基于博弈理论的网格资源共享协同算法

曹怀虎,张艳梅,韩文英
CAO Huai-hu,ZHANG Yan-mei,HAN Wen-ying

中央财经大学 信息学院,北京 100081
School of Information of the Central University Finance and Economics,Beijing 100081,China
E-mail:caohhu@163.com

CAO Huai-hu,ZHANG Yan-mei,HAN Wen-ying.Game theoretic resource coordinated share algorithm in grid.Computer Engineering and Applications,2007,43(24):29-31.

Abstract: According to the autonomy,heterogeneity,distributing and parallel of resource share in grid,considering the character of resource management and node's behavior,proposes the game theoretic model of resource pricing,and brings forward a game theoretic resource coordinated share algorithm.The simulation experiment indicates the algorithm implement self-adaptation equilibrium of resource demand-supply and workload.
Key words: Game Theory;resource share;grid;self-adaptation

摘 要:针对网格资源共享的自治性、异构性、分布性和并行性,在考虑网格资源管理及结点行为特点的基础上,建立了网格资源竞价博弈模型,进而提出了一种基于博弈论的资源共享的协同算法,仿真实验结果表明该算法实现了资源供需变化的自适应以及使用效益意义上的资源负载平衡。
关键词:博弈论;资源共享;网格;自适应
文章编号:1002-8331(2007)24-0029-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP301

1 引言

资源的协同共享问题在网格中的作用非常重要,已有的一些并行和分布计算系统的资源共享技术,并不能很好地适应网格资源共享问题的特点,如资源管理者的自治性、资源及其使用者的异构性、资源共享决策的分布性和并行性等。与此同时,在网格系统的资源管理中使用经济学方法,特别是使用经济学方法解决分布式系统的负载平衡问题,却是近几年来非常活跃的一个研究领域。其基本思想是:使用价格信号反映资源的忙闲程度,通过使用最经济的资源执行新提交的应用任务,实现整个系统的供给平衡。但是,这种市场机制的思想,不能直接用于网格的资源管理,其原因在于,它们需要一个中央市场或是公告牌,因而算法的可扩展性不好,而且基本没有考虑网格的广域特点。为此,本文提出了一种基于市场机制的网格资源共享方法,以一般均衡理论为基础,依靠市场机制,实现网格资源的优化协同共享[1]。

2 网格资源竞价模型

2.1 博弈论(Game Theory)相关定义

博弈论又被称为对策论(Games Theory),是研究具有斗争或竞争性质现象的理论和方法,它既是现代数学的一个新分支,也是运筹学的一个重要学科[2]。其相关定义如下:

纳什定理 任何具有有限纯策略的二人博弈至少有一个均衡偶。这一均衡偶就称为纳什均衡点。

纳什均衡点概念提供了一种非常重要的分析手段,使博弈论研究可以在一个博弈结构里寻找最优的结果。下面将基于博弈论的思想,建立网格资源的竞价模型以及价格博弈模型。

2.2 网格资源价格博弈

2.2.1 网格资源价格博弈模型

这里考虑网格中有 n 个节点和 m 个被请求的资源,资源请求概率是一个向量$(q_1,q_2,..,q_m)$,$\sum_{i=1}^{m} q_i=1$,这个请求概率对所有节点都是可知的。对于每一个资源的请求,节点可以按概率 x_i 选择共享或者不共享,由此也形成了一个向量$(x_1,\dots,x_m)$[3]。这里为了简化问题,网格可以根据实际情况随时更新节点的信息。发现资源的过程将按 3.4 小节所阐述的方法进行。进一步假设每一种资源有一个单位度量,每一个节点拥有 ρ 个单位的资源容量。因此在这种价格博弈中每一个参与者的策略是一个向量$(x_1,\dots,x_m)$,满足 $\sum_{i=1}^{m} x_i\leqslant\rho$。

为了实现资源的最优配置,必须要解决下面的最小化问题:

$$Min\sum_{i=1}^{m}\frac{q_i}{p_i} \tag{1}$$

$$\text{s.t}\sum_{i=1}^{m}p_i=1,p_i\geqslant 0,i=1,\cdots,m$$

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60673162);北京市自然科学基金(No.4073041)。
作者简介:曹怀虎(1977-),男,博士,讲师,主要研究方向:计算机网络体系结构,网格技术;张艳梅,博士生,讲师;韩文英,博士生,讲师。

