平衡二叉树（AVL树 – 红黑树）

王红元 coderwhy

目录
content

目录
content

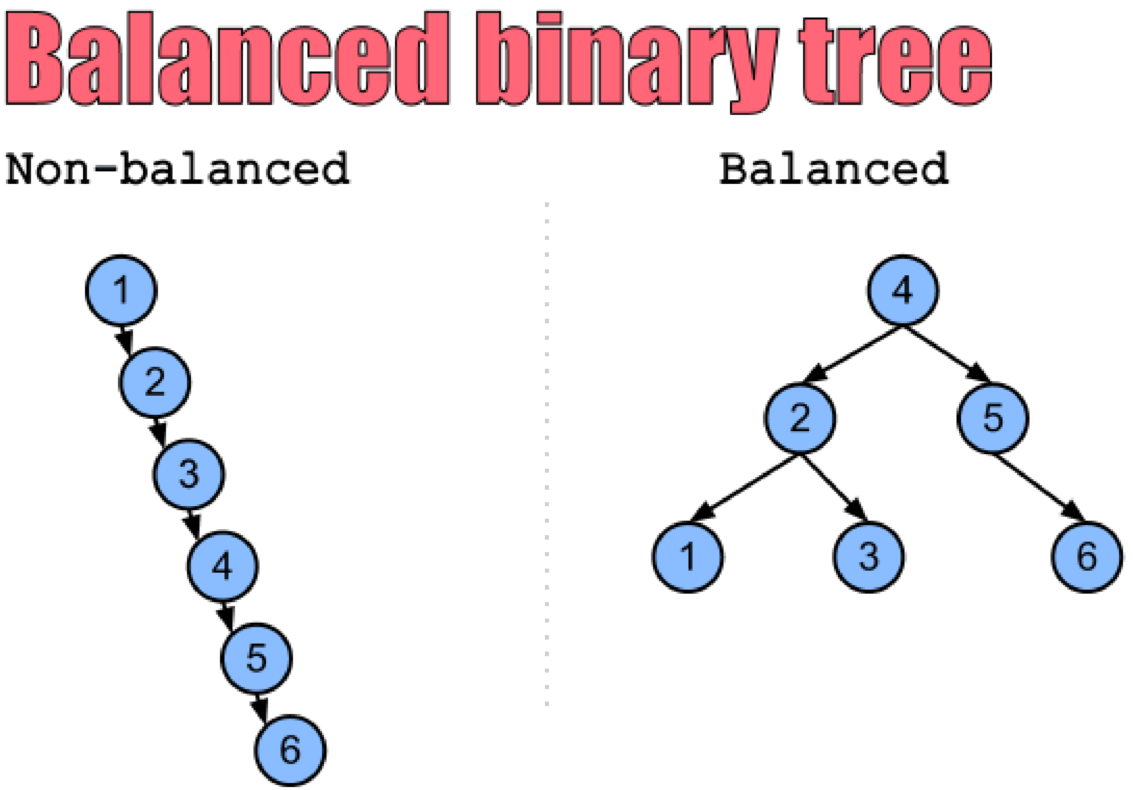
平衡树（Balanced Tree）

- **平衡树（Balanced Tree）是一种特殊的二叉搜索树：**
  - 其目的是通过一些特殊的技巧来维护树的高度平衡；
  - 从而保证树的搜索、插入、删除等操作的时间复杂度都较低；
- **为什么需要平衡树呢?**
  - 如果一棵树退化成链状结构，那么搜索、插入、删除等操作的时间复杂度就会达到最坏情况，即O(n)，因此不能满足要求。
  - 平衡树通过不断调整树的结构，使得树的高度尽量平衡，从而保证搜索、插入、删除等操作的时间复杂度都较低，通常为O(logn)。
  - 因此，如果我们需要高效地处理大量的数据，那么平衡树就显得非常重要了。

- **平衡树的应用非常广泛，如索引、内存管理、图形学等领域均有广泛使用。**

平衡树（Balanced Tree）

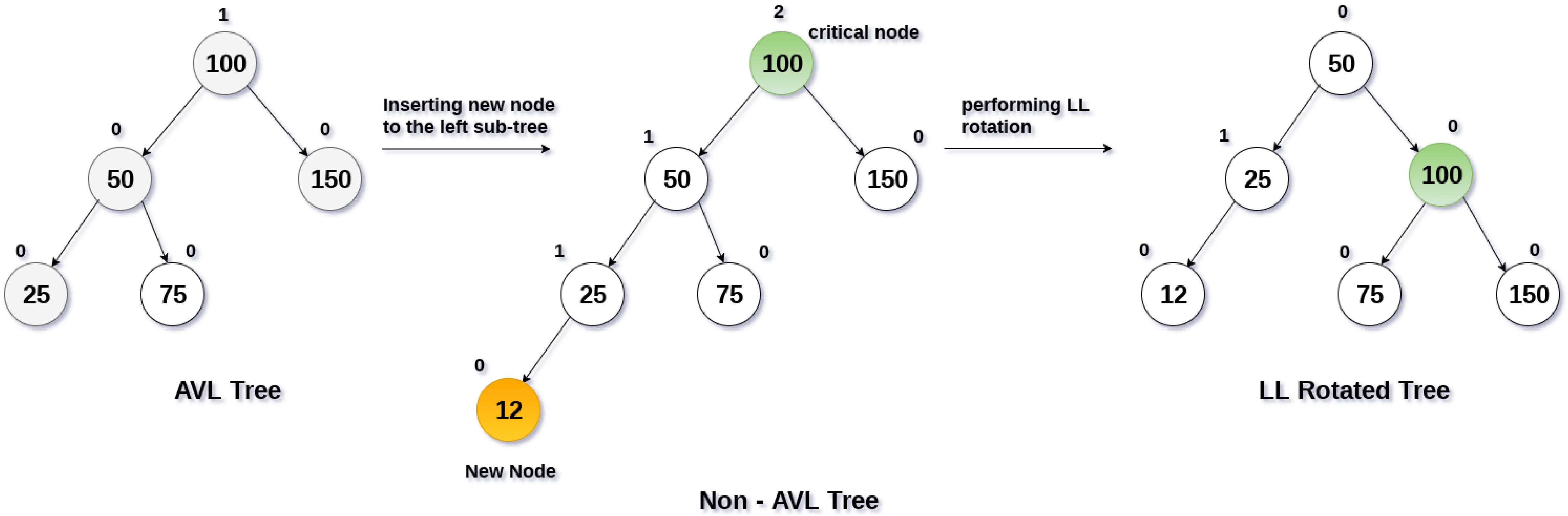
- 比如我们连续的插入1、2、3、4、5、6的数字，那么前面的二叉搜索树最终形成的结构如下



- 事实上不只是添加会导致树的不平衡，删除元素也可能会导致树的不平衡。

如何让树可以更加平衡呢?

- 方式一：限制插入、删除的节点（比如在树特性的状态下，不允许插入或者删除某些节点，不现实）
- 方式二：在随机插入或者删除元素后，通过某种方式观察树是否平衡，如果不平衡通过特定的方式（比如旋转），让树保持平衡。



