

# 专家控制

刘山

浙江大学控制科学与工程学院

# 专家控制

- 专家系统（**Expert System**）使用某个领域专家的经验知识，模仿人类解决专门问题的方法来解决该领域的问题，为人工智能的一个分支。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。
- 应用专家系统概念和技术，模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统即为专家控制系统（**Expert Control System**）。
- 专家控制系统是专家系统与控制理论与技术的结合，是一个基于知识的控制系统（**Knowledge Based Control System**），它应用专家系统技术来解决控制领域的问题。专家控制系统为解决传统控制理论的局限性发挥了重要的作用。
- 1986年Aström发表题为“专家控制”（**Expert Control**）的论文，标志专家控制成为智能控制的一个分支。

# 内容

- 1、专家系统基本概念
- 2、专家控制的结构、类型与设计
- 3、专家PID控制
- 4、专家控制系统应用

# 1、专家系统基本概念

# 专家系统的定义

- 一个智能计算机程序系统，其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验，能够利用人类专家的知识和解决问题的经验方法来处理该领域的高水平难题。
- 一个具有大量的专门知识与经验的程序系统，它应用人工智能技术和计算机技术，根据某领域一个或多个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，以便解决那些需要人类专家才能处理好的复杂问题。
- 一种模拟人类专家解决领域问题的计算机程序系统。
- 专家系统的基本功能取决于它所含有的知识，因此，专家系统称为基于知识的系统（**knowledge-based system**）。

# 专家系统的特点

## ■ 启发性:

- 系统包括专家的专门知识，这些知识是以符号表示和符号操作为特征的启发式知识，并能运用专门的推理方法进行推理，判断和决策。

## ■ 透明性:

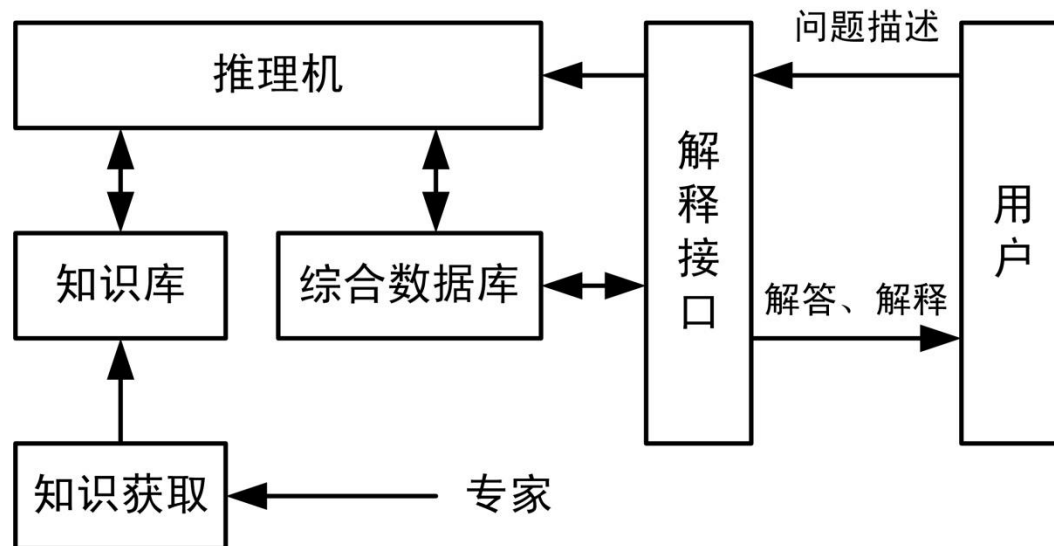
- 能够解释本身的推理过程和回答用户提出的问题，以便让用户了解推理过程，增大对专家系统的信任感。

## ■ 灵活性:

- 能不断增长知识，修改原有知识，进行知识更新，扩展和丰富知识库。即有自学习能力。

# 专家系统的组成

- 知识库 (knowledge base)
- 推理机 (reasoning machine)
- 综合数据库 (global database)
- 解释接口 (explanation interface)
- 知识获取 (knowledge acquisition)



# 专家系统的组成

## ■ 知识库

- 存储专家系统的专门知识，包括事实、可行操作与规则等。

## ■ 推理机

- 解释程序：能够根据知识进行推理和导出结论，而不是简单地搜索现成的答案。
- 调度程序：用于记忆所采用的规则和控制策略的程序，使整个专家系统能够以逻辑方式协调地工作。

## ■ 综合数据库

- 又称全局数据库或总数据库，用于存储领域或问题的初始数据和推理过程中得到的中间数据（信息），即被处理对象的一些当前事实。

## ■ 解释接口

- 能够使系统与用户进行对话的接口，使用户能够输入数据和提出问题并获得答案，了解推理过程。



# 专家系统与常规应用程序间的区别

- 一般应用程序把问题求解的知识隐含地编入程序，把知识组织为两组：数据级和程序级；
- 专家系统把应用领域的问题求解知识单独组成一个实体，即为知识库。知识库的处理是通过与知识库分开的控制策略进行的。专家系统将知识组织成三级：数据、知识库和控制。

# 专家系统应用领域

## ■ 应用领域：

- 解释、咨询、诊断、预测、规划、设计、调试、控制、监视、教学、推理、决策。

## ■ 著名专家系统

- **DENDRAL**有机化学分析专家系统
- **MYCIN**医疗诊断咨询专家系统
- **PROSPECTOR**探矿专家系统

# 知识表示的分类

## ■ 叙述型方法

- 大多数知识可以表示成为一个稳定的事实集合，连同控制这些事实的一组通用过程。
- 优点：
  - 每条知识只须存储一次，而和用不同方法运用这些知识的次数无关。
  - 容易对系统加入新知识而不会改变其他已有知识，也不用改变过程。

## ■ 过程型表示法

- 知识被表示成如何运用这些知识的过程。
- 优点：
  - 容易表达如何去做某件事的知识。
  - 容易表达用简单的叙述型方法较难表达的知识，如缺省推理和概率推理。
  - 容易表达如何有效地做某件事的启发式知识。

- 大多数知识表示法都需要对叙述性知识和过程性知识提供描述方法。

# 知识表示和推理方法

## ■ 知识表示:

- 产生式规则
- 黑板
- 框架
- 谓词逻辑
- 状态空间

## ■ 推理方法:

- 正向推理
- 逆向推理
- 双向推理
- 基于模型的推理

# 产生式规则表示法（一）

- 规则的一般形式为：“条件→行动”或“前提→结论”  
if 条件1 and 条件2 ... and 条件N  
then 结论和动作
  - 在状态空间表示中：条件和行动由前后状态描述
  - 在逻辑推理中：前提和结论
- 条件部分可以是逻辑组合或表达式。行动部分可以是中间结果、最终结果或相应动作。
- 为了表达时间概念，可引入一个时间因子嵌入到规则的条件或结论部分。

