26|红黑树（下）：掌握这些技巧，你也可以实现一个红黑树

红黑树是一个让我又爱又恨的数据结构，“爱”是因为它稳定、高效的性能，“恨”是因为实现起来实在太难了。我今天讲的红黑树的实现，对于基础不太好的同学，理解起来可能会有些困难。但是，我觉得没必要去死磕它。

我为什么这么说呢？因为，即便你将左右旋背得滚瓜烂熟，我保证你过不几天就忘光了。因为，学习红黑树的代码实现，对于你平时做项目开发没有太大帮助。对于绝大部分开发工程师来说，这辈子你可能都用不着亲手写一个红黑树。除此之外，它对于算法面试也几乎没什么用，一般情况下，靠谱的面试官也不会让你手写红黑树的。

如果你对数据结构和算法很感兴趣，想要开拓眼界、训练思维，我还是很推荐你看一看这节的内容。但是如果学完今天的内容你还觉得懵懵懂懂的话，也不要纠结。我们要有的放矢去学习。你先把平时要用的、基础的东西都搞会了，如果有余力了，再来深入地研究这节内容。

好，我们现在就进入正式的内容。上一节，我们讲到红黑树定义的时候，提到红黑树的叶子节点都是黑色的空节点。当时我只是粗略地解释了，这是为了代码实现方便，那更加确切的原因是什么呢？ 我们这节就来说一说。

实现红黑树的基本思想

不知道你有没有玩过魔方？其实魔方的复原解法是有固定算法的：遇到哪几面是什么样子，对应就怎么转几下。你只要跟着这个复原步骤，就肯定能将魔方复原。

实际上，红黑树的平衡过程跟魔方复原非常神似，大致过程就是：遇到什么样的节点排布，我们就对应怎么去调整。只要按照这些固定的调整规则来操作，就能将一个非平衡的红黑树调整成平衡的。

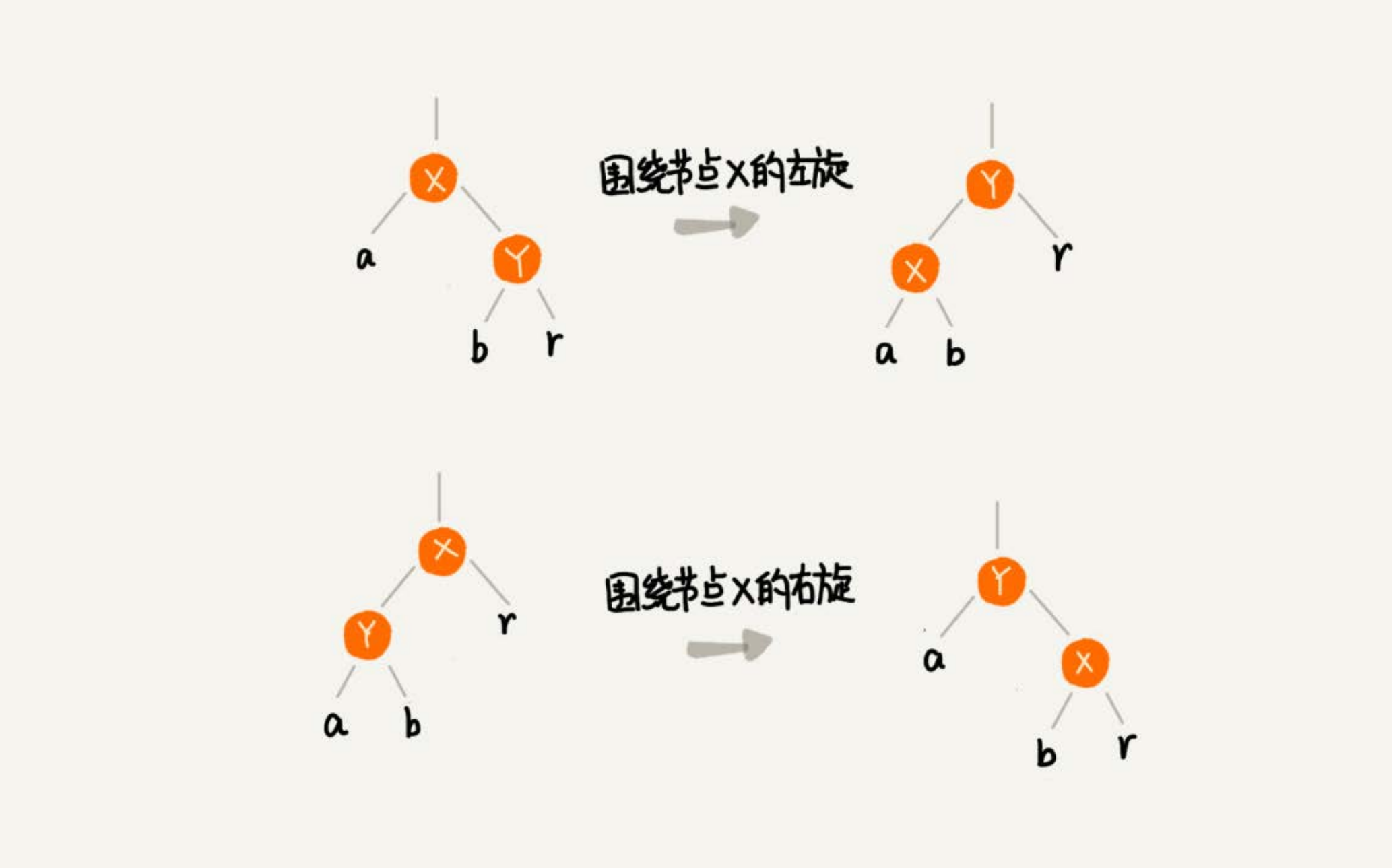
还记得我们前面讲过的红黑树的定义吗？今天的内容里，我们会频繁用到它，所以，我们现在再来回顾一下。一棵合格的红黑树需要满足这样几个要求：

- 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。

在插入、删除节点的过程中，第三、第四点要求可能会被破坏，而我们今天要讲的“平衡调整”，实际上就是要把被破坏的第三、第四点恢复过来。

在正式开始之前，我先介绍两个非常重要的操作，左旋（**rotate left**）、右旋（**rotate right**）。左旋全称其实是叫围绕某个节点的左旋，那右旋的全称估计你已经猜到了，就叫围绕某个节点的右旋。

我们下面的平衡调整中，会一直用到这两个操作，所以我这里画了个示意图，帮助你彻底理解这两个操作。图中的a，b，r表示子树，可以为空。



前面我说了，红黑树的插入、删除操作会破坏红黑树的定义，具体来说就是会破坏红黑树的平衡，所以，我们现在就来看下，红黑树在插入、删除数据之后，如何调整平衡，继续当一棵合格的红黑树的。

插入操作的平衡调整

首先，我们来看插入操作。

红黑树规定，插入的节点必须是红色的。而且，二叉查找树中新插入的节点都是放在叶子节点上。所以，关于插入操作的平衡调整，有这样两种特殊情况，但是也都非常好处理。

- 如果插入节点的父节点是黑色的，那我们什么都不用做，它仍然满足红黑树的定义。
- 如果插入的节点是根节点，那我们直接改变它的颜色，把它变成黑色就可以了。

除此之外，其他情况都会违背红黑树的定义，于是我们就需要进行调整，调整的过程包含两种基础的操作：左右旋转和改变颜色。

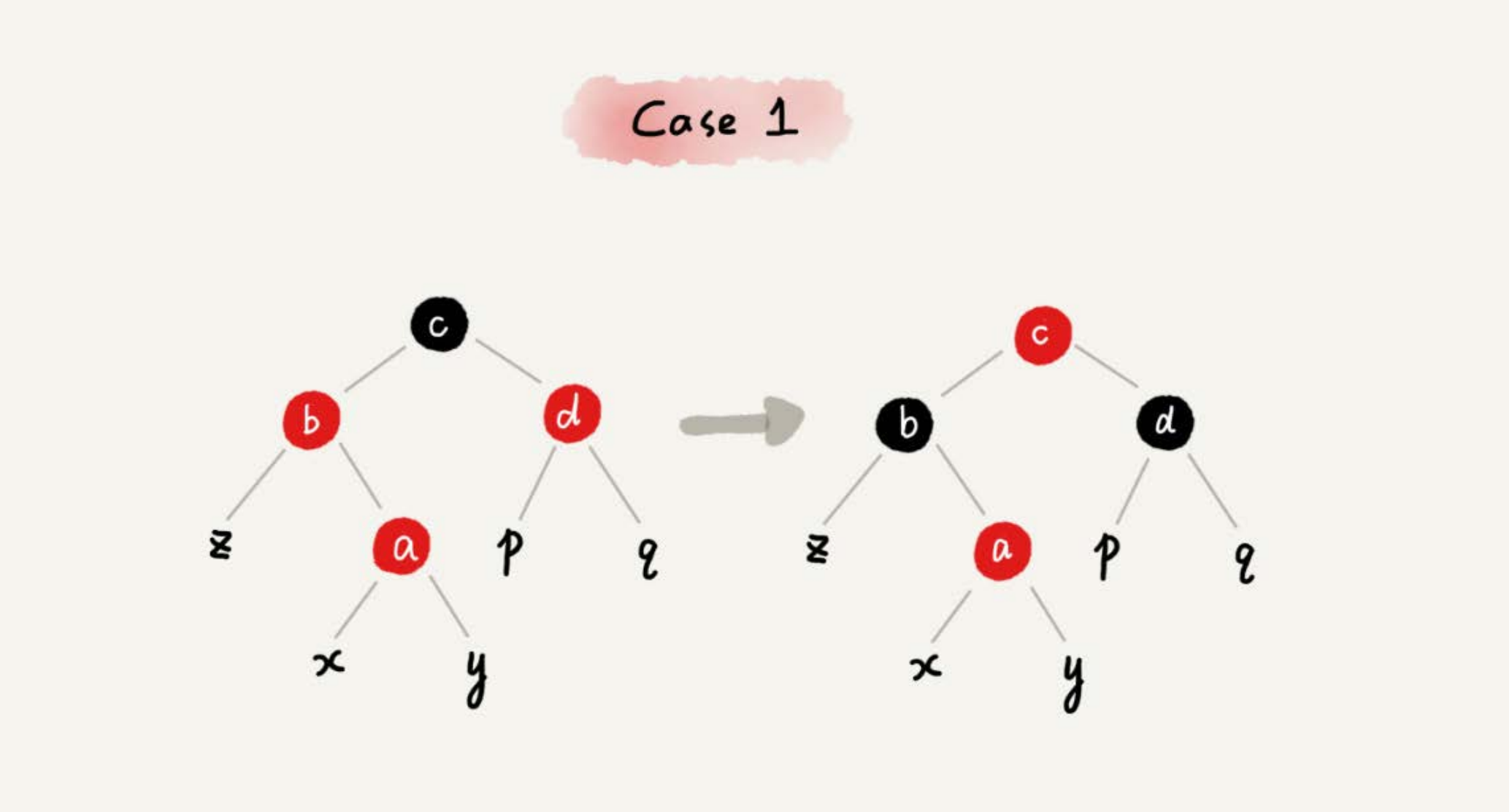
红黑树的平衡调整过程是一个迭代的过程。我们把正在处理的节点叫作关注节点。关注节点会随着不停地迭代处理，而不断发生变化。最开始的关注节点就是新插入的节点。