这里 p_i 是系统的选择策略,定理 1 给出了该最小化问题的解。

2.2.2 价格博弈问题的转化

在价格博弈中，如果所有节点都选择相同的策略$(x_1,\dots,x_m)$,m 个资源请求的预期量将是 $\rho\sum_{i=1}^{m}\frac{q_i}{x_i}$。为了得到纳什均衡$(x_1^*,\dots,x_m^*)$,必须解决下面的优化问题：

$$Min\sum_{i=1}\frac{q_i}{x_i} \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\sum_{i=1}^{m}x_i\leqslant\rho$$

$$x_i\geqslant 0, i=1,\cdots,m$$

在这样一个价格博弈,每个参与者对应一种资源和一个资源的效用函数：

$$U_i(x_i)=-\frac{q_i}{x_i} \tag{3}$$

这个效用函数满足下面的条件：

条件 1 $U_r(x_r)$递增的严格的凹函数,且在 $x_r\geqslant 0$ 范围内持续可微。

进一步将针对资源配置问题，考虑到每一个节点的容量，下面定理说明对于这种约束将是有效的。

定理 1 如果每一个节点实行价格博弈，那么对于这种资源配置问题,分配的结果向量$(x_1^*,\dots,x_m^*)$是每个节点提供资源的最优策略,同时带来全局的最优策略。

证明 价格机制为每一个价格博弈确定一个唯一的优化分配向量$(x_1^*,\dots,x_m^*)$,而且,如果所有节点都选择这样一种分配向量,这就是纳什均衡,在这个平衡点,整个系统资源实现了全局的最优配置。

为了实现这个竞价策略,必须为价格博弈的参与者设计专门的收益函数。

2.2.3 价格博弈的收益函数

为价格博弈的每一位参与者 i 设计的收益函数如下：

$$\pi_i(x_i)=U_i(x_i)-ux_i, u>0 \tag{4}$$

这里 $U_i(x_i)$是在公式(3)中定义的,u 是代价系数。

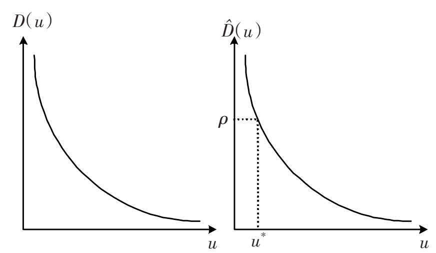
下面将更精确地设计这个收益函数,以使得最后的平衡状态汇聚于资源的最优配置。对于 $i=1,\cdots,m$,定义函数 D_i,以使得 $D_i(u)$是下面的最大化问题的最优解：

$$\underset{x\geqslant 0}{\text{Max}}\{U_i(x_i)-ux\} \tag{5}$$

也即：

$$D_i(u)=alloc\ \underset{x\geqslant 0}{Max}\{U_i(x_i)-ux\}, u\geqslant 0 \tag{6}$$

函数的一个例子如图 1(a)所示。



(a)函数 $D(u)$　(b)函数$\hat{D}(u)$

图 1　函数例子

根据条件 1,总存在一个唯一的解$(x_1^*,\dots,x_m^*)$,同时存在一个参数 u^* 使得：

$$x_i^*=D_i(u^*) \tag{7}$$

进一步定义函数：

$$\hat{D}(u)=\sum_{i=1}^{m}D_i(u) \tag{8}$$

这个函数展示在图 1(b)中,令：

$$\hat{D}(u)=\rho \tag{9}$$

这个收益函数按下面步骤确定：

(1)为了定义收益函数,首先定义效用函数 $U_i(x)$,$U_i(x)$满足条件 1,本文的效用函数如公式(3)。

(2)由于效用函数 $U_i(x)$是严格递增的凹函数,而且是二次可微的,如果结合等式(6)和 $\boldsymbol{x}_i^*=D_i(u)$,从而解得函数 $D_i(u)$,这里 $\boldsymbol{x}_i^*$ 是最优分配矢量[4]。

(3)根据公式(8)可以解出$\hat{D}(u)$。

(4)通过解 $u^*=\hat{D}^{-1}(\rho)$可以得到 u^*,这里$\hat{D}^{-1}(\rho)$是的倒数$\hat{D}(\cdot)$。

