

基于多属性最优化的海洋监测数据副本布局策略

黄冬梅¹ 杜艳玲^{1,2} 贺 琪¹ 随宏运¹ 李 瑶¹

(上海海洋大学信息学院 上海 201306)¹ (国家海洋局东海预报中心 上海 200136)²

摘 要 数据的完整性和可靠性是保证其能被高效访问的关键,尤其是在云存储环境中,数据副本策略是影响系统性能和保障数据可用性的核心。从数据副本布局的角度,提出了基于多属性最优化的数据副本布局策略(Data Replica Layout Strategy based on Multiple Attribute Optimization,MAO-DRLS)。该策略根据数据的访问热度和存储节点的关键属性特点,为每个数据设置动态的副本数,并选择合适的节点对副本进行布局。实验表明,MAO-DRLS 策略能够有效地提升数据副本的利用率,缩短系统的响应时间。

关键词 海洋监测数据,数据副本,多属性最优化,数据布局

中图分类号 TP311.13 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.012

Marine Monitoring Data Replica Layout Strategy Based on Multiple Attribute Optimization

HUANG Dong-mei¹ DU Yan-ling^{1,2} HE Qi¹ SUI Hong-yun¹ LI Yao¹

(College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)¹

(East China Sea Marine Forecast Center of State Oceanic Administration, Shanghai 200136, China)²

Abstract The integrity and reliability of data are the key to ensure its efficient access. Especially in the cloud storage environment, data replication strategy is the core of the system performance and the availability of data. For a data replica layout, this paper put forward a data replica layout strategy based on multiple attribute optimization (MAO-DRLS). According to the heat of data access and the key attributes of storage node, it sets the number of replicas for each dynamic data, and chooses the appropriate node to distribute the replicas. The experiments show that the MAO-DRLS strategy can effectively improve the utilization rate of data replicas and shorten the system response time.

Keywords Marine monitoring data, Data replica, Multiple attribute optimization, Data layout

1 引言

随着海洋监测和预报技术的快速发展,相关数据量呈爆炸式增长,海洋监测大数据也逐渐发展为最热门的科学大数据之一。海洋监测大数据主要包括雷达和卫星等监测资料、数值预报模式结果以及预报产品等。根据以往对海洋数据量的相关研究^[1],2014 年全球各种海洋数据总量约为 25PB,预计 2030 年全球海洋数据总量将达到 275PB^[2-4]。为了更好地适应海洋监测大数据的处理和分析需求,需要采用云环境下的分布式存储模式。然而,在复杂的云环境中,存储节点的性能以及网络间的传输会对单一的存储数据产生一定的影响,从而导致数据时效^[5]或者传输延迟问题。数据副本可以较好地解决这些问题,它是数据项的一份精确拷贝,可通过某种明确的机制^[6]与源数据建立联系,在原始数据丢失时帮助用户

恢复数据。然而,每个数据副本都有着不同的生命周期^[7],合理地创建或删除数据的副本能够增加系统的稳定性,更有助于提升存取数据的效率。因此,创建面向海洋监测大数据的副本策略是必要的。

数据副本不仅能够提高数据的可靠性和完整性,而且能在一定程度上有效地加快数据的响应速度。因此,副本技术成为了海洋大数据存储和管理的关键技术,其目的是提高系统的效率和可靠性。当然,在创建好副本后,选择一个合适的位置来存放副本同样至关重要。对于存储海洋大数据的云环境来说,存储节点数量大、用户复杂多变、节点性能差异大是其代表性特点。针对这些特点,如何在保证数据可靠性、最小化存储空间的前提下保留尽可能少的副本,并高效地将数据对象分布到云环境,是亟待解决的问题。

到稿日期:2017-03-11 返修日期:2017-06-18 本文受国家自然科学基金(41671431),国家重点研发计划(2016YFC1401907),上海市科委能力建设项目(15590501900)资助。

