

四、决策树

2017南京大学机器学习导论课程专用所有权保留

主讲教师：周志华

决策树模型

决策树基于“树”结构进行决策

- ❑ 每个“内部结点”对应于某个属性上的“测试”(test)
- ❑ 每个分支对应于该测试的一种可能结果（即该属性的某个取值）
- ❑ 每个“叶结点”对应于一个“预测结果”

学习过程：通过对训练样本的分析来确定“划分属性”（即内部结点所对应的属性）

预测过程：将测试示例从根结点开始，沿着划分属性所构成的“判定测试序列”下行，直到叶结点

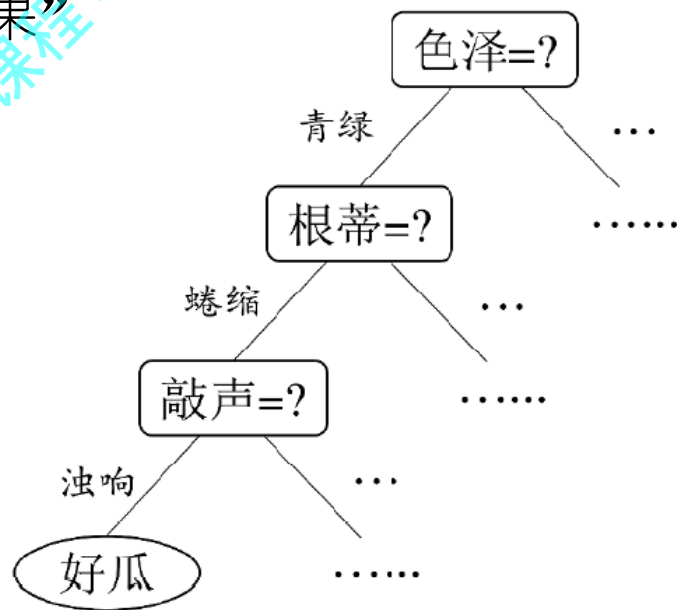


图 4.1 西瓜问题的一棵决策树

决策树简史

- 第一个决策树算法：CLS (Concept Learning System)
[E. B. Hunt, J. Marin, and P. T. Stone's book "*Experiments in Induction*" published by Academic Press in 1966]
- 使决策树受到关注、成为机器学习主流技术的算法：ID3
[J. R. Quinlan's paper in a book "*Expert Systems in the Micro Electronic Age*" edited by D. Michie, published by Edinburgh University Press in 1979]
- 最常用的决策树算法：C4.5
[J. R. Quinlan's book "*C4.5: Programs for Machine Learning*" published by Morgan Kaufmann in 1993]



J. Ross Quinlan
(1943 -)

决策树简史(con't)

- 可以用于回归任务的决策树算法：CART (Classification and Regression Tree)

[L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone's book "Classification and Regression Trees" published by Wadsworth in 1984]

- 基于决策树的最强大算法：RF (Random Forest)

[L. Breiman's MLJ'01 paper "Random Forest"]

这是一种“集成学习”方法 → 第8章



Leo Breiman
(1928-2005)

基本流程

策略：“分而治之” (divide-and-conquer)

自根至叶的递归过程

在每个中间结点寻找一个“划分” (split or test) 属性

三种停止条件：

- (1) 当前结点包含的样本全属于同一类别，无需划分；
- (2) 当前属性集为空，或是所有样本在所有属性上取值相同，无法划分；
- (3) 当前结点包含的样本集合为空，不能划分。

基本算法

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

递归返回,
情形(1)

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

递归返回,
情形(2)

8: 从 A 中选择最优划分属性 a_* ;

利用当前结点的后验分布

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

递归返回,
情形(3)

将父结点的样本分布作为
当前结点的先验分布

决策树算法的
核心

输出: 以 node 为根结点的一棵决策树

信息增益 (information gain)

信息熵 (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 , 则 D 的信息熵定义为

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

计算信息熵时约定: 若 $p = 0$, 则 $p \log_2 p = 0$.

$\text{Ent}(D)$ 的最小值为 0, 最大值为 $\log_2 |\mathcal{Y}|$.

$\text{Ent}(D)$ 的值越小, 则 D 的纯度越高

信息增益直接以信息熵为基础, 计算当前划分对信息熵所造成的变化

信息增益

离散属性 a 的取值: $\{a^1, a^2, \dots, a^V\}$

D^v : D 中在 a 上取值 $= a^v$ 的样本集合

以属性 a 对数据集 D 进行划分所获得的信息增益为:

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

划分前的信息熵

划分后的信息熵

第 v 个分支的权重,
样本越多越重要

一个例子

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

该数据集包含17个
训练样例, $|\mathcal{Y}| = 2$,
其中正例占 $p_1 = \frac{8}{17}$
反例占 $p_2 = \frac{9}{17}$

根结点的信息熵为

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

一个例子 (续)

■ 以属性“色泽”为例，其对应的3个数据子集分别为 D^1 (色泽=青绿), D^2 (色泽=乌黑), D^3 (色泽=浅白)

■ 子集 D^1 包含编号为{1, 4, 6, 10, 13, 17}的6个样例，其中正例占 $p_1 = \frac{3}{6}$ ，反例占 $p_2 = \frac{3}{6}$ ， D^2 、 D^3 同理，3个结点的信息熵为：

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

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

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

■ 属性“色泽”的信息增益为

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

一个例子 (续)