# 产生式规则表示法（二）

## ■ 基于规则的系统

### □ 规则库

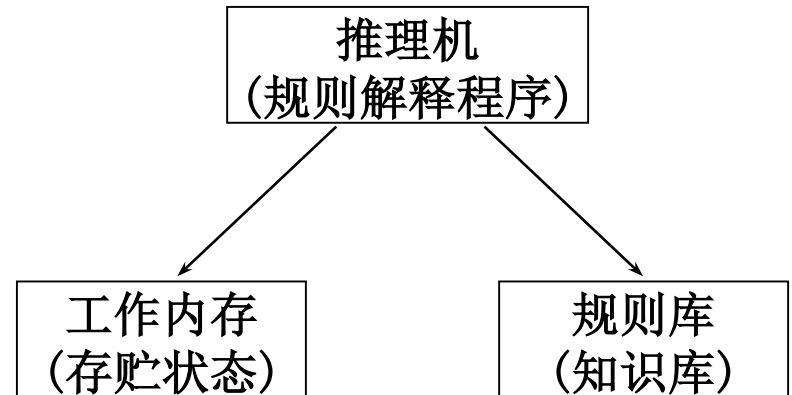
- 存放所有的产生式规则。

### □ 工作内存

- 存贮问题的所有状态，包括问题的初始数据以及推理的中间结果和最后结论。
- 一条规则被启用之前，规则的条件部分必须在工作内存中。
- 规则的执行往往向工作内存加入新的状态或删除、更新工作内存的旧状态。

### □ 推理机

- 执行问题求解的规则解释程序，它确定下一步哪些规则是可用的，按照一定的控制策略，选出一条规则并执行。



# 产生式规则表示法（三）

- 产生式表示法：下述两者的结合构成了基本的产生式系统
  - 用产生式规则描述过程性知识
  - 用全局数据库描述叙述性知识
- 推理机制：
  - 产生式规则不断与数据库中的事实进行匹配，在顺序执行规则的同时就形成推理链。
  - 产生式规则的推理机制是以演绎推理为基础的。

# 产生式规则表示法（四）

## ■ 产生式规则表示法的重要特征

### □ 模块性

- 规则库中的规则是相对独立的，各条规则的相互联系是通过工作内存中状态的变化来间接进行的，因而在建立规则时不必考虑与其它规则的关系，可以独立进行规则的增加、删除和变更等操作；

### □ 可读性

- 在规则库的每条规则都表示一种比较完整的知识，比较容易理解；

### □ 可解释性

- 由于处理的全部过程都是让工作内存的内容依次发生变化来进行的，所以规则的执行过程是明显的，系统可以说明是如何得到结论的。
- 这种说明功能不仅对于让使用者接受专家系统得出的结论是缺不可少的，而且对于为开发者调试知识库也是有用的。

- 通过把专门知识描述成产生式规则，把推理机选择为规则解释程序，使知识表示和知识运用的功能分离。



# 产生式规则表示法（五）

## ■ 产生式系统执行规则

### □ 匹配

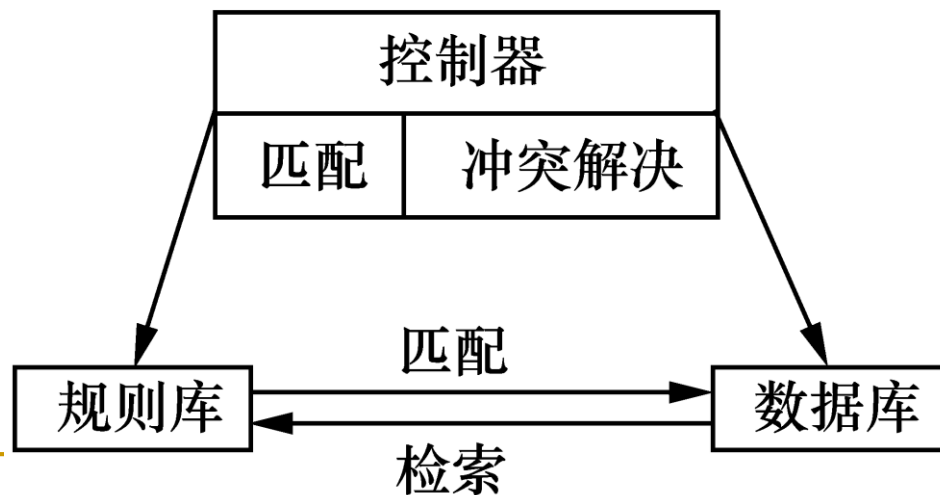
- 规则解释程序将每一条规则的条件部分与工作内存中的状态相匹配，如果两者完全匹配，则该规则可能被激活；

### □ 冲突解决

- 规则的条件部分与工作内存中的状态完全匹配的规则不止一条时，规则解释程序将这些规则选出，构成冲突集，并按一定的冲突解决策略，从冲突集中选出一条规则以便执行。

### □ 执行

- 在这一阶段执行由冲突解决选出的规则。
- 上述三个阶段周期性地进行，直到求出问题的解或不再有规则能被激活为止。



# 产生式规则表示法（六）

- 冲突解决策略根据实际情况选择以下几种方法使用或组合使用。
  - 选择第一个匹配的规则，这需要对所有的规则进行排队，使得某些规则有较高的优先级。
  - 选择条件较多的规则。
  - 选择条件中含有最近生成的状态的规则。
  - 将规则的所有条件按优先级顺序编排起来，首先选择条件部分包含有优先级较高条件的规则。

# 产生式规则表示法（七）

## ■ 前向推理步骤

- 扫描规则库，找出与当前工作内存相匹配的规则，构成冲突集；
- 利用冲突解决策略，由冲突集选出一条规则，执行其行动部分，更新工作内存；
- 根据更新后的工作内存，重复上述两步，直到不再有规则适用或问题得到解决为止。

## ■ 逆向推理步骤

- 验证工作内存中是否有提出的假设，如果有则假设成立，得到最后的推理结果，否则进入下一步；
- 将动作部分包含有该假设的规则找出，若无规则适用则向用户提问该假设，若有一条以上的规则适用，则应按冲突解决策略选出一条规则；
- 将该规则的条件部分设定为下一假设，重复上述两步，验证新的假设，即推理过程表现为递归的形式，直到判明假设是否成立或不再有规则可用为止。

## ■ 双向推理

- 把前向推理和逆向推理结合起来进行。

# 产生式规则表示法（八）

例

规则库

规则编号	If	Then
$R^1$	$A$	$D$
$R^2$	$C \text{ AND } D$	$F$
$R^3$	$F \text{ AND } B$	$Z$

工作内存初始状态

$A, B, C$

前向推理：

反向推理： $Z$ 是否成立？

# 框架表示法（一）

- 一种结构化知识表示法，主要表示叙述性知识的定型状态的数据结构，通常用于描述事物、概念的固定不变的若干方面。
- 框架通常是由框架(frame)名、槽(slot)名、侧面(aspect)名及值(value)四部分组成
  - 顶层固定，表示某个固定的概念、对象或事件，其下层由各个描述方面的槽组成。
  - 一个槽由槽名和槽值予以说明。
  - 每个槽可以按实际情况被一定类型的实例或数据所填充（赋值），所填写的内容称为槽值；
  - 每个槽可有若干个侧面；每个侧面又可有若干个属性值。
  - 槽值有时可以用另外一个框架说明。
  - 相互关联的若干个框架可以连接起来组成框架系统，以表示一个完整的知识。
- 表示与时间相关的知识：
  - 可以将一个过程（一段程序）作为框架的槽值，来描述时序性的知识。
  - 可以在框架中设几个槽来定义与时间有关的属性，如时间格式、时间区间标记和时间值等。

# 框架表示法（二）

## ■ 推理：

- 基于框架的专家系统中可进行默认推理（缺省推理），即在对框架的槽填值或搜索时，默认框架的槽继承了父框架的相应槽值。并在此基础上作进一步的处理和推理，这样可以处理动态变化和干扰环境下不完整的数据输入。

<框架名>

<槽1>	<侧面11>	<值111>	<值121>	...
	<侧面12>	<值121>	<值122>	...
		...		
<槽2>	<侧面21>	<值211>	<值212>	...
	<侧面22>	<值221>	<值222>	...