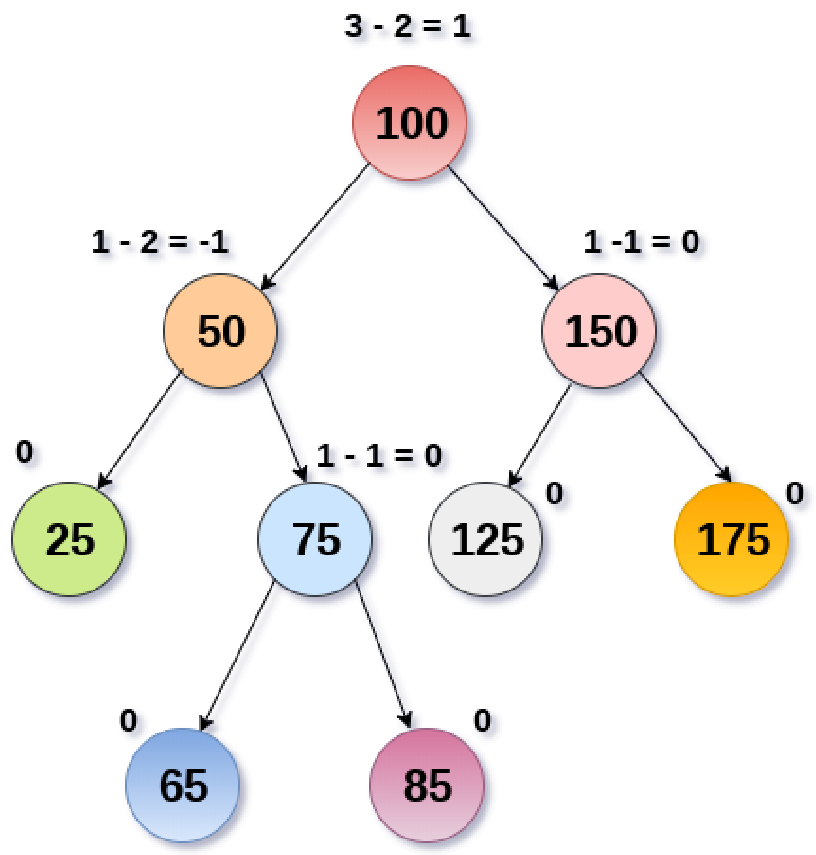
常见的平衡二叉搜索树

- **常见的平衡二叉搜索树有哪些呢?**
  - AVL树：这是一种最早的平衡二叉搜索树，在1962年由G.M. Adelson-Velsky和E.M. Landis发明。
  - 红黑树：这是一种比较流行的平衡二叉搜索树，由R. Bayer在1972年发明。
  - Splay树：这是一种动态平衡二叉搜索树，通过旋转操作对树进行平衡。
  - Treap：这是一种随机化的平衡二叉搜索树，是二叉搜索树和堆的结合。
  - B-树：这是一种适用于磁盘或其他外存存储设备的多路平衡查找树。
- **这些平衡二叉搜索树都用于保证搜索树的平衡，从而在插入、删除、查找操作时保证了较低的时间复杂度。**

- **红黑树和AVL树是应用最广泛的平衡二叉搜索树:**
  - 红黑树：红黑树被广泛应用于实现诸如操作系统内核、数据库、编译器等软件中的数据结构，其原因在于它在插入、删除、查找操作时都具有较低的时间复杂度。
  - AVL树：AVL树被用于实现各种需要高效查询的数据结构，如计算机图形学、数学计算和计算机科学研究中的一些特定算法。

AVL树

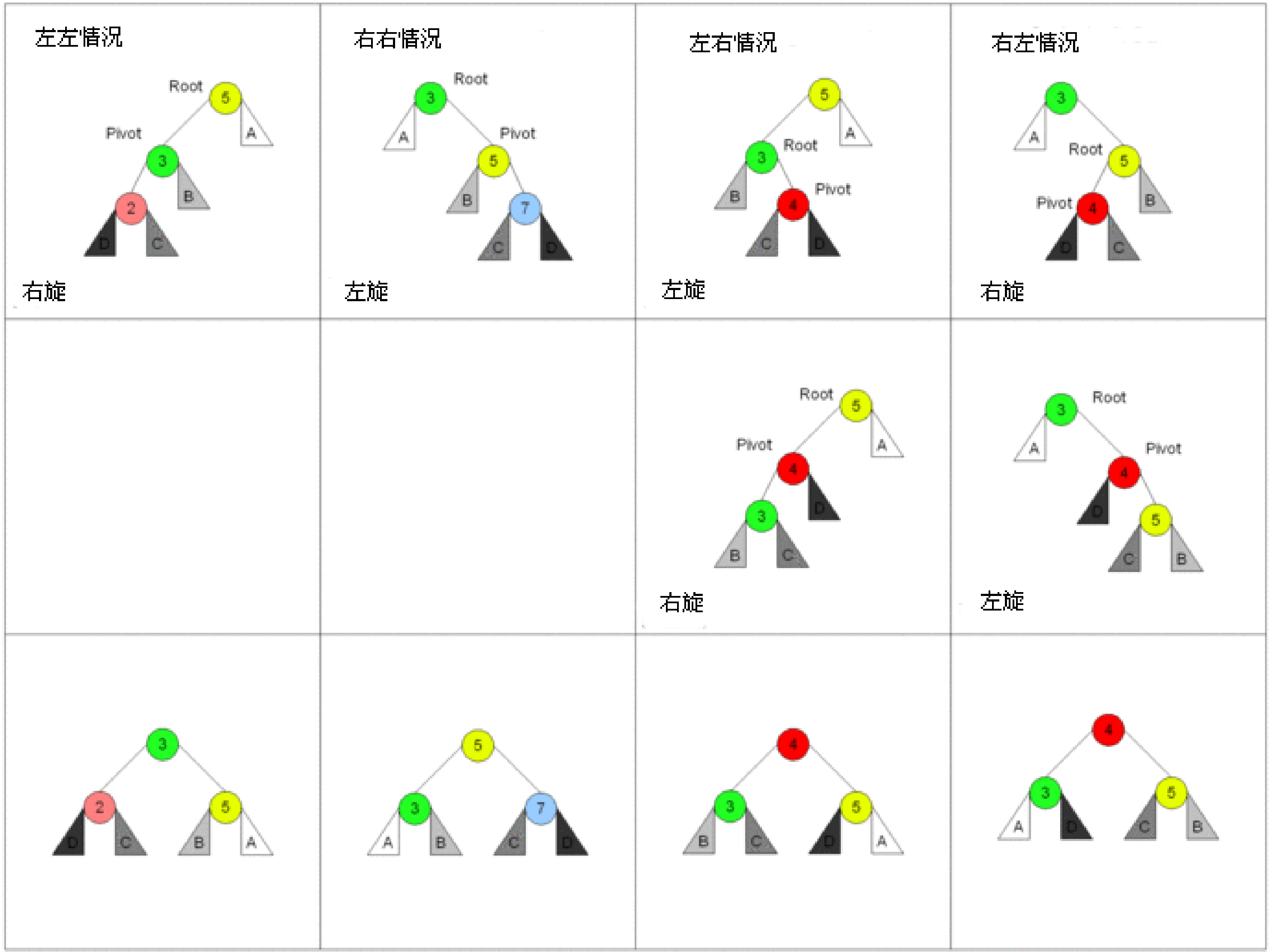
- AVL树（Adelson-Velsky and Landis Tree）是由G.M. Adelson-Velsky和E.M. Landis在1962年发明的
  - 它是一种自（Self）平衡二叉搜索树。
  - 它是二叉搜索树的一个变体，在保证二叉搜索树性质的同时，通过旋转操作保证树的平衡。
- 在AVL树中，每个节点都有一个权值，该权值代表了以该节点为根节点的子树的高度差。
  - 在AVL树中，任意节点的权值只有1或-1或0，因此AVL树也被称为高度平衡树。
  - 对于每个节点，它的左子树和右子树的高度差不超过1。
  - 这使得AVL树具有比普通的二叉搜索树更高的查询效率。
  - 当插入或删除节点时，AVL树可以通过旋转操作来重新平衡树，从而保证其平衡性。
- AVL树的插入和删除操作与普通的二叉搜索树类似，但是在插入或者删除之后，需要继续保持树的平衡。
  - AVL树需要通过旋转操作来维护平衡。
  - 有四种情况旋转操作：左左情况、右右情况、左右情况和右左情况双旋。
  - 具体使用哪一种旋转，要根据不同的情况来进行区分和判断。
- 由于AVL树具有自平衡性，因此其最坏情况下的时间复杂度仅O(log n)。



