46 | 缓存系统：如何通过哈希表和队列实现高效访问？

2019-04-01 黄申

程序员的数学基础课 进入课程 >

讲述：黄申
时长 10:19　大小 9.47M

你好，我是黄申。

经过前三大模块的学习，我带你纵览了数学在各个计算机编程领域的重要应用。离散数学是基础数据结构和编程算法的基石，而概率统计论和线性代数，是很多信息检索和机器学习算法的核心。

因此，今天开始，我会综合性地运用之前所讲解的一些知识，设计并实现一些更有实用性的核心模块或者原型系统。通过这种基于案例的讲解，我们可以融汇贯通不同的数学知识，并打造更加高效、更加智能的计算机系统。首先，让我们从一个缓存系统入手，开始综合应用篇的学习。

什么是缓存系统？

缓存（Cache）是计算机系统里非常重要的发明之一，它在编程领域中有非常非常多的应用。小到电脑的中央处理器（CPU）、主板、显卡等硬件，大到大规模的互联网站点，都在广泛使用缓存来提升速度。而在网站的架构设计中，一般不会像 PC 电脑那样采用高速的缓存介质，而是采用普通的服务器内存。但是网站架构所使用的内存容量大得多，至少是数个吉字节 （GB）。

我们可以把缓存定义为数据交换的缓冲区。它的读取速度远远高于普通存储介质，可以帮助系统更快地运行。当某个应用需要读取数据时，会优先从缓存中查找需要的内容，如果找到了则直接获取，这个效率要比读取普通存储更高。如果缓存中没有发现需要的内容，再到普通存储中寻找。

理解了缓存的概念和重要性之后，我们来看下缓存设计的几个主要考量因素。

第一个因素是**硬件的性能**。缓存的应用场景非常广泛，因此没有绝对的条件来定义何种性能可以达到缓存的资格，我们只要确保以高速读取介质可以充当相对低速的介质的缓冲。

第二个因素是**命中率**。缓存之所以能提升访问速度，主要是因为能从高速介质读取，这种情况我们称为“命中”（Hit）。但是，高速介质的成本是非常昂贵的，而且一般也不支持持久化存储，因此放入数据的容量必须受到限制，只能是全局信息的一部分。那么，一定是有部分数据无法在缓存中读取，而必须要到原始的存储中查找，这种情况称之为“错过”（Missed）。

我们通常使用能够在缓存中查找到数据的次数（$|H|$），除以整体的数据访问次数（$|V|$）计算命中率。如果命中率高，系统能够频繁地获取已经在缓存中驻留的数据，速度会明显提升。

$$HitRatio = \frac{|H|}{|V|}$$

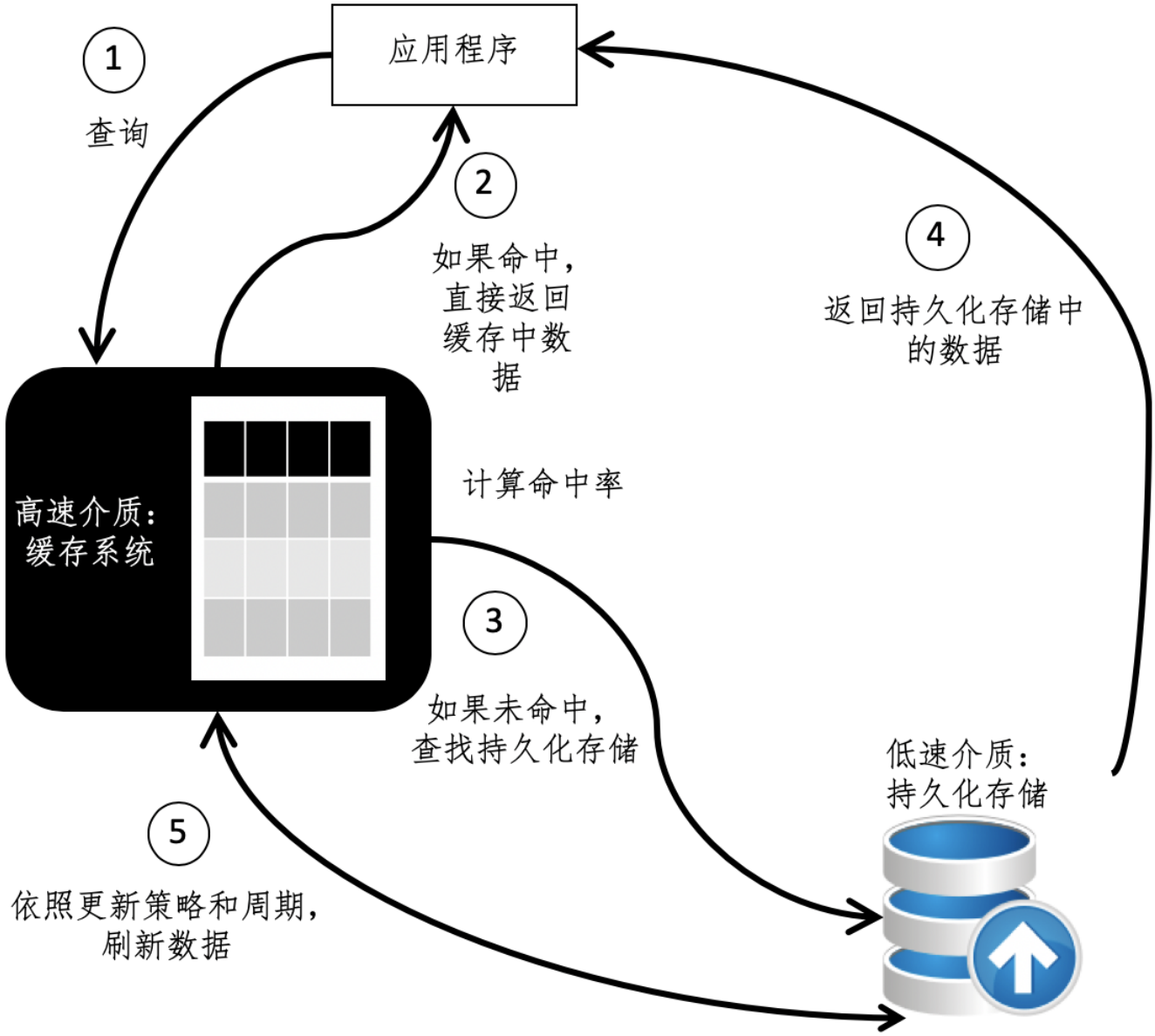
接下来的问题就是，如何在缓存容量有限的情况下，尽可能的提升命中率呢？人们开始研究缓存的淘汰算法，通过某种机制将缓存中可能无用的数据剔除，然后向剔除后空余的空间中补充将来可能会访问的数据。

