

# 智能控制理论

(Intelligent Control Theories)

## 第2章 专家控制

主讲教师：段朝霞（能电院自动化系）

办公室：勤学楼1212

邮 箱：[duanzx1989@163.com](mailto:duanzx1989@163.com)

## 第2章 专家控制

在传统控制系统中，系统的运行排斥了人的干预，人-机之间缺乏交互。控制器对被控对象在环境中的参数、结构的变化缺乏应变能力。

传统控制理论的不足，在于它必须依赖于被控对象严格的数学模型，试图对精确模型来求取最优的控制效果。而实际的被控对象存在着许多难以建模的因素。



上世纪80年代初，人工智能中专家系统的思想和方法开始被引入控制系统的研究和工程应用中。

**专家系统**能处理定性的、启发式或不确定的知识信息，经过各种推理来达到系统的任务目标。专家系统为解决传统控制理论的局限性提供了重要的启示，二者的结合产生了专家控制这一方法。



## 第二章 专家控制

### 2.1 专家系统

### 2.2 专家控制

### 2.3 专家PID控制

## 第二章 专家控制

### 2.1 专家系统

### 2.2 专家控制

### 2.3 专家PID控制



## 2.1 专家系统

### 2.1.1 专家系统概述

#### 1. 定义

专家系统是一类包含知识和推理的智能计算机程序，其内部包含某领域专家水平的知识和经验，具有解决专门问题的能力。

## 2.1 专家系统

### 2. 发展历史

#### (1) 初创期（1965-1971年）

第一代专家系统DENLDRA和MACSMA的出现，标志着专家系统的诞生。其中DENLDRA为推断化学分子结构的专家系统，由专家系统的奠基人，Stanford大学计算机系的Feigenbaum教授及其研究小组研制。MACSMA为用于数学运算的数学专家系统，由麻省理工学院完成。

## 2.1 专家系统



### (2) 成熟期（1972-1977年）

斯坦福大学研究开发了最著名的专家系统-血液感染病诊断专家系统 MYCIN，标志专家系统从理论走向应用。另一个著名的专家系统-语音识别专家系统 HEARSAY 的出现，标志着专家系统的理论走向成熟。



## 2.1 专家系统



### (3) 发展期（1978-现在）

专家系统走向应用领域，专家系统的数量增加，仅1987年研制成功的专家系统就有1000种。

专家系统可以解决的问题一般包括解释、预测、设计、规划、监视、修理、指导和控制等。目前，专家系统已经广泛地应用于医疗诊断、语音识别、图象处理、金融决策、地质勘探、石油化工、教学、军事、计算机设计等领域。

## 2.1 专家系统



### 3. 专家系统的特征

- **具有专家水平的知识：**必须表现专家的技能和高度的技巧以及足够的鲁棒性。系统的鲁棒性是指不管数据正确与否，都能够得到正确的结论或者指出错误。
- **能进行有效的推理：**能够运用专家的经验 and 知识进行搜索、推理。
- **具有透明性：**在推理时，不仅能够得到答案，而且还能给出推理的依据。
- **具有灵活性：**知识的更新和扩充灵活方便。
- **复杂性：**人类的知识可以定性或定量的表示，专家系统经常表现为定性推理和定量计算的混合形式，比较复杂。

## 2.1 专家系统



### 4. 专家系统的应用

- 1) 诊断型专家系统(ES for Diagnosis): 根据症状, 得到故障的原因及排除故障的方案。如各种故障诊断系统(电子、机械等)及医疗诊断系统, MYCIN, PUFF, DART/DASD。
- 2) 解释型专家系统(ES for Interpretation): 根据表征现象和信息解释其深层含义。如: 卫星云图分析, 语音理解, 图像分析, 地址结构及化学结构分析等。
- 3) 预测型专家系统(ES for Prediction): 根据过去和现在的观测数据预测未来可能发生的情况。如: 气象预报、人口预测、交通预测、经济、军事形势的预测等。

## 2.1 专家系统

### 4. 专家系统的应用

4) 设计型专家系统 (ES for Design): 根据设计要求和指标进行产品的设计, 如: 电路板线路设计, 机械产品设计及建筑设计等领域, 如R1(XCOM)

5) 决策型专家系统 (ES for Decision): 对各种可能的决策方案进行综合评判和选优, 包括各种领域的智能决策及咨询。

6) 规划型专家系统 (ES for Planning): 根据任务进行行动规划。如: 交通导航调度, 自动程序设计、机器人规划、军事计划制定及农作物施肥方案规划等。

## 2.1 专家系统

### 4. 专家系统的应用

7) 控制专家系统 (ES for Control) : 自适应地管理一个受控对象或客体的全部行为, 使之满足预定要求。如空中交通管制、自主机器人控制、生产质量控制。

8) 教学型专家控制 (ES for Instruction) : 根据学生特点、弱点和基础知识, 以最适当的教案和教学方法对学生进行教学和辅导。如MACSYMA符号积分与定理证明系统。

9) 监视型专家系统 (ES for Monitoring) : 对某些行为进行监视并在必要时进行干预, 用于核电站的安全监视、机场监视、森林监视、传染病疫情监视、防空监视等。

## 2.1 专家系统

### 2.1.2 专家系统构成

专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统，它应用人工智能技术，根据某个领域一个或多个人类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以解决那些需要专家解决的复杂问题。

专家系统主要由知识库和推理机构成，专家系统的结构如图2-1所示。

## 2.1 专家系统

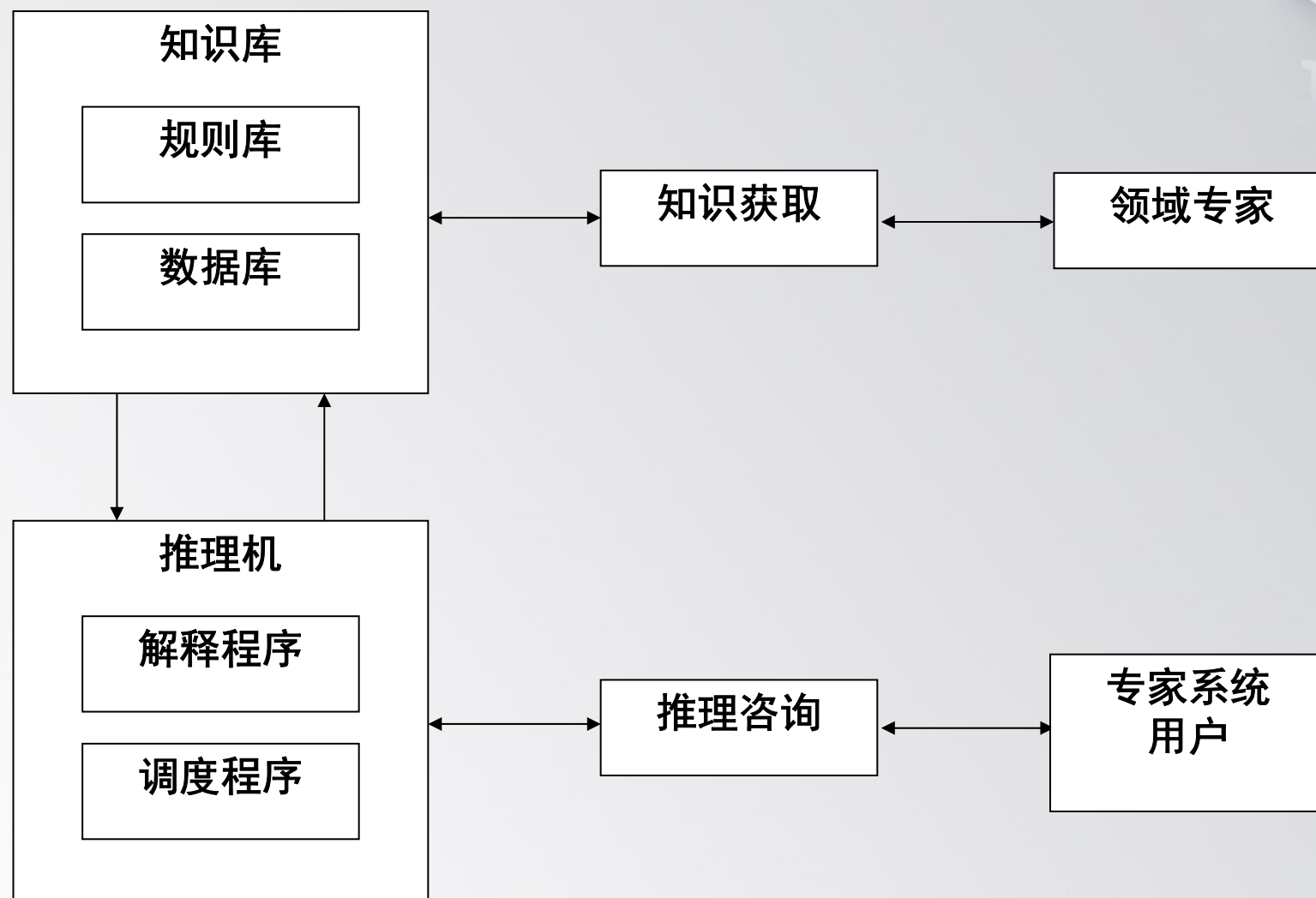


图2-1 专家系统的结构



## 2.1 专家系统



### (1) 知识库

用于存取和管理所获取的专家知识和经验，供推理机利用，具有知识存储、检索、编辑、增删、修改和扩充等功能。

### (2) 推理机

推理机是用于对知识库中的知识进行推理来得到结论的“思维”机构。推理机包括三种推理方式：

- 1) 正向推理：从原始数据和已知条件得到结论；
- 2) 反向推理：先提出假设的结论，然后寻找支持的证据，若证据存在，则假设成立；
- 3) 双向推理：运用正向推理提出假设的结论，运用反向推理来证实假设。



## 2.1 专家系统



### 2.1.3 专家系统的建立

#### 1. 知识库

知识库包含三类知识：

- (1) 基于专家经验的判断性规则；
- (2) 用于推理、问题求解的控制性规则；
- (3) 用于说明问题的状态、事实和概念以及当前的条件和常识等的数据库。

## 2.1 专家系统



知识库包含多种功能模块，主要有知识查询、检索、增删、修改和扩充等。知识库通过人机接口与领域专家相沟通，实现知识的获取。

知识库中的知识一般都是通过“人工移植”方法获得，知识工程师（专家系统的设计者）采用“专家面谈”、“口语记录分析”等方式获取知识，经过整理之后再输入知识库。

## 2.1 专家系统



### 2. 知识的表示

常用的知识表示方法为：

- A. 产生式规则表示法
- B. 状态空间表示法
- C. 框架表示法
- D. “与或图”表示法
- E. 神经网络知识表示

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。

## 2.1 专家系统



### A. 产生式规则的表示法

IF E THEN H WITH CF(E, H)

其中，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。

产生式系统包含三个基本组成成分：

规则库，数据库，控制器

## 2.1 专家系统

### (1) 规则库

该库存放了若干规则，每条产生式规则是以“如果满足这个条件，就应当采取这个操作”形式表示的语句。各条规则之间相互作用不大。规则可有如下形式：

<b>IF</b> (触发事实1是真)	}	条件部分
(触发事实2是真)		
⋮		
(触发事实 $n$ 是真)		
<b>THEN</b> (结论事实 1)	}	操作部分
(结论事实 2)		
⋮		
(结论事实 $n$ )		

## 2.1 专家系统

### (2) 数据库

数据库是产生式规则的中心，每个产生式规则的左边表示在启用这一规则之前数据库内必须准备好的条件。执行产生式规则的操作会引起数据库的变化，这就使得其他产生式规则的条件可能被满足。

