

基于博弈思想的副本创建策略研究

王小梅^{1,2}, 李新明¹, 王 帅¹

(1. 装备学院重点实验室, 北京 101416; 2. 中国人民解放军 93498 部队, 石家庄 050000)

摘 要: 在云计算等复杂网络环境下, 提高海量数据存储的可靠性和访问效率, 需引入副本存储及管理技术。基于此, 提出基于博弈思想的副本创建策略, 应用博弈原理建立复杂网络环境下的副本创建基本模型, 证明纯策略纳什均衡解的存在性及求解方法, 并通过仿真分析方法验证了该策略的有效性。

关键词: 副本创建; 博弈; 副本创建基本模型; 传输代价; 纯策略纳什均衡; 海量数据

Research on Replica Creation Strategy Based on Game Theoretic Thought

WANG Xiao-mei^{1,2}, LI Xin-ming¹, WANG Shuai¹

(1. Key Lab of Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. PLA 93498 Army, Shijiazhuang 050000, China)

【Abstract】 It is the requirement to research data replica storage and management technology for improving the reliability and efficiency of massive data in complex network like the cloud computing. The game theory is used to analyze the replica creation problem, and its basic model in complex network based on game strategy is proposed. The existence of pure strategy Nash equilibria in basic model is proved, and the results are analyzed through simulation. The method is of reference value for improving the usability and efficiency of massive data.

【Key words】 replica creation; game theoretic; replica creation basic model; transfer cost; pure strategy Nash equilibria; massive data

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.17.010

1 概述

随着社会信息化的快速发展, 数据量与日俱增, 人类社会已经进入数据信息极度丰富的时代。据 IDC 报告统计, 全世界一年内新产生的数据量超过 270 000 PB, 且仅在 2011 年就将达到 1.8 ZB(1.8 万亿 GB)^[1]。而伴随着海量数据存储、管理问题的提出, 冗余数据的产生、复制、管理等成为主要的研究内容, 其核心归结为副本管理技术。引入数据对象的副本是为了提高数据的可靠性和访问效率, 但数量过多的副本又会占据宝贵的存储资源, 造成资源浪费、数据更新开销增大等问题。因此, 探索较优的副本创建策略, 以便在提高海量数据可用性的同时优化数据访问效能, 是海量数据分布式处理技术的主要研究内容, 并成为研究热点之一。

目前, 研究人员已经针对副本创建问题开展了大量的研究工作。如文献[2]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创建算法。文献[3]提出基于模拟退火算法的数据网格副本部署策略, 用最小的存储代价、通信代价和最大的带宽服务来确定部署数据副本的节点。文献[4]通过分析带宽、文件大小、用户访问模式、节点存储能力等因素, 针对教育资源网格模型研究副

本创建策略。上述文献均通过构建目标函数求解全局最优解的思路分析副本创建问题, 没有考虑到节点的自身开销和更新代价。此外, 文献[5]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。文献[6]提出将博弈原理应用于副本复制, 但没有证明纯策略纳什均衡解的存在性, 并认为存在混合策略, 增加了研究的复杂性, 且没有考虑与全局最优解的异同。

本文从节点自身利益的角度出发, 研究并提出基于博弈思想的副本创建策略, 构建基于博弈思想的副本创建基本模型, 证明存在纯策略下的纳什均衡解, 并分析比较基于节点自身利益与全局利益的异同。

2 副本创建的影响因素分析

合理地创建副本能够有效提高访问效率。当有访问请求时, 副本策略从数据对象的多个副本中选取一个响应时间最短的副本作为反馈, 因此, 响应时间直接影响副本的创建机制。用 t_{response} 表示响应时间, 则:

$$t_{\text{response}} = t_{\text{transfer}} + t_{\text{access}}$$

其中, t_{transfer} 为数据副本从存储节点到请求节点的传输时间, 它与副本的大小及网络带宽相关; t_{access} 为访问数据的时间, 它与请求节点的写效率和存储节点的读效率相关。

作者简介: 王小梅(1984—), 女, 博士研究生, 主研方向: 海量数据存储, 副本管理; 李新明, 研究员、博士生导师; 王 帅, 博士研究生

收稿日期: 2011-11-07 **修回日期:** 2011-12-28 **E-mail:** wxm0111.student@sina.com

此外,影响副本创建的因素是多方面的,包括复制数据的代价、维护副本的代价、数据访问频率以及网络拓扑、节点存储能力等。

下文将选取主要的性能影响参数,运用博弈思想建立和分析副本创建的基本模型。

3 基于博弈思想的副本创建基本模型

本节采用非合作博弈的思想构建副本创建模型。选取 n 个存储节点作为博弈过程的 n 个参与者,它们的策略集是 $S_i = \{0, 1\}$, $S_i = 1$ 表示节点 i 创建副本, $S_i = 0$ 表示不创建。博弈方法以参与者自身利益出发,寻求稳定的解,即纳什均衡。纳什均衡是一种策略组合,使得每个参与人的策略是对其他参与人策略的最优反应^[7]。