新节点插入之后，如果红黑树的平衡被打破，那一般会有下面三种情况。我们只需要根据每种情况的特点，不停地调整，就可以让红黑树继续符合定义，也就是继续保持平衡。

我们下面依次来看每种情况的调整过程。提醒你注意下，为了简化描述，我把父节点的兄弟节点叫作叔叔节点，父节点的父节点叫作祖父节点。

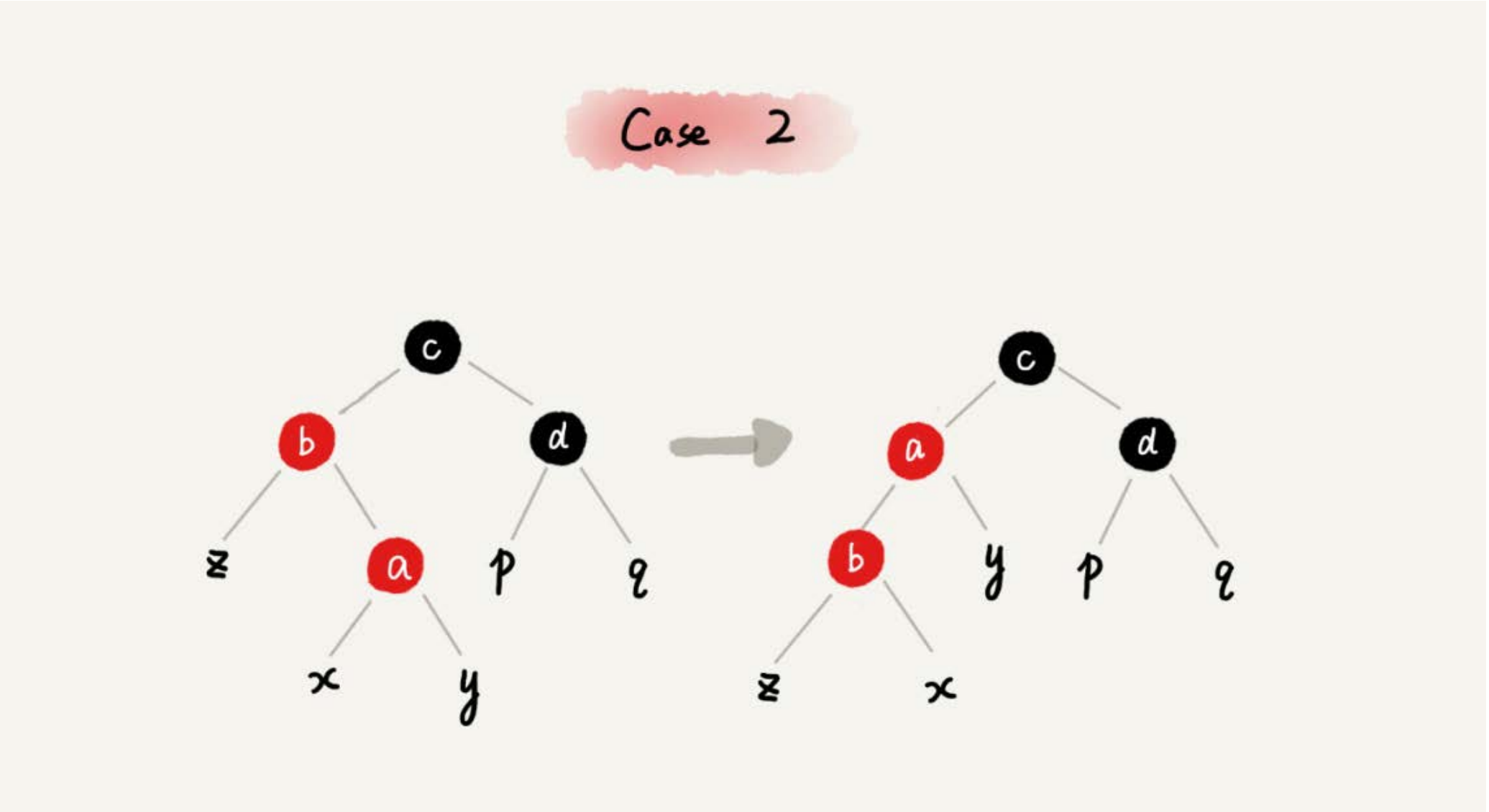
CASE 1：如果关注节点是**a**，它的叔叔节点**d**是红色，我们就依次执行下面的操作：

- 将关注节点a的父节点b、叔叔节点d的颜色都设置成黑色；
- 将关注节点a的祖父节点c的颜色设置成红色；
- 关注节点变成a的祖父节点c；
- 跳到CASE 2或者CASE 3。



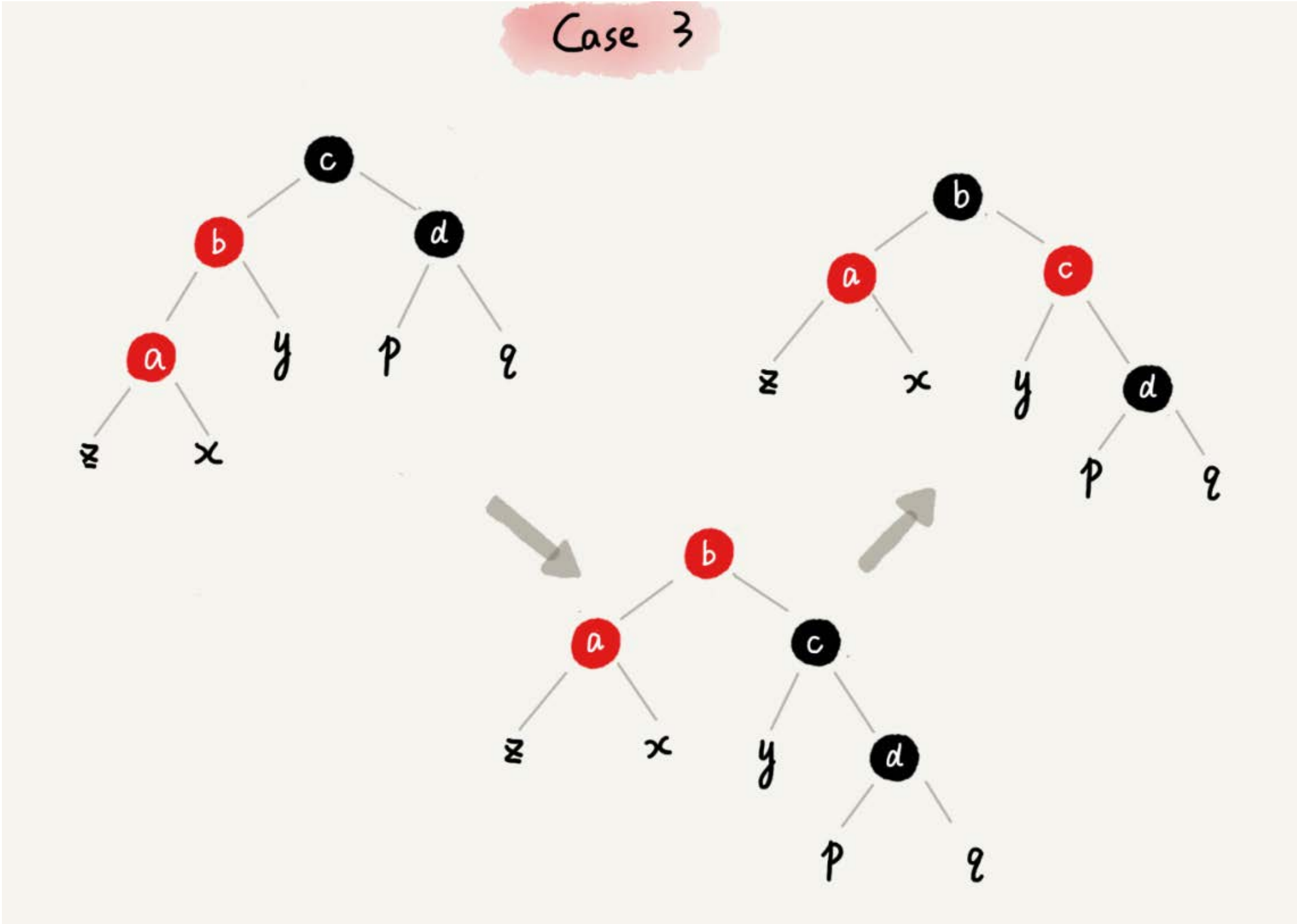
CASE 2：如果关注节点是**a**，它的叔叔节点**d**是黑色，关注节点**a**是其父节点**b**的右子节点，我们就依次执行下面的操作：

- 关注节点变成节点a的父节点b；
- 围绕新的关注节点⊠b左旋；
- 跳到CASE 3。



CASE 3：如果关注节点是**a**，它的叔叔节点**d**是黑色，关注节点**a**是其父节点**b**的左子节点，我们就依次执行下面的操作：

- 围绕关注节点a的祖父节点c右旋；
- 将关注节点a的父节点b、兄弟节点c的颜色互换。
- 调整结束。


Case 3
c
b
d
a
y
p
q
z
x
b
a
c
z
x
y
d
p
q
b
a
c
z
x
y
d
p
q

删除操作的平衡调整

红黑树插入操作的平衡调整还不是很难，但是它的删除操作的平衡调整相对就要难多了。不过原理都是类似的，我们依旧只需要根据关注节点与周围节点的排布特点，按照一定的规则去调整就行了。

