19 | 散列表（中）：如何打造一个工业级水平的散列表？

time.geekbang.org/column/article/64586

通过上一节的学习，我们知道，散列表的查询效率并不能笼统地说成是 O(1)。它跟散列函数、装载因子、散列冲突等都有关系。如果散列函数设计得不好，或者装载因子过高，都可能导致散列冲突发生的概率升高，查询效率下降。

在极端情况下，有些恶意的攻击者，还有可能通过精心构造的数据，使得所有的数据经过散列函数之后，都散列到同一个槽里。如果我们使用的是基于链表的冲突解决方法，那这个时候，散列表就会退化为链表，查询的时间复杂度就从 O(1) 急剧退化为 O(n)。

如果散列表中有 10 万个数据，退化后的散列表查询的效率就下降了 10 万倍。更直接点说，如果之前运行 100 次查询只需要 0.1 秒，那现在就需要 1 万秒。这样就有可能因为查询操作消耗大量 CPU 或者线程资源，导致系统无法响应其他请求，从而达到拒绝服务攻击（DoS）的目的。这也就是散列表碰撞攻击的基本原理。

今天，我们就来学习一下，**如何设计一个可以应对各种异常情况的工业级散列表，来避免在散列冲突的情况下，散列表性能的急剧下降，并且能抵抗散列碰撞攻击？**

如何设计散列函数？

散列函数设计的好坏，决定了散列表冲突的概率大小，也直接决定了散列表的性能。那什么才是好的散列函数呢？

首先，**散列函数的设计不能太复杂**。过于复杂的散列函数，势必会消耗很多计算时间，也就间接的影响到散列表的性能。其次，**散列函数生成的值要尽可能随机并且均匀分布**，这样才能避免或者最小化散列冲突，而且即便出现冲突，散列到每个槽里的数据也会比较平均，不会出现某个槽内数据特别多的情况。

实际工作中，我们还需要综合考虑各种因素。这些因素有关键字的长度、特点、分布、还有散列表的大小等。散列函数各式各样，我举几个常用的、简单的散列函数的设计方法，让你有个直观的感受。

第一个例子就是我们上一节的学生运动会的例子，我们通过分析参赛编号的特征，把编号中的后两位作为散列值。我们还可以用类似的散列函数处理手机号码，因为手机号码前几位重复的可能性很大，但是后面几位就比较随机，我们可以取手机号的后四位作为散列值。这种散列函数的设计方法，我们一般叫作“数据分析法”。

第二个例子就是上一节的开篇思考题，如何实现 Word 拼写检查功能。这里面的散列函数，我们就可以这样设计：将单词中每个字母的ASCII 码值“进位”相加，然后再跟散列表的大小求余、取模，作为散列值。比如，英文单词 nice，我们转化出来的散列值就是下面这样：

```
hash("nice")=(("n" - "a") * 26*26*26 + ("i" - "a")*26*26 + ("c" - "a")*26+ ("e"-"a")) / 78978
```


实际上，散列函数的设计方法还有很多，比如直接寻址法、平方取中法、折叠法、随机数法等，这些你只要了解就行了，不需要全都掌握。

装载因子过大了怎么办？

我们上一节讲到散列表的装载因子的时候说过，装载因子越大，说明散列表中的元素越多，空闲位置越少，散列冲突的概率就越大。不仅插入数据的过程要多次寻址或者拉很长的链，查找的过程也会因此变得很慢。