最基本的策略包括最少使用 LFU（Least Frequently Used）策略和最久未用 LRU（Least Recently Used）策略。LFU 会记录每个缓存对象被使用的频率，并将使用次数最少的对象

剔除。LRU 会记录每个缓存对象最近使用的时间，并将使用时间点最久远的对象给剔除。很显然，我们都希望缓存的命中率越高越好。

第三个因素是**更新周期**。虽然缓存处理的效率非常高，但是，被访问的数据不会一成不变，对于变化速度很快的数据，我们需要将变动主动更新到缓存中，或者让原有内容失效，否则用户将读取到过时的内容。在无法及时更新数据的情况下，高命中率反而变成了坏事，轻则影响用户交互的体验，重则会导致应用逻辑的错误。

为了方便你的理解，我使用下面这张图，来展现这几个主要因素之间的关系，以及缓存系统的工作流程。



如何设计一个缓存系统？

了解这些基本概念之后，我们就可以开始设计自己的缓存系统了。今天，我重点讲解如何使用哈希表和队列，来设计一个基于最久未用 LRU 策略的缓存。

从缓存系统的工作流程可以看出，首先我们需要确认某个被请求的数据，是不是存在于缓存系统中。对于这个功能，哈希表是非常适合的。第 2 讲我讲过哈希的概念，我们可以通过哈希值计算快速定位，加快查找的速度。不论哈希表中有多少数据，读取、插入和删除操作只需要耗费接近常量的时间，也就是 O (1) 的时间复杂度 ，这正好满足了缓存高速运作的需求。

在第 18 讲，我讲了用数组和链表来构造哈希表。在很多编程语言中，哈希表的实现采用的是链地址哈希表。这种方法的主要思想是，先分配一个很大的数组空间，而数组中的每一个元素都是一个链表的头部。随后，我们就可以根据哈希函数算出的哈希值（也叫哈希的 key），找到数组的某个元素及对应的链表，然后把数据添加到这个链表中。之所以要这样设计，是因为存在哈希冲突。所以，我们要尽量找到一个合理的哈希函数，减少冲突发生的机会，提升检索的效率。

