

# 决策树 Decision Tree

Lectured by Shangsong Liang  
Sun Yat-sen University

Produced 《机器学习》周志华



# 第4章 决策树

根据训练数据是否拥有标记信息

学习任务	监督学习(supervised learning)	$(x_i, y_i)$	分类、回归
	无监督学习(unsupervised learning)		聚类
	半监督学习(semi-supervised learning)		
	强化学习(reinforcement learning)		

半监督学习：输入数据部分被标识，部分没有被标识，介于监督学习与非监督学习之间。

**决策树** (decision tree) 模型常常用来解决分类和回归问题。常见的算法包括 CART (Classification And Regression Tree)、ID3、C4.5等。

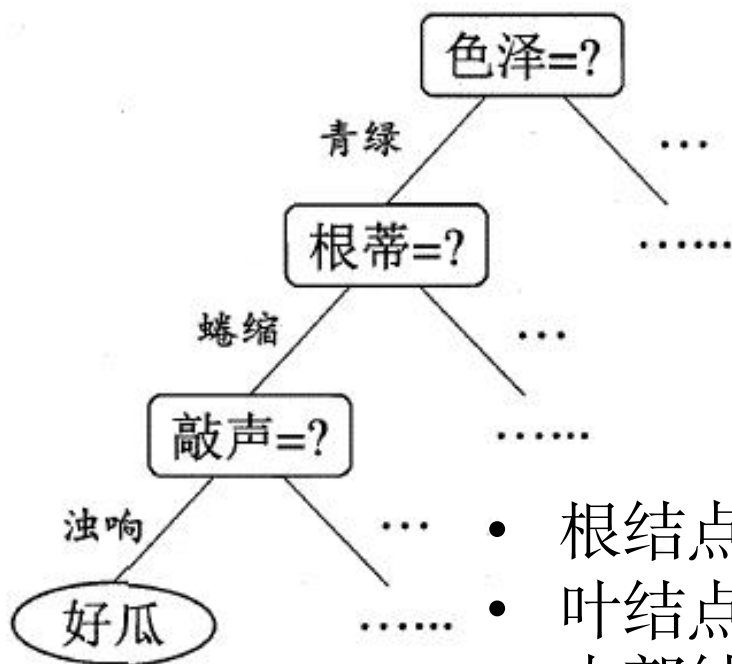


表 4.1 西瓜数据集 2.0

编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	好瓜
1	青绿	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
2	乌黑	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
3	乌黑	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
4	青绿	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
5	浅白	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
6	青绿	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	是
7	乌黑	稍蜷	浊响	稍糊	稍凹	软粘	是
8	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	硬滑	是
9	乌黑	稍蜷	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否
10	青绿	硬挺	清脆	清晰	平坦	软粘	否
11	浅白	硬挺	清脆	模糊	平坦	硬滑	否
12	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	软粘	否
13	青绿	稍蜷	浊响	稍糊	凹陷	硬滑	否
14	浅白	稍蜷	沉闷	稍糊	凹陷	硬滑	否
15	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	否
16	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	硬滑	否
17	青绿	蜷缩	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否



二分类学习任务  
属性  
属性值



- 根结点：包含全部样本
- 叶结点：对应决策结果 “好瓜” “坏瓜”
- 内部结点：对应属性测试

图 4.1 西瓜问题的一棵决策树

决策树学习的目的：为了产生一颗泛化能力强的决策树，即处理未见示例能力强。





## Hunt算法:

输入: 训练集  $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ ;

属性集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_d\}$ .

过程: 函数 TreeGenerate( $D, A$ )

1: 生成结点 node;

2: if  $D$  中样本全属于同一类别  $C$  then

3: 将 node 标记为  $C$  类叶结点; return

4: end if

5: if  $A = \emptyset$  OR  $D$  中样本在  $A$  上取值相同 then

6: 将 node 标记为叶结点, 其类别标记为  $D$  中样本数最多的类; return

7: end if

8: 从  $A$  中选择最优划分属性  $a_*$ ;

9: for  $a_*$  的每一个值  $a_*^v$  do

10: 为 node 生成一个分支; 令  $D_v$  表示  $D$  中在  $a_*$  上取值为  $a_*^v$  的样本子集;

11: if  $D_v$  为空 then

12: 将分支结点标记为叶结点, 其类别标记为  $D$  中样本最多的类; return

13: else

14: 以 TreeGenerate( $D_v, A \setminus \{a_*\}$ ) 为分支结点

15: end if

16: end for

输出: 以 node 为根结点的一棵决策树

无需划分

无法划分

不能划分

递归返回, 情形(1).

递归返回, 情形(2).

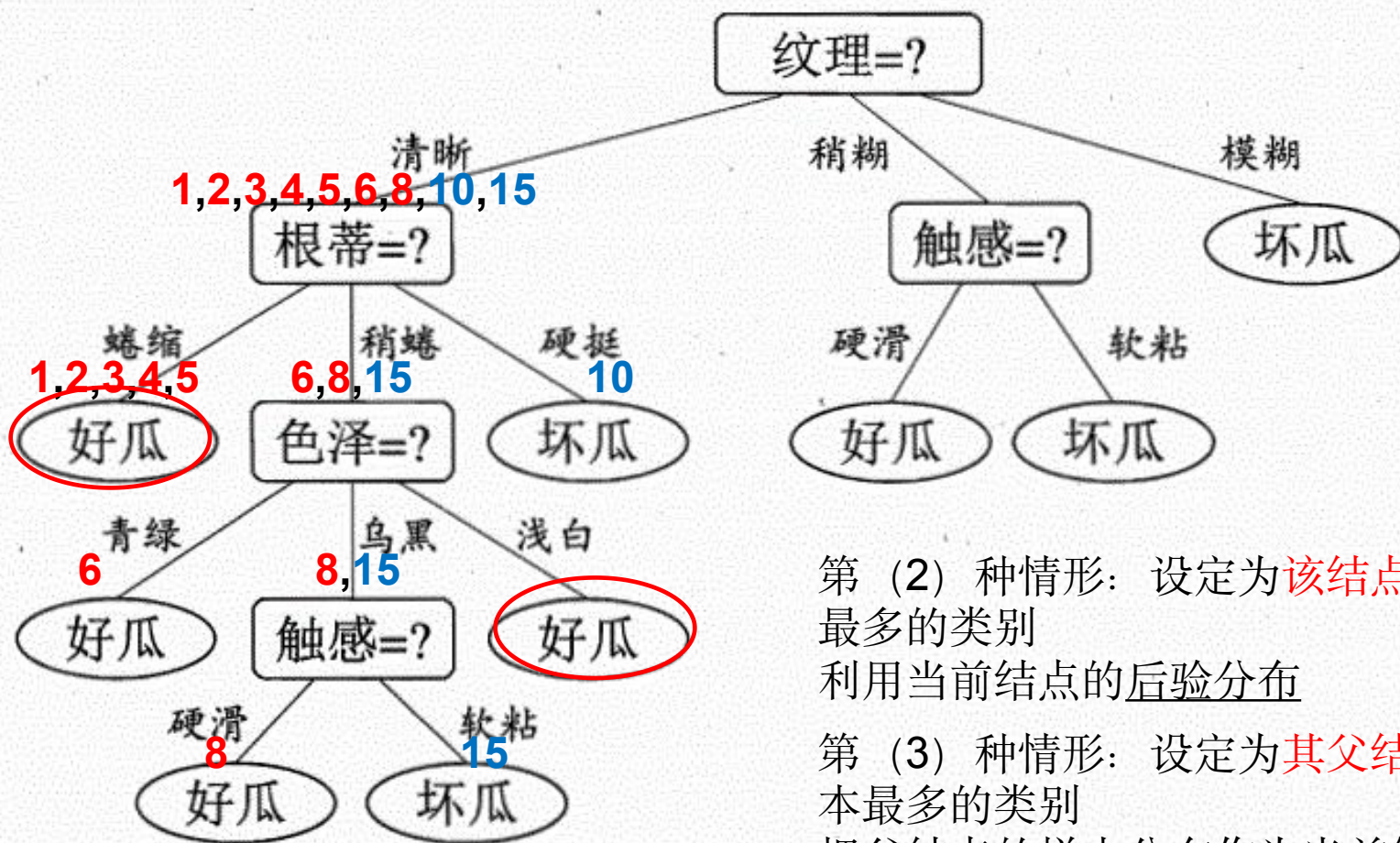
我们将在下一节讨论如何获得最优划分属性.

