

基于超边际分析的分布式资源分配模型

刘君^{1,2} 王恩泽² 乔建忠^{1,2} 林树宽²

(辽宁省软件系统与发展技术重点实验室 沈阳 110001)¹ (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)²

摘要 对以充分利用空闲资源为目的的分布式计算环境来说,可用节点具有波动性,网络环境具有不确定性,从而影响计算效率。提出一种基于超边际分析的分布式计算资源分配方法,该方法把计算任务分配到具有比较优势的节点,选择执行能力更强的节点进行计算,提高了分布式计算环境中资源分配的效率。仿真结果表明此方法合理、有效,适用于分布式计算环境。

关键词 超边际分析,分布式计算,资源分配

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Inframarginal Analysis Based Resource Allocation Method in Distributed Computing

LIU Jun^{1,2} WANG En-ze² QIAO Jian-zhong^{1,2} LIN Shu-kuan²

(Key Laboratory of Software System Application and Development Generic Technology, Shenyang 110001, China)¹

(Department of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)²

Abstract The key of distributed computing is to fully utilize computing resources. However, the efficiency of distributed computing can always be affected by volatility of available nodes and uncertainty of network environment. In order to enhance resource allocation efficiency in distributed computing, this paper presented an inframarginal analysis based resource allocation method, which distributes computing task to the node with more comparative advantage carrying on the task. Simulation results proved that it is effective on resource allocation in the distributed computing environment.

Keywords Inframarginal analysis, Distributed computing, Resources allocation

1 引言

分布式系统是一个硬件或软件组件分布在网络计算机上,通过消息传递进行通信和动作协调的系统^[1]。分布式系统具有包括并发性、缺乏全局时钟和故障独立性等性质,因此它在资源分配上有别于传统系统。

目前分布式系统环境下资源分配分两种情况:(1)通过工程控制的方法主动分配系统资源;(2)通过竞争市场的方式使其中的资源利用最大化,从而实现资源的有效分配。

传统的工程控制方法将资源进行等级划分,然后通过某种分配算法将划分好的资源分配到各个使用资源的任务上去。这种方式一般是静态的,即资源的数量不发生改变,而且运算集中,不适应现代计算机的负载均衡、高容错性等要求。

通过市场竞争进行资源分配,是近年来研究比较热的资源分配方法,其核心是在分布式系统环境中引入市场的概念,通过市场竞争,将资源分配给对其评价最高的任务,从而达到整个系统的效益最大化,实现资源的最优分配。基于市场经济学理论的资源调度方法适合解决分布式资源管理问题^[2],同时也可实现诸如基于 QoS、Pareto 最优^[3]、公平性等优化目标^[4]。

基于新兴古典经济学的资源分配方法既不同于目前广泛

研究的瓦尔拉斯均衡的资源定价模型^[5],也不同于基于纳什均衡的拍卖模型^[6]。这两种广泛研究的模型,其重点和研究核心都在于资源分配问题的本身,而本文所提出的方法不仅研究资源分配问题,也对资源的分配结构进行探讨,简化了资源分配的复杂性,也缩小了解空间,有效地限制了了解空间爆炸现象。

2 相关研究

Wolski^[7,8]首先在计算网格中建立了基于经济市场的资源分配机制,从计算经济学的角度研究了网格资源分配问题中商品市场模型和拍卖模型的资源分配效率。Sandholm^[9]给出计算、通讯以及保密问题都与经济激励机制密切相关的结论。Buyya 基于早期市场机制在分布式系统中的应用研究成果,在文献^[10]中深入探讨了网格环境中基于经济学的分布式资源管理和调度问题。林雯等人提出了一种最大化资源提供者效用的基于博弈的改进算法机制。程春田等人利用了多种经济原理对网格资源分配问题进行求解^[11]。陈晓梅等人则提出了基于微观经济学中市场机制解决网格资源调度问题的理念^[12]。另外还有利用拍卖模型解决资源分配相关问题^[13],以及基于微观经济学的相关理论解决资源分配问题。

