第33卷 第24期 计 算 机 工 程 2007年12月
Vol.33 No.24 Computer Engineering December 2007
·博士论文· 文章编号：1000—3428(2007)24—0001—03 文献标识码：A 中图分类号：TP393

一种基于效用函数的网格资源分配策略

李志洁[1,2]，程春田[1]，李慧贤[3]，黄飞雪[4]

(1. 大连理工大学水电与水信息研究所，大连 116024；2. 大连理工大学计算机科学与工程系，大连 116024；
3. 西北工业大学计算机学院，西安 710072；4. 大连理工大学经济系，大连 116024)

摘　要：针对网格资源分配中用户需求的异构性问题，提出了一种基于效用函数优化的分配策略。该策略综合考虑用户作业执行费用和执行时间两方面的因素，利用拉格朗日方法解决网格用户效用函数的优化问题，通过二分搜索最优解产生一组优化的用户出价，根据该组出价按比例划分资源的计算能力。该分配策略可对网格资源的价格以及资源的占用时间进行优化，对动态、异构的网格环境具有较好的适应性。

关键词：网格；资源分配；效用函数；柯布-道格拉斯

Strategy for Resource Allocation in Grid Environment Based on Utility Function

LI Zhi-jie[1,2], CHENG Chun-tian[1], LI Hui-xian[3], HUANG Fei-xue[4]

(1. Institute of Hydropower System & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian 116024; 2. Department of Computer Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024; 3. Department of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 4. Department of Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

【Abstract】To solve the problem of heterogeneity of user requirements in grid resource allocation, an allocation strategy based on utility function optimization is proposed. The strategy synthetically considers two factors: execution cost and execution time of user job. The Lagrangian method is used to solve the optimal problem of user utility function. To allocate resource capacity efficiently, the allocation strategy uses a bisection search to generate a set of optimal user bids. The results show that the proposed strategy can optimize the grid resource price and grid resource processing time. The conclusion indicates that the strategy can satisfy the heterogeneity and dynamic nature of gird environment.

【Key words】grid; resource allocation; utility function; Cobb-Douglas

网格计算(grid computing)[1-2]作为一个重要的新兴领域主要侧重于大规模资源共享、革新的应用以及高性能计算。由于网格环境下的计算资源广域分布、异构、动态，跨越多个管理域，资源的分配和调度[3-5]十分复杂，因此至今没有一种管理模式能够处理所有的网格应用需求。而当用户需求涉及时间、费用等因素时，市场机制就非常适于解决网格资源分配问题[6-9]。市场机制通过价格浮动反映资源供需状况的动态变化，通过供需均衡实现优化分配。本文运用效用函数对网格资源进行合理分配和管理，综合考虑执行费用和执行时间两方面的因素，讨论了网格用户效用函数的两种可行的优化方案，即基于预算约束的效用优化和基于时限约束的效用优化，并使用拉格朗日(Lagrangian)方法解决网格用户效用函数的优化问题，可使网格用户在能估计资源节点拥塞度，并能完成其所有任务的前提下，产生一个合理的出价方案。

1　市场模型

基于投标的比例共享模型使资源可由多个用户出价共享，避免了单个用户长期独占资源。假设有 N 个网格用户参与竞争，用户的作业包含多个串行的任务，任务之间有数据依赖，且每个任务要访问不同类型的计算资源，作业的执行时间就是所有任务的执行时间之和。

网格资源有K种类型，每种类型都有几个资源提供者，另外每个用户在一种特定类型的资源上只能完成一个任务。网格用户的作业是一个集合 $\{q_k^i\}_{k=1}^K$，其中 q_k^i 是第i个网格用户的第k个类型任务的大小。令 c_k^i 为第i个网格用户为了完成类型k任务而选择的资源的能力。第i个网格用户分到的资源数量与整个资源的比例等于它的出价相对于所有用户出价的比例。

$$r_k^i = c_k^i(\frac{b_k^i}{B_k}) = c_k^i(\frac{b_k^i}{b_k^i + B_k^{-i}}) \tag{1}$$