...

# 框架表示法（三）

- 用框架描述知识时，框架中的槽名和侧面名可以是各种各样的，根据知识的不同而不同。
  - 叙述型知识：值为静态特征信息
  - 过程型知识：值为 “If-needed”、 “If-added”和 “If-removed”等动态特征信息
- 框架常用的推理有继承推理和过程推理。
  - 继承推理：
    - 由于框架系统中常常把共享的信息存放在较高的框架中，这种较高层次的框架称为父辈框架，因而较低层的框架往往可以继承某父辈框架的信息。
  - 过程推理：
    - 由于框架槽的侧面中，可以附加一些过程型的值，这些附加的过程监视着对框架的操作，例如建框架、添加槽、侧面及值等，一旦某一操作发生，即激活对象的附加过程，从而执行一些预定的操作，获得一些未知结果，从而实现过程推理。

# 框架表示法（四）

**例：描述的情况有Tom的姓名、地址、已出版的著作和兴趣。根据框架的一般形式，需要选择姓名(Name)、地址(Address)、已出版的著作(Publiccations)和兴趣(Interests)这四个槽，每个槽设一个值侧面(Value)，填入相关的信息，就可以得到框架**

```
(Tom  
  (Name (Value (Jerry Tom )))  
  (Address (Value (Zhejiang University, 310027)))  
  (Publiccations (Value (Intelligent Control)))  
  (Interests (Value (Industrial Automation)))  
)
```



# 黑板表示法（一）

- 黑板模型是一种功能强大的知识处理结构和问题求解模型，可以处理大量不同的、错误的和不完整的知识，以求解决问题。
- 黑板模型主要由一个具有层次结构的黑板、一套独立的知识源和调度器组成。

# 黑板表示法（二）

## ■ 黑板

- 用于存储所有知识源可访问的知识，它的全局数据结构被用于组织问题求解数据，并处理各知识源之间的通讯问题。

## ■ 知识源

- 专门用于处理一定类型的较窄领域信息或知识的独立程序，而且具有决定是否应当把自身信息提供给问题求解过程的能力。

## ■ 调度器

- 由某个知识源向黑板增添新的信息，触发其它对新送来的信息感兴趣的知識源，执行某些测试过程，以决定它们是否能够被合法执行，最后，一个被触发了的知识源被选中，执行向黑板增添信息的任务。
- 这个循环不断进行下去。

# 黑板表示法（三）

## ■ 黑板模型结构

### □ 黑板：

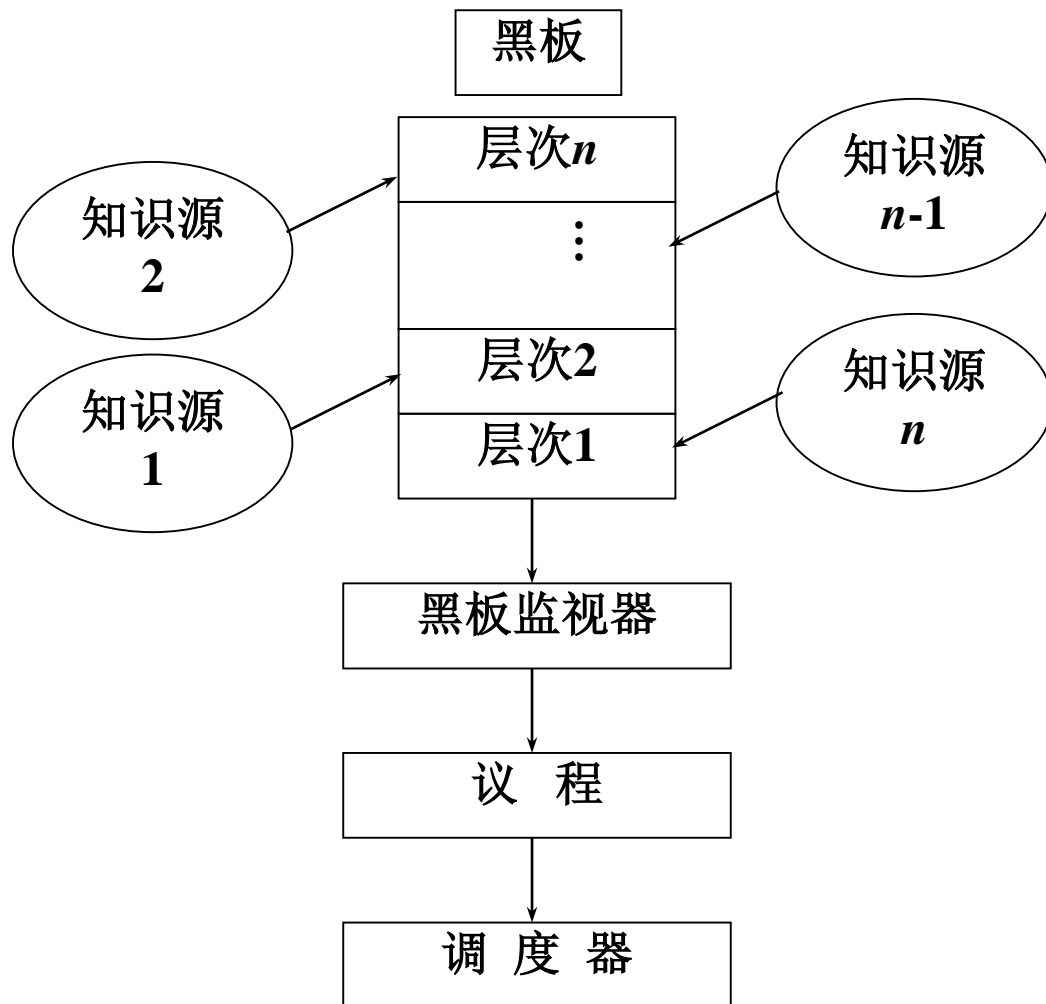
- 共享数据区
- 存储问题空间的状态和中间假设

### □ 知识源：

- 存储各种相关知识
- 可是一个产生式规则的集合，监视着黑板中相应层次的状态

### □ 调度器：

- 控制作用
- 选择最合适的规则来执行



# 黑板表示法（四）

## ■ 黑板模型特征：

- 层次化领域的模型；
- 在各个层次上均有相应的知识源；
- 通过多个知识源的相互结合协同解决问题。

## ■ 黑板系统的优点

- 能够提供解决问题的灵活性以及综合各种知识描述和推理方法的能力。
- 例如，一个产生式系统或基于框架的系统可以作为黑板系统的一部分。

## ■ 推理

- 黑板系统可以提供进行灵活推理的构架。

# 混合表示法

- 包括两种及两种以上表示方法的组合表示法。
- 框架与规则相结合
  - 在规则中包含框架或框架中的槽值，即允许规则的项（条件、结论等）是框架或框架的槽值，当以某种方式使这些框架匹配成功时，就认为该规则成立。
  - 其规则的形式表示为：  
**if 框架实例1 and 框架实例2**  
**then 框架实例n**
- 数学模型与基于规则的技术相结合
  - 知识库中存贮以规则形式表达的经验性知识和大量已成熟的数学模型和方法。
  - 在推理过程中将把数学模型与基于规则的技术有机地结合起来。

