网格资源分配的进化博弈策略

李志洁
LI Zhi-jie

大连民族学院 计算机科学与工程学院,辽宁 大连 116600
School of Computer Science & Engineering,Dalian Nationalities University,Dalian,Liaoning 116600,China
E-mail:lizhijie@dlnu.edu.cn

LI Zhi-jie.Evolutionary game strategy for grid resource allocation.Computer Engineering and Applications,2009,45(15):132-135.

Abstract: To address the competition problem in grid resource allocation,a resource allocation method is proposed based on dynamic mechanism of evolutionary game.The replicated dynamic mechanism is used to produce evolutionary stable point of strategy selection of grid consumer.Then,grid consumers learn and adjust strategies through repeated games.Particularly,the effects of four typical valuation functions on evolutionary stable point are discussed.Finally,the performance of the evolutionary algorithm is evaluated through grid simulator.The results show that the proposed evolutionary algorithm is convergent and generates better utility results compare to classic algorithm.

Key words: grid;resource allocation;replicated dynamic;valuation function

摘 要:针对网格资源分配中的竞争问题,提出了一种利用进化博弈的动态机制研究资源分配的方法。该方法利用复制动态方程求解网格使用者策略选择比例的进化稳定点,通过反复博弈使得网格使用者学习并调整出价策略,并讨论了四种典型的使用者评估函数对进化稳定点的影响。最后利用网格模拟器进行了实验评估,结果表明提出的进化博弈方法是收敛的,且在网格使用者的总体效用方面优于传统算法,从而实现了网格资源的优化分配。

关键词:网格;资源分配;复制动态;评估函数
DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2009.15.038 **文章编号:**1002-8331(2009)15-0132-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP393

1 引言

网格系统[1-3]中的资源管理非常复杂,需要考虑由广域共享所引起的异构性和动态性等问题。由于网格系统的资源管理[4-5]和社会经济活动中的资源管理十分类似,都是以分布自治的行为为基础,而且包含了丰富的博弈关系,所以一个比较活跃的领域是在网格资源管理中引入经济学博弈论[6-7]的成果,将资源配置看成是一个博弈问题,通过寻求纳什均衡解得到资源的优化配置方案。目前,博弈论的一个重要分支是进化博弈论(Evolution Game Theory)[8],它是受到生物进化理论的启发而发展起来的。进化博弈论假设博弈方按照生物或者社会的方式反复进行博弈,改善了传统纳什均衡分析[9]的多重均衡问题,克服了完全理性博弈分析脱离实际的缺陷,因而可对群体行为的动态调整过程进行更为全面的分析,加强博弈分析的理论基础。

网格资源分配系统中的使用者都有一个策略集合,在进化博弈的标准框架中,事先规定了网格使用者只能选择集合中的策略。在网格使用者策略选择的进化过程中,个体收益与总体期望收益之间具有紧密联系。博弈的本质是动态的你得我失,未必均衡,但长期的博弈行为可能出现稳定的结果,形成各得其所的策略均衡,建立基于进化博弈论的网格资源分配机制,尤其是引入进化稳定均衡[10-11]的概念,有助于提升网格这种复杂系统的资源管理能力。

为此,试图把网格资源分配和进化博弈结合起来进行研究,利用进化博弈理论来解决市场机制和传统纳什均衡在网格资源分配领域应用所面临的难题,通过建立基于进化博弈论的网格资源分配机制,在经济/市场模型的基础上探索网格资源分配竞争的策略选择问题。

2 网格资源管理系统模型

在网格系统中,资源共享是主要目的,资源是关键角色。因此,在网格资源分配过程中有三个主要的角色,分别是:资源提供者,负责提供共享的网格资源;资源使用者,提交资源请求并利用网格资源完成任务;信息服务,提供资源的中介服务,提供者和使用者通过信息服务完成资源交易。采用了基于投标的正比例资源共享模型(Bid-based Proportional Resource Sharing Model)研究网格资源分配问题,此模型中资源使用者通过出价的方式获得资源使用权,资源可由多个使用者共享。

