**在Skip List之前：**

1. Skip List是一种随机化的数据结构，基于并联的链表，其效率可比拟于二叉查找树（对于大多数操作需要O(log n)平均时间）。基本上，跳跃列表是对有序的链表增加上附加的前进链接，增加是以随机化的方式进行的，所以在链表中的查找可以快速的跳过部分元素 (因此得名)。
2. Skip List 通过随机数生成器来进行平衡。 尽管 Skip List可能会出现糟糕的最坏性能，但没有任何输入序列能总是导致最坏的情况发生（非常类似于随机选择枢轴元素时的快速排序）。 Skip List不太可能是显著不平衡的（例如，对于超过 250 个元素的字典，搜索将花费超过预期时间的三倍的机会小于百万分之一）。

**跳跃列表/跳跃表/跳表(Skip List)：**

**性质：**

1. 每个节点是红色/黑色。
2. 根节点为黑色。
3. 红色节点的子节点必须是黑色。
4. 从一个节点到null的每一条路径都必须包含的黑色节点数目相同。

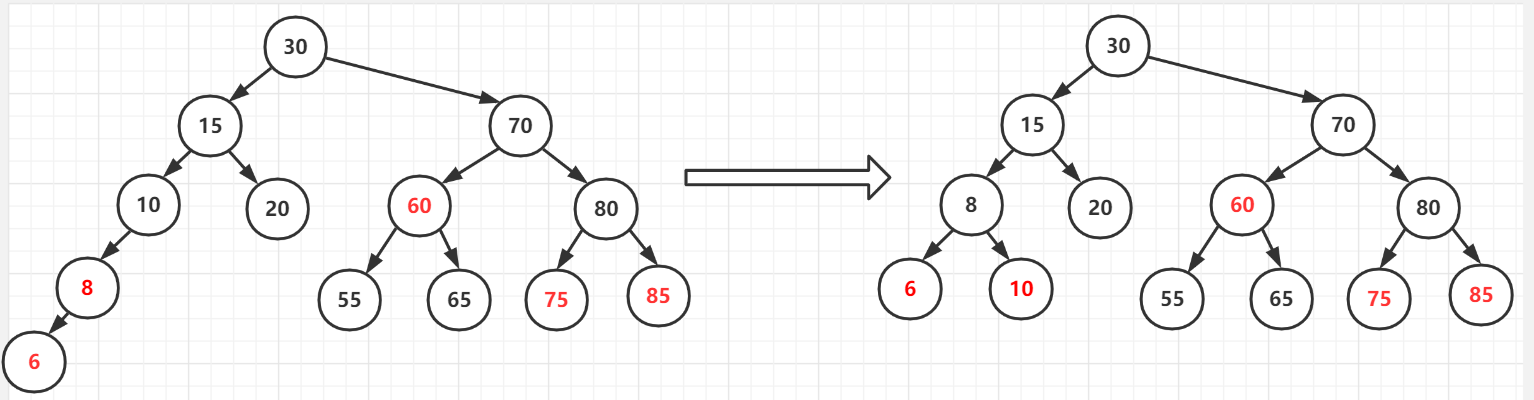
**插入：**

将每个插入的节点置为红色，这样不会直接影响到性质4，只需要关注性质3即可。

设插入节点为X，其父节点为P，父节点的兄弟节点为S，其祖父节点为G。

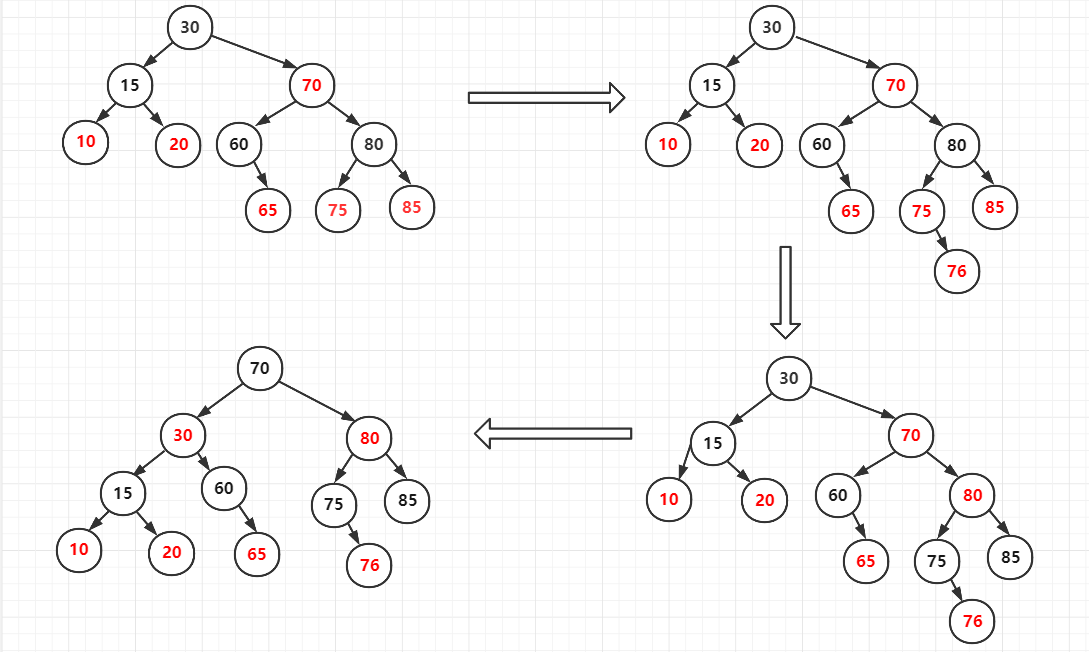
1. 若父节点P为黑色，则无需处理即可满足性质3。
2. 若父节点P为红色，父节点的兄弟节点S为黑色或null。