# 知识的获取

- 早期专家系统的知识获取工作由知识工程师完成。
- 知识工程师确定知识表示方法，设计知识库结构和知识编辑器。
- 知识库编辑器
  - 借助于人-机接口按一定的数据结构格式直接和专家“对话”，或向专家提出问题，请专家回答或要求专家按规定格式描述自己的知识。
  - 将从专家那里获取的知识通过知识库管理系统填入知识库的结构中。
  - 一般还具有对知识库查询、修改、检验以及更新等编辑功能，用以逐步完善知识库。

# 知识获取过程中引入机器学习

- 学习在知识获取方面的作用主要表现在：
  - 在专家指导下，通过实例训练，完成知识获取工作。（如神经网络模型的表示）
  - 通过在线地对专家系统性能的测试，并按一定的学习规则修改和完善专家系统的知识库，从而不断提高系统的性能。（系统性能判别的准则由专家来提供）
  - 在综合定性模型和定量模型的基础上，抽取和总结高层次的知识来构造专家系统的知识库。（如：定量物理模型是完备的，虽不适合用作专家系统的知识表示，但可以作为专家系统的知识源，从中抽取定性物理模型的知识表示，从而可以用于专家系统的推理过程。）

## 2、专家控制的结构、类型与设计



# 专家控制系统

## ■ 专家控制系统

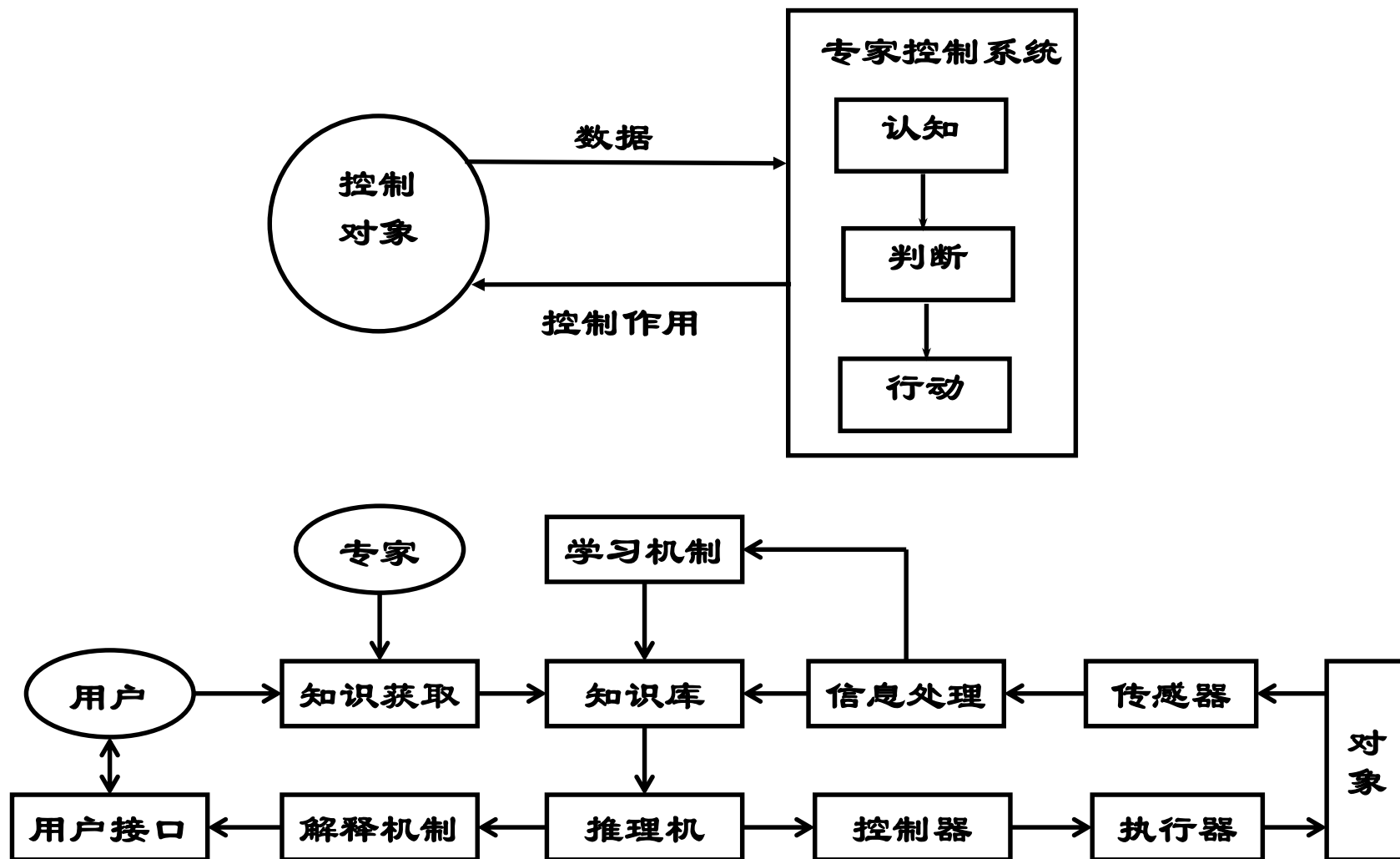
- 应用专家系统概念和技术，模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统。

一般专家系统	专家控制系统
离线工作，对专门领域的问题进行咨询和解释等。	在线工作，定时获取在线信息，进行实时控制。
以知识为基础进行推理，可以得到能够用自然语言描述的结论。	使用基于模型的推理方法，自动地获得相应的控制作用来实现控制功能。

