树结构（Tree）

王红元 coderwhy

目录
content

目录
content

coderwhy

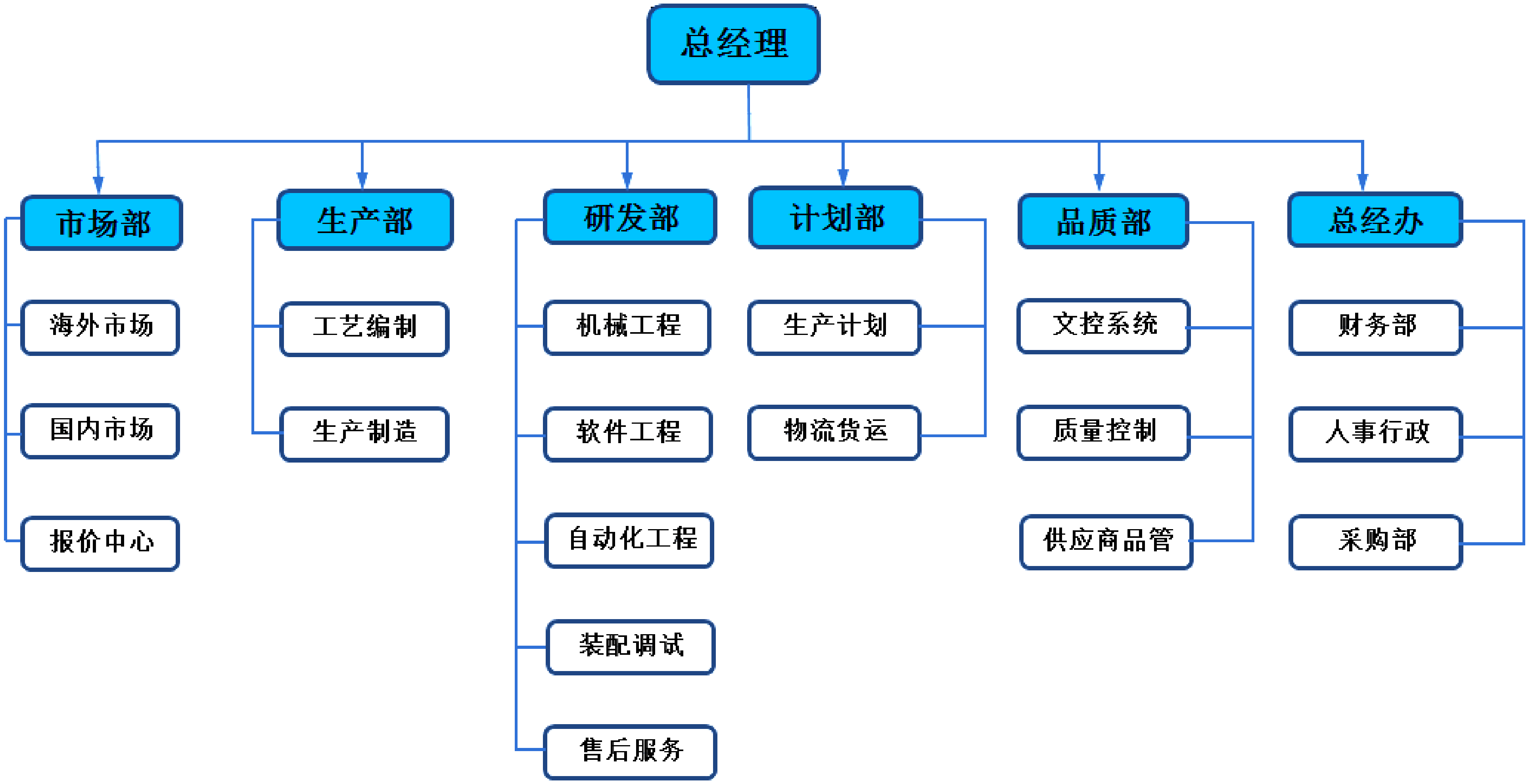
什么是树?

- **真实的树：**
  - 相信每个人对现实生活中的树都会非常熟悉
- 我们来看一下树**有什么特点**?
  - 树通常有一个根。连接着根的是树干。
  - 树干到上面之后会进行分叉成树枝，树枝还会分叉成更小的树枝。
  - 在树枝的最后是叶子。
- **树的抽象：**
  - 专家们对树的结构进行了抽象，发现树可以模拟生活中的很多场景。