递归返回, 情形(3).

从  $A$  中去掉  $a_*$ .

图 4.2 决策树学习基本算法





第 (2) 种情形: 设定为该结点所含样本最多的类别

利用当前结点的后验分布

第 (3) 种情形: 设定为其父结点所含样本最多的类别

把父结点的样本分布作为当前结点的先验分布

图 4.4 在西瓜数据集 2.0 上基于信息增益生成的决策树

决策树学习的关键是算法的第8行：选择最优划分属性

什么样的划分属性是最优的？

我们希望决策树的分支结点所包含的样本尽可能属于同一类别，即结点的“纯度”越来越高，可以高效地从根结点到达叶结点，得到决策结果。

三种度量结点“纯度”的指标：

- 1.信息增益
- 2.增益率
- 3.基尼指数





# 1. 信息增益

## 信息熵

香农提出了“信息熵”的概念，解决了对信息的量化度量问题。

香农用“信息熵”的概念来描述信源的不确定性。

“信息熵” (information entropy) 是度量样本集合纯度最常用的一种指标. 假定当前样本集合  $D$  中第  $k$  类样本所占的比例为  $p_k$  ( $k = 1, 2, \dots, |\mathcal{Y}|$ ), 则  $D$  的信息熵定义为

$$\text{Ent}(D) = - \sum_{k=1}^{|\mathcal{Y}|} p_k \log_2 p_k . \quad (4.1)$$

$\text{Ent}(D)$  的值越小, 则  $D$  的纯度越高. 对于二分类任务  $|\mathcal{Y}| = 2$





假设我们已经知道衡量不确定性大小的这个量已经存在了，不妨就叫做“信息量”

- 不会是负数
- 不确定性函数  $f$  是概率  $p$  的单调递减函数；
- 可加性：两个独立符号所产生的不确定性应等于各自不确定性之和，即

$$f(p_1 \times p_2) = f(p_1) + f(p_2)$$

同时满足这三个条件的函数  $f$  是负的对数函数，即

$$f(p_i) = \log \frac{1}{p_i} = -\log p_i$$

一个事件的信息量就是这个事件发生的概率的负对数。

信息熵是跟所有事件的可能性有关的，是平均而言发生一个事件得到的信息量大小。所以信息熵其实是信息量的期望。

$$E[-\log p_i] = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$



# 信息增益 (ID 3: Iterative Dichotomiser)

假定离散属性  $a$  有  $V$  个可能的取值  $\{a^1, a^2, \dots, a^V\}$ , 若使用  $a$  来对样本集  $D$  进行划分, 则会产生  $V$  个分支结点, 其中第  $v$  个分支结点包含了  $D$  中所有在属性  $a$  上取值为  $a^v$  的样本, 记为  $D^v$ . 我们可根据式(4.1) 计算出  $D^v$  的信息熵, 再考虑到不同的分支结点所包含的样本数不同, 给分支结点赋予权重  $|D^v|/|D|$ , 即样本数越多的分支结点的影响越大, 于是可计算出用属性  $a$  对样本集  $D$  进行划分所获得的“信息增益” (information gain)

$$\text{Gain}(D, a) = \text{Ent}(D) - \sum_{v=1}^V \frac{|D^v|}{|D|} \text{Ent}(D^v) . \quad (4.2)$$

一般而言, 信息增益越大, 则意味着使用属性  $a$  来进行划分所获得的“纯度提升”越大。

决策树算法第8行选择属性  $a_* = \arg \max_{a \in A} \text{Gain}(D, a)$ .

著名的ID3决策树算法



表 4.1 西瓜数据集 2.0

编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	好瓜
1	青绿	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
2	乌黑	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
3	乌黑	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
4	青绿	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
5	浅白	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
6	青绿	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	是
7	乌黑	稍蜷	浊响	稍糊	稍凹	软粘	是
8	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	硬滑	是
9	乌黑	稍蜷	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否
10	青绿	硬挺	清脆	清晰	平坦	软粘	否
11	浅白	硬挺	清脆	模糊	平坦	硬滑	否
12	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	软粘	否
13	青绿	稍蜷	浊响	稍糊	凹陷	硬滑	否
14	浅白	稍蜷	沉闷	稍糊	凹陷	硬滑	否
15	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	否
16	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	硬滑	否
17	青绿	蜷缩	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否



举例：求解划分根结点的最优划分属性

数据集包含17个训练样例：

8个正例（好瓜）占  $p_1 = \frac{8}{17}$

9个反例（坏瓜）占  $p_2 = \frac{9}{17}$

对于二分类任务  $|y| = 2$

以属性“色泽”为例计算其信息增益

根结点的信息熵：

$$\text{Ent}(D) = - \sum_{k=1}^2 p_k \log_2 p_k = - \left( \frac{8}{17} \log_2 \frac{8}{17} + \frac{9}{17} \log_2 \frac{9}{17} \right) = 0.998 .$$





用“色泽”将根结点划分后获得3个分支结点的信息熵分别为：

$$\text{Ent}(D^1) = - \left( \frac{3}{6} \log_2 \frac{3}{6} + \frac{3}{6} \log_2 \frac{3}{6} \right) = 1.000 ,$$

$$\text{Ent}(D^2) = - \left( \frac{4}{6} \log_2 \frac{4}{6} + \frac{2}{6} \log_2 \frac{2}{6} \right) = 0.918 ,$$

$$\text{Ent}(D^3) = - \left( \frac{1}{5} \log_2 \frac{1}{5} + \frac{4}{5} \log_2 \frac{4}{5} \right) = 0.722 ,$$

属性“色泽”的信息增益为：

$$\begin{aligned} \text{Gain}(D, \text{色泽}) &= \text{Ent}(D) - \sum_{v=1}^3 \frac{|D^v|}{|D|} \text{Ent}(D^v) \\ &= 0.998 - \left( \frac{6}{17} \times 1.000 + \frac{6}{17} \times 0.918 + \frac{5}{17} \times 0.722 \right) \\ &= 0.109 . \end{aligned}$$



类似的, 我们可计算出其他属性的信息增益:

$\text{Gain}(D, \text{根蒂}) = 0.143$ ;  $\text{Gain}(D, \text{敲声}) = 0.141$ ;

$\text{Gain}(D, \text{纹理}) = 0.381$ ;  $\text{Gain}(D, \text{脐部}) = 0.289$ ;

$\text{Gain}(D, \text{触感}) = 0.006$ .

