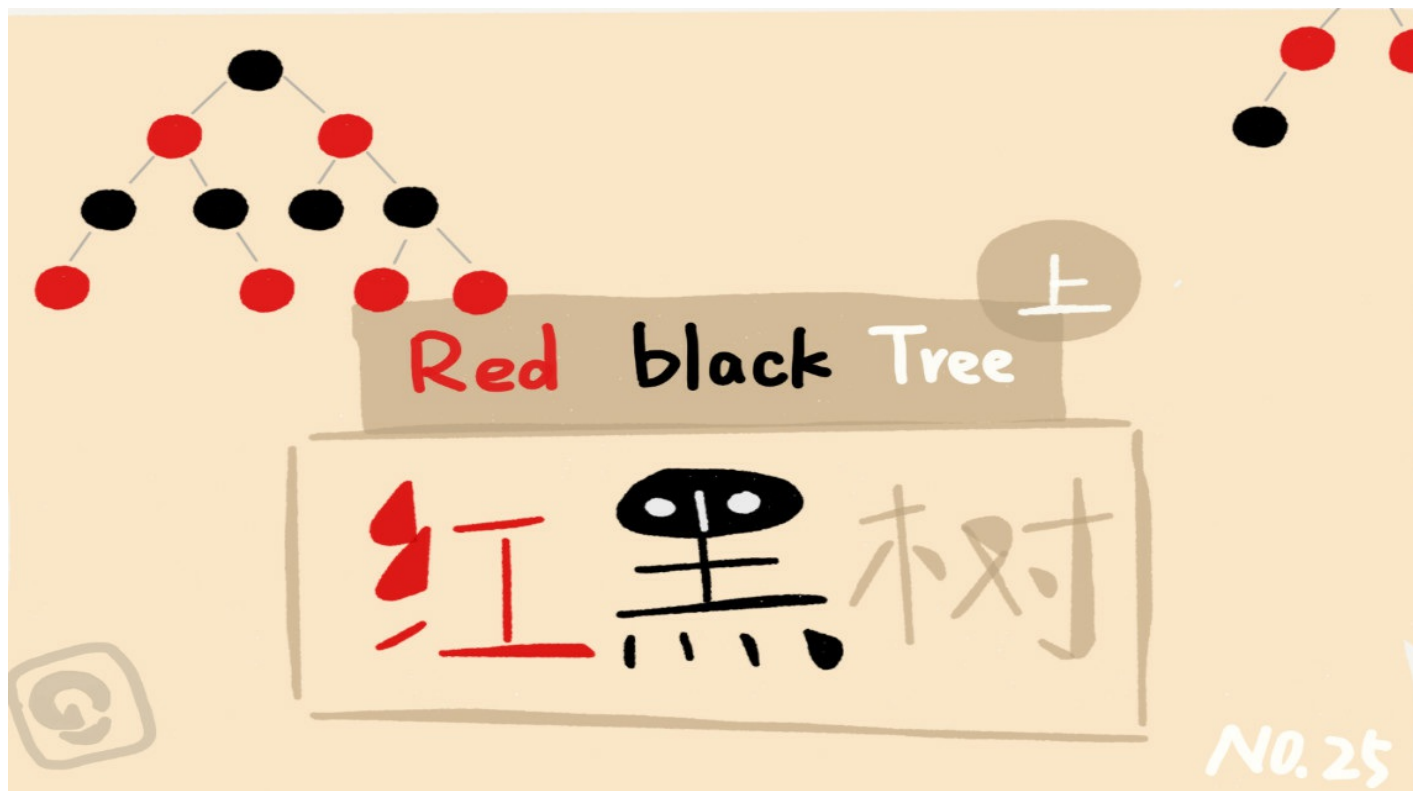


25讲红黑树（上）：为什么工程中都用红黑树这种二叉树



上两节，我们依次讲了树、二叉树、二叉查找树。二叉查找树是最常用的一种二叉树，它支持快速插入、删除、查找操作，各个操作的时间复杂度跟树的高度成正比，理想情况下，时间复杂度是 $O(\log n)$ 。