coderwhy

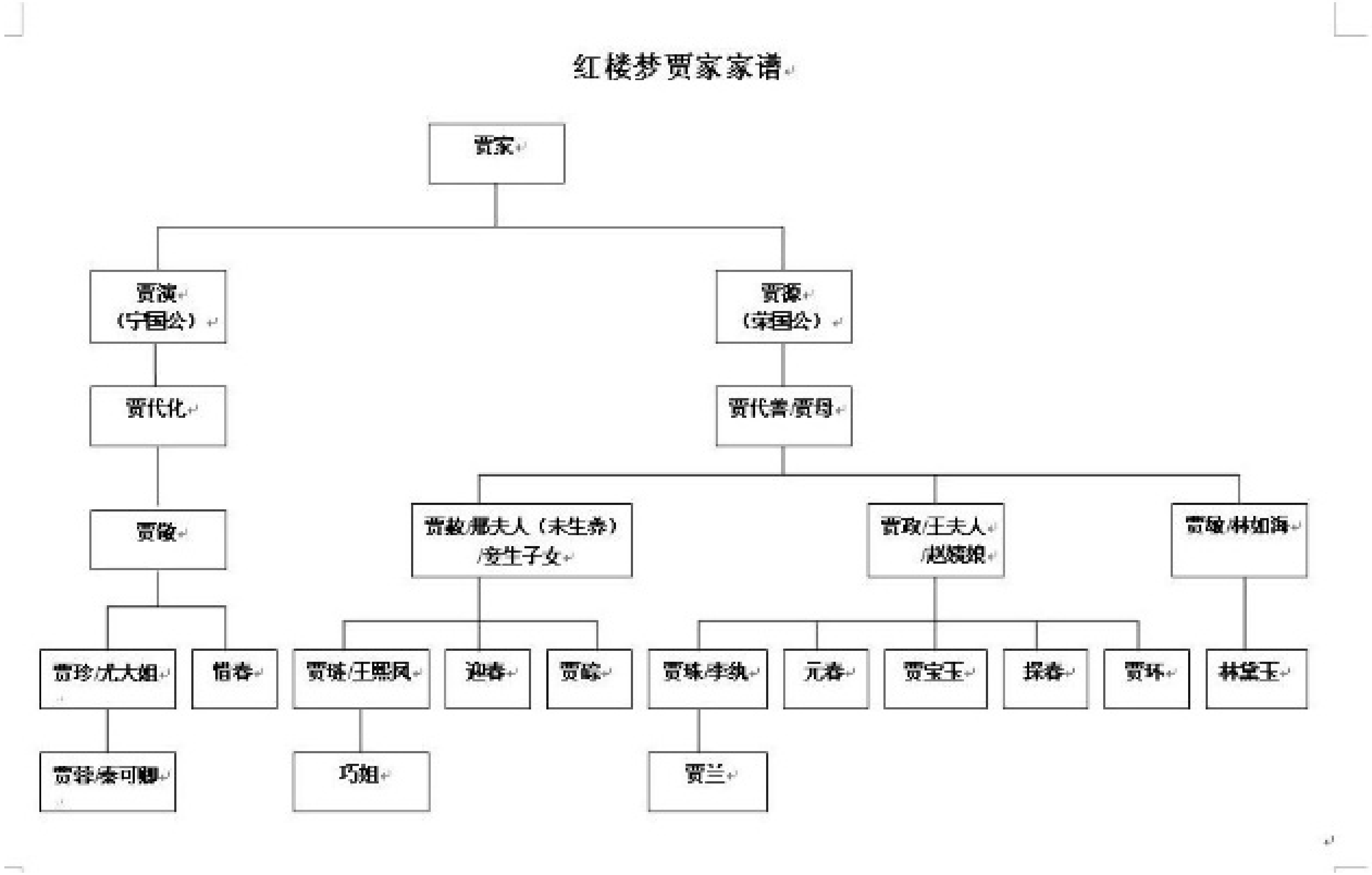
模拟树结构

- 公司组织架构：



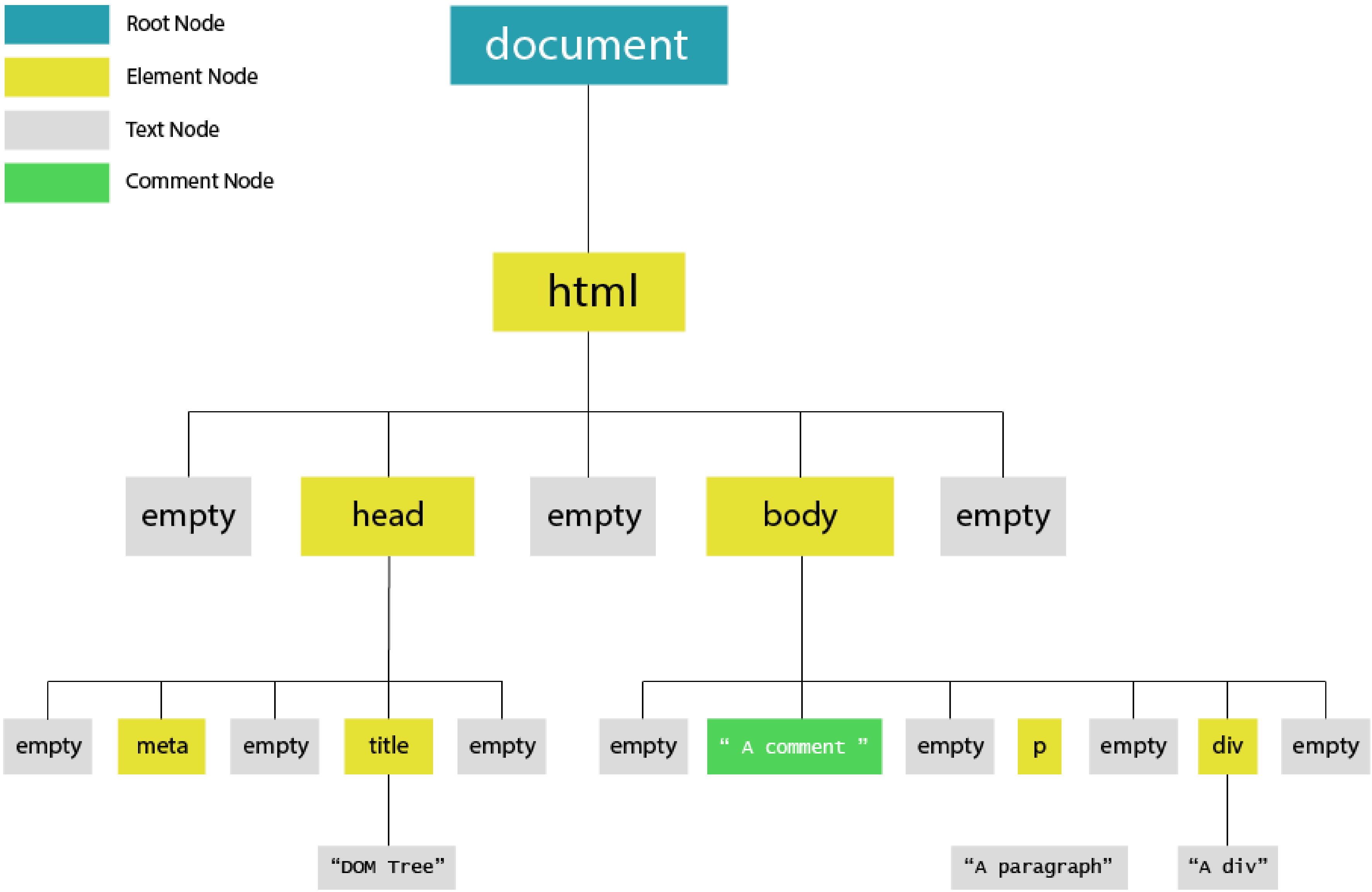
模拟树结构

- 红楼梦家谱



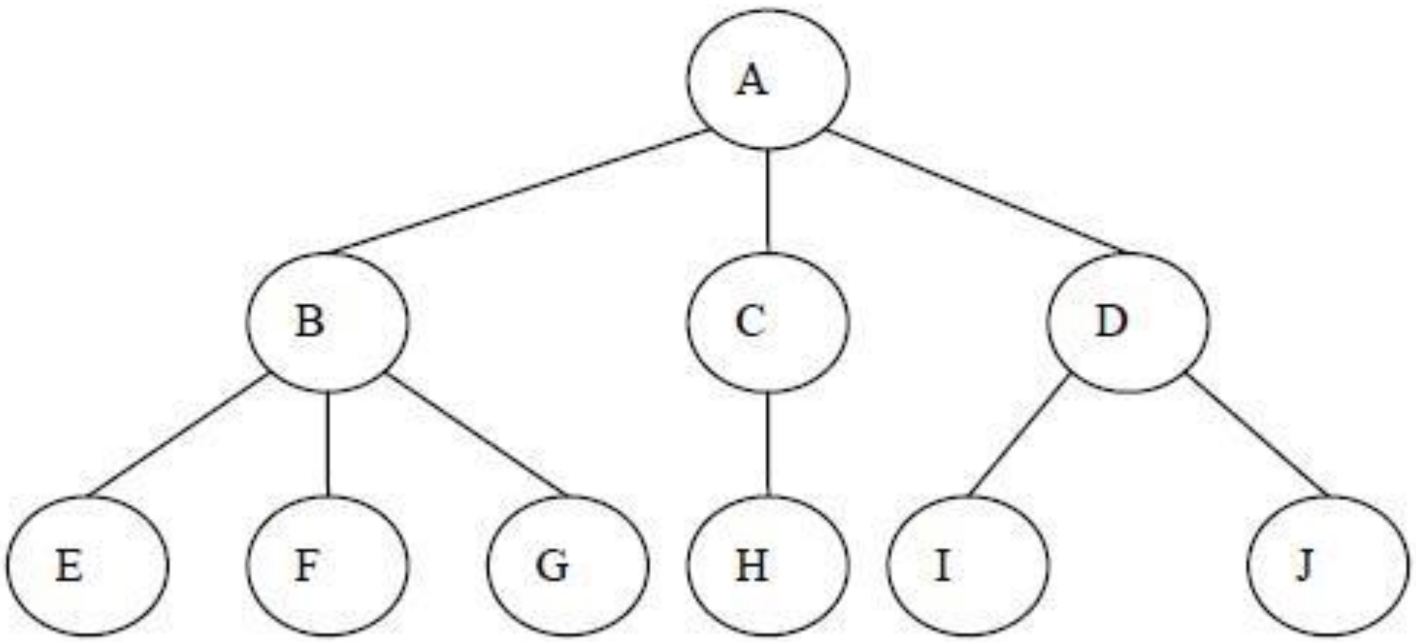
红楼梦贾家家谱
贾家
贾演
（宁国公）
贾源
（荣国公）
贾代化
贾代善/贾母
贾敬
贾赦/邢夫人（未生养）
/妾生子女
贾政/王夫人
/赵姨娘
贾敏/林如海
贾珍/尤大姐
惜春
贾琏/王熙凤
迎春
贾琮
贾珠/李纨
元春
贾宝玉
探春
贾环
林黛玉
贾蓉/秦可卿
巧姐
贾兰

前端非常熟悉的 DOM Tree



树结构的抽象

- 我们再将里面的**数据移除**，仅仅抽象出来**结构**，那么就是我们要学习的**树结构**



树的优点

- 我们之前已经学习了多种数据结构来保存数据，为什么要使用树结构来保存数据呢?
- 树结构和数组/链表/哈希表的对比有什么优点呢?

- 数组:
- 优点:
  - 数组的主要优点是根据下标值访问效率会很高。
  - 但是如果我们希望根据元素来查找对应的位置呢?
  - 比较好的方式是先对数组进行排序，再进行二分查找。
- 缺点:
  - 需要先对数组进行排序，生成有序数组，才能提高查找效率。
  - 另外数组在插入和删除数据时，需要有大量的位移操作(插入到首位或者中间位置的时候)，效率很低。

- 链表:
- 优点:
  - 链表的插入和删除操作效率都很高。
- 缺点:
  - 查找效率很低，需要从头开始依次访问链表中的每个数据项，直到找到。
  - 而且即使插入和删除操作效率很高，但是如果要插入和删除中间位置的数据，还是需要重头先找到对应的数据。

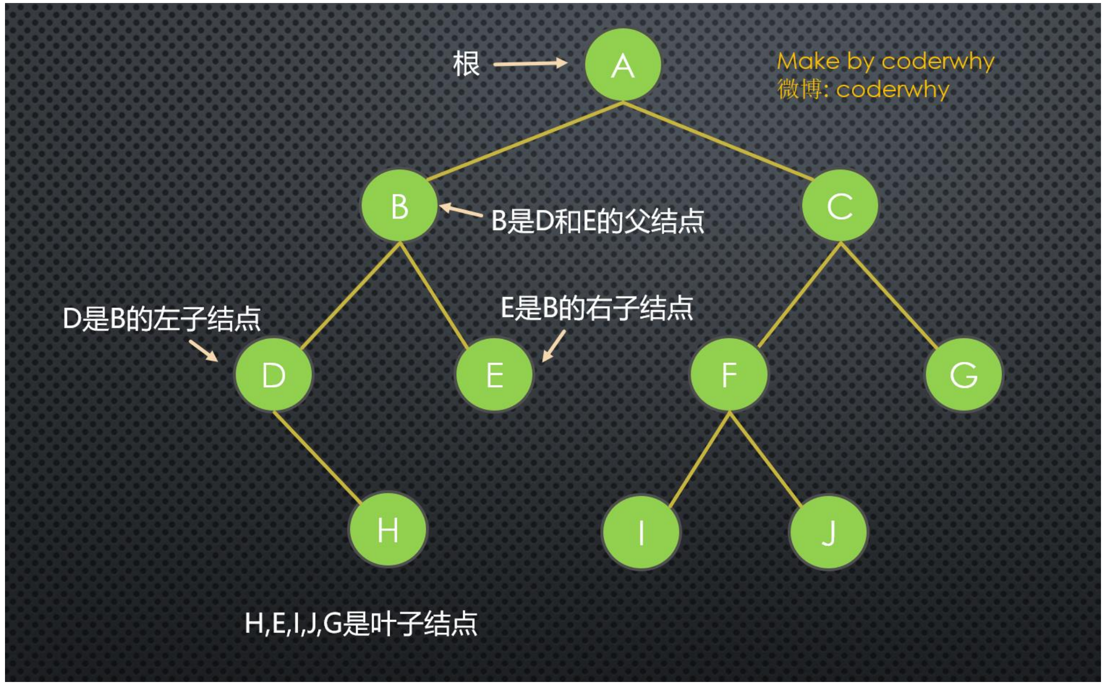
树的优点

- **哈希表:**
- **优点:**
  - 我们学过哈希表后，已经发现了哈希表的插入/查询/删除效率都是非常高的。
  - 但是哈希表也有很多缺点。
- **缺点:**
  - 空间利用率不高，底层使用的是数组，并且某些单元是没有被利用的。
  - 哈希表中的元素是无序的，不能按照固定的顺序来遍历哈希表中的元素。
  - 不能快速的找出哈希表中的最大值或者最小值这些特殊的值。
- **树结构:**
  - 我们不能说树结构比其他结构都要好，因为每种数据结构都有自己特定的应用场景。
  - 但是树确实也综合了上面的数据结构的优点(当然优点不足于盖过其他数据结构，比如效率一般情况下没有哈希表高)。
  - 并且也弥补了上面数据结构的缺点。
- **而且为了模拟某些场景，我们使用树结构会更加方便。**
  - 因为数结构的非线性的，可以表示一对多的关系
  - 比如文件的目录结构。

树的术语

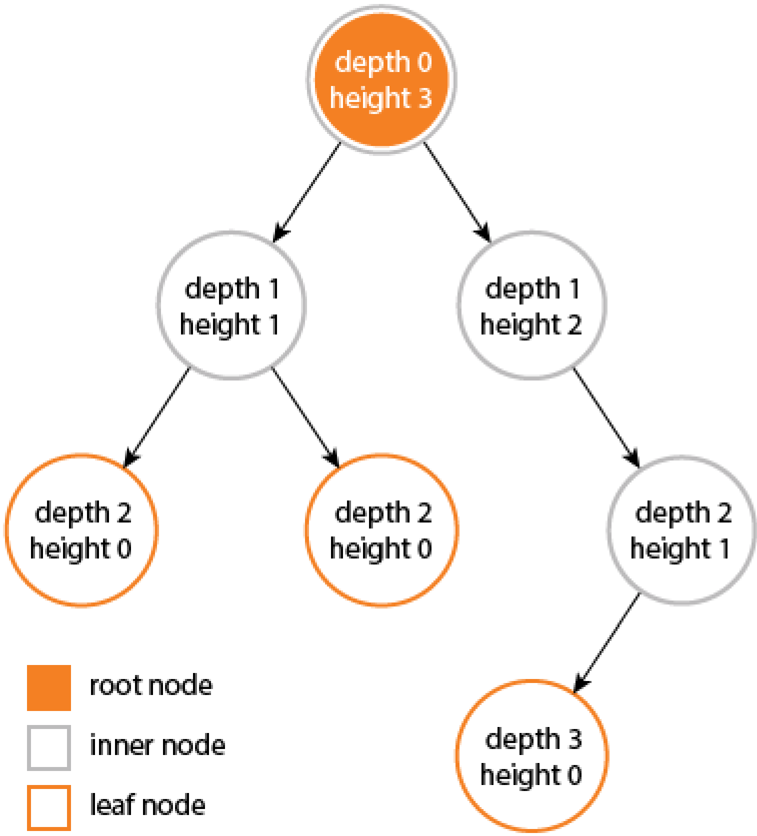
- **在描述树的各个部分的时候有很多术语。**
  - 为了让介绍的内容更容易理解，需要知道一些树的术语。
  - 不过大部分术语都与真实世界的树相关，或者和家庭关系相关(如父节点和子节点)，所以它们比较容易理解。

- **树（Tree）：n（n≥0）个节点构成的有限集合。**
  - 当n=0时，称为空树；
- **对于任一棵非空树（n> 0），它具备以下性质：**
  - 树中有一个称为“根（Root）”的特殊节点，用 r 表示；
  - 其余节点可分为m(m>0)个互不相交的有限集T1，T2，…，Tm，其中每个集合本身又是一棵树，称为原来树的“子树（SubTree）”



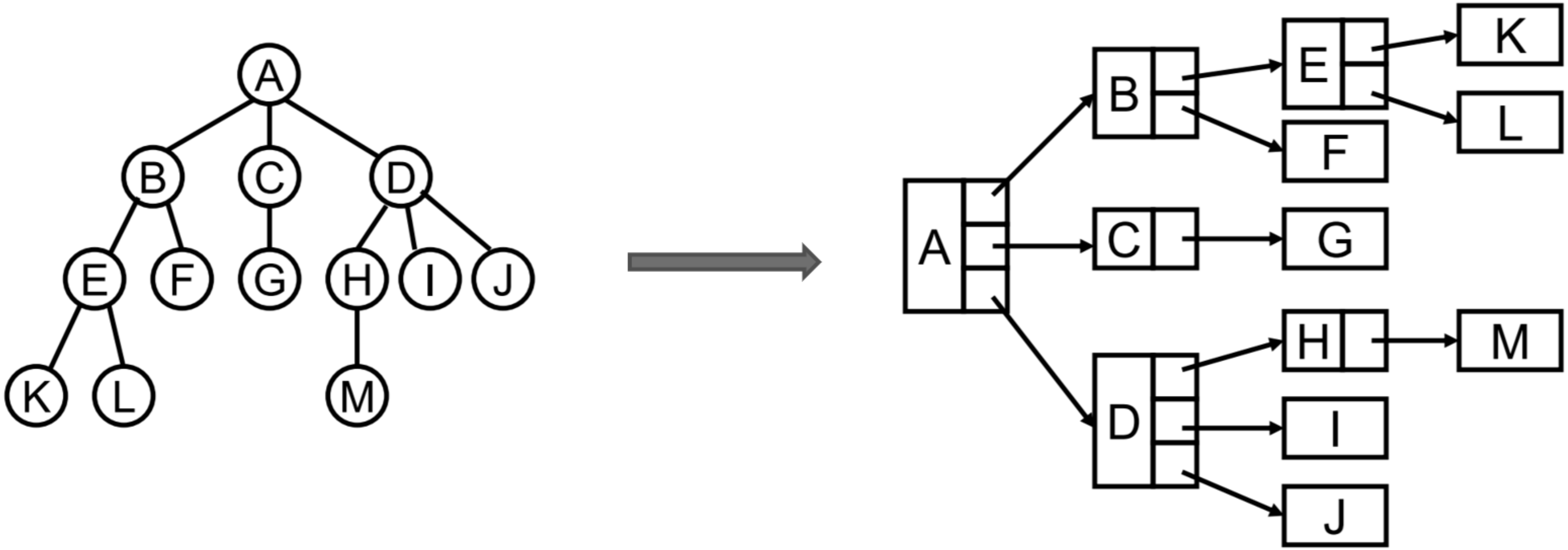
树的术语

- **树的术语：**
- 1.节点的度（Degree）：节点的子树个数。
- 2.树的度 （Degree） ：树的所有节点中最大的度数。
- 3.叶节点（Leaf）：度为0的节点。(也称为叶子节点)
- 4.父节点（Parent）：有子树的节点是其子树的根节点的父节点
- 5.子节点（Child）：若A节点是B节点的父节点，则称B节点是A节点的子节点；子节点也称孩子节点。
- 6.兄弟节点（Sibling）：具有同一父节点的各节点彼此是兄弟节点。
- 7.路径和路径长度：从节点n1到nk的路径为一个节点序列n1 ，n2，… ，nk
  - ni是 n(i+1)的父节点
  - 路径所包含 边 的个数为路径的长度。
- 8.节点的层次（Level）：规定根节点在1层，其它任一节点的层数是其父节点的层数加1。
- 9.树的深度（Depth）：对于任意节点n, n的深度为从根到n的唯一路径长，根的深度为0。
- 10.树的高度（Height）：对于任意节点n,n的高度为从n到一片树叶的最长路径长，所有树叶的高度为0。



