

对等网副本散布问题纯策略纳什均衡研究^{*})

王文方 刘晓光 王刚 刘璟

(南开大学信息技术科学学院 天津 300071)

摘要 在对等网环境中为增强数据的可靠性与访问效率,需要将数据副本进行有效的散布。应用博弈论原理研究副本散布问题是一种有效的新方法。分析了当前使用博弈论方法研究所存在的问题,提出副本散布问题的基本博弈模型,首次证明了多对象且节点容量有限情况下纯策略纳什均衡的存在性,较以前的研究成果更具有实用价值,且是今后进一步研究的基础。

关键词 对等网,副本散布,纯策略纳什均衡

The Research of Pure Strategy Nash Equilibria on Replica Placement Problem in P2P Environment

WANG Wen-Fang LIU Xiao-Guang WANG Gang LIU Jing

(Collage of Information Technology Science, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract In Peer-to-Peer systems, the replica of data object can be used to improve the performance, availability, and reliability. There is much work on the replica placement problem. However, most of it optimize for overall system performance. In reality, nodes may want to maximize their own performance. Game-theoretic approach to analyze the replica placement problem is more suitable for these scenario. There is not much research in replica placement game. In this paper, we module the replica placement problem as a static non-cooperative game, and we prove the existence of pure strategy Nash equilibria in multiple objects capacitated game. It is more practicable than former work, and it will be the base for future work.

Keywords Peer-to-Peer system, Replica placement, Pure strategy nash equilibria

1 引言

在对等网环境中,各节点保存数据对象的多份副本可提高数据的可靠性与访问效率。但副本数量过多会导致存储资源的极大浪费,而数量过少则无法显著提高数据的可靠性与访问效率。因此如何将数据对象副本有效地散布到各节点是目前对等网研究所面临的主要问题之一。

人们已经对副本散布问题进行了许多研究,由于在对等网环境中,节点数量多,具有动态性且各自时钟无法完全同步,因此很难实现集中式算法,目前的算法大多是分布式的。Ko 和 Rubenstein 提出了一种用于副本散布的自稳定的、分布式、异步且可扩展的协议^[1],将每个节点用一种颜色来标示,并不断改变节点的颜色使具有相同颜色的节点间距离最大化,他们通过理论与实验分析了其协议的收敛性。Chen, Katz 和 Kubiawic 提出了一个满足客户端 Qos 和服务端容量限制条件下的动态副本散布算法^[2]。Douceur 和 Wattenhofer 在 Farsite 分布式文件系统上研究了为增强可靠性而交换副本的爬山算法^[3]。与上述这些方法不同, Dennis 和 Kubiawicz 认为大规模的副本管理问题更适合用基于经济模型的方法来解决^[4],这方面的研究目前尚处于起步阶段。Byung-Gon Chun 等通过使用非合作博弈的方法分析了副本散布问题^[5],并在其博弈模型下证明了纯策略纳什均衡的存在性,进而分析了纳什均衡局势的最优化程度,并通过模拟实

验研究了其属性,但在其博弈模型中他们假定节点容量无限大,而在实际情况中这个条件是根本无法达到,从而导致其缺乏实用性。

针对文[5]中存在的问题,本文首次证明了副本散布博弈模型在多对象且节点容量有限的情况下纯策略纳什均衡的存在性,是对文[5]研究的深化,使其更有实际价值,并且也为今后使用博弈论的方法进一步研究副本散布问题打下了基础。

2 副本散布问题的基本博弈模型

在对等网环境中节点副本复制决策受其它节点决策的影响,决策时需要考虑其它节点的决策。通过量化节点对各数据对象的访问代价,并以此作为节点的效用。受程序控制的节点以最大化自身效用为目标,前后一致理性地做出决策。

副本散布问题的非合作静态博弈模型用四元组 $(N, M, S, Cost)$ 表示。 N 为有限非空节点集 $|N|=n$, 对节点 $i \in N, V(i) \in R^+$ 表示节点 i 用于存储副本的共享存储空间容量。 M 为有限非空的数据对象集 $|M|=m$, 对 $j \in M, owner(j) \in N$ 表示负责存储数据对象 j 的节点,称为 j 的宿主节点, $VM(j) \in R^+$ 为数据对象大小。 S 为节点可选择的有限非空策略集,节点 i 的策略集为 $S_i \subseteq S$, 纯策略 $s \in S_i$ 为 m 维向量,第 j 维为 1 表示节点保存对象 j 的副本,为 0 表示不保存对象 j 的副本。 N 中所有节点的策略组合集为 $SG = \times S_i (1 \leq i \leq n)$, 节点的访问代价函数 $Cost: SG \rightarrow R$ 为策略组合集到实数集的映

