

分布式环境中基于市场机制的资源自适应调价策略

丁长松^{1,2}, 王志英¹, 胡志刚³

(1. 国防科技大学计算机学院, 湖南 长沙 410073;
2. 湖南中医药大学管理与信息工程学院, 湖南 长沙 410208; 3. 中南大学软件学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对分布式环境中资源定价面临的资源使用率、价格、收益三者之间的冲突问题, 提出一种基于市场机制的资源自适应调价策略。该策略在保障资源提供者收益前提下, 通过资源价格自适应动态调整来平衡资源节点上的任务分配与资源提供者收益之间的冲突。理论分析证明了调价策略的有效性, 并在此基础上设计了自适应调价算法。仿真实验采用真实分布式系统中资源节点信息作为实验节点的性能参数, 在大规模网格任务中检验了自适应调价策略的性能表现。实验结果表明, 基于市场机制的“自适应调价策略”在保障资源收益、均衡资源利用率的性能表现方面显著优于传统的定价策略。

关键词: 分布式计算; 市场机制; 自适应; 调价策略

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Self-adaptive price adjustment strategy based on market mechanism in distributed environment

DING Chang-song^{1,2}, WANG Zhi-ying¹, HU Zhi-gang³

(1. College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. School of Management and Information Engineering, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China;
3. School of Software, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To solve the resource pricing problem of the collision among resource utilization, price and benefits in distributed computing environments, a self-adaptive pricing strategy of resource services based on market mechanism was proposed. On the premise of the local resource benefits, this adaptive pricing strategy guaranteed the resource to self-adapt the price dynamically so as to balance the collision between the assigned tasks on the resource node and the benefits of the resource provider. The theoretical analysis proved the effectiveness of the pricing strategy, and the algorithm of the pricing strategy was designed. Resources information in the real distributed systems was used as the performance parameters of experimental node in the simulation experiments, and the performance of the adaptive pricing strategy was tested in a large-scale grid mission. Experimental results show that, compared with the traditional pricing strategies, the adaptive pricing strategy based on market mechanism has vastly superior performance on the resource benefits and the balance of resource utilization.

Key words: distributed computing, market mechanism, self-adaptive, price adjustment strategy

1 引言

网格计算^[1]和云计算^[2]等网络计算平台通过

整合资源提供强大的计算能力, 为实时计算、可视化远程医疗、电子商务等领域中复杂的大型任务提供服务, 并在服务过程中保障“非凡的服务

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.81573985); 湖南省科技厅基金资助项目(No.2011RS4025, No.2013GK3143); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(No.13B079)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.81573985), The Science and Technology Projects Fund of Hunan Province (No.2011RS4025, No.2013GK3143), Scientific Research Fund for Outstanding Young Teachers of Hunan Provincial Education Department (No.13B079)

质量”^[3]。相关研究^[4~6]显示,利用经济模型管理资源在促进资源公平分配、激励资源所有者和资源使用者参与交易、资源分配与资源供需变化的自适应等方面都有很好的表现。然而,作为市场机制中的核心问题之一,资源定价问题一直难以得到有效解决,其复杂性主要体现在以下 2 个方面:1) 资源提供给其他用户使用的时间段内,到达的本地任务 QoS 指标,如等待时间、资源利用率等均受到不同程度的影响,网络环境下资源的动态性增加了量化这种负面影响的难度;2) 市场经济环境中收益、价格以及资源分配三者之间关系的复杂性,加大了利用价格平衡资源提供者收益的难度。因此,如何通过合理的定价机制来保障资源提供者本地任务的 QoS 且使资源提供者获得合理收益,是一个亟待解决的问题。

本文从资源性能的真实统计特性出发,将市场经济中价格对资源使用者的影响作为价格调整的基础,引入成本价格弥补出让资源使用权带来的不利影响、利润价格增加额外收益,通过价格的自适应调整保障资源提供者得到合理的资源分配,并促使各资源节点的负载大体平衡。