□ 类似的，其他属性的信息增益为

$$\text{Gain}(D, \text{根蒂}) = 0.143$$

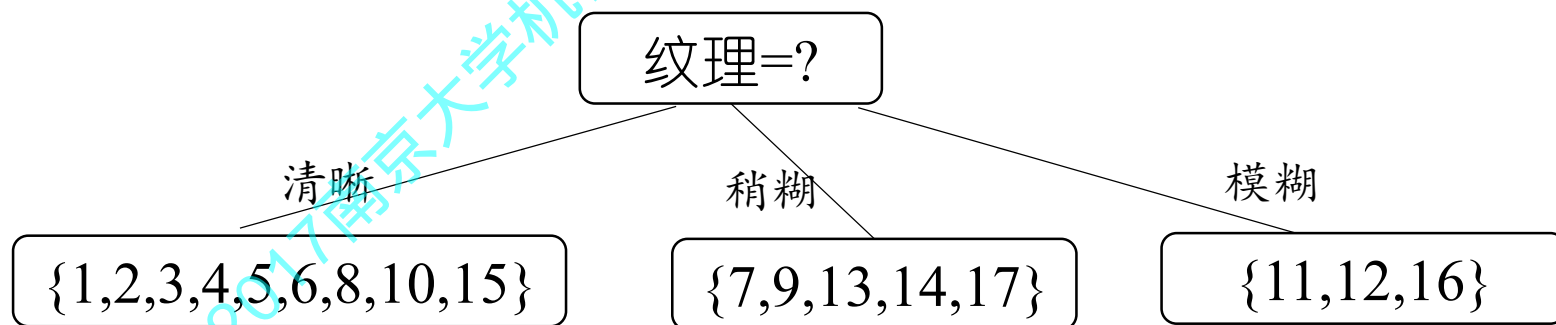
$$\text{Gain}(D, \text{敲声}) = 0.141$$

$$\text{Gain}(D, \text{纹理}) = 0.381$$

$$\text{Gain}(D, \text{脐部}) = 0.289$$

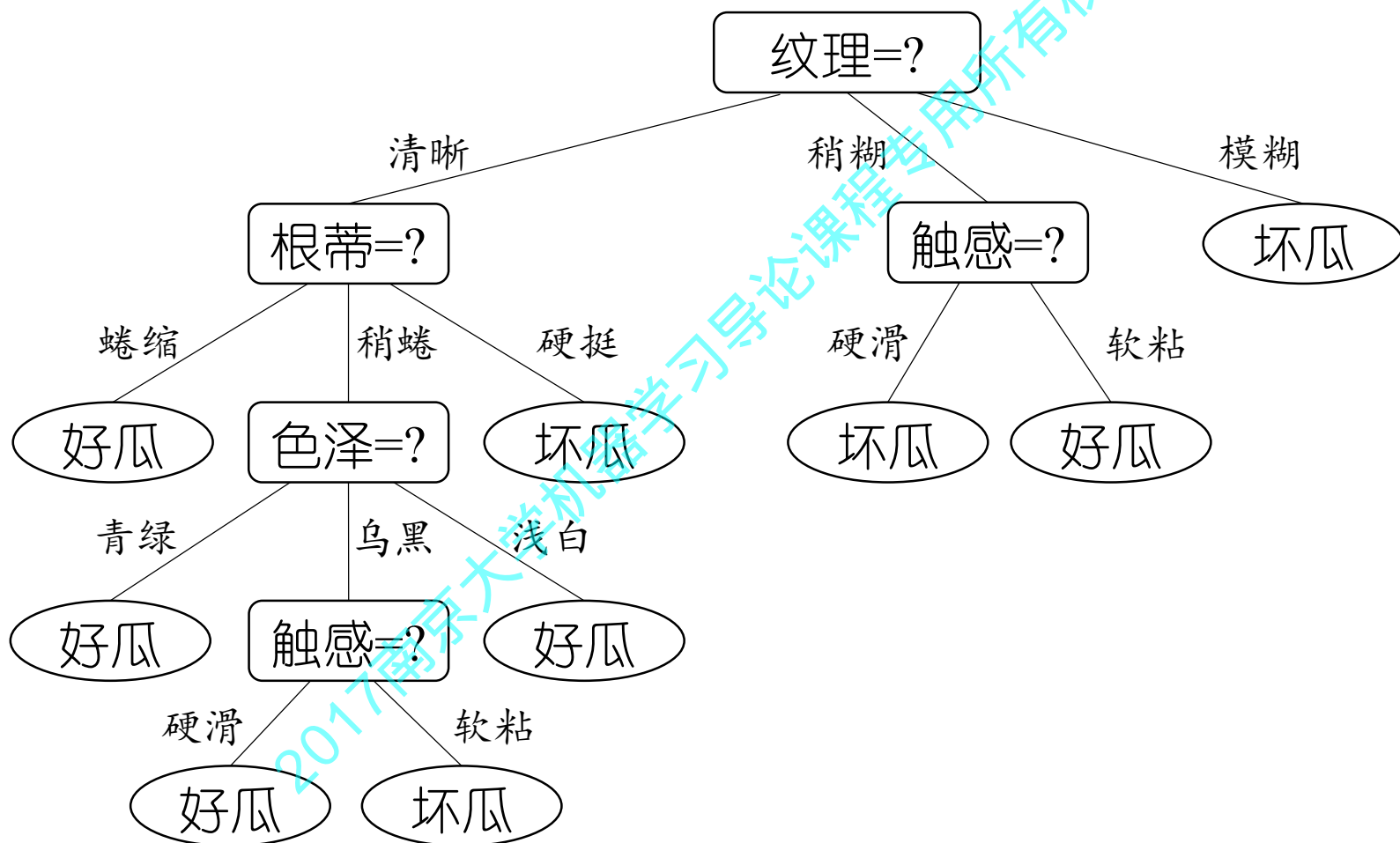
$$\text{Gain}(D, \text{触感}) = 0.006$$

□ 显然，属性“纹理”的信息增益最大，被选为划分属性



一个例子 (续)

对每个分支结点做进一步划分，最终得到决策树



增益率 (gain ratio)

信息增益：对可取值数目较多的属性有所偏好

有明显弱点，例如：考虑将“编号”作为一个属性

增益率：
$$\text{Gain_ratio}(D, a) = \frac{\text{Gain}(D, a)}{\text{IV}(a)}$$

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

属性 a 的可能取值数目越多 (即 V 越大), 则 $\text{IV}(a)$ 的值通常就越大

启发式：先从候选划分属性中找出信息增益高于平均水平的，再从中选取增益率最高的

基尼指数 (gini index)

$$\text{Gini}(D) = \sum_{k=1}^{|\mathcal{Y}|} \sum_{k' \neq k} p_k p_{k'}$$

反映了从 D 中随机抽取两个样例，其类别标记不一致的概率

$$= 1 - \sum_{k=1}^{|\mathcal{Y}|} p_k^2$$

$\text{Gini}(D)$ 越小，数据集 D 的纯度越高

属性 a 的基尼指数:
$$\text{Gini_index}(D, a) = \sum_{v=1}^V \frac{|D^v|}{|D|} \text{Gini}(D^v)$$

在候选属性集合中，选取那个使划分后基尼指数最小的属性

划分选择 vs. 剪枝

研究表明：划分选择的各种准则虽然对决策树的尺寸有较大影响，但对泛化性能的影响很有限

例如信息增益与基尼指数产生的结果，仅在约 2% 的情况下不同

剪枝方法和程度对决策树泛化性能的影响更为显著

在数据带噪时甚至可能将泛化性能提升 25%

Why?

剪枝 (pruning) 是决策树对付“过拟合”的主要手段！

剪枝

为了尽可能正确分类训练样本，有可能造成分支过多 → 过拟合
可通过主动去掉一些分支来降低过拟合的风险

基本策略：

- 预剪枝 (pre-pruning): 提前终止某些分支的生长
- 后剪枝 (post-pruning): 生成一棵完全树，再“回头”剪枝

剪枝过程中需评估剪枝前后决策树的优劣 → 第 2 章

现在我们假定使用“留出法”

数据集

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)

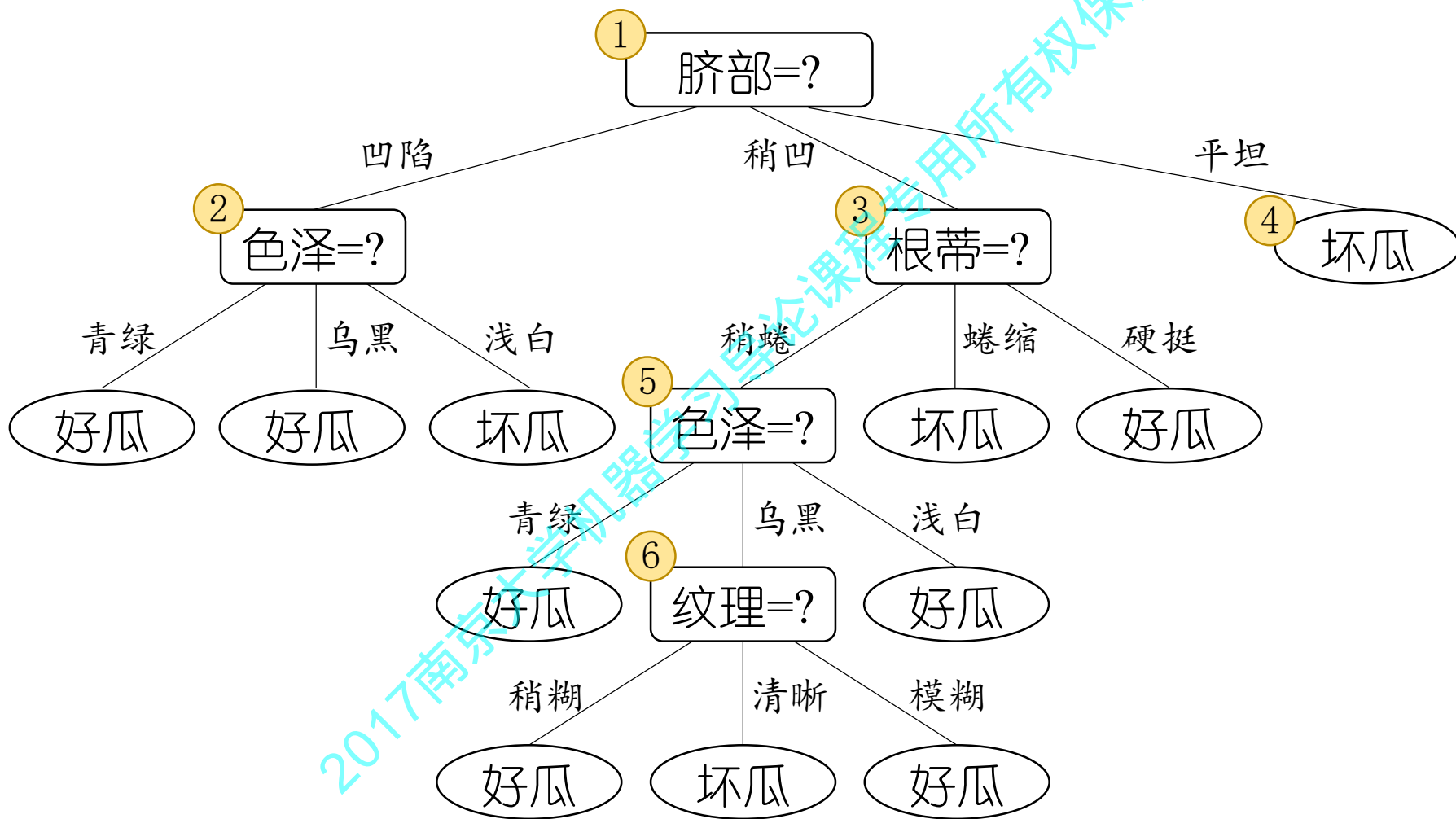
训练集

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

验证集

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

未剪枝决策树



预剪枝

验证集

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

结点1：若不划分，则将其标记为叶结点，类别标记为训练样例中最多的类别，若选“好瓜”。验证集中，{4, 5, 8} 被分类正确，得到验证集精度为 $\frac{3}{7} \times 100\% = 42.9\%$