### (3) 控制器

控制器的作用是说明下一步应该选用什么规则，也就是如何运用规则。通常从选择规则到执行规则分成三步：



## 2.1 专家系统



- 1) **匹配** 把数据库和规则的条件部分相匹配。如果两者完全匹配，则把这条规则称为**触发规则**。当按规则的操作部分去执行时，把这条规则称为**被启用规则**。
- 2) **冲突解决** 当有一个以上的规则条件部分和当前数据库相匹配时，就需要**决定首先使用哪一条规则**。
- 3) **操作** 执行规则的操作部分，经过操作以后，当前数据库将被修改。然后，其他的规则有可能被使用。

## 2.1 专家系统

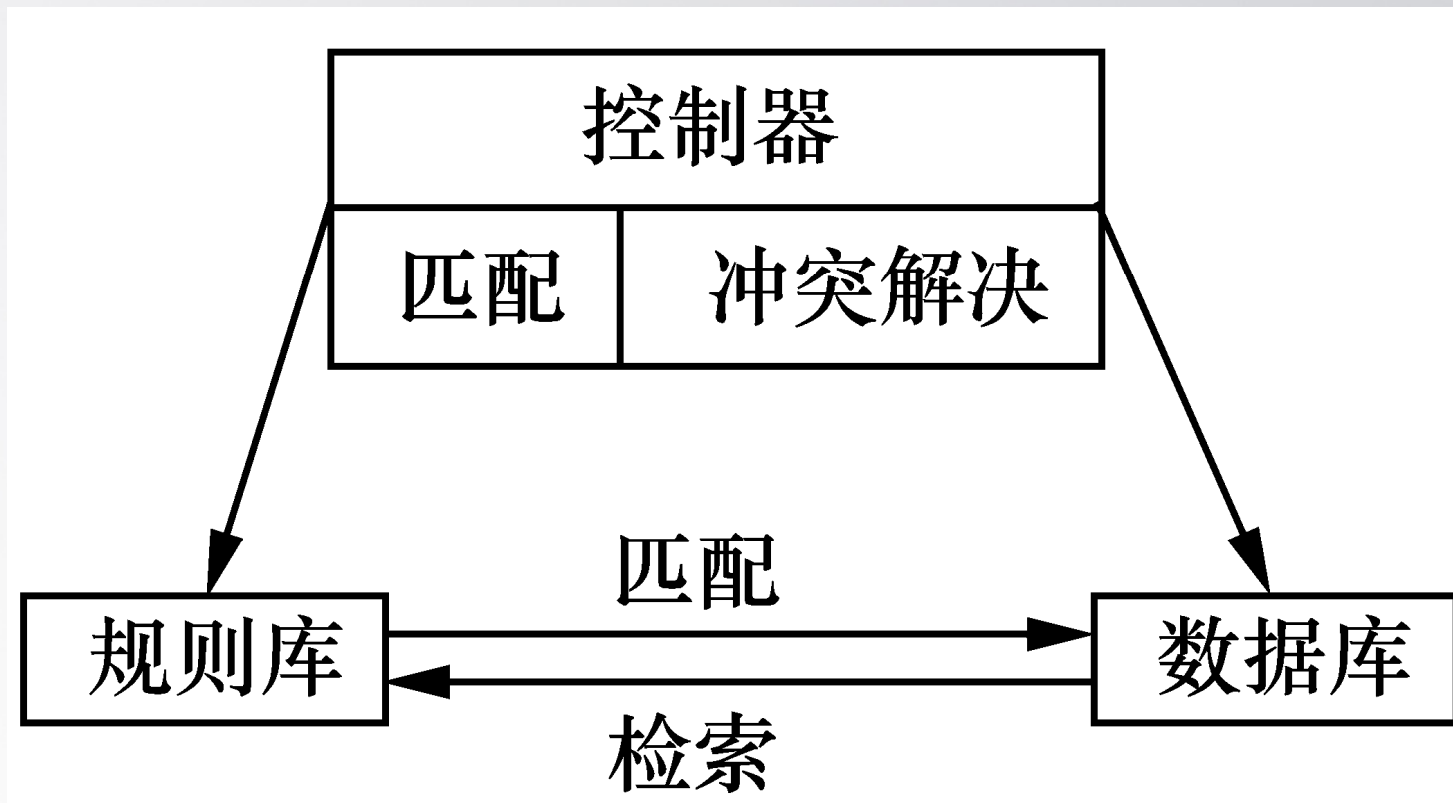


图2-2 产生式系统的基本结构



## 2.1 专家系统



### B. 状态空间表示法

状态空间表示法是知识表达的基本方法。所谓“状态”是用来表示系统状态、事实等叙述性知识的一组变量或数组，即

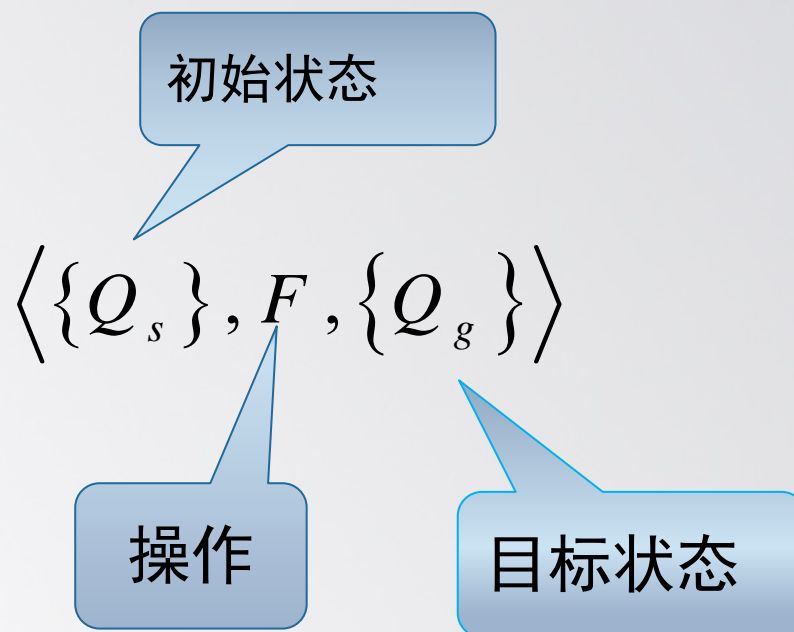
$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$$

所谓“操作”就是用于表示引起状态变化的过程性知识的一组关系或函数

$$F : \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$$

## 2.1 专家系统

状态空间是利用状态变量和操作符号，表示系统或问题的有关知识的符号体系，通常可以用三元组来表示




## 2.1 专家系统



### C. 框架表示法

框架是一个嵌套的连接表，用于表达问题的状态和操作过程及其相互联系。框架结构的嵌套结构便于表达不同层次的知识。通过扩充子框架，可以进一步描述问题的细节。

一个框架由唯一的一个框架名字进行标识，一个框架可以有任意多个的槽，每个槽又可以有任意多个的侧面，每个侧面可以拥有任意数目的值，把它们放在一起，就得到：



```

( 〈框架名〉 ( 〈槽 1〉 ( < 侧面1 > ( 〈值1〉 )
                                     ( 〈值2〉 )
                                     ... )
    ( < 侧面2 > ( 〈值1〉 )
                ( 〈值2〉 )
                ... )
    ... )

( 〈槽 2〉 ( < 侧面1 > ( 〈值1〉 )
                    ( 〈值2〉 )
                    ... )
    ... )

... )