2 相关工作

借用经济学理论分析市场交易中各参与方的行为、交易收益的方法已被广泛应用于计算机资源管理中,且其有效性已在诸多基于经济学理论的实际资源管理系统中得到验证。如为解决异构计算机的调度问题,Waldspurger 等^[7]设计并实现了一个面向市场调度的 Spawn 系统。该系统采用 Vickrey 拍卖机制,用户根据各自偏好,如成本最低、响应时间最小等指标,制定相应竞标策略。针对网络中多用户的带宽分配问题,文献[8]采用效用函数衡量网络用户的满意度,提出了基于网络聚合效用最大化的网络跨层映射模型,该模型求解出的最优带宽分配与各用户的支付费用情况相关。近年来出现的云计算模式由于其提出就考虑商业实现,因而经济学理论往往应用于资源分配中,如针对云虚拟机资源的分配问题,文献[9]提出了以云效用最大为资源调度目标的云虚拟机资源分配模型。

资源定价作为经济模型中资源交易各参与方关注重点,其策略直接影响到资源管理的效果。资源定价主要分为集中式和分布式 2 种策略。前者根

据资源市场的总体供需情况对资源价格进行同步调节,如商业分配方式^[10];后者则根据资源供需情况进行单独调价,整体资源的均衡价格通过对每个资源重复调价获得。集中式定价算法收敛速度快,但价格相对固定,难以适应动态变化的网络环境,且算法复杂度相对较高。分布式定价在进行价格调节时没有考虑各个资源价格之间的相关性,因而不适应资源价格关联性较强的情况^[11],但算法复杂度相对较低。针对市场机制下网络资源调价动态变化快,资源价格的调整节奏与网络环境中资源供需关系变化难以保持相对一致的情况,文献[11]结合集中式调价算法收敛快速的优点,对分布式调价 WALRAS 算法^[12]进行了改进,提了分布式分组调价算法。文献[13]针对异构无线网络资源管理问题,提出了基于 Stackelberg 博弈模型的分布式定价和资源分配算法。

相关研究显示^[14~16],分布式环境中资源所有者出让资源使用权后,将导致本地任务的性能指标如任务反应时间、任务平均等待时间增加等问题。为了弱化其给本地任务带来的负面影响,文献[17]根据本地任务的统计特性制定定价策略,通过价格来保障资源提供者利益。针对网络计算中多 QoS 约束的作业调度 NP 难问题,文献[18]将该问题归约为多目标组合最优化问题,并提出了相应的多目标演化算法以保障网络用户的效用。针对分布式资源管理中用户的信任 QoS 与服务调度难以融合的问题,文献[19]通过效用函数量化服务提供者与服务请求者间信任关系,并在此基础上提出了保证多 QoS 的服务调度算法。

本文借鉴了分布式定价策略中“根据资源供需情况单独调价以达供需平衡”的思想,但与传统的分布式资源定价机制没有考虑资源间的相关性不同,本文将资源间的相关性体现在任务分配的博弈之中,通过市场交易中心根据资源所有者的报价与市场整体情况确定资源分配方案,资源所有者通过价格调整使分配方案与整个市场的供需关系保持一致。

3 问题描述

多资源协同服务的交易系统由资源用户、交易中心、资源代理和资源提供方 4 个主要实体组成。其中,资源提供方由资源集群组成,作为生产者提供资源。本文仅考虑在某时间段已被使用的资源在

该时间段不能再被其他用户使用的独占型、消耗型资源，如 CPU 计算能力、存储能力等，并由资源代理对价格进行决策；资源用户作为消费者使用资源提供方的服务，根据使用服务的情况支付相应的费用；资源分配由交易中心决定，整个资源交易在交易中心的监管下进行；资源代理根据资源提供方的历史统计情况与市场交易情况对资源的利润价格进行自动调节。

资源提供方和资源用户通过市场交易来提供和使用资源，双方追求各自收益最大化。基于一般市场经济学中理性选择原理和曼昆经济学理论^[20]，本文基于以下 3 点假设。

1) 资源提供方希望通过提供相同资源使用权所获得的资源利润越大越好。

2) 在使用相同服务的情况下，资源用户希望支付费用越低越好。

3) 市场希望各交易参与方满意，各资源提供方的收益大体平衡。

在上述 3 点假设的基础上，设资源提供方将某时间段 t 内的资源使用权以单位时间价格 p 提供给资源用户并获得一定的收益，其收益为

$$U = tcp \quad (1)$$

其中， c 为资源提供方实际出让的服务能力，即资源交易中资源的交易量。根据前面的假设可知，在提供相同服务的前提下，价格越低的资源提供方由于资源用户追求低费用，因而其获得资源交易量越大。在为资源用户提供资源服务的时间段 t 内可能增加“资源碎片”或可能导致该时间段内到达的本地任务 QoS 无法保障等情况，从而给本地任务造成一定的损失。本文采用经济学中成本加成定价模式^[21]，将资源单位价格 p 表示为单位成本和加成价格