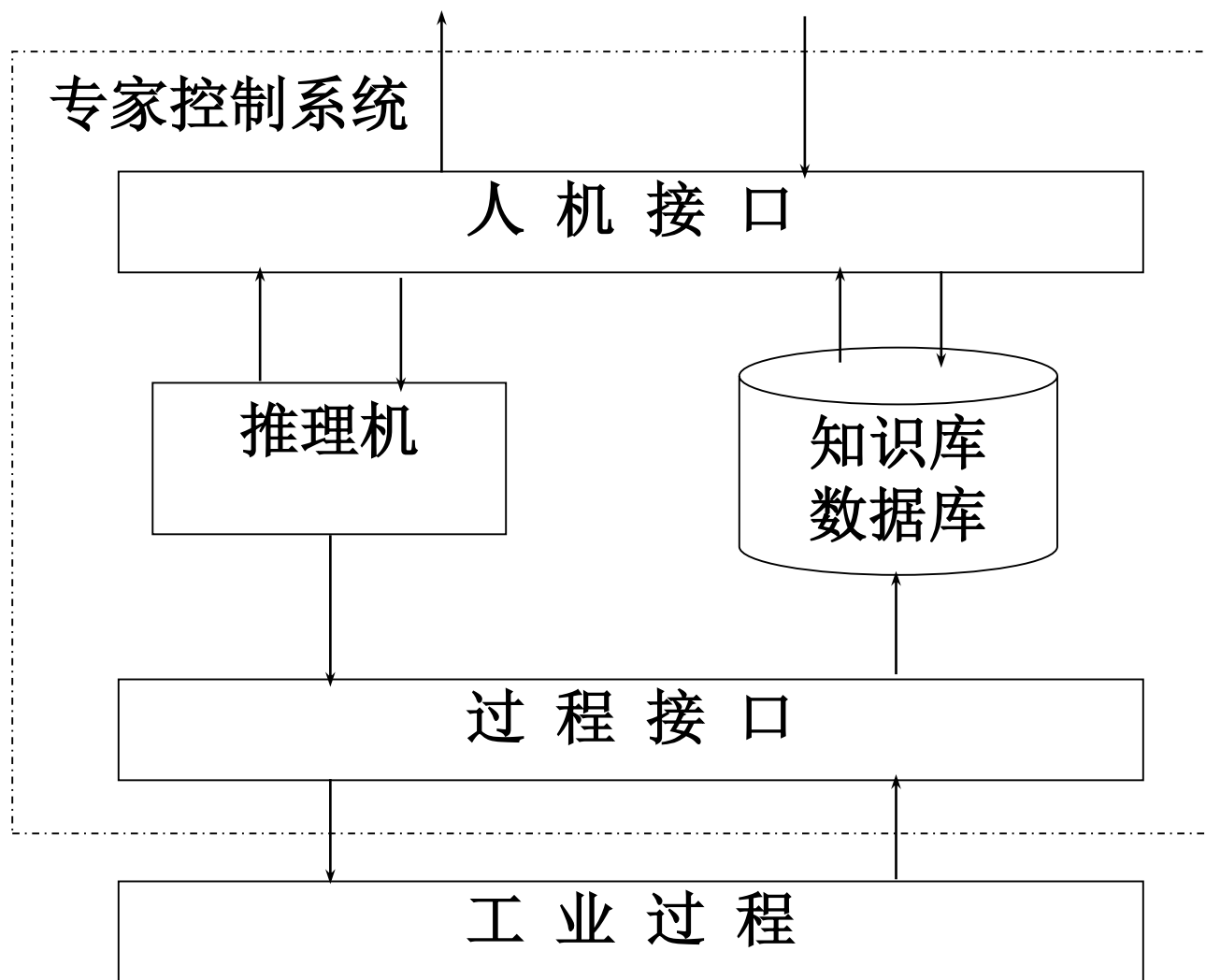
# 专家控制系统的设计原则

- 开放的系统结构
  - 结构和推理过程开放。
- 实时性
  - 要求以实时为前提进行问题求解，具有实时处理功能。
- 运行可靠性
  - 应该具有较高的运行可靠性和监控能力。
- 控制对象的建模
  - 通过建模的过程，可以明确求解问题所需要的知识以及知识的基本结构，能够利用基于模型的推理方法来解决控制问题。
- 与现有系统和控制方式的结合
  - 把专家控制方法与传统控制方法相结合
- 模型描述的多样性
  - 由于专家系统技术能够处理各种定性的与定量的、精确的与模糊的信息，因而控制对象和控制器的模型描述可以采取多样化的形式，可以采用解释模型、模糊模型、规则模型、神经网络等的组合形式。

