedings of the Third International Conference on Computer Science and its Applications (CIIA'11)[C]. Saida, Algeria, 2011.
- [5] ELMROTH E, TORDSSON J. A grid resource broker supporting advance reservations and benchmark-based resource selection[A]. Lecture Notes in Computer Science[C]. Springer-Verlag, 2005. 1077- 1085.
- [6] 丁长松, 胡志刚, 胡周君. 基于收益与风险均衡的网格资源预留策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 88-94.
DING C S, HU Z G, HU Z J. Grid resource reservation policy based on the balance of benefits and risks[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(2): 88-94.
- [7] FOSTER I, ROY A, SANDER V, *et al.* A Quality of Service Architecture that Combines Resource Reservation and Application Adaptation[R]. 2000.
- [8] SODAN A C, DOSHI C, BARSANTI L, *et al.* Gang scheduling and adaptive resource allocation to mitigate advance reservation impact[A]. IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid[C]. 2006. 1-8.
- [9] WU M, SUN X H, CHEN Y. QoS oriented resource reservation in shared environments[A]. Proc of the 6th IEEE International Sympo-

- sium on Cluster Computing and the Grid[C]. 2006.601-608.
- [10] LEE Y C, WANG C, ZOMAYA A Y, *et al.* Profit-driven scheduling for cloud services with data access awareness[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2012, 72(4): 591-602.
- [11] SNELL Q, CLEMENT M, JACKSON D, *et al.* The performance impact of advance reservation meta-scheduling[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000,1911:137-153.
- [12] SABITHA B S, RANI R, VENKATESAN R R. Resource reservation in grid computing environments: design issues[A]. *IEEE 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT)[C]*. 2011.66-70.
- [13] XING J B, WU C, TAO M L, *et al.* Flexible advance reservation for grid computing[A]. *The 2nd International Workshop on Grid and Cooperative Computing(GCC'03)[C]*. Shanghai, China, 2003.
- [14] KAUSHIK N R, FIGUEIRA S M, CHIAPPARI S A. Flexible time-windows for advance reservation scheduling[A]. *Proceedings of IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems[C]*. California, 2006. 218-225.
- [15] TOMÁS L, CAMINERO B, CARRIÓN C. Improving grid resource usage: metrics for measuring fragmentation[A]. *Proceedings of the 12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing[C]*. IEEE Computer Society, 2012. 352-359.
- [16] TOMÁS L, CAMINERO B, CARRIÓN C, *et al.* On the improvement of grid resource utilization: preventive and reactive rescheduling approaches[A]. *Journal of Grid Computing*, 2012,10(3):475-499.
- [17] TOMÁS L, CAMINERO B, CARRIÓN C. Bag of tasks rescheduling within real grid environments: different approaches[A]. *21st Euromicro International Conference on IEEE Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP)[C]*. 2013.213-217.
- [18] CAO J W, ZIMMERMANN F. Queue scheduling and advance reservations with COSY[A]. *Proceedings of International Symposium on Parallel and Distributed Processing[C]*. Santa Fe, New Mexico, 2004.
- [19] BUYYA R, ABRAMSON D, VENUGOPAL S. The grid economy[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(3):698-714.
- [20] SULISTIO A, KIM K H, BUYYA R. Using revenue management to determine pricing of reservations[A]. *Third IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing[C]*. 2007.396-404.
- [21] SINGH G, KESSELMAN C, DEELMAN E. Adaptive pricing for resource reservations in shared environments[A]. *The 8th Grid Computing Conference[C]*. 2007.74-80.
- [22] LUBLIN U, FEITELSON D G. The workload on parallel supercomputers: modeling the characteristics of rigid jobs[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2003, 63(11):1105-1122.
- [23] TSAKALOZOS K, KLLAPI H, SITARIDI E, *et al.* Flexible use of cloud resources through profit maximization and price discrimination[A]. *IEEE 27th International Conference on Data Engineering (ICDE)[C]*. 2011.75-86.
- [24] BAL H E, BHOEDJANG R R, HOFMAN R, *et al.* The distributed ASCI supercomputer project[J]. *ACM Operating Systems Review*, 2000, 34(4):76-96.
- [25] BUYYA R. *Economic-based Distributed Resource Management and Scheduling for Grid Computing[D]*. Australia: Monash University, 2002.

作者简介:



丁长松(1975-),男,湖南汉寿人,湖南中医药大学副教授,主要研究方向为网络资源预留、云计算、中医药信息化。

王志英(1956-),男,山西长治人,中南大学教授、博士生导师,主要研究方向为计算机系统结构。

胡志刚(1963-),男,山西孝义人,国防科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为网络并行计算、嵌入式系统、网络安全。