若将网格资源使用者看作是利益主体,每个利益主体都具有自己的价值目标。在资源共享的过程中,存在使用者对同一

基金项目:大连民族学院博士启动基金(No.20086205)。
作者简介:李志洁(1978-),女,博士,讲师,主要研究领域为:网格计算、进化计算。
收稿日期:2008-03-28 **修回日期:**2008-06-20

资源的竞争，也存在使用者之间的相互关联，这种问题适于在博弈框架下解决。研究的问题是有限数量的网格使用者在竞争资源时的策略变化，也就是说，如果每个网格使用者都坚持自己的效用最大化，那么在反复博弈的过程中使用者的选择方案是学习调整的结果，因而，网格资源使用者的竞争是一个动态博弈系统。

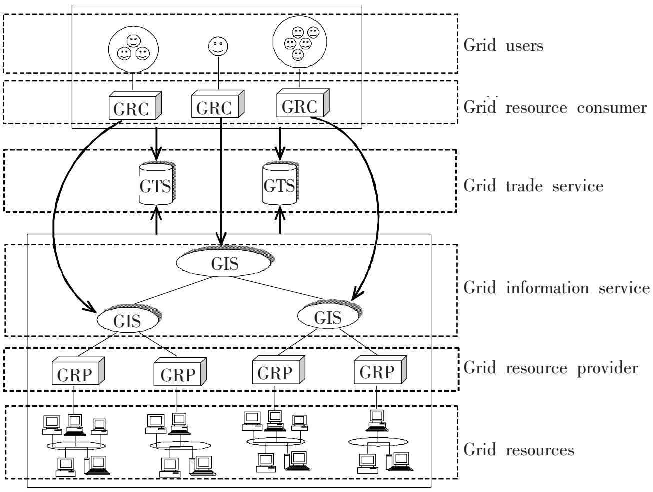


图 1　网格资源管理系统模型

3　网格资源分配问题

网格系统模型中有 N 个网格使用者竞争同一个有限的计算资源，而且使用者出价相对越高，使用的资源比例相对越多。每个使用者需向资源提交一个出价 $b_i\in\Re$，则 $b=[b_1,\cdots,b_N]$ 表示所有使用者的出价。假定资源分配遵循基于权重的比例共享原则，则分配给第 i 个使用者的资源份额 $w_i(b_i)\in[0,1]$ 和出价 b_i 满足关系：

$$w_i(b_i)=\frac{b_i}{\sum\limits_{j=1}^{N}b_j} \tag{1}$$

令 c_i 为第 i 个网格使用者为了完成类型 k 任务而选择的资源的能力，B 为网格资源从使用者集合 A 中接收总的出价，$B=\sum\limits_{j=1}^{N}b_i$。则第 i 个网格使用者分得的资源能力为：

$$r_i=c_iw_i(b_i)=c_i(b_i/B) \tag{2}$$

其中，每单位资源的价格是 B，即所有使用者的出价之和，而使用者获得的资源份额则同支付的费用成正比。另外每个网格使用者对于得到的分配 w_i 都有一个评估 $v_i(w_i)$，这个评估是资源份额函数的性能测量，且能被转换为一个等价值和费用相比较。若网格使用者的评估函数是连续可微的，则网格使用者的效用定义为评估值与支付费用之差：

$$U_i(b_i)=v_i(w_i(b_i))-b_i \tag{3}$$

为了简化研究问题，把网格系统中进行出价竞争的网格使用者群抽象为两个群体，在出价博弈过程中，假定每个网格使用者都面临两种出价策略选择，即 A 策略或 B 策略。网格使用者选择不同的出价策略所获得的效用水平由方程（3）计算，由此构造一个随机配对的博弈框架，可用表 1 所示的 2×2 矩阵来表示。