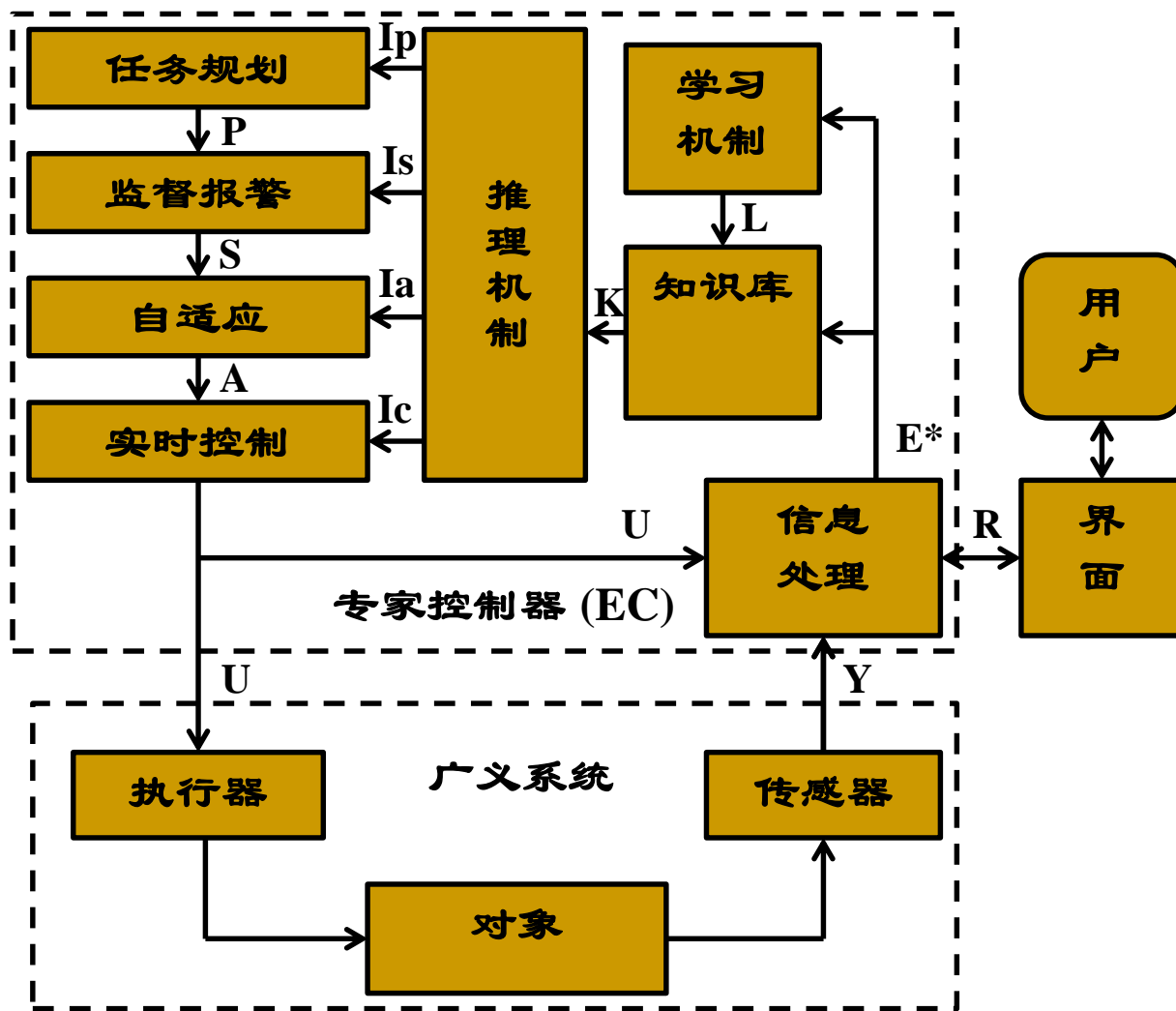
# 专家控制信息处理过程



# 工业过程专家控制系统的结构



# 专家控制的模型结构



$$E = \{e(r, y, u) | r \in R, y \in Y, u \in U\}$$

$$E = R \times Y \times U$$

$E^*$ 是 $E$ 的特征信息

$L$ 是学习机制的输出

$$K = E^* \times L$$

$K$ 是知识库子集输出

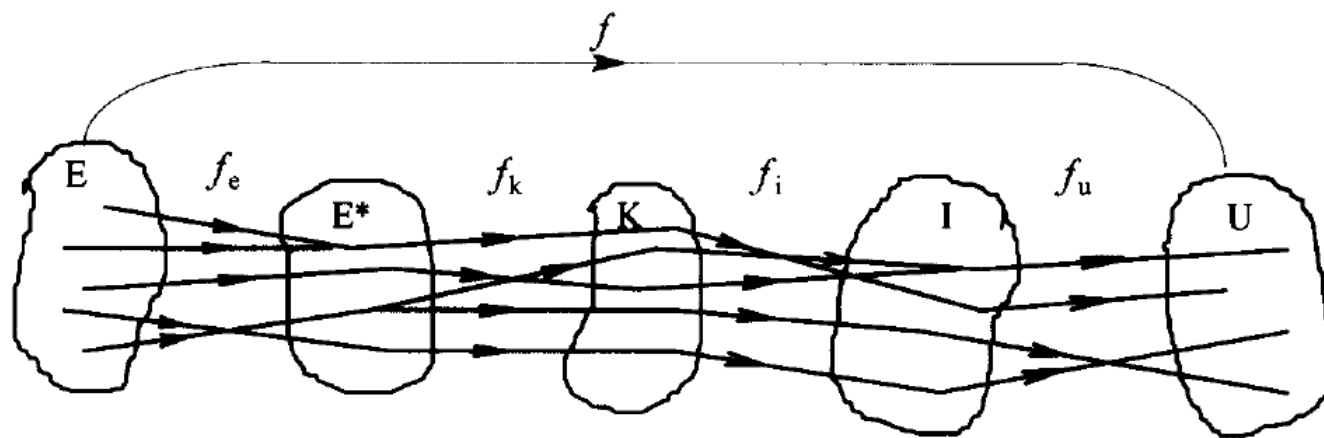
$$I = \{I_p, I_s, I_a, I_c\}$$

$I$ 是推理子集输出

$$U = A \times I_c$$

$U$ 是专家控制器输出

# 控制的推理模型



$$U = f(E)$$

- 专家控制器可看成外部输入数据到控制器输出的映射，为多个算子的复合算子：

$$f = f_u \circ f_i \circ f_k \circ f_e$$

# 控制的推理模型（例）

- 专家控制中的问题求解机制可表示为推理模型

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

其中， $U$ 为控制器的输出作用集，

$E$ 为控制器的外部数据输入集，

$K$ 为系统的知识信息集，

$I$ 为具体推理机构的输出集

- 若选择产生式规则表示法， $f$ 可被看成一种智能算子，其基本形式为：

**IF  $E$  AND  $K$  THEN (IF  $I$  THEN  $U$ )**

- 即根据输入信息 $E$ 和系统中的知识信息 $K$ 进行推理，然后根据推理结果 $I$ 确定相应的控制行为。

# 控制的推理方式

- 专家控制往往带有模糊性、不确定性和不完全性，因此专家控制的推理计算过程也具备某种不确定性。
- 演绎推理：
  - 把前提所具备的可信度完全转移到结论上去。如果把领域知识表示成必然的因果关系，则按逻辑关系进行的推理所得的结论是肯定的。
  - 前提与结论具有相同的可信度。
- 归纳推理：
  - 把前提所具有的可信度部分地转移到结论上去，从而推出一个比前提可信度低的结论。
  - 可以从个别的事物和现象推出普遍性规律。
- 不确定性推理：
  - 针对不确定的事实，根据不充分的论据和不完全的知识进行推理，是在条件检索和执行推理的基础上加入对不确定性知识的处理，例如Bayes概率法。

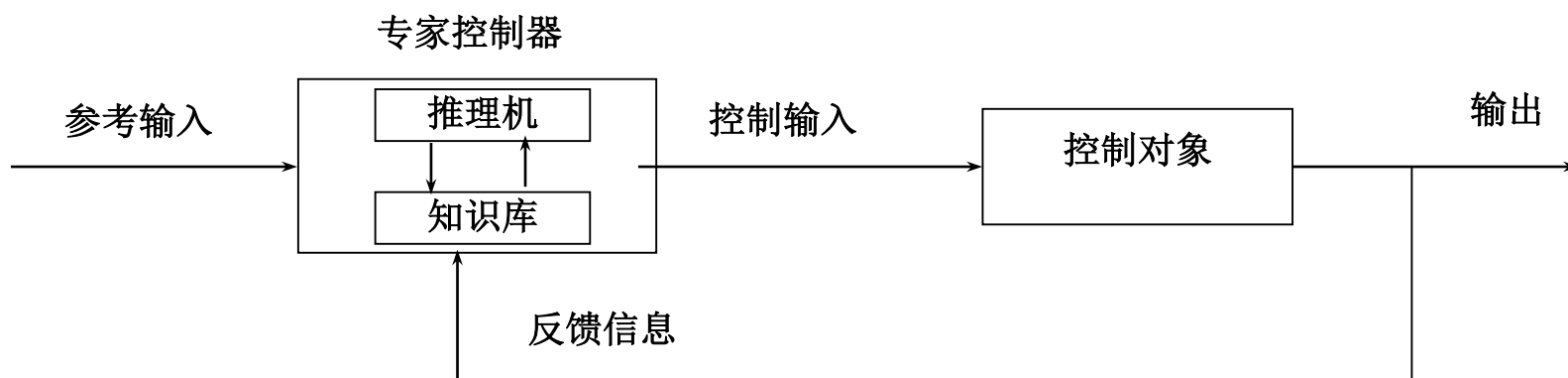


# 专家控制系统的类型

- 根据系统结构的复杂性把专家控制系统分为
  - 专家控制系统
  - 专家控制器
- 以专家控制器在整个系统中的作用为基础分为
  - 直接专家控制系统
  - 间接专家控制系统