AVL Tree

AVL树的旋转情况

Root 是失去平衡的樹的根節點，Pivot 是旋轉后重新平衡的樹的根節點。



AVL树结构的封装过程

- **手写实现AVL树本身的过程是相当的复杂的，所以对于它的学习路线我进行了专门的设计。**
- **我们如何学习呢?**
  - 步骤一：学习AVL树节点的封装；
  - 步骤二：学习AVL树的旋转情况下如何编写代码；
  - 步骤三：写出不同情况下进行的不同旋转操作；
  - 步骤四：写出插入操作后，树的再平衡操作；
  - 步骤五：写出删除操作后，树的再平衡操作；
- **我们可以通过分治的思想，一步步实现上面的功能，再将功能组合在一起就完成了AVL树的编写过程。**

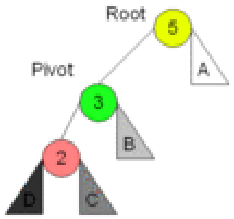
coderwhy

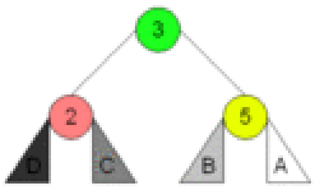
AVLTreeNode – 节点的封装

```
class AVLTreeNode<T> extends TreeNode<T> {
  left: AVLTreeNode<T> | null = null
  right: AVLTreeNode<T> | null = null
  parent: AVLTreeNode<T> | null = null

  private getHeight(): number {
    const leftHeight = this.left ? this.left.getHeight() : 0;
    const rightHeight = this.right ? this.right.getHeight() : 0;

    return Math.max(leftHeight, rightHeight) + 1;
  }

  public getBalanceFactor(): number {
    const leftHeight = this.left ? this.left.getHeight() : 0;
    const rightHeight = this.right ? this.right.getHeight() : 0;
    return leftHeight - rightHeight;
  }

  public get isBalanced(): boolean {
    const balanceFactor = this.getBalanceFactor();
    return balanceFactor >= -1 && balanceFactor <= 1;
  }

  public get higherChild(): AVLTreeNode<T> | null {
    let leftHeight = this.left ? this.left.getHeight(): 0
    let rightHeight = this.right ? this.right.getHeight(): 0
    if (leftHeight > rightHeight) return this.left
    if (leftHeight < rightHeight) return this.right
    // 高度一样，返回同方向节点
    return this.left ? this.left: this.right
  }
}
```

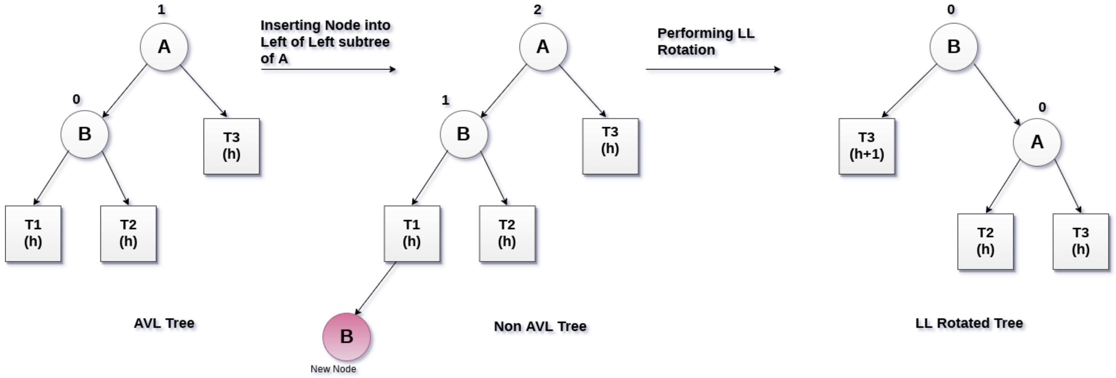
AVL树的旋转 – 右旋转

左左情况





右旋



实现步骤分析

处理pivot的位置

- *1.选择当前节点的左子节点作为旋转轴心(pivot)*
- *2.pivot的父节点指向this(root)当前节点的父节点*

处理pivot右节点的位置

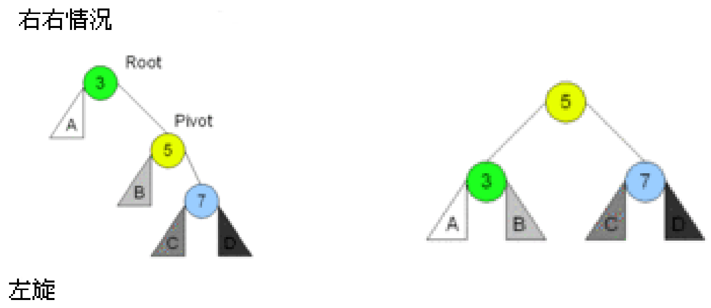
- *3.this(root)当前节点的左节点,指向pivot的右节点*
- *4.如果右节点有值，那么右节点的父节点指向this节点*

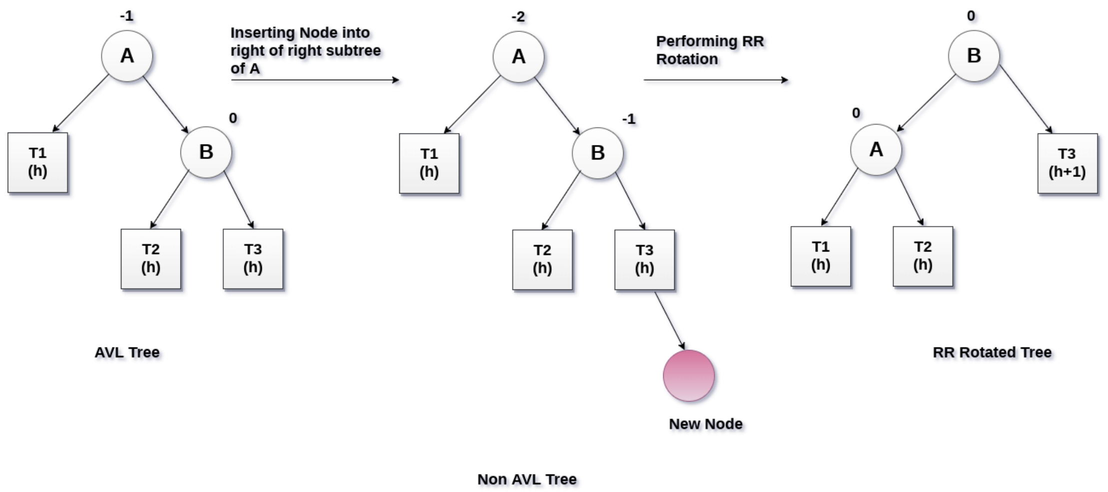
处理this节点的位置

- *5.pivot的右节点指向this*
- *6.this节点的父节点指向pivot*
- *7.判断是否有父节点，父节点的left/right指向pivot*

```
public rotateRight(): AVLTreeNode<T> {
  const isLeft = this.isLeft
  const isRight = this.isRight

  // 1.选择当前节点的左子节点作为旋转轴心(pivot)
  const pivot = this.left!
  // 2.pivot的父节点指向this(root)当前节点的父节点
  pivot.parent = this.parent

  // 3.this(root)当前节点的左节点，指向pivot的右节点
  this.left = pivot.right
  // 4.如果右节点有值，那么右节点的父节点指向this节点
  if (pivot.right) {
    pivot.right.parent = this
  }

  // 5.pivot的右节点指向this
  pivot.right = this
  // 6.this节点的父节点指向pivot
  this.parent = pivot

  // 7.判断是否有父节点，父节点的left/right指向pivot
  if (!pivot.parent) {
    return pivot
  } else if (isLeft) {
    pivot.parent.left = pivot
  } else if (isRight) {
    pivot.parent.right = pivot
  }
  return pivot
}
```

