

虚拟机资源分配的非合作博弈标价模型

邓德传 蒋从锋 徐向华 万健

(杭州电子科技大学计算机学院网络与服务计算技术实验室 杭州 310018)

摘要 基于非合作博弈理论,提出虚拟机资源分配的标价模型,该模型设计了各虚拟机的效益函数,同时利用该函数的最优反应函数,优化各博弈参与者对资源的标价。在效益函数零点无定义下,给出虚拟机标价最优解的唯一性和最优性证明。在满足服务质量条件下,利用优化后的标价按比例分配资源,使资源在各虚拟机之间公平分配,以提高虚拟资源利用率,保证用户的响应时间。仿真实验表明,提出的模型是有效合理的。

关键词 非合作博弈,纳什均衡,标价模型,资源分配,虚拟机

中图分类号 TP393.01 **文献标识码** A

Non-cooperative Gaming and Bidding Model Based Resource Allocation in Virtual Machine Environment

DENG De-chuan JIANG Cong-feng XU Xiang-hua WAN Jian

(Grid and Services Computing Lab, School of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract We studied resource allocation strategy about the virtualized servers. Based on a non-cooperative game theory, we employed bidding model to solve the resource allocation problem in virtualized servers with multiple instances competing for resources. The optimal response function of utility function which we introduced makes every player bidding prices reasonable. Although utility function is not well-defined at the point of zero, we show that the bidding game still has a unique equilibrium point. In our model, resources are well allocated to every virtual machine and are improved the utilization of virtual resources.

Keywords Non-cooperative game, Nash equilibrium, Bidding model, Resource allocation, Virtual machine

1 引言

目前,虚拟化技术在数据中心和大规模服务器系统中得到了大量应用。为了保证大量虚拟机系统的性能和服务质量,同时减少运行成本和能耗,往往需要对虚拟机资源进行合理分配。当前研究主要是基于动态资源管理的。Padala 等人^[1]针对虚拟机复杂的 SLOs(Service Level Objectives),利用控制理论,通过输入输出控制器分配系统资源。金海等人^[2]根据资源使用状态和虚拟机集群的能耗,动态自适应地分配资源。Zhao 等^[3]通过预测未来内存使用状况,利用最近最少使用算法动态控制内存,其是一种单节点下虚拟机之间内存负载均衡的方法。目前,这些研究主要针对单虚拟机系统下 CPU 时间片和内存分页进行管理。由于虚拟机是个自治系统且具有贪婪特性,各虚拟机处于高度竞争资源状态且对资源需求变化较大,需要合理的资源调度机制^[4]。在这种情况下不应用传统资源管理方法,因此本文结合非合作博弈理论,提出了基于虚拟机负载的动态资源分配方法。

无线网络中人们采用博弈论来解决能量控制、带宽问题,如文献^[5-7]采用非合作博弈论的方法,来优化信道接入和控制速率。Ardagna 等^[8,9]从软件即服务(SaaS),基础设施即服务(IaaS),服务等级协议(SLA)角度出发,在服务质量(QoS)

约束下,利用广义博弈论进行资源有效分配,使 SaaS 的提供商以最小的代价获得最大利润,同时使 IaaS 提供商获得最大效益。Yolken 等^[10]基于排队论模型下,利用博弈论均衡各队列争夺共享资源。博弈论在网络资源定价、路由和拥塞控制方面也有一定的研究^[11,12]。但是在虚拟机特殊环境下,还未采用基于博弈论理论资源管理方法。

本文把虚拟机资源当作商品,每个虚拟机当作商品购买者,即博弈参与者,利用非合作博弈理论,构建虚拟机资源分配标价模型。在每一轮资源争夺博弈中,各虚拟机根据当前系统 CPU 利用率和特定负载响应时间等性能参数,对期望获得的资源进行竞价。虚拟机资源管理器根据效益函数,计算出使各虚拟机效益函数最大化的资源标价,最后根据这组价格,并遵守比例共享原则,分配虚拟机资源。同时本文在效益函数零点无定义下,给出了各虚拟机标价最优解的唯一性和最优性的证明,仿真实验验证了本文模型是可行和有效的。