```

利用框架中的槽，可以填入相应的说明，补充新的事实、条件、数据或者结果，修改问题的表达方式和内容，便于表达对行为和系统状的预测和猜想。

## 2.1 专家系统

### D. “与或图”表示法

#### D-1. “与或图”概念

与或图是一种超图(存在超弧的图)，图中使用几条超弧线连接一个父节点和它的一组后继节点，加到一个节点上的“与”或者“或”标记取决于该子节点与父节点的关系。

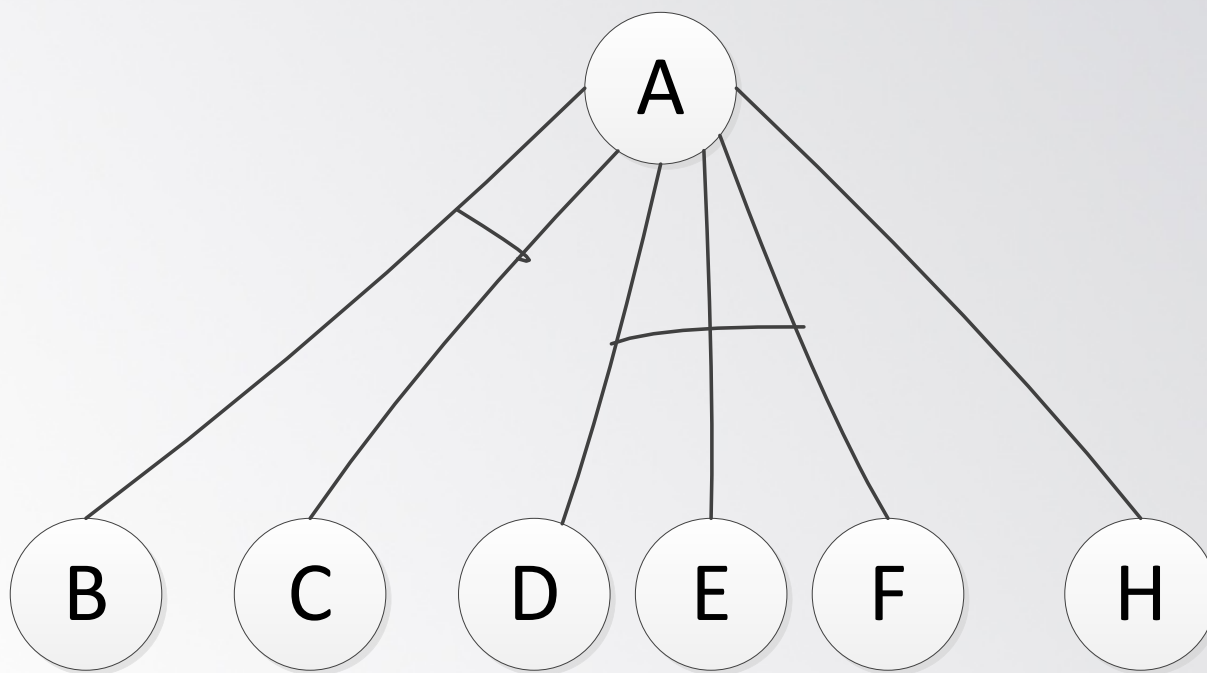


图2-3 说明问题A的子问题替换集合的结构图

人们在求解问题时的两种思维方法：

(1) 分解“与”树 将复杂的大问题分解成一组简单的小问题，将总问题分解为子问题。若所有的子问题都解决了，则总问题也解决了，这是“与”的逻辑关系。

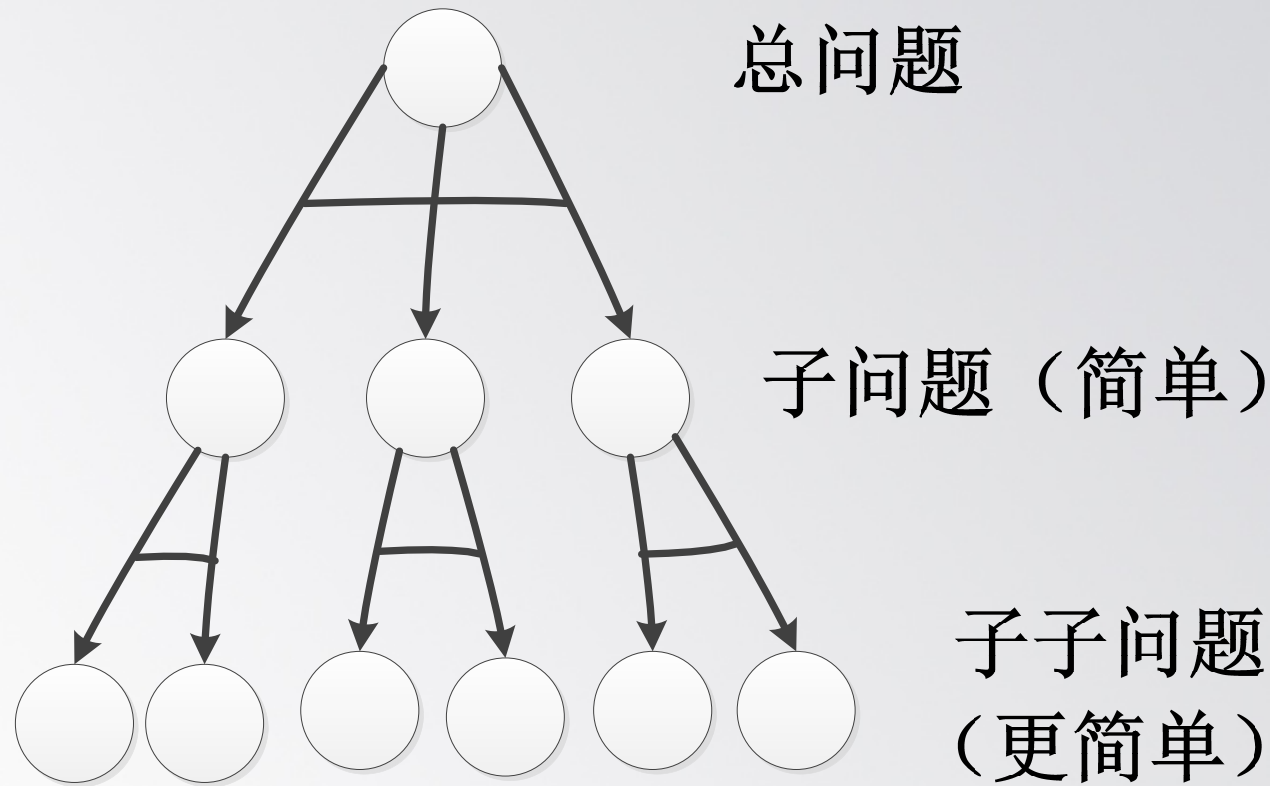


图2-4 “与”树问题分解

## 2.1 专家系统

(2) **变换“或”树** 将较难的问题变换为较易的等价问题，若一个难题可以等价变换为几个容易问题，则任何一个容易问题解决了，也就解决了原有的难题，这是“或”的逻辑关系。

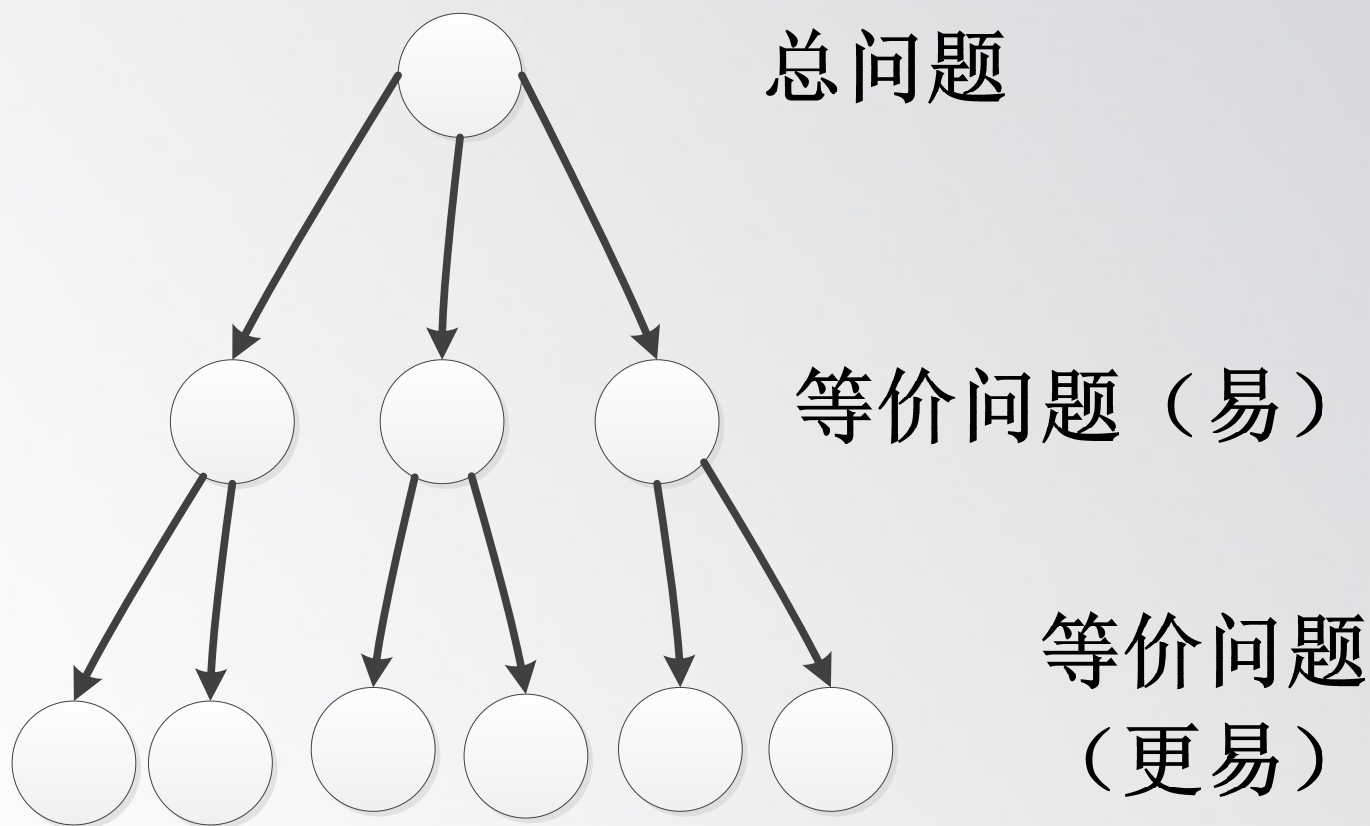


图2-5 “或”树问题变换

## 2.1 专家系统

在实际问题求解中，常常是兼用“分解”和“变换”方法，因而可以用“与”树和“或”树相结合的图——“与或”图来表达。

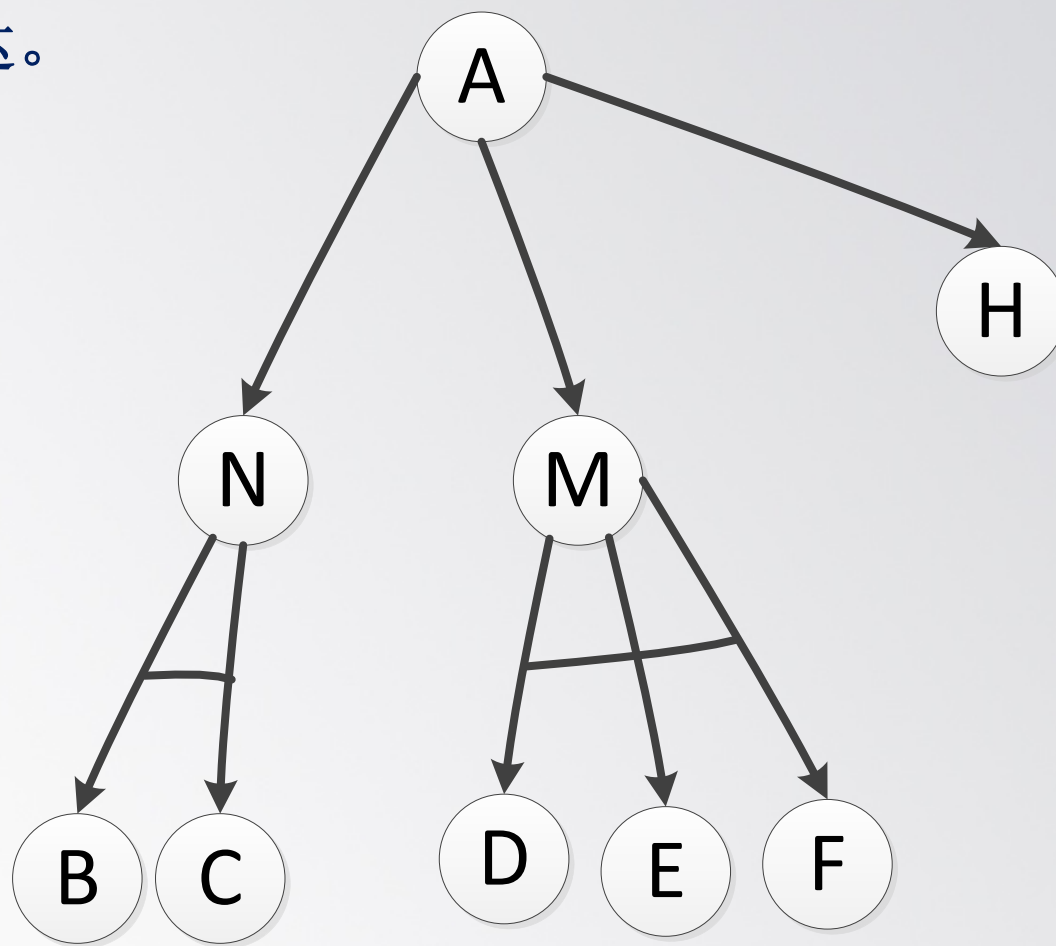


图 2-6 一个“与或图”



## 2.1 专家系统



### D-2 “与或图”构成规则

本原问题——可以直接解答的问题。

1) 与或图中的每一个节点代表一个要解决的单一问题或问题集合，图中的起始节点对应总问题。

2) 对应于本原问题的节点为叶节点，它没有后裔。

3) 对于把算符（与操作/或操作）应用于问题  $A$  的每种可能情况，都把问题变换为一个子问题集合；有向弧线自  $A$  指向后继节点，表示所求得子问题的集合。

## 2.1 专家系统

问题  $A$  变换为 3 个不同的子问题集合：N、M 和 H。如果 N、M 和 H 中有一个能够解答，那么问题  $A$  就得到了解答。N、M 和 H 为或节点。