旋转，父节点变黑，祖父节点变红。



1. 若父节点P为红色，父节点的兄弟节点S也为红色。

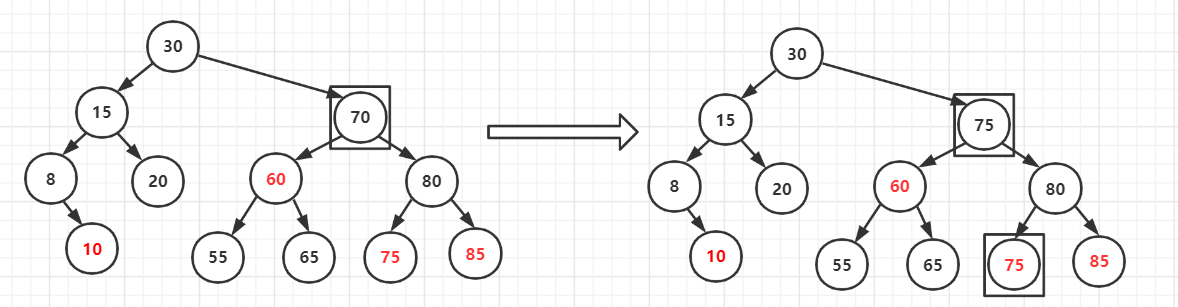
将父节点P和其兄弟节点S置为黑色，将祖父节点G置为红色，此时G的子树整体已满足性质3。然后以G为基准自底向上地递归判断是否满足性质3。