其中，b_k^i 是第 i 个网格用户为使用类型 k 资源每秒的出价，网格资源从用户集合 A_k 中接收总的用户出价 B_k，并且 $B_k^{-i} = \sum_{j \in A_k, j \neq i} b_k^j$。本文假定网格用户具有各种资源价格状态的完美信息，即 B_k^{-i} 已知。既然 b_k^i 不依赖于 B_k^{-i}，($B_k^{-i} + b_k^i$)可以替代 B_k，那么，第 i 个网格用户为完成 k 类型任务所需的时间为

$$t_k^i = \frac{q_k^i}{r_k^i} = \frac{q_k^i(b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i b_k^i} \tag{2}$$

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50479055)
作者简介：李志洁(1978－)，女，博士研究生，主研方向：网格计算；程春田，教授、博士生导师；李慧贤，博士后；黄飞雪，副教授、博士研究生
收稿日期：2006-12-25 **E-mail：**dagonglizhijie@yahoo.com.cn

而费用是

$$e_k^i = t_k^i \cdot b_k^i = \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i} \tag{3}$$

2 资源分配的效用优化

2.1 效用函数

效用(utility)代表接受某种服务或占用资源所获得的用户满意度。网格资源的分配方法应当可以根据特定用户的需求及应用特性来选择适合的计算资源执行任务。为此引入效用函数，用来刻画用户需求的异构性，反映网格用户的偏好和目标。

经济学中的柯布-道格拉斯(Cobb-Douglas)效用函数因为能够较好地反映各模型变量之间的权衡而经常被应用于表述个人效用。本文亦选取柯布-道格拉斯作为用户的效用函数，对于任意两个商品 S 和 R，该效用函数表示为

$$U(S,R) = (S)^{\theta}(R)^{1-\theta} \tag{4}$$

其中，θ是[0, 1]区间的实数，描述用户对商品 S 相对于商品 R 的偏好程度；S 和 R 分别为消费的两种商品数量。用此函数描述用户需求可以消除边际效用。通常来说， 效用函数通常是单调的，但是网格用户的目的是最小化作业的执行时间和费用。为此，引入柯布-道格拉斯形式的负效用，则同式(4)等价的效用函数为

$$U_i = -\theta \ln(S) - (1-\theta)\ln(R) \tag{5}$$

效用函数(5)的含义为：网格用户花费了 R 个网格货币在 S 秒内完成了作业。用 $\sum_{k=1}^{K} t_k^i$ 和 $\sum_{k=1}^{K} e_k^i$ 替换 S 和 R：

$$U_i = -\theta \ln\left(\sum_{k=1}^{K} t_k^i\right) - (1-\theta)\ln\left(\sum_{k=1}^{K} e_k^i\right) \tag{6}$$

接下来的问题是，是否有一组用户出价 $\{b^1, b^2, \cdots, b^N\}$，能够优化所有用户的效用函数，以使整体的满意度最大?下面将详细讨论这个问题。

2.2 预算约束的效用优化

第 1 种情况下，网格用户的目标是通过选择不同的出价 b_k使得其效用函数最小化，即希望在一定的预算限制下尽快完成作业。U_i的最小化策略是使用户在能估计资源节点拥塞度，并能完成它的所有任务的情况下，产生一个合理的费用预算。U_i最小化公式可表示为

$$(P_1) = \begin{cases} \max & U_i \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^{K} e_k^i \le E_i \end{cases} \tag{7}$$

约束条件为第i个网格用户执行所有K个任务所化的费用不能超出用户的预算E_i。用式(2)和式(3)替换U_i中的 $\sum_{k=1}^{K} t_k^i$ 和 $\sum_{k=1}^{K} e_k^i$，

$$U_i = -\theta \ln\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i b_k^i}\right) - (1-\theta)\ln\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i}\right) \tag{8}$$

对U_i取b_k的偏微分

$$U_i' = \frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}b_k^i} = \frac{\theta}{\sum_{k=1}^{K} t_k^i}\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i B_k^{-i}}{c_k^i b_k^{i2}}\right) - \frac{1-\theta}{\sum_{k=1}^{K} e_k^i}\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i}{c_k^i}\right) \tag{9}$$