删除操作的平衡调整分为两步，第一步是针对删除节点初步调整。初步调整只是保证整棵红黑树在一个节点删除之后，仍然满足最后一条定义的要求，也就是说，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；第二步是针对关注节点进行二次调整，让它满足红黑树的第三条定义，即不存在相邻的两个红色节点。

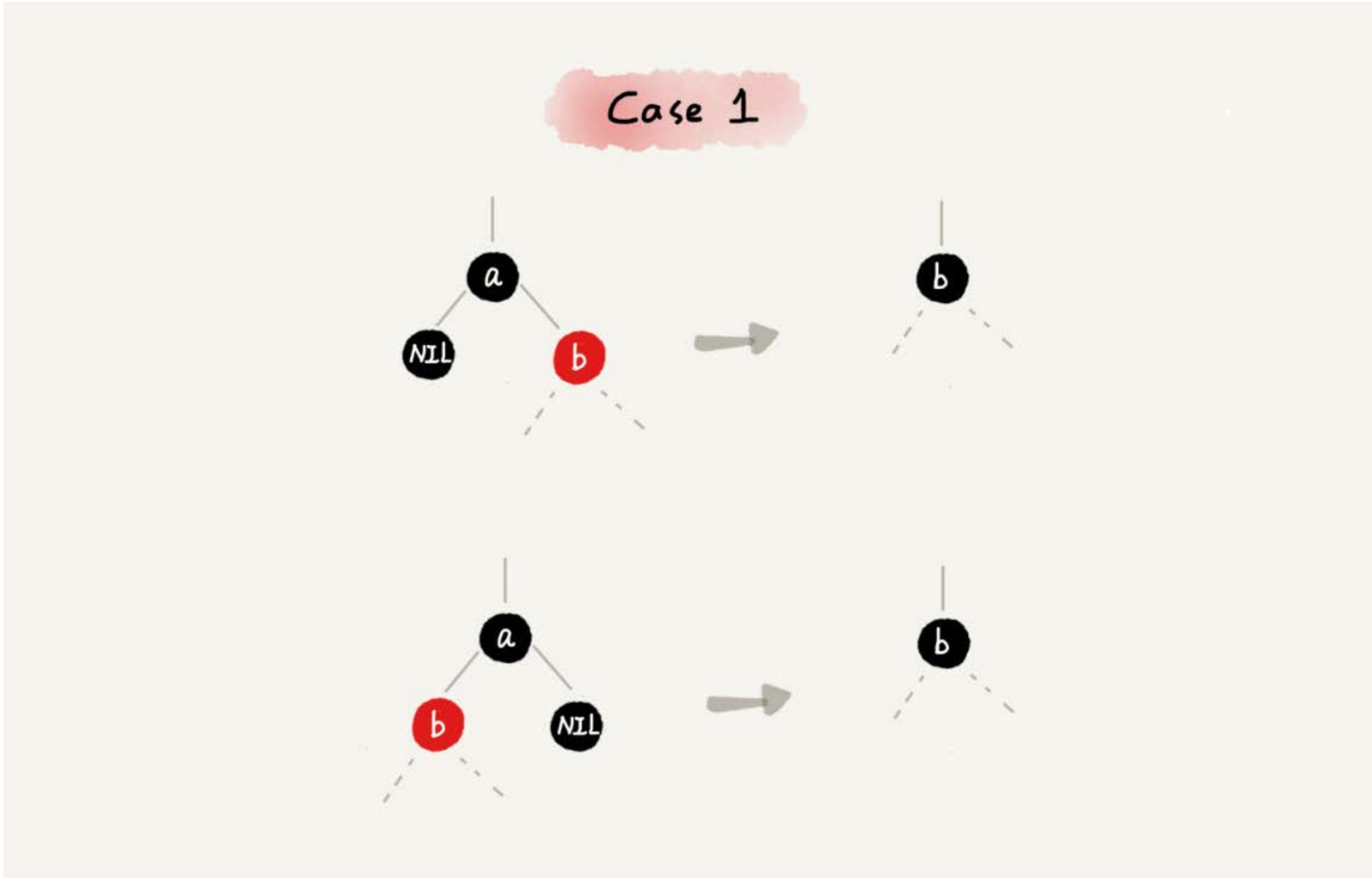
1.针对删除节点初步调整

这里需要注意一下，红黑树的定义中“只包含红色节点和黑色节点”，经过初步调整之后，为了保证满足红黑树定义的最后一条要求，有些节点会被标记成两种颜色，“红-黑”或者“黑-黑”。如果一个节点被标记为了“黑-黑”，那在计算黑色节点个数的时候，要算成两个黑色节点。

在下面的讲解中，如果一个节点既可以是红色，也可以是黑色，在画图的时候，我会用一半红色一半黑色来表示。如果一个节点是“红-黑”或者“黑-黑”，我会用左上角的一个小黑点来表示额外的黑色。

CASE 1：如果要删除的节点是**a**，它只有一个子节点**b**，那我们就依次进行下面的操作：

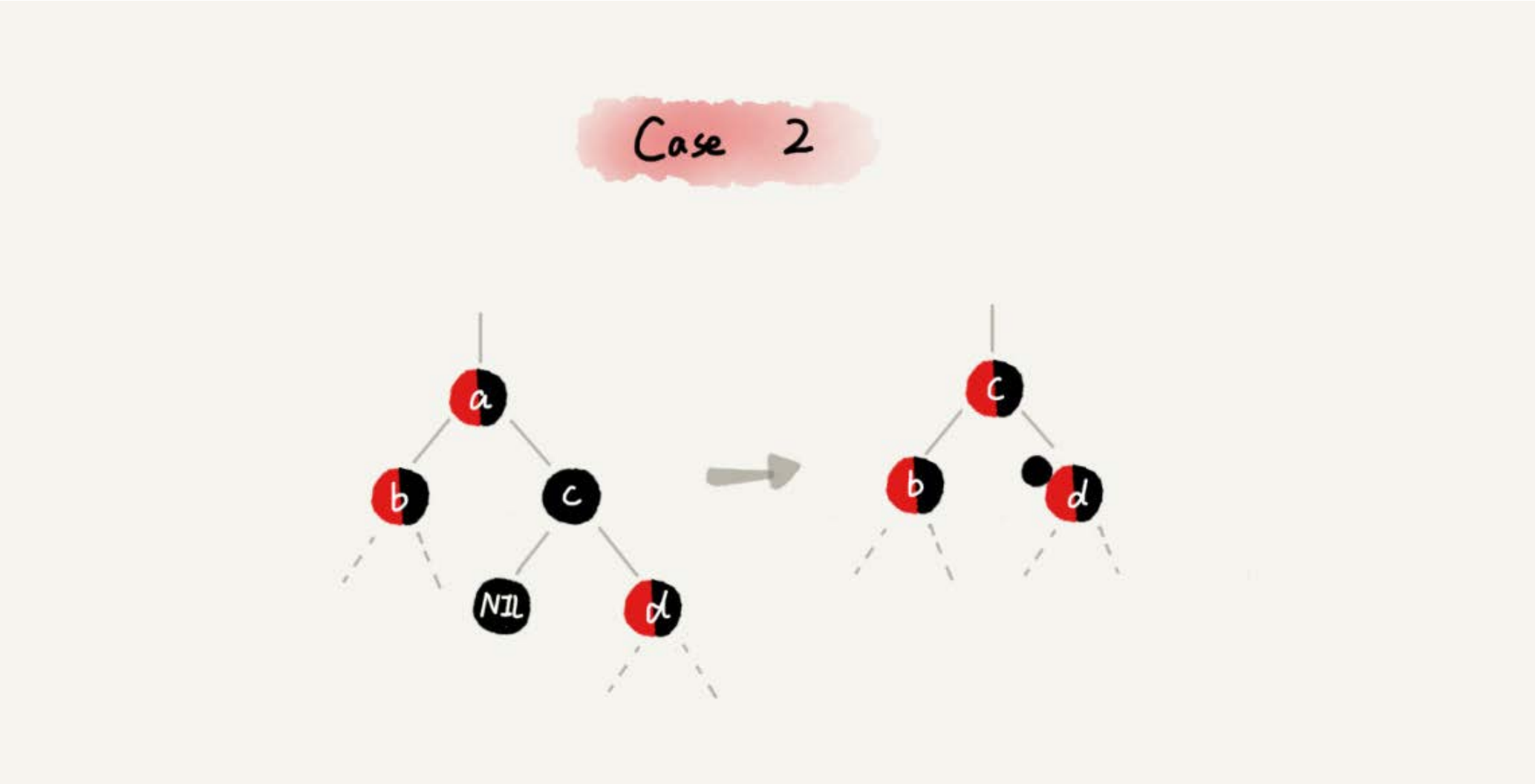
- 删除节点a，并且把节点b替换到节点a的位置，这一部分操作跟普通的二叉查找树的删除操作一样；
- 节点a只能是黑色，节点b也只能是红色，其他情况均不符合红黑树的定义。这种情况下，我们把节点b改为黑色；
- 调整结束，不需要进行二次调整。



CASE 2：如果要删除的节点**a**有两个非空子节点，并且它的后继节点就是节点**a**的右子节点**c**。我们就依次进行下面的操作：

- 如果节点a的后继节点就是右子节点c，那右子节点c肯定没有左子树。我们把节点a删除，并且将节点c替换到节点a的位置。这一部分操作跟普通的二叉查找树的删除操作无异；

