

人工智能导论

主讲：王博

人工智能与自动化学院

符号主义 - 目录

- 3.5 专家系统简介
- 3.6 产生式知识表达
- 3.7 产生式推理
- 3.3 C-F不确定推理

专家系统背景

- 很多问题不能通过数学描述和计算求解



望闻问切

医生、工程师、非遗传承人



转炉炼钢

领域专家 → 经验



瓷器烧制

对问题的求解基于自己的
知识和推理

专家系统定义

- 费根鲍姆（第一个专家系统DENDRAL）：

“专家系统是一种智能的计算机程序，其内部含有大量某个领域专家水平的知识与经验，能够模拟人类专家的思维过程，求解该领域内需要专家才能解决的困难问题。”



爱德华·费根鲍姆，1994年图灵奖获得者

专家系统与中国

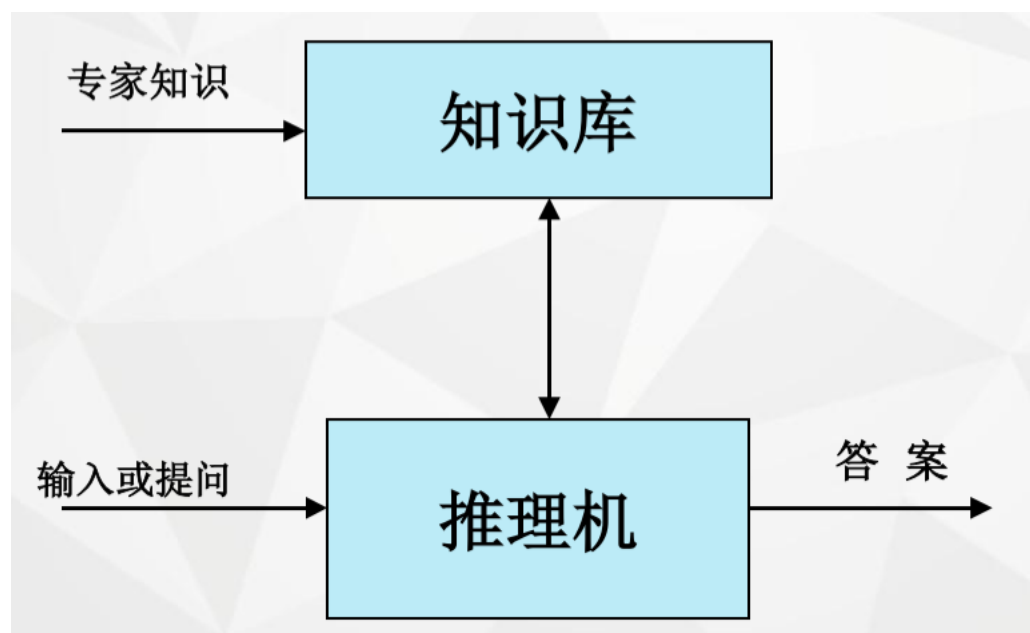
- 我国研制开发的专家系统：
 - 施肥专家系统（中国科学院合肥智能机械研究所）
 - 新构造找水专家系统（南京大学）
 - 勘探专家系统及油气资源评价专家系统（吉林大学）
 - 服装剪裁专家系统及花布图案设计专家系统（浙江大学）
 - 关幼波肝病诊断专家系统（北京中医学院）

专家系统概念

- 同一般的计算机应用系统（如数值计算、数据处理系统等）相比，专家系统具有下列特点：
 - ① 从处理的问题性质看，专家系统善于解决那些不确定性的、非结构化的、没有算法解或虽有算法解但在现有的机器上无法实施的困难问题。
 - ② 从处理问题的方法看，专家系统则是靠知识和推理来解决问题（不像传统软件系统使用固定的算法来解决问题），所以，专家系统是基于知识的智能问题求解系统。