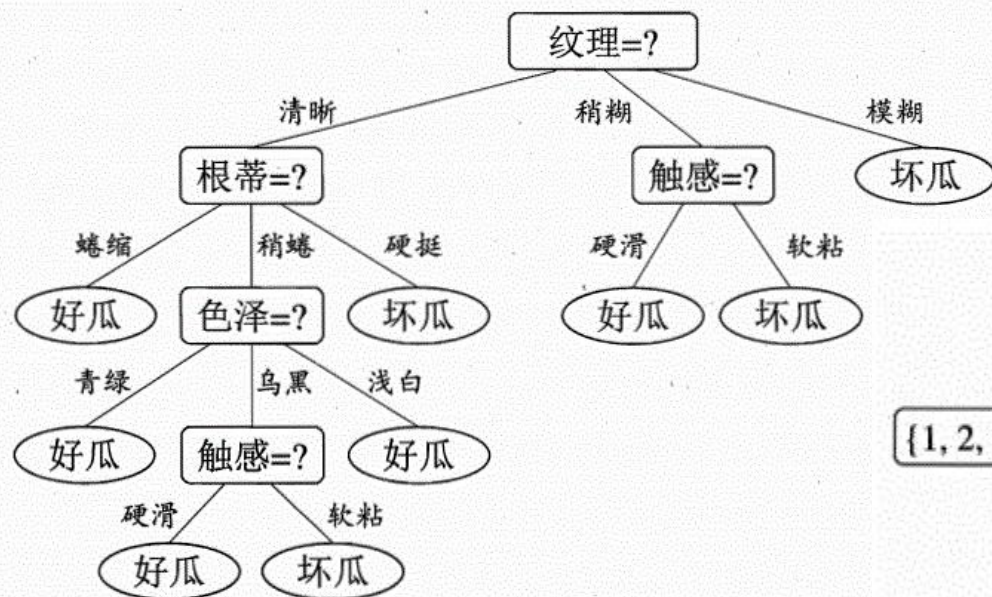


图 4.4 在西瓜数据集 2.0 上基于信息增益生成的决策树



图 4.3 基于“纹理”属性对根结点划分

若把“编号”也作为一个候选划分属性，则属性“编号”的信息增益为：

根结点的信息熵仍为：  $Ent(D) = 0.998$

用“编号”将根结点划分后获得17个分支结点的信息熵均为：

$$Ent(D^1) = \dots = Ent(D^{17}) = -\left(\frac{1}{1} \log_2 \frac{1}{1} + \frac{0}{1} \log_2 \frac{0}{1}\right) = 0$$

则“编号”的信息增益为：

$$Gain(D, \text{编号}) = Ent(D) - \sum_{v=1}^{17} \frac{1}{17} Ent(D^v) = 0.998$$

远大于其他候选属性

信息增益准则对可取值数目较多的属性有所偏好



## 2. 增益率 (Used in C4.5)

$$\text{Gain\_ratio}(D, a) = \frac{\text{Gain}(D, a)}{\text{IV}(a)}, \quad (4.3)$$

其中

$$\text{IV}(a) = - \sum_{v=1}^V \frac{|D^v|}{|D|} \log_2 \frac{|D^v|}{|D|} \quad (4.4)$$

称为属性  $a$  的“固有价值” (intrinsic value) [Quinlan, 1993]. 属性  $a$  的可能取值数目越多(即  $V$  越大), 则  $\text{IV}(a)$  的值通常会越大. 例如, 对表 4.1 的西

增益率准则对可取值数目较少的属性有所偏好

著名的C4.5决策树算法综合了**信息增益准则**和**信息率准则**的特点: 先从候选划分属性中找出信息增益高于平均水平的属性, 再从中选择增益率最高的。





### 3. 基尼指数

#### 基尼值

$$\begin{aligned}\text{Gini}(D) &= \sum_{k=1}^{|\mathcal{Y}|} \sum_{k' \neq k} p_k p_{k'} \\ &= 1 - \sum_{k=1}^{|\mathcal{Y}|} p_k^2.\end{aligned}\quad (4.5)$$

直观来说,  $\text{Gini}(D)$  反映了从数据集  $D$  中随机抽取两个样本, 其类别标记不一致的概率. 因此,  $\text{Gini}(D)$  越小, 则数据集  $D$  的纯度越高.

#### 基尼指数

$$\text{Gini\_index}(D, a) = \sum_{v=1}^V \frac{|D^v|}{|D|} \text{Gini}(D^v). \quad (4.6)$$

于是, 我们在候选属性集合  $A$  中, 选择那个使得划分后基尼指数最小的属性作为最优划分属性, 即  $a_* = \arg \min_{a \in A} \text{Gini\_index}(D, a)$ .

著名的CART决策树算法



- **过拟合**: 学习器学习能力过于强大, 把训练样本自身的一些特点当作了所有潜在样本都会具有的一般性质, 导致泛化性能下降。
- **欠拟合**: 学习器学习能力低下, 对训练样本的一般性质尚未学好。