**删除：**

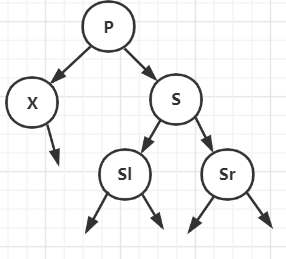
删除节点可以转换成删除叶子节点的方式：

1. 被删除节点只有左子树，找到左子树的最大节点进行替换，然后删除该节点。
2. 被删除节点有右子树，找到右子树的最小节点进行替换，然后删除该节点。

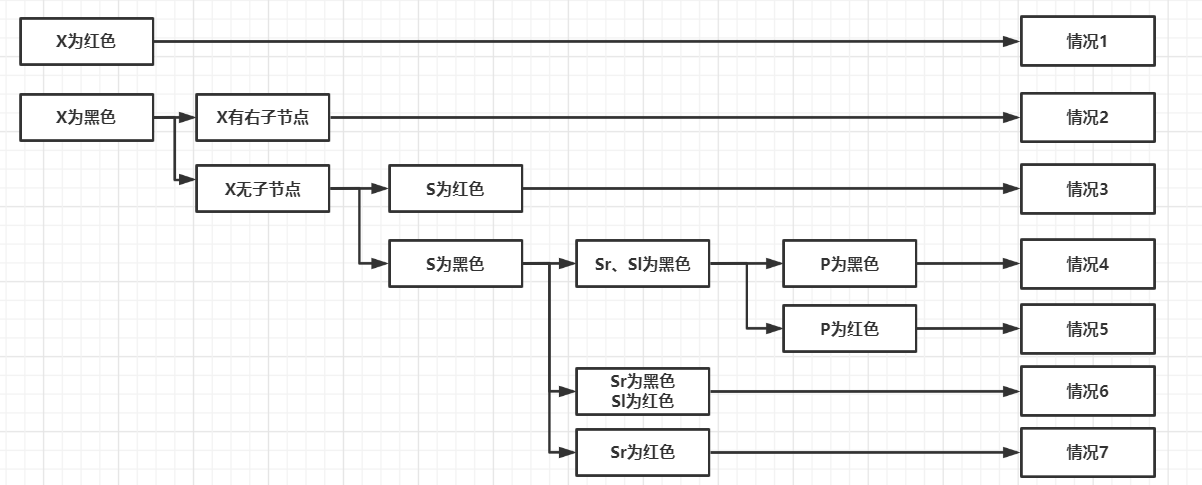


上图由删除节点70，转换成删除叶子节点75。

设删除目标节点为X，其父节点为P，父节点的兄弟节点为S，S的两个孩子节点分别为Sl和Sr。

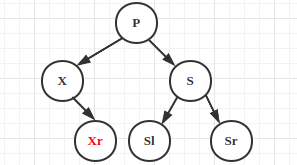


以下以上面情况2（找右子树最小节点替换）来讨论。情况1反着来即可。



基本原则：节点越多越难容易恢复性质，更可供操作。（从S的红色子节点出发，做处理）

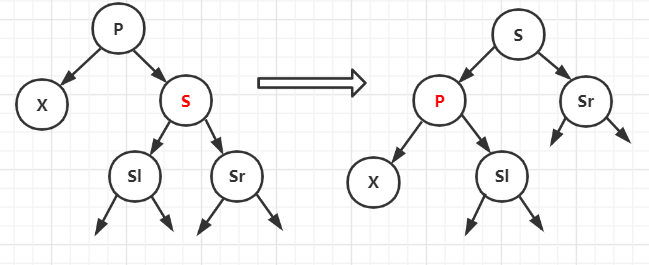
1. X为红色，则X一定没有子节点，删除一个红色节点不影响红黑树的性质，直接删除即可。
2. X为黑色。若X有子节点，那么一定是右子节点，并且为红色。此时删除X，并且使用其子节点替换即可。



1. X为黑色，且无子节点。

S为红色。

此时P、Sl、Sr一定为黑色。



P的右子树有很多节点可供操作（Sl、Sr可能有红色子节点），所以通过旋转“借”些节点到左子树。

左旋，然后将P与S的颜色互换。

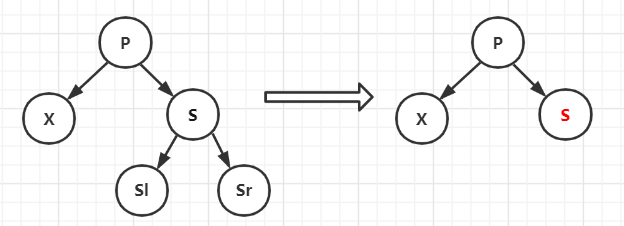
此时满足红黑树性质，但是删除X后依然不满足性质4。然后继续按情况5、6、7处理。

1. X为黑色，且无子节点。

S为黑色。

P为黑色。

Sl、Sr为黑色。



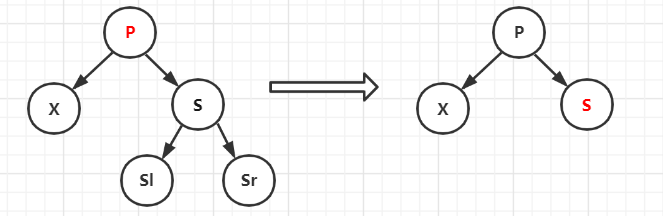
此时Sl、Sr一定为null，这就属于节点少的情况，根本无法操作，只能将S变为红色，然后将XPS整个子树视为一个节点，从情况3开始重新向下判断做平衡处理。

1. X为黑色，且无子节点。

S为黑色。

P为红色。

Sl、Sr为黑色。

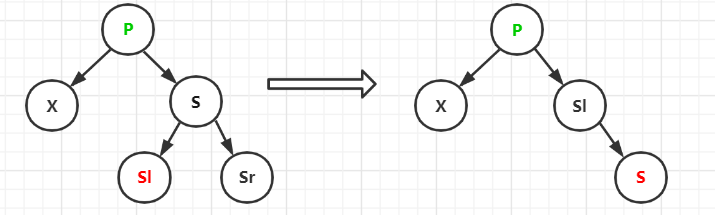


此时Sl、Sr一定为null，但是P为红色，所以可以将P变为黑色，S变为红色来保持性质4。

1. X为黑色，且无子节点。

S为黑色。

Sl为红色，Sr为黑色。



此时Sr必为null，且Sl没有子节点。

因为S提供了一个红色子节点可供操作，所以基本思想就是拿出一个节点去替换X的位置即可，因此P的颜色也不再重要。

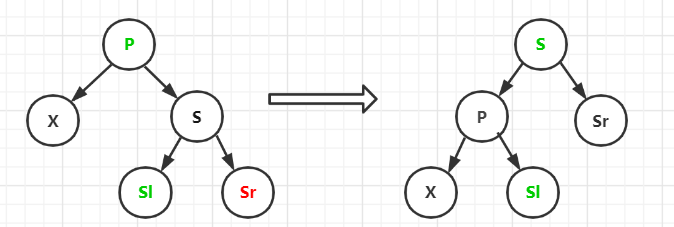
类似插入，首先需要将其变为右子树的右子树，所以先进行右旋操作。

在保证性质4的前提下，进入情况7。

1. X为黑色，且无子节点。

S为黑色。

Sr为红色。



此时Sl要么为null要么为红色。

只要Sr为红色就属于情况7，就可以操作，拿出一个节点去替换X的位置。

直接左旋，交换S和P的颜色，并将Sr变为黑色。