$$p = p_0 + \Delta p \quad (2)$$

其中，单位成本 p_0 为提供资源使用权给资源所有者带来负面影响以及为提供服务所增加的额外开销在市场环境中的货币量化，如协同服务时增加的网络通信开销成本也包含其中。 p_0 根据实际环境确定，如文献^[17]针对网格计算环境采取了本地任务的概率分布特性进行计算； Δp 为加成部分，根据“3C+R”定价原理中成本是定价下限约束^[23]，将 $\Delta p > 0$ 作为约束条件。由加成定价模式的定价经验公式可知

$$p = \frac{p_0}{1-c} \quad (3)$$

其中， c 为资源交易利润率。由于 c 值域为 $(0, 1)$ ，令 $1+l = \frac{1}{1-c}$ ， $l > 0$ ，于是资源交易中价格加成部分 Δp 可用 Δp_0 来表示， Δ 为利润因子。因此，资源价格可以表示为

$$p = (1+l)p_0 \quad (4)$$

根据第 2 点假设可知，理性的资源用户在相同服务的前提下会选择与价格低的资源提供方进行交易。因此，在资源用户的总需求确定的情况下，资源用户和资源提供方之间发生的交易量 c 与资源价格相关。又由于在实际的资源交易场景中成本 p_0 确定，从式(4)可知资源价格随 Δ 值的变化而变化。综合上述分析可得，资源的交易量 c 与利润因子 Δ 相关。基于此，本文基于资源的交易量 c 与利润因子 Δ 之间的相关性，通过调节 Δ 值促使各节点负载趋于均衡。

4 自适应调价策略

资源交易中参与者根据历史情况对本次交易的结果做出期望，但由于交易是多方博弈过程，其实际结果与期望存在着差异。针对该情况，根据资源代理预期出让的服务能力 c_0 与资源提供方实际出让的服务能力 c 之间的差距分为：1) $|c - c_0| < k_0$ ；2) $k_0 < |c - c_0| < k_1$ ；3) $k_1 < |c - c_0|$ 。其中， k_0 和 k_1 分别代表资源代理所能接受和较靠近接受的出让服务能力与期望出让服务能力之间的最大差值， k_0 同时也是价格自适应调整终止参数。1) 和 2) 分配结果没有达到资源代理所能接受的范围，因而需要对价格进行适当调整以使出让的服务能力满足资源代理的期望，其调价流程如图 1 所示。

4.1 第 1 调价策略

当 $k_0 < |c - c_0| < k_1$ 时，利润因子 Δ 值只需进行微调。由于每次调整为使 $|c - c_0|$ 趋近于 k_0 ，因而该调整可采用摸索过程 (tatonnement)^[22]。在调整过程中利润因子 Δ 相近，2 次幅度调整关系表示为 $x_n = x_{n-1} + d_n(c - c_0)$ ，其中 x_n 和 d_n 分别为第 n 次调价幅度和价格调整速率，为使每次调整后 $|c - c_0|$ 更趋近 k_0 ，令 $d_n = md_{n-1}$ ，其中， m 为常系数，其值域为 $(0, 1)$ 。该摸索过程如图 2 所示，通过构造李亚普诺夫能量函数的方法可证明该过程是收敛的。