本文第 2 节介绍虚拟资源标价模型;第 3 节给出模型纳什均衡点证明;第 4 节介绍仿真实验;最后对全文做出总结。

2 虚拟资源标价模型

本节将在虚拟机环境下,构建非合作博弈的资源标价模型。标价模型建立在有目的的择优活动上,合理处理虚拟机

本文受国家 973 计划项目(2007CB310906),国家自然科学基金项目(60873023,60973029),浙江省自然科学基金项目(Y1101092)资助。

邓德传(1984-),男,硕士生,主要研究方向为虚拟化技术;蒋从锋 副教授,主要研究方向为系统虚拟化;徐向华 副教授,主要研究方向为系统虚拟化、传感器网络;万健 教授,主要研究方向为分布式计算。

对资源的请求可看作一个选择和优化过程。在非合作博弈中,多个博弈参与者主体行为相互影响。因此其均衡结果不是由单一博弈参与者决定,而是由所有博弈参与者共同决策实现。本文结合非合作博弈和标价模型特性,设计合理的效益函数,给出合理资源分配方案。为描述方便,列出本文的基本符号,如表 1 所列。

表 1 基本符号

符号	含义
i	虚拟机编号,取值为 $1, \dots, N$
$-i$	第 i 台虚拟机以外的虚拟机
S_i	第 i 台虚拟机竞价,即虚拟机博弈者所采取的策略
s	所有虚拟机竞价组合 (s_N) 向量
$x_i(s)$	第 i 台虚拟机在竞价 s 下,份额向量
$U_i(x(s))$	第 i 台虚拟机效益函数
r_{cpu}	虚拟机 CPU 利用率
m	单位时间片内平均请求响应时间
r	每秒完成的用户请求数
\bar{r}_c	虚拟机空闲 CPU 时间片

2.1 标价模型

在虚拟机环境下,多个虚拟机共享同一物理资源来运行各种不同的应用程序,为提高整个系统的性能,并满足 QoS 等指标,如何给这些虚拟机分配资源(CPU、内存等)成为问题的关键。针对这一问题,本文提出了基于非合作博弈资源标价模型。本文提出的标价模型的 3 个基本参数为:

- (1)参与者:各虚拟机 $1, \dots, N$;
- (2)策略:各虚拟机的标价 s_N ;
- (3)效益函数: $U_i(x(s))$ 。

假设在一台物理机上运行 N 台虚拟机,每台虚拟机上都运行各自的应用程序。这 N 台虚拟机为了满足 QoS 需要,通常考虑系统 CPU 使用率、应用服务器每秒完成的请求数和响应时间等系统指标,向虚拟机资源管理器申请它们所需的资源。各虚拟机对同一资源的请求会引起各虚拟机对该资源进行争夺。在标价模型中,虚拟资源被视为商品,各虚拟机就是商品购买者(博弈参与者)。此时虚拟机要获得资源,只能通过购买方式才能得到。比如某虚拟机运行过程中,发现系统 CPU 使用率过高,自治系统每秒处理能力下降。假设此时虚拟机期望获得 50 个单位的 CPU 资源,于是向虚拟机管理器提出资源申请。同时虚拟机提交为获得此资源支付的费用(标价) S 和自身效益函数。虚拟机资源管理根据各虚拟机提交的费用和效益函数,求出使各虚拟机效益函数值最大的资源分配方案。

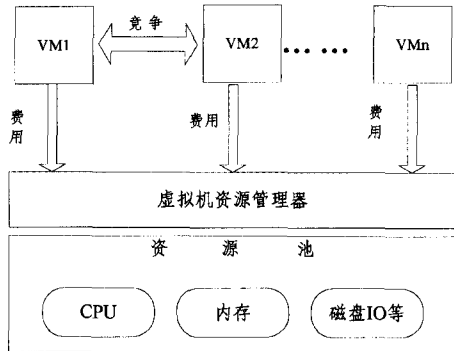


图 1 虚拟机资源博弈图

在标价模型中,各虚拟机(博弈参与者)提交的价格不是任意设定的,而是与它们对资源需求的迫切程度有关,对资源

需求越迫切报价越高。同时虚拟资源管理器根据价格比例共享原则,分配管理器当前拥有的资源。所以每次分配资源也相当于进行了一次资源调节过程,把那些闲置资源分配给当前需要资源的虚拟机。虚拟机资源博弈图如图 1 所示。