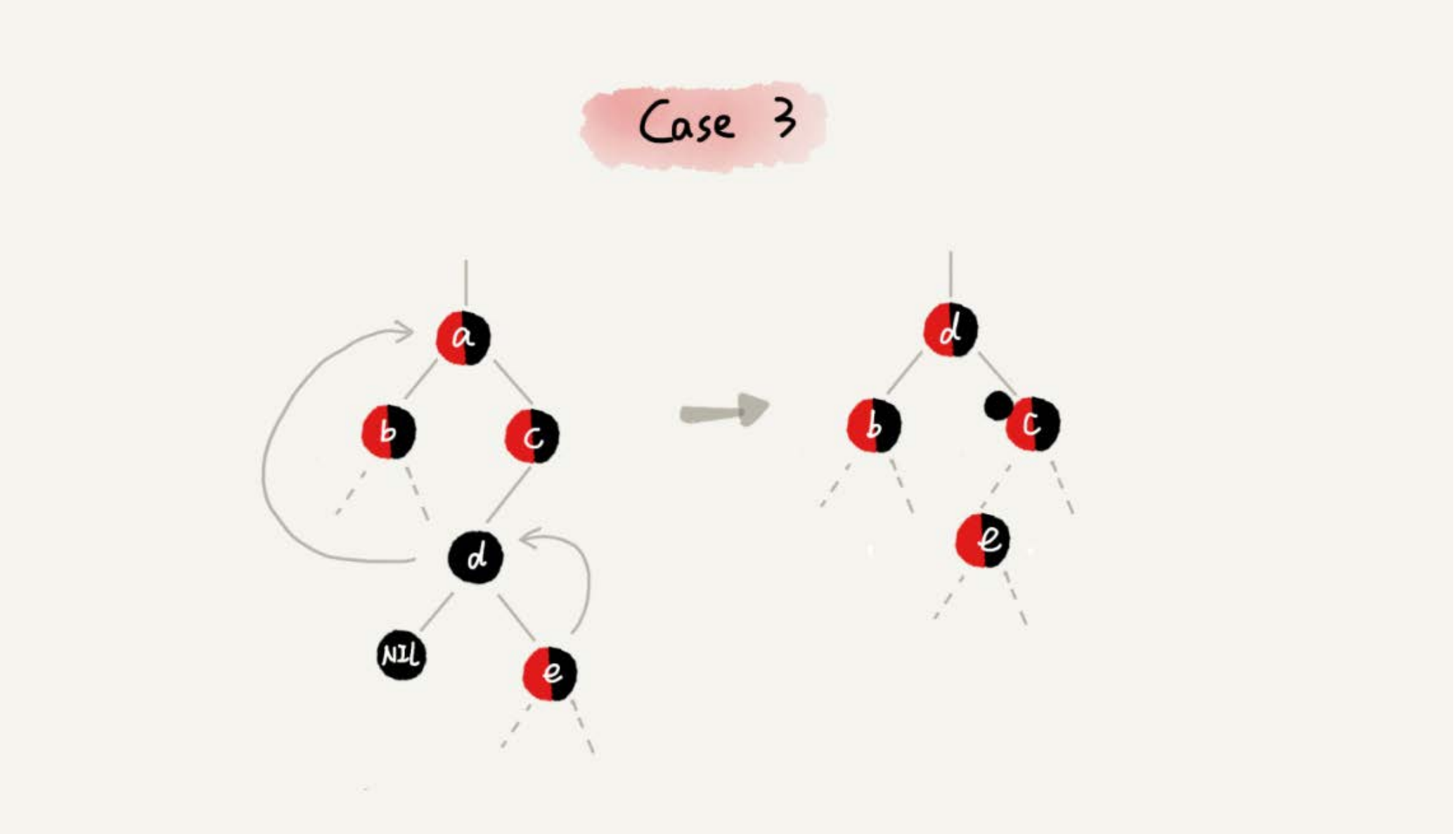
- 然后把节点c的颜色设置为跟节点a相同的颜色；
- 如果节点c是黑色，为了不违反红黑树的最后一条定义，我们给节点c的右子节点d多加一个黑色，这个时候节点d就成了“红-黑”或者“黑-黑”；
- 这个时候，关注节点变成了节点d，第二步的调整操作就会针对关注节点来做。



CASE 3：如果要删除的是节点**a**，它有两个非空子节点，并且节点**a**的后继节点不是右子节点，我们就依次进行下面的操作：

- 找到后继节点d，并将它删除，删除后继节点d的过程参照CASE 1；
- 将节点a替换成后继节点d；

- 把节点d的颜色设置为跟节点a相同的颜色；
- 如果节点d是黑色，为了不违反红黑树的最后一条定义，我们给节点d的右子节点c多加一个黑色，这个时候节点c就成了“红-黑”或者“黑-黑”；
- 这个时候，关注节点变成了节点c，第二步的调整操作就会针对关注节点来做。