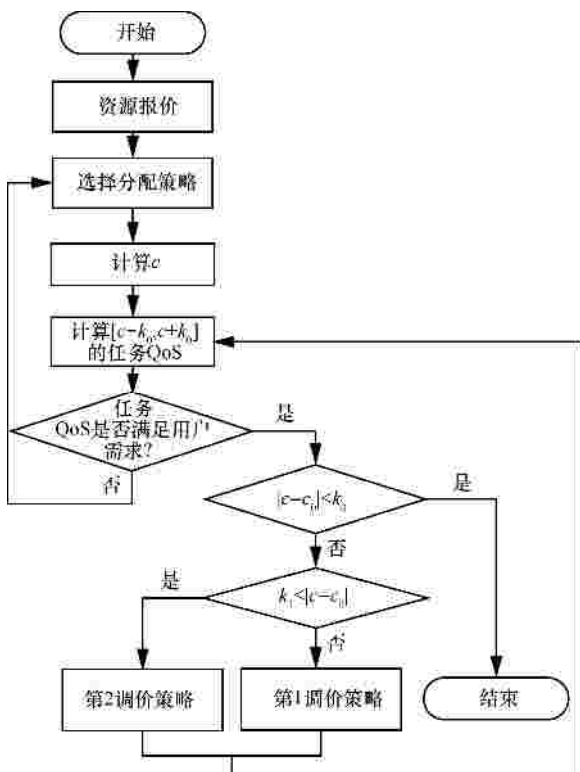


图 1 自适应调价流程

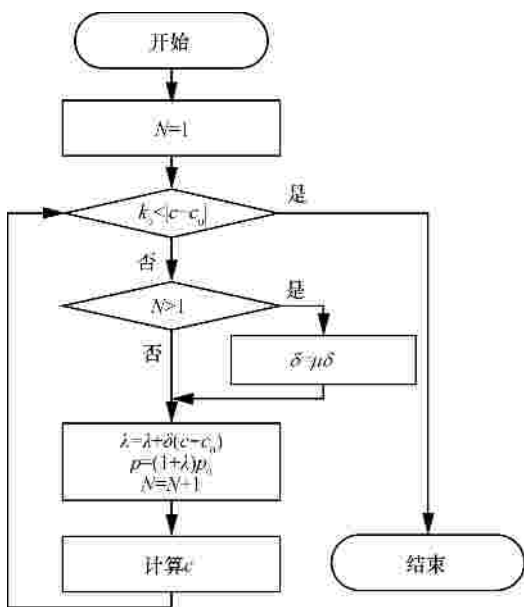


图 2 第 1 调价策略流程

4.2 第 2 调价策略

当 $k_1 < |c - c_0|$ 时，利润因子 λ 值需调整的幅度较大，其调整目标依然是使 $|c - c_0|$ 趋近于 k_0 ，因而该调整过程依然可采用摸索过程。与第 1 调价策略不同之处在于，为使 $|c - c_0|$ 能在尽量少的调整过程中接近 k_0 甚至达到 $|c - c_0| < k_0$ 的范围，利润因子 λ 相近的 2 次幅度调整速率 $d_n = md_{n-1}$ 的系数 m 的取值方法如下

$$\begin{cases} (c_n - c_0)(c_{n-1} - c_0) > 0, m=J \quad (q > 1) \\ \text{其他}, m = -\frac{m}{2} \end{cases}$$

其中， $c_n (n=1, 2, 3L)$ 为第 n 次调价后的实际出让服务能力， J 为一常数。当 $(c_n - c_0)(c_{n-1} - c_0) > 0$ 时，表明相近 2 次价格同向调整即相近 2 次都升高或降低，出让的服务能力还没有达到资源提供者的期待范围，还需进行同向调价。由于 $m > 1$ 即价格调整的幅度是累积增加，该过程终会有某次价格调整后使 $(c_n - c_0)(c_{n-1} - c_0) < 0$ 或达到资源提供者的期望。如果达到资源提供者的期望则整个调价结束；如果 $(c_n - c_0)(c_{n-1} - c_0) < 0$ ，此时令 $m = -\frac{m}{2}$ ，即价格调整的幅度方向相反且幅度是原来的一半，因而该次调整结果必将会使出让的服务能力比上次一次接近资源提供者的期望。因此，该调整过程也是收敛的。