黄冬梅(1964—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为云存储、分布式计算、海洋数据管理以及辅助决策系统,E-mail:dmhuang@shou.edu.cn;杜艳玲(1987—),女,博士,主要研究方向为海洋大数据存储、数据迁移,E-mail:DYanLing2010@gmail.com;贺琪(1979—),女,博士,副教授,主要研究方向为大数据布局、云计算、服务计算、业务流程管理,E-mail:qihe@shou.edu.cn(通信作者);随宏运(1991—),硕士,主要研究方向为大数据布局、海洋数据管理,E-mail:suisuishy@163.com;李瑶(1992—),女,硕士生,主要研究方向为深度学习、数据管理,E-mail:liyaojc2@163.com。

2 相关工作

数据副本是将一个数据项复制多份后分别存放在分布式系统的多个节点上的技术,能提高系统的可靠性、负载均衡性以及访问速率。它是一种减少内存消耗且便于存取的数据保护方法,是一种最为常用和重要的数据管理机制。因此,数据副本的布局和管理对于缩短整个系统的响应时间具有重要的价值。

Deylamsalehi 等人^[8]提出了一种云数据中心内新型的有用有效的动态数据副本策略 CIR。为了达到费用有效的目标,该策略采用了一种增量副本的方式,使其在满足系统可靠性需求的同时最小化副本数目。CIR 能够减少由数据存储所产生的花费,特别是针对临时数据或者可用性较低的数据,存储资源的节省效果十分显著。然而,该策略需要以高花费为代价来提高数据管理的性能,这阻碍了其实际应用。Long 等人^[9]在数据网格模拟器 GridNet 中研究了一种基于费用估计模型的算法,它由数据访问收益以及副本创建和维护代价所驱动,且允许网格节点在需要时自动地对数据进行复制。Mao 等人^[10]提出了一种动态的混合协议,其能有效地联合网格与树结构,通过树高、子节点数、网格深度这 3 个配置参数灵活地调整整体的拓扑结构,容易检测出读写冲突以及写写冲突。Mansour 等人^[11]提出了一种用于 GFS 的静态分布式数据副本算法,该算法能够在限制每台数据服务器最近创建副本次数的同时,将新的副本放置到磁盘空间使用率低于平均值的数据服务器上,提高了用户的访问速率。Tu 等人^[12]在一种分布式的 P2P 网络中构建了一种分层的动态副本布局策略,它在对副本进行置换操作时,考虑了目标放置节点的当前负载状况和通信带宽,给予大尺寸数据文件副本更高的优先权,从而提高了系统的平均负载水平。Guan 等人^[13]提出了一种相似性预测函数,并通过比较历史文件传输路径与当前文件传输路径之间的相似性,构建了一种新颖的数据副本与作业调度方法。

上述方法从多个角度对数据副本进行了有效的布局,并在通用数据上取得了较好的实验效果,但它们对一些具备数据量大、类多且需要实时处理等特点的数据的适用性不佳;而且,目前对大幅跃升的海洋监测大数据的研究较少。因此,本文重点研究海洋监测大数据的副本布局策略。

3 基于多属性最优化的数据副本布局策略

在科技飞速发展的当今,不仅每日会源源不断地产生海洋数据,而且用户数量也在与日俱增。若在同一时间内有较多的用户同时访问同一条数据,则会造成系统性能急剧下降,容易形成网络传输的瓶颈。此外,数据副本的个数会在其生命周期内不断变化,这将直接影响系统空间的存储利用率。因此,为了减少用户访问数据的时间并避免存储空间的浪费,在创建数据之前,需要对副本的热度、副本个数的范围进行设计和控制。