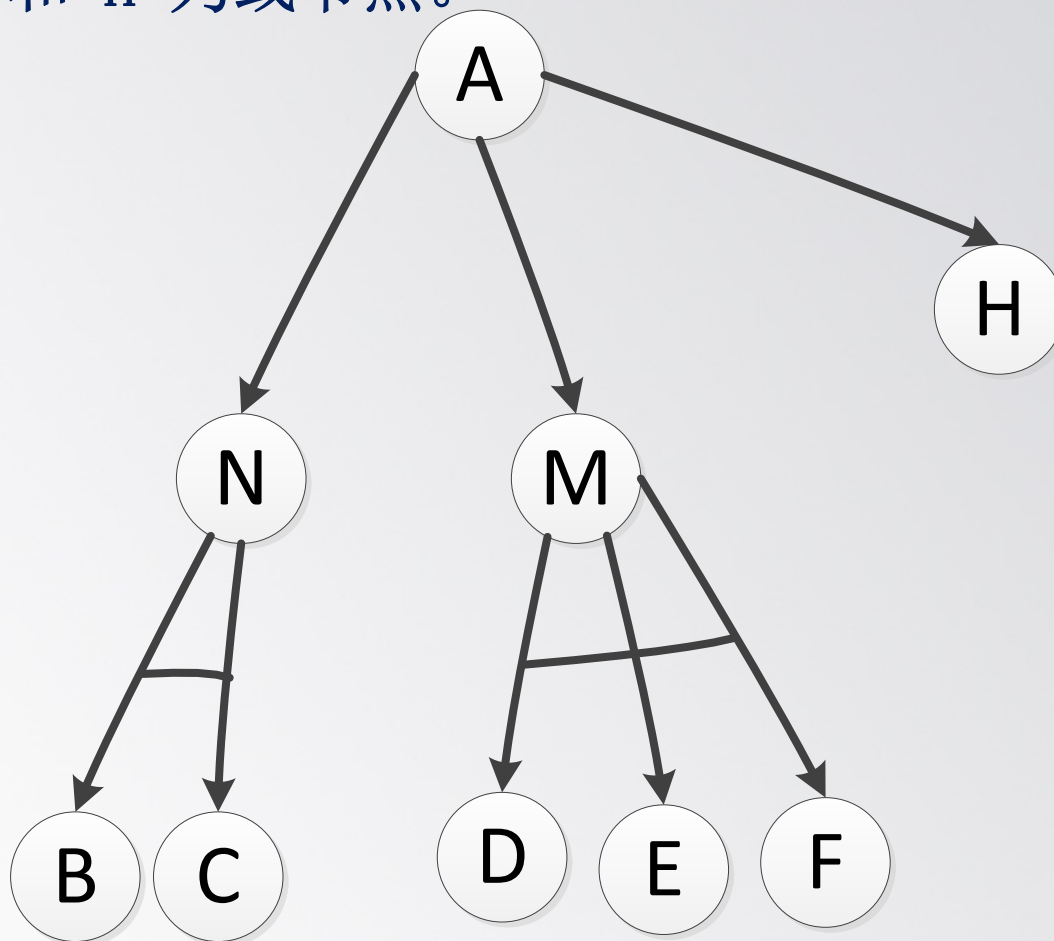


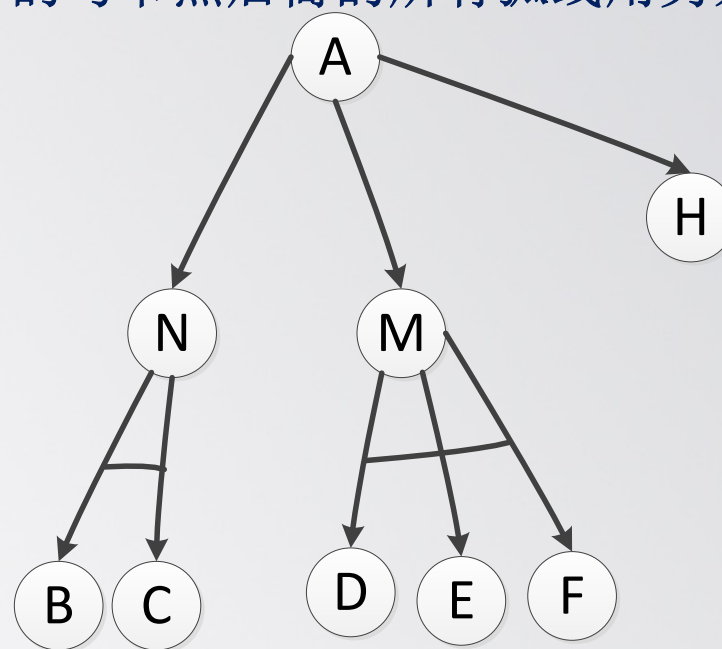
图 2-6 一个“与或图”

## 2.1 专家系统

4) 图 2-6进一步表示了集合 N、M 和 H 的组成情况，图中  $N=\{B, C\}$ ， $M=\{D, E, F\}$ ，而 H 由单一问题构成。

一般对于代表两个或两个以上的子问题集合的每个节点，有向弧线从此节点指向此子问题集合中的各个节点。只有当集合中所有的项都有解的时，这个子问题的集合才能获得解答，所以把这些子问题节点叫做与节点。

为了区别或节点，把具有共同父辈的与节点后裔的所有弧线用另外一段小弧线连接起来。



## 2.1 专家系统



### E. 神经网络知识表示

传统的知识表示都可以看做是知识的一种显示表示，而神经网络的知识表示可看作是一种隐式表示，不像在产生式系统中那样独立的表示每一条规则，而是将某一问题的若干知识在同一网络中表示。

## 2.1 专家系统

三层神经网络表示了逻辑代数中的“异或”逻辑。其邻接权矩阵可以表示为：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.004 & 1.070 & 0 \\ 0 & 0 & 1.135 & 1.100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.102 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3.121 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

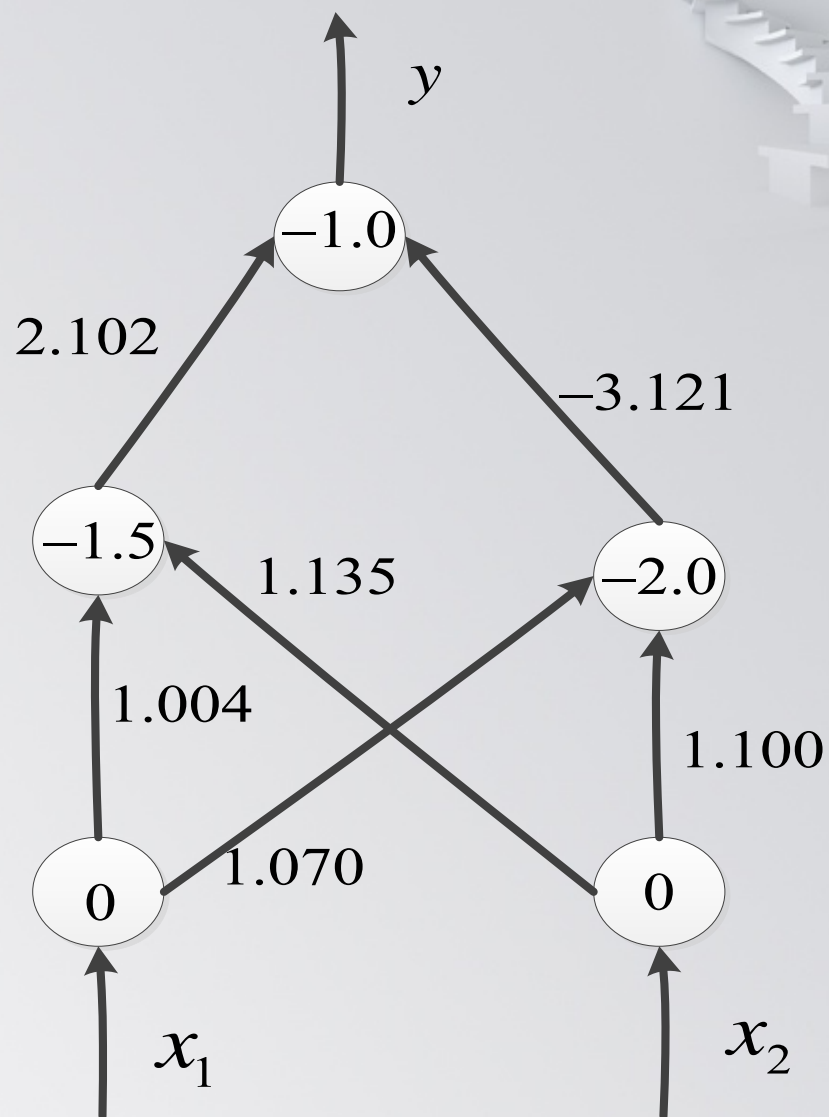


图2-7 “异或”逻辑的神经网络表示

## 2.1 专家系统



如以产生式规则来描述，该网络  
代表了下述4条规则

**IF** ( $x_1 = 0$ ) **and** ( $x_2 = 0$ ) **THEN** ( $y = 0$ )

**IF** ( $x_1 = 0$ ) **and** ( $x_2 = 1$ ) **THEN** ( $y = 1$ )

**IF** ( $x_1 = 1$ ) **and** ( $x_2 = 0$ ) **THEN** ( $y = 1$ )

**IF** ( $x_1 = 1$ ) **and** ( $x_2 = 1$ ) **THEN** ( $y = 0$ )

## 2.1 专家系统



基于神经网络的知识表示方法具有如下优点：

- 1) 具有统一的内部知识表示形式，通过学习程序即可获得网络的相关参数，如分块邻接权矩阵，节点偏移矢量等。任何知识都可变换成数字形式，便于知识库的组织和管理，通用性强。
- 2) 便于实现知识的自动获取。
- 3) 便于实现并行联想推理和自适应推理。
- 4) 能够表示事务的复杂关系，如模糊因果关系。



## 2.1 专家系统

### 3. 推理机

根据问题求解的推理过程中推理的方向，知识推理方法可分为正向推理、反向推理和正反向混合推理三类。

**(1) 正向推理。**正向推理是由原始数据出发，按照一定策略，运用知识库中专家的知识，推断出结论的方法。这种推理方式，由于是由数据到结论，也叫数据驱动策略。

步骤：

- ① 由用户提供一批事实，存放到数据库中。
- ② 用这批事实与知识库中规则的前提事实进行匹配。
- ③ 把匹配成功的规则的结论部分作为新的事实加到数据库中。
- ④ 再用更新后的所有事实，重复②③步，直到结论（答案）出现或不再有新的事实加入到数据库中。



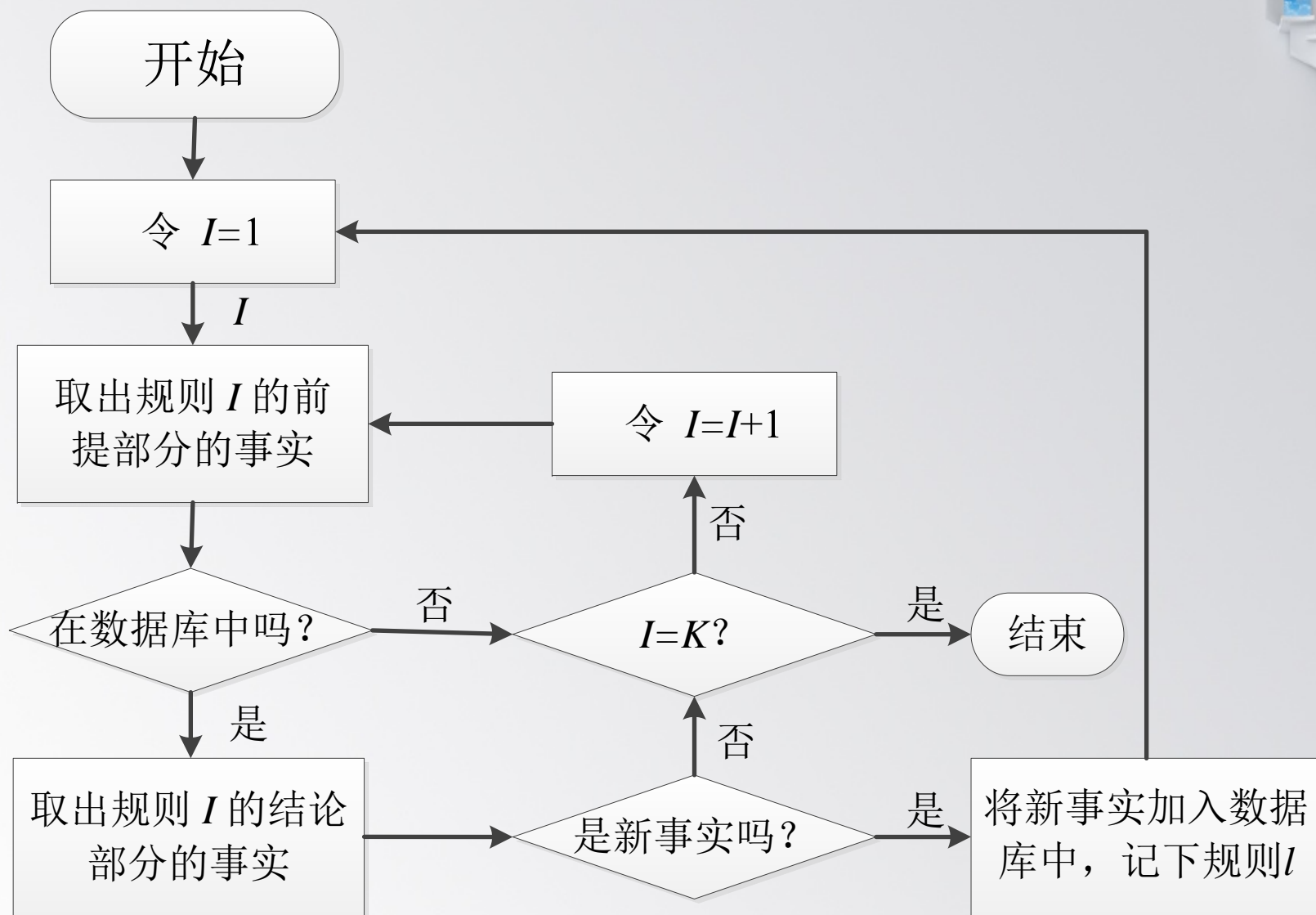


图2-8 正向推理设计示意图

## 2.1 专家系统



(2) 反向推理。反向推理是先提出假设(结论)，然后去找支持这个结论的证据的方法。这种由结论到数据的策略称为目标驱动策略。

步骤：

- ① 验证假设是否在数据中，若在，则假设成立，推理过程结束或验证下一个假设，否则进行下一步。
- ② 判断所验证的假设是否是证据节点，若是，系统就提问用户，让用户来回答；否则，就进行下一步；
- ③ 找出结论部分包含这个假设的那些规则，把它们的所有前提部分的事实都作为新的假设；
- ④ 重复①②③步，直到某一个假设成立为止，或所有的假设都不成立，系统回答FAIL。