与其它的基于市场的资源分配机制不同,基于超边际分

到稿日期:2010-03-16 返修日期:2010-06-22 本文受国家自然科学基金项目(60873009),辽宁省重点科技攻关项目(R200801036)资助。

刘君(1982-),女,博士生,主要研究方向为分布式计算、网格计算,E-mail:juneliuj@gmail.com;王恩泽(1984-),男,博士生,主要研究方向为志愿计算;乔建忠(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为软件体系结构、并行计算和操作系统技术。

析的分布式资源分配方法不仅研究资源的分配,也研究资源分配结构,简化了资源分配的复杂性,也缩小了解空间,有效地限制了解空间爆炸的现象。

3 分布式资源分配模型

新兴古典经济学是上世纪 80 年代发展起来的,通过建立统一的分析框架来包容新古典经济学中的资源分配问题和古典经济学中的分工理论。新兴古典经济学中使用的基本方法是超边际分析^[14],分布式计算环境下进行超边际分析的步骤如下:

- (1)排除不可能最优的角点解。
- (2)用超边际分析求解最优解。
- (3)比较步骤(2)求出 3 个局部最大值,其中最大的局部最大值即为整体最优解。

为了将超边际分析应用于分布式计算环境,本文做如下假设和定义:

假设 1(请求同一性假设) 每一个节点都能为任何请求提供服务。

假设 2(偏好一致性假设) 任意计算节点对于相同的请求偏好是相同的,用 β 表示, $\beta=(\beta_1, \dots, \beta_m)$ 表示节点对于服务的偏好向量, $\sum_{i=1}^m \beta_i=1$ 。

定义 1(交换效率) 简称交换效率,用 k 表示。引用新兴古典经济学中的名词,描述两个服务节点之间数据交换的效率,反映两节点之间数据交换的代价。在此假设两个节点可以像本地共享内存一样交换数据时,其交易效率为 1,两个节点处于完全孤立状态时,其交易效率为 0。

定义 2(服务能力) 描述一个节点对请求提供服务的能力,用 a 表示。通俗地讲,服务节点性能越好,其服务能力越高。

定义 3(效用函数) 描述了一个服务网中单个客户的效用,用来反映服务网中客户的效用水平,其定义为一个节点的效用与服务网中客户数量的比值,用 u 表示。

定义 4(效用函数指数) 描述了一种服务在效用函数中所占的份额,用 β 表示。

假定一个分布式系统 S 由二元组 (V, E) 定义, $V \subset N^+$ 为服务器节点空间, $E=\{(i, j) | i \in V, j \in V\}$ 为节点之间的边空间,其代表节点 i 与 j 相连,且 E_i 表示与节点 i 相连的节点集合。假定每个服务网中的客户有一个理性的、连续的、严格增加的偏好,这个偏好可以由一个定义在 R^m 上的连续的、严格增加的效用函数 u_i 来表示。

根据柯布-道格拉斯效用函数可知,节点 i 和节点 j 的效用可以表示为:

$$U_i=(x_i+k_{ij}x_j^d)^{\beta_1}(y_i+k_{ij}y_j^d)^{\beta_2} \quad (1)$$

$$U_j=(x_j+k_{ji}x_i^d)^{\beta_1}(y_j+k_{ji}y_i^d)^{\beta_2} \quad (2)$$

式中, x_i, y_i 表示在本节点上执行的请求, x_i^d, y_i^d 表示从其他节点交换而来的请求。分布式计算用于多节点多任务环境,针对多节点多任务的资源分配情况,效用函数采用柯布-道格拉斯形式,表达式变化如下:

$$U_i=(x_i+k_{i1}x_1^d)^{\beta_1}(y_i+k_{i2}y_2^d)^{\beta_2} \dots (z_i+k_{in}z_n^d)^{\beta_m} \quad (3)$$

对多节点多服务情况进行求解,可以得到以下通用表达式:

(1)自给自足模式效用函数

$$U_i=\prod_{x \in S}(a_{ix}\beta_x)^{\beta_x} \quad (4)$$

(2)半专业化模式效用函数

大规模节点:

$$U_i=(\beta_x a_{ix})^{\beta_x} \prod_{j \in P_1}(k_{ij}\beta_x a_{jy})^{\beta_y} \prod_{k \in P_2}(\beta_z a_{iz})^{\beta_z} \quad (5)$$

小规模节点:

$$U_i=(\beta_x a_{ix})^{\beta_x} \prod_{j \in P_1}\left(\frac{k_{ij}^2 \beta_x a_{ix} a_{jy}}{a_{jx}}\right)^{\beta_y} \prod_{k \in P_2}(k_{*k}\beta_x a_{kz})^{\beta_z} \quad (6)$$

(3)专业化模式效用函数

$$U_i=(\beta_x a_{ix})^{\beta_x} \prod_{y \in S, y \neq x}(k_{ij}\beta_x a_{jy})^{\beta_y} \quad (7)$$

通过以上建立的任意多个节点之间的多种请求的分配模型,将多种请求合理分配到多个节点上,遵循以下规则:

(1)由于两个节点中任意两种请求的比较优势各不相同,可以对此进行排序,即:

$$\frac{a_{ix}}{a_{jx}} \geq \dots \geq \frac{a_{iy}}{a_{jy}} \geq \frac{a_{ix}}{a_{jx}} \geq \dots \geq \frac{a_{iy}}{a_{jy}} \quad (8)$$

(2)两个节点之间的网络连接一旦确定,即两者之间的数据交换系数确定时,每种服务在两节点之间的分配结构与比较优势的大小有关。比较优势越大,分配结构越趋向于完全专业化分配。因此,可将比较优势最明显的一对请求首先在两节点之间进行分配。当这对请求处于自给自足结构时,也就意味着两节点之间的交换系数非常低,网络状况非常差,其它的请求对也必将是自给自足结构。在这种情况下,两个节点之间没有专业化服务,即每个节点孤立地处理本地节点发出的请求。

(3)当这对请求处于半专业化服务结构时,也意味着一个节点处于专业化结构,一个节点处于半专业化结构。假如此时节点 i 处于专业化服务结构,节点 j 处于半专业化结构,则可以选择比 a_{ix}/a_{jy} 小一级的服务,假设将 a_{ix}/a_{jx} 和 a_{iy}/a_{jy} 进行比较,来决定这两种服务的分配结构。以此类推,直到出现自给自足模式或者所有的请求对都分配完成为止。

(4)当这对请求处于专业化服务结构时,则可以取具有次比较优势的服务对进行分析,按照上面的步骤决定分配方案。经过这样的迭代进行,最终使得这两点之间都处于较专业化的服务状态,从而达到分配的近似最优解。

4 仿真实验与结果分析

在实际环境中,任意节点对于自身是否执行一些自身不具有优势的服务来保证在网络条件不好的情况下可以获得更大的效用,没有做太多考虑,结构上类似于专业化结构;另一方面现在的网络用户虽然可以做到从网络中获取信息,不过大部分服务均在本机上执行,结构上类似于自给自足结构。考虑到这两大现状,实验将用上面提出的直接分配法和节点比较法与专业化结构和自给自足结构进行比较。

这里我们假定每个节点对于不同服务的偏好相同,给出两组效用指数,第一组数据服从均匀分布 $f_1=U(0, m)$,其中 m 为服务种类,表示用户对于每种服务无特殊喜好;第二组数据服从随机分布。对于各节点间的交换系数,服从 $(0, 1)$ 之间的随机分布。各节点对于各服务的执行能力,给出两组数据,第一组根据式(9)进行取值:

$$f(i, j) = \begin{cases} 10 - (j - i) * 2, & i < j \\ 10, & i = j \\ (i - j) * 2, & i > j \end{cases} \quad (9)$$

第二组随机取出一个超级节点,令其对于每种服务的执行能力均大于其他节点,其他节点对于各服务的执行能力服从(0,10)之间的均匀分布。两组执行能力数据,第一组表示每个节点都有一个具有绝对优势的服务;第二组表示有一个节点执行能力超强,对于每种服务都具有绝对优势。下面进行仿真。