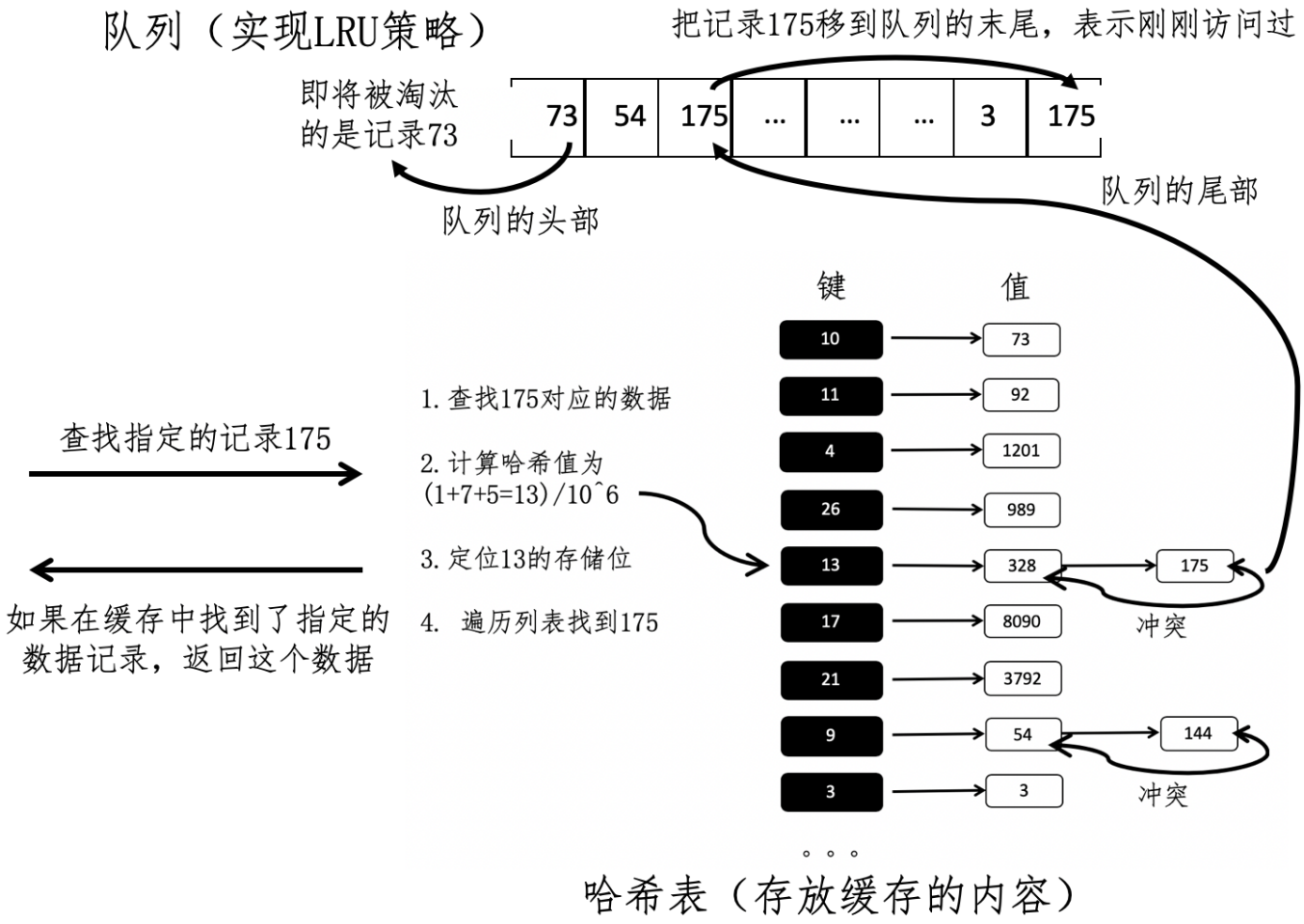
接下来，我们来聊聊缓存淘汰的策略。这里我们使用 LRU 最久未用策略。在这种策略中，系统会根据数据最近一次的使用时间来排序，使用时间最久远的对象会被淘汰。考虑到这个特性，我们可以使用队列。我在讲解广度优先搜索策略时，谈到了队列。这是一种先进先出的数据结构，先进入队列的元素会优先得到处理。如果充分利用队列的特点，我们就很容易找到上一次使用时间最久的数据，具体的实现过程如下。

第一，根据缓存的大小，设置队列的最大值。通常的做法是使用缓存里所能存放数据记录量的上限，作为队列里结点的总数的上限，两者保持一致。

第二，每次访问一个数据后，查看是不是已经存在一个队列中的结点对应于这个数据。如果不是，创造一个对应于这个数据的队列结点，加入队列尾部。如果是，把这个数据所对应的队列结点重新放入队列的尾部。需要注意，这一点是至关重要的。因为这种操作可以保证上一次访问时间最久的数据，所对应的结点永远在队列的头部。

第三，如果队列已满，我们就需要淘汰一些缓存中的数据。由于队列里的结点和缓存中的数据记录量是一致的，所以队列里的结点数达到上限制，也就意味着缓存也已经满了。刚刚提到，由于第二点的操作，我们只需要移除队列头部的结点就可以了。

综合上述关于哈希表和队列的讨论，我们可以画出下面这张框架图。



从这张图可以看到，我们使用哈希表来存放需要被缓存的内容，然后使用队列来实现 LRU 策略。每当数据请求进来的时候，缓存系统首先检查数据记录是不是已经存在哈希表中。如果不存在，那么就返回没有查找到，不会对哈希表和队列进行任何的改变；如果已经存在，就直接从哈希表读取并返回。