表 1 中出价 E/k 是 A 策略，出价 E 是 B 策略，其中，E 为使用者预算，k 为大于 1 的常数。在有限理性的制约下，网格使用者事先并不知道哪种策略最好，经过反复博弈，使用者会采用不同的策略。下面求解该博弈的进化稳定均衡。

表 1　使用者选择出价策略的效用矩阵

		网格使用者 1	
		A	B
网格使用者 2	A	$v\left(\frac{1}{2}\right)-\frac{E}{k},v\left(\frac{1}{2}\right)-\frac{E}{k}$	$v\left(\frac{k}{k+1}\right)-E,v\left(\frac{1}{k+1}\right)-\frac{E}{k}$
	B	$v\left(\frac{1}{k+1}\right)-\frac{E}{k},v\left(\frac{k}{k+1}\right)-E$	$v\left(\frac{1}{2}\right)-E,v\left(\frac{1}{2}\right)-E$

4　网格资源分配的进化博弈方法

4.1　复制动态方程

所采用的进化动态机制是单群体复制动态机制[12]。所谓复制动态是指，使用某种纯策略的人数所占比例的增长率，等于使用该策略时所得支付与群体平均支付之差。这是进化博弈的基本动态机制，能够比较准确地描述个体行动收益与群体系统演进的动态关系。而且与其他动态机制相比，复制动态简单明了，便于应用，能够比较准确地描述个体行动收益与群体系统演进的动态关系。复制动态方程（replicated dynamic equation）可表示为式（4）：

$$\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t}=x_i[f(s_i,x)-f(x,x)] \tag{4}$$

式中，x_i 表示在时刻 t 选择纯策略 s_i 的个体在群体中所占比例；$\mathrm{d}x_i/\mathrm{d}t$ 表示这一比例随着时间的变化；$f(s_i,x)$ 表示群体中选择纯策略 s_i 的个体所得的期望效用；$f(x,x)$ 表示群体平均期望效用，$f(x,x)=\sum\limits_i x_if(s_i,x)$。均衡点存在于使复制动态方程等于零的位置，因此，利用复制动态方程可得到进化博弈的进化稳定均衡（evolutionary stable strategy）。

4.2　进化稳定均衡

若网格使用者群体中采用 A 策略 E/k 的比例为 $x(0\leqslant x\leqslant 1)$，则采用 B 策略 E 的比例为 $1-x$。由进化博弈模型可算出选择两种策略网格使用者的期望效用和群体平均期望效用分别为：

$$f(\frac{E}{k},x)=x\cdot\left(v\left(\frac{1}{2}\right)-\frac{E}{k}\right)+(1-x)\cdot\left(v\left(\frac{k}{k+1}\right)-E\right) \tag{5}$$

$$f(E,1-x)=x\cdot\left(v\left(\frac{1}{k+1}\right)-\frac{E}{k}\right)+(1-x)\cdot\left(v\left(\frac{1}{2}\right)-E\right) \tag{6}$$

$$f(x,x)=x\cdot f(\frac{E}{k},x)+(1-x)\cdot f(E,1-x) \tag{7}$$

按照生物进化复制动态的思想，采用策略所得效用低于群体平均效用的博弈方会改变自己的策略，转向另一个策略，因此群体中采用不同策略成员的比例就会发生变化，特定策略比例的变化速度与其期望效用超过平均期望效用的幅度成正比。因此，在上述问题中采用 A 策略 E/k 的博弈方，其比例的变化速度可用复制动态机制表示为方程（8）：

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}&=x[f(\frac{E}{k},x)-f(x,x)]=\\&x[f(\frac{E}{k},x)-x\cdot f(\frac{E}{k},x)-(1-x)\cdot f(E,1-x)]=\\&x(1-x)[f(\frac{E}{k},x)-f(E,1-x)]=\\&x(1-x)\left[x\left(v\left(\frac{1}{2}\right)-v\left(\frac{1}{k+1}\right)\right)+(1-x)\left(v\left(\frac{k}{k+1}\right)-v\left(\frac{1}{2}\right)\right)\right]\end{aligned} \tag{8}$$