对于没有频繁插入和删除的静态数据集合来说，我们很容易根据数据的特点、分布等，设计出完美的、极少冲突的散列函数，因为毕竟之前数据都是已知的。

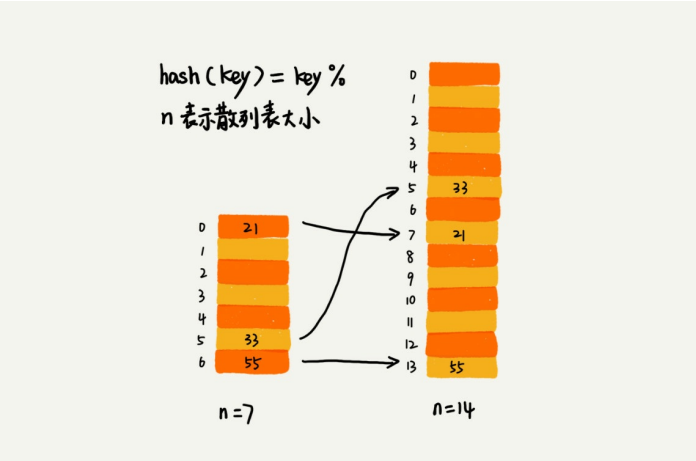
对于动态散列表来说，数据集合是频繁变动的，我们事先无法预估将要加入的数据个数，所以我们也无法事先申请一个足够大的散列表。随着数据慢慢加入，装载因子就会慢慢变大。当装载因子大到一定程度之后，散列冲突就会变得不可接受。这个时候，我们该如何处理呢？

还记得我们前面多次讲的“动态扩容”吗？你可以回想一下，我们是如何做数组、栈、队列的动态扩容的。

针对散列表，当装载因子过大时，我们也可以进行动态扩容，重新申请一个更大的散列表，将数据搬移到这个新散列表中。假设每次扩容我们都申请一个原来散列表大小两倍的空间。如果原来散列表的装载因子是 0.8，那经过扩容之后，新散列表的装载因子就下降为原来的一半，变成了 0.4。

针对数组的扩容，数据搬移操作比较简单。但是，针对散列表的扩容，数据搬移操作要复杂很多。因为散列表的大小变了，数据的存储位置也变了，所以我们需要通过散列函数重新计算每个数据的存储位置。

你可以看我图里这个例子。在原来的散列表中，21 这个元素原来存储在下标为 0 的位置，搬移到新的散列表中，存储在下标为 7 的位置。



对于支持动态扩容的散列表，插入操作的时间复杂度是多少呢？前面章节我已经多次分析过支持动态扩容的数组、栈等数据结构的时间复杂度了。所以，这里我就不啰嗦了，你要是还不清楚的话，可以回去复习一下。

插入一个数据，最好情况下，不需要扩容，最好时间复杂度是 O(1)。最坏情况下，散列表装载因子过高，启动扩容，我们需要重新申请内存空间，重新计算哈希位置，并且搬移数据，所以时间复杂度是 O(n)。用摊还分析法，均摊情况下，时间复杂度接近最好情况，就是 O(1)。

实际上，对于动态散列表，随着数据的删除，散列表中的数据会越来越少，空闲空间会越来越多。如果我们对空间消耗非常敏感，我们可以在装载因子小于某个值之后，启动动态缩容。当然，如果我们更加在意执行效率，能够容忍多消耗一点内存空间，那就可以不用费劲来缩容了。

我们前面讲到，当散列表的装载因子超过某个阈值时，就需要进行扩容。装载因子阈值需要选择得当。如果太大，会导致冲突过多；如果太小，会导致内存浪费严重。

装载因子阈值的设置要权衡时间、空间复杂度。如果内存空间不紧张，对执行效率要求很高，可以降低负载因子的阈值；相反，如果内存空间紧张，对执行效率要求又不高，可以增加负载因子的值，甚至可以大于 1。