再对U_i取b_k的二次偏微分

$$U_i'' = \frac{\mathrm{d}^2 U_i'}{\mathrm{d}b_k^{i2}} = -\frac{\theta}{\sum_{k=1}^{K} t_k^i}\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i B_k^{-i}}{c_k^i b_k^{i3}}\right) \tag{10}$$

由于 $b_k^i > 0$，因此 U_i'' 为负。U_i的极值点就是使用户效用最大化的唯一值。既然网格用户的效用U_i是出价b_k的凸函数，则可用拉格朗日方法解此凸函数的优化问题。用户效用的拉格朗日函数定义为

$$L_i = -\theta \ln\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i b_k^i}\right) - (1-\theta)\ln\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i}\right) - \lambda\left(\sum_{k=1}^{K} e_k^i - E_i\right) \tag{11}$$

其中，λ是拉格朗日乘子，用式(3)替换式(11)中的 e_k^i。先对式(11)的两边取 b_k^i 的偏微分并令其等于 0，得

$$\left(\lambda + \frac{1-\theta}{\sum_{k=1}^{K} e_k^i}\right) \cdot \frac{\sum_{k=1}^{K} t_k^i}{\theta} = \left(\frac{B_k^{-i}}{b_k^{i2}}\right) \tag{12}$$

对一个用户而言，$\sum_{k=1}^{K} t_k^i$ 和 $\sum_{k=1}^{K} e_k^i$ 是确定的。因此，得到了用户对任意两个任务的出价 b_j^i 和 b_k^i 之间的关系：

$$b_k^i = b_j^i \sqrt{\frac{B_k^{-i}}{B_j^{-i}}} \tag{13}$$

再对式(11)的两边取λ的偏微分并令其等于 0，得

$$\frac{\partial L_i}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i} - E_i = 0 \tag{14}$$

合并式(13)和式(14)，得

$$\frac{q_1^i}{c_1^i}(b_1^i + B_1^{-i}) + \sum_{k \ne 1} \frac{q_k^i}{c_k^i}\sqrt{\frac{B_k^{-i}}{B_1^{-i}}}\, b_1^i + \sum_{k \ne 1} \frac{q_k^i}{c_k^i} B_k^{-i} - E_i = 0 \tag{15}$$

引入如下变量：

$$\alpha_1^i = E_i - \sum_{k \ne 1} \frac{q_k^i}{c_k^i} B_k^{-i},\ \beta_1^i = \frac{q_1^i}{c_1^i},\ \gamma_1^i = \sum_{k \ne 1} \frac{q_k^i}{c_k^i}\sqrt{B_k^{-i}} \tag{16}$$

得 b_1^i，即预算约束的效用优化时，第 i 个网格用户的第 1 个任务的最优出价为

$$b_1^i = \frac{(\alpha_1^i - \beta_1^i B_1)^2}{2\gamma_1^{i2}}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4 B_1 \gamma_1^{i2}}{(\alpha_1^i - \beta_1^i B_1)^2}}\right) \tag{17}$$

其中，$B_1 \in (0, \frac{\alpha_1^i}{\beta_1^i})$，若超出此区间则 $b_1^i = 0$。从式(16)很容易得出针对类型 k 任务的出价 b_k^i。

2.3 时间约束的效用优化

另一种情况，网格用户的目标是希望在一定的时限T_i限制下尽可能便宜地完成作业。U_i最小化公式可表示为

$$(P_2) = \begin{cases} \max & U_i \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^{K} t_k^i \le T_i \end{cases} \tag{18}$$

由式(9)和式(10)可知，用户的效用是出价b_k的凸函数。因此，仍采用拉格朗日方法解。建立拉格朗日函数

$$L_i = -\theta \ln\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i b_k^i}\right) - (1-\theta)\ln\left(\sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i (b_k^i + B_k^{-i})}{c_k^i}\right) - \lambda\left(\sum_{k=1}^{K} t_k^i - T_i\right) \tag{19}$$

先对式(18)的两边取 b_k^i 的偏微分并令其等于 0，得式(13)，再对式(18)的两边取λ的偏微分并令其等于 0，得

$$\frac{\partial L_i}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{q_k^i}{c_k^i} + \frac{q_k^i B_k^{-i}}{c_k^i b_k^i}\right) - T_i = 0 \tag{20}$$