将复制动态方程（8）简记为 $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=F(x)$。令 $F(x)=0$ 就可解出复制动态方程的不动点，或者称为稳定点，即在复制动态过

程中采用策略 E/k 的博弈方比例 x 稳定不变的水平。上述复制动态最多可能有三个稳定点,分别是:

(1)$x^*=0$,意味着群体中的所有网格使用者都采用主导策略 E/k。

(2)$x^*=1$,意味着群体中的所有网格使用者都采用变异策略 E。

(3)$x^*=\dfrac{v(1/2)-v(k/(k+1))}{v(1/2)-v(k/(k+1))+v(1/2)-v(1/(k+1))}$,意味着网格使用者的出价博弈将有一个混合策略均衡。

前两个稳定点意味着群体成员趋向于采用相同的策略(A 或 B);后一个稳定点意味着群体成员以一定比例采用不同策略,对应混合策略均衡。此外,具有真正稳定性的稳定状态还必须对微小的扰动具有稳定性,也就是说,如果由于博弈方的错误等某种原因使得上述比例关系偏离了这些稳定点 x^* 时,复制动态仍然会使其回复到这些水平。即:

$$\begin{cases}F(x)>0, & 0<x<x^*\\ F(x)<0, & x^*<x<1\end{cases}$$

这要求 x 向低于 x^* 水平偏离时 $dx/dt=F(x)$ 大于 0,当 x 向高于 x^* 的水平偏离时 $dx/dt=F(x)$ 小于 0,也就是在稳定点处 $F(x)$ 的导数 $F'(x^*)<0$,或者说 $F(x)$ 与水平轴相交处的切线斜率为负。由复制动态函数求得其导数:

$$F'(x)=x(2-3x)\left(v\left(\frac{1}{2}\right)-v\left(\frac{1}{k+1}\right)\right)+$$
$$(1-x)(1-3x)\left(v\left(\frac{k}{k+1}\right)-v\left(\frac{1}{2}\right)\right) \tag{9}$$

再根据网格使用者的效用矩阵求解方程(9),满足 $F'(x^*)<0$ 的点即是该博弈的进化稳定点。由方程(9)可知,不同的评估函数产生不同的稳定点。图 2 给出了四种不同类型的评估函数特性图。

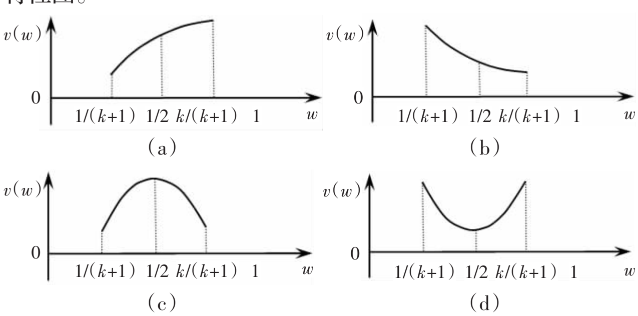


图 2 不同稳定点时网格群体博弈的复制动态相位图

如果 $v(1/2)-v(1/(k+1))>0$ 且 $v(k/(k+1)-v(1/2)>0$,如图 2(a)所示,那么 $x^*=1$ 是进化稳定点,所有网格使用者都选择 A 策略 E/k;如果 $v(1/2)-v(1/(k+1))<0$ 且 $v(k/(k+1)-v(1/2)<0$,如图 2(b)所示,那么 $x^*=0$ 是进化稳定点;如果 $v(1/2)<v(1/(k+1))$并且 $v(1/2)<v(k/(k+1))$,如图 2(c)所示,那么 $x^*=\dfrac{v(1/2)-v(k/(k+1))}{2v(1/2)-v(k/(k+1))-v(1/(k+1))}$ 是进化稳定点;如果 $v(1/2)>v(1/(k+1))$且 $v(1/2)>v(k/(k+1))$,如图 2(d)所示,那么此时有两个点 $x^*=0$ 和 $x^*=1$ 符合稳定点的条件。