如何避免低效地扩容？

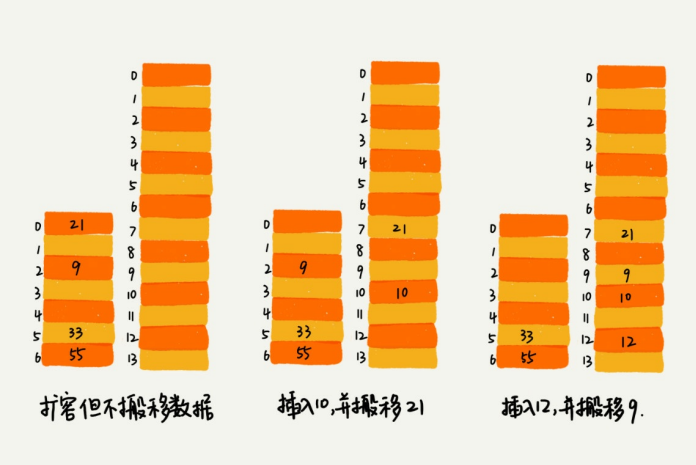
我们刚刚分析得到，大部分情况下，动态扩容的散列表插入一个数据都很快，但是在特殊情况下，当装载因子已经到达阈值，需要先进行扩容，再插入数据。这个时候，插入数据就会变得很慢，甚至会无法接受。

我举一个极端的例子，如果散列表当前大小为 1GB，要想扩容为原来的两倍大小，那就需要对 1GB 的数据重新计算哈希值，并且从原来的散列表搬移到新的散列表，听起来就很耗时，是不是？

如果我们的业务代码直接服务于用户，尽管大部分情况下，插入一个数据的操作都很快，但是，极个别非常慢的插入操作，也会让用户崩溃。这个时候，“一次性”扩容的机制就不合适了。

为了解决一次性扩容耗时过多的情况，我们可以将扩容操作穿插在插入操作的过程中，分批完成。当装载因子触达阈值之后，我们只申请新空间，但并不将老的数据搬移到新散列表中。

当有新数据要插入时，我们将新数据插入新散列表中，并且从老的散列表中拿出一个数据放入到新散列表。每次插入一个数据到散列表，我们都重复上面的过程。经过多次插入操作之后，老的散列表中的数据就一点一点全部搬移到新散列表中了。这样没有了集中的一次性数据搬移，插入操作就都变得很快了。



这期间的查询操作怎么来做呢？对于查询操作，为了兼容了新、老散列表中的数据，我们先从新散列表中查找，如果没有找到，再去老的散列表中查找。

通过这样均摊的方法，将一次性扩容的代价，均摊到多次插入操作中，就避免了一次性扩容耗时过多的情况。这种实现方式，任何情况下，插入一个数据的时间复杂度都是 O(1)。

如何选择冲突解决方法？

上一节我们讲了两种主要的散列冲突的解决办法，开放寻址法和链表法。这两种冲突解决办法在实际的软件开发中都非常常用。比如，Java 中 LinkedHashMap 就采用了链表法解决冲突，ThreadLocalMap 是通过线性探测的开放寻址法来解决冲突。那你知道，这两种冲突解决方法各有什么优势和劣势，又各自适用哪些场景吗？

1. 开放寻址法

我们先来看看，开放寻址法的优点有哪些。

开放寻址法不像链表法，需要拉很多链表。散列表中的数据都存储在数组中，可以有效地利用 CPU 缓存加快查询速度。而且，这种方法实现的散列表，序列化起来比较简单。链表法包含指针，序列化起来就没那么容易。你可不要小看序列化，很多场合都会用到的。我们后面就有一节会讲什么是数据结构序列化、如何序列化，以及为什么要序列化。

我们再来看下，开放寻址法有哪些缺点。

上一节我们讲到，用开放寻址法解决冲突的散列表，删除数据的时候比较麻烦，需要特殊标记已经删除掉的数据。而且，在开放寻址法中，所有的数据都存储在一个数组中，比起链表法来说，冲突的代价更高。所以，使用开放寻址法解决冲突的散列表，装载因子的上限不能太大。这也导致这种方法比链表法更浪费内存空间。

所以，**我总结一下，当数据量比较小、装载因子小的时候，适合采用开放寻址法。这也是 Java 中的ThreadLocalMap使用开放寻址法解决散列冲突的原因**。