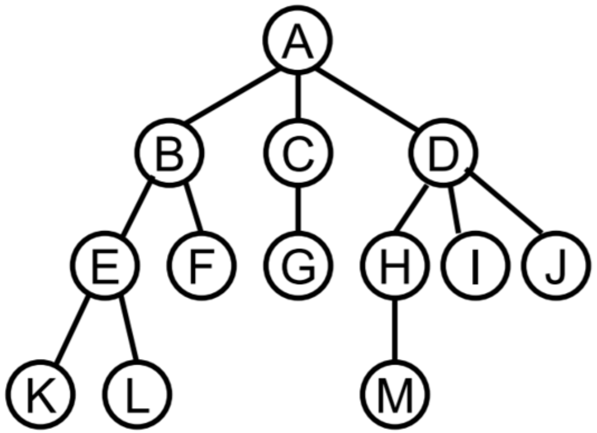
普通的表示方式

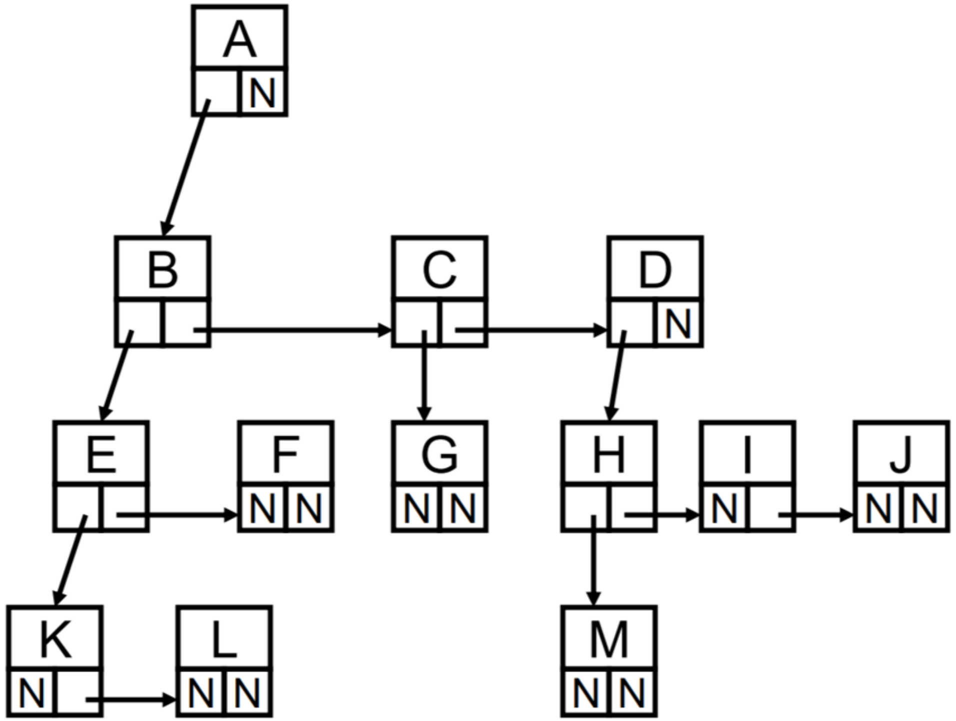
■ **最普通的表示方式**



儿子-兄弟表示法

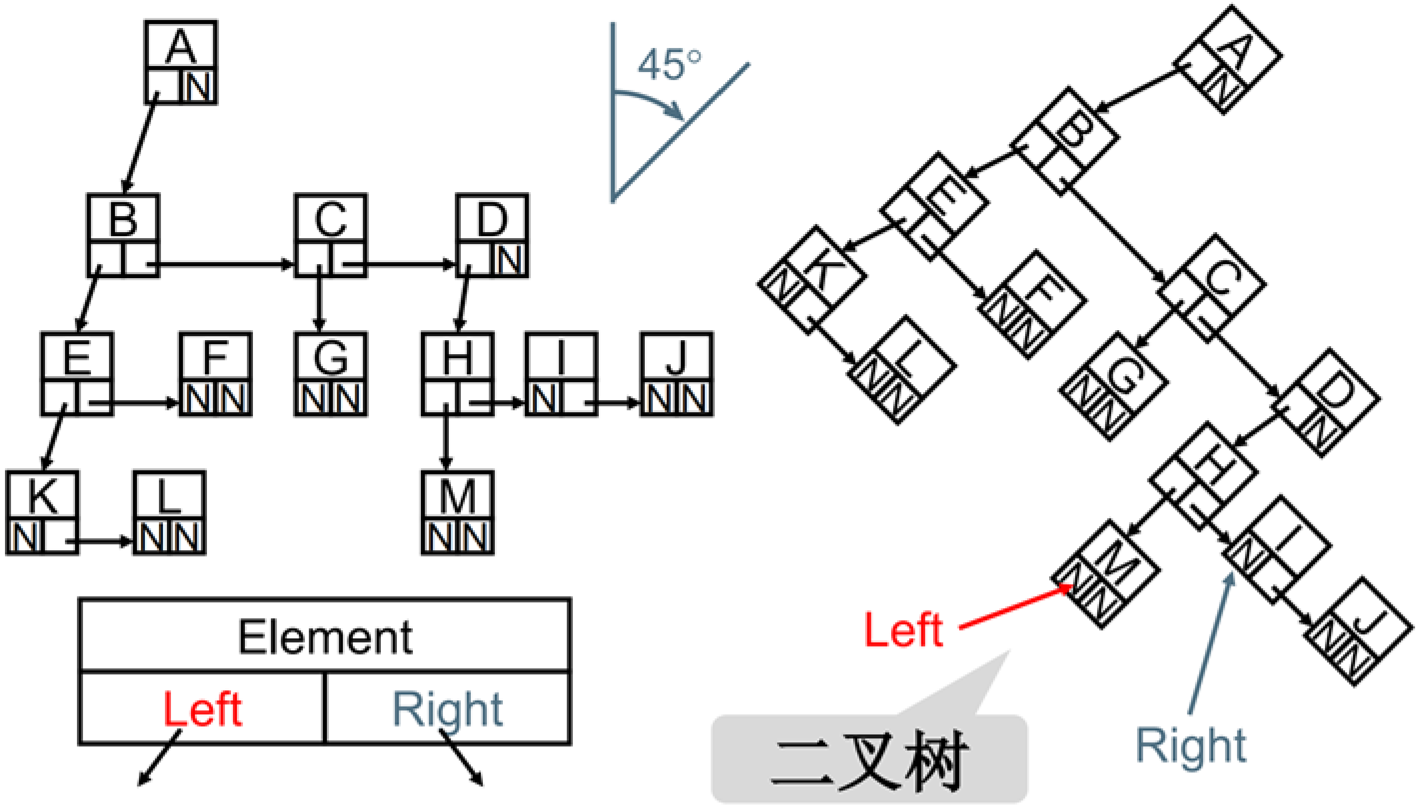
- 儿子-兄弟表示法





儿子-兄弟表示法旋转

■ 儿子-兄弟表示法旋转

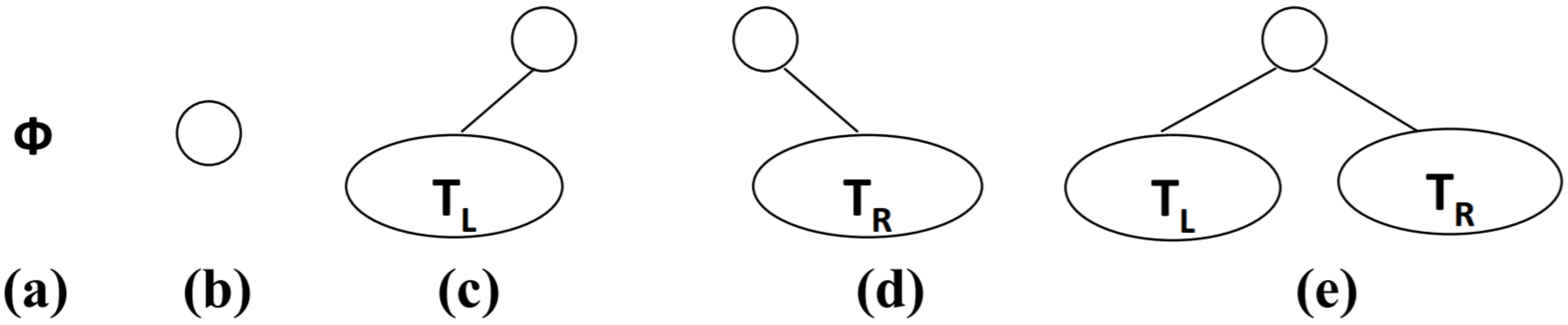


■ **你发现上面规律了吗?**

- 其实所有的树本质上都可以使用二叉树模拟出来。
- 所以在学习树的过程中，二叉树非常重要。

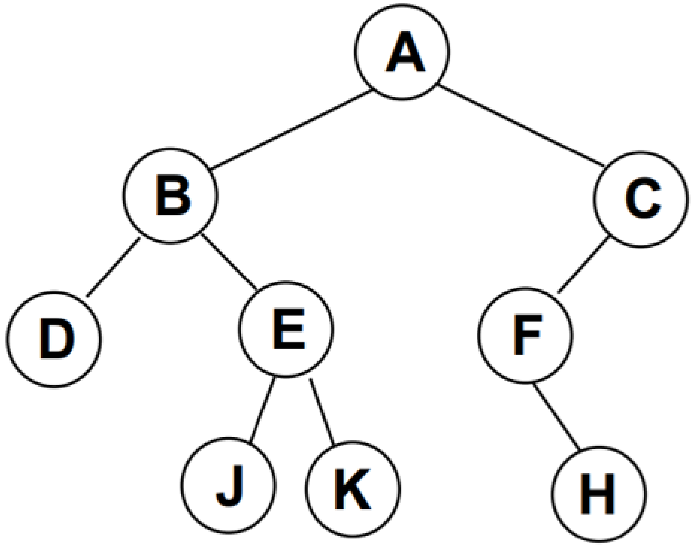
二叉树的概念

- **如果树中每个节点最多只能有两个子节点，这样的树就成为"二叉树"。**
  - 前面，我们已经提过二叉树的重要性，不仅仅是因为简单，也因为几乎上所有的树都可以表示成二叉树的形式。
- **二叉树的定义**
  - 二叉树可以为空，也就是没有节点。
  - 若不为空，则它是由根节点 和 称为其 左子树TL和 右子树TR 的两个不相交的二叉树组成。
- **二叉树有五种形态：**