与此同时，在队列中进行相应的操作，标记对应记录最后访问的次序。队列头部的结点，对应即将被淘汰的记录。如果缓存或者说队列已满，而我们又需要插入新的缓存数据，那么就需要移除队列头部的结点，以及它所对应的哈希表结点。

接下来，我们结合这张图，以请求数据记录 175 为例，详细看看在这个框架中，每一步是如何运作的。

这里的哈希表所使用的散列函数非常简单，是把数据的所有位数加起来，再对一个非常大的数值例如 10^6 求余。那么，175 的哈希值就是 (1+7+5)/10^6=13。通过哈希值 13 找到对应的链表，然后进行遍历找到记录 175。这个时候我们已经完成了从缓存中获取数据。

不过，由于使用了 LRU 策略来淘汰旧的数据，所以还需要对保存访问状态的队列进行必要的操作。检查队列，我们发现表示 175 的结点已经在队列之中了，说明最近这条数据已经

被访问过，所以我们要把这个结点挪到队列的最后，让它远离被淘汰的命运。

我们再来看另一个例子，假设这次需要获取的是数据记录 1228，这条记录并不在缓存之中，因此除了从低速介质返回获取的记录，我们还要把这个数据记录放入缓存区，并更新保存访问状态的队列。和记录 175 不同的是，1228 最近没有被访问过，所以我们需要在队列的末尾增加一个表示 1201 的结点。这个时候，队列已经满了，我们需要让队列头部的结点 73 出队，然后把相应的记录 73 从哈希表中删除，最后把记录 1228 插入到哈希表中作为缓存。

总结

当今的计算机系统中，缓存扮演着非常重要的角色，小到 CPU，大到互联网站点，我们都需要使用缓存来提升系统性能。基于哈希的数据结构可以帮助我们快速的获取数据，所以非常适合运用在缓存系统之中。

不过，缓存都需要相对昂贵的硬件来实现，因此大小受到限制。所以，我们需要使用不同的策略来淘汰不经常使用的内容，取而代之一些更有可能被使用的内容，增加缓存的命中率，进而提升缓存的使用效果。为了实现这个目标，人们提出了多种淘汰的策略，包括 LRU 和 LFU。

综合上面两点，我们提出一种结合哈希表和队列的缓存设计方案。哈希表负责快速的存储和更新被缓存的内容，而队列负责管理最近被访问的状态，并告知系统哪些数据是要被淘汰并从哈希表中移除。

思考题

请根据今天所讲解的设计思想，尝试编码实现一个基于 LRU 淘汰策略的缓存。哈希表部分可以直接使用编程语言所提供的哈希类数据结构。

欢迎留言和我分享，也欢迎你在留言区写下今天的学习笔记。你可以点击“请朋友读”，把今天的内容分享给你的好友，和他一起精进。

上一篇　45 | 线性代数篇答疑和总结：矩阵乘法的几何意义是什么？

下一篇　47 | 搜索引擎（上）：如何通过倒排索引和向量空间模型，打造一个简单的搜索引擎？

精选留言 (5)

写留言

铁丑-王立...
2019-04-03

1

查找数据是否在队列这个成本也不小啊

展开

作者回复: 这是个好问题，正常的情况下，我们假设哈希表和队列里的数据一致，除非发生了异常。
如果是这样，我们可以利用链表来实现队列，然后使用哈希表存储每个被缓存结果所对应的队列结点，这样我们可以快速访问队列的结点，并使用链表结点的移动来实现队列内结点的移动。

qinggeouy...
2019-04-09

collections 的 OrderedDict()

class LRUCache:

def __init__(self, capacity):...

展开

作者回复: 这部分实现主要侧重于queue实现LRU策略，依赖于Python queue的查找机制，如果Python的queue也有类似哈希表的查询效率，那么也是一种更简洁的实现方式。

铁丑-王立...
2019-04-04

嗯嗯，我下午也在想，这个队列应该是一个双向链表，而且新加的哈希表可能还要解决队列节点的冲突问题。设计的再复杂一点这个结构应该能够和原有的那张缓存哈希表融合。这样还能节省内存。

作者回复: 融合的概念很新颖，代码可读性会弱一点，但是效率很高

失火的夏天
2019-04-01

class LRUCache {

private Node head;// 最近最少使用，类似列队的头，出队
private Node tail;// 最近最多使用，类似队列的尾，入队
private Map<Integer,Node> cache;...

展开

作者回复: 实现的很仔细

失火的夏天
2019-04-01

因为篇幅不够，分段截出来了，这里先声明一个内部类，表示为队列（链表）的节点，接下来的Node节点是这个内部类

```
private class Node{
        private Node prev;...
```

展开