^{*})国家自然科学基金项目(60273031);高等学校博士点专项科研基金项目(20020055021);天津市科技发展计划重点基金项目(043800311)。

王文方 博士研究生,主要研究方向为大规模存储和分布式系统。刘晓光 博士,副教授,主要研究方向为并行与分布式系统。王刚 博士,副教授,主要研究方向为数据布局、海量存储、并行与分布式系统。刘璟 教授,博士生导师,主要研究方向为并行与分布式系统、海量存储。

射,其定义为:对节点 $i, sg \in SG, Cost_i(sg) = \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij} I_{ij} + \beta_j (1 - I_{ij}))$, 其中 $\alpha_{ij} = w_{ij} (first_{ij} + c_{ij} t_u)$, $\beta_j = w_{ij} d_u$ 。若节点 i 保存对象 j 的副本, I_{ij} 为 1, 否则为 0。 α_{ij} 为节点 i 首次复制对象 j 的代价 $first_{ij}$ 与对象维护代价 t_u 两者之和与对象访问频率 w_{ij} 的乘积, w_{ij} 满足 $\sum_{j=1}^m w_{ij} = 1$ 。节点 l 保存对象 j 副本且对节点 i 访问代价最小。 d_u 为对象从节点 i 到节点 l 的传输时间。 t_u 与特定节点的对象维护代价, 对象同步周期和节点间对象传输时间相关。为使对象维护代价与访问代价具有可比性, 引入比例因子 c_{ij} , 对节点 i , 取 c_{ij} 为节点 i 到任意两个节点的 d 与 t 之差的比值, 这个比值只与 t 中对象传输时间的系数相关, 对节点 i 和对象 j 来说是唯一的。 β_j 表示节点 i 从节点 l 访问对象 j 的代价, 是数据传输代价 d_u 与对象访问频率 w_{ij} 的乘积。

博弈论的方法追求的是稳定的解, 即纳什均衡解。纯策略纳什均衡是指这样一种局势: 对任一节点, 若给定其它节点的策略不变, 该节点不会单方面改变自己的策略, 否则不会使节点访问代价变小。形式化的描述为: 若 $(s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*) \in SG$ 为一个纯策略纳什均衡, 则 $\forall i \in N, \forall s_i \in S_i$ 有 $Cost(s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*) \leq Cost(s_1^*, \dots, s_i, \dots, s_n^*)$ 。在节点个数与各节点策略均为有限的情况下, 必定存在混合策略意义下的纳什均衡, 但不一定存在纯策略意义下的纳什均衡。与强调整体最优的方法不同, 博弈论方法强调的是个体节点的最优, 纳什均衡解可能是全局最优的, 也可能不是全局最优的。

3 纯策略纳什均衡存在性证明

对任一节点, 给定其它节点的复制策略, 总可以找到一种对象复制策略使该节点的对象访问代价最小。对节点 i 与对象 $j, \alpha_{ij} \geq \beta_j$ 时节点 i 选择通过其它节点访问对象 $j, \alpha_{ij} < \beta_j$ 时类似于 0-1 背包问题根据 $\alpha_{ij}, VM(j)$ 及 $V(i)$ 决定是否保存对象 j 的副本。

定理 1 在副本散布博弈模型中, 若某复制策略为节点最优策略, 那么当该节点访问某对象的代价变小时, 该复制策略仍为节点的最优策略。

证明: 设节点最优复制策略为 I , 其复制与通过距其最近的节点访问对象的代价分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 与 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$, 则 $Cost = \sum_{j=1}^m (\alpha_j I_j + \beta_j (1 - I_j))$ 。访问代价变小时 α_j 与 β_j 分别变为 α_j^* 和 β_j^* , 设访问代价变小的对象的集合为 $ObjM$, 则若 $j \in ObjM$, 有 $\alpha_j^* < \alpha_j, \beta_j^* < \beta_j$ 否则有 $\alpha_j^* = \alpha_j, \beta_j^* = \beta_j$ 。