图 3 总结了评估函数及其稳定点的对应关系。由上述分析可知,稳定点的位置取决于两个参数值,即 $v(1/2)-v(1/(k+1))$ 和 $v(k/(k+1)-v(1/2)$。图中箭头表示策略选择的最终走向,$A\leftarrow B$ 表示使用者最后选择 A 策略;$A\rightarrow B$ 表示使用者最后选择 B 策略;$A\rightarrow\leftarrow B$ 表示最后 A 策略和 B 策略共存;$A\leftarrow\rightarrow B$ 表示使用者最后选择 A 策略或者 B 策略。

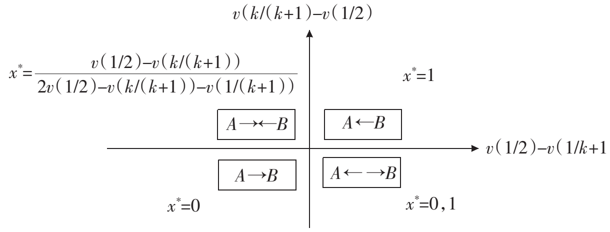


图 3 不同类型的评估函数及稳定点

5 模拟实验

5.1 评估函数

网格使用者有两种策略可供选择,即 A 策略出价 E/k 和 B 策略出价 E。令 $k=2$,$E=2$ G$(G$表示网格货币单位),则出价策略分别为 1 G$和 2 G$。按照正比例资源共享的原则,若网格使用者都选择 A 策略(B 策略)时,博弈双方所获得的资源份额均为 1/2;若选择 A 策略的使用者遇到选择 B 策略的使用者时,所获得的资源份额为 1/3;若选择 B 策略的使用者遇到选择 A 策略的使用者时,所获得的资源份额为 2/3。

根据图 3 可知,评估函数和稳定点有对应关系,即稳定点的位置取决于两个参数值,$v(1/2)-v(1/(k+1))$和 $v(k/(k+1)-v(1/2)$。为了分析不同的稳定点,定义了四种类型的评估函数,如表 2 所示。

表 2 评估函数及参数定义

k 常数	E 预算	v_a 评估函数	v_b 评估函数	v_c 评估函数	v_d 评估函数
2	2 G$	$8\ln(1+w)$	$3/2w$	$3+50(w-1/2)^2$	$3-30(w-1/2)^2$

图 4 给出了表 2 中四种评估函数的特性曲线。评估函数 v_a 使得使用者的评估与获得的资源份额成正比;相反,评估函数 v_b 使得使用者的评估与获得的资源份额成反比;评估函数 v_c 和 v_d 都属于二次函数,所以在极值点的两边,评估的变化方向相反。在方程(3)中,使用者效用定义为评估与出价之差,因此,四种评估函数产生了四种效用矩阵,对应的复制动态图如图 5 所

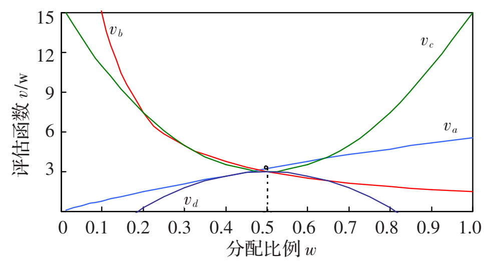
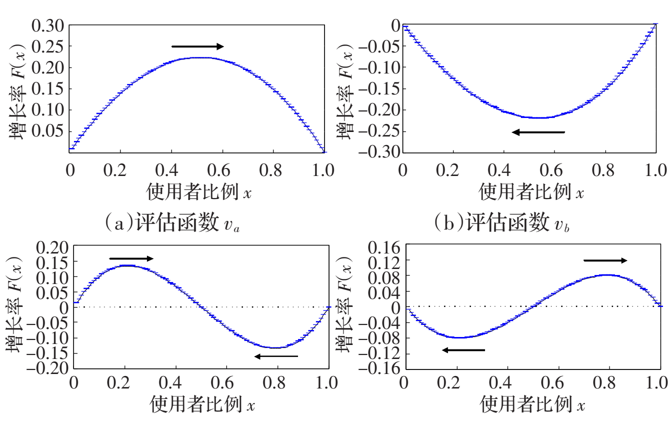