经过以上的步骤,可以定义每一个参与者 i 的收益函数。

3 分布式算法设计

设想网格环境中每个资源代理运行若干个线程,每个线程负责一种资源的管理,执行一个特定的收益函数,来实现它的收益最大化。每一个代理并不需要知道这些线程的收益函数。如果改变这个收益函数,就可以得到不同的全局优化问题。第 2.2.1 小节的问题 $SYSTEM'(U,A,C)$ 可以被分解为两个问题：一个是资源的消费者,另一个是网格系统[5]。假设,任一个节点 r 针对每单位资源给出价格 u，然后,r 在单位时间内支付 w_r,同时收到 $x_r=\frac{w_r}{u}$。对于任一个节点的效用最大化问题 $USER(U_r;u)$如下：

$$\text{Max}U_r\left(\frac{w_r}{u}\right)-w_r \tag{10}$$

整个网格系统的效用最大化问题 $GRID(A,C;w)$如下：

$$\text{Max}\sum_{r\in R}w_r\log x_r$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{r\in R}x_r\leqslant C_k, x\geqslant 0 \tag{11}$$

注意,求解 $GRID(A,C;w)$并不要求知道效用函数 U。

基于上述的基本思想,提出了一个分布式的算法,其主要步骤如下：

(1) 运行在每一个节点的算法

步骤 1 在每一个阶段 k,每一个节点 i 收到价格 $u^{(k-1)}$,这个价格是节点 i 在阶段 $k-1$ 产生的。

步骤 2 选择一个新的 $x_i^{(k)}$:$x_i^k=D_i(u^{(k-1)})$。

步骤 3 向代理报告 $x_i^{(k)}$。

(2)运行在每一个代理上的算法

步骤 1 随时接收域内节点的资源申请(在申请中应用代理给出了资源需求下限)。

步骤 2 按照先申请先接受的原则确定下一个长度为 T_j 时间段里使用资源 r_j 的应用代理集合 A_j 确保这些应用代理的资源需求下限之和不超出资源 r_j 的全部能力。

步骤3 在每一个长度为 T_j 时间段的开始时执行算法步骤步骤 4~13。

步骤 4 取资源的当前价格 u 作为初始价格,确定价格调整速率初值 a,迭代中止参数 E。

步骤 5 将价格 u 通知集合 A_j 中的所有应用代理。

步骤 6 接收各个应用代理返回的它们在价格 u 下的最优。

资源需求量,计算总超额需求 $z_j^{(k-1)}$(各个应用代理的最优资源需求量之和减去资源 r_j 的全部能力)。

步骤 7 如果 $\left|z_j^{(k-1)}\right| \leqslant E$ 那么当前 u 的就是均衡价格,按照当前各个应用代理的最优资源需求量分配资源 r_j,该次资源分配结束,返回步骤 1。

步骤 8 根据下式更新价格 u:

$$u^{(k)}=u^{(k-1)}+\left[a\left(\sum_{i=1}^{m} x_i^{(k)}-\rho\right)\right]^+$$

这里 a 是价格调整速率:

$$\left[a\left(\sum_{i=1}^{m} x_i^{(k)}-\rho\right)\right]^+=\max\left\{\left(\sum_{i=1}^{m} x_i^{(k)}-\rho\right),0\right\}$$

步骤 9 如果 $u^{(k)}<0$,那么依照公式 $a=\frac{a}{2}$ 修正价格调整速率 a,返回步骤步骤 8。

步骤 10 通知集合集合 A_j 中的所有应用代理。

步骤 11 接收各个应用代理返回的它们在价格 $u^{(k)}$ 下的最优资源需求量,计算总超额需求 $z_j^{(k)}$。

步骤 12 如果 $\left|z_j^{(k)}\right| \geqslant \left|z_j^{(k-1)}\right|$ 那么依照公式 $a=\frac{a}{2}$ 修正价格调整速率 a 返回步骤步骤 8。

步骤 13 将 $u^{(k-1)}$ 调整为 $u^{(k)}$,$z_j^{(k-1)}$ 调整为 $z_j^{(k)}$ 返回步骤步骤 7。

该算法的基本思想是:当资源的供给大于资源的需求,即 z_j 小于零时,价格下降;反之,当资源的供给小于资源的需求,即 z_j 大于零时,价格上升,并且价格升降的速度和 z_j 的绝对值成正比。在经济学中这样的价格调整过程称为 Tatonnement 过程[6]可以通过构造李亚普诺夫能量函数的方法证明 Tatonnement 过程收敛于均衡价格,并且其收敛速度很快[7]。