1
脐部=?

验证集精度

“脐部=?” 划分前：42.9%

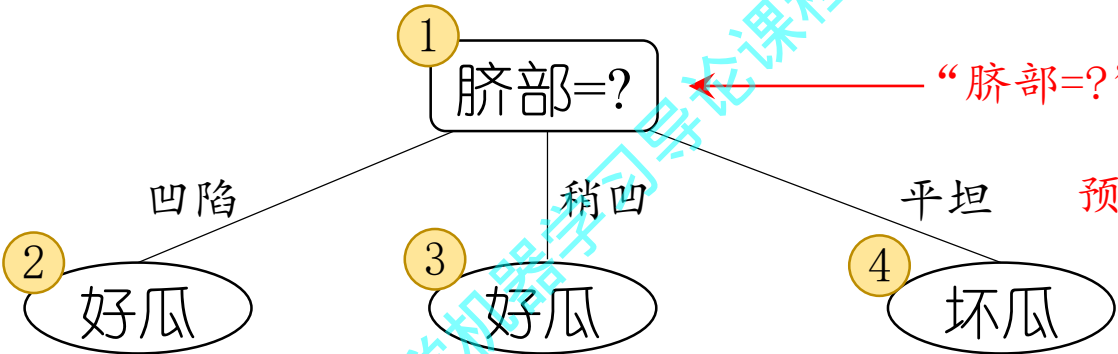
预剪枝 (续)

验证集

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

结点1：若划分，根据结点②，③，④的训练样例，将这3个结点分别标记为“好瓜”、“好瓜”、“坏瓜”。此时，验证集中编号为{4, 5, 8, 11, 12}的样例被划分正确，验证集精度为 $\frac{5}{7} \times 100\% = 71.4\%$

验证集精度



“脐部=?” 划分前：42.9%
划分后：71.4%
预剪枝决策：划分

2017南京大学计算机学院课程

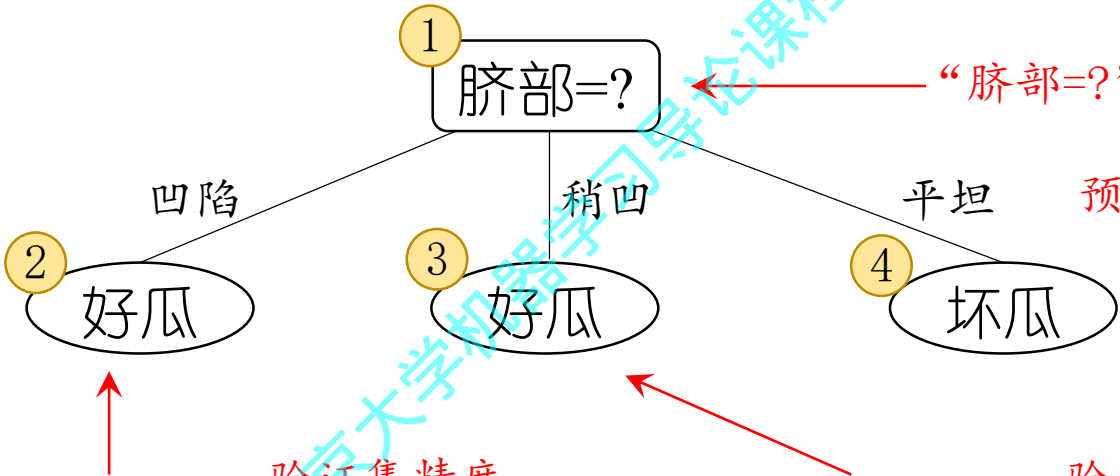
预剪枝 (续)

验证集

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

对结点②, ③, ④ 分别进行剪枝判断, 结点②, ③都禁止划分, 结点④ 本身为叶子结点。最终得到仅有一层划分的决策树, 称为“决策树桩” (decision stump)