3.1 数据副本的热度

海洋监测大数据具有海量性、实时性、多样性等属性特征,这使得不同数据的受欢迎程度也有所不同,甚至对于同一

数据,在不同的时间段中其受欢迎的程度也可能不同。因此,本文通过合理的计算得到每个数据的热度属性,以衡量数据受欢迎的程度。数据热度越高,表明该数据越受欢迎。针对受欢迎程度高的数据建立更多的副本,多个副本可以分散数据的请求操作,防止产生系统热点,最大可能地减少网络传输的时延,提高系统的响应速度。若数据的受欢迎程度较低,则为其建立较少的副本,这样不仅能够保证数据的可靠性,而且能够尽量减少副本的冗余度,在一定程度上节省系统的存储空间。在云环境下,对存储节点设置一个监护进程来负责统计在不同时间段内用户对各个数据的访问频率。虽然无法准确预计数据在下一时间段的受欢迎程度,但通过分析数据的访问规律,可得知近期经常被访问的数据^[15]在之后的一段时间内仍然会被访问。因此,在 MAO-DRLS 策略中,假设数据在每个周期内的访问请求模式保持不变。数据热度是数据在每个周期内被访问频率的加权平均,用 $Data_h$ 表示。每一个数据的生命周期是从其被创建的那一刻开始计算,监护进程监视其被访问次数,每过一个周期,就根据被访问频率计算出其相应的热度。有以下两个因素会影响数据在本周期结束时的热度值:1)数据在上周期结束时的热度值;2)数据在本周期内的访问频率。具体的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \alpha + \beta &= 1 \\ Data_h_0 &= 0 \\ Data_h_i &= \alpha Data_h_{i-1} + \beta f_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $Data_h_0$ 表示数据最初被创建时的热度值,为了便于计算,将数据热度初值赋为 0; $Data_h_i$ 表示某个数据在第 i 个周期结束时的数据热度值; f_i 表示第 i 个周期内监视进程统计的数据的被访问频率; α 为第 $i-1$ 个周期的历史访问因子,反映了系统对该数据最近被访问情况的注重程度,若 α 接近于 0,则表示当前周期内的访问频率对数据的最新热度影响较大; β 为第 i 个周期的访问因子,可依据系统需求来设置。

假设云存储系统中该数据有 g 个副本,存储节点尽可能地将客户端的请求均分到每个副本上,则每个副本的数据热度为:

$$DReplica_h_i = Data_h_i / g = (\alpha Data_h_{i-1} + \beta f) / g \quad (2)$$

根据式(1)和式(2),可得到每个数据不断变化的访问热度。

3.2 海洋监测大数据副本的个数

海洋监测大数据副本的个数在其生命周期内不断地变化,若副本个数太少,则无法更好地保证数据的可用性^[14];若副本个数过多,则会造成系统存储空间的浪费。因此,在 MAO-DRLS 策略中,以用户的可靠性要求、副本个数的最小值以及系统允许的一致性开销为依据来对副本个数的最大值进行计算。

1) 副本个数的最小值

在云环境下,数据的可靠性和有效性是影响副本个数最小值的关键因素。用户可以根据数据的重要性提出不同的可靠性要求,该要求代表了用户要求访问的成功率。如果用户对某数据的可靠性要求为 0.99,则表明用户要求访问成功率达 99%。在云环境下,适量的节点失效被视为正常情况。设用户对某数据的可靠性要求为 R ,副本的最小个数为 a ,存储

节点中单个副本的失效率为 L , 则 a 的值可由式(3)得到:

$$R \leq (1-C)(1-L^a) \quad (3)$$

其中, C 为云环境中因各种不确定性因素(如数据丢失、网络阻塞等)导致的环境失效率; $(1-C)(1-L^a)$ 代表一个数据被成功访问的概率。

2) 副本个数的最大值

副本个数的最大值主要由维护副本一致性的开销决定, 副本个数的最大值越大, 则维护一致性的难度和开销就越大。然而, 系统对副本每进行一次更新, 都会消耗内部的数据流量, 因此文中以单位时间内由副本更新所引发的数据流量来衡量维护一致性的开销。由于副本个数不能无限增加, 因此, 单位时间内维护副本一致性所引发的流量 W 与副本的最大值有如下关系:

$$W \geq h \times v \times b \quad (4)$$

即

$$b \leq W / (h \times v) \quad (5)$$

其中, b 为副本的最大值, h 为更新的副本内容的大小, v 为用户更新副本的频率。可以看出, 数据副本个数的最大值 b 主要由海洋监测大数据更新的频率和更新内容的大小来决定。