4.3 自适应调价算法

自适应调价算法 (A³PA, auto-adapted adjustment price algorithm) 的伪码如图 3 所示。

```

    输入：由各资源集群信息组成的队列 RQ、任务申请 T、资源代理承受阈值 k0、k1
    输出：价格方案 p=(p1, ..., pn)
    Begin
    1) 初始化价格方案 (p=null)
    2) 过滤掉不满足任务申请 QoS 约束的资源节点，并对符合条件的资源节点的利润因子 λ 进行初始化，计算成本价格并将价格上报给交易中心，Q=0
    3) while Q=0 do
    4) 交易中心根据各资源代理报价，结合市场规则选择资源分配方案
    5) 计算在各资源代理所能接受的分配方案区间的任务 QoS 表现
    6) if QoS 表现满足需求约束，then Q=1
    7) end while
    8) while RQ <> null do
    9) if 存在资源代理 |c-c0| < k0 then
    10) 该资源代理出队列 RQ，并将该代理价格加入队列 p=(p1, ..., pn)
    11) else if |c-c0| < k1 then
    12) 执行第 1 调价策略
    else
    13) 执行第 2 调价策略
    14) endif
    15) 队列 RQ 中的代理上报交易中心调整后的价格
    16) end while
    17) 输出 p=(p1, ..., pn)
    End
    
```

图 3 A³PA 伪代码

A³PA 算法首先初始化价格方案，过滤不满足任务 QoS 约束的节点和根据历史日志计算出

成本价格并对利润因子进行初始化(步骤 1)和步骤 2), 接下来根据任务 QoS 约束确定资源分配方案(步骤 3)~ 步骤 7), 然后资源代理队列 RQ 根据交易中心的分配方案确定是否对价格进行调整以及如何调整(步骤 9)~ 步骤 13)。为保证每个资源代理获得可接受的分配方案, 用 $RQ \neq \text{null}$ 作为循环约束条件(步骤 8)~ 步骤 16)。理想情况为交易中心根据各资源代理初始化利润因子 p_i 计算出的分配方案就能满足各资源代理的期望, 在该情况下算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。最坏情况为根据各资源代理初始化利润因子计算出的资源交易量没有资源代理能接受, 每个节点都需要进行调价, 但是需要调价的资源代理数量与时间复杂度无关, 这是由于在步骤 8)~ 步骤 16)中循环约束条件只要存在资源代理对资源分配方案不满意就继续调整价格, 具体的时间复杂度与所选的调整策略承受阈值 k_0 相关, A^3PA 算法的收敛性由调价策略 1 和调价策略 2 的收敛性保障。

5 实验结果与性能评估

5.1 仿真实验设计

为检验本文提出的分布式环境中自适应定价策略 (A^3PS , auto-adapted adjustment price strategy) 的性能表现, 基于 GridSim 搭建了一个分布式系统。实验中各站点性能参数配置采用 Grid'5000^[23] 在 2015 年 4 月 22 日的实际配置, 详细信息如表 1 所示。任务负载采用 Lublin-Feitelson 模型生成。考虑到任务由 Lublin-Feitelson 模型随机生成, 实验数据采用每次实验重复 10 次后的平均结果。

表 1 模拟网格系统的数据信息

ID	Grid 站点	处理器数量	平均处理能力/GHz
1	Grenoble	232	2.34
2	lille	148	2.67
3	lyon	206	2.37
4	nancy	336	2.50
5	rennes	346	2.18
6	sophia	190	2.44
7	Toulouse	280	2.6

模拟实验将 A^3PS 策略与在资源定价中广泛应用的招投标/合同网模型 (TCM, tender/contract-net model)^[24] 和商品市场模型 (CMM, commodity

market model)^[25] 的性能表现进行比较。

5.2 性能分析与比较

5.2.1 性能比较

完成时间、资源利用率方差 (DX)、总利润以及总收益 4 个指标的统计结果如表 2 所示。其中, 完成时间为任务开始执行到全部完成所花费的总时间; $DX = E(r - Er)^2 = \sum (r - Er)^2$, p_i 为资源节点 i 的资源利用率, Er 为所有资源的平均利用率, DX 用来衡量各资源节点 CPU 繁忙程度与所有节点 CPU 平均繁忙程度的偏差情况; 总利润和总收益分别为所有资源节点出让使用权所获得的利润总和 ($\sum c_i \Delta p_i$) 与总收益 ($\sum c_i p_i$)。