如图1所示,第一组执行能力,第一组效用指数的仿真结果,图中纵坐标表示效用值,横坐标表示交换系数按比例提高,图中将自给自足结构、专业化结构以及本文设计的3个算法放在同一环境下进行仿真。可以看到当交换系数提高到60%时,除自给自足曲线外,所有曲线都收敛于专业化曲线。

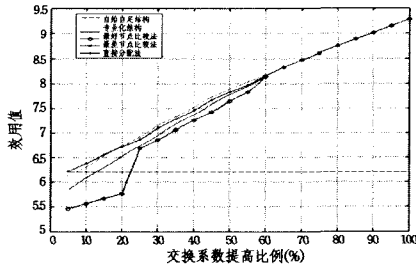


图1 数据均匀分布且绝对优势平均化的仿真结果

如图2所示,第一组执行能力,第二组效用指数的仿真结果。这里先做如下假设:

假设3(效用值) 20%处的交点部分称为过渡点;20%之后的部分称为专业化阶段;20%之前的部分称为自给自足阶段。

由假设3可以看出,处于专业化阶段时,最差节点比较法效用最高,最好节点比较法效用最低;处于自给自足阶段时,最好节点比较法效用最高,最差节点比较法效用最低;从整体来看,直接分配法的总效用最高。如图2所示,曲线基本处于专业化阶段,最差节点比较法效用最高。

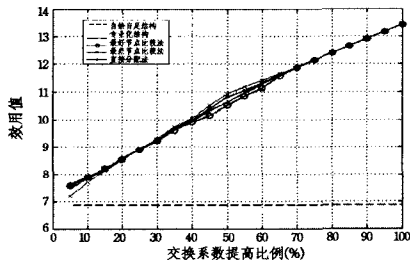


图2 数据均匀分布且具有超级节点的仿真结果

如图3所示,第二组执行能力,第一组效用指数的仿真结果。图中的曲线变化不像图1、图2那样平滑,主要是因为自给自足结构的效用有所提高,当交换系数提高到70%前,自给自足结构比专业化结构效用高。最好节点比较法受自给自足结构影响比较大,最差节点比较法受专业化影响比较大,因此图3中最差节点比较法曲线开始时效用不高,不过效用提高迅速,效用始终高于专业化结构;而最好节点比较法效用始终高于自给自足结构;直接分配法的效用综合来看仍然是最优的。

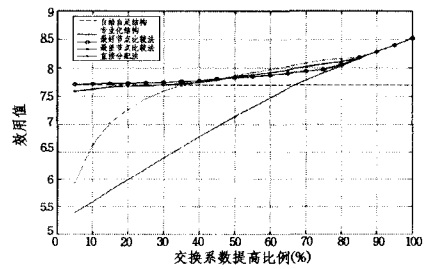


图3 数据随机分布且绝对优势平均化的仿真结果

如图4所示,第二组执行能力,第二组效用指数的仿真结果,仍然验证了前面提出的规律,这里不再过多讨论。

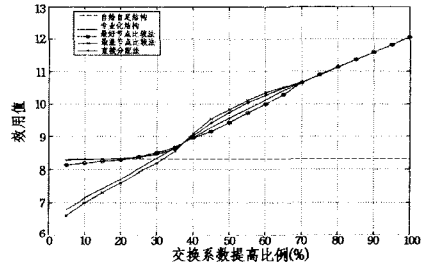


图4 数据随机分布且具有超级节点的仿真结果

结束语 本文提出的基于超边际分析的分布式资源分配模型,通过对新兴古典经济学原理的应用,对分布式环境下资源分配问题进行了超边际分析,得到了很好的效果。模型使整个系统的整体资源利用率达到最高。本文结论如下:

(1)专业化分工使得每个节点都在执行其具有比较优势的服务,从而提高了执行效率,使得总体执行能力提高,总效用也随之提高。

(2)节点之间的网络性能,即交换效率决定了节点的分配结构。当交换效率较低时,节点对请求的分配在自给自足的结构中达到均衡。随着交换效率的提高,节点逐渐过渡到专业化执行结构,并在这种结构中达到均衡。