3.3 海洋监测大数据副本的创建

数据副本热度表示当前时间用户对该数据的访问强度。当访问强度过大时, 可为数据增加相应的副本, 让其分担一部分访问该数据对象的请求, 减少用户访问的延迟; 相反, 当访问强度过小时, 可以通过减少副本量来避免存储资源的浪费, 提高其利用率。

MAO-DRLS 策略为每个数据副本热度 $Data_h_i$ 设定一个增阈值 δ_1 和一个减阈值 δ_2 , 分别用来判断在副本动态模式下何时创建新副本和删除无用副本。海洋监测大数据副本的更新流程如图 1 所示。

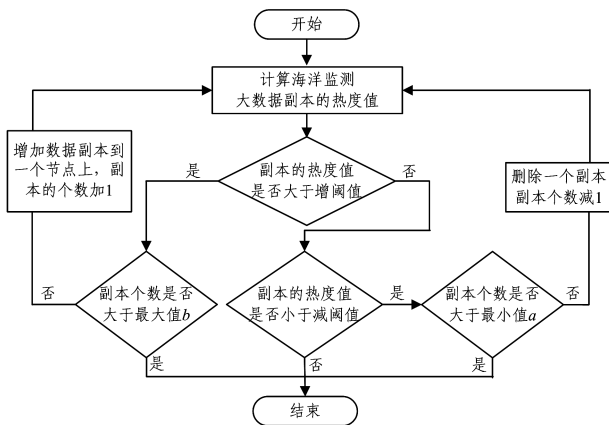


图 1 海洋监测大数据副本的更新流程

Fig. 1 Updating process of marine monitoring data replica

对于需要存储的海洋监测大数据, 首先, 根据式(1)计算出海洋数据副本的热度, 并比较热度值与增阈值 δ_1 的大小。若热度值比 δ_1 大, 则增加副本的个数, 直到当前副本个数达到了副本个数的最大值 b 为止; 若热度值比 δ_2 小, 则删除副本的个数, 直到当前副本个数达到了副本个数的最小值 a 为止。

3.4 海洋监测大数据副本的布局

每个存储子节点都有多个属性, 为了找到各个属性最优、

最邻近的节点, 采用 TOPSIS^[57] (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 方法对多个候选节点的多个属性构造矩阵, 进而找到最优解和最劣解, 这为合理地布局数据副本打下了坚实的基础。

1) 关键属性

在存储副本的过程中, 用户读写操作的集中程度、节点服务性能的稳定性以及存储节点间传输数据量的大小皆为评价一个副本布局策略^[58] 是否有效的关键因素。因此, 在 MAO-DRLS 策略中选取节点访问量、节点响应比和节点带宽 3 个关键属性。其中, 节点访问量代表单位时间内节点的访问量, 节点访问量越小越能有效地避免用户读写操作的过分集中; 节点响应比代表该节点的可用率, 用该节点正确响应数占总请求数的比例来表示, 节点的响应比越高, 其服务性能越稳定; 节点带宽代表在网络传输中, 单位时间内从某个节点到另一个节点能够传输的最高数据率, 节点带宽越高, 用户的读写越方便。

2) 决策分析

根据副本布局的原则, 在选择存储副本的节点时, 首先要考虑存储空间是否足够, 然后判断存储节点的节点访问量、节点响应比和节点带宽, 最后综合副本布局的这些关键因素, 采用 TOPSIS 方法解决多属性决策问题。