不过，二叉查找树在频繁的动态更新过程中，可能会出现树的高度远大于 $\log_2 n$ 的情况，从而导致各个操作的效率下降。极端情况下，二叉树会退化为链表，时间复杂度会退化到 $O(n)$ 。我上一节说了，要解决这个复杂度退化的问题，我们需要设计一种平衡二叉查找树，也就是今天要讲的这种数据结构。

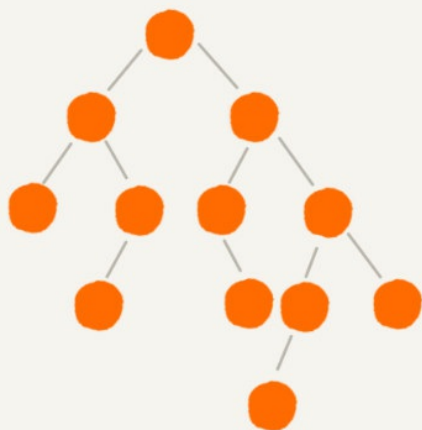
很多书籍里，但凡讲到平衡二叉查找树，就会拿红黑树作为例子。不仅如此，如果你有一定的开发经验，你会发现，在工程中，很多用到平衡二叉查找树的地方都会用红黑树。你有没有想过，为什么工程中都喜欢用红黑树，而不是其他平衡二叉查找树呢？

带着这个问题，让我们一起来学习今天的内容吧！

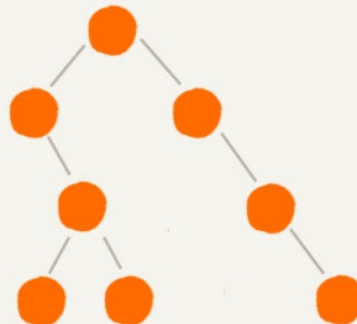
什么是“平衡二叉查找树”？

平衡二叉树的严格定义是这样的：二叉树中任意一个节点的左右子树的高度相差不能大于1。从这个定义来看，上一节我们讲的完全二叉树、满二叉树其实都是平衡二叉树，但是非完全二叉树也有可能是平衡二叉树。

平衡二叉树



非平衡二叉树



平衡二叉查找树不仅满足上面平衡二叉树的定义，还满足二叉查找树的特点。最先被发明的平衡二叉查找树是[AVL树](#)，它严格符合我刚讲到的平衡二叉查找树的定义，即任何节点的左右子树高度相差不超过1，是一种高度平衡的二叉查找树。

但是很多平衡二叉查找树其实并没有严格符合上面的定义（树中任意一个节点的左右子树的高度相差不能大于1），比如我们下面要讲的红黑树，它从根节点到各个叶子节点的最长路径，有可能会比最短路径大一倍。

我们学习数据结构和算法是为了应用到实际的开发中的，所以，我觉得没必要去死抠定义。对于平衡二叉查找树这个概念，我觉得我们要从这个数据结构的由来，去理解“平衡”的意思。

发明平衡二叉查找树这类数据结构的初衷是，解决普通二叉查找树在频繁的插入、删除等动态更新的情况下，出现时间复杂度退化的问题。

所以，平衡二叉查找树中“平衡”的意思，其实就是让整棵树左右看起来比较“对称”、比较“平衡”，不要出现左子树很高、右子树很矮的情况。这样就能让整棵树的高度相对来说低一些，相应的插入、删除、查找等操作的效率高一些。

所以，如果我们现在设计一个新的平衡二叉查找树，只要树的高度不比 $\log_2 n$ 大很多（比如树的高度仍然是对数量级的），尽管它不符合我们前面讲的严格的平衡二叉查找树的定义，但我们仍然可以说，这是一个合格的平衡二叉查找树。

如何定义一棵“红黑树”？

平衡二叉查找树其实有很多，比如，Splay Tree（伸展树）、Treap（树堆）等，但是我们提到平衡二叉查找树，听到的基本都是红黑树。它的出场率甚至要高于“平衡二叉查找树”这几个字，有时候，我们甚至默认平衡二叉查找树就是红黑树，那我们现在来看看这个“明星树”。