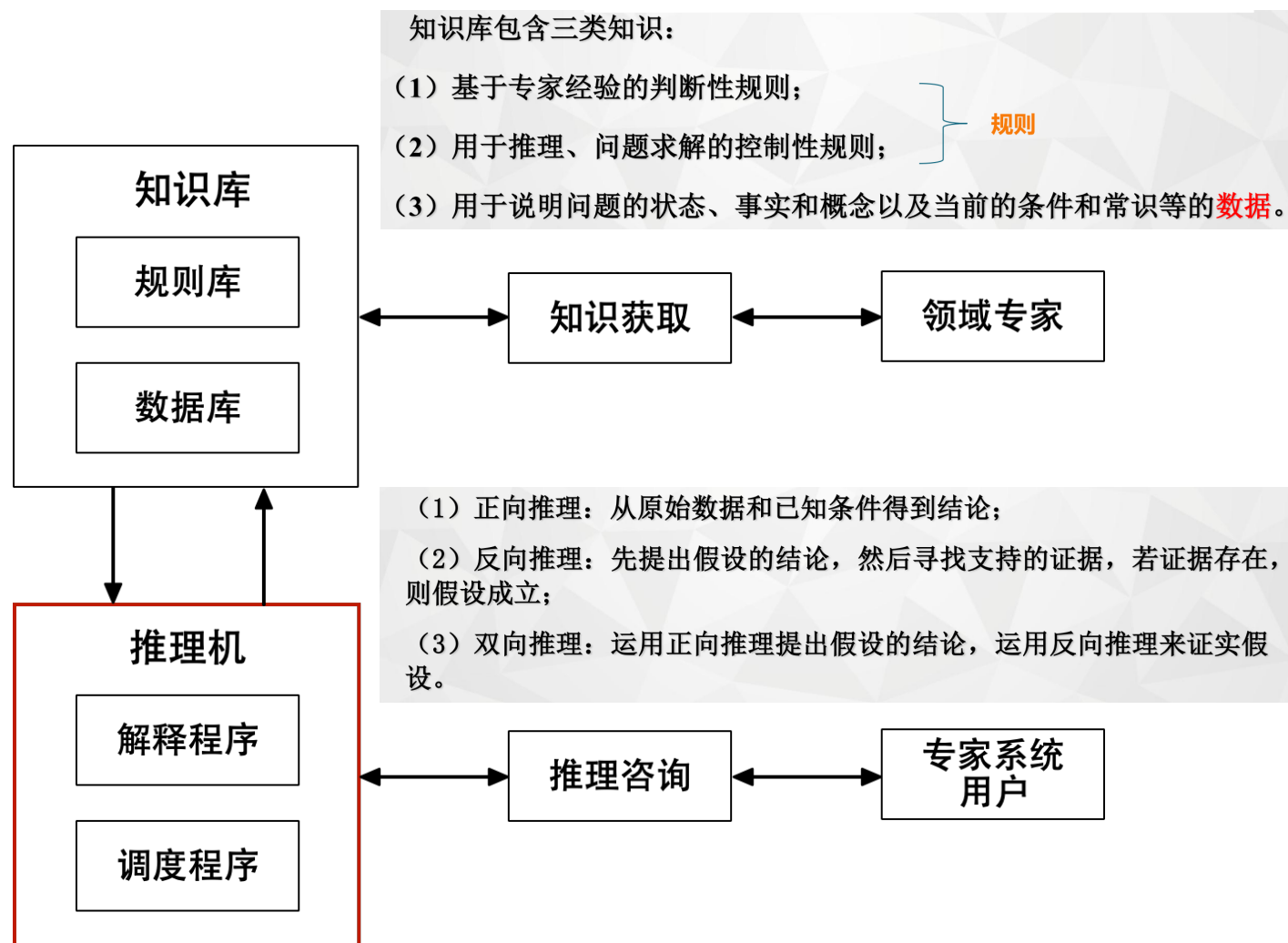
专家系统结构

- 专家系统的结构是指专家系统各组成部分的构造方法和组织形式。系统结构选择恰当与否，是与专家系统的适用性和有效性密切相关的，选择什么结构最为恰当，要根据系统的应用环境和所执行任务的特点确定。



专家系统结构

- 专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统，根据某个领域的专家提供的知识和经验进行推理和判断，模拟人类专家的决策过程。