① 建立属性评价矩阵。对于多属性最优化的决策问题, 有多个备选方案, 每个方案中有多个属性。在云环境下, 每个方案即是一个存储节点, 每个属性则指每个存储节点包含的关键属性。假设目前有 r 个备选方案, h_1, h_2, \dots, h_s 表示每个方案的 s 个属性, h_{ij} 表示第 i 个备选方案的第 j 个属性, 如 h_{23} 表示第 2 个存储节点的节点带宽。根据节点带宽可建立属性评价矩阵 H ; 为了便于计算, 对矩阵 H 进行归一化处理, 得到矩阵 G 。

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{12} & \dots & h_{1s} \\ h_{21} & \dots & h_{22} & \dots & h_{2s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{r1} & \dots & h_{r2} & \dots & h_{rs} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & g_{12} & \dots & g_{1s} \\ g_{21} & \dots & g_{22} & \dots & g_{2s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ g_{r1} & \dots & g_{r2} & \dots & g_{rs} \end{bmatrix}$$

其中:

$$g_{ij} = \frac{h_{ij}}{\sum_{i=1}^s h_{ij}}, i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, s \quad (6)$$

② 为每个节点中的各个属性进行权重分析, 建立加权矩阵 WG 。 w_{ij} 代表节点访问量、节点响应比和节点带宽 3 个关键属性在所有属性中所占的权重, 则矩阵 G 的加权矩阵 WG 如式(7)所示:

$$WG = \begin{bmatrix} wg_{11} & \dots & wg_{12} & \dots & wg_{1s} \\ wg_{21} & \dots & wg_{22} & \dots & wg_{2s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ wg_{r1} & \dots & wg_{r2} & \dots & wg_{rs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

③ 确定属性评价矩阵的最优解 G^+ 和最劣解 G^- 。最优

解 G^+ 为矩阵 G 中每一列的最大值组成的集合,最劣解 G^- 为矩阵 G 中每一列的最小值组成的集合,如式(8)和式(9)所示:

$$G^+ = (g_1^+, g_2^+, \dots, g_s^+) \tag{8}$$

$$G^- = (g_1^-, g_2^-, \dots, g_s^-) \tag{9}$$

④计算每个节点到最优解和最劣解的距离。节点与最优解和最劣解的距离计算公式分别如式(10)和式(11)所示。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^s (g_{ij} - g_j^+)^2}, i=1,2,\dots,r \tag{10}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^s (g_{ij} - g_j^-)^2}, i=1,2,\dots,r \tag{11}$$

⑤根据式(12)计算每个节点与最优解的相对贴近度,并通过排序选取贴近度最小的节点。

$$U_i = \frac{d_i^+}{d_i^+ + d_i^-} \tag{12}$$

3) 数据副本的布局

云计算环境下,海洋监测大数据的副本布局过程如下。

输入:海洋监测大数据,节点访问量,节点响应比,节点带宽

输出:海洋监测大数据的副本布局方案

步骤 1 根据 3.2 节创建海洋监测大数据的副本;

步骤 2 选择放置节点的机架;

步骤 3 判断节点的存储空间,若空间足够,则获取该节点的节点访问量、节点响应比和节点带宽;

步骤 4 根据 TOPSIS 建立属性评价矩阵,并对该矩阵进行归一化处理;

步骤 5 根据式(7)一式(9)建立节点关键属性的加权矩阵,确定最优解和最劣解;

步骤 6 根据式(10)一式(12)计算各节点到最优解的相对贴近度,选取贴近度最小的节点;

步骤 7 根据步骤 6,输出海洋监测大数据的副本布局方案。

4 实验分析

仿真实验平台的配置为酷睿四核处理器,2.8 GHz,6 GB 内存。采用开源的 Open stack 云计算管理平台,在云环境下对海洋监测大数据副本的创建和布局进行研究。经调研得知,国家海洋局某预报中心目前监测采集的海洋数据量已多达 PB 级,且以每台监测站每分钟接收 1 kB 数据的速度在不断跃升,数据包含了平均风、气压、气温等要素信息。表 1 列出了该预报中心自 2006 年到 2016 年的数据量和数据存储情况。