2.2 资源费用

由上节描述可知,各虚拟机(博弈参与者)对所申请的资源标价,即费用与对资源的需求迫切程度成正比。在实际的场景中,选取能反映虚拟机系统和应用软件性能的特征量,作为各博弈参与者的出价参考指标。本节以典型的三层 Web 架构标价为例。

在该三层架构中,Web 服务器和数据库处理用户的访问和事务请求。由此把系统吞吐率—每秒完成的用户请求数量化为一个出价指标 r ,同时用户单位时间片内平均请求响应时间 m —反映系统的处理能力,也作为本文的报价指标。另外本文还考虑虚拟机本身的 CPU 利用率 r_{cpu} 。一般, r_{cpu} 、 m 、 r 这些指标值越大,系统越繁忙。同时为了能侧面反映系统的空闲程度和 CPU 资源的浪费状况,本文还选取虚拟机空闲 CPU 时间片 \bar{r}_c 为参考指标。

综上所述,各虚拟机的标价 s ,正比于 r_{cpu} 、 m 、 r ,且反比于 \bar{r}_c 。

2.3 效益函数

由于效益函数影响各虚拟机的资源分配情况和各虚拟机博弈者的决策,因此设计一个合理效益函数是本文关键环节。当博弈参与者 i 向资源拥有者提交一个投标价格 s_i ,投标的价格越高,期望获到资源份额越大。利用资源分配遵循基于价格比例共享原则^[13],设计如下份额和标价关系式:

$$x_i(s) = \frac{S_i}{\sum_j S_j} = \frac{S_i}{S_i + S_{-i}} \quad (1)$$

且 $\sum_{i=1}^n x_i = 1$,可以看出份额函数是由各虚拟机参与者本身和其它虚拟机博弈者共同决定的。

期望效益函数:第 i 个博弈参与者期望获得收益,它是各博弈虚拟机在获取到资源份额 x_i 时完成用户请求获得报酬的一个估计值。则虚拟机期望效益函数是关于份额的函数。我们定义其期望效益函数为:

$$V_i(x_i(s)) = \frac{-1}{C_i x_i} = \frac{-(S_i + S_{-i})}{C_i S_i} \quad (2)$$

由于各虚拟机运行的应用不同,其获得的效益也不同。本文用期望效益函数调节因子 C_i ,调节各博弈参与者效益函数的差别。本文假设期望效益函数在其定义内连续可微,二阶导数小于零,一阶倒数大于零,所以函数表面光滑不会出现跳跃性,在博弈中不会出现一些不合理的点,且其为凸函数对式(2)中的期望效益函数存在以下性质:

$$V_i(x_i), \forall x_i \in (0, 1) \\ V_i'(x_i) = \frac{1}{C_i x_i^2} > 0 \quad (3)$$

$$V_i''(x_i) = \frac{-2}{C_i x_i^3} \forall x_i \in (0, 1) V_i''(x_i) < 0$$

博弈参与者 i 的效益函数为期望效益函数与标价之差:

$$U_i(x(s)) = V_i(x_i(s)) - S_i = \frac{-(S_i + S_{-i})}{C_i S_i} - S_i \\ = -\frac{1}{C_i} - \frac{S_{-i}}{C_i S_i} - S_i \quad (4)$$

可知函数在零点时没有意义,除零点外效益函数连续可

微。其一阶导数为：

$$U_i'(x(s)) = V_i'(x_i(s)) - S_i' = \frac{S_{-i}}{C_i S_i^2} - 1 \quad (5)$$

3 纳什均衡点证明

首先本节给出虚拟环境下两个非合作资源博弈定义。

定义 1 在博弈 $G = \{N, s, u\}$ 中, 各虚拟机参与者在任意给定的资源标价策略组合下, 都存在一个策略 S_i^* 使得对于任意 $\forall S_i, S_i \neq S_i^*$, 都有 $u_i(S_1, \dots, S_i^*, \dots, S_n) > u_i(S_1, \dots, S_i, \dots, S_n)$, 称 S_i^* 为参与者 i 的严格优策略。

