11 | 垃圾回收（上）

2018-08-15 郑雨迪

11 | 垃圾回收（上）
朗读人：郑雨迪　12′11″ | 5.59M

你应该听说过这么一句话：免费的其实是最贵的。

Java 虚拟机的自动内存管理，将原本需要由开发人员手动回收的内存，交给垃圾回收器来自动回收。不过既然是自动机制，肯定没法做到像手动回收那般精准高效 [1]，而且还会带来不少与垃圾回收实现相关的问题。

接下来的两篇，我们会深入探索 Java 虚拟机中的垃圾回收器。今天这一篇，我们来回顾一下垃圾回收的基础知识。

引用计数法与可达性分析

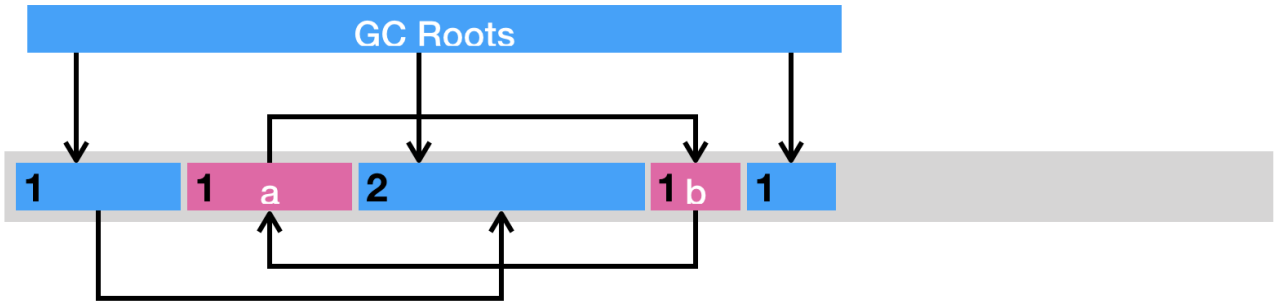
垃圾回收，顾名思义，便是将已经分配出去的，但却不再使用的内存回收回来，以便能够再次分配。在 Java 虚拟机的语境下，垃圾指的是死亡的对象所占据的堆空间。这里便涉及了一个关键的问题：如何辨别一个对象是存是亡？

我们先来讲一种古老的辨别方法：引用计数法（reference counting）。它的做法是为每个对象添加一个引用计数器，用来统计指向该对象的引用个数。一旦某个对象的引用计数器为 0，则说明该对象已经死亡，便可以被回收了。

它的具体实现是这样子的：如果有一个引用，被赋值为某一对象，那么将该对象的引用计数器 +1。如果一个指向某一对象的引用，被赋值为其他值，那么将该对象的引用计数器 -1。也就是说，我们需要截获所有的引用更新操作，并且相应地增减目标对象的引用计数器。

除了需要额外的空间来存储计数器，以及繁琐的更新操作，引用计数法还有一个重大的漏洞，那便是无法处理循环引用对象。

举个例子，假设对象 a 与 b 相互引用，除此之外没有其他引用指向 a 或者 b。在这种情况下，a 和 b 实际上已经死了，但由于它们的引用计数器皆不为 0，在引用计数法的心中，这两个对象还活着。因此，这些循环引用对象所占据的空间将不可回收，从而造成了内存泄露。



目前 Java 虚拟机的主流垃圾回收器采取的是可达性分析算法。这个算法的实质在于将一系列 GC Roots 作为初始的存活对象合集（live set），然后从该合集出发，探索所有能够被该集合引用到的对象，并将其加入到该集合中，这个过程我们也称之为标记（mark）。最终，未被探索到的对象便是死亡的，是可以回收的。

那么什么是 GC Roots 呢？我们可以暂时理解为由堆外指向堆内的引用，一般而言，GC Roots 包括（但不限于）如下几种：

1. Java 方法栈桢中的局部变量；
2. 已加载类的静态变量；
3. JNI handles；
4. 已启动且未停止的 Java 线程。

可达性分析可以解决引用计数法所不能解决的循环引用问题。举例来说，即便对象 a 和 b 相互引用，只要从 GC Roots 出发无法到达 a 或者 b，那么可达性分析便不会将它们加入存活对象合集之中。