首先考虑节点 i 创建副本 j 的代价 α_{ij} :

$$\alpha_{ij} = \text{first}_{ij} + c_j \frac{\text{updatesize}_j}{\text{replicasize}_j} \cdot \frac{1}{T} \sum_k p_{kj} \quad (1)$$

创建代价 α_{ij} 包括创建副本的代价 first_{ij} , 以及副本更新维护代价 $c_j \frac{\text{updatesize}_j}{\text{replicasize}_j} \frac{1}{T} \sum_k p_{kj}$, 其中, updatesize_j 为更新量的大小; replicasize_j 为副本对象大小; T 为更新周期; p_{kj} 为节点 k 对副本对象 j 的需求率、为使副本对象更新维护代价与后续要分析的访问代价具有可比性引入比例因子 c_j 。

其次分析节点 i 不创建副本,从其他节点访问副本对象的代价 β_{ij} :

$$\beta_{ij} = \omega_{ij} t_{il} \quad (2)$$

其中, ω_{ij} 表示副本对象的访问频率; t_{il} 为节点 i 到节点 l 的传输时间, l 是距离节点 i 最近的存储了副本 j 的节点。

综上,建立副本创建的基本模型如下:

定义 设基于非合作博弈思想的副本创建模型由四元组 (N, M, S, C) 表示。其中, N 为非空节点集; M 为非空数据对象集; S 为节点选择的有限非空策略集; C 为节点的访问代价函数。

根据式(1)、式(2)得到节点 i 的访问代价函数为:

$$C_i(S) = \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij} S_j + \beta_{ij} (1 - S_j)) = \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij} S_j + \omega_{ij} t_{il} (1 - S_j)) \quad (3)$$

式(3)表示的是节点 i 的代价函数,系统全局的总代价为:

$$\text{Cost}(S) = \sum_{i=1}^n C_i(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij} S_j + \beta_{ij} (1 - S_j)) \quad (4)$$

式(4)为系统全局的副本创建代价,通过求解 $\text{Cost}(S)$ 的最小值,即 $\min(\sum_i \sum_j [\alpha_{ij} S_j + \beta_{ij} (1 - S_j)])$, 可得到全局最优条件下的策略集 S 。

式(3)即节点 i 的副本创建基本模型,根据博弈的思想可求得稳定的纳什均衡解,即策略集 S_i 。当 $\alpha_{ij} > \beta_{ij}$ 时,节点 i 通过与其最近的存储了数据对象 j 的节点处访问 j ; 当 $\alpha_{ij} < \beta_{ij}$ 时,节点 i 根据数据对象 j 的大小、节点 i 的存储容量以及 α_{ij} 来决定是否创建 j 的副本。

在该模型中,纳什均衡是这样一种局势:没有节点可

以通过改变策略而减少它的代价函数值,即对任一节点,若其他节点不改变策略,该节点不会单方面改变自身策略,否则节点的访问代价不会变小。

形式化描述上述过程为:

设 $(S_1^*, S_2^*, \dots, S_n^*) \in S$ 为一个纳什均衡策略,则 $\forall i \in N$, $\forall S_i \in S$, 有 $C(S_1^*, S_2^*, \dots, S_i^*, \dots, S_n^*) \leq C(S_1^*, S_2^*, \dots, S_i, \dots, S_n^*)$ 。

根据博弈理论,在节点数和策略有限的情况下,必然存在混合策略下的纳什均衡解。但在实际存储策略情况下,研究纯策略纳什均衡解才更具意义,因此,是否存在纯策略下的纳什均衡需要进一步分析。

4 副本创建博弈模型纯策略纳什均衡解的存在性

证明: 设集合 $V = N$, $V' = \emptyset$; 对同一副本对象 j , 假设每一节点的创建代价 α 相同。

(1) 对所有节点 $i \in V$, 选择策略使节点的自身代价 C_i 最小。

(2) 集合 $X \subseteq V$ 表示集合 V 中创建了副本对象 j 节点集合。 $\forall x_1 \in X$, 则 V 中所有通过 x_1 访问 j 的节点集合 $Z_1 = \{z_1 : \beta_{z_1 x_1} \leq \alpha, z_1 \in V\}$, $\beta_{z_1 x_1}$ 为节点 z_1 通过 x_1 访问副本 j 的代价。将 Z_1 与 x_1 从 V 中删除, 并加入 V' 中。