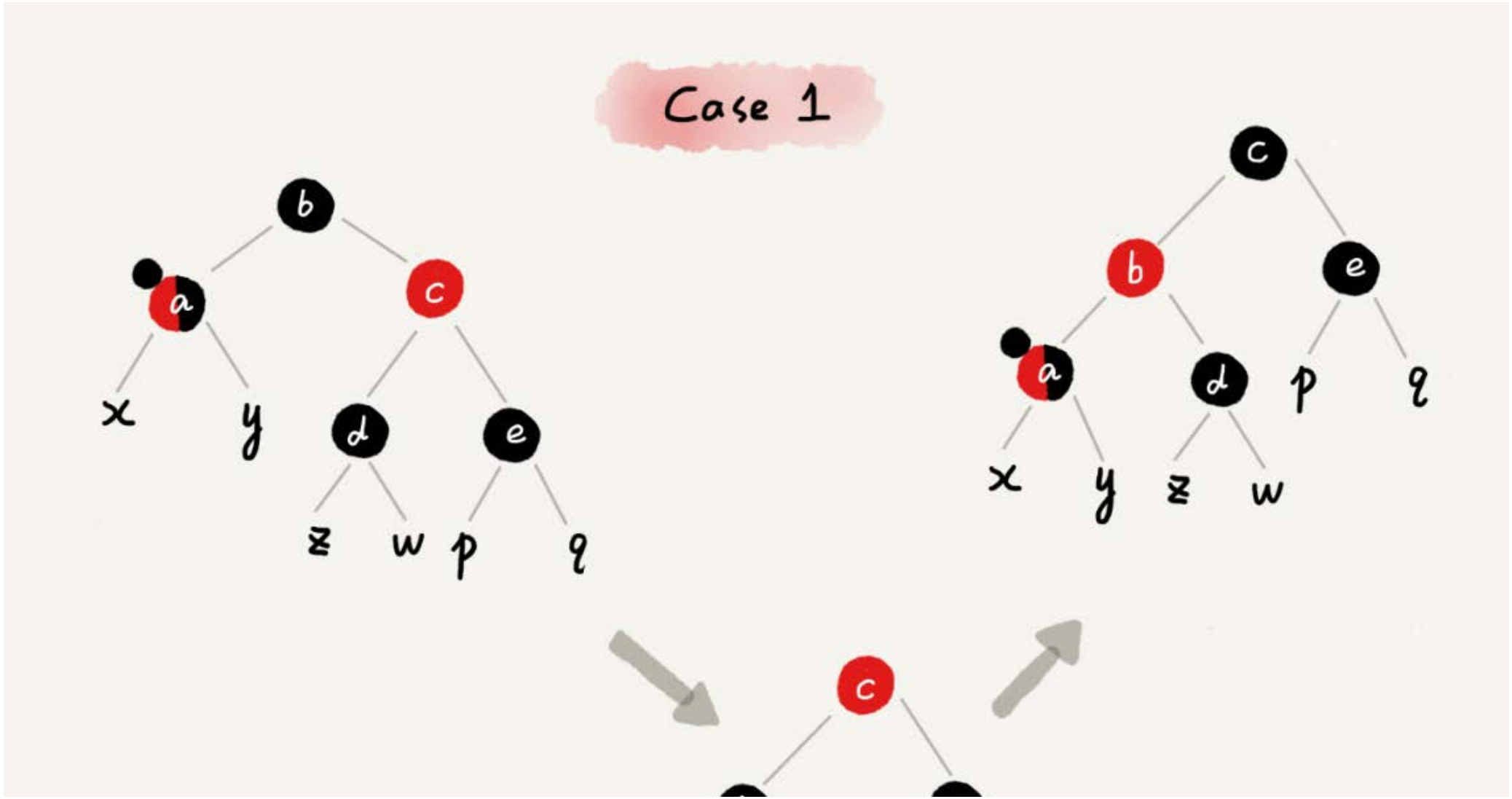


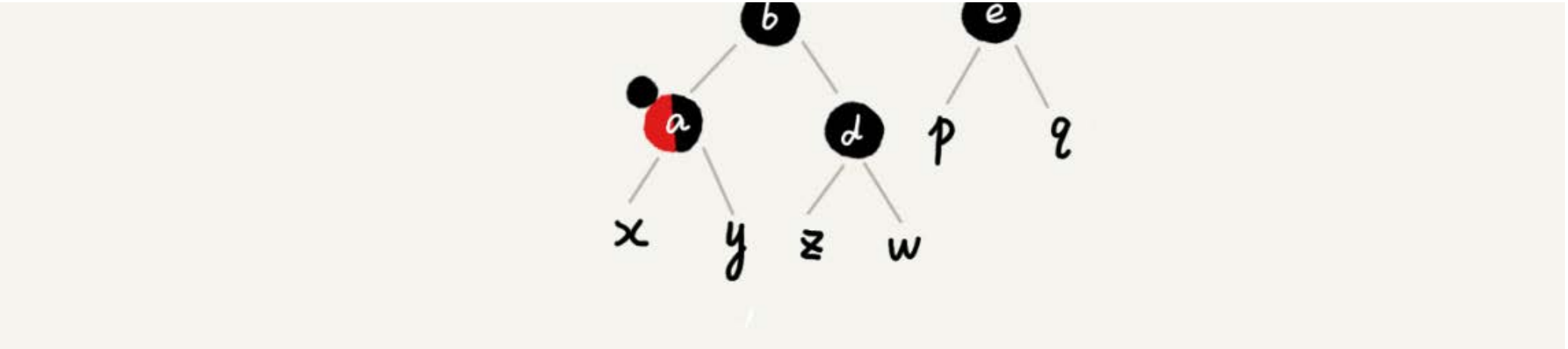
2.针对关注节点进行二次调整

经过初步调整之后，关注节点变成了“红-黑”或者“黑-黑”节点。针对这个关注节点，我们再分四种情况来进行二次调整。二次调整是为了让红黑树中不存在相邻的红色节点。

CASE 1：如果关注节点是**a**，它的兄弟节点**c**是红色的，我们就依次进行下面的操作：

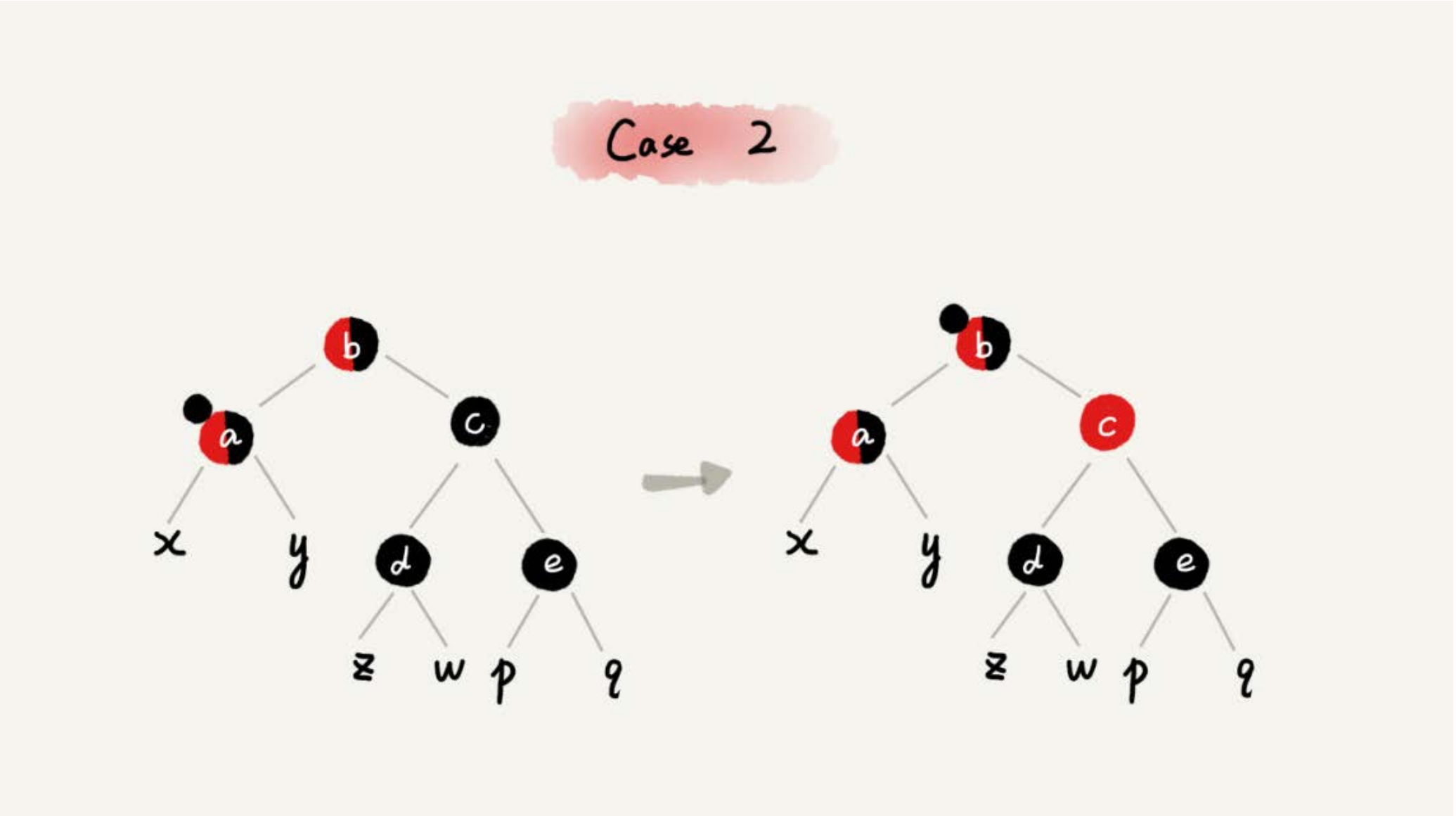
- 围绕关注节点a的父节点b左旋；
- 关注节点a的父节点b和祖父节点c交换颜色；
- 关注节点不变；
- 继续从四种情况中选择适合的规则来调整。





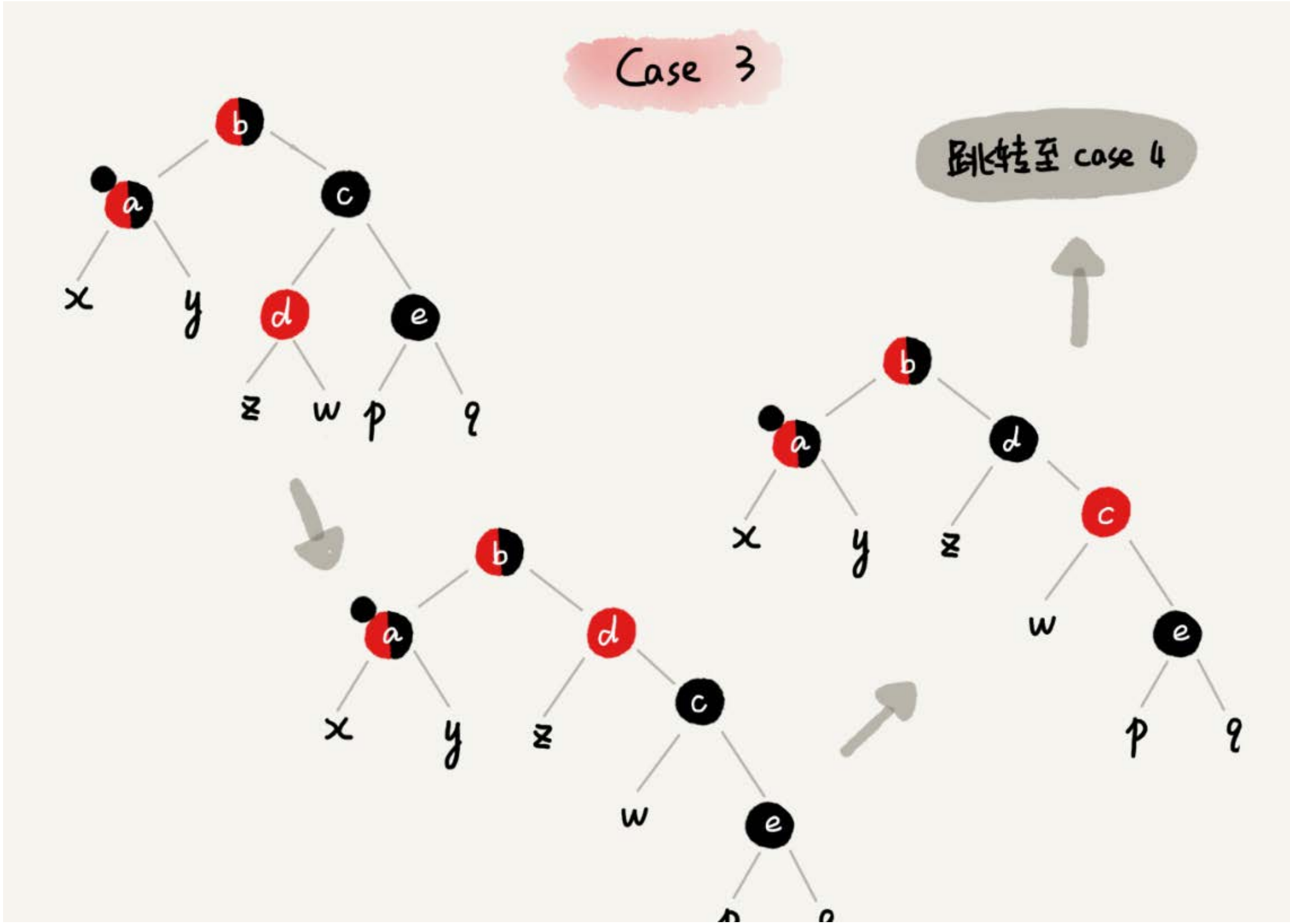
CASE 2：如果关注节点是**a**，它的兄弟节点**c**是黑色的，并且节点**c**的左右子节点**d**、**e**都是黑色的，我们就依次进行下面的操作：

- 将关注节点a的兄弟节点c的颜色变成红色；
- 从关注节点a中去掉一个黑色，这个时候节点a就是单纯的红色或者黑色；
- 给关注节点a的父节点b添加一个黑色，这个时候节点b就变成了“红-黑”或者“黑-黑”；
- 关注节点从a变成其父节点b；
- 继续从四种情况中选择符合的规则来调整。



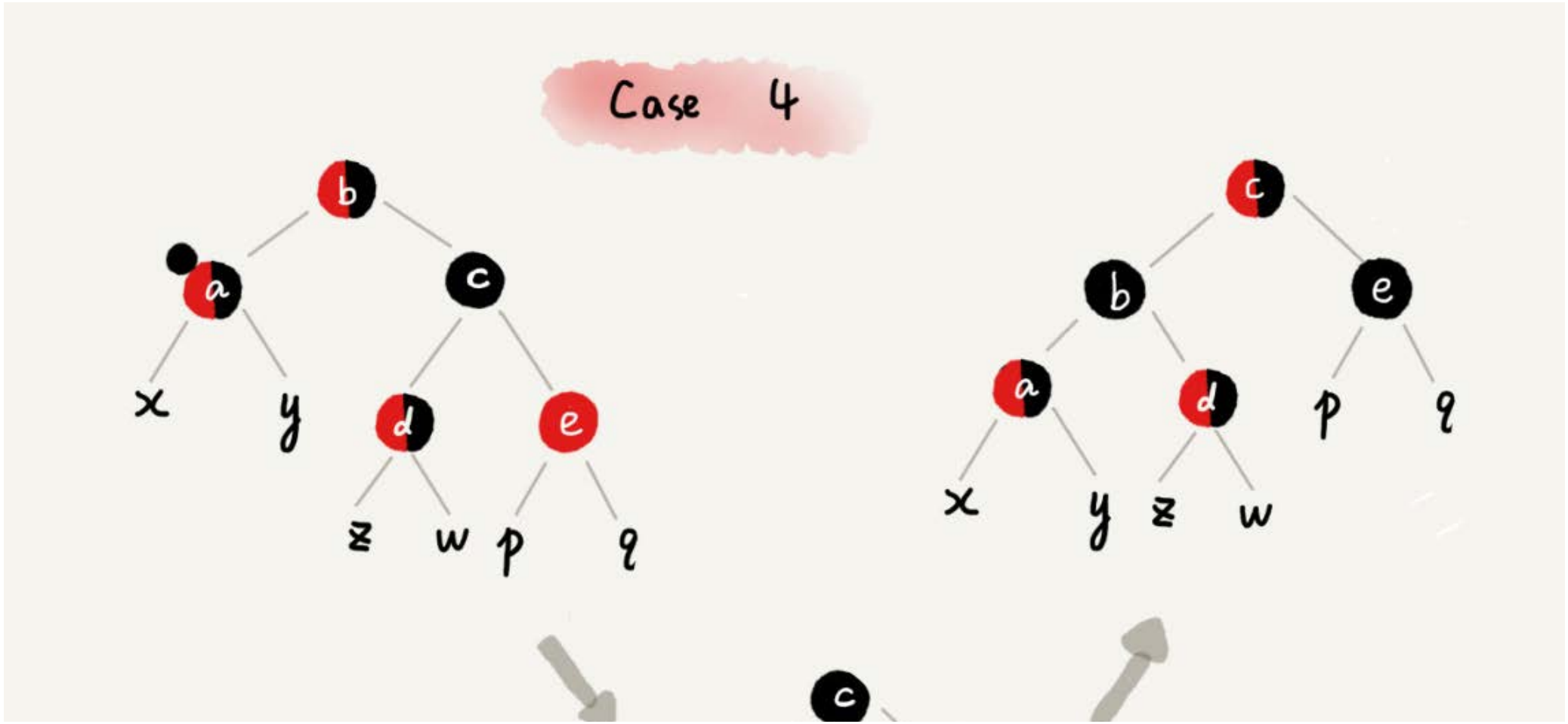
CASE 3：如果关注节点是**a**，它的兄弟节点**c**是黑色，**c**的左子节点**d**是红色，**c**的右子节点**e**是黑色，我们就依次进行下面的操作：