二叉树的特性

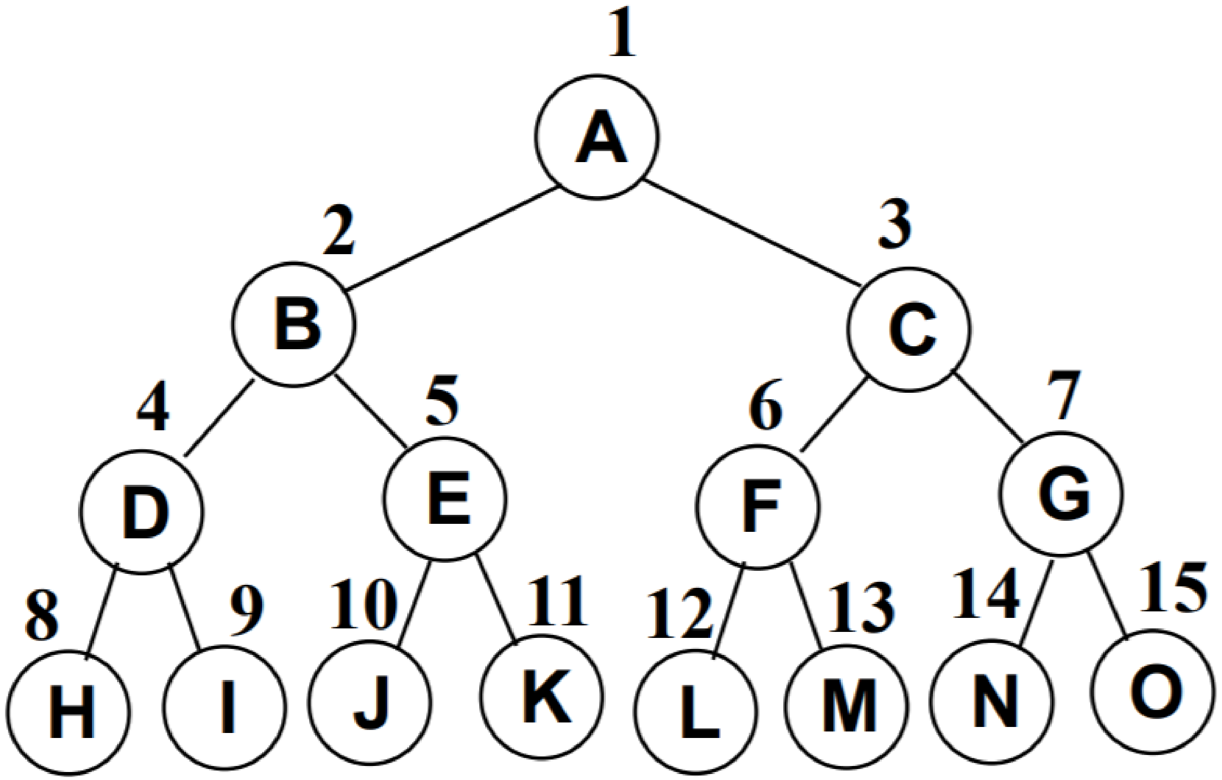
- **二叉树有几个比较重要的特性，在笔试题中比较常见：**
  - 一颗二叉树第 i 层的最大节点数为：2^(i-1)，i >= 1;
  - 深度为k的二叉树有最大节点总数为： 2^k - 1，k >= 1;
  - 对任何非空二叉树 T，若n0表示叶节点的个数、n2是度为2的非叶节点个数，那么两者满足关系n0 = n2 + 1。



叶结点树是4, 分别是D,J,K,H
度为2的节点: 3, 分别是A,B,E
公式: 4 = 3 + 1

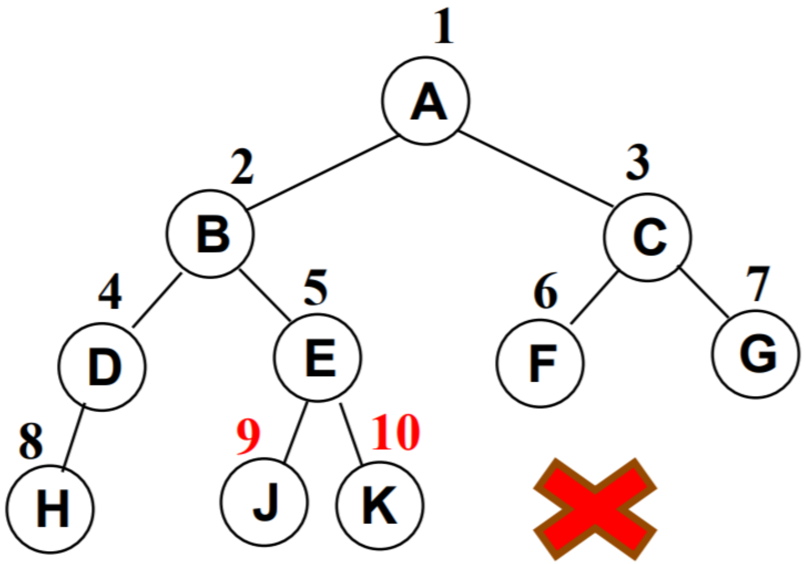
完美二叉树

- **完美二叉树(Perfect Binary Tree)，也称为满二叉树(Full Binary Tree)**
  - 在二叉树中，除了最下一层的叶节点外，每层节点都有2个子节点，就构成了满二叉树。



完全二叉树

- **完全二叉树(Complete Binary Tree)**
  - 除二叉树最后一层外，其他各层的节点数都达到最大个数。
  - 且最后一层从左向右的叶节点连续存在，只缺右侧若干节点。
  - 完美二叉树是特殊的完全二叉树。
- **下面不是完全二叉树，因为D节点还没有右节点，但是E节点就有了左右节点。**



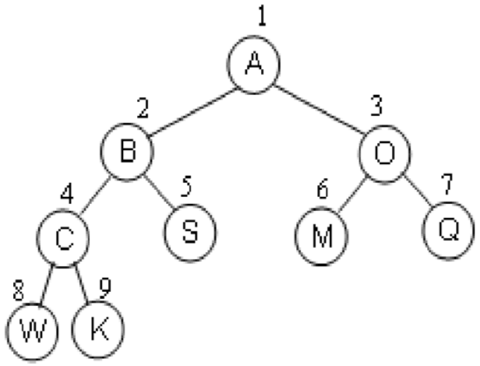
coderwhy

二叉树的存储

■ **二叉树的存储常见的方式是数组和链表。**

使用数组

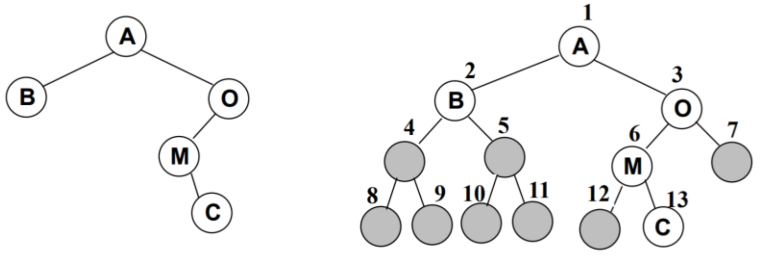
- 完全二叉树：按从上至下、从左到右顺序存储



结点	A	B	O	C	S	M	Q	W	K
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9

非完全二叉树：

- 非完全二叉树要转成完全二叉树才可以按照上面的方案存储。
- 但是会造成很大的空间浪费



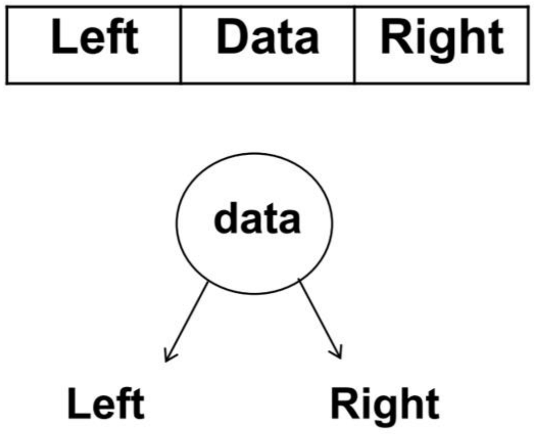
(a)一般二叉树　　(b) 对应的完全二叉树

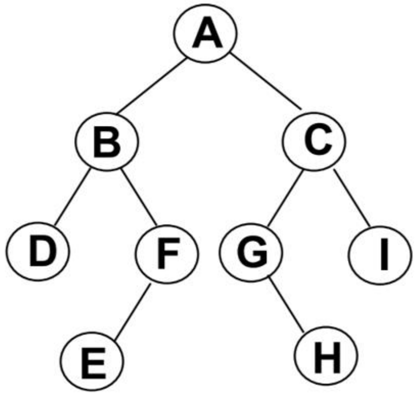
结点	A	B	O	∧	∧	M	∧	∧	∧	∧	∧	∧	C
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

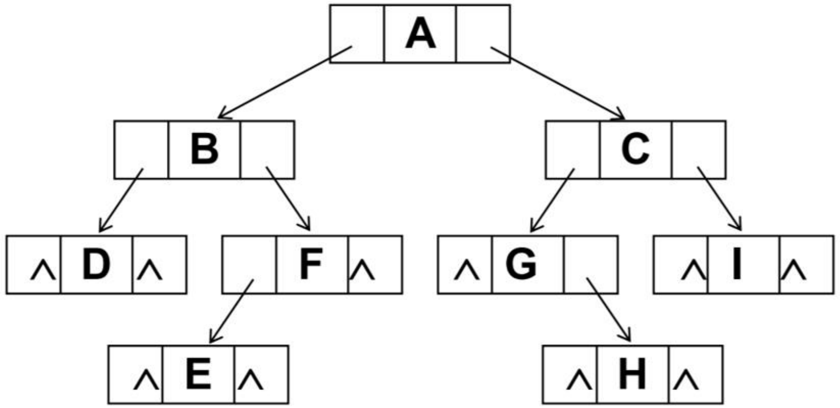
造成空间浪费！

链表存储

- 二叉树最常见的方式还是使用链表存储。
  - 每个节点封装成一个Node，Node中包含存储的数据，左节点的引用，右节点的引用。

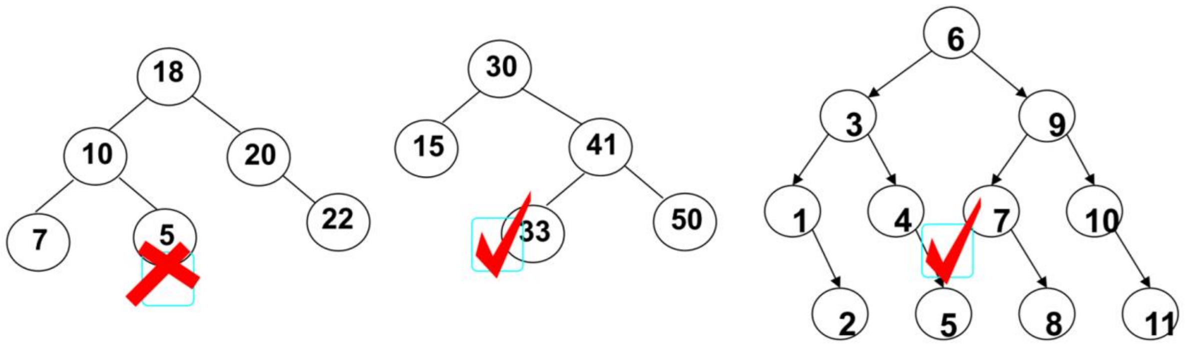






什么是二叉搜索树?