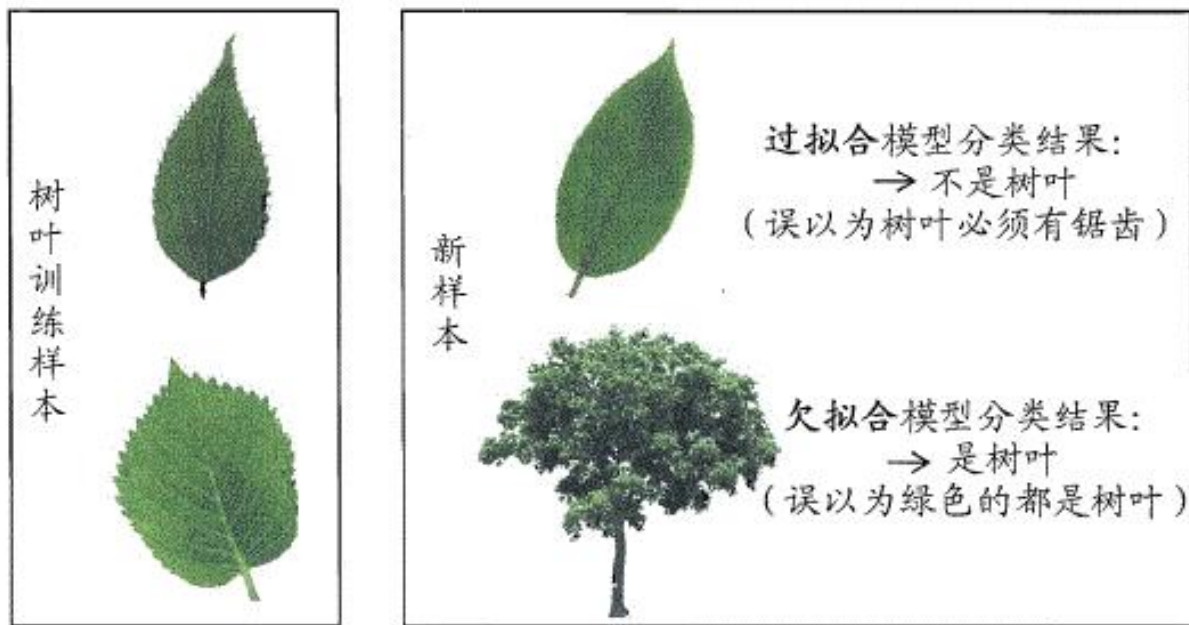


图 2.1 过拟合、欠拟合的直观类比

过拟合无法彻底避免, 只能做到“缓解”。



剪枝，即通过主动去掉一些分支来降低过拟合的风险。

决策树的剪枝策略

- 预剪枝
- 后剪枝

**预剪枝：**在决策树生成过程中，对每个结点在划分前先进行估计，若当前结点的划分不能带来决策树泛化性能提升，则停止划分并将当前结点标记为叶结点

**后剪枝：**先从训练集生成一棵完整的决策树，然后自底向上地对非叶结点进行考察，若将该结点对应的子树替换为叶结点能带来决策树泛化性能提升，则将该子树替换为叶结点。

**留出法：**将数据集**D**划分为两个互斥的集合：训练集**S**和测试集**T**

$$D = S \cup T \text{ 且 } S \cap T = \emptyset$$





表 4.2 西瓜数据集 2.0 划分出的训练集(双线上部)与验证集(双线下部)

编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	好瓜
1	青绿	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
2	乌黑	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
3	乌黑	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
6	青绿	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	是
7	乌黑	稍蜷	浊响	稍糊	稍凹	软粘	是
10	青绿	硬挺	清脆	清晰	平坦	软粘	否
14	浅白	稍蜷	沉闷	稍糊	凹陷	硬滑	否
15	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	否
16	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	硬滑	否
17	青绿	蜷缩	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否
编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	好瓜
4	青绿	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
5	浅白	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
8	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	硬滑	是
9	乌黑	稍蜷	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否
11	浅白	硬挺	清脆	模糊	平坦	硬滑	否
12	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	软粘	否
13	青绿	稍蜷	浊响	稍糊	凹陷	硬滑	否





# 预剪枝

精度：正确分类的样本占有所有样本的比例

验证集：4,5,8,9,11,12,13

训练集：好瓜 坏瓜  
1,2,3,6,7,10,14,15,16,17

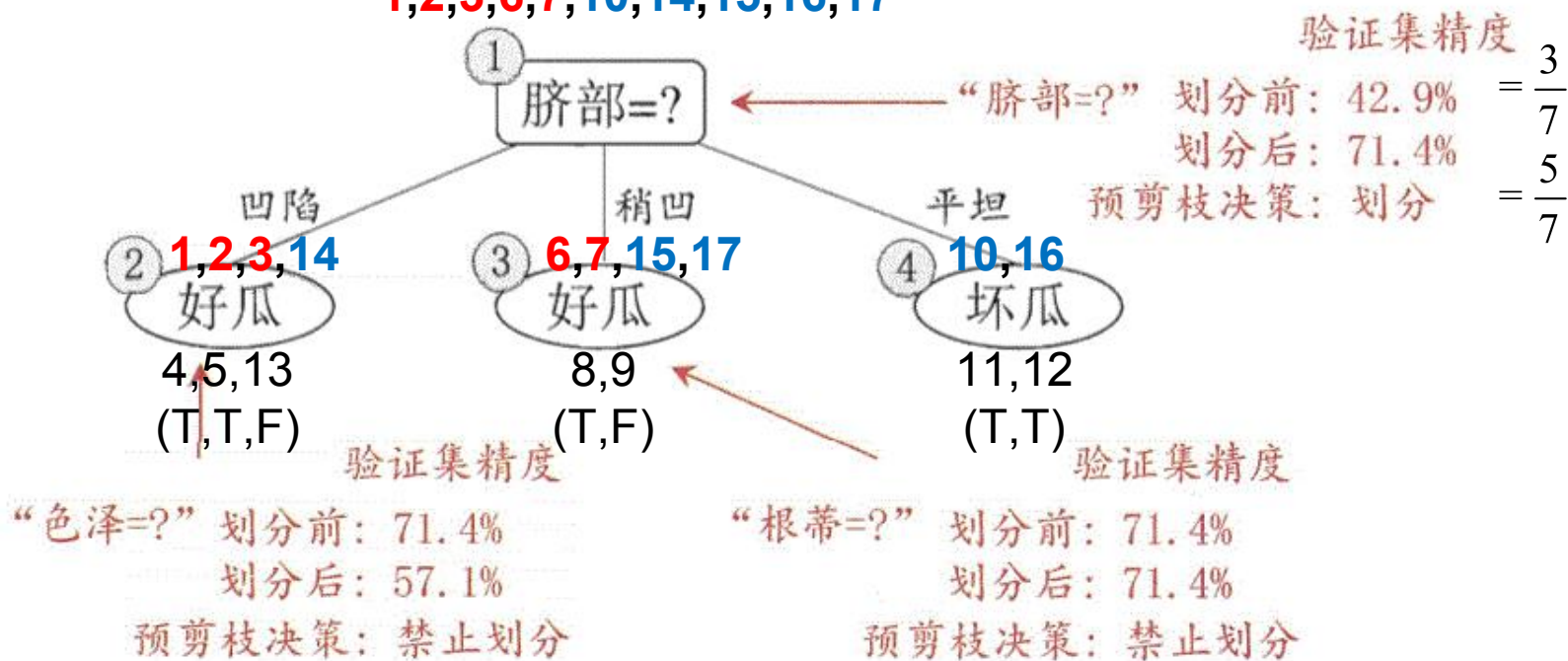
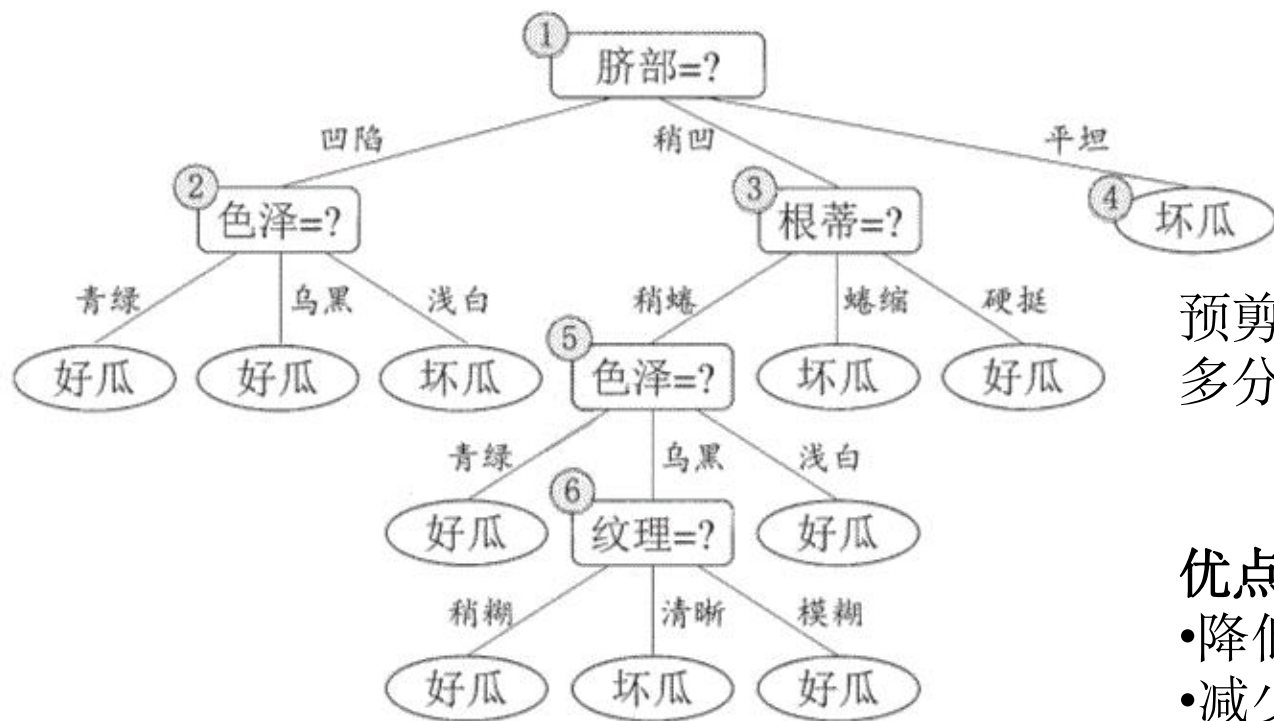