AVL树的旋转 – 左旋转





实现步骤分析

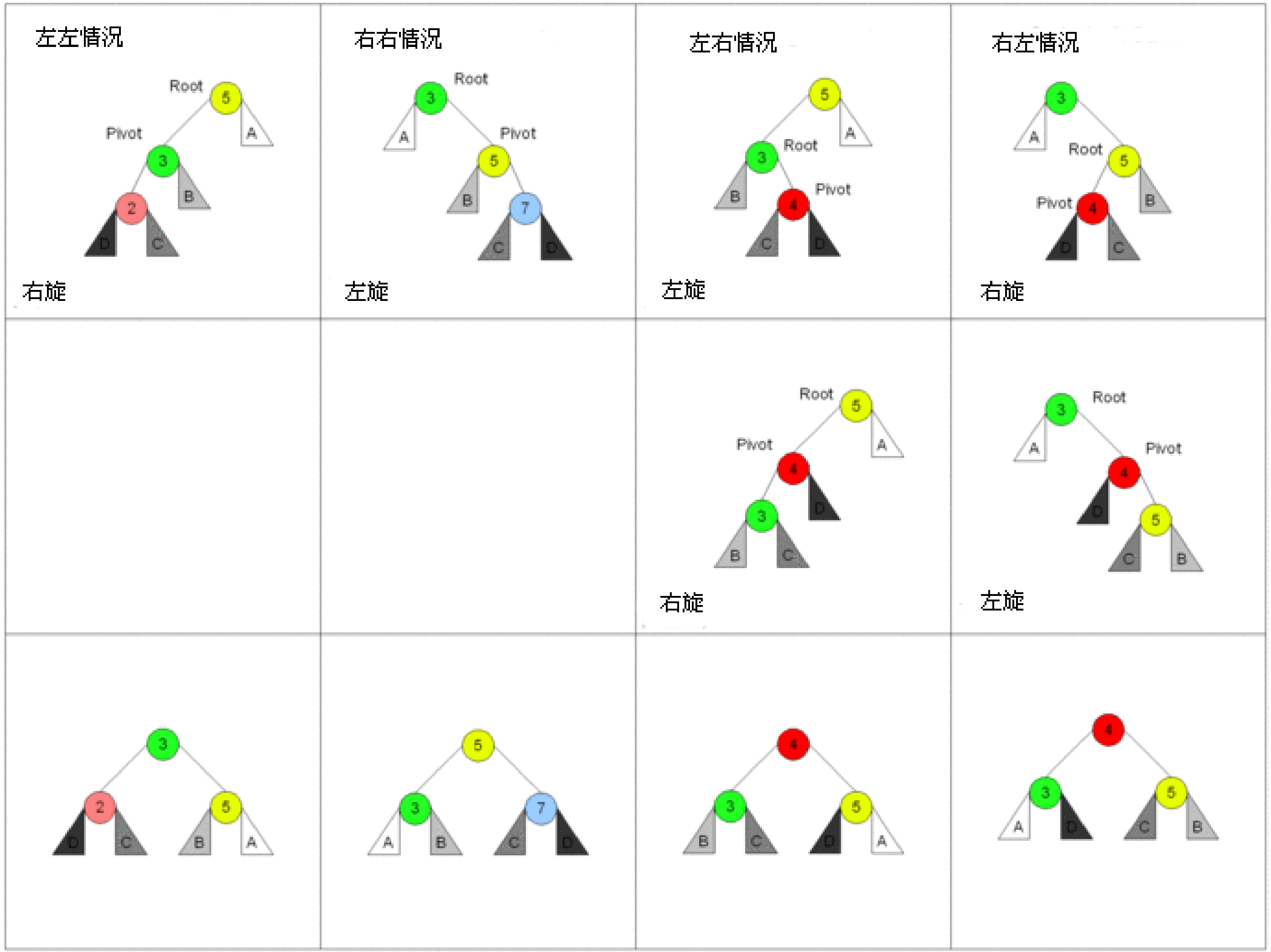
- *1.选择当前节点的右子节点作为旋转轴心(pivot)*
- *2.pivot的父节点指向this(root)当前节点的父节点*
- *3.this(root)当前节点的右节点，指向pivot的左节点*
- *4.如果左节点有值，那么左节点的父节点指向this节点*
- *5.pivot的右节点指向this*
- *6.this节点的父节点指向pivot*
- *7.判断是否有父节点，父节点的left/right指向pivot*

```
public rotateLeft(): AVLTreeNode<T> {
  const isLeft = this.isLeft
  const isRight = this.isRight

  // 1.选择当前节点的右子节点作为旋转轴心(pivot)
  const pivot = this.right!
  // 2.pivot的父节点指向this(root)当前节点的父节点
  pivot.parent = this.parent


  // 3.this(root)当前节点的右节点，指向pivot的左节点
  this.right = pivot.left
  // 4.如果左节点有值，那么左节点的父节点指向this节点
  if (pivot.left) {
    pivot.left.parent = this
  }

  // 5.pivot的左节点指向this
  pivot.left = this
  // 6.this节点的父节点指向pivot
  this.parent = pivot

  // 7.判断是否有父节点，父节点的left/right指向pivot
  if (!pivot.parent) {
    return pivot
  } else if (isLeft) {
    pivot.parent.left = pivot
  } else if (isRight) {
    pivot.parent.right = pivot
  }

  return pivot
}
```

旋转的四种情况 - 分析

coderwhy

Root 是失去平衡的樹的根節點，Pivot 是旋轉后重新平衡的樹的根節點。

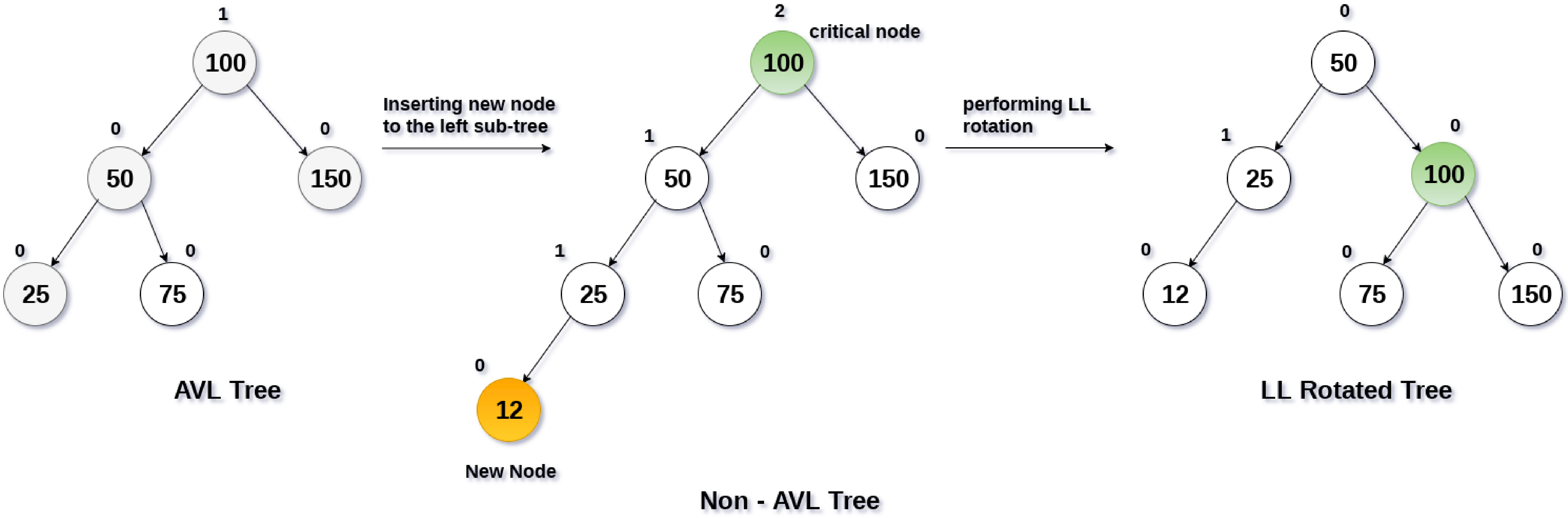


- **如何对AVL树进行旋转呢?**
- **首先，我们需要先找到失衡的节点:**
  - 失衡的节点称之为grandParent
  - 失衡节点的儿子（更高的儿子）称之为parent
  - 失衡节点的孙子（更高的孙子）称之为current
- **如果从grandParent到current的是:**
  - LL：左左情况，那么右旋转；
  - RR：右右情况，那么左旋转；
  - LR：左右情况，那么先对parent进行左旋转，再对grandParent进行右旋转；
  - RL：右左情况，那么先对parent进行右旋转，再对grandParent进行左旋转；