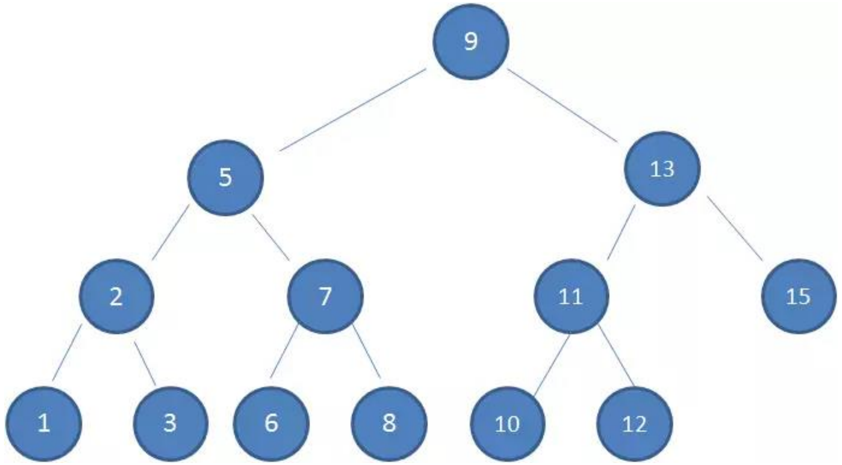
- **二叉搜索树**（BST，Binary Search Tree），也称**二叉排序树**或**二叉查找树**
- **二叉搜索树是一颗二叉树，可以为空；**
- **如果不为空，满足以下性质：**
  - 非空左子树的所有键值小于其根节点的键值。
  - 非空右子树的所有键值大于其根节点的键值。
  - 左、右子树本身也都是二叉搜索树。

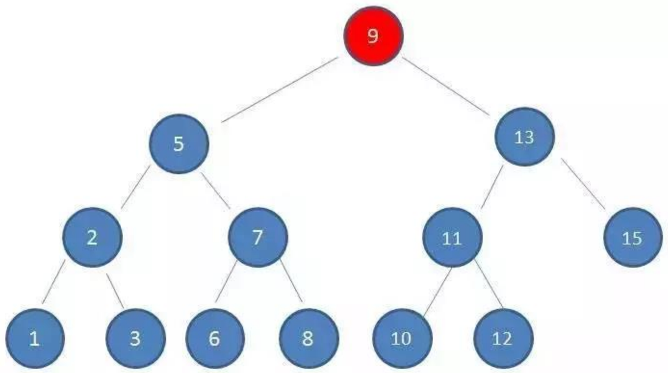


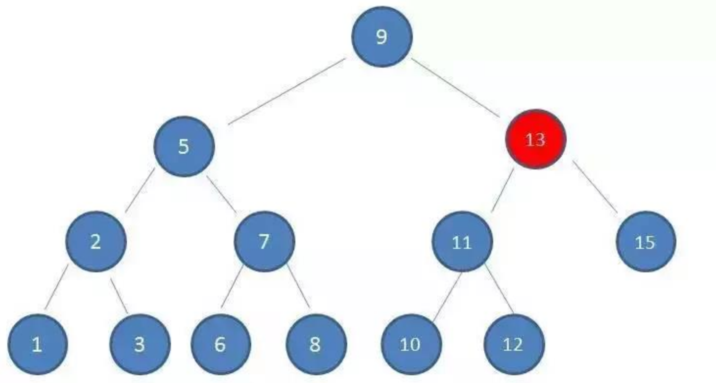
- **下面哪些是二叉搜索树，哪些不是?**
- **二叉搜索树的特点：**
  - 二叉搜索树的特点就是相对较小的值总是保存在左节点上，相对较大的值总是保存在右节点上。
  - 那么利用这个特点，我们可以做什么事情呢?
  - 查找效率非常高，这也是二叉搜索树中，搜索的来源。

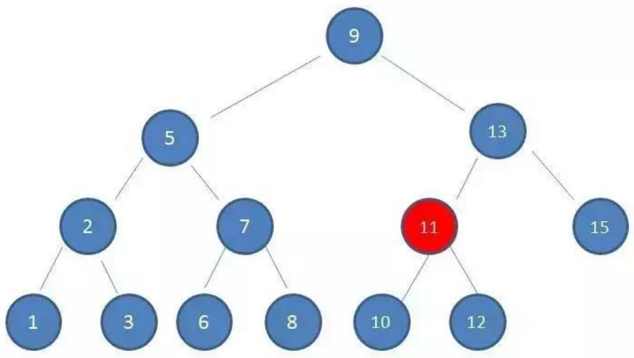
二叉搜索树

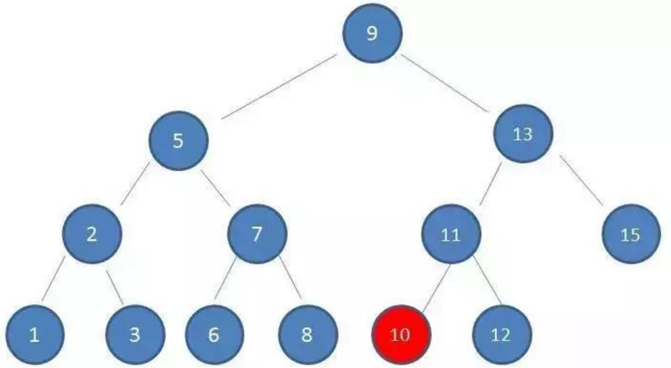
- 下面是一个二叉搜索树







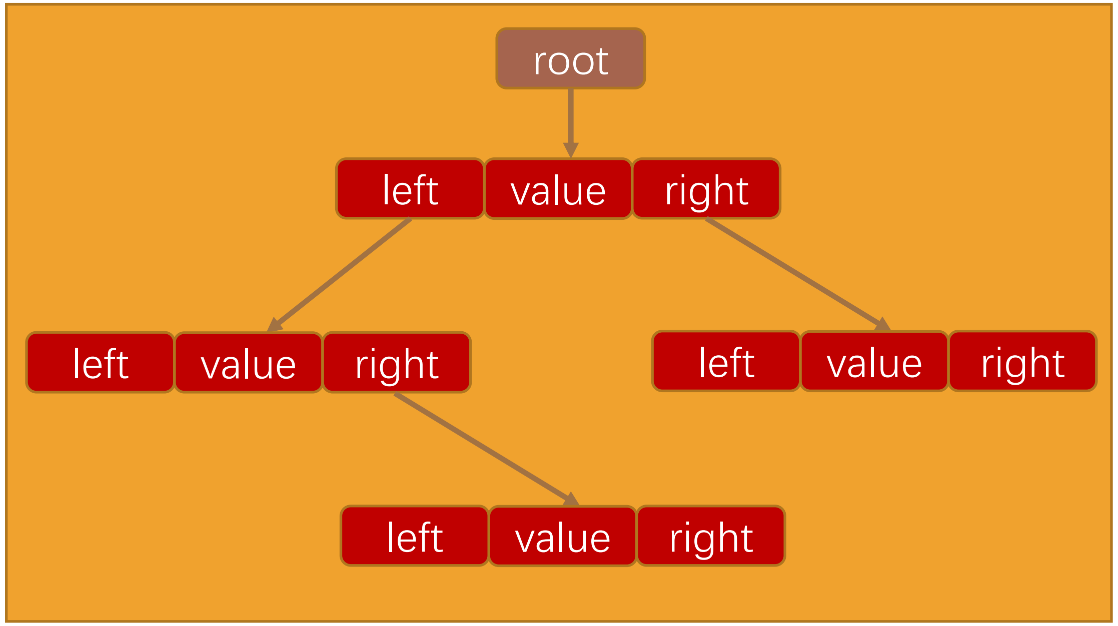




- 这样的数据结构有什么好处呢?
  - 我们试着查找一下值为10的节点
- 这种方式就是二分查找的思想
  - 查找所需的最大次数等于二叉搜索树的深度;
  - 插入节点时，也利用类似的方法，一层层比较大小，找到新节点合适的位置。

二叉搜索树的封装

■ **我们像封装其他数据结构一样，先来封装一个BSTree的类**




```typescript
class Node<T> {
  value: T
  left: Node<T> | null
  right: Node<T> | null

  constructor(value: T) {
    this.value = value
  }
}
```

```typescript
class BSTree<T = number> {
  root: Node<T> | null

  // 二叉搜索树的其他方法
}
```

■ **代码解析：**

- 封装BSTree的类；
- 还需要封装一个用于保存每一个节点的类Node。
- 该类包含三个属性：节点对应的value，指向的左子树left，指向的右子树right
- 对于BSTree来说，只需要保存根节点即可，因为其他节点都可以通过根节点找到。

二叉搜索树常见操作

- **二叉搜索树有哪些常见的操作呢?**
- **插入操作：**
  - insert(value)：向树中插入一个新的数据。
- **查找操作：**
  - search(value)：在树中查找一个数据，如果节点存在，则返回true；如果不存在，则返回false。
  - min：返回树中最小的值/数据。
  - max：返回树中最大的值/数据。
- **遍历操作：**
  - inOrderTraverse：通过中序遍历方式遍历所有节点。
  - preOrderTraverse：通过先序遍历方式遍历所有节点。
  - postOrderTraverse：通过后序遍历方式遍历所有节点。
  - levelOrderTraverse：通过层序遍历方式遍历所有节点。
- **删除操作（有一点点复杂）：**
  - remove(value)：从树中移除某个数据。

向树中插入数据

- **我们分两个部分来完成这个功能。**
- **首先，外界调用的insert方法：**

```
insert(value: T) {
  // 创建新的节点
  const newNode = new Node(value)

  // 判断是否有根节点
  if (!this.root) {
    this.root = newNode
  } else {
    this.insertNode(this.root, newNode)
  }
}
```

- **代码解析：**
- 首先，根据传入的value，创建对应的Node。
- 其次，向树中插入数据需要分成两种情况：
  - 第一次插入，直接修改根节点即可。
  - 其他次插入，需要进行相关的比较决定插入的位置。
- 在代码中的insertNode方法，我们还没有实现，也是我们接下来要完成的任务。

向树中插入数据

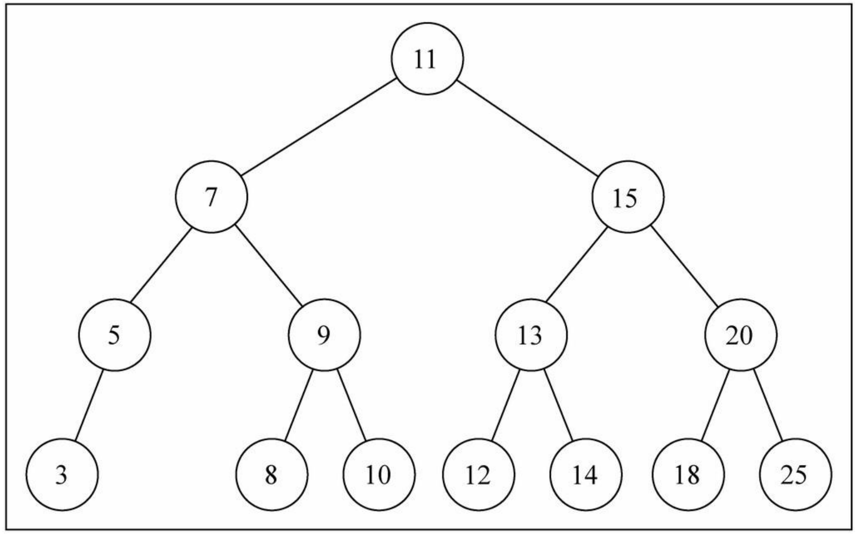
■ 其次，插入非根节点

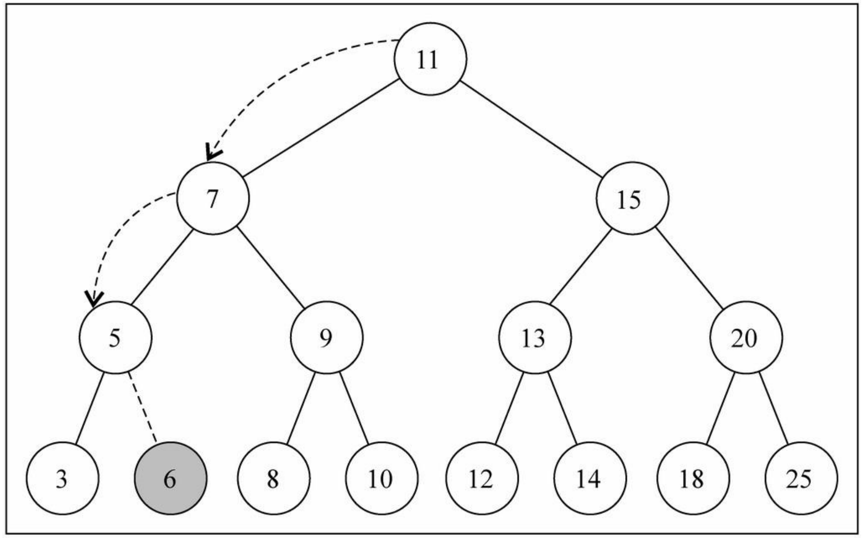
```
private insertNode(node: Node<T>, newNode: Node<T>) {
  if (newNode.value < node.value) { // 向左子树插入
    if (node.left === null) { // 左子树上没有内容
      node.left = newNode
    } else {
      this.insertNode(node.left, newNode)
    }
  } else { // 向右子树插入
    if (node.right === null) {
      node.right = newNode
    } else {
      this.insertNode(node.right, newNode)
    }
  }
}
```

- **代码解析：**
- 插入其他节点时，我们需要判断该值到底是插入到左边还是插入到右边。
- 判断的依据来自于新节点的value和原来节点的value值的比较。
  - 如果新节点的newvalue小于原节点的oldvalue，那么就向左边插入。
  - 如果新节点的newvalue大于原节点的oldvalue，那么就向右边插入。
- 代码的1序号位置，就是准备向左子树插入数据。但是它本身又分成两种情况
  - 情况一(代码1.1位置)：左子树上原来没有内容，那么直接插入即可。
  - 情况二(代码1.2位置)：左子树上已经有了内容，那么就一次向下继续查找新的走向，所以使用递归调用即可。
- 代码的2序号位置，和1序号位置几乎逻辑是相同的，只是是向右去查找。
  - 情况一(代码2.1位置)：左右树上原来没有内容，那么直接插入即可。
  - 情况二(代码2.2位置)：右子树上已经有了内容，那么就一次向下继续查找新的走向，所以使用递归调用即可。