图 4.6 基于表 4.2 生成的预剪枝决策树



预剪枝使得决策树的很多分支都没有“展开”

优点:

- 降低过拟合的风险
- 减少了训练时间开销和测试时间开销

图 4.5 基于表 4.2 生成的未剪枝决策树

不足:

- 基于“贪心”本质禁止某些分支展开，带来了欠拟合的风险



# 后剪枝

先从训练集生成一棵完整的决策树，然后自底向上地对非叶结点进行考察，若将该结点对应的子树替换为叶结点能带来决策树泛化性能提升，则将该子树替换为叶结点。

训练集: 好瓜 坏瓜  
1,2,3,6,7,10,14,15,16,17

验证集: 4,5,8,9,11,12

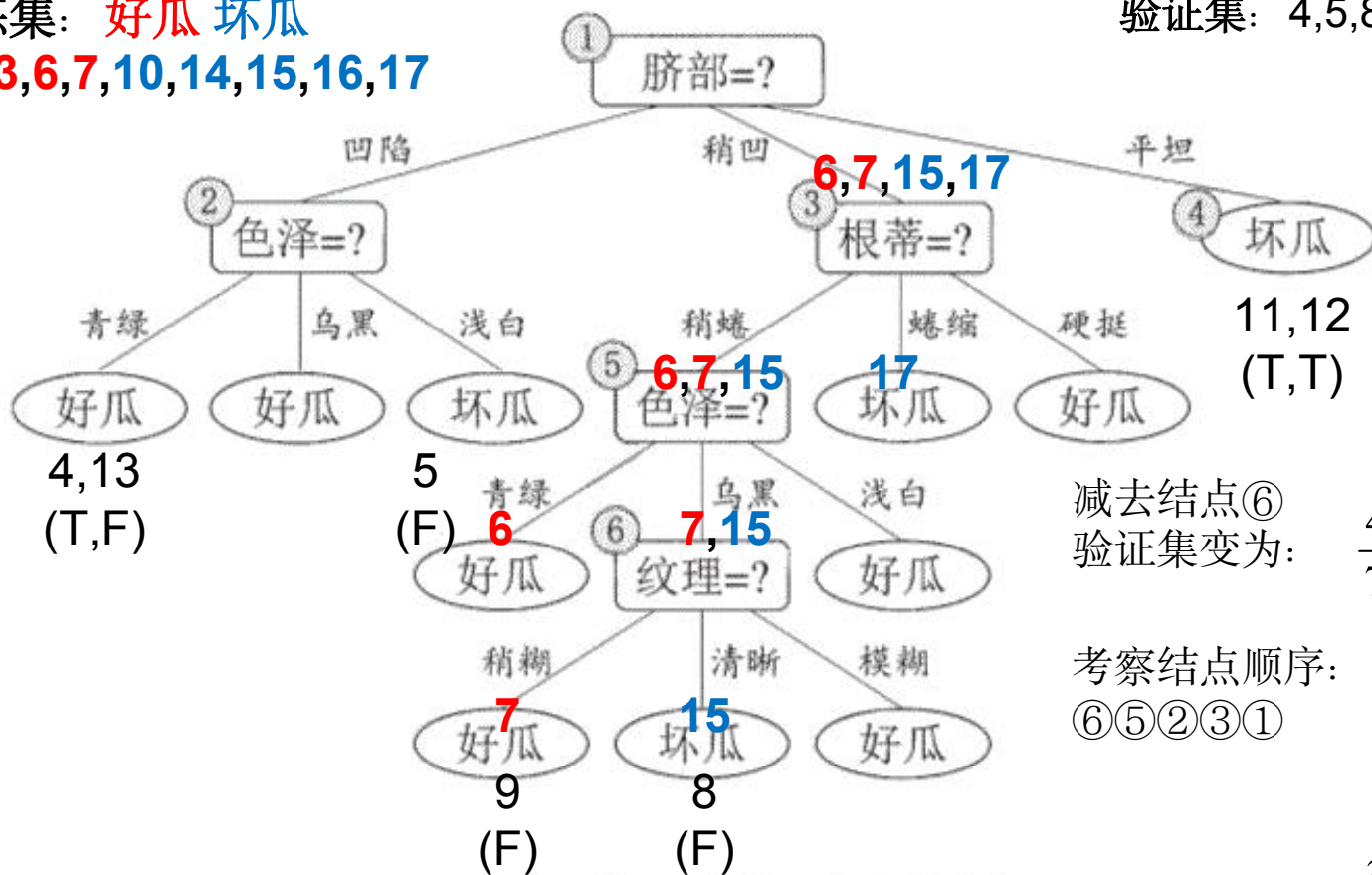


图 4.5 基于表 4.2 生成的未剪枝决策树 验证集精度:  $\frac{3}{7}$

## 后剪枝决策树

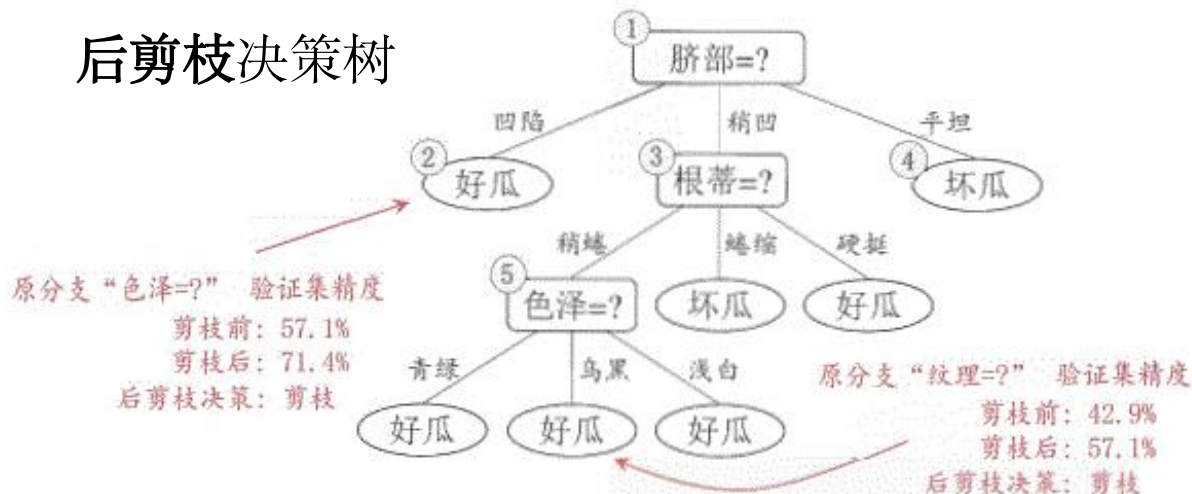


图 4.7 基于表 4.2 生成的后剪枝决策树

- 保留了更多的分支
- 欠拟合风险很小
- 泛化能力优于预剪枝决策树

- 训练时间开销比未减枝和预剪枝决策树大得多

1. 生产完全决策树
2. 所有非叶节点逐一考察

## 预剪枝决策树

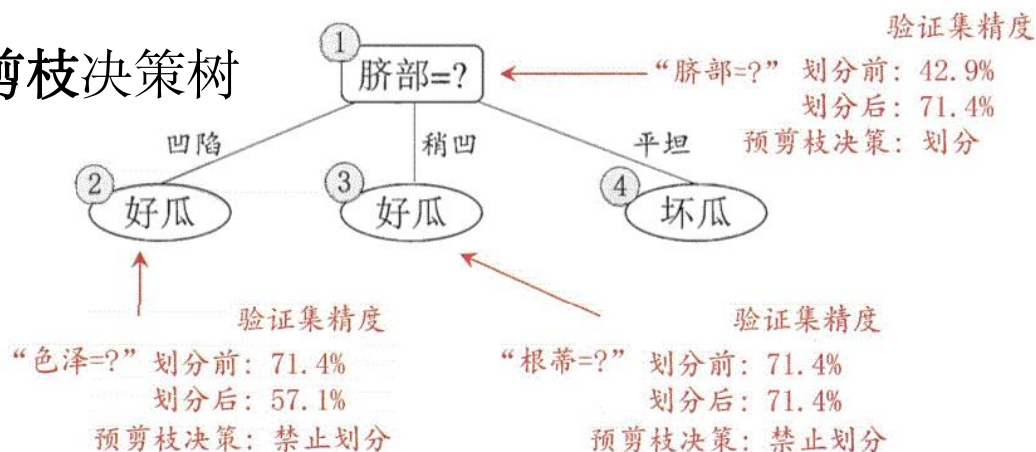


图 4.6 基于表 4.2 生成的预剪枝决策树





# 知识回顾:

1.四类学习任务

2.Hunt算法3种递归返回情形、第8行

3.3种度量结点“纯度”的指标:

- 信息增益 ID3
- 增益率 C4.5
- 基尼指数 CART

1.过拟合、欠拟合

2.决策树剪枝

- 预剪枝
- 后剪枝



表 4.3 西瓜数据集 3.0

编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	密度	含糖率	好瓜
1	青绿	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	0.697	0.460	是
2	乌黑	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	0.774	0.376	是
3	乌黑	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	0.634	0.264	是
4	青绿	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	0.608	0.318	是
5	浅白	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	0.556	0.215	是
6	青绿	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	0.403	0.237	是
7	乌黑	稍蜷	浊响	稍糊	稍凹	软粘	0.481	0.149	是
8	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	硬滑	0.437	0.211	是
9	乌黑	稍蜷	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	0.666	0.091	否