图 4 评估函数特性图



(a)评估函数 v_a (b)评估函数 v_b

(c)评估函数 v_c (d)评估函数 v_d

图 5 四种评估函数的复制动态图

示。在不同的评估函数下，图中的 $F(x)$ 表示选择策略 A 的使用者占群体比例的增长率。

5.2 参数设置

模拟实验平台采用 GridSim[13]。GridSim 是一个基于 Java 的事件驱动的网格仿真工具包。模拟了 20 个竞争资源的网格使用者，每个使用者平均包含 4 项任务，每项任务具有不同的任务长度和输入文件大小，任务的长度（单位：MI）均匀分布在[2 000，3 000]；输入文件和输出文件的长度（单位：MI）均匀分布在[100，250]。网格使用者的预算在 4.1 节给出，使用者预算（单位：G$）均匀分布在[0.5，2]，费用支出不能超出预算，否则使用者退出博弈。使用者和资源之间的网络通信速度（单位：Mb/s）均匀分布在[50，100]，网络延迟（单位：s）均匀分布在[0.001，0.1]，时间序列设置为 30 s。网格资源能力（单位：MI/s）均匀分布在[7 540，41 400]。背景负载（单位：G$）均匀分布在[1，5]。网格资源每隔 40 s 计算一次分配。对于工作着的网格系统来说，资源随时都有可能收到使用者的请求。而且当一些作业执行完成时，资源会有部分空闲能力。因此，最常见的情况是：每当资源有空闲能力时，就为等待队列中的任务分配资源。若因为网络延迟，资源在计算分配时没有接收到使用者请求，即便该请求已经发出也忽略不计。

5.3 结果比较

表 3 较了网格资源分配的进化算法在不同评估函数和初始策略选择条件下的收敛时间。使用者的评估函数 v 和初始比例 x 是影响分配结果的两个重要因素。评估函数是网格使用者对分得资源份额的一个度量，不同的评估函数会产生不同的进化稳定点，而且一个评估函数对应一个效用矩阵。为了研究不同的进化稳定点，选取了四种典型的评估函数。初始比例 x 是算法开始时，选择 A 策略的使用者在群体中的比例。

表 3　采用四种评估函数的算法收敛时间比较

初始比例	v_a $8\ln(1+w)$	v_b $3/2w$	v_c $3+50(w-1/2)^2$	v_d $3-30(w-1/2)^2$
0.1	12.3	3.8	10.4	5.2
0.2	9.1	5.3	9.1	7.0
0.3	6.7	6.2	8.6	7.6
0.4	7.0	6.9	7.2	10.1
0.5	5.2	6.8	0.1	0.1
0.6	5.2	8.1	8.3	10.1
0.7	3.8	8.9	9.7	8.7
0.8	3.7	8.9	10.1	8.1
0.9	2.9	10.1	10.1	7.2

从表 3 可以看出，当使用者采用评估函数 v_c 和 v_d 时，收敛时间并不完全呈现理论分析给出的完全对称分布，这主要是由网络延迟和使用者本身等因素所导致的。与此类似，当使用者采用评估函数 v_a 和 v_b 时，收敛时间也没有随着初始比例的变化而均匀分布。但是，从实验结果可以判断我们的进化算法是收敛的，而且评估函数 v 和初始比例 x 是两个重要角色。其中，评估函数可产生特定的效用矩阵和增长率 $F(x)$；初始比例 x 在已知评估函数时可决定收敛时间的长短。