(3) 重复进行步骤(2), 即取 $\forall x_2 \in X$, 以及 $Z_2 = \{z_2 : \beta_{z_2 x_2} \leq \alpha, z_2 \in V\}$, 将 Z_2 与 x_2 移入 V' 。以此类推, 直至 $V' = \emptyset$ 。

(4) 该构建算法不会改变 V 中剩余节点的策略。下面考虑 V' 中的节点是否会改变策略。 $\forall z_1 \in Z_1$, 有 $\beta_{z_1 x_1} \leq \alpha$, 则 z_1 与 x_1 不会改变策略。若假设 $\exists z_2 \in Z_2$, 有 $\beta_{z_2 x_2} < \beta_{z_2 x_1}$, 则 z_2 会依然采取自身不创建副本而通过 x_1 访问数据 j , 并不会改变策略。若 $\exists \beta_{x_2 x_1} < \alpha$, 则 x_2 会改变策略, 但若 $\exists \beta_{x_2 x_1} < \alpha$, 则节点 x_2 必然会与 Z_1 同时移入 V' , 即 $x_2 \in Z_1 \subset V$, 显然与 $x_2 \in X \subset V$ 矛盾。故不存在 $\beta_{x_2 x_1} < \alpha$ 的情况, 因此, x_2 不会改变策略。同理, V' 中的节点均不会改变自身策略。

此局势为纯策略纳什均衡局势。证毕。

通过上述证明得知, 对某一数据对象, 副本创建的基本模型存在纯策略纳什均衡解。因此, 可以把单个数据对象的副本创建过程作为一次博弈过程, 将每次博弈过程的纳什均衡解组合成为多数据对象纳什均衡解。文献[8]在纯策略纳什均衡中证明: 若 2 个博弈过程均存在纯策略纳什均衡局势, 且它们的代价函数是相互无关且单调的, 那么它们的组合仍存在纯策略纳什均衡。则多数据对象博弈过程的纯策略纳什均衡解为单数据对象博弈过程纳什均衡解的叉乘。这使得研究的重点可以转为关注单个数据对象的副本创建过程。

5 副本创建博弈模型仿真分析

本节对单数据对象的副本创建博弈模型进行仿真验证。由式(3)得到单数据对象的代价函数如下:

$$C_i(S) = \alpha_{ij}S_i + \omega_{ij}t_{ij}(1-S_i) \quad (5)$$

为简化仿真过程, 突出节点在自身创建与访问其他节点间的博弈选择过程, 假设对同一数据对象, 各节点的创建代价相同、访问需求一致, 并将 ω_{ij} 归一化。化简后的单数据对象代价函数如下:

$$C_i(S) = \alpha_{ij}S_i + t_{ij}(1-S_i) = \alpha_{ij}S_i + \min t_{ij}(1-S_i) \quad (6)$$

其中, $\min t_{ij}$ 表示节点 i 访问存储了副本 j 的节点中访问代价的最小值。

算法简述如下:

(1)初始化: 对 n 个节点, 随机产生策略集 $S=(S_1, S_2, \dots, S_n)$; 建立传输代价矩阵 $T_{n \times m}$, 其中, 元素 t_{ik} 表示节点 i 访问节点 k 的传输代价, 若节点 k 没有存储副本 j 或节点 i 与节点 k 间没有通路, 则 $t_{ik}=0$ 。

(2)博弈: 当前策略下在所有存储了副本 j 的节点中, 比较节点 i 访问 j 的传输代价最小值 $\min t_{ij}$, 比较节点 i 自身创建 j 的代价 α 与 $\min t_{ij}$ 大小, 若 $\alpha < \min t_{ij}$, 则节点 i 选择自己创建 j , $S_i=1$; 若 $\alpha \geq \min t_{ij}$, 则节点 i 不创建, 通过访问传输代价最小的节点获取 j 。

令 $C_{\min}=\min\{\alpha, \min t_{ij}\}$, 表示节点 i 博弈过后应有的代价函数值, C_{now} 为节点 i 当下的代价函数值, 仿真过程简述如下:

```

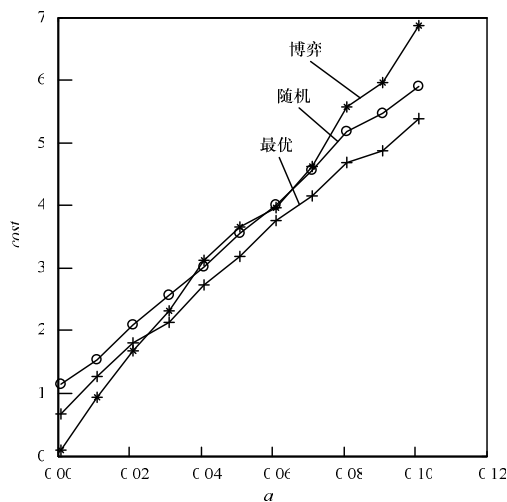
for i=1~n
  Cnow=αi+mintij(1-Si)
  Cmin=min{α, mintij}
  if Cnow>Cmin then
    if Cmin=α then
      Si=1
    else
      Si=0