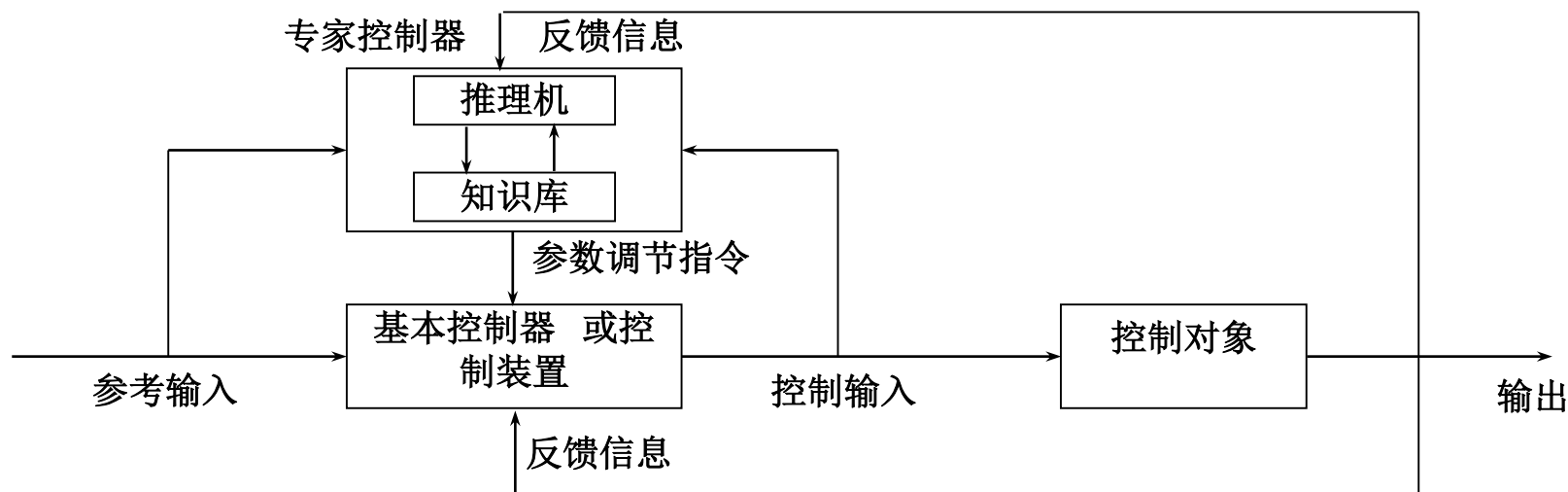
# 直接专家控制系统

- 专家控制器向系统提供控制信号，并直接对受控过程产生作用。



# 间接专家控制系统

- 直接作用于控制对象的是基本控制器或控制装置，专家控制器则用于调节基本控制器或控制装置参数，对控制系统起间接作用



# 直接专家控制系统与间接专家控制系统的异同

## ■ 区别在知识的设计目标上

### □ 直接专家控制系统

- 基于知识控制器直接模仿人类专家或人类的认知能力，将控制误差直接映射为受控对象的作用。

### □ 间接专家控制系统

- 专家系统用于调整常规控制器的参数。
- 监控受控对象的某些特征（如超调、上升时间和稳定时间等），然后拟定校正常规控制器参数（如PID参数）的规则，以保证控制系统处于稳定的和高质量的运行状态。

## ■ 相同点是控制器设计均有两种方式

- 离线训练：基于经验、知识和离线数据，训练生成规则，用于系统的启动。
- 在线学习：在线运行过程中，积累专家的控制经验或根据运行的数据学习得到动态规则，用于系统的改进。

# 专家控制系统的选择

- 根据应用场合和控制要求的不同，可以设计和应用不同类型的专家控制器。
  - 对于具有不确定性、非线性以及非精确和不完全信息的比较简单的控制过程（装置），可以采用一般的工业专家控制器。
  - 对于比较复杂的控制过程（装置），应当采用专家控制系统，如黑板专家控制系统等。

# 工业专家控制器

## ■ 知识库：

- 专家控制器的基础。
- 存放工业过程控制的领域知识，由经验数据库和学习与适应装置组成。
- 经验数据库主要存储经验和事实。
- 学习与适应装置的功能就是根据在线获取的信息，补充或修改知识库内容，改进系统性能，以便提高问题求解能力。

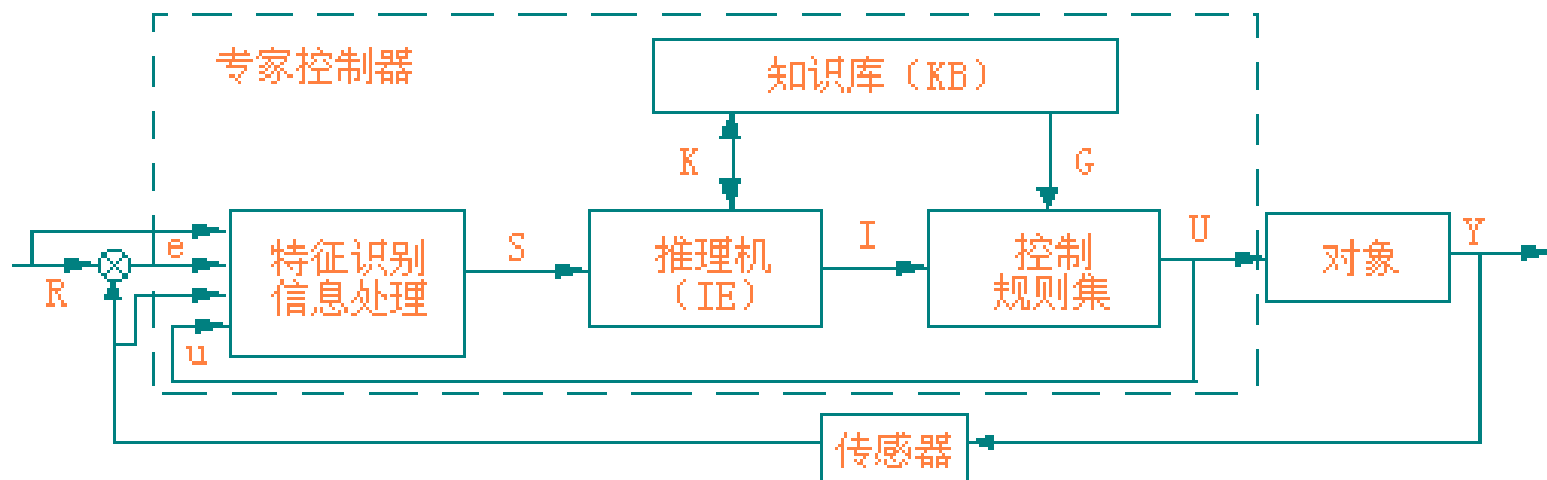
## ■ 控制规则集：

- 对受控过程的各种控制模式和经验的归纳和总结。

## ■ 特征识别与信息处理：

- 实现对信息的提取与加工，为控制决策和学习适应提供依据。
- 主要包括抽取动态过程的特征信息，识别系统的特征状态，并对特征信息作必要的加工。

# 工业专家控制器简化结构图



- 专家控制器的输入集为:  $E = (R, e, Y, U)$
- $e = R - Y$ ,
- $R$ 为参考控制输入,
- $e$ 为误差信号,
- $Y$ 为受控输出,
- $U$ 为控制器输出
- $S$ : 特征信息输出集
- $K$ : 规则库修改集
- $I$ : 推理机构输出集