10	青绿	硬挺	清脆	清晰	平坦	软粘	0.243	0.267	否
11	浅白	硬挺	清脆	模糊	平坦	硬滑	0.245	0.057	否
12	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	软粘	0.343	0.099	否
13	青绿	稍蜷	浊响	稍糊	凹陷	硬滑	0.639	0.161	否
14	浅白	稍蜷	沉闷	稍糊	凹陷	硬滑	0.657	0.198	否
15	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	稍凹	软粘	0.360	0.370	否
16	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	硬滑	0.593	0.042	否
17	青绿	蜷缩	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	0.719	0.103	否

离散属性: 脐部 根蒂 色泽...

连续属性: 密度 含糖率...



## 连续属性离散化技术：二分法 C4.5决策树算法

样本集  $D$

连续属性  $a$ ，有  $n$  个不同的取值，将  $n$  个取值从小到大排序：  
 $\{a^1, a^2, \dots, a^n\}$

划分点  $t$  (数值) 将  $D$  划分为两个子集  $D_t^-$  和  $D_t^+$

$$\begin{array}{ccc} \{a^1, a^2, \dots, a^i, a^{i+1}, \dots, a^n\} & & \\ \hline D_t^- & t & D_t^+ \end{array}$$

显然，对相邻的属性取值  $a^i$   $a^{i+1}$  来说， $t$  在区间  $[a^i, a^{i+1})$  中取任意值所产生的划分结果都相同



可考察包含  $n - 1$  个元素的候选划分点集合

$$T_a = \left\{ \frac{a^i + a^{i+1}}{2} \mid 1 \leq i \leq n - 1 \right\}, \quad (4.7)$$

即把区间  $[a^i, a^{i+1})$  的中位点  $\frac{a^i + a^{i+1}}{2}$  作为候选划分点. 然后, 我们就可像离散属性值一样来考察这些划分点, 选取最优的划分点进行样本集合的划分. 例如, 可对式(4.2)稍加改造:

$$\begin{aligned} \text{Gain}(D, a) &= \max_{t \in T_a} \text{Gain}(D, a, t) \\ &= \max_{t \in T_a} \text{Ent}(D) - \sum_{\lambda \in \{-, +\}} \frac{|D_t^\lambda|}{|D|} \text{Ent}(D_t^\lambda), \end{aligned} \quad (4.8)$$

其中  $\text{Gain}(D, a, t)$  是样本集  $D$  基于划分点  $t$  二分后的信息增益. 于是, 我们就可选择使  $\text{Gain}(D, a, t)$  最大化的划分点.





