

蚊子产卵交配和模拟退火的混合优化数据副本放置机制

张 榜 王兴伟 黄 敏

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘 要 为了提高云存储系统的可扩展性、可靠性,同时改善用户访问能力,通常为其配备多数据副本机制,则不仅需要为数据副本选择合适的存储场地,而且需要实现用户访问请求对数据副本的优化分配。为此,提出了一种基于蚊子产卵交配和模拟退火混合优化数据副本放置机制。该机制以最小化总代价为优化目标,基于蚊子产卵交配思想确定数据副本候选放置方案,基于模拟退火进一步求精得到最优解。基于 CloudSim,对该机制进行了仿真实验和性能评价,并且与现有的机制进行了对比分析,结果表明,该机制具有更好的性能,是可行和有效的。

关键词 蚊子产卵交配,模拟退火,混合优化,副本放置

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.4.013

Hybrid Optimal Data Replica Placement Scheme Based on Mosquitoes Oviposition Mating and Simulated Annealing

ZHANG Bang WANG Xing-wei HUANG Min

(Department of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract The multiple data replica scheme should be adopted in cloud storage system in order to improve system scalability and reliability and improve user access capability at the same time. Selecting proper location for each replica and realizing the optimal allocation of user access requests to data replica should be solved. In this paper, a hybrid optimal multiple data replica placement scheme based on MOX (Mosquitoes Oviposition Mating) and SA (Simulated Annealing) was proposed. With minimizing the total cost as its optimization objective, it uses the ideas of MOX to determine the candidate data replica placement solutions and then uses SA to refine the candidates further to get the optimal solution. We simulated implementation and performance evaluation on the proposed scheme based on CloudSim and then carried out comparative analysis with certain existing scheme. Simulation results show that the proposed scheme is feasible and efficient with better performance.

Keywords MOX, SA, Hybrid optimization, Replica placement

1 引言

云存储通常是由分布在不同数据中心的大量存储设备构成的,通过集群技术、网络技术和虚拟化技术等,把大量的异构存储设备用应用软件集合起来,形成统一的存储系统,对外提供数据存储和数据访问服务等^[1]。用户不需建立自己的数据存储中心,只需通过云存储在线获取存储空间,从而避免了存储平台的重复建设,节约了投资。

在云存储中,不同的存储设备在可靠性和性能等方面都存在差异,故障时有发生,而且这些设备通过网络连接,网络状态也会影响到数据访问的及时性和可靠性。面对云端用户的海量访问请求,为了提供及时、可靠、高效的数据访问,改善用户体验质量,通常需要在云存储系统中配备多数据副本机制,即在适当的时间和存储场地为适当的数据对象部署适当

数量的数据副本。实现对多数据副本高效管理的关键是要实现对多副本的优化放置、用户访问时副本的择优选择以及多副本间的一致性维护等。本文着重研究其中的多数据副本放置机制。

目前已经提出了多种多数据副本放置机制。文献[2]以最小化副本的存储场地数为目标,提出了基于拉格朗日的启发式算法,降低了系统存储成本,但是对改善用户访问时间和降低用户访问代价的促进不够显著。文献[3]提出了一种副本放置机制,基于定单源最短路径确定副本存储场地,提高了数据访问的可靠性和效率,但面向的是数据中心网络。文献[4]面向数据网络的实际需要,根据数据流行度确定副本的存储场地,目的是使用户可以就近访问数据副本,因而可以显著降低用户访问时间,同时高效使用网络和存储资源。文献[5]提出了基于度和基于频率的数据副本放置机制,通过设置

到稿日期:2014-10-27 返修日期:2014-12-12 本文受国家杰出青年科学基金项目(61225012,71325002),高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域课题(20120042130003),中央高校基本科研业务费专项资金项目(N110204003,N120104001)资助。

张 榜(1990—),女,博士生,主要研究方向为未来互联网管控优化机制,E-mail:cucumberbb@163.com;王兴伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为未来互联网、云计算、网络安全和信息安全;黄 敏(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能算法设计与优化、调度理论与方法等。