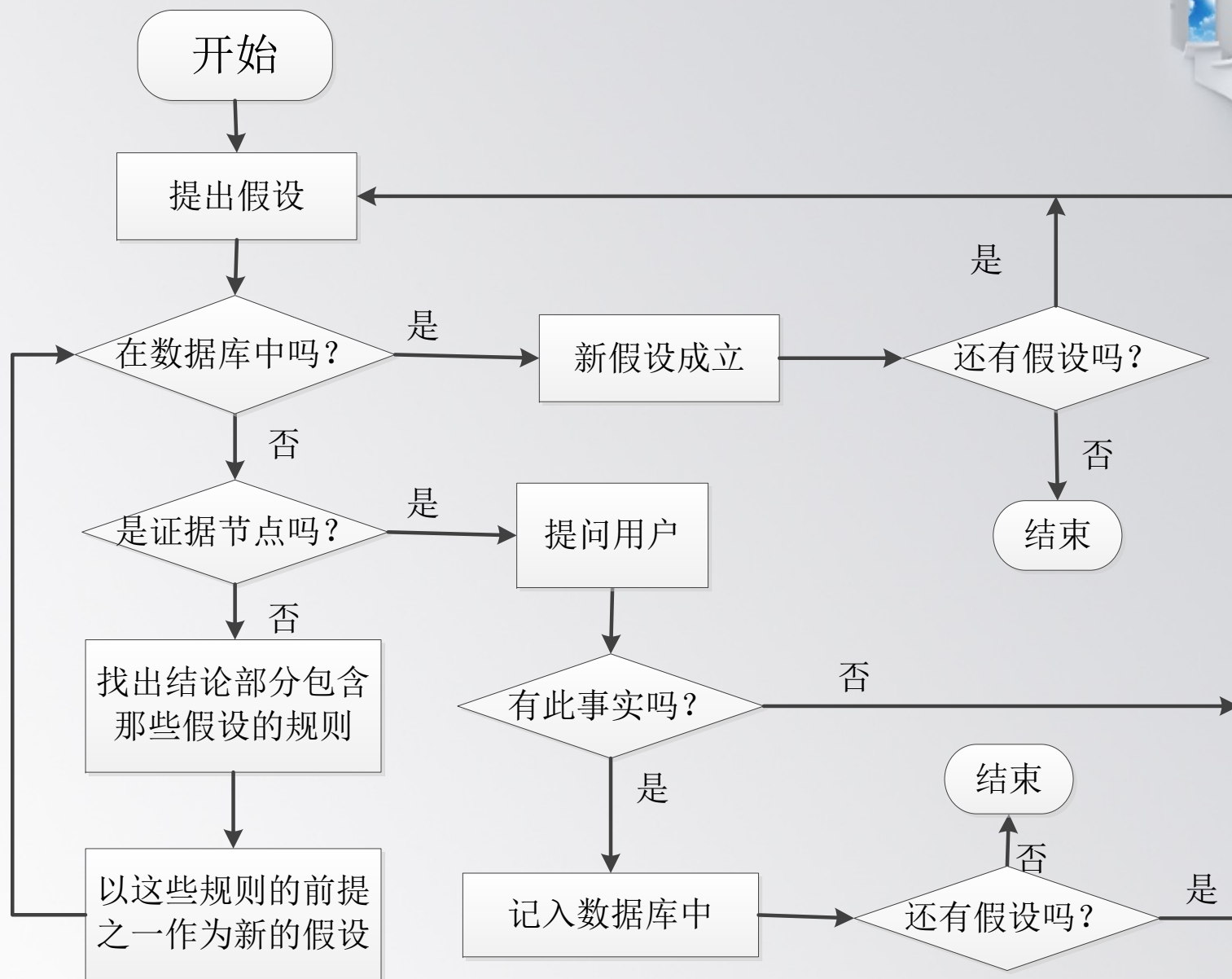


图2-9 反向推理设计示意图

## 逆向推理：

**优点：** 目的性强，不必寻找与假设无关的信息和知识。这种策略对推理过程提供较精确的解释，告诉用户要达到目标所使用的规则（知识）。另外，此控制策略在解空间较小的问题求解环境下尤为合适，它利于向用户提供求解过程。

**缺点：** 初始目标的选择有盲目性，不能通过用户提供的有用信息来操作，用户要求快速输入相应的问题领域，若不符合实际，则要多次提出假设，影响系统效率。

与正向推理相比，反向推理的目的性很强，通常用于验证某一特定知识是否成立。

## 2.1 专家系统



### 4. 专家系统建立步骤

#### (1) 知识库的设计

- ① 确定知识类型：叙述性知识，过程性知识，控制性知识；
- ② 确定知识表达方法；
- ③ 知识库管理系统的设计：实现规则的保存、编辑、删除、增加、搜索等功能。

## 2.1 专家系统



### (2) 推理机的设计

- ① 选择推理方式;
- ② 选择推理算法: 选择各种搜索算法, 如深度优先搜索、广度优先搜索、启发式优先搜索等。

### (3) 人一机接口的设计

- ① 设计“用户—专家系统接口”: 用于咨询理解和结论解释;
- ② 设计“专家—专家系统接口”: 用于知识库扩充及系统维护。



## 4. 专家系统的优良性能

- (1) 专家系统能够高效率、准确、周到、迅速地进行工作。
- (2) 专家系统不受周围环境的影响，也不可能遗漏忘记。
- (3) 可以使专家的专长不受时间和空间的限制。
- (4) 专家系统使各领域专家的专业知识和经验得到总结和精炼。

## 第二章 专家控制



2.1 专家系统

2.2 专家控制

2.3 专家PID控制



## 2.2 专家控制

### 2.2.1 专家控制概述

瑞典学者 K. J. Åström 在 1983 年首先把人工智能中的专家系统引入智能控制领域，于 1986 年提出“专家控制”的概念，构成一种智能控制方法。

专家控制，是将专家系统的理论和技术同控制理论、方法与技术相结合，在未知环境下，仿效专家的经验，实现对系统的控制。

## 2.2 专家控制

专家控制试图在传统控制的基础上“加入”一个富有经验的控制工程师，实现控制的功能，它由**知识库**和**推理机构**构成主体框架，通过对控制领域知识（先验经验、动态信息、目标等）的获取与组织，按某种策略及时地选用恰当的规则进行推理输出，实现对实际对象的控制。

## 2.2 专家控制

### 2.2.2 专家控制的基本原理

#### 1. 结构

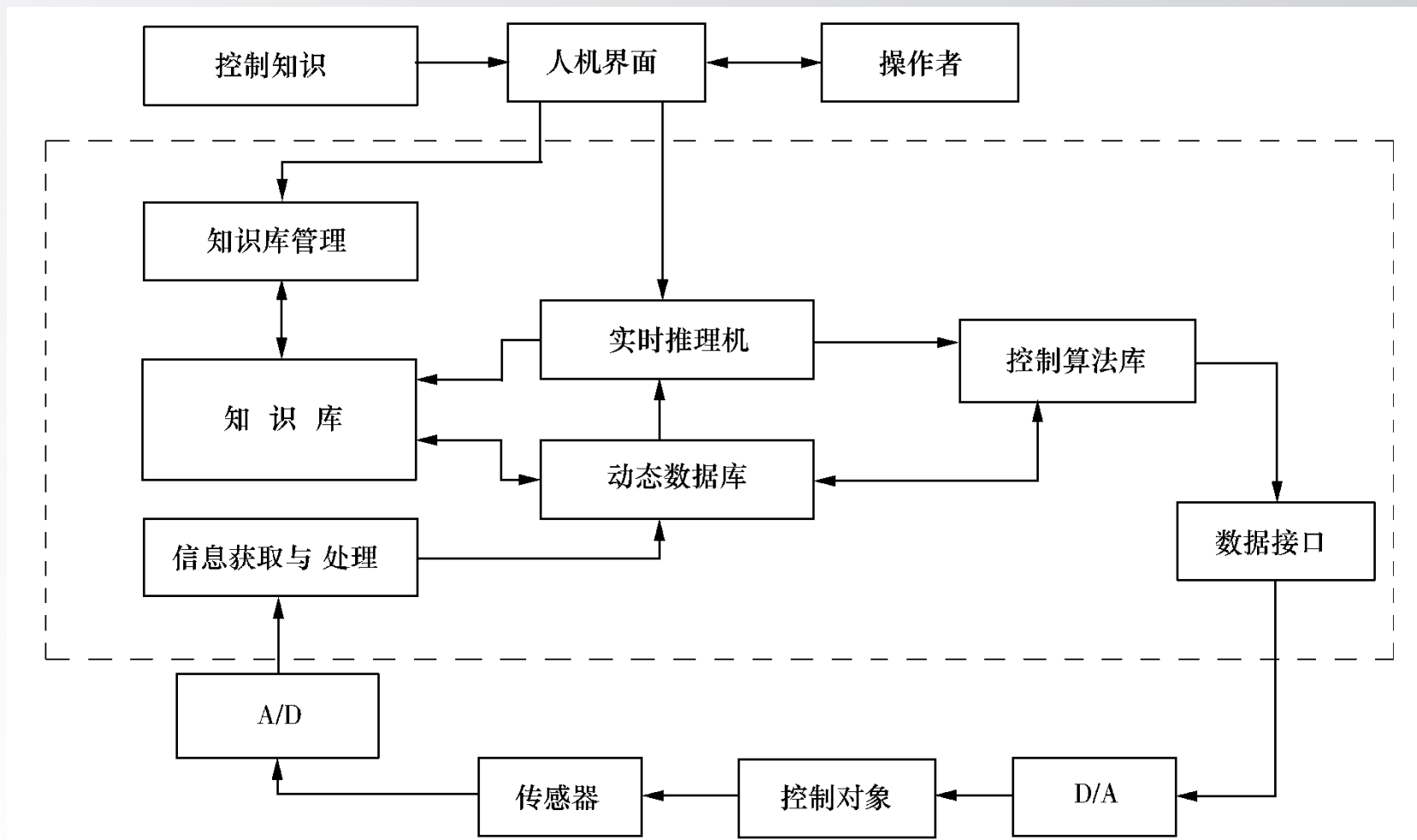


图 2-10 一般专家控制的基本结构

## 2.2 专家控制



### (1) 知识库

由事实集和经验数据、经验公式、规则等构成。

- 事实集包括对象的有关知识，如结构、类型及特征等。
- 控制规则有自适应、自学习、参数自调整等方面的规则。
- 经验数据包括对象的参数变化范围、控制参数的调整范围及其限幅值、传感器特性、系统误差、执行机构特征、控制系统的性能指标以及经验公式。