测试插入代码

```
// 插入数据
bst.insert(11)
bst.insert(7)
bst.insert(15)
bst.insert(5)
bst.insert(3)
bst.insert(9)
bst.insert(8)
bst.insert(10)
bst.insert(13)
bst.insert(12)
bst.insert(14)
bst.insert(20)
bst.insert(18)
bst.insert(25)
Bst.insert(6)
```



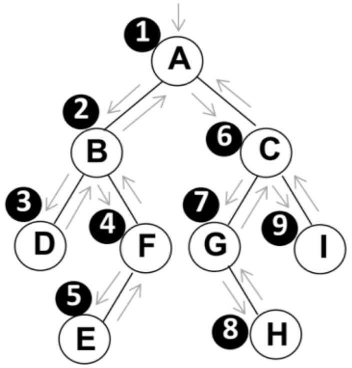


遍历二叉搜索树

- **前面，我们向树中插入了很多的数据，为了能很多的看到测试结果。我们先来学习一下树的遍历。**
  - 注意：这里我们学习的树的遍历，针对所有的二叉树都是适用的，不仅仅是二叉搜索树。
- **树的遍历：**
  - 遍历一棵树是指访问树的每个节点(也可以对每个节点进行某些操作，我们这里就是简单的打印)
  - 但是树和线性结构不太一样，线性结构我们通常按照从前到后的顺序遍历，但是树呢？
  - 应该从树的顶端还是底端开始呢？ 从左开始还是从右开始呢？
- 二叉树的遍历常见的有**四种方式**：
  - 先序遍历
  - 中序遍历
  - 后序遍历。
  - 层序遍历

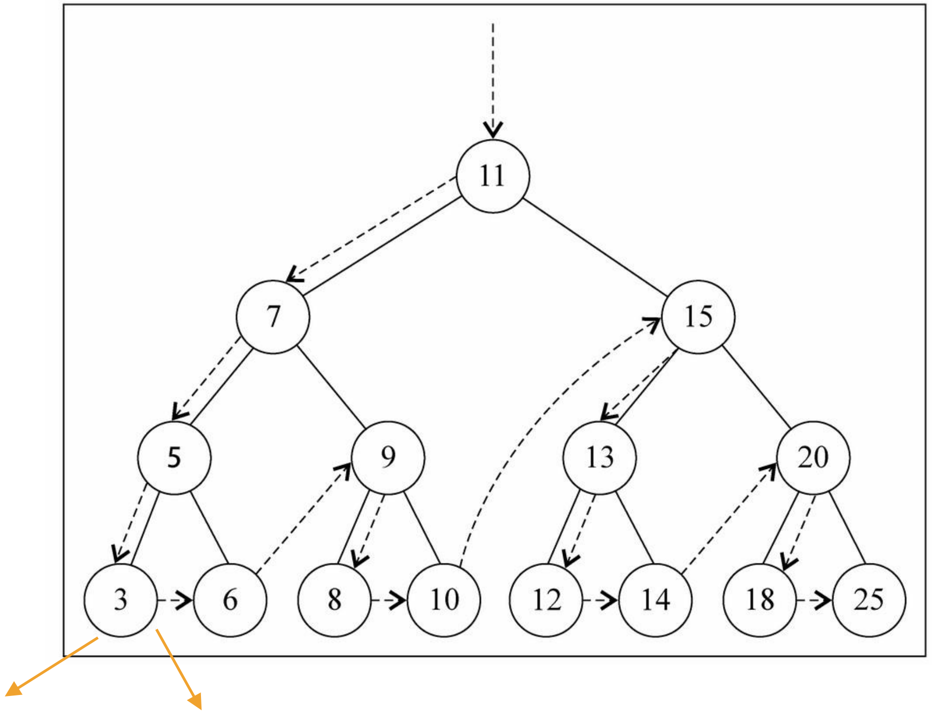
先序遍历

- **遍历过程为：**
  - ①访问根节点；
  - ②先序遍历其左子树；
  - ③先序遍历其右子树。



A (B D F E) (C G H I)

先序遍历=> A B D F E C G H I



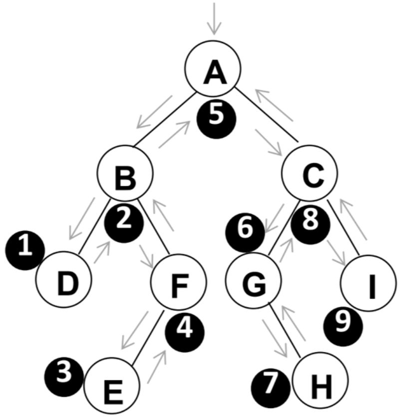

```
preOrderTraverse() {
  this.preOrderTraverseNode(this.root)
}
private preOrderTraverseNode(node: Node<T> | null) {
  if (node) {
    console.log(node.value)
    this.preOrderTraverseNode(node.left)
    this.preOrderTraverseNode(node.right)
  }
}
```

先序遍历（非递归 – 课下扩展）

```
preOrderTraversalNoRecursion() {
  let stack: Node<T>[] = [];
  let current: Node<T> | null = this.root;

  while (current !== null || stack.length !== 0) {
    while (current !== null) {
      console.log(current.value);
      stack.push(current);
      current = current.left;
    }

    current = stack.pop()!;
    current = current.right;
  }
}
```

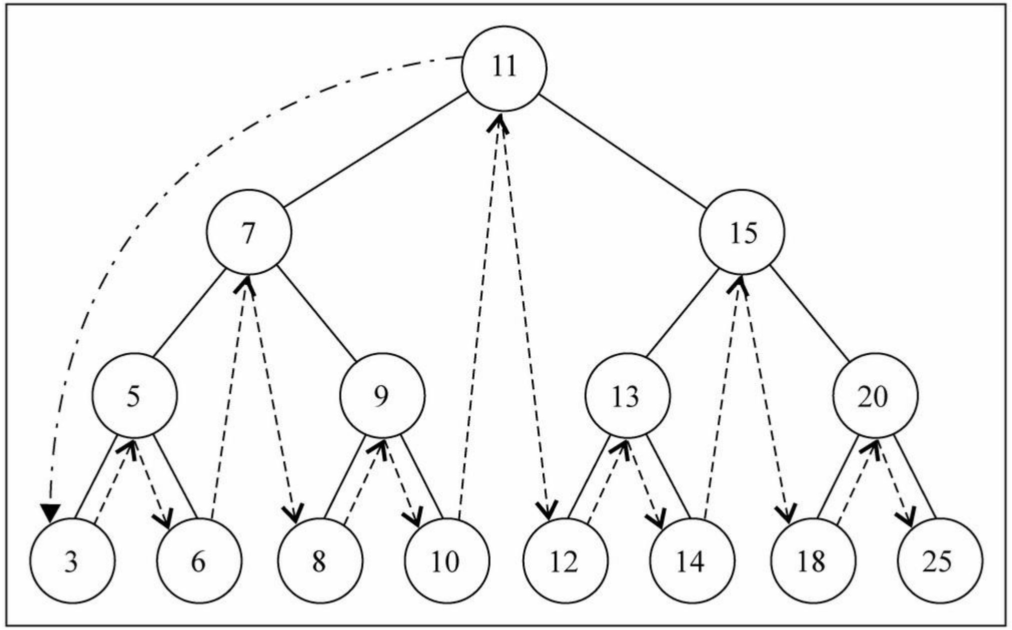
中序遍历

- **遍历过程为：**
  - ①中序遍历其左子树；
  - ②访问根节点；
  - ③中序遍历其右子树。



（D B E F） A （G H C I）

中序遍历=> D B E F A G H C I



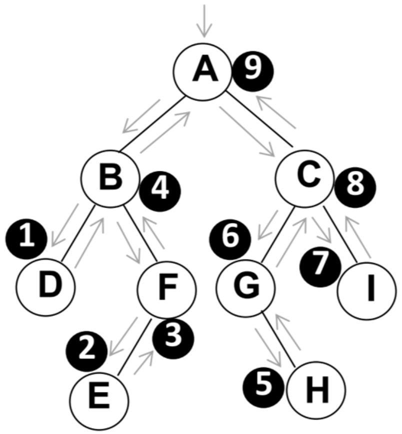

```
// 中序遍历
inOrderTraverse() {
  this.inOrderTraverseNode(this.root)
}
private inOrderTraverseNode(node: Node<T> | null) {
  if (node) {
    this.inOrderTraverseNode(node.left)
    console.log(node.value)
    this.inOrderTraverseNode(node.right)
  }
}
```

中序遍历（非递归 – 课下扩展）

```
inOrderTraverseNonRecursive() {
  let stack: Node<T>[] = [];
  let current: Node<T> | null = this.root;

  while (current !== null || stack.length !== 0) {
    while (current !== null) {
      stack.push(current);
      current = current.left;
    }

    current = stack.pop()!;
    console.log(current.value);
    current = current.right;
  }
}
```

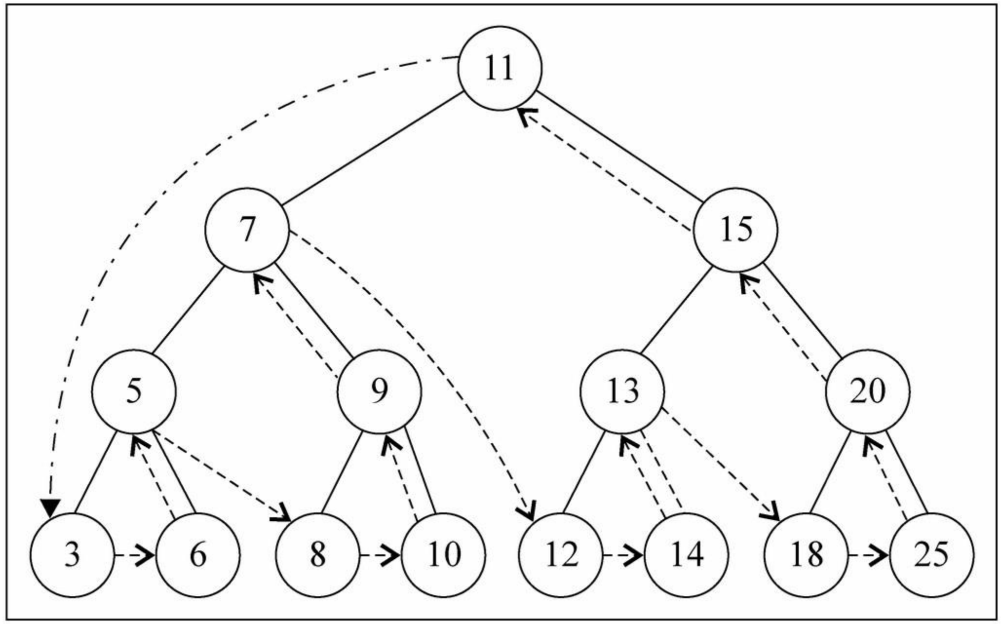
后序遍历

- **遍历过程为：**
  - ①后序遍历其左子树；
  - ②后序遍历其右子树；
  - ③访问根节点。



（D E F B ）（H G I C ）A

后序遍历=>　D E F B H G I C A



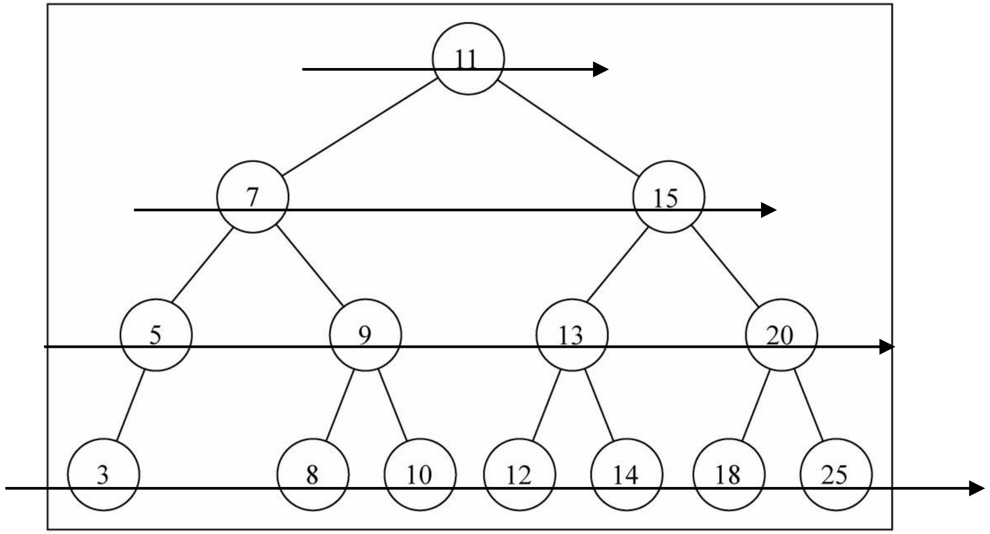

```
// 后序遍历
postOrderTraverse() {
  this.postOrderTraverseNode(this.root)
}
private postOrderTraverseNode(node: Node<T> | null) {
  if (node) {
    this.postOrderTraverseNode(node.left)
    this.postOrderTraverseNode(node.right)
    console.log(node.value)
  }
}
```