合并式(13)和式(20)，得

$$\frac{q_1^i B_1^{-i}}{c_1^i b_1^i} + \sum_{k \ne 1}\left(\frac{q_k^i \sqrt{B_k^{-i}}}{c_k^i}\right)\frac{\sqrt{B_k^{-i}}}{b_1^i} = T_i - \sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i}{c_k^i} \tag{21}$$

引入变量

$$\delta_1^i = T_i - \sum_{k=1}^{K} \frac{q_k^i}{c_k^i},\ \beta_1^i = \frac{q_1^i}{c_1^i},\ \gamma_1^i = \sum_{k \ne 1} \frac{q_k^i}{c_k^i}\sqrt{B_k^{-i}}$$

得 b_1^i，即时限约束的效用优化时，第 i 个网格用户的第 1 个任务的最优出价：

$$b_1^i = \frac{\beta_1^i B_1}{\delta_1^i + \beta_1^i} + \frac{-\gamma_1^i + \sqrt{(\gamma_1^i)^4 + 4(\gamma_1^i)^2(\delta_1^i + \beta_1^i)\delta_1^i B_1}}{2(\delta_1^i + \beta_1^i)^2} \tag{22}$$

3 资源分配的算法设计

这部分描述如何实现基于效用函数的资源分配策略。一个简单的网格模型主要有网格资源、网格用户和网格信息服务 3 类实体。网格资源是资源的提供者；网格用户是资源的消费者；网格信息服务负责资源的注册与查询，具有中介功能。搜索资源分配的最优解，主要有 2 个步骤：(1)网格用户

向所需的网格资源提交出价函数，即式(22)；(2)网格资源根据所有用户的出价生成资源价格，即通过二分搜索方程 $B_k = \sum_{i=1}^{N} b_k^i(B_k)$ 找到均衡点，并向用户反馈最优出价和资源价格。假设一个网格用户有两个类型的任务分别对应资源 1 和资源 2，则网格用户、网格资源和网格信息服务之间的交互关系如图 1 所示。

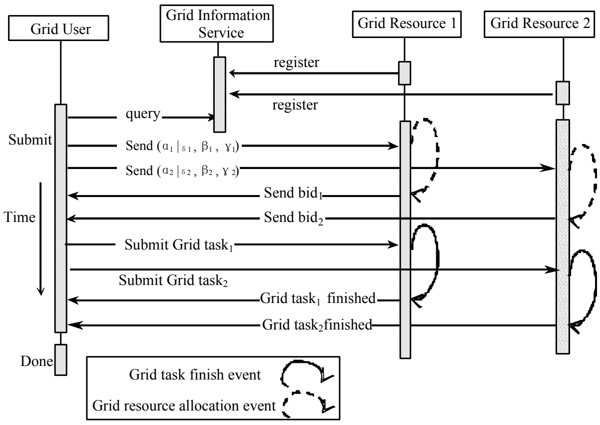

图 1　网格用户/网格资源与网格信息服务之间的交互关系

4　实验结果

为了评估所提出的基于效用函数的资源分配策略的性能，本文设计了一个适于网格环境的应用层实验方案。主要考察了基于效用函数的资源分配策略中，不同的用户数量对资源占用时间和资源价格的影响，以及预算约束与时限约束的方法比较。实验中所考虑的效用函数与两个因素有关：作业的预算和时限。第 1 类效用函数优化 P_1 只考虑尽快执行任务；第 2 类效用函数 P_2 只考虑执行作业的费用。模拟了 5 个不同的网格资源，每个资源具有不同的处理能力、操作系统、时区等特性。用户和资源之间的网络通信速度以数据传输带宽率定义为 100 Mb/s。然后创建 50 个竞争资源的网格用户，每个用户包含 3~5 个串行任务，任务长度至少是 2 000 MI (Million Instructions)。图 2 和图 3 分别考察了竞争用户数量为 2, 15, 30 和 50 时的资源占用时间和资源价格的变化。每个实验运行 6 次，每次的背景负载(background loads)各不相同，实验结果取平均值，图中的误差线为标准方差。