红黑树的英文是“Red-Black Tree”，简称R-B Tree。它是一种不严格的平衡二叉查找树，我前面说了，它的定义是不严格符合平衡二叉查找树的定义的。那红黑树究竟是怎么定义的呢？

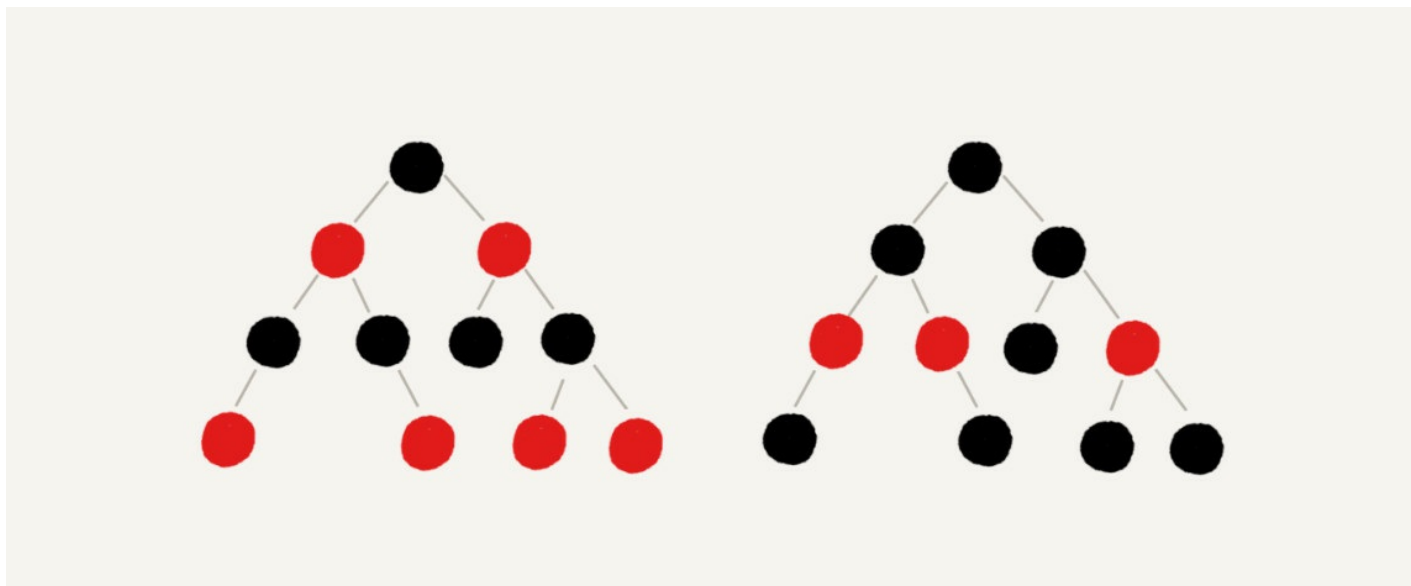
顾名思义，红黑树中的节点，一类被标记为黑色，一类被标记为红色。除此之外，一棵红黑树还需要满足这样几个要求：

- 根节点是黑色的；

- 每个叶子节点都是黑色的空节点（NIL），也就是说，叶子节点不存储数据；
- 任何相邻的节点都不能同时为红色，也就是说，红色节点是被黑色节点隔开的；
- 每个节点，从该节点到达其可达叶子节点的所有路径，都包含相同数目的黑色节点；

这里的第二点要求“叶子节点都是黑色的空节点”，稍微有些奇怪，它主要是为了简化红黑树的代码实现而设置的，下一节我们讲红黑树的实现的时候会讲到。这节我们暂时不考虑这一点，所以，在画图和讲解的时候，我将黑色的、空的叶子节点都省略掉了。