### (2) 控制算法库

存放控制策略及控制方法，如 PID、PI、Fuzzy、神经网络NC、预测控制算法等，是直接基本控制方法集。

## 2.2 专家控制



### (3) 实时推理机

根据一定的推理策略(正向推理)从知识库中选择有关知识,对控制专家提供的控制算法、事实、证据以及实时采集的系统特性数据进行推理,直到得出相应的最佳控制决策,由决策的结果指导控制作用。

### (4) 信息获取与处理

信息获取是通过闭环控制系统的反馈信息及系统的输入信息,获取控制系统的误差及误差变化量、特征信息。信息处理包括特征识别、滤波等。

### (5) 动态数据库

用来存放推理过程中的数据、中间结果、实时采集与处理的数据

## 2.2 专家控制



### 2. 功能

- (1) 能够满足任意动态过程的控制需要，尤其适用于带有时变、非线性和强干扰的控制；
- (2) 控制过程可以利用对象的先验知识；
- (3) 通过修改、增加控制规则，可不断积累知识，改进控制性能；
- (4) 可以定性地描述控制系统的性能，如“超调小”、“偏差增大”等；
- (5) 对控制性能可进行解释；
- (6) 可通过对控制闭环中的单元进行故障检测来获取经验规则。

## 2.2 专家控制



### 3. 与专家系统的区别

专家控制引入了专家系统的思想，但与专家系统存在区别：

- (1) 专家系统能完成专门领域的功能，辅助用户决策；专家控制能进行独立的、实时的自动决策。专家控制比专家系统对可靠性和抗干扰性有着更高的要求。
- (2) 专家系统处于离线工作方式，而专家控制要求在线获取反馈信息，即要求在线工作方式。



## 2.2 专家控制



### 4. 知识表示

专家控制将系统视为基于知识的系统，控制系统的知识表示如下：

#### (1) 受控过程的知识

- ① 先验知识：包括问题的类型及开环特性；
- ② 动态知识：包括中间状态及特性变化。

#### (2) 控制、辨识、诊断知识

- ① 定量知识：各种算法；
- ② 定性知识：各种经验、逻辑、直观判断。

按照专家系统知识库的结构，有关知识可以分类组织，形成数据库和规则库，从而构成专家控制系统的知识源。



## 2.2 专家控制



数据库包括：事实、证据、假设、目标。

**事实**——已知的静态数据。例如传感器测量误差、运行阈值、报警阈值、操作序列的约束条件、受控过程的单元组态等；

**证据**——测量到的动态数据。例如传感器的输出值、仪器仪表的测试结果等。证据的类型是各异的，常常带有噪声、延迟，也可能是不完整的，甚至相互之间有冲突；

## 2.2 专家控制



**假设——**由事实和证据推导的中间结果，作为当前事实集合的补充。例如，通过各种参数估计算法推得的状态估计等；

**目标——**系统的性能指标。例如对稳定性的要求，对静态工作点的寻优、对现有控制规律是否需要改进的判断等。目标既可以是预定的，也可以是根据外部命令或内部运行状况在线地动态建立的。

## 2.2 专家控制



专家控制的规则库一般采用产生式规则表示：

IF 控制局势（事实和数据） THEN 操作结论

由多条产生式规则构成规则库。

## 2.2 专家控制

### 5 分类

按专家控制在控制系统中的作用和功能，可将专家控制器分为以下两种类型：

- (1) 直接型专家控制器
- (2) 间接型专家控制器

## 2.2 专家控制

### (1) 直接型专家控制器

直接专家控制器用于取代常规控制器，直接控制生产过程或被控对象。具有模拟（或延伸，扩展）操作工人智能的功能。该控制器的任务和功能相对比较简单，但是需要在线、实时控制。因此，其知识表达和知识库也较简单，通常由几十条产生式规则构成，以便于增删和修改。

直接型专家控制器的示意图见图中的虚线所示。

## 2.2 专家控制

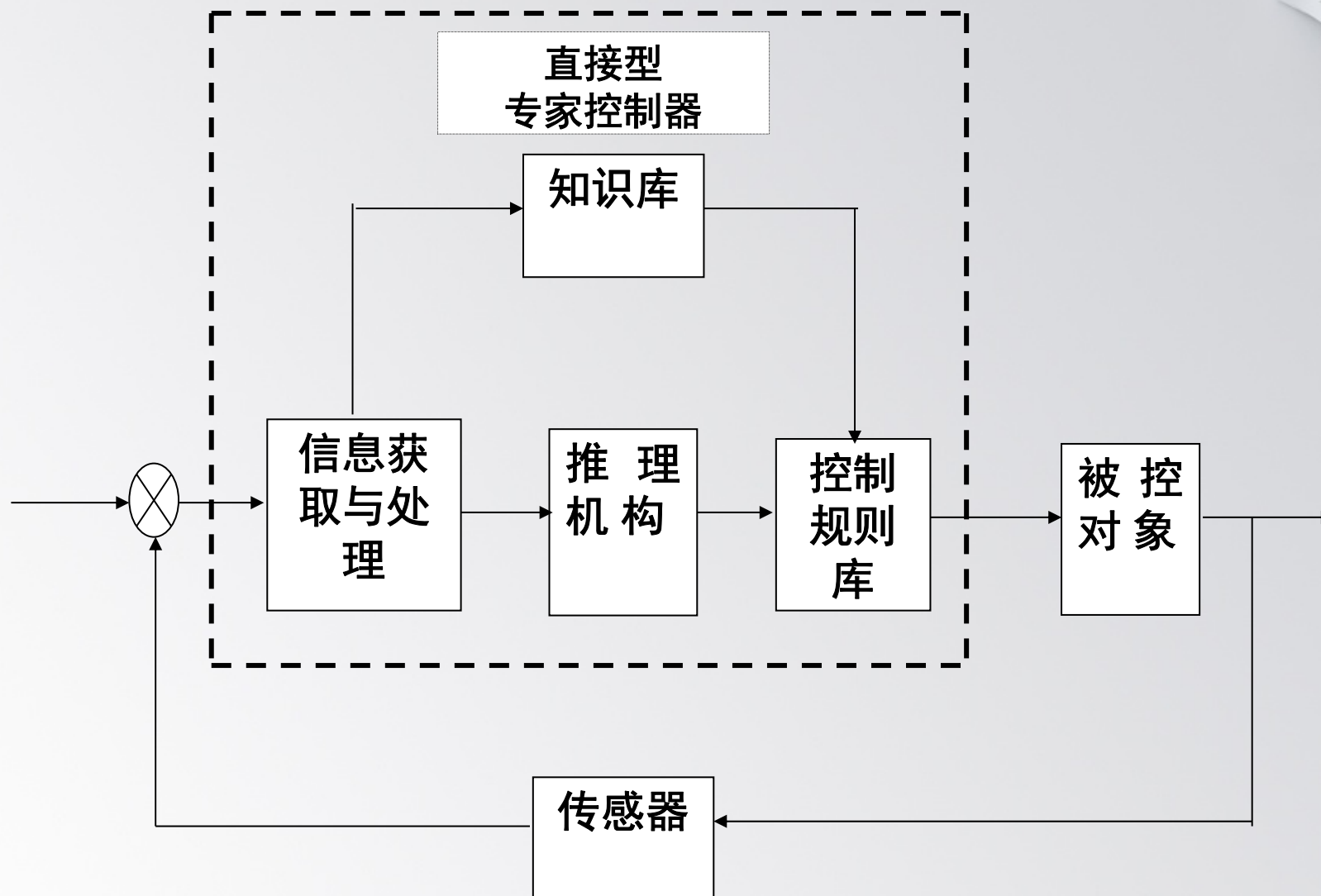


图 2-11 直接型专家控制器

## 2.2 专家控制

### 1) 知识库建立

一般根据工业控制的特点及实时控制要求，采用产生式规则描述过程的因果关系，并通过带有调整因子的模糊控制规则建立控制规则集。

直接专家控制知识模型可用如下形式表示：

$$U = f(E, K, O)$$

其中， $f$ 为智能算子，其基本形式为：

$$\text{IF } E \text{ AND } K \text{ THEN } (\text{IF } O \text{ THEN } U)$$

其中，

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  为控制器输入信息集；

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  为知识库中的经验数据与事实集；

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_p\}$  为推理机构的输出集；

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  为控制规则输出集。

## 2.2 专家控制



### 2) 控制知识的获取

控制知识是从控制专家或专门操作人员的操作过程基础上概括、总结归纳而成的。

控制知识总结为“IF THEN ”形式的启发式规则

### 3) 推理方法的选用

对于简单的知识结构，可采用以数据驱动的正向推理方法，逐次判别各规则的条件，若满足条件执行该规则，否则继续搜索。



## 2.2 专家控制

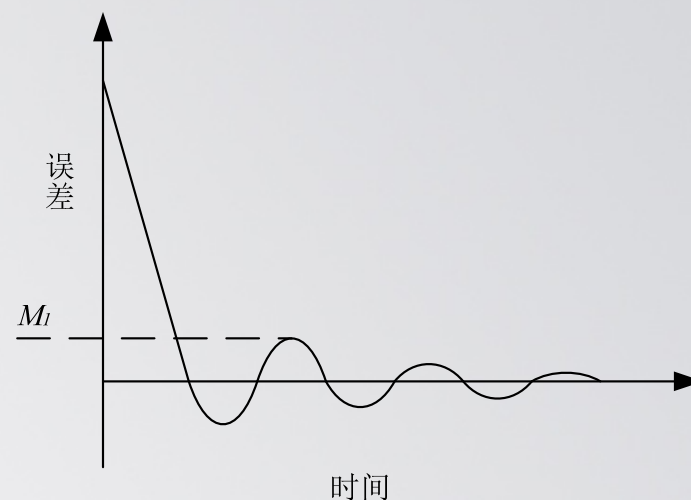
例如一个温度专家控制规则的获取过程如下：

控制输入量为温度给定值与热电偶测量反馈信号的误差，输出量为双向可控硅导通率。

分析误差曲线：

当误差较大时，可以采用开环控制尽快减少误差

当误差较小时，采用PI控制提高精度，优化动态过程



## 2.2 专家控制



### (2) 间接型专家控制器

间接型专家控制器用于和常规控制器相结合，组成对生产过程或被控对象进行间接控制的智能控制系统。具有模拟（或延伸，扩展）控制工程师智能的功能。该控制器能够实现优化适应、协调、组织等高层决策的智能控制。按照高层决策功能的性质，间接型专家控制器可分为以下几种类型：

## 2.2 专家控制



① **优化型专家控制器：**是基于最优控制专家的知识 and 经验的总结和运用。通过设置整定值、优化控制参数或控制器，实现控制器的静态或动态优化。

② **适应型专家控制器：**是基于自适应控制专家的知识 and 经验的总结和运用。根据现场运行状态和测试数据，相应地调整控制规律，校正控制参数，修改整定值或控制器，适应生产过程、对象特性或环境条件的漂移和变化。