验证集精度



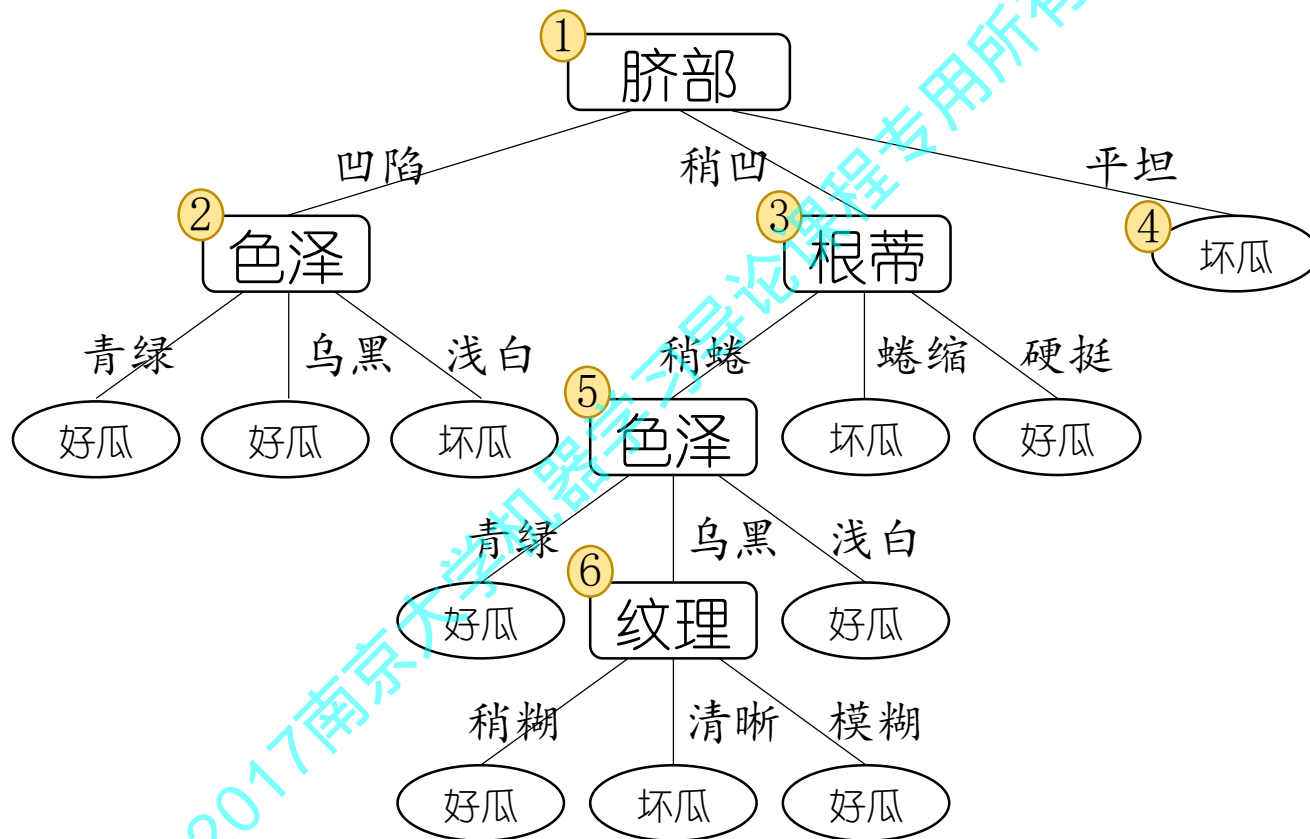
“脐部=?” 划分前: 42.9%
划分后: 71.4%
预剪枝决策: 划分

验证集精度
“色泽=?” 划分前: 71.4%
划分后: 57.1%
预剪枝决策: 禁止划分

验证集精度
“根蒂=?” 划分前: 71.4%
划分后: 71.4%
预剪枝决策: 禁止划分

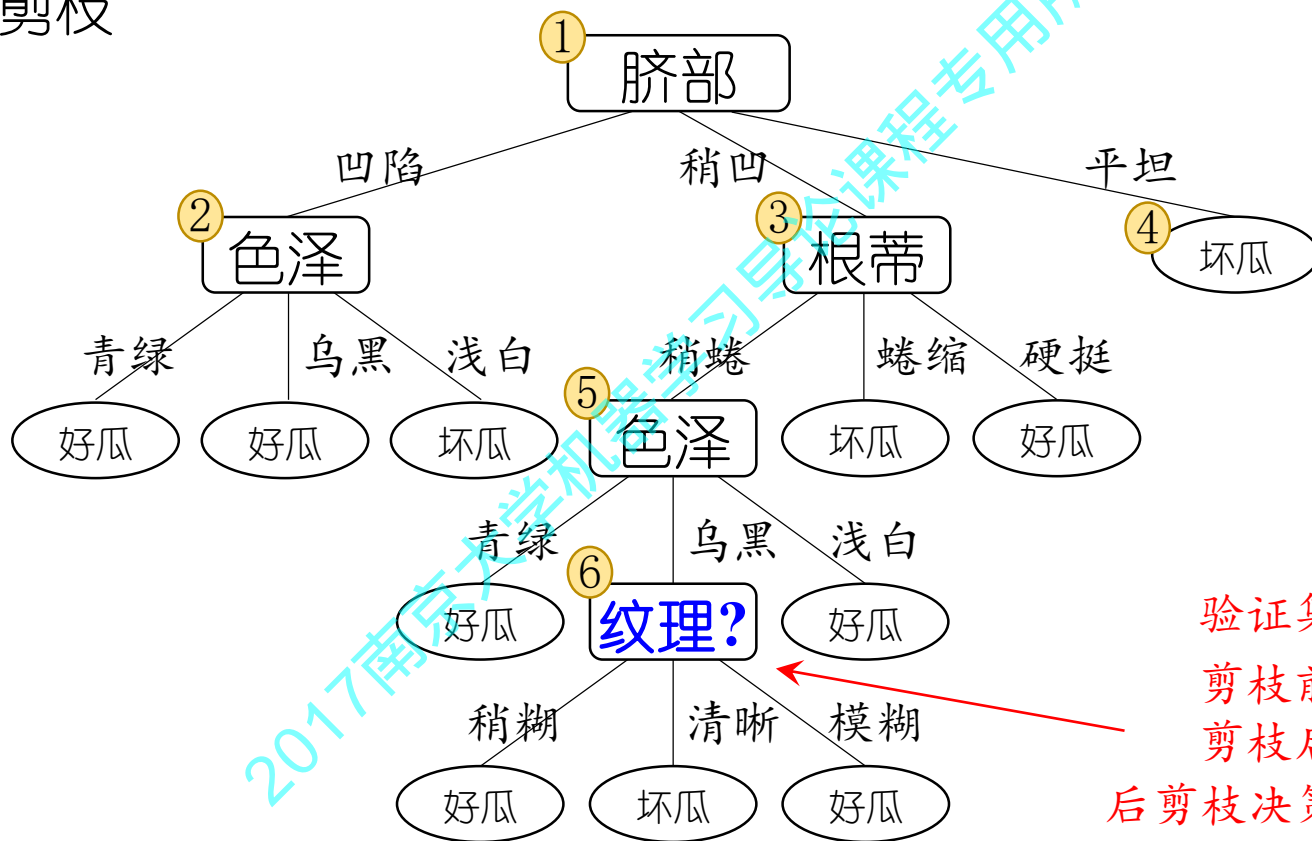
后剪枝

先生成一棵完整的决策树，其验证集精度测得为 42.9%



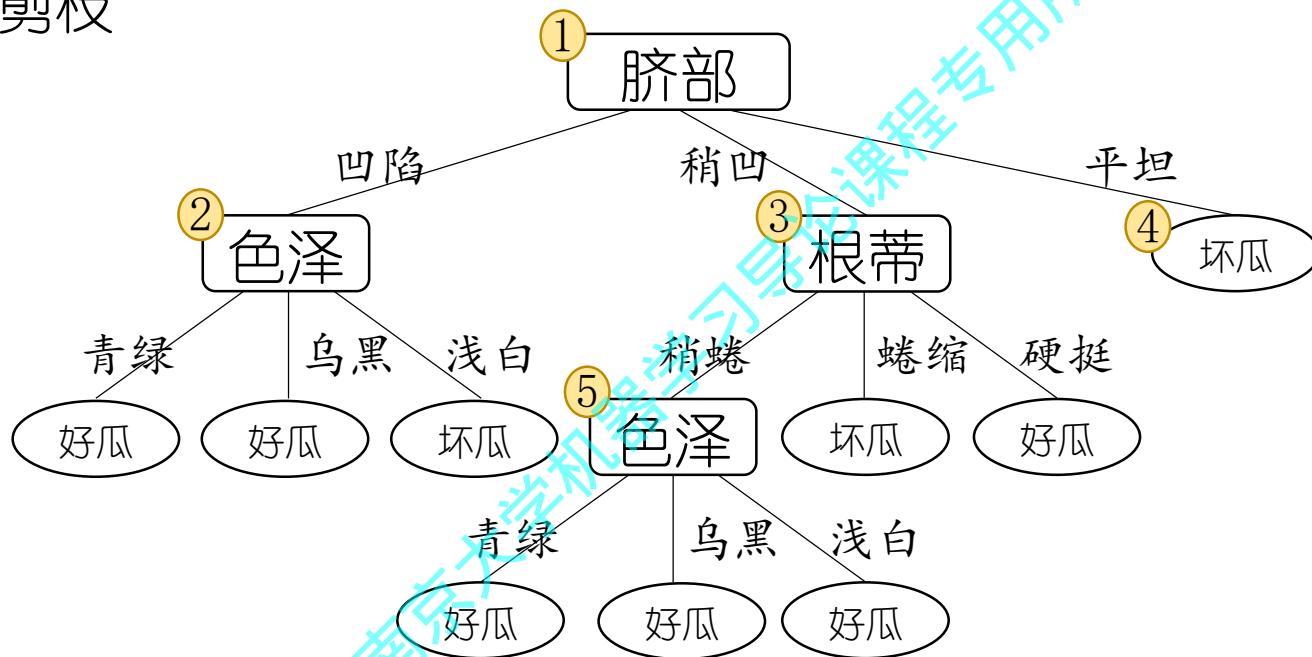
后剪枝 (续)