专家系统的知识表示

- 常用的知识表示方法为：**产生式规则**，**框架**，**语义网络**，**过程**。其中产生式规则是专家系统最流行的表达方法。由产生式规则表示的专家系统又称为基于规则的系统或产生式系统。

产生式规则的表达方式为：

IF E THEN H WITH CF (E,H)

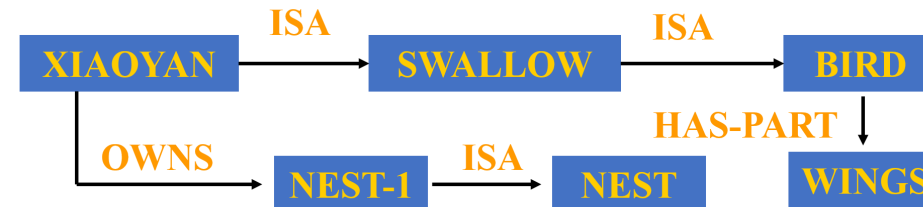
E 表示规则的前提条件，即证据，它可以是单独命题，也可以是复合命题；

H 表示规则的结论部分，即假设，也是命题；

CF (Certainty Factor) 为规则的强度，反映当前提为真时，规则对结论的影响程度。

以下为一个表示“男孩”框架的示例：

槽	值	类型
BOY (男孩)	—	(框架名)
ISA (属性)	Person (人)	(父框架)
SEX (性别)	Male (男性)	(实例值)
AGE (年龄)	Under 12 yrs. (小于12岁)	(过程附件——集合约束)
HOME (家)	A Place (某一地点)	(另一框架)
NUM_LEGS (腿数量)	Default = 2 (默认值 = 2)	(从父框架“人”继承的默认值)



符号主义 - 目录

- 3.5 专家系统简介
- 3.6 产生式知识表达
- 3.7 产生式推理
- 3.3 C-F不确定推理

产生式

- “产生式”由美国数学家波斯特（E.POST）在1934年首先提出，它根据串代替规则提出了一种称为波斯特机的计算模型，模型中的每条规则称为产生式。
- 许多专家系统用它来表示知识
- 产生式通常用于表示事实、规则以及它们的不确定性度量，适合于表示事实性知识和规则性知识。

产生式

- (1) 确定性规则知识的产生式表示

- 基本形式: IF P THEN Q

- 或者: $P \rightarrow Q$

- P 是产生式的前提, Q 是一组结论或操作。

- 如果前提 P 被满足, 则可得到结论 Q 或执行 Q 所规定的操作。

例如:

r_1 : IF 动物会飞 AND 会下蛋 THEN 该动物是鸟

编号 P Q

产生式

- (2) 不确定性规则知识的产生式表示

- 基本形式: IF P THEN Q (置信度)
或者: $P \rightarrow Q$ (置信度)

例如: IF 发烧 THEN 感冒 (0.6)

例如在专家系统MYCIN中:

IF 本微生物的染色斑是革兰氏阴性

本微生物的形状呈杆状

病人是中间宿主

Then 该微生物是绿脓杆菌, 置信度是0.6

产生式

- (3) 确定性事实性知识的产生式表示

- 三元组表示：（对象，属性，值）

- 或者：（关系，对象1，对象2）

例： 老李年龄是40岁： $(Li, age, 40)$

老李和老王是朋友： $(friend, Li, Wang)$

产生式

- (4) 不确定性事实性知识的产生式表示

- 四元组表示：（对象，属性，值，置信度）

- 或者：（关系，对象1，对象2，置信度）

例： 老李年龄很可能是40岁： $(Li, age, 40, 0.8)$

老李和老王不大可能是朋友： $(friend, Li, Wang, 0.1)$

产生式和蕴含式的区别

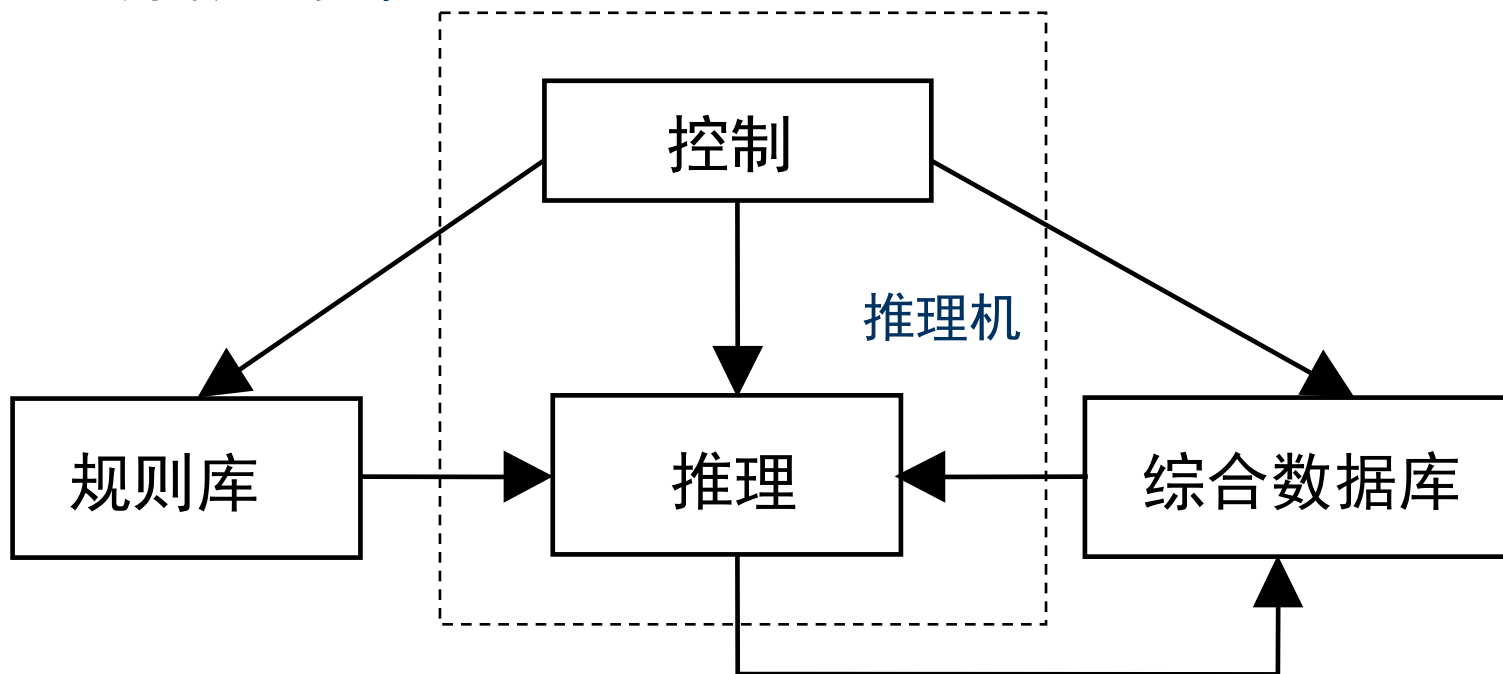
- 产生式与谓词逻辑中的蕴含式基本形式相同
- 蕴含式是产生式的一种特殊情况
 - 除逻辑蕴含外，产生式还包括各种操作、规则、变换、算子、函数等。例如，“如果炉温超过上限，则立即关闭风门”是一个产生式，但不是蕴含式。产生式的外延很广。
 - 蕴含式只能表示精确知识，而产生式不仅可以表示精确的知识，还可以表示不精确知识。蕴含式的匹配总要求是精确的。产生式匹配可以是精确的，也可以是不精确的，只要按某种算法求出的相似度落在预先指定的范围内就认为是可匹配的。
- 产生式的形式描述及语义：
 - 巴科斯范式BNF（Backus normal form）