旋转的四种情况 - 代码实现

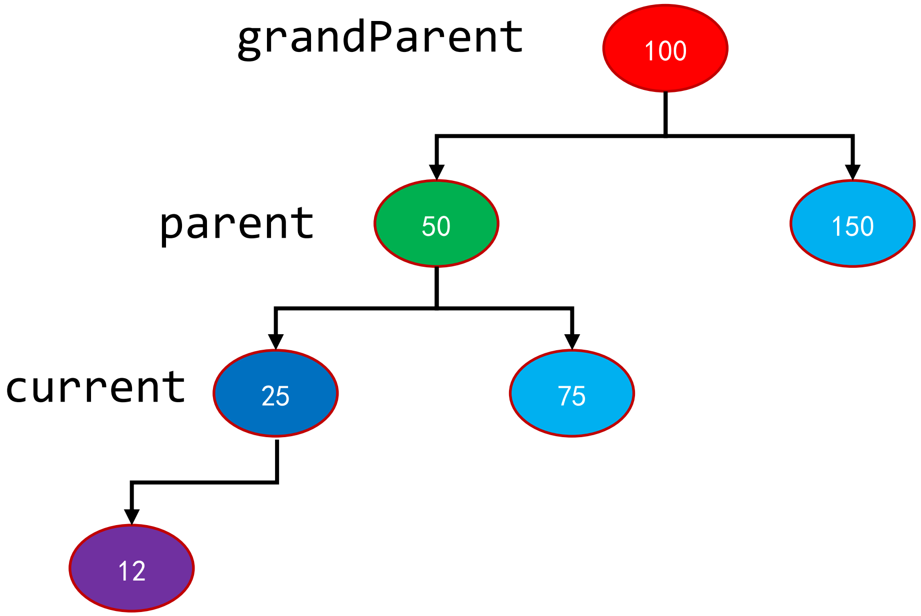
```
rebalance(grand: AVLTreeNode<T>) {
  const parent = grand.higherChild
  const current = parent?.higherChild

  let resultNode: AVLTreeNode<T> | null = null

  if (parent?.isLeft) { // L左
    if (current?.isLeft) { // LL左左
      resultNode = grand.rotateRight()
    } else { // LR左右
      parent.rotateLeft()
      resultNode = grand.rotateRight()
    }
  } else { // R右
    if (current?.isLeft) { // RL右左
      parent?.rotateRight()
      resultNode = grand.rotateLeft()
    } else { // RR右右
      resultNode = grand.rotateLeft()
    }
  }

  if (resultNode.parent === null) {
    this.root = resultNode
  }
}
```

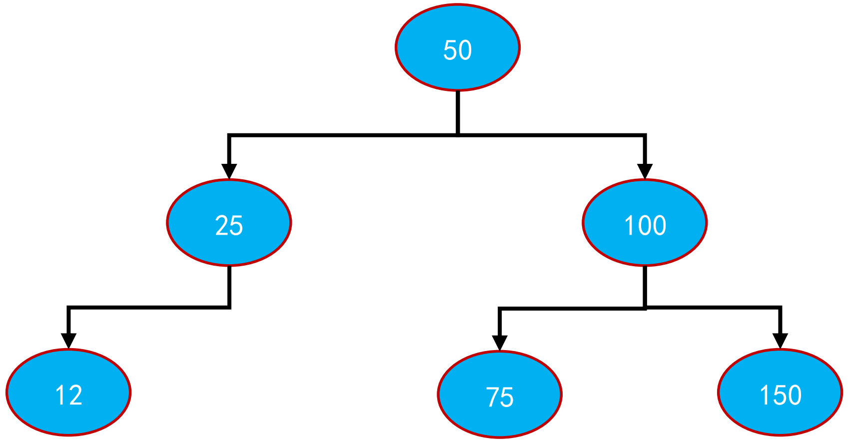
LL的案例演示

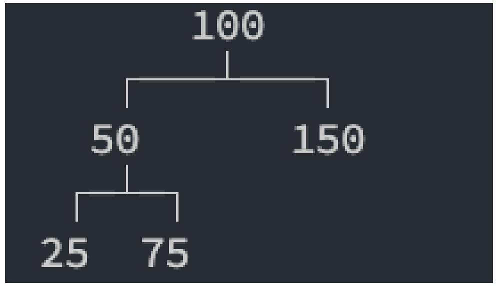


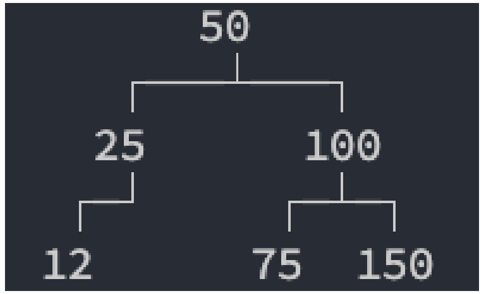
1
100
0
50
0
150
0
25
0
75
AVL Tree
Inserting new node
to the left sub-tree
2
critical node
100
1
50
0
150
1
25
0
75
0
12
New Node
Non - AVL Tree
performing LL
rotation
0
50
1
25
0
100
0
12
0
75
0
150
LL Rotated Tree

插入的案例演示


grandParent
100
parent
50
150
current
25
75
12


50
25
100
12
75
150


100
50
150
25
75


50
25
100
12
75
150

insert的调整和再平衡

■ 我们可以继续使用之前的插入操作，在插入完成后去检查树的平衡：

```
protected checkBalance(current: TreeNode<T>) {}

/** 插入数据的操作 */
insert(value: T) {
  // 1.根据传入value创建Node(TreeNode)节点
  const newNode = new TreeNode(value)

  // 2.判断当前是否已经有了根节点
  if (!this.root) { // 当前树为空
    this.root = newNode
  } else { // 树中已经有其他值
    this.insertNode(this.root, newNode)
  }

  // 3.检查节点是否平衡
  this.checkBalance(newNode)
}
```

```
protected checkBalance(currentNode: AVLTreeNode<T>, isAdd = true): void {
  let current = currentNode.parent
  while (current) {
    // 找到不平衡的节点后，就让它恢复平衡
    if (!current.isBalanced) {
      this.rebalance(current)
      if (isAdd) break
    }
    current = current.parent
  }
}
```

细节一 – Node节点的类型

- 这里有一个小细节 - BSTree插入的节点类型 TreeNode
- 我们可以封装一个模板方法，让子类来进行重写即可

```
protected createNode(value: T): TreeNode<T> {
  return new TreeNode(value)
}

protected checkBalance(current: TreeNode<T>) {}

/** 插入数据的操作 */
insert(value: T) {
  // 1.根据传入value创建Node(TreeNode)节点
  const newNode = this.createNode(value)
```

```
protected createNode(value: T): AVLTreeNode<T> {
  return new AVLTreeNode(value)
}
```