2. 链表法

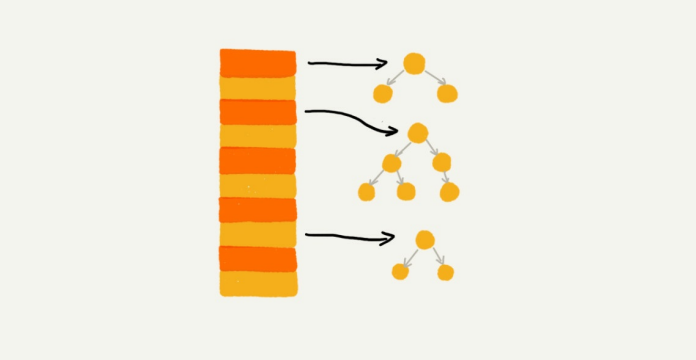
首先，链表法对内存的利用率比开放寻址法要高。因为链表结点可以在需要的时候再创建，并不需要像开放寻址法那样事先申请好。实际上，这一点也是我们前面讲过的链表优于数组的地方。

链表法比起开放寻址法，对大装载因子的容忍度更高。开放寻址法只能适用装载因子小于 1 的情况。接近 1 时，就可能会有大量的散列冲突，导致大量的探测、再散列等，性能会下降很多。但是对于链表法来说，只要散列函数的值随机均匀，即便装载因子变成 10，也就是链表的长度变长了而已，虽然查找效率有所下降，但是比起顺序查找还是快很多。

还记得我们之前在链表那一节讲的吗？链表因为要存储指针，所以对于比较小的对象的存储，是比较消耗内存的，还有可能会让内存的消耗翻倍。而且，因为链表中的结点是零散分布在内存中的，不是连续的，所以对 CPU 缓存是不友好的，这方面对于执行效率也有一定的影响。

当然，如果我们存储的是大对象，也就是说要存储的对象的大小远远大于一个指针的大小（4 个字节或者 8 个字节），那链表中指针的内存消耗在大对象面前就可以忽略了。

实际上，我们对链表法稍加改造，可以实现一个更加高效的散列表。那就是，我们将链表法中的链表改造为其他高效的动态数据结构，比如跳表、红黑树。这样，即便出现散列冲突，极端情况下，所有的数据都散列到同一个桶内，那最终退化成的散列表的查找时间也只不过是 O(logn)。这样也就有效避免了前面讲到的散列碰撞攻击。



所以，**我总结一下，基于链表的散列冲突处理方法比较适合存储大对象、大数据量的散列表，而且，比起开放寻址法，它更加灵活，支持更多的优化策略，比如用红黑树代替链表**。

工业级散列表举例分析

刚刚我讲了实现一个工业级散列表需要涉及的一些关键技术，现在，我就拿一个具体的例子，Java 中的 HashMap 这样一个工业级的散列表，来具体看下，这些技术是怎么应用的。

1. 初始大小

HashMap 默认的初始大小是 16，当然这个默认值是可以设置的，如果事先知道大概的数据量有多大，可以通过修改默认初始大小，减少动态扩容的次数，这样会大大提高 HashMap 的性能。

2. 装载因子和动态扩容

最大装载因子默认是 0.75，当 HashMap 中元素个数超过 0.75*capacity（capacity 表示散列表的容量）的时候，就会启动扩容，每次扩容都会扩容为原来的两倍大小。

3. 散列冲突解决方法

HashMap 底层采用链表法来解决冲突。即使负载因子和散列函数设计得再合理，也免不了会出现拉链过长的情况，一旦出现拉链过长，则会严重影响

HashMap 的性能。

于是，在 JDK1.8 版本中，为了对 HashMap 做进一步优化，我们引入了红黑树。而当链表长度太长（默认超过 8）时，链表就转换为红黑树。我们可以利用红黑树快速增删改查的特点，提高 HashMap 的性能。当红黑树结点个数少于 8 个的时候，又会将红黑树转化为链表。因为在数据量较小的情况下，红黑树要维护平衡，比起链表来，性能上的优势并不明显。