为了让你更好地理解上面的定义，我画了两个红黑树的图例，你可以对照着看下。



为什么说红黑树是“近似平衡”的？

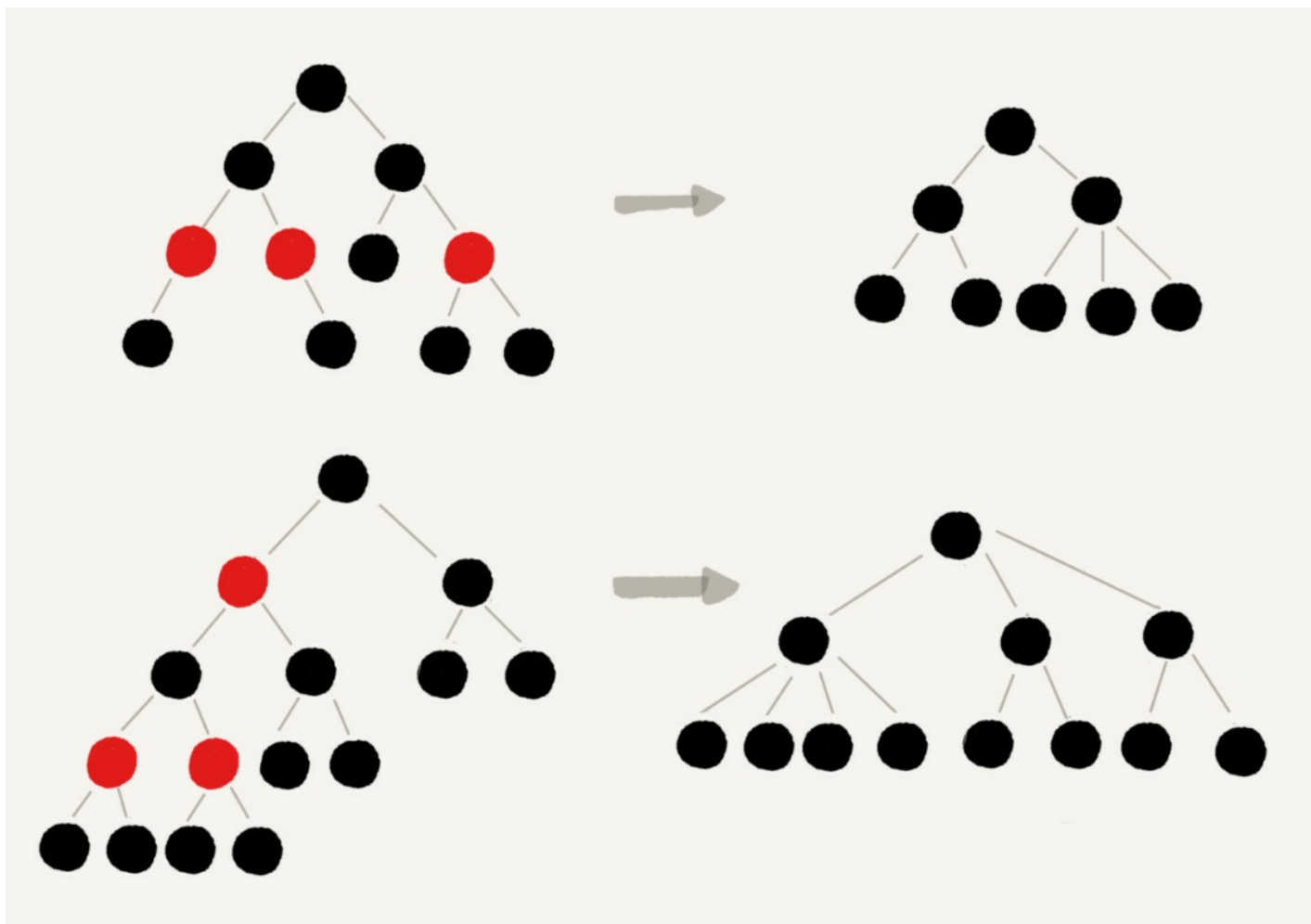
我们前面也讲到，平衡二叉查找树的初衷，是为了解决二叉查找树因为动态更新导致的性能退化问题。所以，“平衡”的意思可以等价为性能不退化。“近似平衡”就等价为性能不会退化的太严重。