假如 I 不再是最优策略, 则必存在策略 I^* 有

$$\sum_{j=1}^m (\alpha_j^* I_j^* + \beta_j^* (1 - I_j^*)) < \sum_{j=1}^m (\alpha_j I_j + \beta_j (1 - I_j)) \quad (1)$$

由于 I 为访问代价变小前的最优策略则有

$$\sum_{j=1}^m (\alpha_j I_j + \beta_j (1 - I_j)) < \sum_{j=1}^m (\alpha_j I_j + \beta_j (1 - I_j^*)) \quad (2)$$

根据 α 与 β 的取值有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m ((\alpha_j^* - \alpha_j) I_j + (\beta_j^* - \beta_j) (1 - I_j)) = \\ \sum_{j=1}^m ((\alpha_j^* - \alpha_j) I_j^* + (\beta_j^* - \beta_j) (1 - I_j^*)) \end{aligned} \quad (3)$$

将(3)加入(2)的两端有

$$\sum_{j=1}^m (\alpha_j^* I_j + \beta_j^* (1 - I_j)) < \sum_{j=1}^m (\alpha_j^* I_j^* + \beta_j^* (1 - I_j^*))$$

与(1)式矛盾, 则假设错误, 即仍 I 为最优策略。 \square

给出一种局势的构造算法:

令 V 和 V' 为两个节点集, V 中的节点只通过对象宿主节点访问对象, V' 中的节点既可通过对象宿主节点也可通过其它节点的共享存储区访问对象。

步骤 1: 令集合 $V = N$, 集合 $V' = \emptyset$ 为空。

步骤 2: 对所有的节点 $i \in V$, 选择复制策略 s_i , 使 $Cost_i$ 最小。

步骤 3: 从集合 V 任取一节点 i , 令其可通过集合 V' 中节点的共享存储区访问对象, 节点 i 重新选择复制策略使其在当前条件下访问代价最小, 将节点 i 从集合 V 中删除, 加入集合 V' 。

步骤 4: 重复步骤 3, 直至集合 V 变为空。

定理 2 经上述构造算法生成的局势是一个纳什均衡局势。

证明: 每次在步骤 3 改变节点 i 的复制策略时不会影响集合 V 中其它节点复制策略的最优性, 因此只需考虑集合 V' 中的节点。对节点 i , 将其复制的对象集合记为 $ObjN(i)$, 分两种情况:

(1) 对节点 $k \in V'$, 对象 $j \in ObjN(i)$, 若节点 i 导致 α_{kj} 和 β_{kj} 变大, 则不会改变节点 k 复制策略的最优性, $Cost_k$ 不变。

(2) 对节点 $k \in V'$, 对象 $j \in ObjN(i)$, 若节点 i 导致 α_{kj} 和 β_{kj} 减小, 则根据定理 1, 不会改变节点 k 复制策略的最优性, $Cost_k$ 减小。

经上述算法逐渐增加集合 V' 中元素的个数, 最终必可生成一个纳什均衡局势。 \square

定理 2 说明, 在副本散布问题基本博弈模型中, 在多对象且节点容量有限的情况下存在纯策略的纳什均衡。

结论与今后工作 本文在多对象且节点容量有限的情况下证明了副本散布问题的博弈模型中纯策略纳什均衡存在性, 是对节点无限容量情况更为实用的扩展。在此基础上可通过继续研究纳什均衡解的最优化性质, 明确最优解的上下限, 引入改进方法, 提出真正实际可用的副本散布算法。

参 考 文 献

- 1 Ko B-J, Rubenstein D. Distributed self-stabilizing placement of replicated resources in emerging networks. In: Proc. of the 11th Intl. Conf. on Network Protocols (ICNP'03), 2003
- 2 Chen Y, Katz R H, Kubiawicz J D. SCAN: A Dynamic, Scalable, and Efficient Content Distribution Network. In: Proc. of Intl. Conf. on Pervasive Computing, 2002
- 3 Douceur J R, Wattenhofer R P. Large-Scale Simulation of Replica Placement Algorithms for a serverless Distributed File System. In: Proc. Of MASCOTS, 2001
- 4 Geels D, Kubiawicz J. Replica Management Should Be A Game. In: Proc. of the SIGOPS European Workshop 2002, Sep. 2002
- 5 Chun B-G, Chaudhuri K, Wee H, et al. Selfish Caching in Distributed Systems: A Game-Theoretic Analysis. In: Proc. of the twenty-third annual ACM symposium on Principles of distributed computing, 2004