## 2.2 专家控制

③ 协调型专家控制器：是基于协调控制专家和调度工程师的知识和经验的总结和运用。用以协调局部控制器或各子控制系统的运行，实现大系统的全局稳定和优化。

④ 组织型专家控制器：是基于控制工程的组织管理专家或总设计师的知识和经验的总结和运用。用以组织各种常规控制器，根据控制任务的目标和要求，构成所需要的控制系统。

## 2.2 专家控制

间接型专家控制器可以在线或离线运行。通常，优化型、适应型需要在线、实时、联机运行。协调型、组织型可以离线、非实时运行，作为相应的计算机辅助系统。

间接型专家控制器的示意图如图所示。

## 2.2 专家控制

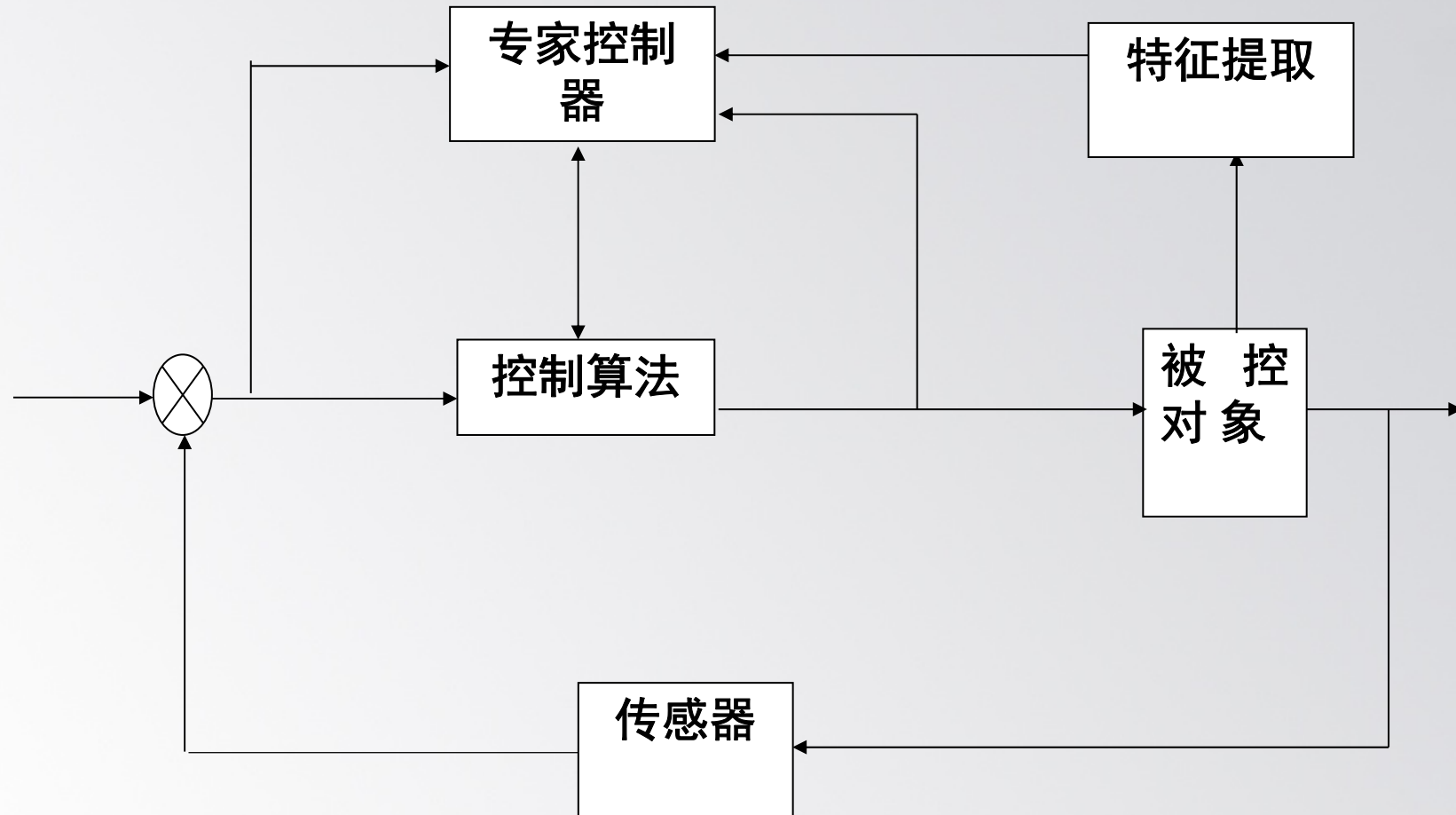


图 2-12 间接型专家控制器

## 2.2 专家控制

### 2.1.3 专家控制的关键技术及特点

#### 1. 专家控制的关键技术

- (1) 知识的表达方法;
- (2) 从传感器中识别和获取定量的控制信号;
- (3) 将定性知识转化为定量的控制信号;
- (4) 控制知识和控制规则的获取。

## 2.2 专家控制



### 2. 专家控制的特点

(1) 灵活性：根据系统的工作状态及误差情况，可灵活地选取相应的控制律；

(2) 适应性：能根据专家知识和经验，调整控制器的参数，适应对象特性及环境的变化；

(3) 鲁棒性：通过利用专家规则，系统可以在非线性、大偏差下可靠地工作。

鲁棒性：是指在环境变化和有外界干扰的情况下，系统能够在保持原有主要功能、特性和组织结构的基础上而正常运转的能力。



## 第二章 专家控制



2.1 专家系统

2.2 专家控制

2.3 专家PID控制

## 2.3 专家PID控制



### 2.3.1 专家PID控制原理

专家PID控制的实质是基于受控对象和控制规律的各种知识，无需知道被控对象的精确模型，利用专家经验来设计PID参数。专家PID控制是一种直接型专家控制器。

典型的二阶系统单位阶跃响应误差曲线如图所示。

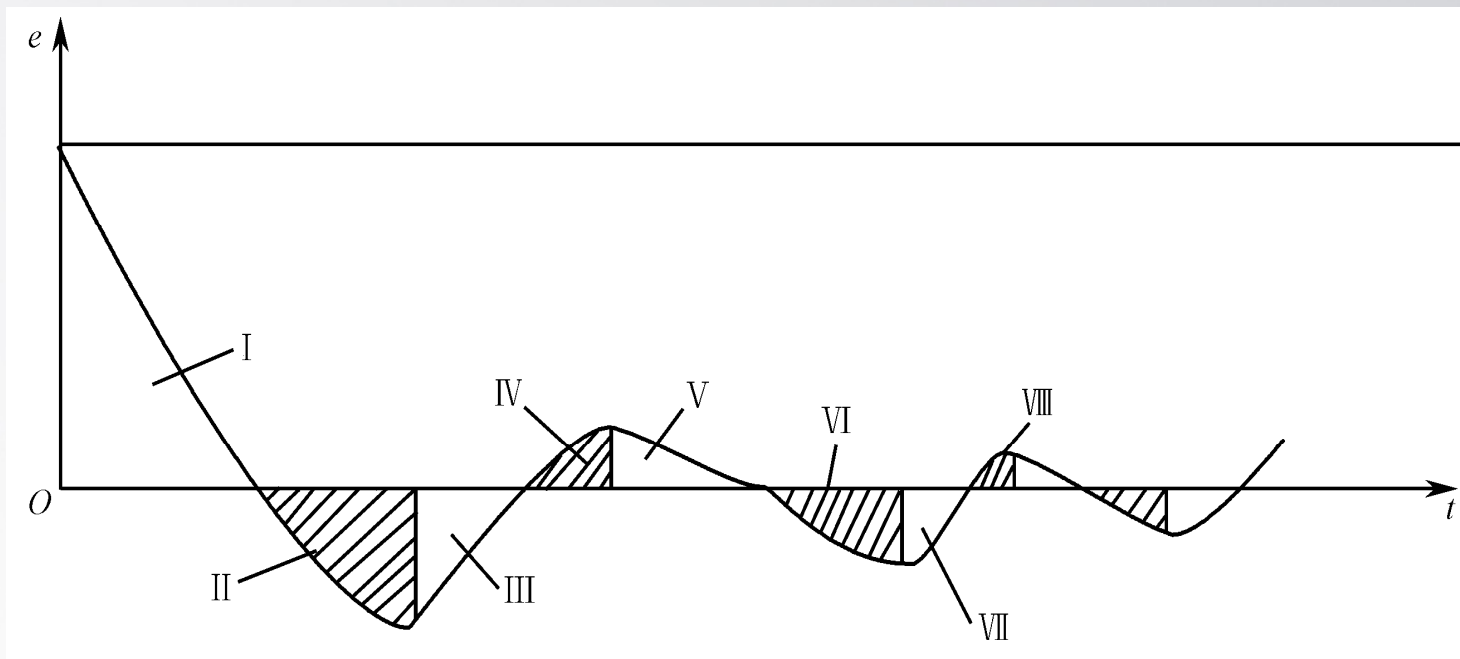



图 2-13 典型二阶系统单位阶跃响应误差曲线




令 $e(k)$ 表示离散化的当前采样时刻的误差值， $e(k-1)$  和 $e(k-2)$ 分别表示前一个和前两个采样时刻的误差值，则有

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$
$$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)$$



根据误差及其变化，可设计专家PID控制器，该控制器可分为以下五种情况进行设计：

(1) 当  $|e(k)| > M_1$  时，说明误差的绝对值已经很大。不论误差变化趋势如何，都应考虑控制器的输出应按最大（或最小）输出，以达到迅速调整误差，使误差绝对值以最大速度减小。此时，它相当于实施开环控制。



(2) 当  $e(k)\Delta e(k) > 0$  或  $\Delta e(k) = 0$  时, 说明误差在朝误差绝对值增大方向变化, 或误差为某一常值, 未发生变化。

此时, 如果  $|e(k)| \geq M_2$ , 说明误差也较大, 可考虑由控制器实施较强的控制作用, 以达到扭转误差绝对值朝减小方向变化, 并迅速减小误差的绝对值, 控制器输出为


增益放大  
系数  $k_I > 1$

$$u(k) = u(k-1) + k_1 \left\{ k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\}$$



如果 $|e(k)| < M_2$ ，说明尽管误差朝绝对值增大方向变化，但误差绝对值本身并不很大，可考虑控制器实施一般的控制作用，只要扭转误差的变化趋势，使其朝误差绝对值减小方向变化，控制器输出为

$$u(k) = u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$



(3) 当  $e(k)\Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) > 0$  或者  $e(k) = 0$  时, 说明误差的绝对值朝减小的方向变化, 或者已经达到平衡状态。此时, 可考虑采取保持控制器输出不变。

(4) 当  $e(k)\Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) < 0$  时, 说明误差处于极值状态。如果此时误差的绝对值较大, 即  $|e(k)| \geq M_2$ , 可考虑实施较强的控制作用。

$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e_m(k)$$

增益放大  
系数  $k_I > 1$

误差  $e$  的  
第  $k$  个极值



如果此时误差的绝对值较小，即  $|e(k)| < M_2$ ，可考虑实施较弱的控制作用。

抑制系数

$$0 < k_2 < 1$$

$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e_m(k)$$

(5) 当  $|e(k)| \leq \varepsilon$  时，说明误差的绝对值很小，此时加入积分，减少稳态误差。

$M_1, M_2$  为设定的误差界限， $M_1 > M_2 > 0$ ；

$k$  为控制周期的序号（自然数）；

$\varepsilon$  是任意小的正实数。

图中，I、III、V、VII、…区域，误差朝绝对值减小的方向变化。此时，可采取保持等待措施，相当于实施开环控制；II、IV、VI、VIII、…区域，误差绝对值朝增大的方向变化。此时，可根据误差的大小分别实施较强或一般的控制作用，以抑制动态误差。