细节二 – Node节点需要保存父节点

- 因为之后我们需要从当前节点中寻找parent节点，所以最好让每一个节点都保存一份parent节点（之前代码是不需要的）

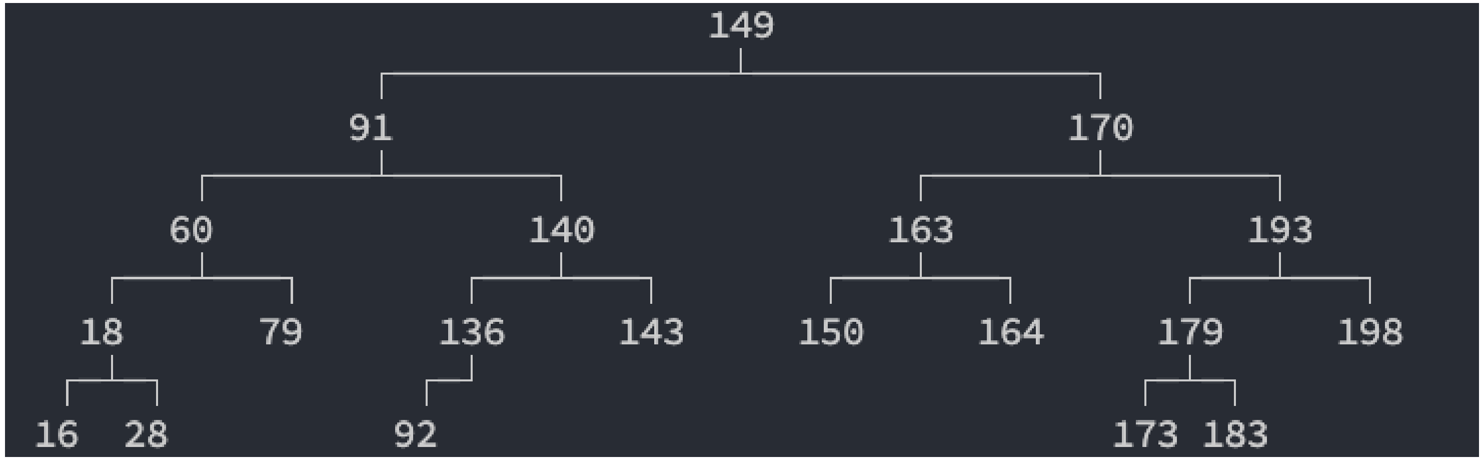
```
private insertNode(node: TreeNode<T>, newNode: TreeNode<T>) {
  if (newNode.value < node.value) { // 去左边继续查找空白位置
    if (node.left === null) { // node节点的左边已经是空白
      node.left = newNode
      newNode.parent = node
    } else {
      this.insertNode(node.left, newNode)
    }
  } else { // 去右边继续查找空白位置
    if (node.right === null) {
      node.right = newNode
      newNode.parent = node
    } else {
      this.insertNode(node.right, newNode)
    }
  }
}
```

coderwhy

随机插入数据的案例演示

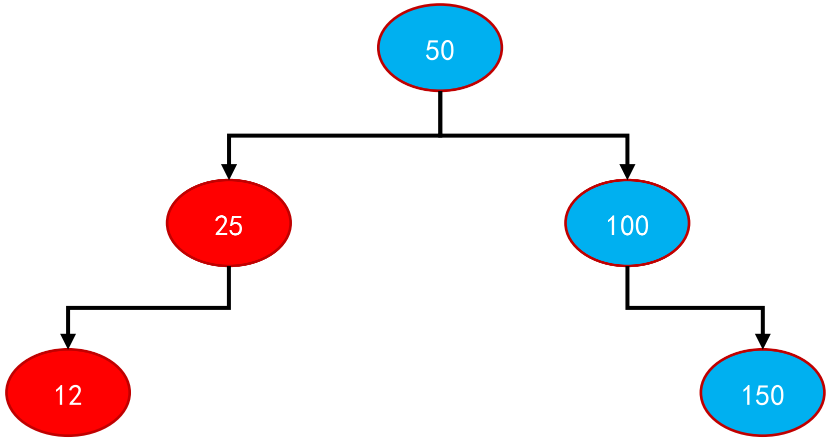
■ **我们可以随机一些数字，插入到AVLTree中来查看树是否平衡：**

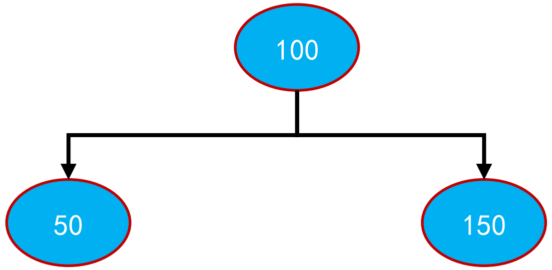
```javascript
for (let i = 0; i < 20; i++) {
  const num = Math.ceil(Math.random() * 200)
  avltree.insert(num)
}

avltree.print()
```

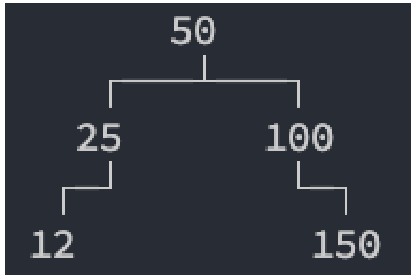


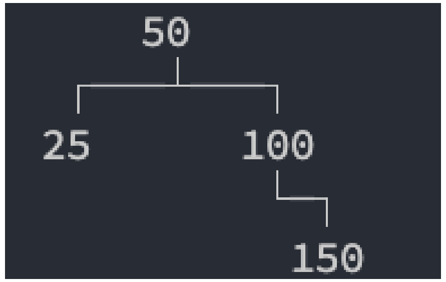
coderwhy

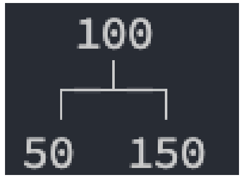
删除的案例演示











remove的调整和再平衡

```typescript
  remove(value: T): boolean {
    // 1.搜索: 当前是否有这个value
    const current = this.searchNode(value)
    if (!current) return false

    // 2.获取到三个东西: 当前节点/父节点/是属于父节点的左子节点, 还是右子节点
    let replaceNode: TreeNode<T> | null = null
    if (current.left === null && current.right === null) {
      replaceNode = null
    } else if (current.right === null) {
      replaceNode = current.left
    } else if (current.left === null) {
      replaceNode = current.right
    } else {
      const successor = this.getSuccessor(current)
      replaceNode = successor
    }

    if (current === this.root) {
      this.root = replaceNode
    } else if (current.isLeft) {
      current.parent!.left = replaceNode
    } else {
      current.parent!.right = replaceNode
    }

    this.checkBalance()

    return true
  }
}
```

问题 – checkBalance传入谁?

- **思考： checkBalance传入谁?**
  - 很明显应该是删除的节点;
  - 但是如果有两个子节点的情况，我们需要找的是前期和后继，最终是将前驱和后继位置的节点删除掉的;
  - 寻找的应该是从AVL树中被移除位置的节点;
- **情况一：删除节点本身是叶子节点**
  - 传入current节点即可，并且需要根据current节点的parent去寻找失衡节点;
- **情况二：删除节点只有一个子节点**
  - 传入current节点即可，并且需要根据current节点的parent去寻找失衡节点;
- **情况三：删除节点有两个子节点:**
  - 找到后继节点successor原来的位置，并且需要根据successor节点去寻找失衡节点;
- **这里的关键点是两个:**
  - 关键点一：必须要找到检测位置的节点;
  - 关键点二：检测位置的节点必须有父节点;

coderwhy

关键点一 – 寻找delNode节点

```
remove(value: T): boolean {
  // 1.搜索: 当前是否有这个value
  const current = this.searchNode(value)
  if (!current) return false

  let delNode: TreeNode<T> = current

  // 2.获取到三个东西: 当前节点/父节点/是属于父节点的左子节点, 还是右子节点
  let replaceNode: TreeNode<T> | null = null
  if (current.left === null && current.right === null) {
    replaceNode = null
  } else if (current.right === null) {
    replaceNode = current.left
  } else if (current.left === null) {
    replaceNode = current.right
  } else {
    const successor = this.getSuccessor(current)
    replaceNode = successor

    // 这里是successor
    delNode = successor
  }

  if (current === this.root) {…
  } else if (current.isLeft) {…
  } else {…
  }

  this.checkBalance(delNode)

  return true
```

关键点二 – delNode节点的父节点

- **情况一和情况二：**
  - delNode节点有正确的父节点，但是后面的替换节点会失去正确的父节点；

```
if (replaceNode) {
  replaceNode.parent = current
}
```