首先考虑结点⑥，若将其替换为叶结点，根据落在其上的训练样例 {7, 15} 将其标记为“好瓜”，测得验证集精度提高至 57.1%，于是决定剪枝



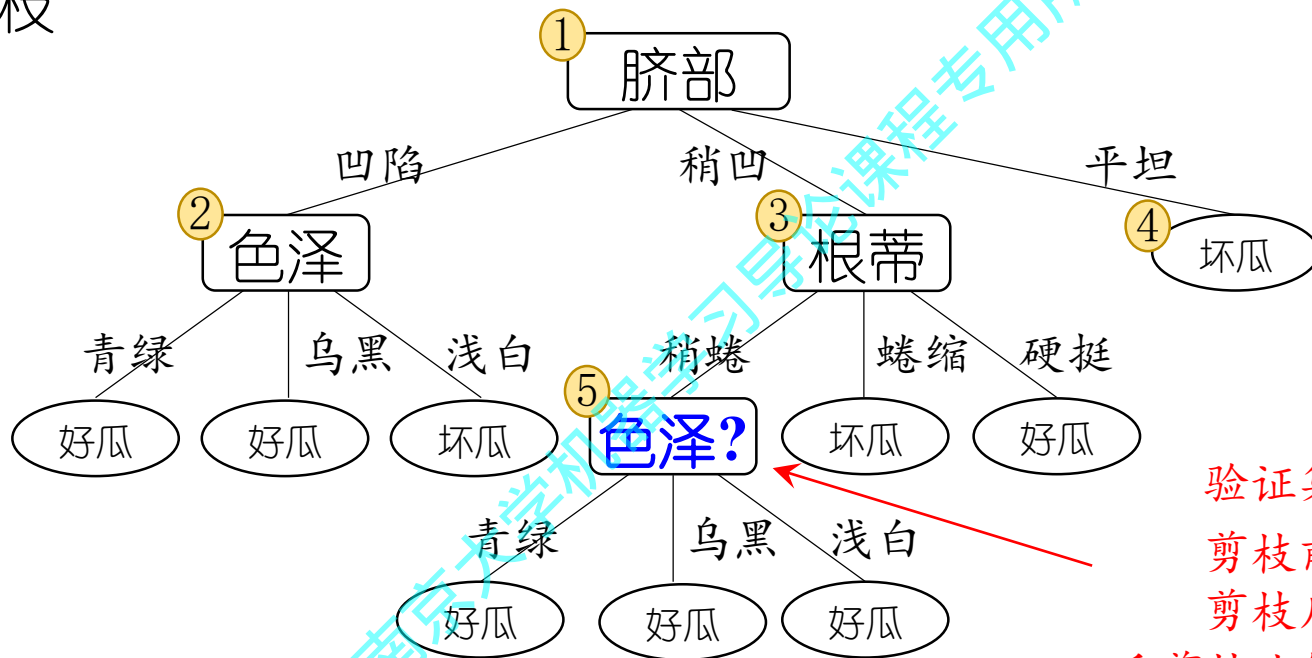
后剪枝 (续)

首先考虑结点⑥，若将其替换为叶结点，根据落在其上的训练样例 {7, 15} 将其标记为“好瓜”，测得验证集精度提高至 57.1%，于是决定剪枝



后剪枝 (续)

然后考虑结点⑤，若将其替换为叶结点，根据落在其上的训练样例 {6, 7, 15} 将其标记为“好瓜”，测得验证集精度仍为 57.1%，可以不剪枝



验证集精度

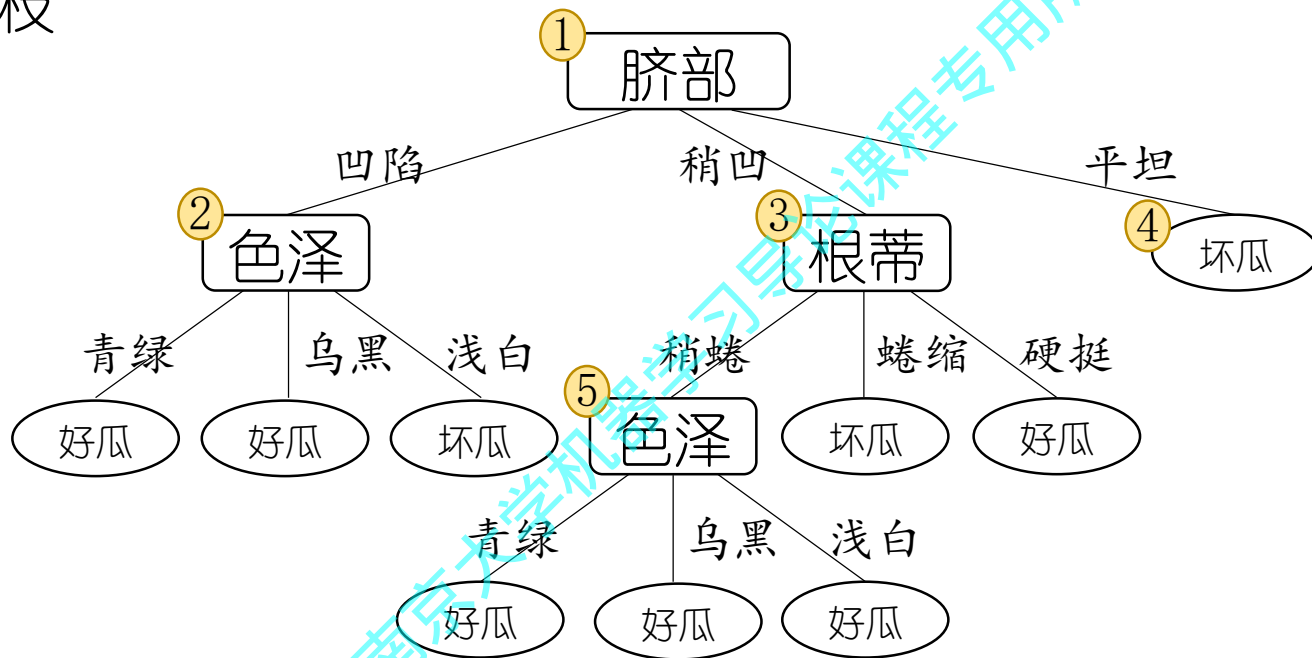
剪枝前: 57.1%

剪枝后: 57.1%

后剪枝决策: 不剪枝

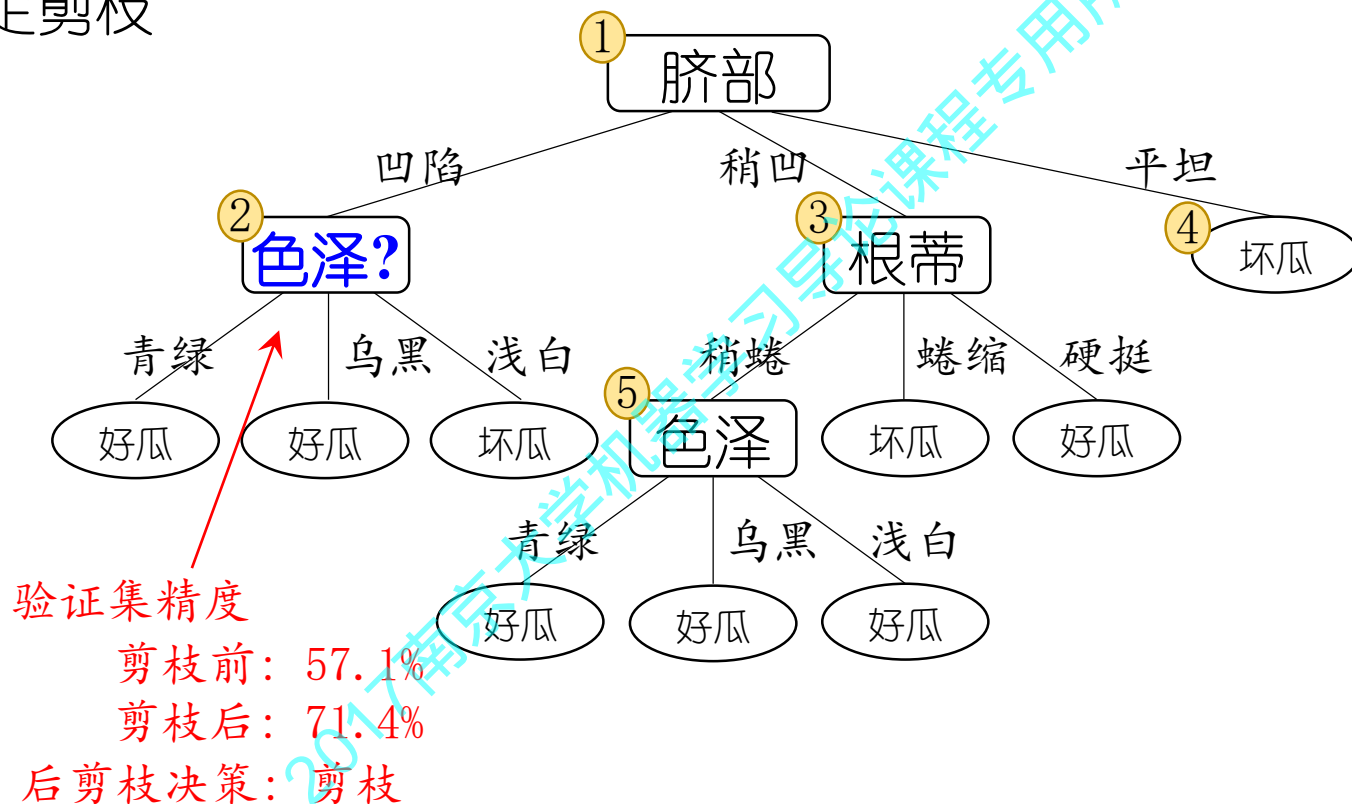
后剪枝 (续)