表 1 2006—2016 年预报中心的数据存储情况

Table 1 Data storage of prediction center from 2006 to 2016

时间/年	数据大小/TB	存储空间/TB
2006	380	2 ⁹
2007	510	2 ¹⁰
2008	630	2 ¹⁰
2009	725	2 ¹¹
2010	835	2 ¹¹
2011	910	2 ¹¹
2012	1200	2 ¹²
2013	1330	2 ¹²
2014	1405	2 ¹²
2015	1510	2 ¹²
2016	1650	2 ¹³

副本管理及对副本进行布局的目的是在有效保护数据的前提下,减少不必要的副本个数并缩短系统的响应时间。因

此,在实验过程中将 MAO-DRLS 策略与随机存储策略(Random)、面向最小成本的布局策略(C-DRLS)进行比较,通过不断增加数据的访问强度来观察副本个数的动态变化情况和系统对数据的响应时间。

图 2 给出了在不同运行时间下,副本个数的动态变化情况。随着运行时间的不断增加,3 种策略出现一定的偏差,但仍然在可接受的范围内。在传统副本管理机制下,副本的个数一般设置为一个固定的值;在 C-DRLS 策略中,为了得到最小的数据管理成本,数据副本的个数一般取一个固定的较小值;而 MAO-DRLS 策略则是根据数据副本热度值以及副本最大值与最小值间的范围进行动态创建和删除。当访问强度过大时,为数据增加副本,让副本来分担一部分对该对象的访问请求,进而大大减少用户的访问延迟;相反,当访问强度过小时,减少副本量,以避免存储资源的浪费,提高其利用率。

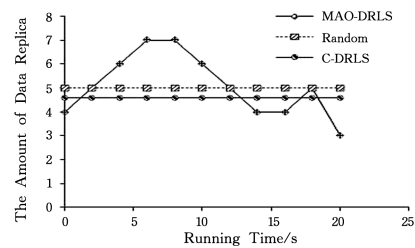


图 2 副本个数的动态变化情况

Fig. 2 Dynamic change of number of replica

从图 3 中可以看出,随着访问次数的增加,3 种策略的系统响应时间也开始增加。当访问次数不多时,3 种策略增加的速度都较为缓慢;当访问次数达到一定数值之后,随机策略的系统响应时间急剧增加,而 MAO-DRLS 策略则增加平缓。其原因在于初创副本时需要一定的累积时间,因此随着访问次数的增加,两种方法的系统响应时间都会不断增加。然而,MAO-DRLS 布局策略在访问的同时按照副本热度进行增加和删除操作,从而有效地控制了副本个数。同时,与 C-DRLS 策略相比,随着访问次数的增加,MAO-DRLS 策略在缩短系统响应时间的效果上更为显著。在布局过程中,MAO-DRLS 策略构建了存储节点来的关键属性,并依据属性矩阵选择更适合的节点来存储副本,减少了对存储空间不必要的浪费,从整体上提高了系统的性能。由此可得,随着访问强度的增加,MAO-DRLS 策略能更有效地缩短系统的响应时间。

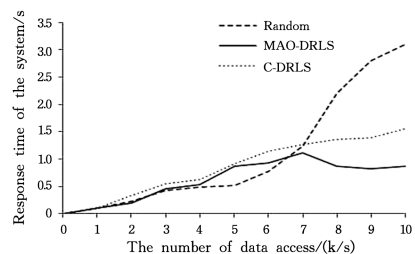


图 3 系统响应时间的对比

Fig. 3 Comparison of system response time

结束语 数据的可靠性和完整性是影响数据利用率的关键因素,当数据丢失或损坏时,需及时地提供补救措施,因此会对数据创建相应的副本。针对数据量爆炸式跃升的海洋监