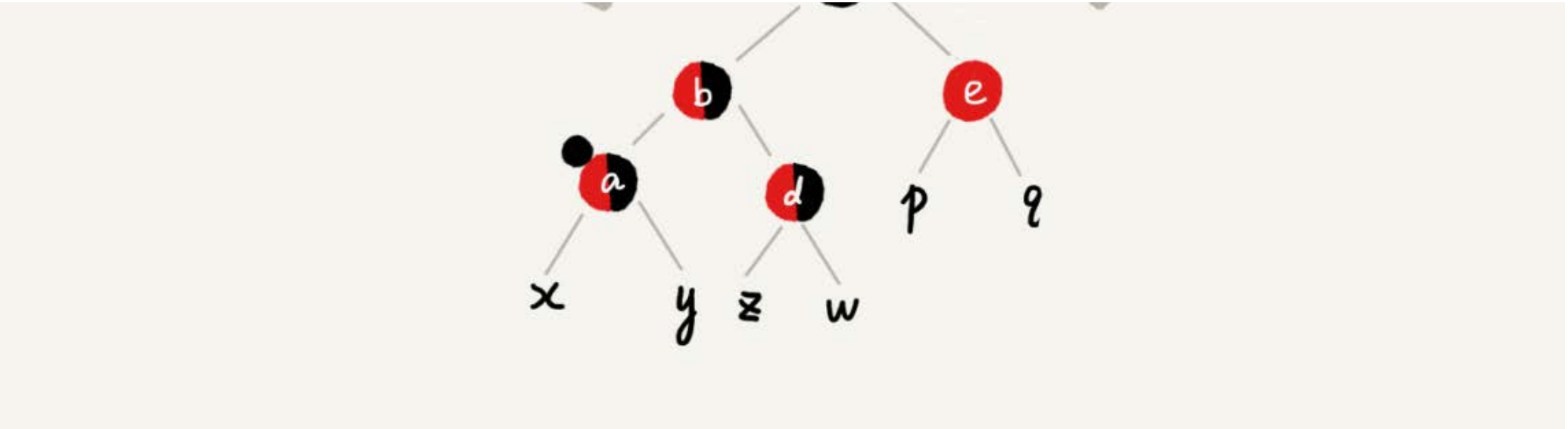
- 围绕关注节点a的兄弟节点c右旋；
- 节点c和节点d交换颜色；
- 关注节点不变；
- 跳转到CASE 4，继续调整。


Case 3
跳转至 case 4
b
a
c
x
y
d
e
z
w
p
q

CASE 4：如果关注节点**a**的兄弟节点**c**是黑色的，并且**c**的右子节点是红色的，我们就依次进行下面的操作：

- 围绕关注节点a的父节点b左旋；
- 将关注节点a的兄弟节点c的颜色，跟关注节点a的父节点b设置成相同的颜色；
- 将关注节点a的父节点b的颜色设置为黑色；
- 从关注节点a中去掉一个黑色，节点a就变成了单纯的红色或者黑色；
- 将关注节点a的叔叔节点e设置为黑色；
- 调整结束。



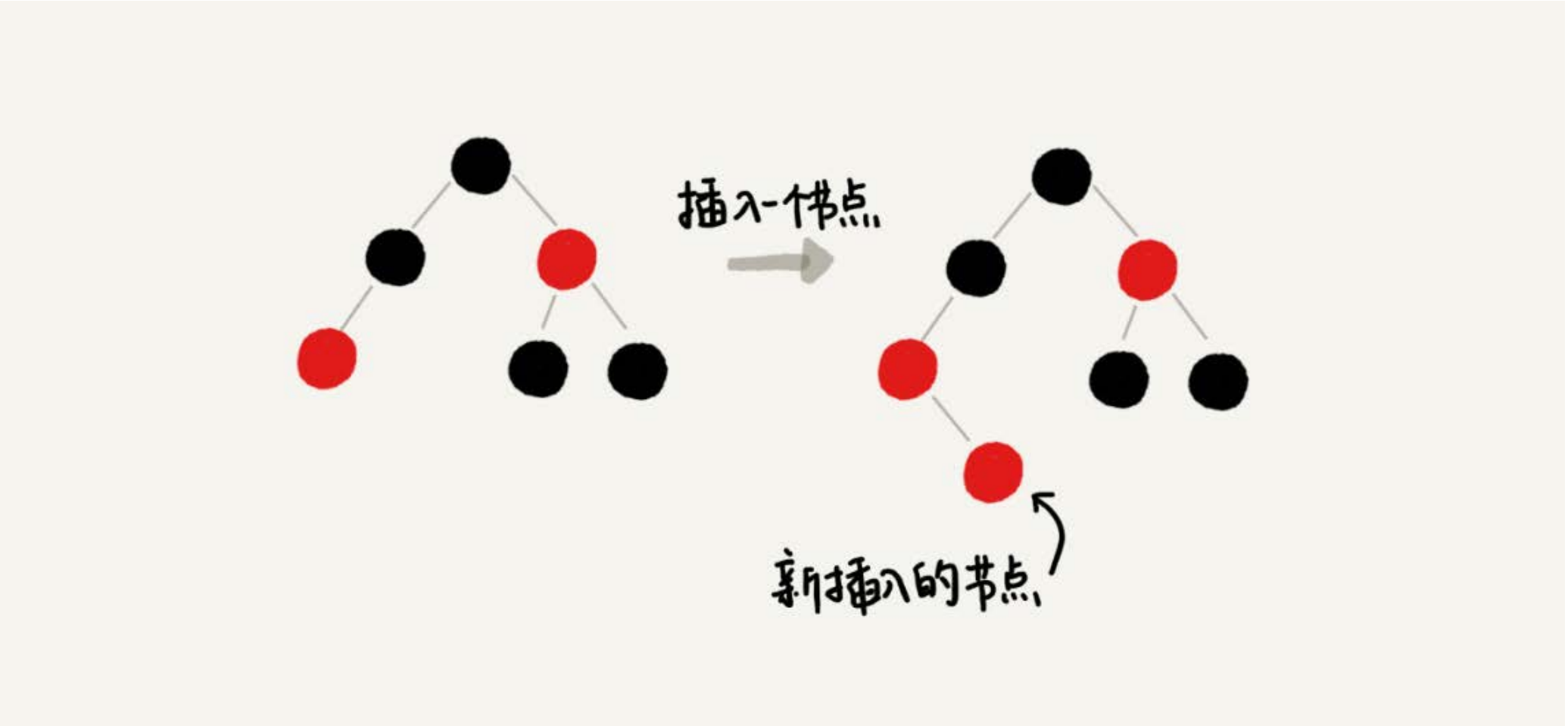


解答开篇

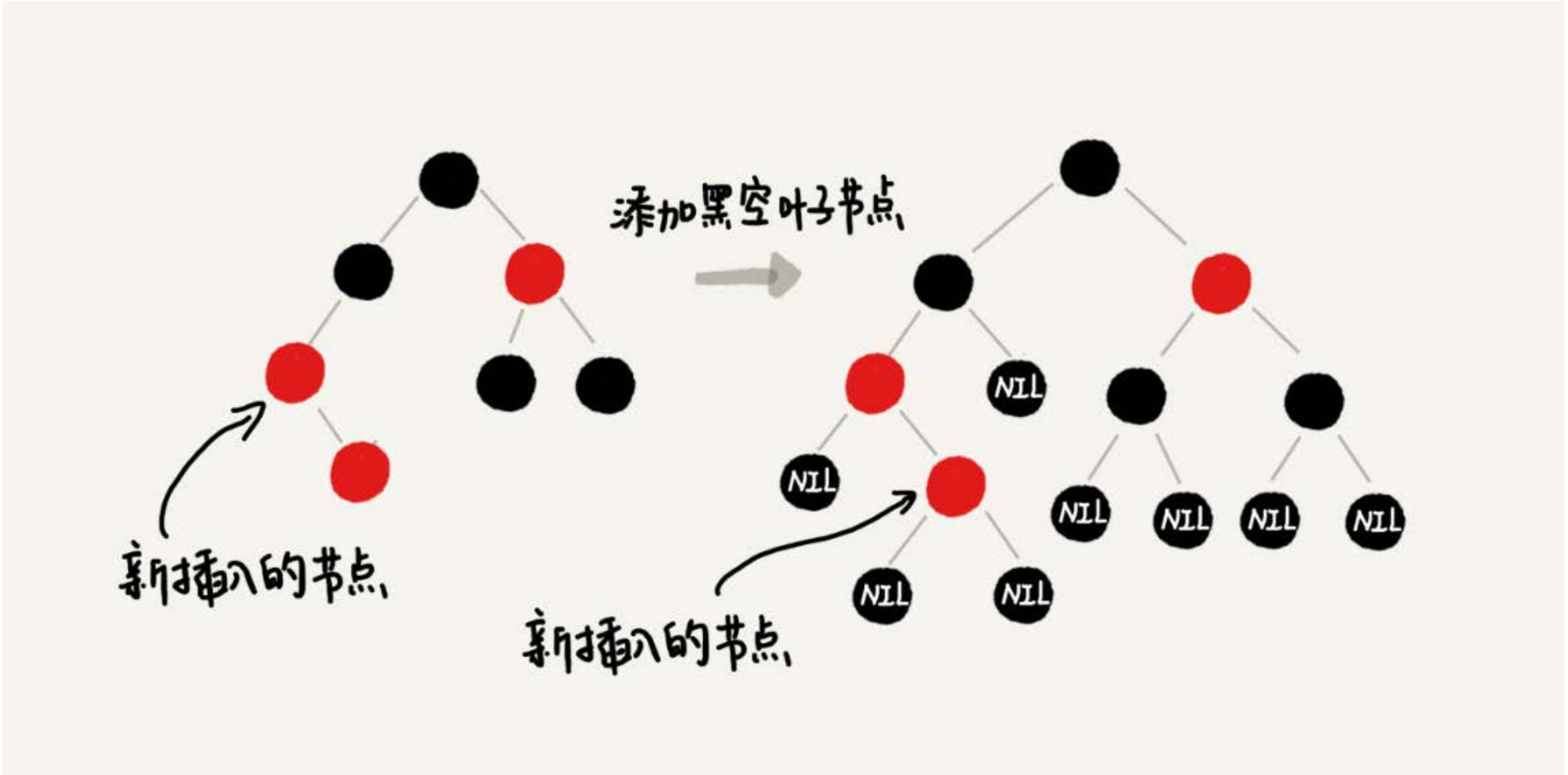
红黑树的平衡调整就讲完了，现在，你能回答开篇的问题了吗？为什么红黑树的定义中，要求叶子节点是黑色的空节点？