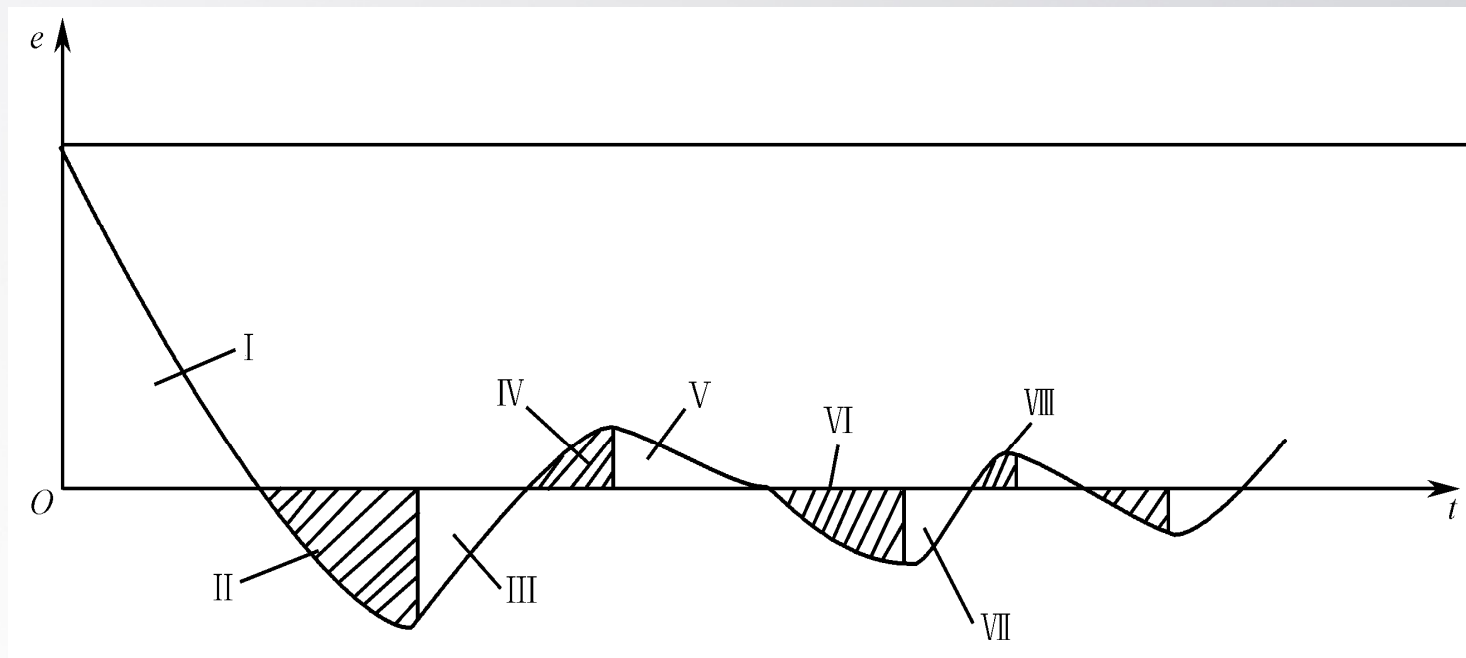


图 2-13 典型二阶系统单位阶跃响应误差曲线

## 2.3.2 仿真程序及分析

### 仿真实例

求三阶传递函数的阶跃响应

$$G_p(s) = \frac{523500}{s^3 + 87.35 s^2 + 10470 s}$$

其中对象采样时间为1ms。

采用专家PID设计控制器。在仿真过程中， $\varepsilon$  取0.001，程序中的五条规则与控制算法的五种情况相对应。

仿真程序：chap2\_1.m

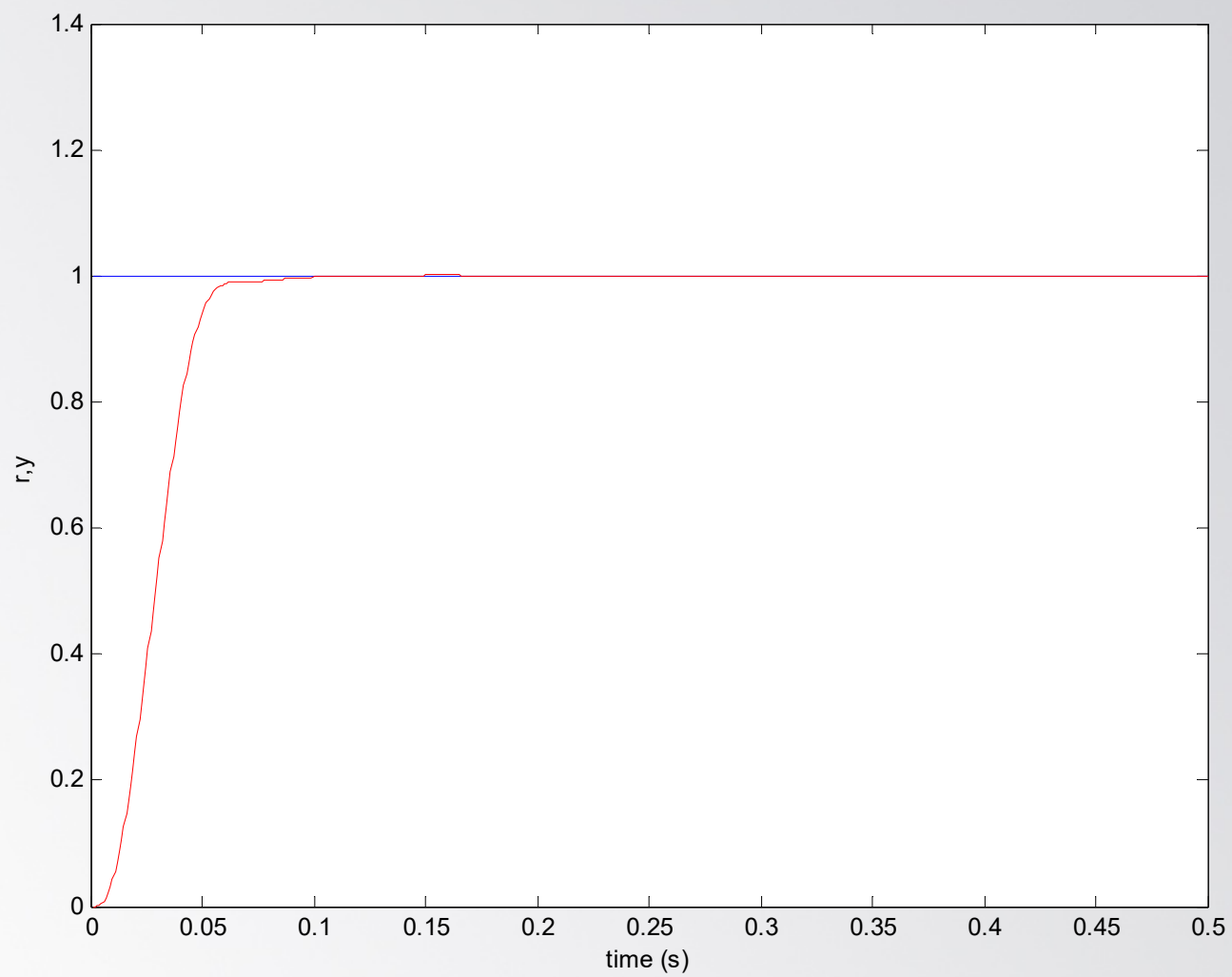


图 2-14 PID控制阶跃响应曲线

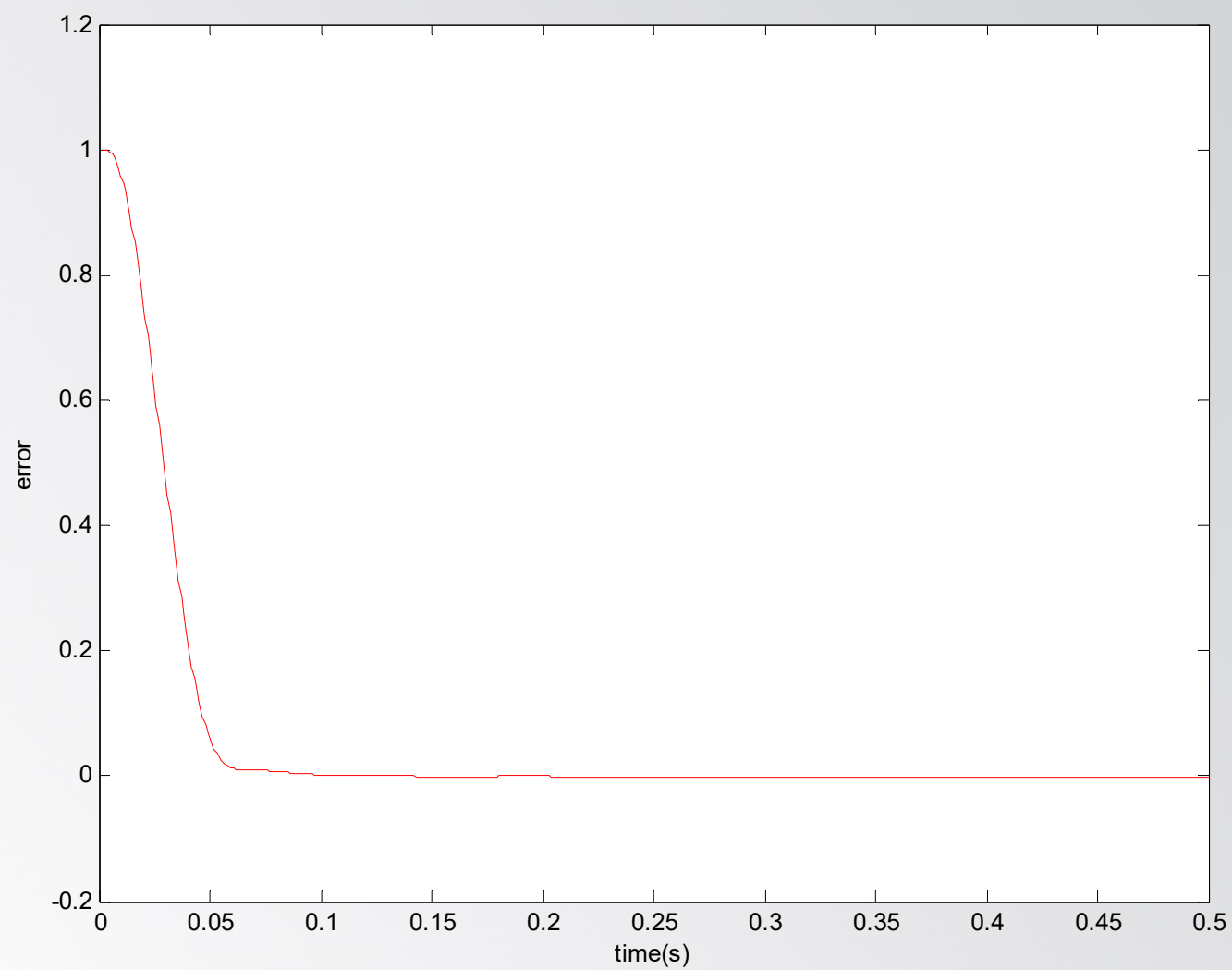


图 2-15 误差响应曲线

# 小结



## 2.1 专家系统

- 专家系统的概述（定义、发展历史、特征、应用）
- 专家系统的构成（知识库、推理机）
- 专家系统的建立

## 2.2 专家控制

- 概述
- 基本原理（结构、功能、与专家系统的区别，知识的表示，分类）

## 2.3 专家PID控制

## 习题

2-3 求二阶传递函数的阶跃响应

$$G_p(s) = \frac{133}{s^2 + 25s}$$

取采样时间为1ms进行离散化。参照专家PID仿真控制程序 chap2\_1.m，设计专家PID控制器，并进行MATLAB仿真。

## 超图 (Hyper Graph) —— [图的扩展](#)

普通图:  $G=(X,E)$ ,  $X$  为点集合,  $E$  为边集合,

边: 两个节点之间的连接称作边

超图:  $H=(X,\hat{E})$ ,  $X$  为点集合,  $\hat{E}$  为超边集合,

超边 (超弧): 超边可以经过任意多的节点

$$X = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$$

$$\hat{E} = \{\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3, \hat{e}_4\}$$

$$= \{\{v_1, v_2, v_3\}, \{v_2, v_3\}, \{v_3, v_5, v_6\}, \{v_4\}\}$$