然后考虑结点⑤，若将其替换为叶结点，根据落在其上的训练样例 {6, 7, 15} 将其标记为“好瓜”，测得验证集精度仍为 57.1%，可以不剪枝



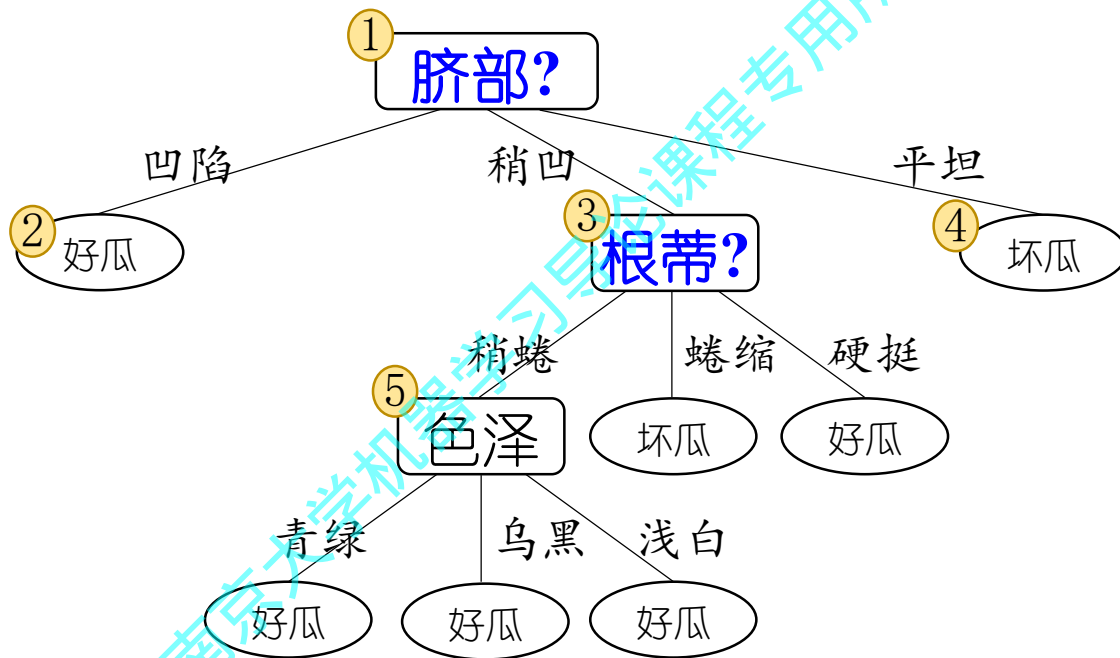
后剪枝 (续)

对结点②，若将其替换为叶结点，根据落在其上的训练样例 {1, 2, 3, 14}，将其标记为“好瓜”，测得验证集精度提升至 71.4%，决定剪枝



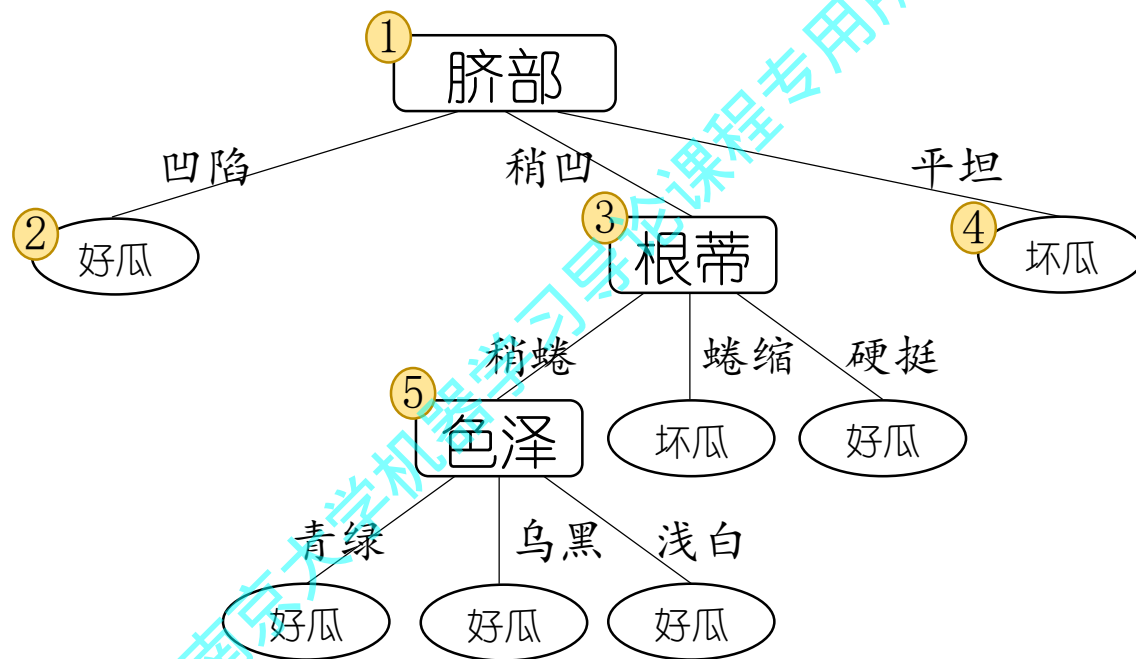
后剪枝 (续)

对结点③和①，先后替换为叶结点，均未测得验证集精度提升，
于是不剪枝



后剪枝 (续)

最终，后剪枝得到的决策树：



预剪枝 vs. 后剪枝

□ 时间开销：

- 预剪枝：测试时间开销降低，训练时间开销降低
- 后剪枝：测试时间开销降低，训练时间开销增加

□ 过/欠拟合风险：

- 预剪枝：过拟合风险降低，欠拟合风险增加
- 后剪枝：过拟合风险降低，欠拟合风险基本不变

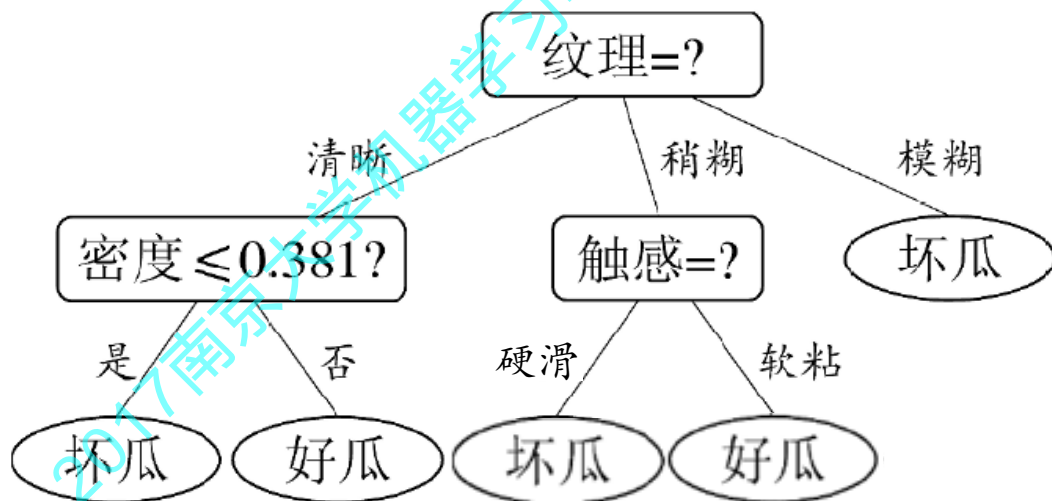
□ 泛化性能：后剪枝 通常优于 预剪枝

连续值

基本思路：连续属性离散化

常见做法：二分法 (bi-partition)