(3)根据交换效率的高低不同,可以应用不同的分配方案,使模型整体效用达到最优,当交换效率变化时,应注意及时调整分配方案。

(4)根据节点较少的情况可以找到一些规律,即使在节点较多的模型中,这些规律也同样适用,便于分配方案的顺利施行。

参考文献

- [1] Peter Y, Denning J. Third Generation Computer Systems [J]. ACM Computing Surveys, 1971, 3(4): 175-216
- [2] Mckinney J M. A Survey of Analytical Time-Sharing Models [J]. ACM Computing Surveys, 1969, 1(2): 105-116
- [3] 陈军, 谢立, 孙钟秀. 分布式任务调度研究的新趋向[J]. 计算机研究与发展, 1990(4): 38-43
- [4] Stone H S. Multiprocessor Scheduling With the Aid of Network Flow Algorithms [J]. IEEE Trans. Software Eng., 1977, 3(1): 85-93
- [5] Cheng J Q, Wellman M P. The WALRAS algorithm: a convergent distributed implementation of general equilibrium outcomes [J]. Journal of Computational Economics, 1998, 12(1): 1-24

(下转第 113 页)

对于上面给出的例子,利用算法求得的最短路径是:
MinP={0,4,2,4,1,3,2,1,3,0}

最优代价是:MinCost=94。后面对 8 个测试实例分别用一般时变网络和 FIFO 网络的算法进行了计算,并且列出所有的测试结果。

4.2.2 测试结果

最后对一般时变网络和 FIFO 时变网络均进行了实验,具体的实验结果如表 1 和表 2 所列。

表 1 一般时变网络分支限界算法测试数据

编号	节点数	边数	时间 段数	边权 上限	边权 下限	计算 次数	最优 解	最小时 间(秒)	最大时 间(秒)	平均时 间(秒)
(1)	5	7	8	25	5	10	94	0.891	0.938	0.9141
(2)	5	7	12	25	5	10	77	0.765	0.813	0.7798
(3)	5	10	12	25	5	10	68	136.276	141.768	138.266
(4)	6	8	8	25	5	10	71	2.313	2.391	2.3504
(5)	6	10	12	25	5	10	111	297.041	308.052	303.031
(6)	7	10	6	25	5	10	111	208.125	219.775	211.797
(7)	10	10	3	25	15	10	253	3.547	3.672	3.6062
(8)	10	12	4	25	15	10	290	1188.26	1203.25	1190.22

表 2 FIFO 时变网络分支限界算法测试数据

编号	节点数	边数	时间 段数	边权 上限	边权 下限	计算 次数	最优 解	最小时 间(秒)	最大时 间(秒)	平均时 间(秒)
(1)	5	7	8	25	5	10	94	0.218	0.235	0.228
(2)	5	7	12	25	5	10	77	0.172	0.188	0.1782
(3)	5	10	12	25	5	10	68	18.219	18.875	18.4219
(4)	6	8	8	25	5	10	71	0.218	0.25	0.2377
(5)	6	10	12	25	5	10	111	130.937	132.235	131.391
(6)	7	10	6	25	5	10	111	69.011	73.216	70.36
(7)	10	10	3	25	15	10	253	2.328	2.484	2.389
(8)	10	12	4	25	15	10	290	255.15	262.126	259.125

实验测试结果表明:(1)对于同一实例,表 1 的平均计算时间要比表 2 长,表明 FIFO 网络分支限界算法性能优于一般时变网络。(2)在节点数固定的情况下,边数越多,所需时间越长。在边数固定情况下,节点数越多,所需时间越少。分析认为,计算时间与图中节点的平均度有关,节点平均度的增加(减少)会导致解空间树分支的增加(减少),计算时间也会随之增加(减少)。