度和频率阈值选出副本放置的候选位置,从中选出访问代价最小的候选节点放置副本,但针对的是对等数据网格的实际需要。文献[6]面向车辆容迟网络的特殊需要,定义了副本代价函数和信任计算指标,据此给出了一种基于概率的信任感知型数据副本放置策略,不能直接应用于云存储系统。文献[7]面向数据密集型应用,提出了一种基于动态规划的数据副本放置算法,可以最小化包括存储代价和通信代价在内的复制代价。文献[8]提出了一种内容分发网络中的启发式副本放置机制,在满足存储场地约束等的前提下,为副本确定最佳的存储场地,最小化网络传输代价。文献[9]研究了 P2P 存储系统中可靠性与数据副本数量之间的关系,但是没有给出具体的数据副本放置机制。文献[10]以收益-代价差值最大化为目标,确定副本的放置位置,提高了数据密集型网格的可用性。文献[11]提出了一种动态选择高性能节点作为存储场地的副本放置机制,可以提高 P2P 系统可用性,但是对云存储系统的适用性需要进一步验证并进行必要的改进。文献[12]从理论角度研究了如何实现数据副本在云环境下的均衡布局,描述了云系统有效性和副本数量之间的关系,给出了副本数量计算方法和副本复制算法,但没有给出具体的数据副本放置机制。文献[13]根据节点性能为数据副本选择存储场地,目标是为了减少节点间数据传送量,但主要是面对 Hadoop 的负载均衡需要。

上述工作多是面向内容分发网络、数据网格、车辆网络、P2P 网络、Hadoop 和数据密集型应用等的需要而开发的,并不完全适合云存储系统的需要;有的仅进行了理论建模;多数工作未以最小化访问代价作为副本放置优化目标,而实际上在云存储系统中设置副本的目的之一就是为了方便用户对数据的访问;基本上仅考虑了如何为数据副本确定合适的存储场地,但没有考虑用户访问请求对数据副本的优化分配,不利于充分发挥多数据副本存在的效益。实际上,数据副本放置机制要解决的问题的计算复杂度很高,例如,仅从 M 个存储场地中选取 $R_{\min}$ 个场地存放数据副本就有 $M!/(M-R_{\min})!$ 个可能的方案(考虑到不同副本应该放到不同的存储场地),当 M 和 $R_{\min}$ 较大时选出最优解的计算量极大。受智能优化方法在此类工程问题优化求解中成功应用^[14-16]的启发,本文提出一种混合优化云存储智能数据副本放置机制,以最小化总代价为目标,基于蚊子产卵交配(Mosquitoes Oviposition Mating, MOX)^[17]思想确定数据副本候选放置方案,基于模拟退火(Simulated Annealing, SA)^[18]进一步求精得到最优解,不仅为数据副本选择合适的存储场地,而且实现用户访问请求对数据副本的优化分配。仿真研究表明,该机制是可行和有效的,同现有机制相比,具有更好的性能。

2 问题描述

把云存储环境下的多数据副本放置问题定义如下:对于数据对象 O ,云存储系统有 M 个存储场地,分别记为 DC_j , $j=1, \dots, M$;有 N 个访问 O 的用户,分别记为 C_i , $i=1, \dots, N$;为 O 至少建立 $R_{\min}$ 个数据副本 O_c ,使得每个用户对数据对象的访问请求都能得到满足,而且所有用户对数据对象访问的总代价最小。记 C_i 通过 DC_j 访问 O_c 的访问代价为 AC_{ij} ,记

DC_j 对 O_c 的维护代价为 MC_{ij} , C_i 对 O 的访问次数记为 w_i ,决策变量 x_j 表示是否选择在 DC_j 处放置 O_c (1 表示放置,0 表示未放),决策变量 y_{ij} 表示自 C_i 的访问请求由 DC_j 响应的比例。上述问题的数学描述如下:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij} w_i AC_{ij} + \sum_{k=1}^M MC_{jk} x_k \right) \\ & \text{s. t. } \sum_{j=1}^M x_j \geq R_{\min} \\ & \quad \sum_{j=1}^M y_{ij} = 1 \\ & \quad y_{ij} - x_j \leq 0 \\ & \quad x_j \in \{0, 1\}, y_{ij} \in [0, 1] \end{aligned}$$

约束 1 要求至少选择 $R_{\min}$ 个存储场地放置数据对象的副本;约束 2 要求用户对数据对象的访问请求须得到响应;约束 3 要求响应用户访问请求的存储场地必须有数据对象的副本;约束 4 是决策变量的取值范围约束。

3 算法设计

本文提出的混合优化机制,首先基于 MOX 思想求出数据副本候选放置方案,继而基于 SA 进一步求精得到最优解。

3.1 解的表达

每个蚊子代表问题的一个解即数据副本的一个放置方案,用矩阵 $Y = [y_{ij}]_{N \times M}$ 表示。满足全部约束的解为可行解,否则为不可行解。