- n 个属性值可形成 $n-1$ 个候选划分
- 然后即可将它们当做 $n-1$ 个离散属性值处理



缺失值

现实应用中，经常会遇到属性值“缺失”(missing)现象

仅使用无缺失的样例？ → 对数据的极大浪费

使用带缺失值的样例，需解决：

Q1：如何进行划分属性选择？

Q2：给定划分属性，若样本在该属性上的值缺失，如何进行划分？

基本思路：样本赋权，权重划分

一个例子

仅通过无缺失值的
样例来判断划
分属性的优劣

学习开始时，根结点包
含样例集 D 中全部17个
样例，权重均为 1

表 4.4 西瓜数据集 2.0a

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

以属性“色泽”为例，该属性上无缺失值的样例子集 \tilde{D} 包含 14 个样例，
信息熵为

$$\text{Ent}(\tilde{D}) = - \sum_{k=1}^2 \tilde{p}_k \log_2 \tilde{p}_k = - \left(\frac{6}{14} \log_2 \frac{6}{14} + \frac{8}{14} \log_2 \frac{8}{14} \right) = 0.985$$

一个例子

令 $\tilde{D}^1, \tilde{D}^2, \tilde{D}^3$ 分别表示在属性“色泽”上取值为“青绿”“乌黑”以及“浅白”的样本子集，有

$$\text{Ent}(\tilde{D}^1) = -\left(\frac{2}{4} \log_2 \frac{2}{4} + \frac{2}{4} \log_2 \frac{2}{4}\right) = 1.000 \quad \text{Ent}(\tilde{D}^2) = -\left(\frac{4}{6} \log_2 \frac{4}{6} + \frac{2}{6} \log_2 \frac{2}{6}\right) = 0.918$$

$$\text{Ent}(\tilde{D}^3) = -\left(\frac{0}{4} \log_2 \frac{0}{4} + \frac{4}{4} \log_2 \frac{4}{4}\right) = 0.000$$

因此，样本子集 \tilde{D} 上属性“色泽”的信息增益为

$$\begin{aligned} \text{Gain}(\tilde{D}, \text{色泽}) &= \text{Ent}(\tilde{D}) - \sum_{v=1}^3 \tilde{r}_v \text{Ent}(\tilde{D}^v) \\ &= 0.985 - \left(\frac{4}{14} \times 1.000 + \frac{6}{14} \times 0.918 + \frac{4}{14} \times 0.000\right) \\ &= 0.306 \end{aligned}$$

无缺失值样例中属性 a 取值为 v 的占比

于是，样本集 D 上属性“色泽”的信息增益为

$$\text{Gain}(D, \text{色泽}) = \rho \times \text{Gain}(\tilde{D}, \text{色泽}) = \frac{14}{17} \times 0.306 = 0.252$$

无缺失值样例占比

一个例子

类似地可计算出所有属性在数据集上的信息增益

$\text{Gain}(D, \text{色泽}) = 0.252$ $\text{Gain}(D, \text{根蒂}) = 0.171$

$\text{Gain}(D, \text{敲声}) = 0.145$ $\text{Gain}(D, \text{纹理}) = 0.424$

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

进入“纹理=清晰”分支

进入“纹理=稍糊”分支

进入“纹理=模糊”分支

样本权重在各子结点仍为1

在“纹理”上出现缺失值，
样本 8, 10 同时进入三个
分支，三支上的权重分
别为 7/15, 5/15, 3/15

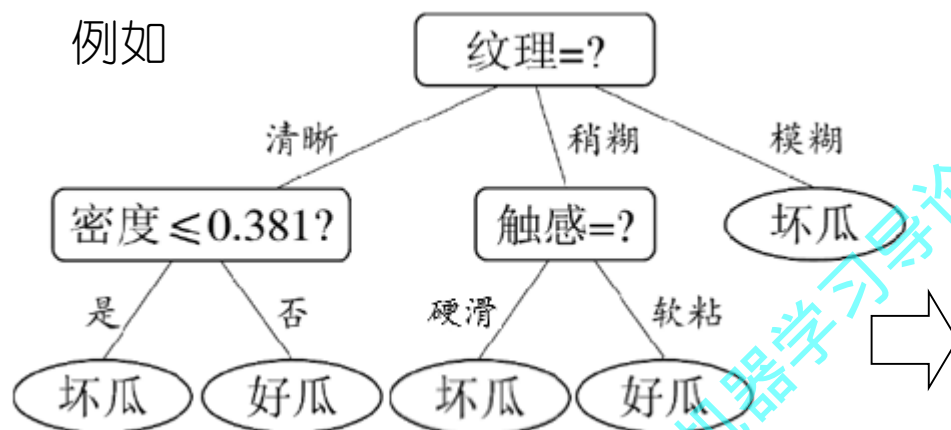
编号	色泽	根蒂	敲声	纹理	脐部	触感	好瓜
1	—	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
2	乌黑	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	—	是
3	乌黑	蜷缩	—	清晰	凹陷	硬滑	是
4	青绿	蜷缩	沉闷	清晰	凹陷	硬滑	是
5	—	蜷缩	浊响	清晰	凹陷	硬滑	是
6	青绿	稍蜷	浊响	清晰	—	软粘	是
7	乌黑	稍蜷	浊响	稍糊	稍凹	软粘	是
8	乌黑	稍蜷	浊响	—	稍凹	硬滑	是
9	乌黑	—	沉闷	稍糊	稍凹	硬滑	否
10	青绿	硬挺	清脆	—	平坦	软粘	否
11	浅白	硬挺	清脆	模糊	平坦	—	否
12	浅白	蜷缩	—	模糊	平坦	软粘	否
13	—	稍蜷	浊响	稍糊	凹陷	硬滑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

权重划分

从“树”到“规则”

- 一棵决策树对应于一个“规则集”
- 每个从根结点到叶结点的分支路径对应于一条规则

例如



- IF (纹理=清晰) \wedge (密度 ≤ 0.381) THEN 坏瓜
- IF (纹理=清晰) \wedge (密度 > 0.381) THEN 好瓜
- IF (纹理=稍糊) \wedge (触感=硬滑) THEN 坏瓜
- IF (纹理=稍糊) \wedge (触感=软粘) THEN 好瓜
- IF (纹理=模糊) THEN 坏瓜

好处:

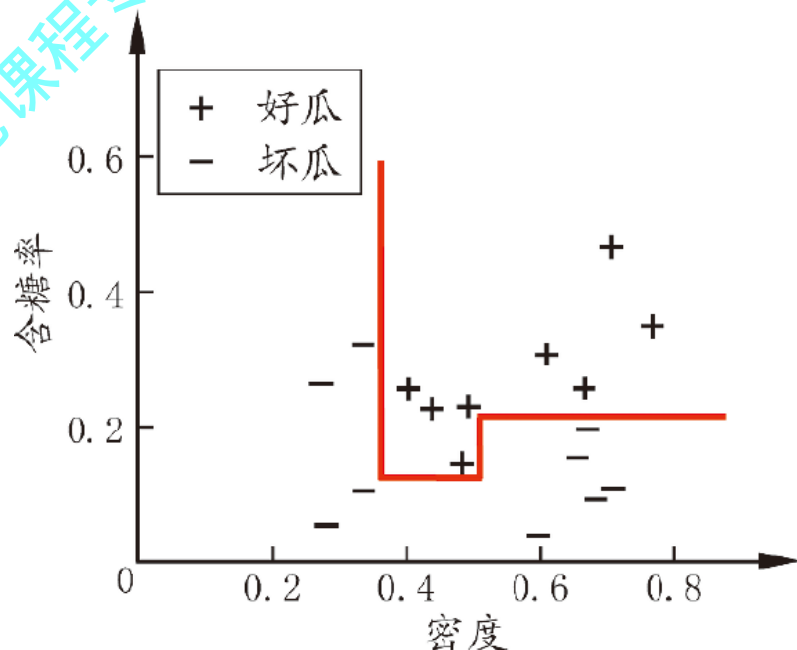
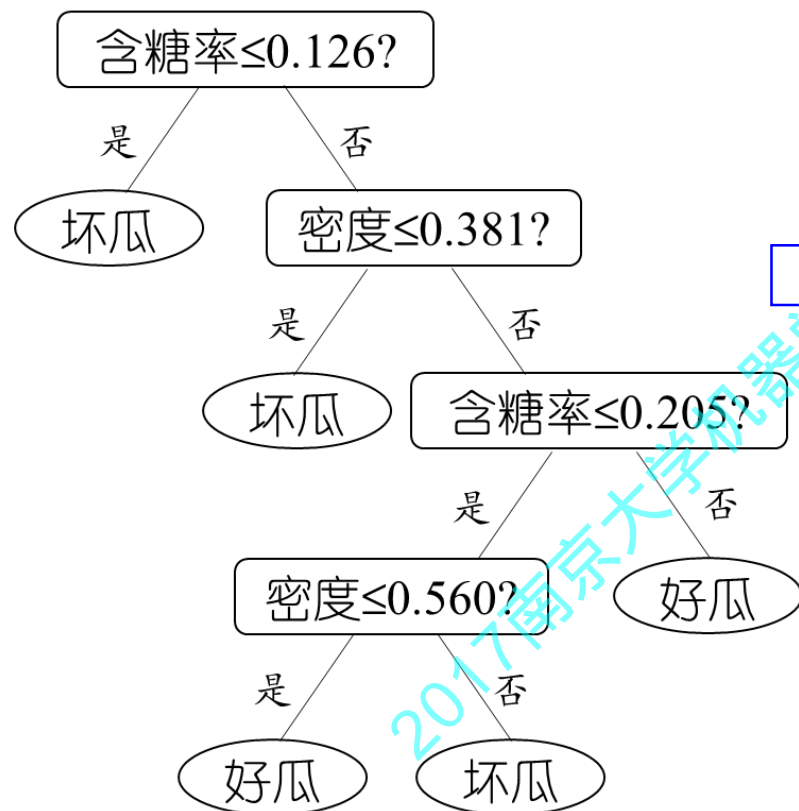
- 改善可理解性
- 进一步提升泛化能力

由于转化过程中通常会进行前件合并、泛化等操作
例如 **C4.5Rule** 的泛化能力通常优于 **C4.5**决策树

轴平行划分

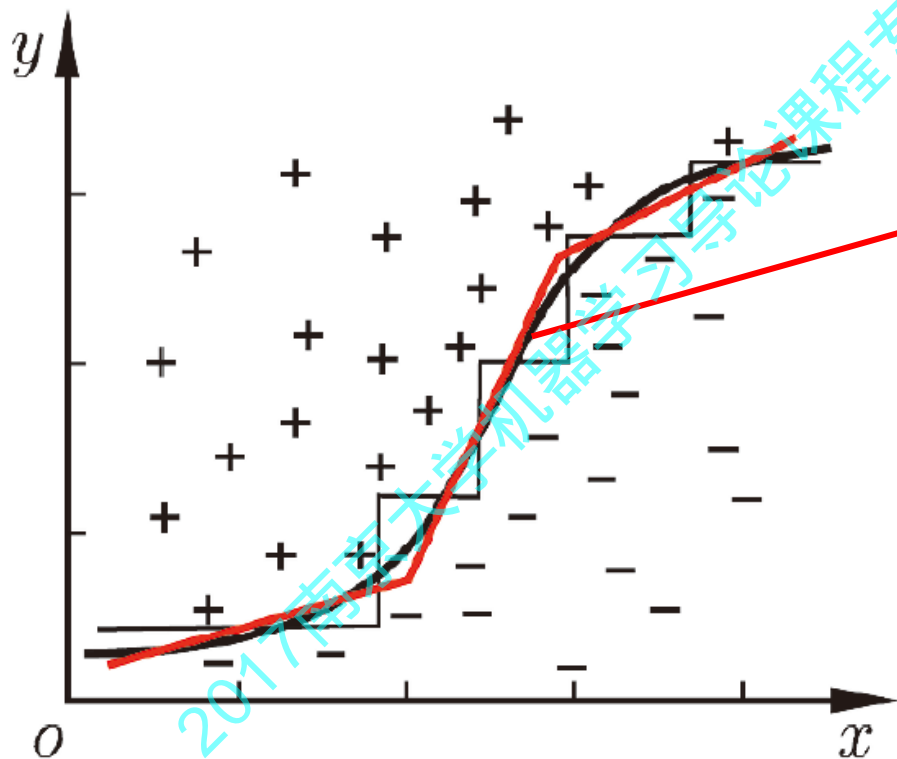
单变量决策树：在每个非叶结点仅考虑一个划分属性

产生“轴平行”分类面



轴平行 vs. 倾斜

当学习任务所对应的分类边界很复杂时，需要非常多段划分才能获得较好的近似

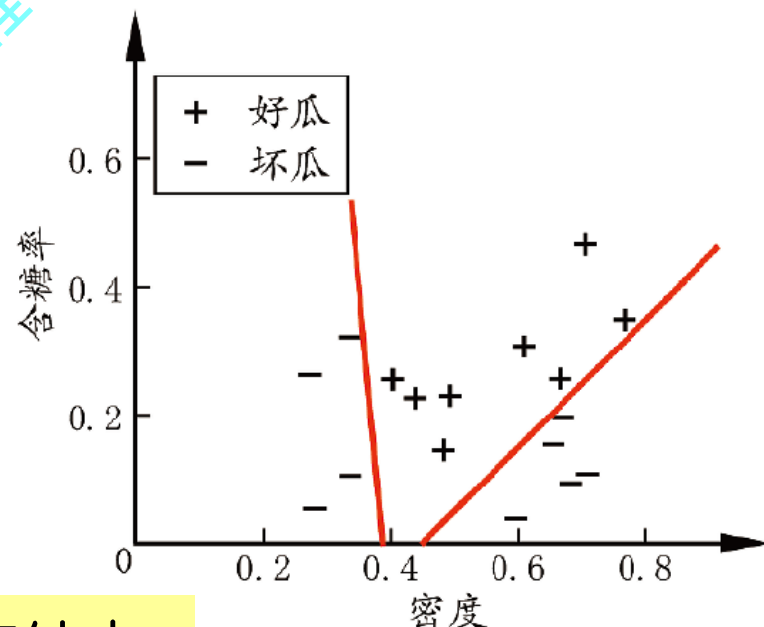
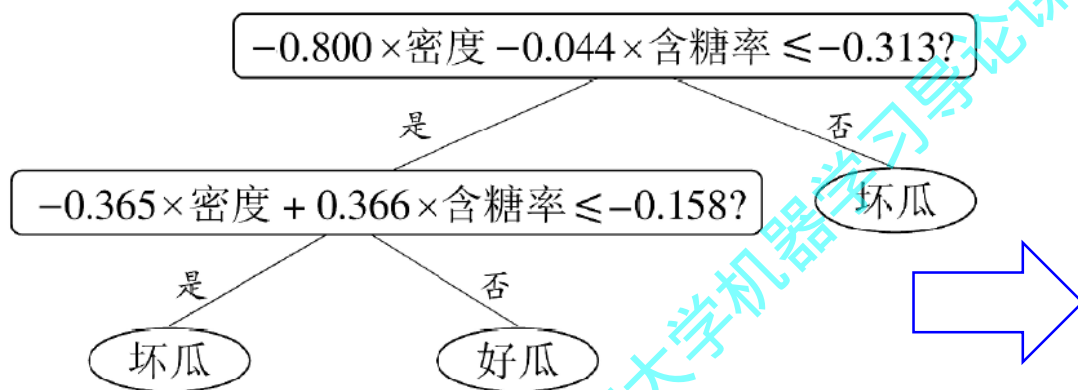


能否产生这样的分类边界？

多变量(multivariate)决策树

多变量决策树：每个非叶结点不仅考虑一个属性

例如“**斜决策树**” (oblique decision tree) 不是为每个非叶结点寻找最优划分属性，而是建立一个**线性分类器**



更复杂的“**混合决策树**”甚至可以在结点嵌入神经网络或其他非线性模型

决策树常用软件/工具包

□ ID3, C4.5, C5.0

<http://www.rulequest.com/Personal/>

□ J4.8

<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

□ CART

<https://www.salford-systems.com/products/cart>

□

2017南京大学机器学习导论课程专用版权所有

前往第五站.....