后序遍历（非递归 – 课下扩展）

```
postOrderTraversalNoRecursion() {
  let stack: Node<T>[] = [];
  let current: Node<T> | null = this.root;
  let lastVisitedNode: Node<T> | null = null;

  while (current !== null || stack.length !== 0) {
    while (current !== null) {
      stack.push(current);
      current = current.left;
    }

    current = stack[stack.length - 1];
    if (current.right === null || current.right === lastVisitedNode) {
      console.log(current.value);
      lastVisitedNode = current;
      stack.pop();
      current = null;
    } else {
      current = current.right;
    }
  }
}
```

层序遍历

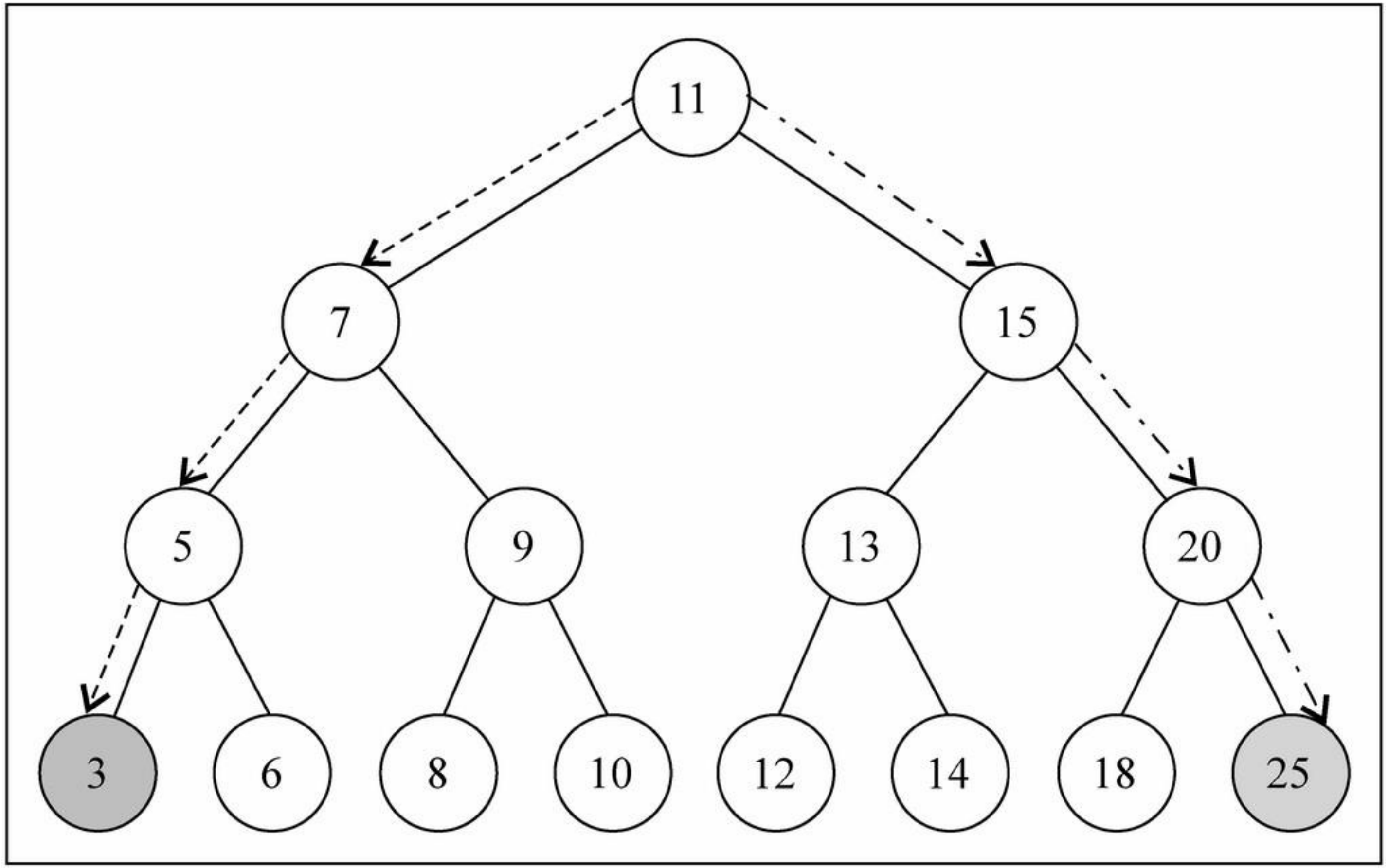
- **遍历过程为：**
  - 层序遍历很好理解，就是从上向下逐层遍历。
  - 层序遍历通常我们会借助于队列来完成；
    - ✓ 也是队列的一个经典应用场景；




```
// 层序遍历
levelOrderTraversal() {
  // 没有根节点，直接返回
  if (!this.root) return

  // 创建一个队列
  const queue: Node<T>[] = []
  queue.push(this.root)

  while (queue.length !== 0) {
    const current = queue.shift()!
    console.log(current.value)

    if (current.left !== null) {
      queue.push(current.left)
    }

    if (current.right !== null) {
      queue.push(current.right)
    }
  }
}
```

最大值 & 最小值

■ 在二叉搜索树中搜索最值是一件非常简单的事情，其实用眼睛看就可以看出来了。




```
// 获取最值
// 获取最小值
getMinValue(): T | null {
  let current = this.root
  while (current && current.left) {
    current = current.left
  }
  return current?.value ?? null
}
// 获取最大值
getMaxValue(): T | null {
  let current = this.root
  while (current && current.right) {
    current = current.right
  }
  return current?.value ?? null
}
```

search搜索特定的值

- 二叉搜索树不仅仅获取最值效率非常高，搜索特定的值效率也非常高。
  - 注意：这里的实现返回boolean类型即可。

```typescript
// 搜索特定的值
search(value: T): boolean {
  return this.searchNode(this.root, value)
}
private searchNode(node: Node<T> | null, value: T): boolean {
  // 1.如果节点为null，那么就直接推出递归
  if (node === null) return false

  // 2.判断node节点的value和传入的value的大小
  if (node.value > value) { // 在左边继续查找
    return this.searchNode(node.left, value)
  } else if (node.value < value) { // 在右边继续查找
    return this.searchNode(node.right, value)
  } else {
    return true
  }
}
```

- **代码解析：**
- 这里我们还是使用了递归的方式。
- 递归必须有退出条件，我们这里是两种情况下退出。
  - node === null，也就是后面不再有节点的时候。
  - 找到对应的value，也就是node.value === value的时候。
- 在其他情况下，根据node.的value和传入的value进行比较来决定向左还是向右查找。
  - 如果node.value > value，那么说明传入的值更小，需要向左查找。
  - 如果node.value < value，那么说明传入的值更大，需要向右查找。

search搜索特定的值（非递归）

```
searchNoRecursion(value: T) {
  let current = this.root
  while (current) {
    if (current.value > value) {
      current = current.left
    } else if (current.value < value) {
      current = current.right
    } else {
      return true
    }
  }
  return false
}
```

二叉搜索树的删除

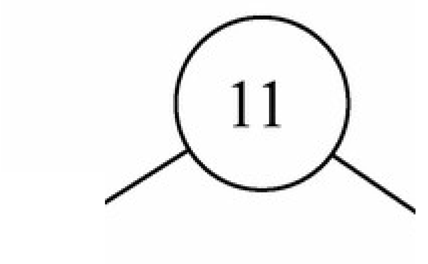
- 二叉搜索树的删除有些复杂，我们一点点完成。
- 删除节点要从查找要删的节点开始，找到节点后，需要考虑三种情况：
  - 该节点是叶节点(没有字节点，比较简单)
  - 该节点有一个子节点(也相对简单)
  - 该节点有两个子节点.(情况比较复杂，我们后面慢慢道来)

- 我们先从查找要删除的节点入手
- 1> 先找到要删除的节点，如果没有找到，不需要删除
- 2> 找到要删除节点
  - 1) 删除叶子节点
  - 2) 删除只有一个子节点的节点
  - 3) 删除有两个子节点的节点

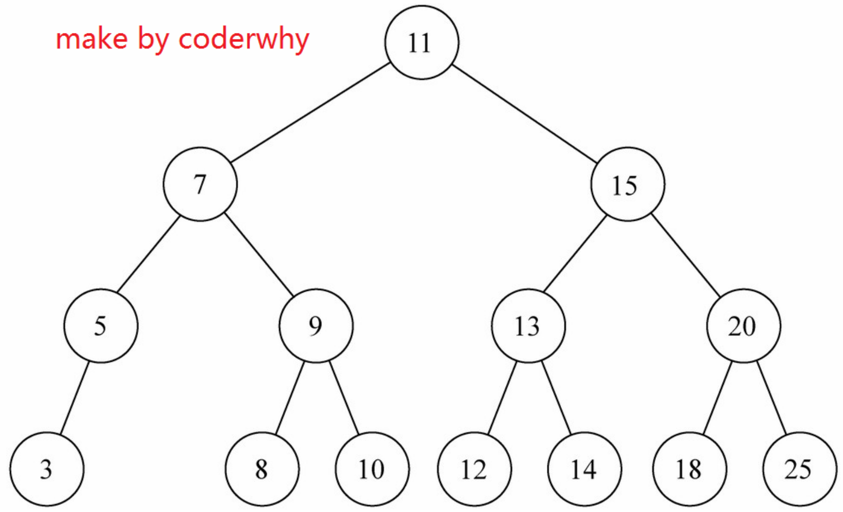
```typescript
remove(value: T): boolean {
  if (!this.root) return false

  // 1.查找到该节点的位置(如果没有直接返回)
  let current: Node<T> | null = this.root // 当前节点
  let parent: Node<T> | null = null // 父节点
  let isLeft = true // 是否是父节点左子节点

  while (current.value !== value) {
    parent = current
    if (value < current.value) {
      isLeft = true
      current = current.left
    } else {
      isLeft = false
      current = current.right
    }

    if (current === null) return false
  }
```

情况一：没有子节点

- **情况一：没有子节点.**
  - 这种情况相对比较简单，我们需要检测current的left以及right是否都为null.
  - 都为null之后还要检测一个东西，就是是否current就是根，都为null，并且为跟根，那么相当于要清空二叉树(当然，只是清空了根，因为只有它).
  - 否则就把父节点的left或者right字段设置为null即可.
- **如果只有一个单独的根，直接删除即可**



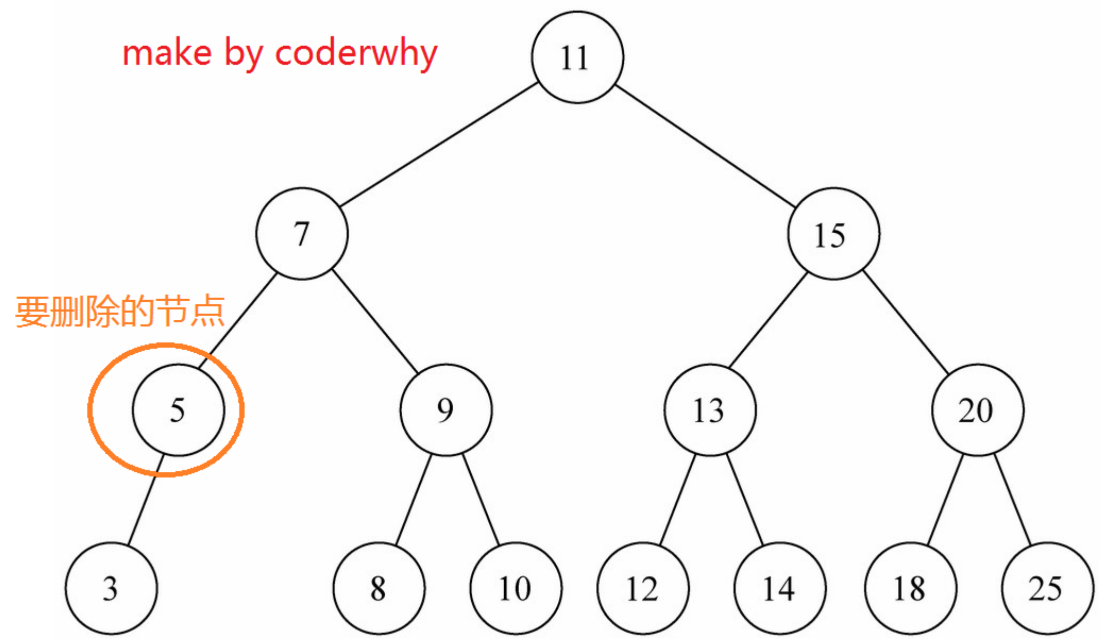
- **如果是叶节点，那么处理方式如下：**



如果是3,8,10,12,14,18,25中任何一个叶子结点.(current)
那么直接将parent(current的父节点)指向该引用的left或者right
设置为null杰克