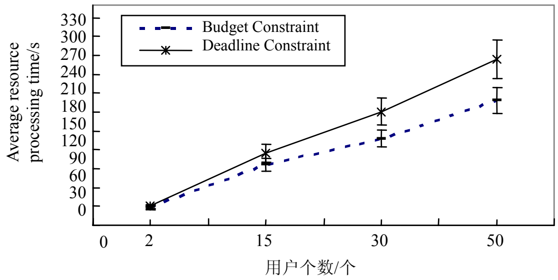

图 2　预算约束策略与时限约束策略的平均资源占用时间比较

从图 2 中可以看出，不同的竞争用户数量对资源占用时间有明显的影响，而且预算约束策略的资源占用时间低于时限约束策略。当用户较少时，资源能力足够用户在预算和时限内完成作业，因此预算约束策略与时限约束策略的资源占用时间大致相当。随着用户数量的升高，时限约束策略的资源占用时间迅速上升，比预算约束策略高出约 16.5%。当用户很多时，时限约束策略要花费较多的时间处理任务。

图 3 显示了不同的用户数量对资源价格的影响。用户越多，资源价格越高。在相同的用户数量下，时限约束策略的资源价格低于预算约束策略。且随着用户数量的增加，它们之间的差距越来越大。当只有 2 个用户时，预算约束策略与时限约束策略的资源价格基本一样。当用户数量增至 15 个时，时限约束策略的资源价格比预算约束策略降低了 36.5%。而当用户数量升至 30 时，时限约束策略的资源价格比预算约束策略降低了 42.6%。

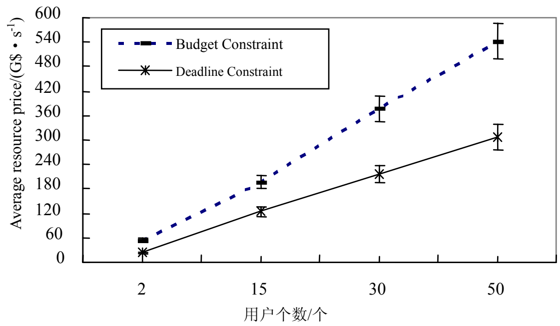

图 3　预算约束策略与时限约束策略的平均资源价格比较

5　结束语

资源分配是网格计算领域的一个重要的研究课题，本文提出了一种基于效用函数的网格资源分配策略。综合考虑作业执行费用和执行时间两方面的因素，讨论了网格用户效用函数的两种可行的优化方案，即基于预算约束的效用优化和基于时限约束的效用优化。首先运用拉格朗日方法解决网格用户效用函数的优化问题；然后通过寻找该优化问题的最优解产生一组优化的用户出价，并根据这组出价按比例分配资源的计算能力。研究结果表明，该策略可使网格用户在能估计资源节点拥塞度，并能在完成其所有任务的情况下，产生一个合理的费用支出方案。

参考文献

[1] Fox F, Gannon D. Computational Grids[J]. IEEE Computational Science and Engineering, 2001, 3(4): 74-77.

[2] Foster I. The Grid: Computing Without Bonds[J]. Science American, 2003, 288(4): 78-85.

[3] Czajkowski K, Foster I, Karonis N, et al. Resource Management Architecture for Metacomputing Systems[C]//Proc. of the 4th Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. [S. l.]: Springer-Verlag, 1998: 62-82.

[4] Krauter K, Buyya R, Maheswaran M. A Taxonomy and Survey of Grid Resource Management System[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.

[6] Wolski R, Plank J S, Brevik J, et al. Analyzing Market-based Resource Allocation Strategies for the Computational Grid[J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2001, 15(3).

[7] 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.

[8] Bredin J, Kotz D, Rus D, et al. Computational Markets to Regulate Mobile-agent Systems[J]. Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2003, 6(3): 235-263.

[9] Maheswaran R T, Başar T. Nash Equilibrium and Decentralized Negotiation in Auctioning Divisible Resources[J]. Group Decision and Negotiation, 2003, 12(5): 361-395.