虽然可达性分析的算法本身很简明，但是在实践中还是有不少其他问题需要解决的。

比如说，在多线程环境下，其他线程可能会更新已经访问过的对象中的引用，从而造成误报（将引用设置为 null）或者漏报（将引用设置为未被访问过的对象）。

误报并没有什么伤害，Java 虚拟机至多损失了部分垃圾回收的机会。漏报则比较麻烦，因为垃圾回收器可能回收事实上仍被引用的对象内存。一旦从原引用访问已经被回收了的对象，则很有可能会直接导致 Java 虚拟机崩溃。

Stop-the-world 以及安全点

怎么解决这个问题呢？在 Java 虚拟机里，传统的垃圾回收算法采用的是一种简单粗暴的方式，那便是 Stop-the-world，停止其他非垃圾回收线程的工作，直到完成垃圾回收。这也就造成了垃圾回收所谓的暂停时间（GC pause）。

Java 虚拟机中的 Stop-the-world 是通过安全点（safepoint）机制来实现的。当 Java 虚拟机收到 Stop-the-world 请求，它便会等待所有的线程都到达安全点，才允许请求 Stop-the-world 的线程进行独占的工作。

这篇博客 [2] 还提到了一种比较另类的解释：安全词。一旦垃圾回收线程喊出了安全词，其他非垃圾回收线程便会一一停下。

当然，安全点的初始目的并不是让其他线程停下，而是找到一个稳定的执行状态。在这个执行状态下，Java 虚拟机的堆栈不会发生变化。这么一来，垃圾回收器便能够“安全”地执行可达性分析。

举个例子，当 Java 程序通过 JNI 执行本地代码时，如果这段代码不访问 Java 对象、调用 Java 方法或者返回至原 Java 方法，那么 Java 虚拟机的堆栈不会发生改变，也就代表着这段本地代码可以作为同一个安全点。

只要不离开这个安全点，Java 虚拟机便能够在垃圾回收的同时，继续运行这段本地代码。

由于本地代码需要通过 JNI 的 API 来完成上述三个操作，因此 Java 虚拟机仅需在 API 的入口处进行安全点检测（safepoint poll），测试是否有其他线程请求停留在安全点里，便可以在必要的时候挂起当前线程。

除了执行 JNI 本地代码外，Java 线程还有其他几种状态：解释执行字节码、执行即时编译器生成的机器码和线程阻塞。阻塞的线程由于处于 Java 虚拟机线程调度器的掌控之下，因此属于安全点。

其他几种状态则是运行状态，需要虚拟机保证在可预见的时间内进入安全点。否则，垃圾回收线程可能长期处于等待所有线程进入安全点的状态，从而变相地提高了垃圾回收的暂停时间。

对于解释执行来说，字节码与字节码之间皆可作为安全点。Java 虚拟机采取的做法是，当有安全点请求时，执行一条字节码便进行一次安全点检测。

执行即时编译器生成的机器码则比较复杂。由于这些代码直接运行在底层硬件之上，不受 Java 虚拟机掌控，因此在生成机器码时，即时编译器需要插入安全点检测，以避免机器码长时间没有安全点检测的情况。HotSpot 虚拟机的做法便是在生成代码的方法出口以及非计数循环的循环回边（back-edge）处插入安全点检测。

那么为什么不在每一条机器码或者每一个机器码基本块处插入安全点检测呢？原因主要有两个。

第一，安全点检测本身也有一定的开销。不过 HotSpot 虚拟机已经将机器码中安全点检测简化为一个内存访问操作。在有安全点请求的情况下，Java 虚拟机会将安全点检测访问的内存所在的页设置为不可读，并且定义一个 segfault 处理器，来截获因访问该不可读内存而触发 segfault 的线程，并将它们挂起。

第二，即时编译器生成的机器码打乱了原本栈桢上的对象分布状况。在进入安全点时，机器码还需提供一些额外的信息，来表明哪些寄存器，或者当前栈帧上的哪些内存空间存放着指向对象的引用，以便垃圾回收器能够枚举 GC Roots。

由于这些信息需要不少空间来存储，因此即时编译器会尽量避免过多的安全点检测。

不过，不同的即时编译器插入安全点检测的位置也可能不同。以 Graal 为例，除了上述位置外，它还会在计数循环的循环回边处插入安全点检测。其他的虚拟机也可能选取方法入口而非方法出口来插入安全点检测。