4. 散列函数

散列函数的设计并不复杂，追求的是简单高效、分布均匀。我把它摘抄出来，你可以看看。

```
int hash(Object key) {
int h = key.hashCode()；
return (h ^ (h >>> 16)) & (capitity -1); //capicity 表示散列表的大小
}
```

复制代码

其中，hashCode() 返回的是 Java 对象的 hash code。比如 String 类型的对象的 hashCode() 就是下面这样：

```
public int hashCode() {
int var1 = this.hash;
if(var1 == 0 && this.value.length > 0) {
char[] var2 = this.value;
for(int var3 = 0; var3 < this.value.length; ++var3) {
var1 = 31 * var1 + var2[var3];
}
this.hash = var1;
}
return var1;
}
```

复制代码

解答开篇

今天的内容就讲完了，我现在来分析一下开篇的问题：如何设计的一个工业级的散列函数？如果这是一道面试题或者是摆在你面前的实际开发问题，你会从哪几个方面思考呢？

首先，我会思考，**何为一个工业级的散列表？工业级的散列表应该具有哪些特性？**

结合已经学习过的散列知识，我觉得应该有这样几点要求：

- 支持快速的查询、插入、删除操作；
- 内存占用合理，不能浪费过多的内存空间；
- 性能稳定，极端情况下，散列表的性能也不会退化到无法接受的情况。

如何实现这样一个散列表呢？根据前面讲到的知识，我会从这三个方面来考虑设计思路：

- 设计一个合适的散列函数；
- 定义装载因子阈值，并且设计动态扩容策略；
- 选择合适的散列冲突解决方法。

关于散列函数、装载因子、动态扩容策略，还有散列冲突的解决办法，我们前面都讲过了，具体如何选择，还要结合具体的业务场景、具体的业务数据来具体分析。不过只要我们朝这三个方向努力，就离设计出工业级的散列表不远了。

内容小结

上一节的内容比较偏理论，今天的内容侧重实战。我主要讲了如何设计一个工业级的散列表，以及如何应对各种异常情况，防止在极端情况下，散列表的性能退化过于严重。我分了三部分来讲解这些内容，分别是：如何设计散列函数，如何根据装载因子动态扩容，以及如何选择散列冲突解决方法。

关于散列函数的设计，我们要尽可能让散列后的值随机且均匀分布，这样会尽可能地减少散列冲突，即便冲突之后，分配到每个槽内的数据也比较均匀。除此之外，散列函数的设计也不能太复杂，太复杂就会太耗时间，也会影响散列表的性能。

关于散列冲突解决方法的选择，我对比了开放寻址法和链表法两种方法的优劣和适应的场景。大部分情况下，链表法更加普适。而且，我们还可以通过将链表法中的链表改造成其他动态查找数据结构，比如红黑树，来避免散列表时间复杂度退化成 O(n)，抵御散列碰撞攻击。但是，对于小规模数据、装载因子不高的散列表，比较适合用开放寻址法。

对于动态散列表来说，不管我们如何设计散列函数，选择什么样的散列冲突解决方法。随着数据的不断增加，散列表总会出现装载因子过高的情况。这个时候，我们就需要启动动态扩容。

课后思考

在你熟悉的编程语言中，哪些数据类型底层是基于散列表实现的？散列函数是如何设计的？散列冲突是通过哪种方法解决的？是否支持动态扩容呢？

欢迎留言和我分享，我会第一时间给你反馈。


极客时间
数据结构与算法之美
为工程师量身打造的数据结构与算法私教课
王争
前 Google 工程师
新版升级：点击「 请朋友读 」，10位好友免费读，邀请订阅更有现金奖励。