符号主义 - 目录

- 3.5 专家系统简介
- 3.6 产生式知识表达
- 3.7 产生式推理
- 3.3 C-F不确定推理

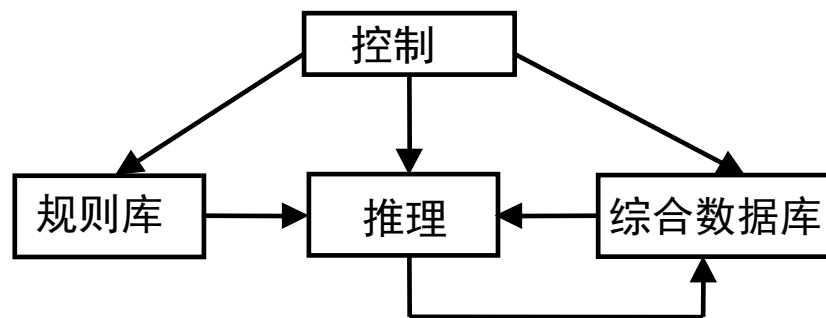
产生式系统

- 一组产生式放在一起，互相配合，一个产生式的结论可以供另一个作为事实使用，以求得问题的解。



产生式系统

- **规则库**：用于描述相应领域内知识的产生式集合。
- **综合数据库**（事实库、上下文、黑板等）：一个用于存放问题求解过程中各种当前信息的数据结构。
- **控制系统（推理机）**：由一组程序组成，负责整个产生式系统的运行，实现对问题的求解。
 - 推理
 - 冲突消解
 - 执行规则
 - 检查推理终止条件



产生式系统例子

- 例如：**动物识别系统**——识别虎、金钱豹、斑马、长颈鹿、鸵鸟、企鹅、信天翁七种动物的产生式系统。



产生式系统例子

- r_1 : IF 该动物有毛发 THEN 该动物是哺乳动物
- r_2 : IF 该动物有乳房 THEN 该动物是哺乳动物
- r_3 : IF 该动物有羽毛 THEN 该动物是鸟
- r_4 : IF 该动物会飞 AND 会下蛋 THEN 该动物是鸟
- r_5 : IF 该动物吃肉 THEN 该动物是食肉动物
- r_6 : IF 该动物有犬齿 AND 有爪 AND 眼盯前方
THEN 该动物是食肉动物
- r_7 : IF 该动物是哺乳动物 AND 有蹄
THEN 该动物是有蹄类动物
- r_8 : IF 该动物是哺乳动物 AND 是反刍动物
THEN 该动物是有蹄类动物

规
则
库

产生式系统例子

r_9 : IF 该动物是哺乳动物 AND 是食肉动物 AND 是黄褐色
AND 身上有暗斑点 THEN 该动物是金钱豹

r_{10} : IF 该动物是哺乳动物 AND 是食肉动物 AND 是黄褐色
AND 身上有黑色条纹 THEN 该动物是虎

r_{11} : IF 该动物是有蹄类动物 AND 有长脖子 AND 有长腿
AND 身上有暗斑点 THEN 该动物是长颈鹿

r_{12} : IF 该动物是有蹄类动物 AND 身上有黑色条纹
THEN 该动物是斑马

r_{13} : IF 该动物是鸟 AND 有长脖子 AND 有长腿 AND 不会飞
AND 有黑白二色 THEN 该动物是鸵鸟

r_{14} : IF 该动物是鸟 AND 会游泳 AND 不会飞
AND 有黑白二色 THEN 该动物是企鹅

r_{15} : IF 该动物是鸟 AND 善飞 THEN 该动物是信天翁

产生式系统例子

- 设已知初始事实存放在综合数据库中：

该动物身上有：暗斑点，长脖子，长腿，乳房，蹄，哺乳动物

r_1 : IF 该动物有毛发 THEN 该动物是哺乳动物

r_2 : IF 该动物有乳房 THEN 该动物是哺乳动物

r_3 : IF 该动物有羽毛 THEN 该动物是鸟

r_4 : IF 该动物会飞 AND 会下蛋 THEN 该动物是鸟

r_5 : IF 该动物吃肉 THEN 该动物是食肉动物

r_6 : IF 该动物有犬齿 AND 有爪 AND 眼盯前方

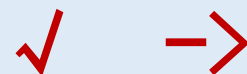
THEN 该动物是食肉动物

r_7 : IF 该动物是哺乳动物 AND 有蹄

THEN 该动物是有蹄类动物

r_8 : IF 该动物是哺乳动物 AND 是反刍动物

THEN 该动物是有蹄类动物



“该动物是哺乳动物”