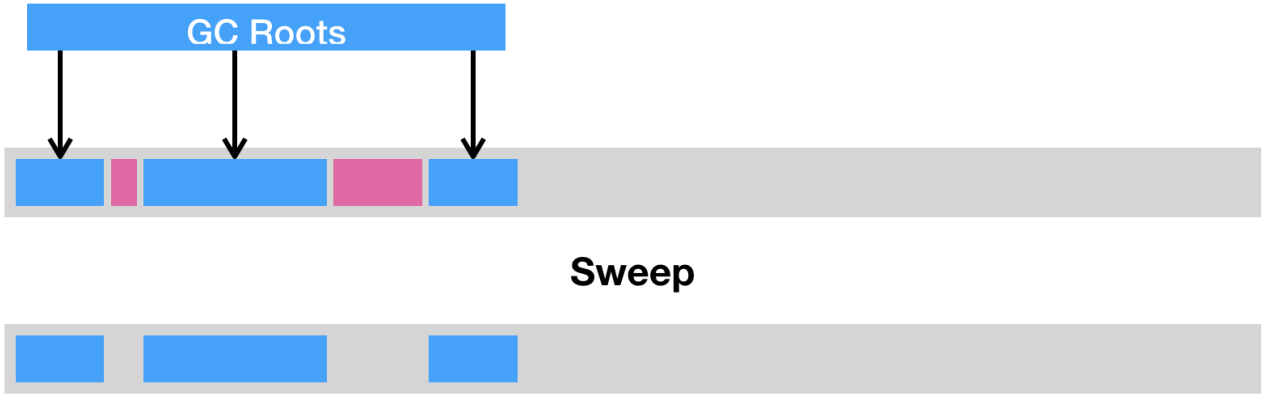
不管如何，其目的都是在可接受的性能开销以及内存开销之内，避免机器码长时间不进入安全点的情况，间接地减少垃圾回收的暂停时间。

除了垃圾回收之外，Java 虚拟机其他一些对堆栈内容的一致性有要求的操作也会用到安全点这一机制。我会在涉及的时侯再进行具体的讲解。

垃圾回收的三种方式

当标记完所有的存活对象时，我们便可以进行死亡对象的回收工作了。主流的基础回收方式可分为三种。

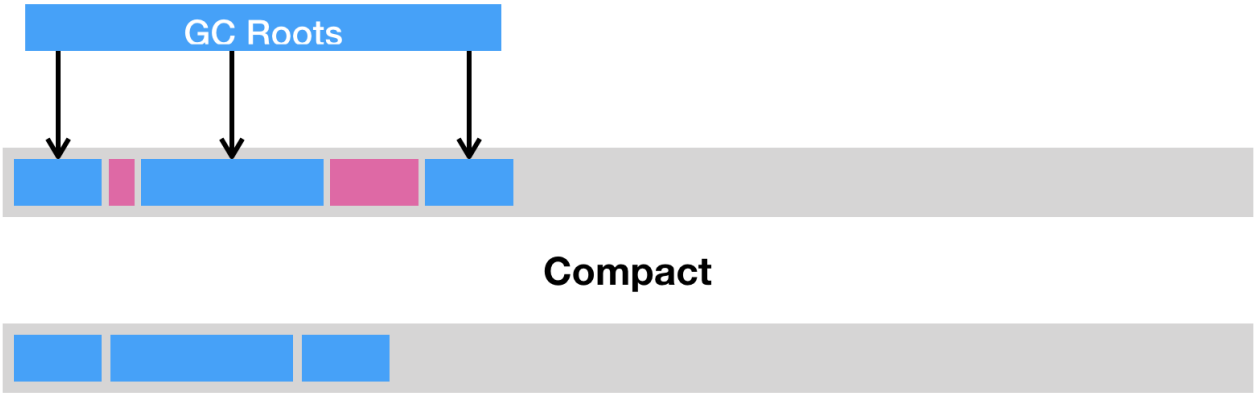
第一种是清除（sweep），即把死亡对象所占据的内存标记为空闲内存，并记录在一个空闲列表（free list）之中。当需要新建对象时，内存管理模块便会从该空闲列表中寻找空闲内存，并划分给新建的对象。