密度	好瓜
0.243	否
0.245	否
0.343	否
0.360	否
0.403	是1
0.437	是2
0.481	是3
0.556	是4
0.593	否
0.680	是5
0.634	是6
0.639	否
0.657	否
0.666	否
0.697	是7
0.719	否
0.774	是8

根结点包含17个训练样本，密度有17个不同取值  
 候选划分点集合包含16个候选值  
 每一个划分点能得到一个对应的信息增益

$$\text{Gain}(D, a) = \max_{t \in T_a} \text{Gain}(D, a, t)$$

$$t = 0.381 \quad = \max_{t \in T_a} \text{Ent}(D) - \sum_{\lambda \in \{-, +\}} \frac{|D_t^\lambda|}{|D|} \text{Ent}(D_t^\lambda), \quad (4.8)$$

根结点的信息熵仍为:  $\text{Ent}(D) = 0.998$

$$\text{Ent}(D_t^-) = -\left(\frac{0}{4} \log_2 \frac{0}{4} + \frac{4}{4} \log_2 \frac{4}{4}\right) = 0$$

$$\text{Ent}(D_t^+) = -\left(\frac{8}{13} \log_2 \frac{8}{13} + \frac{5}{13} \log_2 \frac{5}{13}\right) = 0.961$$

$$\text{Gain}(D, \text{密度}, 0.381)$$

$$= \text{Ent}(D) - \left[\frac{4}{17} \times \text{Ent}(D_t^-) + \frac{13}{17} \times \text{Ent}(D_t^+)\right]$$

$$= 0.263$$



$\text{Gain}(D, \text{色泽}) = 0.109$ ;  $\text{Gain}(D, \text{根蒂}) = 0.143$ ;

$\text{Gain}(D, \text{敲声}) = 0.141$ ;  $\text{Gain}(D, \text{纹理}) = 0.381$ ; 选择“纹理”作为根结点划分属性

$\text{Gain}(D, \text{脐部}) = 0.289$ ;  $\text{Gain}(D, \text{触感}) = 0.006$ ;

$\text{Gain}(D, \text{密度}) = 0.262$ ;  $\text{Gain}(D, \text{含糖率}) = 0.349$ .

与离散属性不同，若当前结点划分属性为连续属性，该连续属性还可被再次选作后代结点的最优划分属性。

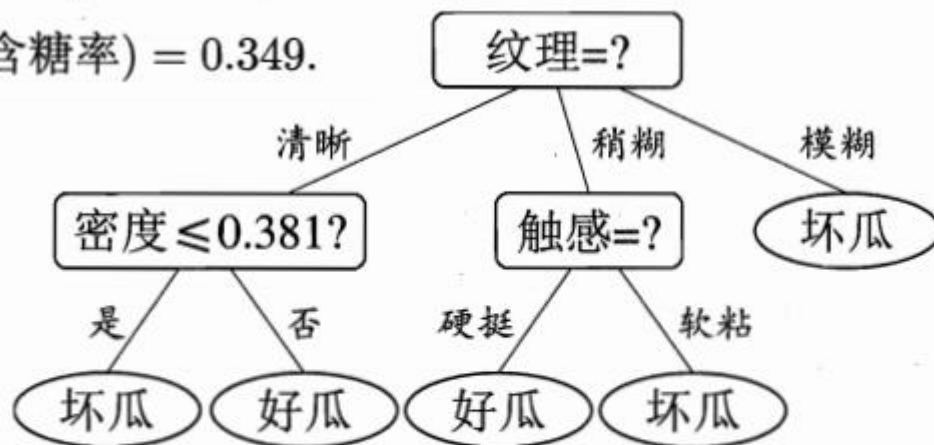


图 4.8 在西瓜数据集 3.0 上基于信息增益生成的决策树

表 4.4 西瓜数据集 2.0 $\alpha$ 

编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	好瓜
1	-	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
2	乌黑	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	-	是
3	乌黑	蜷缩	-	清晰	凹陷	硬滑	是
4	青绿	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
5	-	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
6	青绿	稍蜷	浊响	清晰	-	软粘	是
7	乌黑	稍蜷	浊响	稍糊	稍凹	软粘	是
8	乌黑	稍蜷	浊响	-	稍凹	硬滑	是
9	乌黑	-	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否
10	青绿	硬挺	清脆	-	平坦	软粘	否
11	浅白	硬挺	清脆	模糊	平坦	-	否
12	浅白	蜷缩	-	模糊	平坦	软粘	否
13	-	稍蜷	浊响	稍糊	凹陷	硬滑	否
14	浅白	稍蜷	沉闷	稍糊	凹陷	硬滑	否
15	乌黑	稍蜷	浊响	清晰	-	软粘	否
16	浅白	蜷缩	浊响	模糊	平坦	硬滑	否
17	青绿	-	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否