要我说，之所以有这么奇怪的要求，其实就是为了实现起来方便。只要满足这一条要求，那在任何时刻，红黑树的平衡操作都可以归结为我们刚刚讲的那几种情况。

还是有点不好理解，我通过一个例子来解释一下。假设红黑树的定义中不包含刚刚提到的那一条“叶子节点必须是黑色的空节点”，我们往一棵红黑树中插入一个数据，新插入节点的父节点也是红色的，两个红色的节点相邻，这个时候，红黑树的定义就被破坏了。那我们应该如何调整呢？

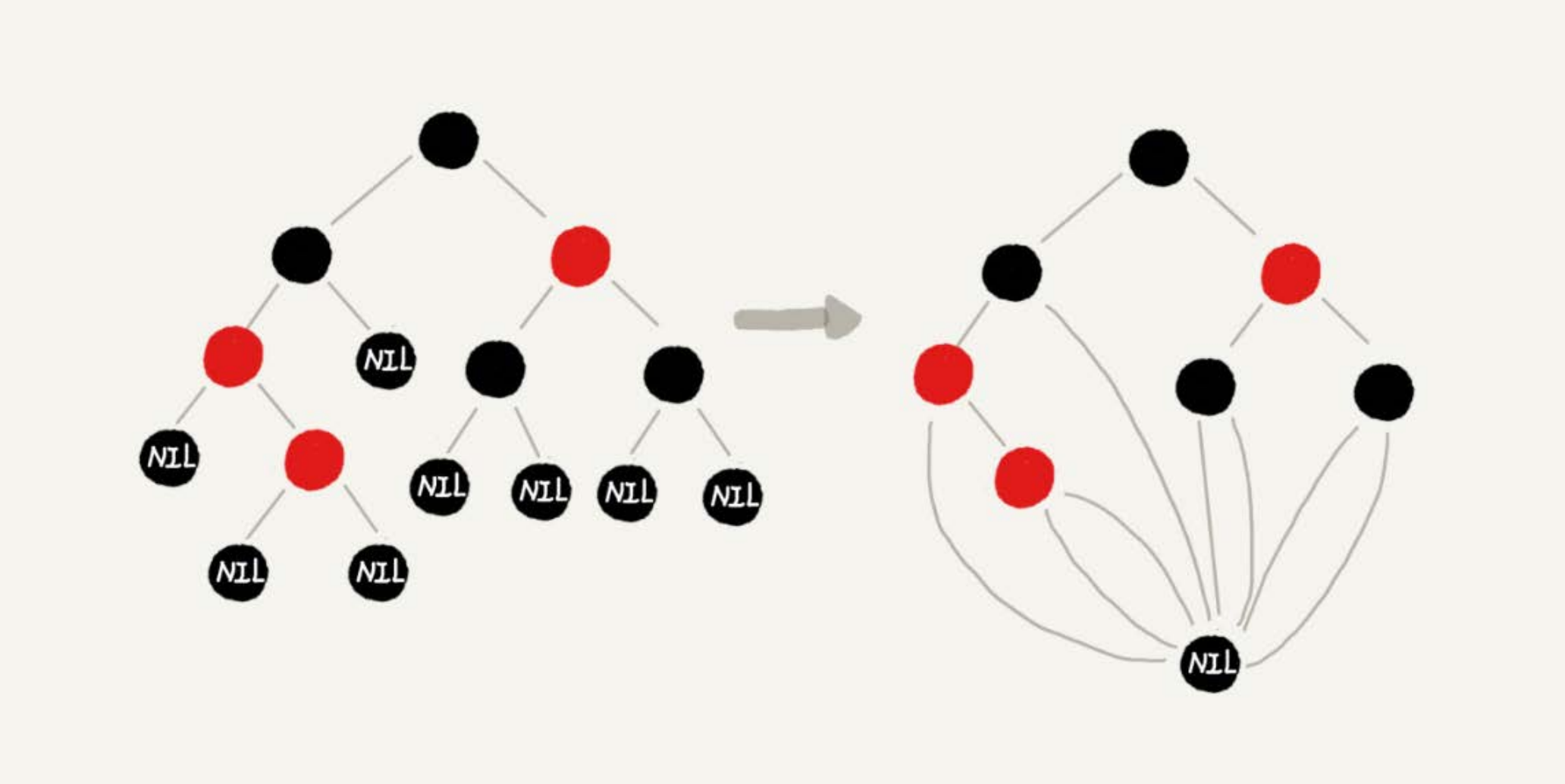


你会发现，这个时候，我们前面讲的插入时，三种情况下的平衡调整规则，没有一种是适用的。但是，如果我们把黑色的空节点都给它加上，变成下面这样，你会发现，它满足CASE 2了。



你可能会说，你可以调整一下平衡调整规则啊。比如把CASE 2改为“如果关注节点a的叔叔节点b是黑色或者不存在，a是父节点的右子节点，就进行某某操作”。当然可以，但是这样的话规则就没有原来简洁了。

你可能还会说，这样给红黑树添加黑色的空的叶子节点，会不会比较浪费存储空间呢？答案是不会的。虽然我们在讲解或者画图的时候，每个黑色的、空的叶子节点都是独立画出来的。实际上，在具体实现的时候，我们只需要像下面这样，共用一个黑色的、空的叶子节点就行了。



内容小结

“红黑树一向都很难学”，有这种想法的人很多。但是我感觉，其实主要原因是，很多人试图去记忆它的平衡调整策略。实际上，你只需要能看懂我讲的过程，没有知识盲点，就算是掌握了这部分内容了。毕竟实际的软件开发并不是闭卷考试，当你真的需要实现一个红黑树的时候，可以对照着我讲的步骤，一点一点去实现。

现在，我就来总结一下，如何比较轻松地看懂我今天讲的操作过程。

第一点，把红黑树的平衡调整的过程比作魔方复原，不要过于深究这个算法的正确性。你只需要明白，只要按照固定的操作步骤，保持插入、删除的过程，不破坏平衡树的定义就行了。

第二点，找准关注节点，不要搞丢、搞错关注节点。因为每种操作规则，都是基于关注节点来做的，只有弄对了关注节点，才能对应到正确的操作规则中。在迭

代的调整过程中，关注节点在不停地改变，所以，这个过程一定要注意，不要弄丢了关注节点。

第三点，插入操作的平衡调整比较简单，但是删除操作就比较复杂。针对删除操作，我们有两次调整，第一次是针对要删除的节点做初步调整，让调整后的红黑树继续满足第四条定义，“每个节点到可达叶子节点的路径都包含相同个数的黑色节点”。但是这个时候，第三条定义就不满足了，有可能会存在两个红色节点相邻的情况。第二次调整就是解决这个问题，让红黑树不存在相邻的红色节点。

课后思考

如果你以前了解或者学习过红黑树，关于红黑树的实现，你也可以在留言区讲讲，你是怎样来学习的？在学习的过程中，有过什么样的心得体会？有没有什么好的学习方法？

欢迎留言和我分享，我会第一时间给你反馈。

精选留言：

- 沉睡的木木夕 2018-11-19 09:07:41
  感觉看不下去了，多层级的左旋右旋过程能不能再详细说一下？还有新增，删除那里的case几种情况，是不是就是说红黑树操作只有这几种情况？这里面的左右旋真的没搞懂 [46赞]

- 失火的夏天 2018-11-20 11:24:27

我看到老师说道要我举个例子，我不太清楚是我说的那个问题还是关于红黑树的理解，这里也分个区
一：我说的case3的情况是表示老师的画的那个图，case3图的例子根节点到左边叶子节点只经过2个黑色节点，到右边叶子节点却经过了3个黑色节点。

二：我这里就大概说下吧（一家之言，自己的一点经验，也希望别的同学来一起讨论）：
1.左旋右旋这个，个人还是认为要画图，不画图我自己也写不出那个代码……哈哈。

2.说到插入删除的算法，我说用到了递推，就比如插入的CASE1的情况，CASE1的处理之后，关注节点从本身变成了他的祖父节点（红色节点），这就是往根节点递推。不过我认为CASE1处理过一次之后，不一定会进入case2或者case3，是有可能还在case1的。

换句话说，就是可以在case1的情况下，一直往根节点走，因为当前节点永远是红色，所以在最后要把根节点涂黑。同时，只要进入到case2,case3的情况，就是变成平衡二叉树的单旋和双旋的情况，双旋的处理逻辑就是把双旋变成单旋（比如先右后左旋就是把树变成“左撇子”）。这个就变成了单左旋能一步到位处理的平衡了，这个就是归纳。把未知情况转化为已知，如果我没有记错的话，数学归纳法的核心思想就是递推和归纳。

3.其实我们只要记住，除了关注的节点所在的子树，其他的子树本身都是一颗红黑树，他们是满足红黑树的所有特征的。当关注节点往根节点递推时，这个时候关注节点的子树也已经满足了红黑树的定义，我们就不用再去特别关注子树的特征。只要注意关注节点往上的部分。这样就能把问题简化，思考的时候思路会清晰一些。

4.再说到删除算法，我看到很多同学没理解为什么要红-黑，黑-黑节点的出现。这里我的看法是，红黑树最不好控制的其实是最后一个的性质4（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），因为你永远不知道别的子树到底有多少个黑色节点。这里加入红-黑，黑-黑节点就可以控制红黑树满足性质4，到时候要恢复颜色，只要去掉多余的黑色即可。

接下来的处理思路就是要满足：1.每个节点不是红的就是黑的，2.相邻节点不能是红的。这个思路计时变复杂为简单。

删除的case1情况，并没有真正处理，而且为了进入接下来的case2,case3,case4，这里又是之前说到的归纳思想。case2的情况又是一个递推思路，关注节点往根节点递推，让其左右子树都满足红黑树的定义。因为往上推，右子树多了一个黑色节点，就把关注节点的兄弟节点变红，使其满足性质4.