我们在上一节讲过，二叉查找树很多操作的性能都跟树的高度成正比。一棵极其平衡的二叉树（满二叉树或完全二叉树）的高度大约是 $\log_2 n$ ，所以如果要证明红黑树是近似平衡的，我们只需要分析，红黑树的高度是否比较稳定地趋近 $\log_2 n$ 就好了。

红黑树的高度不是很好分析，我带你一步一步来推导。

首先，我们来看，如果我们将红色节点从红黑树中去掉，那单纯包含黑色节点的红黑树的高度是多少呢？

红色节点删除之后，有些节点就没有父节点了，它们会直接拿这些节点的祖父节点（父节点的父节点）作为父节点。所以，之前的二叉树就变成了四叉树。



前面红黑树的定义里有这么一条：从任意节点到可达的叶子节点的每个路径包含相同数目的黑色节点。我们从四叉树中取出某些节点，放到叶节点位置，四叉树就变成了完全二叉树。所以，仅包含黑色节点的四叉树的高度，比包含相同节点个数的完全二叉树的高度还要小。

上一节我们说，完全二叉树的高度近似 $\log_2 n$ ，这里的四叉“黑树”的高度要低于完全二叉树，所以去掉红色节点的“黑树”的高度也不会超过 $\log_2 n$ 。

我们现在知道只包含黑色节点的“黑树”的高度，那我们现在把红色节点加回去，高度会变成多少呢？

从上面我画的红黑树的例子和定义看，在红黑树中，红色节点不能相邻，也就是说，有一个红色节点就要至少有一个黑色节点，将它跟其他红色节点隔开。红黑树中包含最多黑色节点的路径不会超过 $\log_2 n$ ，所以加入红色节点之后，最长路径不会超过 $2\log_2 n$ ，也就是说，红黑树的高度近似 $2\log_2 n$ 。

所以，红黑树的高度只比高度平衡的AVL树的高度（ $\log_2 n$ ）仅仅大了一倍，在性能上，下降得并不多。这样推导出来的结果不够精确，实际上红黑树的性能更好。

解答开篇

我们刚刚提到了很多平衡二叉查找树，现在我们就来看下，为什么在工程中大家都喜欢用红黑树这种平衡二叉查找树？

我们前面提到Treap、Splay Tree，绝大部分情况下，它们操作的效率都很高，但是也无法避免极端情况下时间复杂度的退化。尽管这种情况出现的概率不大，但是对于单次操作时间非常敏感的场景来说，它们并不适用。

AVL树是一种高度平衡的二叉树，所以查找的效率非常高，但是，有利就有弊，AVL树为了维持这种高度的平衡，就要付出更多的代价。每次插入、删除都要做调整，就比较复杂、耗时。所以，对于有频繁的插入、删除操作的数据集合，使用AVL树的

代价就有点高了。

红黑树只是做到了近似平衡，并不是严格的平衡，所以在维护平衡的成本上，要比AVL树要低。

所以，红黑树的插入、删除、查找各种操作性能都比较稳定。对于工程应用来说，要面对各种异常情况，为了支撑这种工业级的应用，我们更倾向于这种性能稳定的平衡二叉查找树。

内容小结

很多同学都觉得红黑树很难，的确，它算是最难掌握的一种数据结构。其实红黑树最难的地方是它的实现，我们今天还没有涉及，下一节我会专门来讲。

不过呢，我认为，我们其实不应该把学习的侧重点，放到它的实现上。那你可能要问了，关于红黑树，我们究竟需要掌握哪些东西呢？

还记得我多次说过的观点吗？**我们学习数据结构和算法，要学习它的由来、特性、适用的场景以及它能解决的问题。对于红黑树，也不例外。你如果能搞懂这几个问题，其实就已经足够了。**

红黑树是一种平衡二叉查找树。它是为了解决普通二叉查找树在数据更新的过程中，复杂度退化的问题而产生的。红黑树的高度近似 $\log_2 n$ ，所以它是近似平衡，插入、删除、查找操作的时间复杂度都是 $O(\log n)$ 。