4　仿真实验结果分析

为了评价这个资源协同共享的机制及其分布式算法,用 C++编程对这个算法进行了两组仿真实验。

实验 1 拥有 1 000 个网格节点,10 种不同的资源。所有节点有相同的资源容量为随机分布[1,5],价格调整速率 a 设为 0.025。

表 1 中的 4 列分别为资源编号,请求概率,期望的优化共享概率,实际的共享概率,这个结果是随机抽取任一节点的结果。从表 1 可以看出,x_i 与期望的概率 p_i 成正比,这与定理 1 的结论是相吻合的,也说明了资源的供需是成正比的。图 2 也是随机抽取的一个节点,图 2(a)是共享概率$(x_1,\ldots,x_m)$,图 2(b)是价格,在这里并没有限制概率小于或等于 1,但这并不影响最终的平衡状态,在大多数情况下经过 30 个时间单位,将汇聚在一个稳定的平衡点。这表明本文所提出的算法是有效的,能够实现全局的资源优化配置。

实验 2 拥有 500~1 000 个网格节点,资源的供给与需求服从 Gamma 分布,考察整体的资源需求与供给情况。实验结果如图 3 所示,资源的供给可以随着资源的需求的变化而变化,实现了资源供给的平衡。

表 1　在异构网格环境中的资源共享

i	q_i	p_i	x_i	i	q_i	p_i	x_i
1	0.01	0.034	0.174	6	0.10	0.112	0.556
2	0.02	0.048	0.244	7	0.10	0.111	0.555
3	0.02	0.048	0.244	8	0.20	0.157	0.785
4	0.05	0.079	0.391	9	0.20	0.157	0.785
5	0.05	0.079	0.391	10	0.25	0.175	0.875

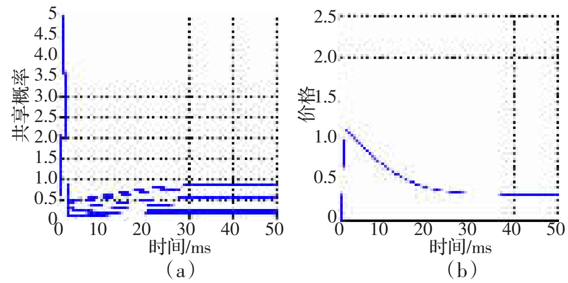


图 2　随机节点的共享概率及价格

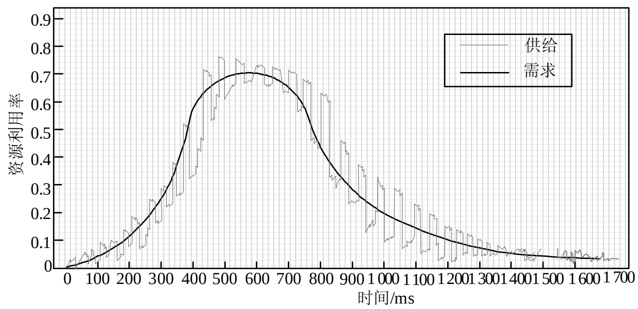


图 3　资源需求与供给比较

5　结论及未来工作

针对网格资源共享的自治性、异构性、分布性和并行性,在考虑网格资源管理及结点行为特点的基础上,建立了网格资源竞价博弈模型,进而提出了一种基于博弈论的资源共享的协同算法,仿真实验结果表明该算法实现了资源供需变化的自适应以及使用效益意义上的资源负载平衡。进一步要做的工作是将本文所提出的方法应用于实际的网格系统,获得更贴近实际情况的的验证。(收稿日期:2007 年 5 月)

参考文献:

[1] Golle P,Leyton-Brown K,Mironov I,et al.Incentives for sharing in Peer-to-Peer networks[C]//Proc.of the ACM Conference on Electronic Commerce(WELCOM),2001.

[2] Gibbons R.Game theory for applied economics[M].[S.l.]:Princeton Univeristy Press,1992.

[3] Srinivasan V,Nuggehalli P,Chiasserini C F,et al.Cooperation in wireless Ad Hoc networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM,2003.

[4] Marbach P,Berry R.Downlink resource allocation and pricing for wireless networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM,2002.

[5] Feigenbaum J,Shenker S.Distributed algorithmic mechanism design:recent results and future directions[C]//Sixth International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications(Dial'M),2002.

[6] Hey J D.Current issues in microeconomics.hampshire[M].[S.l.]:Macmillan Press Ltd,1989:105-109.

[7] 张金水.数理经济学——理论与应用[M].北京:清华大学出版社,1998:82-88.