删除的case3是为了进入case4，提前变色的原因和case2是一样的，都是为了满足性质4。同样是归纳推理的思路。都要记住一点，各种case下的其他子树节点都满足红黑树的定义，需要分类讨论的，都在这几种case情况中了。

4.最后的建议，其实说了这么多，很多的表达都不太清楚，但是个人感觉，数学基础好的同学，理解红黑树会好一些，学习的时候多画画图，人对图形的敏感肯定比文字高，另外的就是大家可以去看看源码，本人是做java开发的，jdk1.8的treemap就是用红黑树实现的，跟着源码多看看，跟着老师的说明或者百度上的教程思考，动笔画画图，都能理解的。我自己看jdk源码的也是看了将近两个月才大概明白（因为也在上班，只有晚上有一些时间来看看代码）。学习

的过程中要耐心，学习红黑树本身也不是为了“默写”，而是去学习思想，锻炼思维，复杂问题简单化，新问题转化为已解决过的问题等等。其实说到最后，都是用到了数学的思维，这些思维都会在潜移默化中影响到自己。

ps:本人并不是什么大牛，不会的东西也是很多很多，上面只是自己的一点感想。老师的建议很多，不要太去扣细节，我们要在一个整体的角度上去看红黑树是怎么处理的，知道他的应用场景，什么时候要用他，什么时候该用他，为什么要用他。这几个地方弄清楚，大部分就够了，我们要有的放矢，抓准学习的核心内容。 [37赞]

作者回复2018-11-21 10:12:41
倾佩

- 。。。 2018-11-21 14:58:52
  红黑树是由2-3树演变过来的，父节点指向的节点是红节点，那么就认为这两个节点其实是2-3树里面的3节点。如果有一个黑节点链接了两个红节点，那么就认为这是一个4-节点，因为2-3树不允许4-节点所以要将其提取出来。所谓的旋转。对于2-3树来说节点并没有变化。因为 红节点和指向他的节点本来就被认为是一个节点。建议看《算法》。里面讲了红黑树的精髓。看完以后怎么旋转怎么写红黑树就都知道了 [15赞]

- 凡 2018-11-19 09:01:34
  文章还没看完，前面的就忘了 [15赞]

- ban 2018-11-19 11:48:57
  1、没看懂哪个节点跟哪个节点左旋或者右旋
  2、为什么要有红/黑节点，为什么要有红-黑 黑-黑，作用是什么 [11赞]

- zixuan 2018-11-19 19:00:38
  这个不是设计而是推导出来的，源自2-3树 https://blog.csdn.net/fei33423/article/details/79132930 [10赞]

- iron_man 2018-11-19 15:43:08
  红黑树是2-3树的变形，以2-3树的角度去理解红黑树就简单了，作者可以结合2-3数来讲讲红黑树插入删除节点时的各种操作 [9赞]

- 任旭东 2018-11-19 09:57:56
  老师能讲一下调整策略是怎么推出来的么？就像数学公式一样，只知道公式，不知道推理过程很难理解 [9赞]

- 凉粉 2018-11-19 08:41:02
  一脸懵 [9赞]

- 沉睡的木木夕 2018-11-20 01:19:40
  回到家我又翻看了《算法导论》中红黑树章节，又似乎加了点理解。
  虽然里面时间复杂度依旧是用数学推导出来的，我看不懂，不过里面讲的红黑树5个性质：
  1.

每个节点不是红色就是黑色
2.根节点是黑色
3.每个叶子结点（NIL）是黑色的
4.如果一个节点是红色的，则他的两个子节点都是黑色的
5.对每个子结点，从该结点到其所有后代叶子结点的简单路劲上，均包含相同数目的黑色结点
后面讲到的3种情况都是为了满足这5点特性而做出的相应的变化
老师在讲解左右旋的时候一张图就概括了，说实话我第一时间真没看懂，花了大量时间这方面的理解，后来在《算法导论》中居然找到了浅显易懂的中文描述左右旋的过程，我概述为3点
1.左右旋操作中，只有指针的改变，其他所有属性都保持不变
2.左旋的过程与右旋的过程是对称的（伪代码也是对称的）
3.左旋为例，以x结点左旋，那么y成为该子树的跟结点，x成为y的左子结点，y的左子结点成为x的右子结点（所以右旋就是反过来的）
那么当多层级的呢，也就是文中case3中的右旋过程，因为是a的曾祖父结点来进行右旋，所以文中的“c”就是x，“a和b”就是y，那么右旋用文字描述就是“y（a,b）成为跟结点，x（c）成为y的右结点，y的右结点成为x的左结点，其他指针不变”
得到的子树结构然后根据前面说的5个特性（同老师说的4点特征）再做出响应的颜色变化
~ ~ ~ ~
唉，真是智商捉急 [8赞]

作者回复2018-11-20 09:28:05

- 失火的夏天 2018-11-19 00:34:25
  先提一个问题：老师，插入的case3情况是不是不满足红黑树的第四个条件？根节点到左边的叶子节点只经过两个黑色节点，但是根节点到右边的却经过三个黑色节点。

  学习红黑树在于理解他的思想，比如为什么要旋转，是因为高度不平衡。为什么有双旋，因为单旋没法一步到位，所以把一个新问题转化为已经解决过的问题。旋转的学习其实自己画一下图，一步步走，数形结合的思想用上就好。插入的核心思想就是，把红色节点往根节点递推，然后把根节点涂黑。删除同样是往根节点递推，转化成处理过的情况因为越靠近根节点，节点关系也就越清晰。其实红黑树的处理也有动态规划的思想，只有处理的这个节点子树是可能破坏的，而其他节点子树都是红黑树，都满足红黑树的定义。用数学归纳法的思路来想这些问题，感觉就不会被复杂的情况搞得头晕。 [6赞]

  作者回复2018-11-20 10:09:12
  能否举个例子呢

- Andylee 2018-11-19 13:16:27
  看到删除的部分突然懵了，什么时候多了一个红黑，黑黑，一个节点两个颜色的概念了…… [5赞]

往事随风，顺其自然 2018-11-19 09:09:18
为什么红黑和黑黑这样来标注，这两种看成是黑色还是红色，什么时候当成黑色，什么时候当成红色 [4赞]

- qinggeouye 2018-12-05 23:55:19
  试着理解了一下「实现红黑树的基本思想」图例 1 中左旋和右旋的概念，可以将图例 1 中的树看作一个定滑轮：

  围绕节点 X 的左旋：
  拉住节点 X 左边的 a 子树，向下拉，将节点 Y 拉到节点 X 的位置，a 子树仍是节点 X 的左子树，而节点 X 成为了节点 Y 的左子节点，那么就将原先节点 Y 的左子树 b 摘下来，变成节点 X 的右子树；

  同理，围绕节点 X 的右旋：
  拉住节点 X 右边的 r 子树，向下拉，将节点 Y 拉到节点 X 的位置，a 子树仍是节点 Y 的左子树，而节点 X 成为了节点 Y 的右子节点，那么就将原先节点 Y 的右子树 b 摘下来，变成节点 X 的左子树； [2赞]

- 数据结构和算法 2018-11-30 07:32:58
  这个图文结合对红黑树公析的很详细https://blog.csdn.net/abcdef314159/article/details/77193888 [2赞]

- crazyone 2018-11-19 09:25:38
  插入的case2到case3是否连贯的案例？case2调整后，a的父节点是c，case3调整前，a的父节点是b。 [2赞]

- 卡罗 2018-11-19 09:16:33
  魔方还原公式总共200多种，要全部背下来并熟练运用，花的时间因人而异。我觉得这和你完全要掌握红黑树一样，你需要把每种情况都熟记，方能熟练运用。 [2赞]

- Brandon 2018-12-13 14:46:10
  关键一点为什么是红，什么是黑，为什么要这么分，都是一个疑惑
  对数据结果和算法很感兴趣，想开拓眼界，训练思维
  左右旋，只有这两种情况，已经穷尽了所有的可能
  二叉查找树中新插入的节点都是放在叶子节点上

  插入：的动作无非就是左右旋转和改变颜色，
  有三种情况，先不记忆了，没有明白原理

  删除：准确的说没看懂，什么一半是红一半是黑，

很多疑问，决定跳过 [1赞]

- 碧玉簪 2018-11-28 19:34:12

  您好，老师有一点不太明白，就是删除操作时，以初步调整为例，case3的情况下，原文（如果节点 d 是黑色，为了不违反红黑树的最后一条定义，我们给节点 d 的右子节点 c 多加一个黑色，这个时候节点 c 就成了“红 - 黑”或者“黑 - 黑”；），最后一条是（每个节点，从该节点到达其可达叶子节点的所有路径，都包含相同数数目的黑色节点。），能理解要给节点 d 的右子节点 c 多加一个黑色，但图中的表示方法没看明白，引文原来的d节点是在c和e之间，所以所加的黑色节点是不是也应该在c和e之间，这点不太确定影响后边大半部分的理解，还请老师不吝赐教，多谢，真的挺焦急的 [1赞]

- 大次狼 2018-11-20 21:50:08

  添加的case2中一开始就不满足红黑球的定义了，根节点到右子节点经历过的黑色节点数比经过左边可到答节点数要多1 [1赞]

  作者回复2018-11-21 09:53:08

  因为有可能是从case1过来的