定义 2 在博弈 $G = \{N, s, u\}$ 中, 对所有虚拟机参与者 i 而言, 如果都存在 S_i^* 为严格优策略, 那么虚拟机资源标价策略组合 $s^* = (S_1^*, \dots, S_i^*, \dots, S_n^*)$ 就成为严格优策略均衡, 也称纳什均衡。

当各虚拟机参与者处于纳什均衡点时, 则

$$S_i^* = G_i(S_{-i}) = \operatorname{argmax} U_i(S_i, S_{-i}^*), \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (6)$$

式(6)成立, 也就是说每个参与者不愿单方面改变自己策略的点, 纳什均衡点也是对任意虚拟机 i 效益函数 U_i 最大值的点。并称函数 $G_i(s)$ 为虚拟机参与者 i 的最优反应函数, 把满足等式 $s = G(s)$ 的点称为不动点。系统如果是处于纳什均衡, 那么 $G(S) = (G_1(s), G_2(s), \dots, G_n(s))$ 为不动点。由式(5)可得到本模型有如下的最优反应函数:

$$S_i = G_i(s_{-i}) = \operatorname{argmax}(U_i(x(s))) = \sqrt{\frac{S_{-i}}{C_i}} \quad (7)$$

Yates^[8] 在本文中指出非合作博弈的最优反应函数若满足:

$$\begin{cases} \alpha G(S) > G(\alpha \bar{S}) \quad \forall \alpha > 1 \\ S \geq \bar{S} \Rightarrow G(S) \geq G(\bar{S}) \end{cases} \quad (8)$$

$$S \geq \bar{S} \Rightarrow G(S) \geq G(\bar{S}) \quad (9)$$

并且在零点必须有定义, 而为 $G(0)$ 大于零的条件下, 存在纳什均衡点而且唯一。

本文设定的最优反应函数满足式(8)和式(9), 但是效益函数在零点没有定义, 无法引用 Yates 的证明。下面将证明在零点无定义时, 本文非合作博弈的资源标价模型纳什均衡存在且唯一。

定理 1 基于满足本文给定条件的效益函数, 非合作博弈 $G = \{N, s, u\}$ 存在纳什均衡点。

证明: 对最优反应函数 $G(s_{-i}) = \sqrt{\frac{S_{-i}}{C_i}}$, 寻找一个 β 使不等式 $\beta S > G(\beta S)$ 成立。对不等式化简如式(10)所示:

$$\begin{aligned} \beta S > G(\beta S) &\Leftrightarrow \beta S_i > \sqrt{\beta S_{-i}} \quad \forall i \\ &\Leftrightarrow \beta \sqrt{S_{-i}} > \sqrt{\beta S_{-i}} \quad \forall i \\ &\Leftrightarrow (\beta - \sqrt{\beta}) \sqrt{S_{-i}} > 0 \quad \forall i \end{aligned} \quad (10)$$

显然当 β 充分大的时候, 有 $(\beta - \sqrt{\beta}) \sqrt{S_{-i}} > 0$, 设该值为 β_{\max} 。同理对于不等式 $\beta S < G(\beta S)$, 存在另外一个点 β 使不等式 $\beta S < G(\beta S)$ 成立, 设该值为 β_{\min} 。根据最优反应函数 G

$(s_{-i}) = \sqrt{\frac{S_{-i}}{C_i}}$, 构造如下子序列:

$$\begin{cases} S(0) = \beta_{\max} S \\ S(1) = G(S(0)) \\ S(2) = G(S(1)) \\ \vdots \\ S(n) = G(S(n-1)) \end{cases} \quad (11)$$

由上面证明当 β 取 β_{\max} 时, 有 $\beta S > G(\beta S)$ 成立, 所以有 $S(0) \geq G(S(0))$ 成立, 因此可以得出不等式 $S(0) \geq S(1) = G(S(0))$ 成立。由上文分析可知最优反应函数是单调递增的, 把 $S(0), S(1)$ 代入最优反应函数, 可以得式(12)成立。

$$\begin{cases} S(0) \geq S(1) \\ G(S(0)) \geq G(S(1)) \\ \vdots \\ S(n-1) \geq S(n) \end{cases} \quad (12)$$