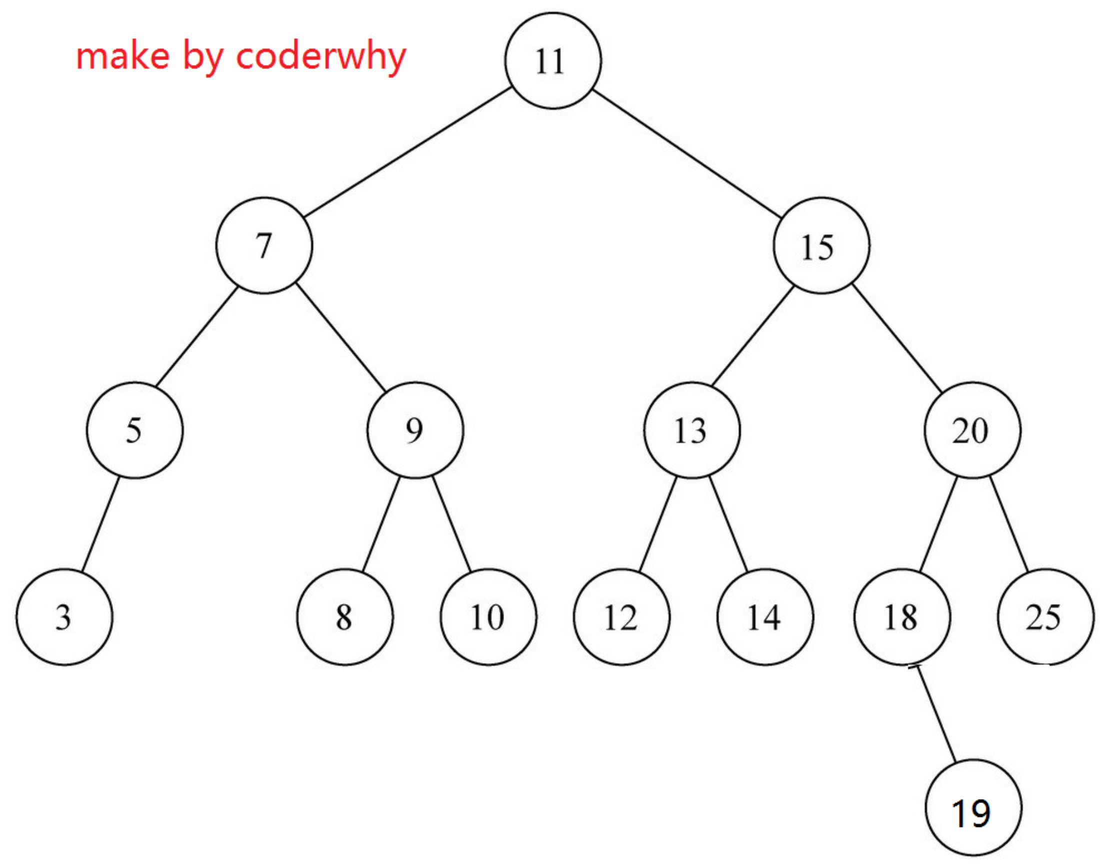
情况二：一个子节点

- **情况二：有一个子节点**
  - 这种情况也不是很难.
  - 要删除的current节点，只有2个连接(如果有两个子节点，就是三个连接了)，一个连接父节点，一个连接唯一的子节点.
  - 需要从这三者之间：爷爷 - 自己 - 儿子，将自己(current)剪短，让爷爷直接连接儿子即可.
  - 这个过程要求改变父节点的left或者right，指向要删除节点的子节点.
  - 当然，在这个过程中还要考虑是否current就是根.
- 图解过程：
  - 如果是根的情况，大家可以自己画一下，比较简单，这里不再给出.
  - 如果不是根，并且只有一个子节点的情况.



假设要删除的是结点5, 而5只有一个子结点.
其实无所谓自己的儿子结点(3节点)有没有子结点, 直接将该节点移到原来5的位置即可.
也就是让parent节点(7)结点, 直接指向3结点

情况三：两个子节点



看下面的集中情况, 你怎么处理?

情况一: 删除9节点.

> 处理方式相对简单, 将8位置替换到9, 或者将10位置替换到9.

> 注意: 这里我说的是替换. 也就是8位置替换到9时, 7指向8, 而8还需要指向10.

情况二: 删除7节点.

>一种方式是将5拿到7的位置, 3依然指向5, 但是5有一个right需要指向9. 依然是二叉搜索树, 没有问题.

> 另一种方式是在右侧找一个, 找谁? 8

> 也就是将8替换到7的位置, 8的left指向5, right指向9, 依然是二叉搜索树, 没有问题.

情况三: 删除15节点, 并且我希望也在右边找

> 你找到的是谁? 其实我们观察一下你能找到18

> 18替换15的位置, 20的left指向19. 也是一个二叉搜索树, 也没有问题.

是不是已经懵逼了?

情况就是这么复杂, 但是我们要开始找规律了

寻找规律

- 如果我们要删除的节点有两个子节点，甚至子节点还有子节点，这种情况下我们需要从下面的子节点中找到一个节点，来替换当前的节点.
- 但是找到的这个节点有什么特征呢？ 应该是current节点下面所有节点中最接近current节点的.
  - 要么比current节点小一点点，要么比current节点大一点点。
  - 总结你最接近current，你就可以用来替换current的位置.
- 这个节点怎么找呢?
  - 比current小一点点的节点，一定是current左子树的最大值。
  - 比current大一点点的节点，一定是current右子树的最小值。
- 前驱&后继
  - 在二叉搜索树中，这两个特别的节点，有两个特别的名字。
  - 比current小一点点的节点，称为current节点的前驱。
  - 比current大一点点的节点，称为current节点的后继。
- 也就是为了能够删除有两个子节点的current，要么找到它的前驱，要么找到它的后继。
- 所以，接下来，我们先找到这样的节点(前驱或者后继都可以，我这里以找后继为例)

```
private getSuccessor(delNode: Node<T>): Node<T> {
  // 1.保存临时节点变量
  let successor = delNode
  let successorParent = delNode
  let current = delNode.right

  // 2.寻找后继节点
  while (current !== null) {
    successorParent = successor
    successor = current
    current = current.left
  }

  // 3.如果删除后继节点还有右节点，那么还需要如下操作
  if (successor !== delNode.right) {
    successorParent.left = successor.right
    successor.right = delNode.right
  }

  return successor
}
```

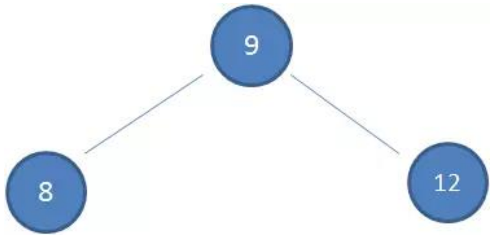
删除操作总结

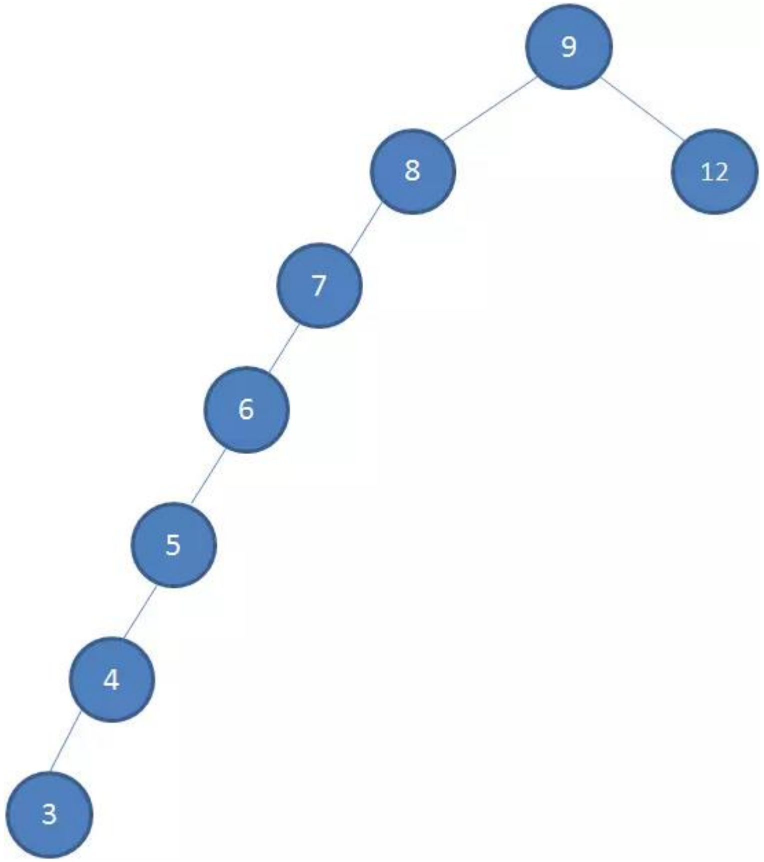
- 看到这里，你就会发现删除节点相当棘手。
- 实际上，因为它非常复杂，一些程序员都尝试着避开删除操作。
  - 他们的做法是在Node类中添加一个boolean的字段，比如名称为isDeleted。
  - 要删除一个节点时，就将此字段设置为true。
  - 其他操作，比如find()在查找之前先判断这个节点是不是标记为删除。
  - 这样相对比较简单，每次删除节点不会改变原有的树结构。
  - 但是在二叉树的存储中，还保留着那些本该已经被删除掉的节点。
- 上面的做法看起来很聪明，其实是一种逃避。
  - 这样会造成很大空间的浪费，特别是针对数据量较大的情况。
  - 而且，作为程序员要学会通过这些复杂的操作，锻炼自己的逻辑。

coderwhy

二叉搜索树的缺陷

- **二叉搜索树作为数据存储的结构由重要的优势：**
  - 可以快速地找到给定关键字的数据项 并且可以快速地插入和删除数据项。
- **但是，二叉搜索树有一个很麻烦的问题：**
  - 如果插入的数据时有序的数据，比如下面的情况
  - 有一棵初始化为 9 8 12 的二叉树
  - 插入下面的数据：7 6 5 4 3
- **非平衡树：**
  - 比较好的二叉搜索树数据应该是左右分布均匀的
  - 但是插入连续数据后，分布的不均匀，我称这种树为非平衡树。
  - 对于一棵平衡二叉树来说，插入/查找等操作的效率是O(logN)
  - 对于一棵非平衡二叉树，相当于编写了一个链表，查找效率变成了O(N)





树的平衡性

- **为了能以较快的时间O(logN)来操作一棵树，我们需要保证树总是平衡的：**
  - 至少大部分是平衡的，那么时间复杂度也是接近O(logN)的
  - 也就是说树中每个节点左边的子孙节点的个数，应该尽可能的等于右边的子孙节点的个数。
  - 常见的平衡树有哪些呢？
- **AVL树：**
  - AVL树是最早的一种平衡树。它有些办法保持树的平衡(每个节点多存储了一个额外的数据)
  - 因为AVL树是平衡的，所以时间复杂度也是O(logN)。
  - 但是，每次插入/删除操作相对于红黑树效率都不高，所以整体效率不如红黑树
- **红黑树：**
  - 红黑树也通过一些特性来保持树的平衡。
  - 因为是平衡树，所以时间复杂度也是在O(logN)。
  - 另外插入/删除等操作，红黑树的性能要优于AVL树，所以现在平衡树的应用基本都是红黑树。