加入综合数据库

产生式系统例子

- 设已知初始事实存放在综合数据库中：

该动物身上有：暗斑点，长脖子，长腿，乳房，蹄，哺乳动物，有蹄类动物

r_1 : IF 该动物有毛发 THEN 该动物是哺乳动物

~~r_2 : IF 该动物有乳房 THEN 该动物是哺乳动物~~

r_3 : IF 该动物有羽毛 THEN 该动物是鸟

r_4 : IF 该动物会飞 AND 会下蛋 THEN 该动物是鸟

r_5 : IF 该动物吃肉 THEN 该动物是食肉动物

r_6 : IF 该动物有犬齿 AND 有爪 AND 眼盯前方

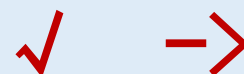
THEN 该动物是食肉动物

~~r_7 : IF 该动物是哺乳动物 AND 有蹄~~

THEN 该动物是有蹄类动物

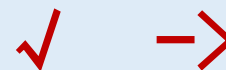
r_8 : IF 该动物是哺乳动物 AND 是反刍动物

THEN 该动物是有蹄类动物 加入综合数据库



“该动物是哺乳动物”

加入综合数据库



“该动物是有蹄类动物”

产生式系统例子

该动物身上有：暗斑点，长脖子，长腿，乳房，蹄，哺乳动物，有蹄类动物

r_9 : IF 该动物是哺乳动物 AND 是食肉动物 AND 是黄褐色
AND 身上有暗斑点 THEN 该动物是金钱豹

r_{10} : IF 该动物是哺乳动物 AND 是食肉动物 AND 是黄褐色
AND 身上有黑色条纹 THEN 该动物是虎

r_{11} : IF 该动物是有蹄类动物 AND 有长脖子 AND 有长腿
AND 身上有暗斑点 THEN 该动物是长颈鹿

匹配成功!

长颈鹿

r_{12} : IF 该动物是有蹄类动物 AND 身上有黑色条纹
THEN 该动物是斑马

r_{13} : IF 该动物是鸟 AND 有长脖子 AND 有长腿 AND 不会飞
AND 有黑白二色 THEN 该动物是鸵鸟

r_{14} : IF 该动物是鸟 AND 会游泳 AND 不会飞
AND 有黑白二色 THEN 该动物是企鹅

r_{15} : IF 该动物是鸟 AND 善飞 THEN 该动物是信天翁

产生式系统的特点

- 不断从规则库中选择可用规则与综合数据库中的已知事实进行匹配
- 规则的每一次成功匹配都使综合数据库中增加新的内容，朝着问题解决的方向前进，称为推理，是专家系统中的核心内容

优点：

- 自然性
- 模块性
- 有效性
- 清晰性

缺点：

- 效率不高
- 不能表达结构性知识

适合产生式表示的知识：

- 领域知识间关系不密切，不存在结构关系，如化学方面。
- 经验性及不确定性的知识，且相关领域中对这些知识没有严格、统一的理论，如医疗论断。
- 领域问题的求解过程可被表示为一系列相对独立的操作，且每个操作可被表示为一条或多条产生式规则。

符号主义 - 目录

- 3.5 专家系统简介
- 3.6 产生式知识表达
- 3.7 产生式推理
- 3.3 C-F不确定推理

不确定性知识表示与推理

- 现实世界中客观上存在的随机性、模糊性
- 我们对事物的认识往往是不精确、不完全的，具有一定程度的不确定性
- 反映到知识和证据上，就形成了不确定性知识及不确定性证据
- 在信息不完善、不精确的情况下，如何推理？



不确定性推理

主要介绍基于概率论的方法

不确定性推理

- **不确定性推理**：从不确定性的初始证据出发，通过运用不确定性的知识，最终推出具有一定程度的不确定性但却是合理或者近乎合理的结论的思维过程。
- 一些基本问题：
 - 不确定性的表示与量度
 - 不确定性匹配算法及阈值的选择
 - 组合证据不确定性的算法
 - 不确定性的传递算法
 - 结论不确定性的合成