表 2 模拟实验结果

策略	完成时间/s	DX	总利润	总收益
A^3PS	411.068	0.000 5	1 140 092	1 461 245
CMM	415.768	0.048 39	854 622	1 174 106
TCM	434.319	0.056 23	685 878	942 282

表 2 中数据显示, TCM 策略的任务完成时间最长, 而 A^3PS 策略的任务完成时间最短, 其原因在于 TCM 策略中资源价格由资源所有者指定, 其定价机制相对固定, 导致资源用户选择资源时具有随机性, 选择的资源不一定是合适的资源。然而, A^3PS 策略其价格中成本价格部分就蕴含着本地任务对资源的使用情况, 而理性的资源使用者都倾向于选择价格低的资源, 因此其任务完成时间最短。TCM 模型的 DX 最大反映出各资源利用率情况相差很大, 这正是由于 TCM 模型中资源用户一旦选择了某个资源提供方后就不会考虑其他资源情况的这一缺陷所致, 而 A^3PS 策略的 DX 最小体现了其有使资源负载趋向平衡的能力, 分析原因还是在于 A^3PS 策略的定价考虑了成本价格且利润价格与市场整体利润平衡时的资源提供方才停止调价, 而资源用户将任务放在价格较低的资源节点上运行, 价格低的资源节点其本地任务相对较少, 因而起到了平衡资源节点负载作用。

表 2 中数据显示, 3 种策略的总收益和总利润之间的差距都较大。导致这一现象的原因在于实验中设置的费用预算较大, 在进行任务分配时费用预算对分配策略影响不大。实验中发现如果将费用预算减少, 3 种策略的总收益差距会减小。造成总利润之间的差距较大的原因是, A^3PS 策略在成本价格较低的资源

节点上分配的任务多,因而其利润相对高,根据定价策略可知,成本价格与资源节点原有负载相关,即成本价格低的节点其负载较低,通过 A³PS 策略把资源用户的任务更多地分配到负载较低的节点中,这也与 A³PS 策略 DX 值最小相符合。

实验中发现, A³PS 策略的资源节点总调价次数明显高于其他策略,正是由于该策略具有自适应调价的灵活性,根据市场供需情况采用自动调价,使收益符合各自预期。

5.2.2 参数分析

上述检验 A³PS 策略实验中,当 $k_0 < |c - c_0|$ k_1 时,采取第 1 调价策略时 $|m| = 0.1$; 当 $k_1 < |c - c_0|$ 时,初始 $J = 1.2$, 接纳阈值 $k_0 = 0.025$ 。为进一步研究不同参数情况下调价策略对资源节点以及任务 QoS 指标的影响,对策略中参数采取了不同的取值。表 3 中 m_1 、 m_2 分别为 $k_0 < |c - c_0|$ k_1 时, $|m|$ 和 $k_1 < |c - c_0|$ 中 J 的取值。

表 3 中数据显示,随着参数 $|m|$ 的减小,调价次数逐渐增加,尤其在 $m_1 = 0.02$ 、 $m_2 = 1.1$ 时其调价次数达到 448 次之多,而资源提供者的总收益、总利润以及 DX 和任务完成时间都相差甚少,这表明在资源提供方接纳阈值确定的情况下,在同一市场环境中其对应的价格区间是确定的,因而随着价格的变化幅度越小要达到该区间需要调节的次数就越多,而在价格区间与接纳阈值确定的情况下,其对应的系统总收益和总利润以及各节点的负载都基本保持不变。图 4 和图 5 的结果显示,随着接纳阈值的增加,系统的调价次数、总收益和总利润减少而 DX 增加,这表明接纳阈值影响着系统的收益与节点的负载情况。分析原因在于接纳阈值越小代表资源提供方对收益期望越高,对应的价格区间越小,因而调价次数需增加;由于每个资源提供方都要求收益高,因而系统总收益和总利润会提高,这也导致资源用户需支付更多的费用。

表 3 模拟实验结果

参数设置	调节次数	完成时间/s	DX	总利润	总收益
$\mu_1 = 0.10, \mu_2 = 1.2$	94	416.43	0.000 46	1 156 439	1 477 672
$\mu_1 = 0.05, \mu_2 = 1.2$	180	411.06	0.000 471	1 140 092	1 461 245
$\mu_1 = 0.05, \mu_2 = 1.1$	185	411.06	0.000 471	1 140 092	1 461 245
$\mu_1 = 0.02, \mu_2 = 1.1$	448	411.07	0.000 472	1 136 823	1 457 960