最后，比较了进化博弈方法与传统博弈方法的总体效用。传统方法假定网格使用者是完全理性的，与评估函数没有直接关系，根据方程(5)和方程(6)，传统博弈的均衡点是固定的，为方程 $f(E/k,x)=f(E,1-x)$ 的解。因为进化博弈方法是耗时的，所以选取使用者的总体效用作为衡量两种算法的标准。影响总体效用的因素有使用者数量、预算、评估和策略。根据表 4 结果可知，进化方法在总体效用上优于传统方法，因此，在网格资源分配的优化问题上，进化博弈方法是一种可行、有效的方案。

表 4　使用者数量 N=20 时的算法总体效用比较

	v_a $8\ln(1+w)$	v_b $3/2w$	v_c $3+50(w-1/2)^2$	v_d $3-30(w-1/2)^2$
进化方法	44.8	20	43.9	19.9，21.7，39.9
传统方法	31.4	−30	43.9	21.7

6 结论

进化博弈理论可对群体行为的动态调整过程进行更为全面的分析，网格资源分配系统具备了进化博弈所必须的系统要素。因此，提出了一种利用进化博弈的动态机制研究网格资源分配的新方法，建立基于进化博弈论的网格资源分配机制，令参与网格资源竞争的使用者按照生物进化的方式反复进行博弈，在长期的博弈行为中出现稳定的结果，形成各得其所的策略均衡。首先，将使用者视为有限理性的博弈群，建立了使用者出价博弈的复制动态模型；然后，利用复制动态方程求解使用者策略选择比例的进化稳定点，并讨论了四种典型的评估函数对进化稳定点的影响；最后，利用网格模拟器进行了实验评估，结果表明提出的进化算法是收敛的。其中，使用者的评估函数和初始策略选择比例分别是影响算法收敛位置和收敛位置时间的重要因素；而且，在网格使用者的总体效用方面，进化算法要优于传统算法，从而有效地实现了网格资源的优化分配。

参考文献：

[1] Foster I，Kesselman C，Tuecke S.The anatomy of the grid：enabling scalable virtual organizations[J].International Journal of High Performance Computing Applications，2001，15(3)：200-222.

[2] Li M L，Wu M Y，Li Y，et al.ShanghaiGrid：An information service grid[J].Concurrency and Computation：Practice & Experience，2006，18(1)：111-135.

[3] Yang G H，Jin H，Li M L，et al.Grid computing in China[J].Journal of Grid Computing，2004，2(2)：193-206.

[4] Krauter K，Buyya R，Maheswaran M.A taxonomy and survey of grid resource management system for distributed computing[J].Software：Practice and Experience，2002，32(2)：135-164.

[5] Buyya R，Abramson D，Giddy J，et al.Economic models for resource management and scheduling in grid computing[J].Concurrency and Computation：Practice and Experience，2002，14(13/15)：1507-1542.

[6] 张维迎.信息经济学与博弈论[M].上海：上海人民出版社，2004.

[7] Roy S.Game theory：An overview[J].The ICFAI Journal of Managerial Economics，2005，3(4)：46-53.

[8] 乔根·W·威布尔.演化博弈论[M].上海：上海人民出版社，2007.

[9] Nash J F.Non-Cooperative games[J].Annals of Mathematics，1951，54(2)：286-295.

[10] Wild G，Taylor P D.Fitness and evolutionary stability in game theoretic models of finite populations[C]//Proceedings of the Royal Society B：Biological Sciences，2004：2345-2349.

[11] Antal T，Scheuring I.Fixation of strategies for an evolutionary game in finite populations[J].Bulletin of Mathematical Biology，2006，68(8)：1923-1944.

[12] Taylor C.Evolutionary game dynamics in finite populations[J].Bulletin of Mathematical Biology，2004，66(6)：1621-1644.

[13] Buyya R，Murshed M.GridSim：a toolkit for modeling and simulation of grid resource management and scheduling[J].Journal of Concurrency and Computation：Practice and Experience，2002，14(13/15)：1175-1220.