关键点二 – delNode节点的父节点

■ **情况三：**

- 如果需要找后继节点，那么父节点的操作会比较复杂；
- 我们可以利用我之前提到的第二种方案，来减少一些父节点的设置操作；

```
private getSuccessor(delNode: TreeNode<T>): TreeNode<T> {
  // 获取右子树
  let current = delNode.right
  let successor: TreeNode<T> | null = null
  while (current) {…
  }

  // 拿到了后继节点
  if (successor !== delNode.right) {
    successor!.parent!.left = successor!.right
    // successor!.right = delNode.right
    if (successor!.right) {
      successor!.right.parent = successor!.parent
    }
  } else {
    delNode.right = successor!.right
  }

  // 一定要进行的操作：将删除节点的left，赋值给后继节点的left
  // successor!.left = delNode.left

  return successor!
}
```

```
remove(value: T): boolean {
  // 1.搜索：当前是否有这个value
  const current = this.searchNode(value)
  if (!current) return false

  let delNode: TreeNode<T> = current

  // 2.获取到三个东西：当前节点/父节点/是属于父节点的左子节点，还是右子节点
  let replaceNode: TreeNode<T> | null = null
  if (current.left === null && current.right === null) {
    replaceNode = null
  } else if (current.right === null) {
    replaceNode = current.left
  } else if (current.left === null) {
    replaceNode = current.right
  } else {
    const successor = this.getSuccessor(current)
    current.value = successor.value
    // 这里是successor
    delNode = successor
    this.checkBalance(delNode)
    return true
  }
```

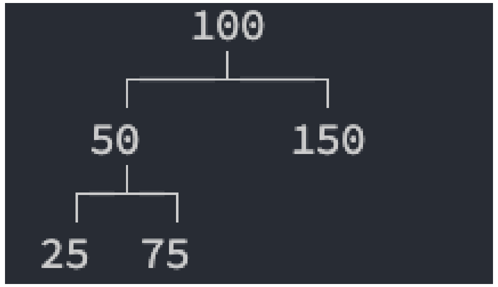
随机插入和删除测试

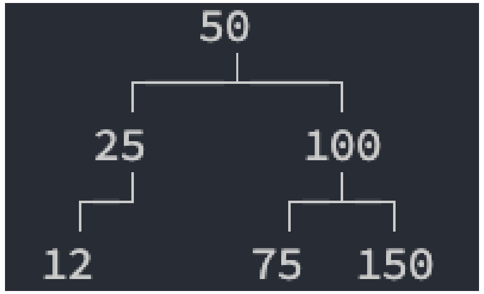
■ 我们可以随机一些数字，插入，再删除，AVLTree中来查看树是否平衡：

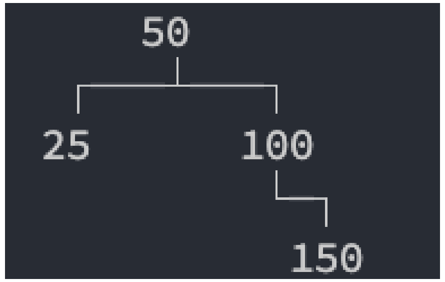
```
const avltree = new AVLTree<number>()
const nums: number[] = []
for (let i = 0; i < 20; i++) {
  const num = Math.ceil(Math.random() * 200)
  if (i < 10) nums.push(num)
  avltree.insert(num)
}

avltree.print()

for (const item of nums) {
  console.log("删除节点:", item)
  avltree.remove(item)
  avltree.print()
}
```

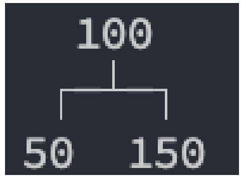
rebalance的优化

- **目前我们rebalance的操作是哪些节点会执行呢?**
  - 插入节点的所有父节点（一直向上查找父节点）；
  - 删除节点的所有父节点（一直向上查找父节点）；
- **但是 是否需要每次插入、删除都需要将所有的父节点都rebalance操作呢?**
  - 这个取决于在插入一个节点后后，是否改变了祖父节点的高度;
  - 这个取决于在删除一个节点后后，是否改变了祖父节点的高度;









- **我们得出结论:**
  - 插入节点，再平衡**rebalance**后不需要继续后续节点的再平衡**rebalance** ；
  - 删除节点，再平衡**rebalance**后需要继续后续节点的再平衡**rebalance**;

coderwhy

如何优化代码呢?

```
protected checkBalance(currentNode: AVLTreeNode<T>, isAdd = true): void {
  let current = currentNode.parent
  while (current) {
    // 找到不平衡的节点后，就让它恢复平衡
    if (!current.isBalanced) {
      this.rebalance(current)
      if (isAdd) break
    }
    current = current.parent
  }
}
```

邂逅 红黑树

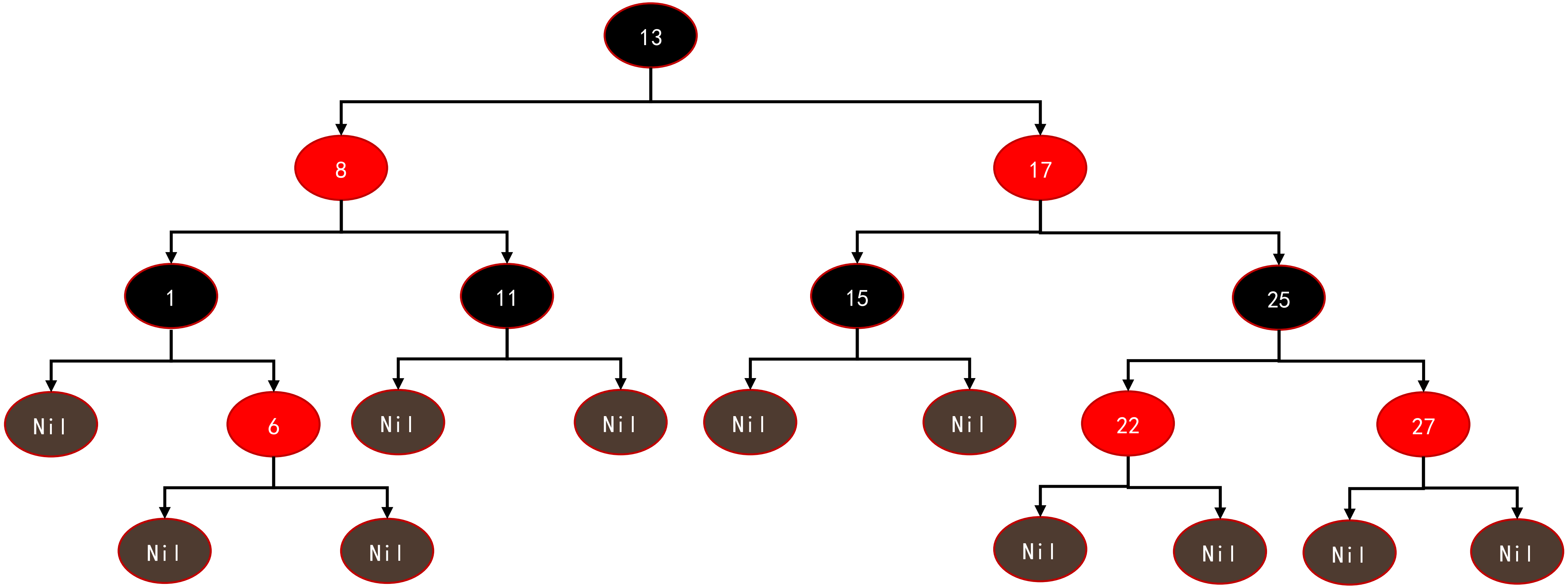
- **首先，红黑树是数据结构中很难的一个知识点，难到什么程度呢?**
  - 基本你跟别人聊数据结构的时候, 他不会和你聊红黑树, 因为它是数据结构中一个难点中的难点.
  - 数据结构的学习本来就比较难了, 红黑树是又将难度上升一个档次的知识点.
- **面试的时候经常出现这个场景:**
  - 面试官: 你知道红黑树吗?
  - 面试者: 知道啊。
  - 面试官: 知道原理吗?
  - 面试者: 不知道啊。
  - 面试官: 那你让‘不’过来面试我们公司吧，你先回去等通知吧。

- **哪些面试会出现红黑树呢?**
  - 在面试时基本不会让手写红黑树（即使是面试Google、Apple这样的公司，也很少会出现）。
  - 通常是这样问题的（比如腾讯的一次面试题）：为什么已经有平衡二叉树（比如AVL树）了，还需要红黑树呢?