因为红黑树是一种性能非常稳定的二叉查找树，所以，在工程中，但凡是用到动态插入、删除、查找数据的场景，都可以用到它。不过，它实现起来比较复杂，如果自己写代码实现，难度会有些高，这个时候，我们其实更倾向用跳表来替代它。

课后思考

动态数据结构支持动态地数据插入、删除、查找操作，除了红黑树，我们前面还学习过哪些呢？能对比一下各自的优势、劣势，以及应用场景吗？

欢迎留言和我分享，我会第一时间给你反馈。

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。

精选留言



您的好友William

老师做图的软件用的是啥啊？我看了不少的极客时间的blog，感觉老师这个是最好看的哈哈。

2018-11-16 11:14



Smallfly

动态数据结构的动态是什么意思？

动态是指在运行时该数据结构所占的内存会扩大或缩小。

数组是一种静态的数据结构，在创建时内存大小已经确定，不管有没有插入数据。而链表是动态的数据结构，插入数据 `alloc` 内存，删除数据 `release` 内存。

栈、队列、散列表、跳表、树都是抽象的数据结构，它们在内存中存在的形式都要依赖于数组或者链表。

如果用链表实现，很明显它们是动态的数据结构；如果用数组实现，那么在扩容的时候会创建更大内存的数组，原数组被废弃，从抽象角度看，它们仍旧是动态的。

2018-11-16 10:34

作者回复

我看smallfly大牛好像对动态数据结构有些误解，可能其他同学也会有。所以，我解释一下：动态数据结构是支持动态的更新操作，里面存储的数据是时刻在变化的，通俗一点讲，它不仅仅支持查询，还支持删除、插入数据。而且，这些操作都非常高效。如果不高效，也就算不上是有效的动态数据结构了。所以，这里的红黑树算一个，支持动态的插入、删除、查找，而且效率都很高。链表、队列、栈实际上算不上，因为操作非常有限，查询效率不高。那现在你再想一下还有哪些支持动态插入、删除、查找数据并且效率都很高的数据结构呢？？

2018-11-16 14:07

fy

老师，可以教我们刷下leetcode上的算法，毕竟讲了这么多，还是练习的。这样的提升才有巨大的帮助

2018-11-18 14:06



allan

看了这篇文章还是有很多疑惑，主要是 不理解红黑树满足的几个性质，为什么要那样要求？

2018-12-02 16:31



失火的夏天

动态数据结构有链表，栈，队列，哈希表等等。链表适合遍历的场景，插入和删除操作方便，栈和队列可以算一种特殊的链表，分别适用先进后出和先进先出的场景。哈希表适合插入和删除比较少（尽量少的扩容和缩容），查找比较多时候。红黑树对数据要求有序，对数据增删查都有一定要求的时候。（个人看法，欢迎老师指正）

2018-11-16 07:16

作者回复

刚看错了。写的不错

2018-11-16 10:07



kakasi

散列表：插入删除查找都是 $O(1)$ ，是最常用的，但其缺点是不能顺序遍历以及扩容缩容的性能损耗。适用于那些不需要顺序遍历，数据更新不那么频繁的。

跳表：插入删除查找都是 $O(\log n)$ ，并且能顺序遍历。缺点是空间复杂度 $O(n)$ 。适用于不那么在意内存空间的，其顺序遍历和区间查找非常方便。

红黑树：插入删除查找都是 $O(\log n)$ ，中序遍历即是顺序遍历，稳定。缺点是难以实现，去查找不方便。其实跳表更佳，但红黑树已经用于很多地方了。

2018-12-02 14:35



gg

我看smallfly大牛好像对动态数据结构有些误解，可能其他同学也会有。所以，我解释一下：动态数据结构是支持动态的更新操作，里面存储的数据是时刻在变化的，通俗一点讲，它不仅仅支持查询，还支持删除、插入数据。而且，这些操作都非常高效。如果不高效，也就算不上是有效的动态数据结构了。所以，这里的红黑树算一个，支持动态的插入、删除、查找，而且效率都很高。链表、队列、栈实际上算不上，因为操作非常有限，查询效率不高。那现在你再想一下还有哪些支持动态插入、删除、查找数据并且效率都很高的数据结构呢？