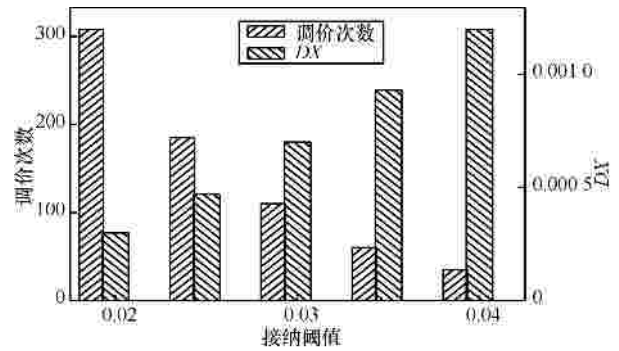


图 4 不同 k_0 值的调价次数、DX 情况

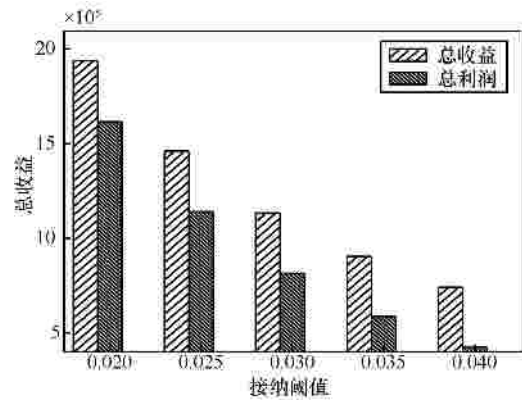


图 5 不同 k_0 值的总收益、总利润情况

综合上述实验结果可以得出:调价函数和接纳阈值对系统的调节次数有很大的影响,接纳阈值相同的情况下调价函数的变化对各资源的总收益与任务完成时间没有明显影响,资源的总收益和任务完成时间、调价次数与接受阈值相关,而且接受阈值越小调价次数越多,收益越大,这表示资源提供者对分配策略的要求比较苛刻,表明资源分配方案与价格调整函数关系不大,只要资源提供方的接纳分配策略范围 $|c - c_0| < k_0$ 确定,其资源分配方案就能确定。

6 结束语

如何合理地对资源定价是基于市场机制进行资源管理的一个核心问题。本文在保障本地节点利益并尊重市场规律的前提下,对资源提供方出让的使用权进行价格确定,在该定价过程中资源代理利用市场对价格的反应,通过对价格进行自适应调整,使市场中资源分配方案符合资源代理所设置的资源分配接纳区间,以此来保障资源提供方的收益,并建立了资源自适应市场变化的定价策略。对 GridSim 进行了改进与扩展,并在此平台上对提出的自适应定价策略进行的仿真实验结果表明,本文提出的定

价策略不但保障了资源提供方的收益，而且能使各资源节点的资源负载趋于平衡。下一步工作将主要集中在研究资源提供者不同偏好以及多 QoS 约束下保障价格的定价机制与价格调整函数的优化。