结束语 时间依赖网络的中国邮路问题相比传统的邮路问题有更广泛的应用领域,更具有现实意义。时间依赖邮路问题的时间动态变化特性,使得传统的理论和算法不再适用。本文在分析时间依赖网络特性的基础上,提出了解决时间依赖网络邮路问题的分支限界最优化方法,同时针对 FIFO 网

络,设计了新的剪枝条件,得到了一个更有效的求解 FIFO 网络时变无向中国邮路问题的分支限界最优化方法。该算法可以应用到网络通信、实时系统测试以及智能交通系统等众多领域。同时对算法进行了实验,得到了正确的结果。

参考文献

- [1] 管梅谷. 奇偶图上作业法[J]. 数学学报, 1960, 10(3)
- [2] Eiselt H A, Gendreau M, Laporte G. Arc routing problems, part 1: The Chinese postman problem [J]. Operations Research, 1995, 43(2): 231-242
- [3] Orda A, Rom R. Shortest path and minimum-delay algorithms in networks with time-dependent edge-length[J]. Journal of ACM, 1990, 37(3): 607-625
- [4] 谭国真, 高文. 时间依赖的网络中最短路径算法[J]. 计算机学报, 2002, 25(2): 165-172
- [5] 谭国真, 柳亚玲, 高文. 随机时间依赖网络的 K 期望最短路径算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(3): 323-331
- [7] Chen W H, Lu C S, Chen L, et al. Synchronizable Protocol Test sequence Generation via the Duplex Technique[J]. IEEE INPRO-COM, 1990, 2: 561-563
- [8] 范洪达, 叶文. Time Petri 网在实时软件测试中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2003, 20(12): 23-25
- [9] 王用杰, 杨红雨, 王玲, 等. 实时软件测试管理的设计与实践[J]. 中国民航飞行学院学报, 2005, 16(1): 44-47
- [10] Chryssi M, Daskin Mark S. Time dependent vehicle routing problems: formulations, properties and heuristic algorithms[J]. Transportation Science, 1992, 26(3): 185-201
- [11] Ghiani G, Laporte G. A branch-and-cut algorithm for the Undirected Rural Postman Problem [J]. Mathematical. Programming, 2000, 87(3): 467-481
- [12] Liu S B, Ng K M, Ong H L. Branch-and-bound algorithms for simple assembly line balancing problem [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(1): 169-177
- [13] 黄婉珍, 唐国春. 分支定界法求解最小带权误工工件数排序[J]. 应用数学学报, 1992, 15(2): 194-199
- [14] Edmonds J. Paths, Trees and Flowers [J]. Canadian Journal of Mathematics, 1965, 17: 449-467
- [15] 谭国真, 李栋, 瞿晓高, 等. 时间依赖的混合型网络的分布式路由协议[J]. 通信学报, 2004, 25(10): 117-126

(上接第 105 页)

- [6] 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
- [7] Wolski R, Brevik J, Plank J, et al. Grid Resource Allocation and Control Using Computational Economies [M]. E Berman, G Fox, T Hey, eds. Grid Computing: Making the Global Infrastructure a Reality. Chichester: Wiley & Sons Ltd. 2003
- [8] Wolski R, Plank J S, Brevik J, et al. Analyzing market-based resource allocation strategies for the computational grid [J]. Int'l Journal of High Performance Computing Applications, 2001, 15(3): 258-281
- [9] Sandholm T. Making Markets and Democracy Work: A Story of Incentives and Computing [C] // Proceeding of the International

Joint Conference on Artificial Intelligence, 2003

- [10] Buyya, Abramson D, Giddy J. An Economy Driven Resource Management Architecture for Global Computational Power Grids [C] // The 2000 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications. Las Vegas, 2000
- [11] 李志洁. 基于经济原理的网格资源分配策略与算法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1-27
- [12] 陈晓梅, 卢锡城, 王怀民. 基于微观经济学方法的网络资源分配问题 [J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(11): 1345-1353
- [13] 翁楚良, 陆鑫达. 一种基于双向拍卖机制的计算网格资源分配方法 [J]. 计算机学报, 2006, 29(6): 1004-1009
- [14] 杨小凯, 等. 新兴古典经济学与超边际分析 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2003