2018-11-16 14:06

null

红黑树的节点颜色，是如何确定的，如何知道在新增一个节点时，该节点是什么颜色？

从红黑树需要满足的四个要求来看：

1. 根节点为黑色
2. 所有叶子节点为黑色，且不存储数据
3. 相邻两个节点不能都为红色
4. 从某节点到其所有叶子节点的路径中，黑色节点数相同

从这四点要求，好像我一根树全是黑色，也是满足其定义的。这里用红黑两色区分各节点，意义是啥？

谢谢老师

2018-11-16 08:12

作者回复

新插入的节点都是红色的。全黑不可能的。红黑区分的意义你等下一节课看看能懂不

2018-11-16 10:05



朱月俊

动态数据结构比如本篇的平衡二叉查找树，还有就是跳表，跳表也支持动态插入，删除，查询，也很快，不同点是跳表还能支持快速的范围查询。比如leveldb中的memtable，redis都是使用跳表实现的，而也有用红黑树实现的memtable。

除此之外，跳表还支持多写多读，而红黑树不可以，这些场景下显然用跳表合适。

2018-11-17 10:27

有铭

我除了看懂红黑树是一种“性能上比较均衡”的二叉树这个结论外，完全没搞懂它为啥能获得这个“比较平衡”的结果

2018-11-16 15:50

farFlight

老师好，请问之后讲到heap sort这些的时候会提到斐波那契堆吗？最近在看相关但是觉得网上的资料讲得都不太清楚。

2018-11-16 05:31



Laughing_Lz

老师，你这里提到：我画了两个红黑树的图例，你可以对照着看下。

这下面的两张图，左边第一个，四个叶子节点都是红色呀？我有点看不懂。。

规则不是说叶子节点都是不存储数据的黑色空节点吗？这里是不是画错了？

如果你是说省略了黑色叶子节点，那就是说这四个红色节点下其实还有叶子节点？但是这样又不能满足规则四：每个节点，从该节点到达其可达叶子节点的所有路径，都包含相同数目的黑色节点...除非第三层的第三个黑色子节点下也有叶子节点？

2018-12-02 23:39

作者回复

是的 都会有nil的黑色叶子节点的

2018-12-03 09:47



丁卯兔

动态的数据结构可能跳跃链表算一个，实现比红黑树简单，查询，删除，插入都可以；大顶堆，小顶堆应该也还行。

2018-11-28 23:20



! null

没太看懂去掉红色节点生成全黑四叉树，又把红色节点加进去的目的是什么？感觉不懂这个整个红黑树就没学懂。

2018-11-21 09:42



insist

支持高效的查找、插入、删除操作的动态数据结构有跳表、散列表、平衡二叉查找树

2018-11-18 12:56



阿K

以前只知道概念和实现，不知道为什么这么实现。

要是早几年看到这篇文章，我也不至于这样了

2018-11-17 16:33



wean

“我们从四叉树中取出某些节点，放到叶节点位置，四叉树就变成了完全二叉树”

老师，这里的某些节点应该怎么取，才能让四叉树变成二叉树，不是很明白，希望老师讲解一下，谢谢

2018-11-16 12:13



不似旧日

没明白红节点与黑节点的存在意义

2019-01-03 16:35



luo

有跳表，hash表，还有红黑树 执行效率：跳表与红黑树的时间复杂度为 $O(\log n)$ ，而hash表的性能为 $O(1)$ ，所以在查找方面只要数据分布比较均匀 hash表的性能优势体现的比较明显。

空间复杂度：而言 跳表是比较高需要额外的 $O(n)$ 的复杂度。

稳定性：红黑树的稳定性高于跳表跟hash表，但是不好实现

有序方面：红黑树和跳表都属于有序的，而hash表则是无序的，所以适合的场景也得做下区分。

2018-12-20 16:45



Geek_zy

可不可以这样理解

动态：就是数据经常变化的一个结构

相反的静态：就是数据趋于稳定，基本上不会做什么变化

2018-12-17 09:56