红黑树的介绍

- **红黑树（英语：Red–black tree）是一种自平衡二叉查找树，是在计算机科学中用到的一种数据结构。**
  - 它在1972年由鲁道夫·贝尔发明，被称为“**对称二叉B树**”，它现代的名字源于Leo J. Guibas和罗伯特·塞奇威克于1978年写的一篇论文。
- **红黑树, 除了符合二叉搜索树的基本规则外, 还添加了一下特性:**
  - 1.节点是红色或黑色。
  - 2.根节点是黑色。
  - 3.每个叶子节点都是黑色的空节点（NIL节点，空节点）。
    - ✓ 第三条性质要求每个叶节点（空节点）是黑色的
    - ✓ 这是因为在红黑树中，黑色节点的数量表示从根节点到该节点的黑色节点数量。
  - 4 每个红色节点的两个子节点都是黑色。(从每个叶子到根的所有路径上不能有两个连续的红色节点)
    - ✓ 第四条性质保证了红色节点的颜色不会影响树的平衡，同时保证了红色节点的出现不会导致连续的红色节点。
  - 5.从任一节点到其每个叶子的所有路径都包含相同数目的黑色节点。
    - ✓ 第五条性质是最重要的性质，保证了红黑树的平衡性。
- **这些规则会让人一头雾水**
  - 完成搞不懂规则叠加起来，怎么让一棵树平衡的。
  - 但是它们还是被一些聪明的人发明出来了。

红黑树的图例


13
8
17
1
11
15
25
Nil
6
Nil
Nil
Nil
Nil
22
27
Nil
Nil
Nil
Nil
Nil
Nil

红黑树的相对平衡

- **前面的性质约束，确保了红黑树的关键特性:**
  - 从根到叶子的最长可能路径, 不会超过最短可能路径的两倍长。
  - 结果就是这个树基本是平衡的.
  - 虽然没有做到绝对的平衡，但是可以保证在最坏的情况下, 依然是高效的。
- **为什么可以做到 最长路径不超过最短路径的两倍 呢?**
  - 性质五决定了最短路径和最长路径必须有相同的黑色节点;
  - 路径最短的情况：全部是黑色节点n;
  - 路径最长的情况：首尾解释黑色节点n，中间全部是红色节点n – 1;
    - ✓ 性质二：根节点是黑节点;
    - ✓ 性质三：叶子节点都是黑节点;
    - ✓ 性质四：两个红色节点不能相连
  - 最短路径为 n – 1（边的数量）;
  - 最长路径为 (n + n – 1) - 1 = 2n – 2;
  - 所以 最长路径 一定不超过 最短路径的2倍;

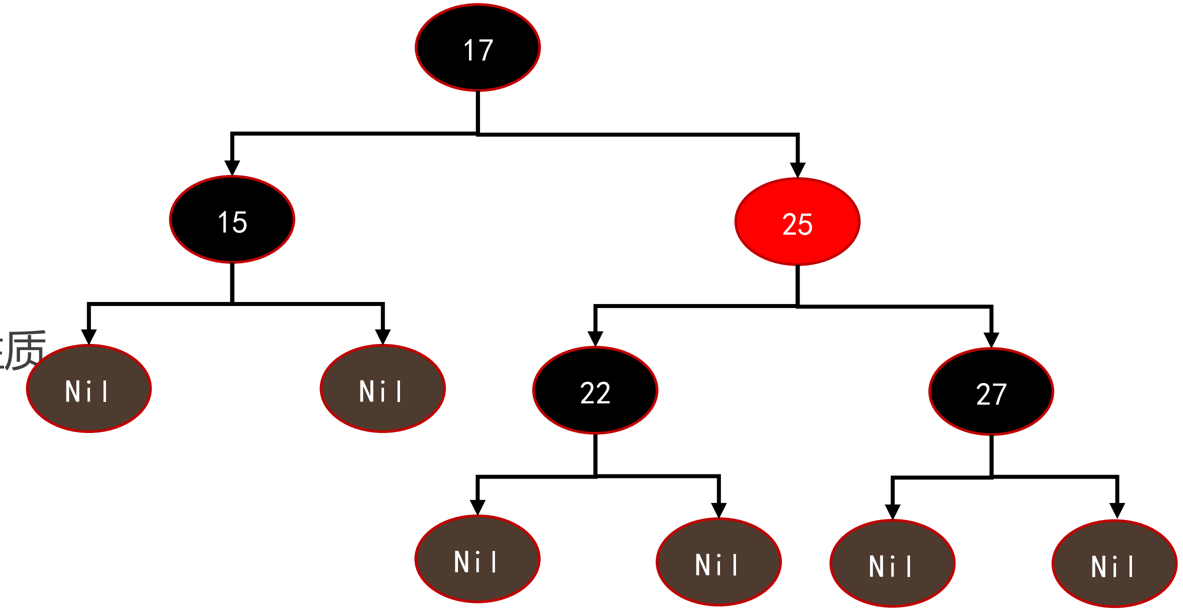
红黑树的代码实现

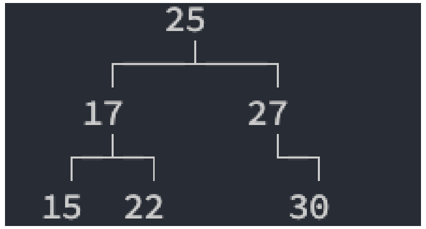
- **手写一个 TypeScript 红黑树的详细步骤：**
  - 定义红黑树的节点：定义一个带有键、值、颜色、左子节点、右子节点和父节点的类；
  - 实现左旋操作：将一个节点向左旋转，保持红黑树的性质；
  - 实现右旋操作：将一个节点向右旋转，保持红黑树的性质；
  - 实现插入操作：在红黑树中插入一个新的节点，并保持红黑树的性质；
  - 实现删除操作：从红黑树中删除一个节点，并保持红黑树的性质；
  - 实现修复红黑树性质：在插入或删除操作后，通过旋转和变色来修复红黑树的性质；
  - 其他方法较为简单，可以自行实现；

- **具体代码参考我的Markdown笔记。**

红黑树的性能分析

- **事实上，红黑树的性能在搜索上是不如AVL树的，为什么呢?**
- **我们来看一下右边的红黑树:**
  - 首先，它符合是一颗红黑树吗？符合。
  - 这个时候我们插入 节点30，会被插入到哪里呢?
    - ✓ 27的右边，并且节点30是红色节点时，依然符合红黑树的性质
  - 也就是对于红黑树来说，它不需要进行任何操作;
- **那么AVL树会怎么样呢?**
  - 如果是AVL树必然要对17、25、27节点进行右旋转;
  - 事实上右旋转是一系列的操作;
- **但是红黑树的高度比AVL树要高:**
  - 所以如果同样是搜索30，那么红黑树需要搜索4次，AVL树搜索3次;
  - 所以红黑树相当于牺牲了一点点的搜索性能，来提高了插入和删除的性能;





AVL树和红黑树的选择

- **AVL树和红黑树的性能对比：**
  - AVL树是一种平衡度更高的二叉搜索树，所以在搜索效率上会更高；
  - 但是AVL树为了维护这种平衡性，在插入和删除操作时，通常会进行更多的旋转操作，所以效率相对红黑树较低；
  - 红黑树在平衡度上相较于AVL树没有那么严格，所以搜索效率上会低一些；
  - 但是红黑树在插入和删除操作时，通常需要更少的旋转操作，所以效率相对AVL树较高；
  - 它们的搜索、添加、删除时间复杂度都是O(logn)，但是细节上会有一些差异；
- **开发中如何进行选择呢?**
  - 选择AVL树还是红黑树，取决于具体的应用需求。
  - 如果需要保证每个节点的高度尽可能地平衡，可以选择AVL树。
  - 如果需要保证删除操作的效率，可以选择红黑树。
- **在早期的时候，很多场景会选择AVL树，目前选择红黑树的越来越多（AVL树依然是一种重要的平衡树）。**
  - 比如操作系统内核中的内存管理；
  - 比如Java的TreeMap、TreeSet底层的源码；