参考文献：

- [1] FOSTER I, KESSELMAN C. The grid: blueprint for a new computing infrastructure, second edition [M]. Singapore: Elsevier, 2004.
- [2] LUO J Z, JIN J H, SONG A B, et al. Cloud computing: architecture and key technologies [J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 3-21.
- [3] FOSTER I. What is the Grid? a three point checklist [J]. GRID Today, 2002, 1(6): 20-27.
- [4] BUYAYA R. Economic-based distributed resource management and scheduling for grid computing[D]. Monash University, Australia, 2002.
- [5] SANDHOLM T. Making markets and democracy work: a story of incentives and computing[C]//The International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-03), c2003: 1649-1671.
- [6] 曹鸿强, 肖依, 卢锡城, 等. 一种基于市场机制的计算网络资源分配方法[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(8): 913-916
- 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.
- [7] WALDSPURGER C, HOGG T, HUBERMAN B, et al. Spawm: a distributed computation economy [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1992, 18(2): 103-117.
- [8] 李世勇, 杨冬, 秦雅娟, 等. 基于效用最大化的网络跨层映射[J]. 软件学报, 2011, 22(8): 1855-1871.
- LI S Y, YANG D, QIN Y J, et al. Network cross-layer mapping based in utility maximization[J]. Journal of Software, 2011, 22(8): 1855-1871.
- [9] 师雪霖, 徐格. 云虚拟机资源分配的效用最大化模型[J]. 计算机学报, 2013, 36(2): 252-262.
- SHI X L, XU K. Utility maximization model of virtual machine scheduling in cloud environment[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 252-262.
- [10] KENYON C, CHELIOTIS G. Grid resource commercialization: economic engineering and delivery scenarios grid resource management: state of the art and research issues [M]. Kluwer, 2003.
- [11] 翁楚良, 陆鑫达. 一种基于市场机制的网格资源调价算法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1151-1156.
- WENG C L, LU X D. A pricing algorithm for market-based resource management on grid computing systems[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7): 1151-1156.
- [12] CHENG J Q, WELLMAN M P. The WALRAS algorithm: a convergent distributed implementation of general equilibrium outcomes [J]. Computational Economics, 1998, 12(1): 1-24.
- [13] 姜永, 陈山枝, 胡博. 异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(1): 61-68.
- JIANG Y, CHEN S Z, HU B. Stackelberg games - based distributed algorithm of pricing and resource allocation in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 61-68.
- [14] SMITH W, FOSTER I, TAYLOR V. Scheduling with advanced reservations[C]//14th International Parallel and Distributed Processing

- Symposium(IPDPS 2000), c2000: 127-132.
- [15] CAO J F, Zimmermann. Queue scheduling and advance reservations with COSY[C]//18th International conference on Parallel and Distributed Processing Symposium, c2004: 63a.
 - [16] HEINE F, HOVESTADT M, KAO O, et al. On the impact of reservations from the Grid on planning-based resource management[C]//International Conference on Computational Science-(ICCS 2005), c2005: 155-162.
 - [17] 丁长松, 王志英, 胡志刚. 基于效用驱动的网格资源协同预留策略[J]. 通信学报, 2014, 35(3): 101-107.
 - DING C S, WANG Z Y, HU Z G. Utility-driven based co-allocation resource reservation strategy in computational grid[J]. Journal on Communications, 2014, 35(3): 101-107.
 - [18] 张伟哲, 胡铭曾, 张宏莉, 等. 多 QoS 约束网格作业调度问题的多目标演化算法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(11): 1855-1862.
 - ZHANG W Z, HU M Z, ZHANG H L, et al. A multiobjective evolutionary algorithm for grid job scheduling of multi-QoS constraints [J]. Journal of Computer Research and development, 2006, 43(11): 1855-1862.
 - [19] 张伟哲, 方滨兴, 胡铭曾, 等. 基于信任 QoS 增强的计算服务调度算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(7): 1157-1166.
 - ZHANG W Z, FANG B X, HU M Z, et al. A trust-QoS enhanced grid service scheduling [J]. Chinese Journal of Computers, 29(7): 1157-1166.
 - [20] MANKIW N G. Teaching the principles of economics [J]. Eastern Economic Journal, 1998, 24(4): 519-524.
 - [21] 骆明亮. 定价策略[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2013. 19-22.
 - LUO P L. Pricing strategy. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2013. 19-22.
 - [22] VARIAN H R. Microeconomic analysis[M]. New York: W.W. Norton & Company, 1992.
 - [23] MediaWiki. Grid5000: Home[EB/OL]. <https://www.grid5000.fr/mediawiki/index.php/Grid5000:Home>.
 - [24] SMITH R, DAVIS R. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver [J]. IEEE Transactions on Computers, 1980, 29(12): 1104-1113.
 - [25] MCKNIGHT L W, BOROUHAND J. Pricing internet service: approaches and challenges [J]. IEEE Computer, 2000, 33(2): 128-129.

作者简介：



丁长松 (1975-), 男, 湖南汉寿人, 湖南中医药大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为云计算、中医药信息化。

王志英 (1956-), 男, 山西长治人, 国防科技大学教授、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, 中南大学教授、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。