现实任务中，尤其在属性数目较多时，存在大量样本出现缺失值。  
出于成本和隐私的考虑





每个属性 ~ 坐标空间中的一个坐标轴  
 d个属性描述的样本 ~ d维空间中的一个数据点  
 对样本分类 ~ 在坐标空间中寻找不同类样本之间的分类边界

决策树形成的分类边界的明显特点：轴平行，分类边界由若干个与坐标轴平行的分段组成。

优点：学习结果解释性强，每个划分都对应一个属性取值

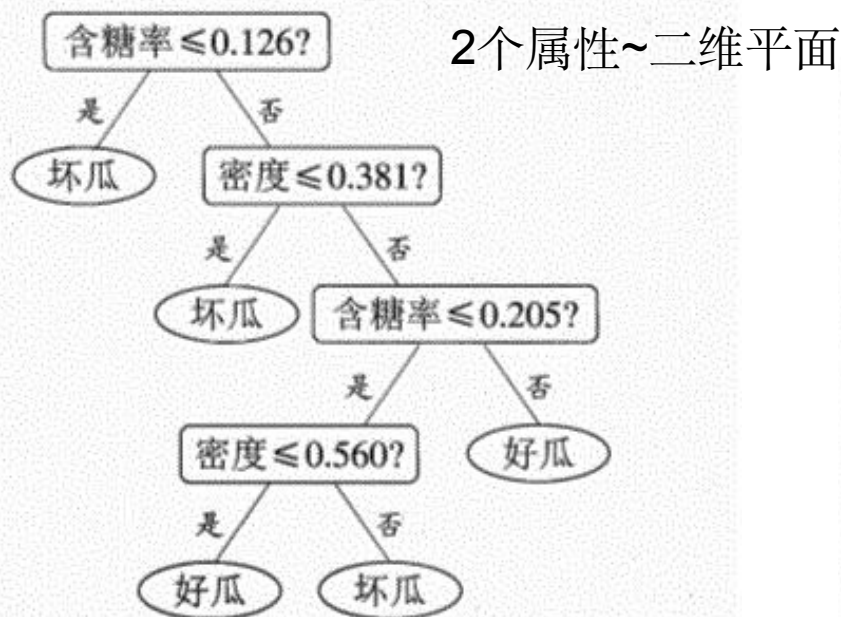


图 4.10 在西瓜数据集 3.0α 上生成的决策树

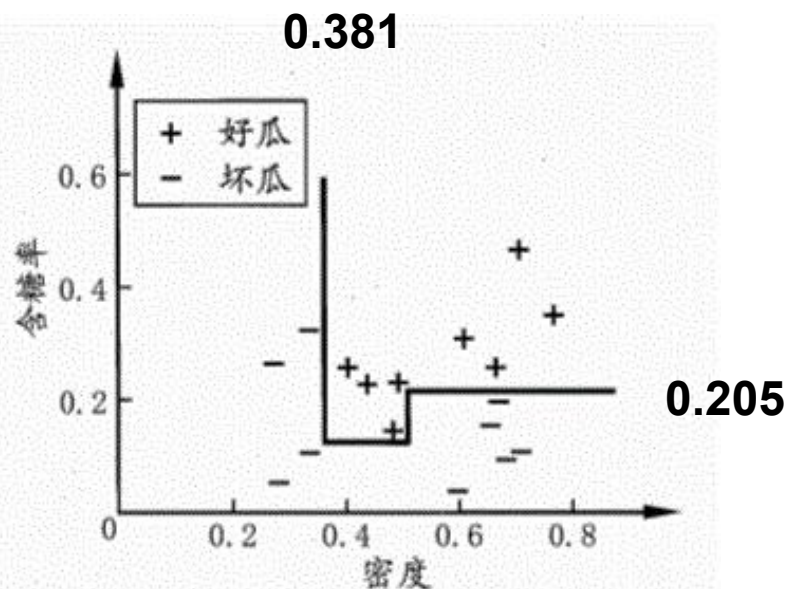


图 4.11 图 4.10 决策树对应的分类边界



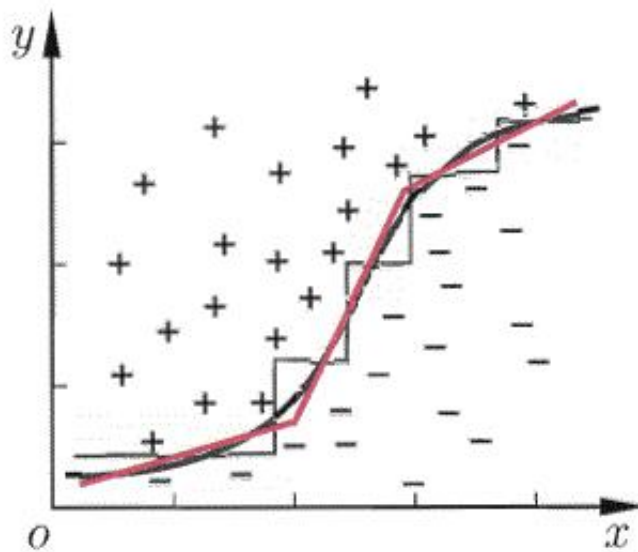


图 4.12 决策树对复杂分类边界的分段近似

不足:

如图 4.12 所示; 此时的决策树会相当复杂, 由于要进行大量的属性测试, 预测时间开销会很大.

若能使用斜的划分边界, 如图 4.12 中红色线段所示, 则决策树模型将大为简化. “多变量决策树” (multivariate decision tree) 就是能实现这样的“斜划分”甚至更复杂划分的决策树. 以实现斜划分的多变量决策树为例, 在此类决

	单变量决策树	多变量决策树
非叶结点的属性测试	一个属性 (最优划分属性)	属性的线性组合 (线性分类器) $\sum_{i=1}^d w_i a_i = t$
算法第8行	寻找最优划分属性	建立合适的线性分类器

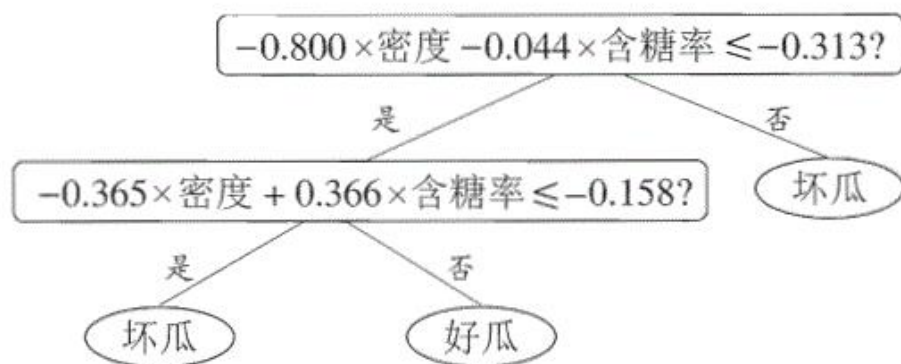


图 4.13 在西瓜数据集 3.0α 上生成的多变量决策树

$w_i, t$  可以从该结点所含的样本集D和属性集A上学得

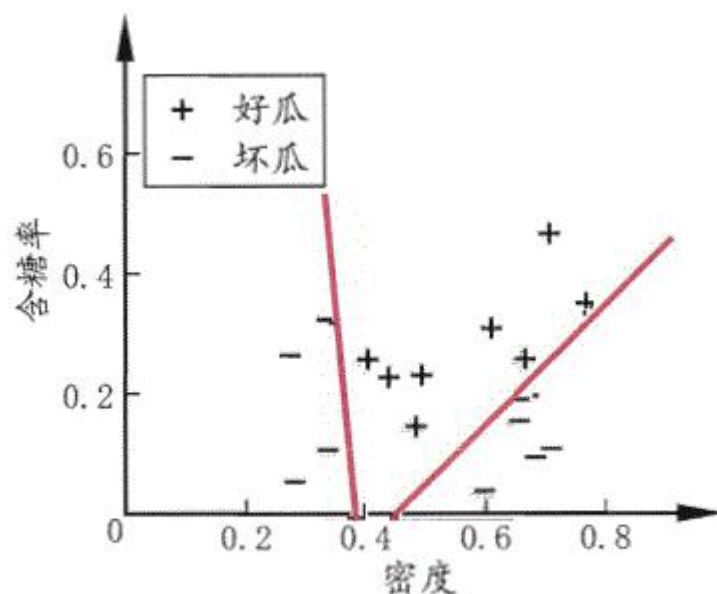


图 4.14 图 4.13 多变量决策树对应的分类边界