不确定性推理的基本问题

- 不确定性的表示与量度
 - 知识不确定性的表示
 - 证据不确定性的表示
 - 不确定性的度量
- 不确定性匹配算法及阈值的选择
 - 知识与数据库中已知证据进行匹配时，由于知识和证据都具有不确定性，如果知识所要求的不确定性程度与证据实际具有的不确定性知识不同，怎么才算匹配成功？
 - 设计一个算法来计算双方相似的程度
 - 设定阈值来衡量多大程度可称之为匹配

不确定性推理的基本问题

- 组合证据不确定性的算法
 - 多个简单条件可通过逻辑运算构成复合条件
 - 匹配时对应即为组合证据，其不确定性需要方法来计算
- 不确定性的传递算法
 - 每一步推理中，如何把证据及知识的不确定性传递给结论
 - 在多步推理中，如何把初始证据的不确定性传递给最终结论
- 结论不确定性的合成
 - 用不同知识进行推理得到了相同结论，但得到的不确定程度不同，需要算法来进行处理

可信度方法

- 1975年肖特里菲（E. H. Shortliffe）等人在确定性理论（Theory of Confirmation）的基础上，结合概率论等提出的一种不确定性推理方法
- 是许多专家系统的基础
- **可信度**：根据经验对一个事物或现象为真的相信程度
- 可信度方法带有较大的主观性和经验性，但直观、简单，且有效
- 基本方法：**C-F模型**（The Certainty-Factor Model）

C-F模型

- 1. 知识不确定性的表示

- 产生式规则表示：

IF E THEN H ($CF(H,E)$)

- 可信度因子 $CF(H,E)$ ：该条知识的可信度
- $CF(H,E)$ 在 $[-1, 1]$ 上取值，由领域专家直接给出
 - 证据的出现增加结论H为真的可信度，则 $CF(H,E)>0$
 - 证据的出现增加结论H为假的可信度，则 $CF(H,E)<0$
 - 证据的出现与H无关，则 $CF(H,E)=0$

例：IF 头痛 AND 流涕 THEN 感冒 (0.7)

C-F模型

- 2. 证据不确定性的表示

$CF(E)=0.6$: E 的可信度为0.6

- $CF(E)$ 也在 $[-1, 1]$ 上取值
- 对初始证据，如肯定为真则取1，肯定为假则取-1
- 某种程度为真则取 $0 < CF(E) < 1$ ，某种程度为假则取 $-1 < CF(E) < 0$
- 如果暂未获得相关的观察，可看作无关，取0

C-F模型

• 3. 组合证据不确定性的算法

- 当组合证据是多个单一证据的合取（与）时，可信度取最小值
- 当组合证据是多个单一证据的析取（或）时，可信度取最大值

$$E = E_1 \text{ AND } E_2 \text{ AND } \dots \text{ AND } E_n$$

$$CF(E) = \min\{CF(E_1), CF(E_2), \dots, CF(E_n)\}$$

$$E = E_1 \text{ OR } E_2 \text{ OR } \dots \text{ OR } E_n$$

$$CF(E) = \max\{CF(E_1), CF(E_2), \dots, CF(E_n)\}$$

C-F模型

• 4. 不确定性的传递算法

- 从不确定的初始证据出发，最终推出结论并求出其可信度
- 结论 H 的可信度：

$$CF(H) = CF(H, E) \times \max\{0, CF(E)\}$$

知识的可信度 证据的可信度

- 当证据以某种程度为假时，即 $CF(E) < 0$ ，则 $CF(H) = 0$
- 当证据为真，即 $CF(E) = 1$ ，则 $CF(H) = CF(H, E)$

模型中没有考虑证据为假的程度对结论 H 所产生的影响

当证据为真时，结论 H 的可信度就是知识的可信度

C-F模型

- 5. 结论不确定性的合成算法

- 如果由多条不同知识推出了相同结论，但可信度不同，需要合成算法求出综合可信度
- 考虑两两合成，有知识如下：

IF	E_1	THEN	H	$(CF(H, E_1))$
IF	E_2	THEN	H	$(CF(H, E_2))$

- 分别对每条知识求出结论可信度 $CF(H)$ ：

$$CF_1(H) = CF(H, E_1) \times \max\{0, CF(E_1)\}$$
$$CF_2(H) = CF(H, E_2) \times \max\{0, CF(E_2)\}$$