同理当 β 取 β_{\min} 时, 可得到式(13), 式(14)。

$$\begin{cases} \overline{S(0)} = \beta_{\min} S \\ \overline{S(1)} = G(\overline{S(0)}) \\ \overline{S(2)} = G(\overline{S(1)}) \\ \vdots \\ \overline{S(n)} = G(\overline{S(n-1)}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \overline{S(0)} \leq \overline{S(1)} \\ G(\overline{S(0)}) \leq G(\overline{S(1)}) \\ \vdots \\ \overline{S(n-1)} \leq \overline{S(n)} \end{cases} \quad (14)$$

根据上面构造过程, 得到递增序列 $\{S(n)\}$ 和递减序列 $\{\overline{S(n)}\}$ 。又因为它们分别满足 $\beta S > G(\beta S)$ 和 $\beta S < G(\beta S)$, 所以 $S(n) \geq \overline{S(n)}$, 序列 $\{S(n)\}$ 和 $\{\overline{S(n)}\}$ 收敛于一点记为 \bar{s} , 因此 $G(\bar{S}) = \bar{S}$ 即为所求的纳什均衡点, 证毕。

定理 2 $G(\bar{s}) = \bar{s}$ 纳什均衡点唯一。

证明: 假设在非合作博弈 $G = \{N, s, u\}$ 中, 存在不止一个纳什均衡点, 设另外纳什均衡点为 s' , 不失一般性, 设 $\bar{s} < s'$, 则存在一个 α 值, 使不等式 $\alpha \bar{s} > s'$ 成立。又因为纳什均衡点为不动点, 所有对点 \bar{s}, s' 有 $\bar{s} = G(\bar{s}) \leq G(\alpha \bar{s}) = \alpha s'$ 显然与 $\alpha \bar{s} > s'$ 矛盾, 所以纳什均衡点存在且唯一。

结合定理 1 和定理 2, 用如下伪代码构造出两个收敛的序列:

```

1 S(0) > 0
2 t ← 0
3 repeat
4 S(t+1) = g(S)
5 t ← t + 1
6 until converged
    
```

4 仿真实验

本节根据各虚拟机的效益函数是否相同, 采用两个仿真实验来验证所提标价模型的合理性。在实验一, 假设有 4 台虚拟机参与博弈, 竞争虚拟资源, 如 CPU。在区间 $[0, 1000]$ 内随机取 4 个值, 代表虚拟机初始报价, 4 台虚拟机的效益调节因子在 $[0, 100]$ 内随机取 4 个值, 实验精度 E 取值为 0.05。

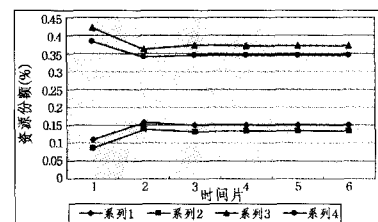


图 2 博弈过程中各博弈者获得的资源份额

sources[C]//Proc. of ACM SIGPLAN Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming. San Diego, USA; [s. n.], 2003

[5] 李晓明,王韬,刘东,等. 走进多核时代[J]. 计算机科学与探索, 2008

[6] Chandra R, Dagum L, Kohr D, et al. Parallel Programming in OpenMP[M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2001

[7] Klemm M, Bezold M, Gabriel S, et al. Reparallelization techniques for migrating OpenMP codes in computational grids[J]. Special Issue: The Best of CCGrid'2007: A Snapshot of an 'Adolescent' Area, 2009. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2009, 21: 281-299

[8] Shah S, Haab G, Petersen P, et al. Flexible control structures for parallelism in OpenMP[J]. Concurrency: Practice and Expe-

rience, 2000; 1219-1239

[9] Schmidl D, Terboven C, Mey D, et al. Binding Nested OpenMP Programs on Hierarchical Memory Architectures[J]. Beyond Loop Level Parallelism in Openmp; Accelerators, Tasking and More, 2010, 6132

[10] Rabenseifner R, Hager G, Jost G. Hybrid MPI/OpenMP Parallel Programming on Clusters of Multi-Core SMP Nodes[J]. Parallel, Distributed and Network-based Processing, 2009. High Performance Comput. Center Stuttgart (HLRS), 2009(2): 427-436

[11] 王家华,周叶,高海余. 克里金地质绘图技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1999