3.2 适值函数

使用适值评价解的优劣,定义蚊子的适值函数 $F(Y)$ 如下:

$$F(Y) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij} w_i AC_{ij} + \sum_{k=1}^M MC_{jk} x_k}, & Y \text{ 是可行解} \\ 0, & Y \text{ 是不可行解} \end{cases} \quad (1)$$

显然, F 值越大,与解对应的放置方案越优。

3.3 产卵、交配与随机跳跃

①产卵

雌性蚊子通过随机选择互换、添加或移除操作完成产卵。互换操作用一个未被选择的存储场地替换选中的存储场地,选中的存储场地数目不变;添加操作是再随机选择一个新的存储场地来放置数据副本,被选中的存储场地数目加 1,但不能超过 M ;移除操作是取消一个已选中的存储场地,被选中的存储场地数目减 1,但不能低于 $R_{\min}$ 。上述操作都会导致与 Y 对应的 x_j 发生变化,从而影响 y_{ij} 。若 x_j 从 1 变 0,则须把原来由 DC_j 响应的 C_i 的用户访问请求重新分配到其他存储场地;若 x_j 从 0 变 1,则可分配部分用户访问请求由 DC_j 响应。

②交配

雌性蚊子 Y^f 以一定概率选择雄性蚊子 Y^m ,用 Y^m 的元素随机替换 Y^f 的对应元素。雄性蚊子以一定概率选择雌性蚊子,据式(2)向雌性蚊子移动。

$$Y^m = Y^m + U[0, 1](Y^f - Y^m) \quad (2)$$

这里, $U[0, 1]$ 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。

③随机跳跃

雄性蚊子以一定概率通过随机执行互换、添加或删除操作完成。雌性蚊子以一定概率据式(3)完成随机跳跃。

$$Y' = Y^3 + U(0,1)(Y^2 - Y^1) \quad (3)$$

其中, Y^1 、 Y^2 和 Y^3 是 3 个随机选择的已有蚊子。

3.4 模拟退火求精

对蚊子即解进行模拟退火求精如下:

步骤 1: 设定退火次数 S_T 、初始温度 T 和温度冷却系数 c , 已退火次数计数器 $s_t = 1$ 。

步骤 2: 生成随机数 $r \in (0,1)$ 。

步骤 3: 根据式(4), 调整 Y , 得 Y' 。

$$y'_{ij} = \begin{cases} |y_{ij} - \frac{r}{3 \cdot s_t}|, & 0 < r \leq 0.5 \\ |y_{ij} + \frac{r}{3 \cdot s_t} - \frac{1}{3}|, & 0.5 < r < 1 \end{cases} \quad (4)$$

步骤 4: 若 $F(Y') > F(Y)$, 则 $Y = Y'$ 且转步骤 7。

步骤 5: 生成随机数 $r \in (0,1)$ 。

步骤 6: 若式(5)成立, 则 $Y = Y'$ 。

$$|e^{-\frac{F(Y') - F(Y)}{T}} - \frac{F(Y') - F(Y)}{T}| > r \quad (5)$$

步骤 7: $s_t = s_t + 1$ 。

步骤 8: 若 $s_t > S_T$, 则结束; 否则, 修改退火温度即 $T = c \cdot T$, 转步骤 2。

3.5 算法描述

步骤 1: 设定迭代次数 I_T 、初始蚊子规模 P_s , 精英解集 $ES = \emptyset$, 产卵、交配与随机跳跃概率分别为 p_o 、 p_m 和 p_l , 已迭代次数计数器 $i_t = 0$ 。

步骤 2: 初始化蚊子群, 随机生成满足约束条件的 P_s 个蚊子, 雄性 & 雌性蚊子各一半。

步骤 3: 对每个蚊子 Y , 计算 $F(Y)$, 记其最大值为 F^* , 把与 F^* 对应的蚊子放入 ES 。

步骤 4: 对每个雌性蚊子, 依概率 p_o 产卵。

步骤 5: 对每个蚊子, 依概率 p_m 交配。

步骤 6: 对每个蚊子, 依概率 p_l 随机跳跃。

步骤 7: 计算当前所有蚊子的适值, 记其最大值为 F^* 。若 $F^* > F^*$, 则用与 F^* 对应的蚊子取代 ES 中的原有元素; 若 $F^* = F^*$, 则把与 F^* 对应的蚊子并入 ES 。