```

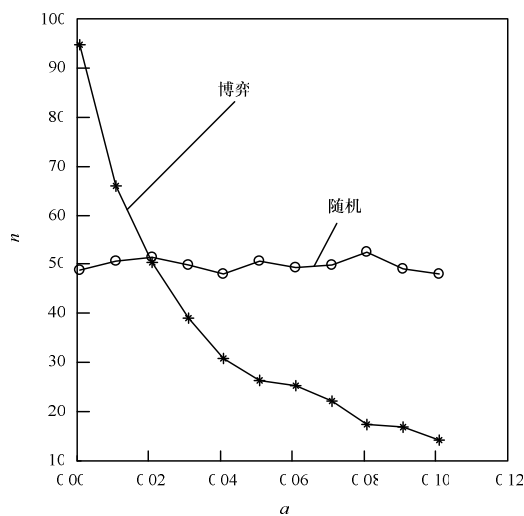
上述伪代码的含义为: 若 $C_{\text{now}} > C_{\min}$, 则说明当前策略并不是博弈后的优化策略, 所以, 要改变节点 i 的策略选择, 使其代价函数值最优。否则, 目前的策略恰好为博弈后的优化策略。对每一个节点 i 均进行策略的博弈选择, 最终得到优化策略集 $S=(S_1, S_2, \dots, S_n)$ 。

仿真过程中的参数设置为: 选取 $n=100$ 个节点, 传输代价 t_{ij} 取值在 $(0, 1)$ 之间, 创建代价 α 取值在 $(0, 0.11]$ 之间。在分析创建代价 α 不同时, 博弈策略与随机存储情况下的系统代价及平均副本个数, 如图 1 所示。为使随机存储的结果具有比较意义, 每次不同 α 值的仿真过程选择循环 100 次并取均值。需要说明的是图 1(a) 中的最优, 表示在 100 次随机策略中全局代价 cost 的最优值。在图 1(a) 中, 当 $\alpha < 0.06$ 时, 博弈策略的全局代价优于随机存储策略; 当 $\alpha > 0.06$ 时, 博弈策略的全局代价略高于随机存储策略。在图 1(b) 中, 当 $\alpha < 0.02$ 时, 博弈策略的副本个数多于随机策略; 当 $\alpha > 0.06$ 时, 博弈策略的副本个数明显少于随机策略。且在 $0.02 < \alpha < 0.06$ 区间里, 博弈策略的全局代价及副本个数均优于随机策略。由此, 当 α 较小时, 博弈策略的全局代价小于随机的存储情况, 且可能达到全局最优值, 但副本数量较多。这在理论上较易理解, 由于创建副

本的代价相对较小, 更多的节点倾向于自身创建副本。当 α 增大时, 博弈算法的全局代价略高于随机情况, 且可能不是全局最优值, 但副本数量较少。这是因为节点更倾向于通过其他节点访问副本以减小自身开销, 可见略高的全局代价换取了更多的剩余存储空间。当 α 在某一区间内, 既能优化全局代价又能优化存储空间, 若副本创建代价能够满足某实际拓扑结构, 则博弈策略会得到最佳应用。



(a) 创建代价 α 变化时随机存储与博弈策略的全局代价对比



(b) 创建代价 α 变化时随机存储与博弈策略的平均副本个数对比

图 1 博弈策略与随机存储情况下全局代价及平均副本个数对比

博弈的思想通过强调节点自身的代价从而使系统达到某种稳定状态(纳什均衡), 利于节点自治。但应注意博弈思想下的策略并不一定是全局代价最优时的策略选择, 它强调的是节点自身的代价最优和系统状态的稳定。

6 结束语

本文采用博弈思想建立了副本创建的基本模型, 证明了基本模型纯策略纳什均衡局势的存在性, 说明模型的可行性。本文提出的副本创建策略突出了节点自身的利益, 但弱化了全局代价。因此, 如何能够既满足节点自身代价又保证全局最优的纯策略纳什均衡局势, 是下一步研究的问题。

(下转第 41 页)