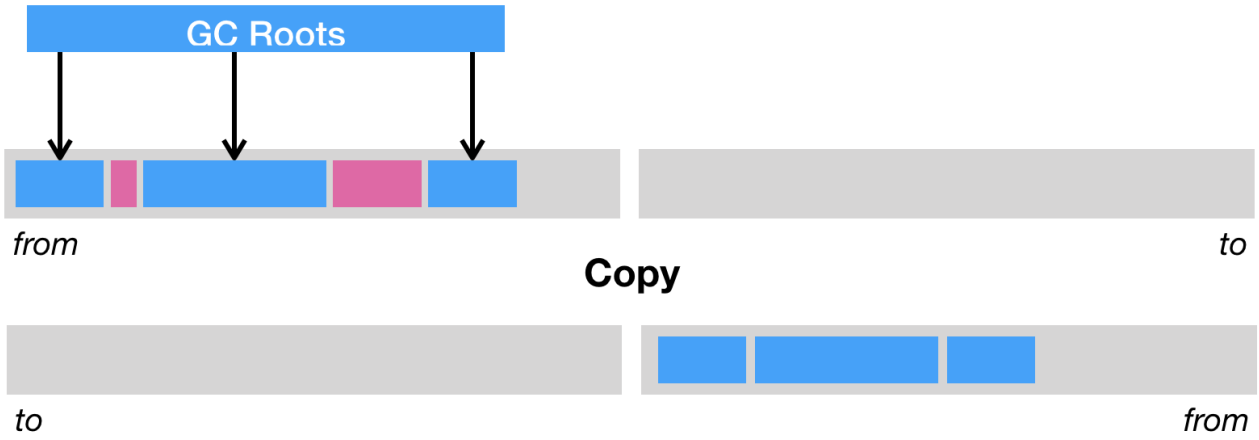
清除这种回收方式的原理及其简单，但是有两个缺点。一是会造成内存碎片。由于 Java 虚拟机的堆中对象必须是连续分布的，因此可能出现总空闲内存足够，但是无法分配的极端情况。

另一个则是分配效率较低。如果是一块连续的内存空间，那么我们可以通过指针加法（pointer bumping）来做分配。而对于空闲列表，Java 虚拟机则需要逐个访问列表中的项，来查找能够放入新建对象的空闲内存。

第二种是压缩（compact），即把存活的对象聚集到内存区域的起始位置，从而留下一段连续的内存空间。这种做法能够解决内存碎片化的问题，但代价是压缩算法的性能开销。



第三种则是复制（copy），即把内存区域分为两等分，分别用两个指针 from 和 to 来维护，并且只是用 from 指针指向的内存区域来分配内存。当发生垃圾回收时，便把存活的对象复制到 to 指针指向的内存区域中，并且交换 from 指针和 to 指针的内容。复制这种回收方式同样能够解决内存碎片化的问题，但是它的缺点也极其明显，即堆空间的使用效率极其低下。



当然，现代的垃圾回收器往往会综合上述几种回收方式，综合它们优点的同时规避它们的缺点。在下一篇中我们会详细介绍 Java 虚拟机中垃圾回收算法的具体实现。

总结与实践

今天我介绍了垃圾回收的一些基础知识。

Java 虚拟机中的垃圾回收器采用可达性分析来探索所有存活的对象。它从一系列 GC Roots 出发，边标记边探索所有被引用的对象。

为了防止在标记过程中堆栈的状态发生改变，Java 虚拟机采取安全点机制来实现 Stop-the-world 操作，暂停其他非垃圾回收线程。

回收死亡对象的内存共有三种方式，分别为：会造成内存碎片的清除、性能开销较大的压缩、以及堆使用效率较低的复制。

今天的实践环节，你可以体验一下无安全点检测的计数循环带来的长暂停。你可以分别测单独跑 foo 方法或者 bar 方法的时间，然后与合起来跑的时间比较一下。

```
// time java SafepointTestp// 你还可以使用如下几个选项
// -XX:+PrintGC
// -XX:+PrintGCApplicationStoppedTime
// -XX:+PrintSafepointStatistics
// -XX:+UseCountedLoopSafepoints
ublic class SafepointTest {
  static double sum = 0;
 public static void foo() {
    for (int i = 0; i < 0x22222222; i++) {
      sum += wrMpth.log10);
    }
  }
```

```
  public static void bar() {
     for (int i = 0; i < 1500000_000; i++) {
       new Object().hashCode();
   // 逃逸    }
    }

  public static void main(String[] args) {
     new Thread(SafepointTest::foo).start();
     new Thread(SafepointTest::bar).start();
    }
}
```

[1] https://media.giphy.com/media/EZ8QO0myvsSk/giphy.gif

[2] http://psy-lob-saw.blogspot.com/2015/12/safepoints.html

通过留言可与作者互动