步骤 8: $i_t = i_t + 1$ 。

步骤 9: 若 $i_t < I_T$, 则转步骤 4。

步骤 10: 对 ES 中的每个蚊子进行模拟退火求精。

步骤 11: 选取 ES 中适值最大的蚊子作为问题解输出(若有多, 则任选其一), 结束。

4 仿真实现与性能评价

本文基于 CloudSim^[19] 对上述混合优化云存储副本放置机制进行了仿真实现和性能评价, 将本文工作(以下简称 MOX-SA)与文献[2]中基于 p -中位模型的副本放置机制(以下简称 PM 机制)作比较, 分析在不同访问模式下的平均访问时间和所需副本数, 如图 1 和图 2 所示。两种机制平均访问时间和所需副本数从低到高的顺序均依次为齐普夫分布、均匀分布和顺序分布访问模式, 这是因为齐普夫分布(也称长尾

分布)最符合真实的互联网用户访问模式, 因此假设用户访问请求服从它也更符合用户对云存储系统的访问实际, 更有利于发挥多副本的作用; 均匀分布(假设用户访问请求对数据对象的分布是均匀的)实际上是不现实的; 顺序分布(假设用户依次访问数据对象的各个副本)最不符合用户访问云存储系统的实际情况。由于本文机制基于 MOX 和 SA 对数据副本存储场地选择和用户访问请求分配进行联合优化, 而对比机制仅考虑数据副本存储场地的优化选择, 因此本文机制性能明显优于对比机制。

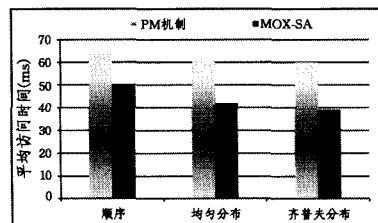


图 1 两种机制在不同用户访问模式下的平均访问时间与所需副本数

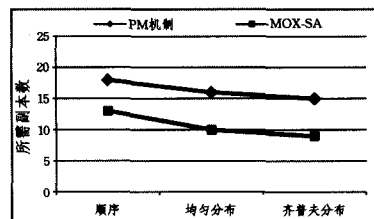


图 2 两种机制在不同用户访问模式下所需副本数

结束语 数据副本管理有助于提高云存储系统的可伸缩性和可靠性以及缩短用户访问时间。本文提出并仿真实现了一种混合优化云存储数据副本放置机制, 以最小化总代价为优化目标, 基于 MOX 思想确定数据副本候选放置方案, 基于 SA 进一步求精得到问题的最优解; 进行了仿真实现和性能评价, 结果表明本文机制是可行和有效的。基于东北大学校园云平台进行原型实现以验证并提高本文工作的实用性是我们今后研究与开发工作的重点。

参考文献

- [1] Wang Xing-wei, Sun Jia-jia, Li Hong-xing, et al. A reverse auction based allocation mechanism in the cloud computing environment[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, 7(11): 75-84
- [2] Rahman R M, Barker K, Alhajj R. Replica Placement strategies in data grid[J]. Journal of Grid Computing, 2008, 6(1): 103-123
- [3] Huang Xin, Peng Yu-xing. A Novel Replica Placement Strategy for Data Center Network[C]//Proceedings of 2011 13th IEEE Joint International Computer Science and Information Technology Conference(JICSIT 2011). 2013: 599-609
- [4] Shorfuzzaman M, Graham P, Eskicioglu R. Adaptive popularity-driven replica placement in hierarchical data grids[J]. The Journal of Supercomput, 2010, 51: 374-392
- [5] Ren Xun-yi, Wang Ru-chuan, Kong Qiang, et al. Degree-based replica placement algorithms for P2P data grids[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(3): 486-490

(下转第 70 页)