[12] 曾怀生,黄生享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究[J]. 测绘工程, 2007, 16(5)

(上接第 382 页)

如图 2、图 3 所示,随着博弈过程的进行,各虚拟机资源份额和效益函数值曲线趋向平稳。当处于纳什均衡点时,各虚拟机效益函数值达到最大。在实验二,采取两台相同效益函数虚拟机进行博弈,效益函数调节因子设为 10。由于效益函数一样,根据第 3 节可知,各虚拟机应该获取相同的资源,图 4 验证了此结论,当处于纳什均衡点时,系统等分资源。

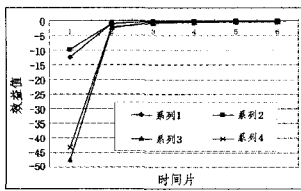


图 3 各虚拟机效益值

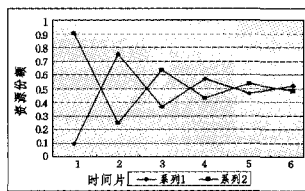


图 4 两个等效效益函数博弈

图 5 表示,虽然两个虚拟机的初始效益值不同,但是他们的效益函数一样,当处于纳什均衡时,各虚拟机的效益值都几乎相同。

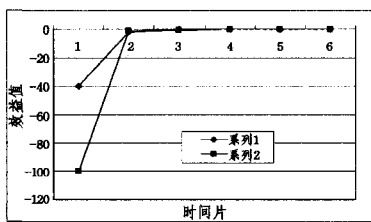


图 5 效益值

结束语 本文对虚拟机环境下的资源管理进行了研究,提出了非合作博弈标价模型。该模型核心部分是各虚拟机效益函数的设计。本文在参与者效益函数零点无定义下,给出了模型纳什均衡点存在性和唯一性的证明。同时通过仿真实验,验证了系统处于纳什均衡点时,各虚拟机博弈参与者的效益最大,而且资源分配方案也是公平的。通过本文标价模型分配虚拟机资源,能有效提高系统资源的利用率,节约系统成本。

参 考 文 献

[1] Padala P, Hou K Y, Shin K G, et al. Automated control of multiple virtualized resources[C]//Proceedings of the 4th ACM Eu-

ropean Conference on Computer Systems (EuroSys 2009). New York: ACM, 2009; 13-26

[2] 金海,邓莉,吴松,等. 一种能耗感知的虚拟集群 CPU 资源自动再配置方法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(7): 1123-1133

[3] Zhao Wei-ming, Wang Zhen-lin, Luo Ying-wei. Dynamic memory balancing for virtual machines[C]// Proceedings of the 2009 ACM SIGPLAN/SIGOPS international conference on Virtual Execution Environments (VEE 2009). New York: ACM, 2009, 43(3): 37-47

[4] 李运发,徐向华,万健. 基于虚拟机负载迁移的资源调度机制[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(9): 45-48

[5] Ghosh P, Roy N, Das S K, et al. A game theory based pricing strategy for job allocation in mobile grids[C]// Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2004). Santa Fe, New Mexico: IEEE, 2007; 80-92

[6] Altman E, Borkar V S, Kherani A A. Optimal random access in networks with two-way traffic[C]// 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004). 2004; 609-613

[7] Lin T H, Chatterjee M, Basu K, et al. ARC: An integrated admission and rate control framework for competitive wireless CDMA data networks using non-cooperative games[J]. IEEE Transactions on Mobile Computation, 2005, 4(3): 243-258

[8] Facchinei F, Kanzow C. Generalized nash equilibrium problems[J]. A Quarterly Journal of Operations, 2007, 5(3): 173-210

[9] Ardagna D, Panicucci B, Passacantando M. A game theoretic formulation of the service provisioning problem in cloud systems[C]// Proceedings of the 20th international conference on World Wide Web (WWW 2011). New York: ACM, 2011; 177-186

[10] Yolken B, Bambos N. Game based capacity allocation for utility computing environments[J]. Telecommunication Systems, 2010, 47(1/2): 165-181

[11] Altman E, Boulogne T, El-Azouzi R, et al. A survey on networking games in telecommunications[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(2): 286-311

[12] 李明欣,陈山枝,谢东亮,等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. 软件学报, 2008, 21(8): 2037-2049