- 用下述公式求出 E_1 和 E_2 对H的综合可信度 $CF_{12}(H)$ ：

C-F模型

$$CF_{1,2}(H) = \begin{cases} CF_1(H) + CF_2(H) - CF_1(H)CF_2(H) & \text{若 } CF_1(H) \geq 0, CF_2(H) \geq 0 \\ CF_1(H) + CF_2(H) + CF_1(H)CF_2(H) & \text{若 } CF_1(H) < 0, CF_2(H) < 0 \\ \frac{CF_1(H) + CF_2(H)}{1 - \min\{|CF_1(H)|, |CF_2(H)|\}} & \text{若 } CF_1(H) \text{ 与 } CF_2(H) \text{ 异号} \end{cases}$$

- 例： 如果头痛，则感冒（0.8）
- 如果发热，则感冒（0.9）
- 如果头痛且咳嗽，则发热（0.7）
- 妈妈观察到小王头痛的可信度是0.6，咳嗽的可信度是0.8，问小王是否感冒？

设各项证据为：

头痛 E_1 $CF(E_1)=0.6$ 感冒 H

发热 E_2

咳嗽 E_3 $CF(E_3)=0.8$

知识可写为：

1. IF E_1 THEN H (0.8)
2. IF E_2 THEN H (0.9)
3. IF $E_1 \wedge E_3$ THEN E_2 (0.7)

C-F模型

已知规则和证据:

$$r_1: \text{IF } E_1 \text{ THEN } H \quad (0.8)$$

$$r_2: \text{IF } E_2 \text{ THEN } H \quad (0.9)$$

$$r_3: \text{IF } E_1 \wedge E_3 \text{ THEN } E_2 \quad (0.7)$$

$$\text{CF}(E_1)=0.6; \text{CF}(E_3)=0.8$$

分别对每条规则求出结论可信度 $\text{CF}(H)$:

$$\text{由 } r_1 \text{ 得到: } \text{CF}_1(H) = \text{CF}(H, E_1) \times \max\{0, \text{CF}(E_1)\} = 0.8 \times 0.6 = 0.48$$

$$\begin{aligned} \text{由 } r_3 \text{ 得到: } \text{CF}(E_2) &= \text{CF}(E_2, E_1 \wedge E_3) \times \max\{0, \text{CF}(E_1 \wedge E_3)\} \\ &= 0.7 \times \min\{\text{CF}(E_1), \text{CF}(E_3)\} = 0.7 \times 0.6 = 0.42 \end{aligned}$$

$$\text{由 } r_2 \text{ 得到: } \text{CF}_2(H) = \text{CF}(H, E_2) \times \max\{0, \text{CF}(E_2)\} = 0.9 \times 0.42 = 0.378$$

求出结论的综合可信度:

$$\begin{aligned} \text{CF}_{1,2}(H) &= \text{CF}_1(H) + \text{CF}_2(H) - \text{CF}_1(H) \text{CF}_2(H) \\ &= 0.48 + 0.378 - 0.48 \times 0.378 = 0.67656 \end{aligned}$$

确实比较有可能感冒了!

$$\text{CF}_{1,2}(H) = \begin{cases} \text{CF}_1(H) + \text{CF}_2(H) - \text{CF}_1(H)\text{CF}_2(H) & \text{若 } \text{CF}_1(H) \geq 0, \text{CF}_2(H) \geq 0 \\ \text{CF}_1(H) + \text{CF}_2(H) + \text{CF}_1(H)\text{CF}_2(H) & \text{若 } \text{CF}_1(H) < 0, \text{CF}_2(H) < 0 \\ \frac{\text{CF}_1(H) + \text{CF}_2(H)}{1 - \min\{|\text{CF}_1(H)|, |\text{CF}_2(H)|\}} & \text{若 } \text{CF}_1(H) \text{ 与 } \text{CF}_2(H) \text{ 异号} \end{cases}$$