- Yang Ning-hu, Chen Li. Spatial Parameters and Coverage Analysis of Satellite Navigation System[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(1): 34-37
- [8] 李振东, 何善宝, 刘崇华. 导航星座星间网络路由算法研究[C]//第一届中国卫星导航学术年会. 北京, 2010: 14-20
- Li Zhen-dong, He Shan-bao, Liu Chong-hua. Research on Routing Algorithm of Satellite Navigation Constellation Network [C]//The first session of the China Satellite Navigation Annual Conference. Beijing, 2010: 14-20
- [9] 李振东, 何善宝, 刘崇华. 采用 Ka 频段的导航星座网络静态拓扑结构[C]//中国宇航学会学术年会. 北京, 2009: 17-22
- Li Zhen-dong, He Shan-bao, Liu Chong-hua. Ka-band using A Static Navigation Constellation Network Topology with Ka-band Channel [C]// Chinese Society of Astronautics Annual Conference. Beijing, 2009: 17-22
- [10] 何家富, 姜勇, 张更新, 等. 一种具有异轨星间链路的 Walker 星座网络拓扑与路由生成方案[J]. 解放军理工大学学报, 2009, 10(5): 409-413
- He Jia-fu, Jiang Yong, Zhang Geng-xin, et al. An Network Topology and Routing Calculation Solution of Walker Constellation with Inter-orbit Link[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2009, 10(5): 409-413
- [11] 郑晋军, 林益明, 陈忠贵, 等. GPS 星间链路技术及自主导航算法分析[J]. 航天器工程, 2009, 18(2): 28-35
- Zhen Jin-jun, Lin Yi-ming, Chen Zhong-gui, et al. The Technology of GPS Satellite Link and Autonomous Navigation Algorithm Analysis [J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(2): 28-35
- [12] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636-1648
- [13] 刘刚, 吴诗其. 非静止轨道卫星通信系统中星间链路性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 24(1): 105-109
- Liu Gang, Wu Shi-qi. Research on Satellite Link Quality in Communication System of Non-geostationary Orbit Satellite [J]. Systems Engineering and Electronic, 2001, 24(1): 105-109
- [14] 尹志忠, 张龙, 周贤伟. LEO/HEO/GEO 三层卫星网络层间 ISL 性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(12): 9-13
- Yin Zhi-zhong, Zhang Long, Zhou Xian-wei. Quality analysis of inter-layer ISL of LEO/HEO/GEO three layers satellite networks [J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(12): 9-13
- [15] 陈垣毅, 郑增威. 星际网络通信协议研究进展综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 406-412
- Chen Yuan-yi, Zhen Zeng-wei. Overview of Research Progress of Inter-satellite Network Communication Protocol[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 406-412

(上接第 59 页)

- [6] Neeraj K, Jongsung K. Probabilistic trust aware data replica placement strategy for online video streaming applications delay tolerant networks [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2013, 58(1/2): 3-14
- [7] Fu Xiong, Zhu Xin-xin, Han Jing-yu, et al. QoS-aware Replica placement for data intensive applications[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(3): 43-47
- [8] Neves T A, Drummond L M A, Ochi L S, et al. Solving Replica Placement and Request Distribution in Content Distribution Networks[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2010(36): 89-96
- [9] 刘志明, 沙基昌, 阳小华, 等. 基于随机 Petri 网的 P2P 存储系统可靠性模型和分析[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 80-83
- Liu Zhi-ming, Sha Ji-chang, Yang Xiao-hua, et al. Model and analysis of Peer-to-Peer Storage System Reliability Based on Stochastic Petri Net[J]. Computer Science, 2011, 38(4): 80-83
- [10] 石宣化, 金海. 有服务质量保证的数据密集型网格应用管理研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(6): 131-135
- Shi Xuan-hua, Jin Hai. Data-intensive Applications Management Framework with QoS Guarantee in Grid Environments [J]. Computer Science, 2007, 34(6): 131-135
- [11] 侯孟书, 王晓斌, 卢显良, 等. 一种新的动态副本管理机制[J]. 计算机科学, 2006, 33(9): 50-52
- Hou Meng-shu, Wang Xiao-bin, Lu Xian-liang, et al. A novel dynamic replication management mechanism [J]. Computer Science, 2006, 33(9): 50-52
- [12] Sun Da-wei, Chang Gui-ran, Gao Shang, et al. Modeling a dynamic data replication strategy to increase system availability in cloud computing[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2012, 27(2): 256-272
- [13] 林伟伟. 一种改进的 Hadoop 数据放置策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 152-158
- Lin Wei-wei. An improved data placement strategy for Hadoop [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 152-158
- [14] Wang Xing-wei, Cheng Hui, Li Ke-qin, et al. A cross-layer optimization based integrated routing and grooming algorithm for green multi-granularity transport networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2013, 73(6): 807-822
- [15] Wang Xing-wei, Cheng Hui, Huang Min. Multi-robot navigation based QoS routing in self-organizing networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 262-272
- [16] 曲大鹏, 王兴伟, 黄敏. 移动对等网络中的感知蚁群路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1456-1464
- Qu Da-peng, Wang Xing-wei, Huang Min. An aware ant routing algorithm in mobile peer-to-peer networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1456-1464
- [17] Arif M. MOX: A novel global optimization algorithm inspired from Oviposition site selection and egg hatching inhibition in mosquitoes[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 4614-4625
- [18] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 136-166
- Wang Ding-wei, Wang Jun-wei, Wang Hong-feng, et al. Intelligent Optimization Methods [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 136-166
- [19] Calheiros R N, Ranjan R, Beloglazov A, et al. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms [J]. Software: Practice and Experience, 2011, 41(1): 23-50