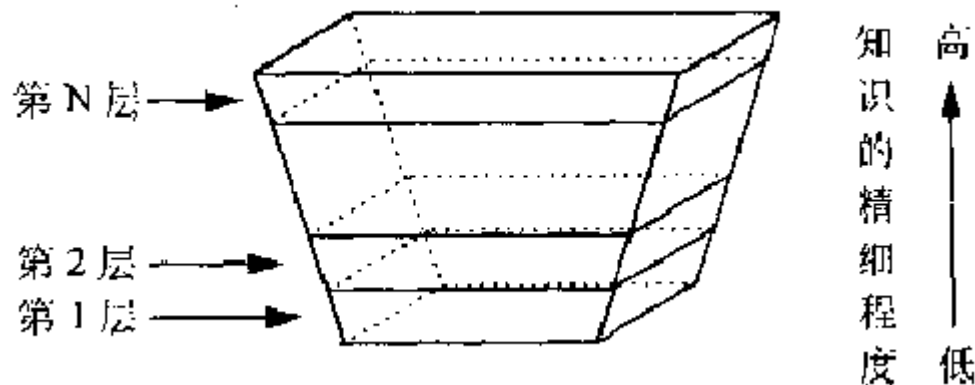
# 专家控制器的设计原则

- 专家控制器对被控过程或对象进行实时控制，必须在每个采样周期内都给出控制信号，所以对专家系统运算（推理）速度的要求是很高的。
- 在设计上应遵循以下两条原则：
  - 提高专家系统的运行速度。
    - 硬件，工具软件，知识库设计，推理机设计
  - 确保在每个采样周期内都能提供控制信号。
    - 专家控制器在每个采样周期的有限时间内，必须首先要解决控制信号的有无问题，然后才考虑解决控制信号的质量高低问题。



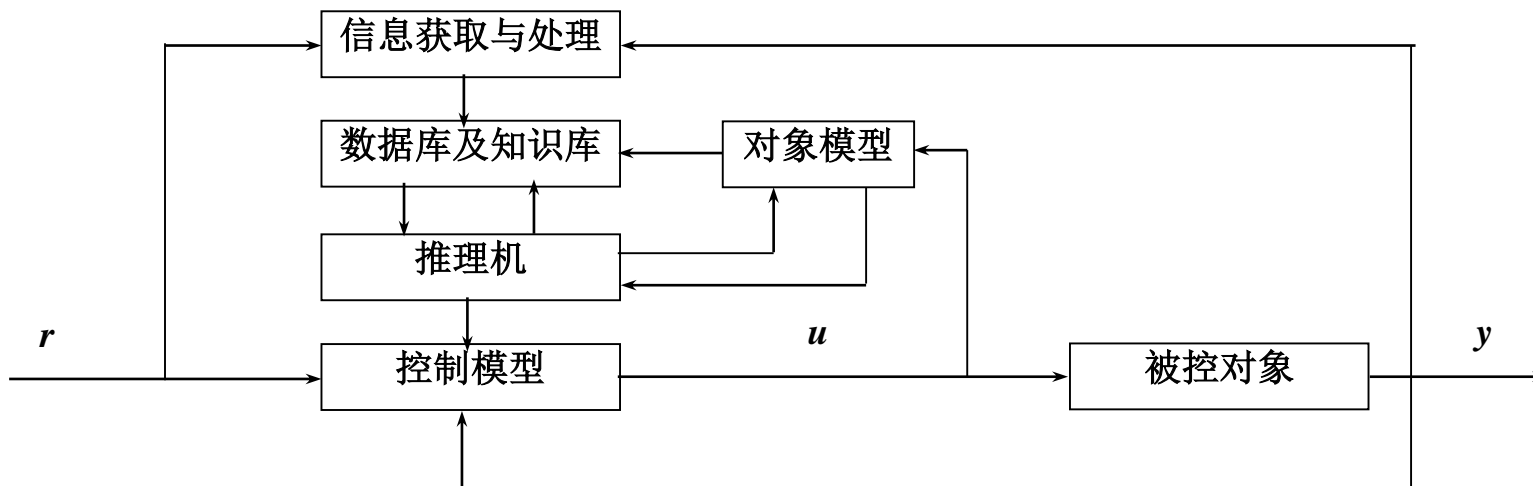
# 专家控制器的逐步推理法

- 采用逐步推理方法，逐步地改善控制信号的精度。
- 逐步推理方法将专家的知识分成不同的知识层，不同层知识求解不同精度的解。这样在推理过程中，随着推理机运用的知识层的提高，逐步改善问题的解。
- 保证在每个采样周期内运用最低层知识获取较粗糙的解。
- 每个知识层分别建立相应的知识库的一个子库。
- 推理机推理时，首先运用第一个知识层的知识子库进行搜索，获得一个较粗糙的解。确保在一个采样周期内可以完成搜索过程，保证有控制信号产生。然后，若该采样周期尚未结束，推理机再逐步运用具有更高一层知识层的知识子库进一步搜索，逐步获得更精确的解。

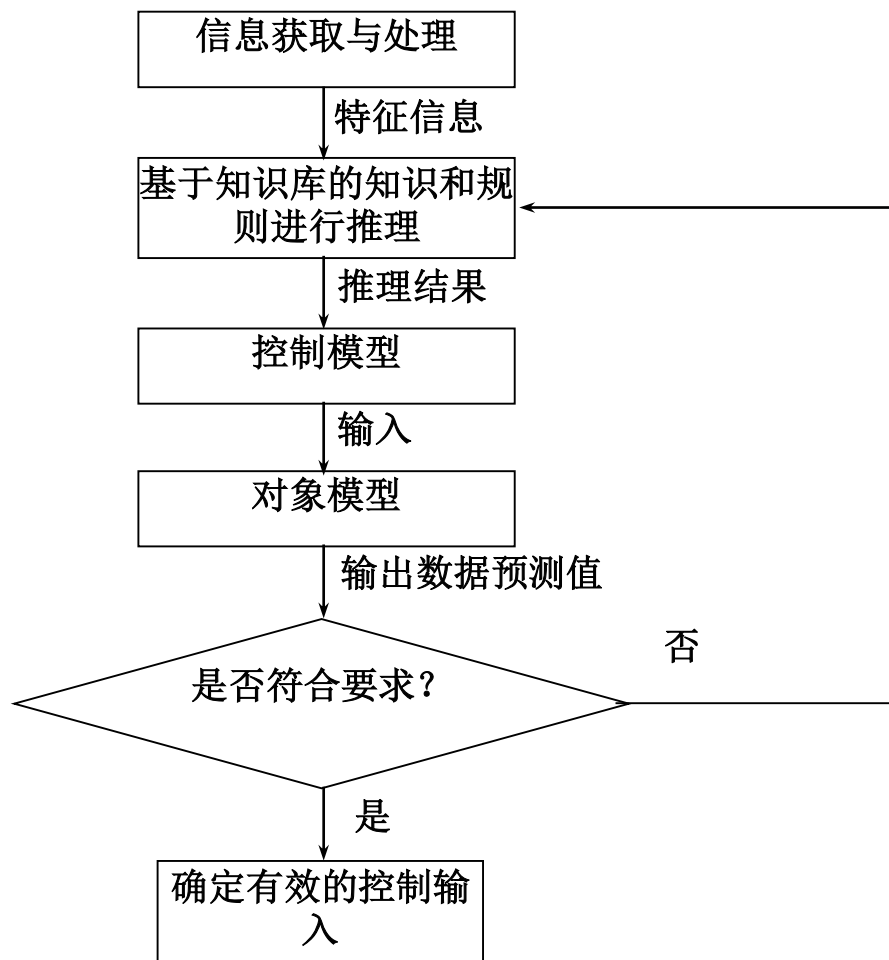


# 基于模型的专家控制系统

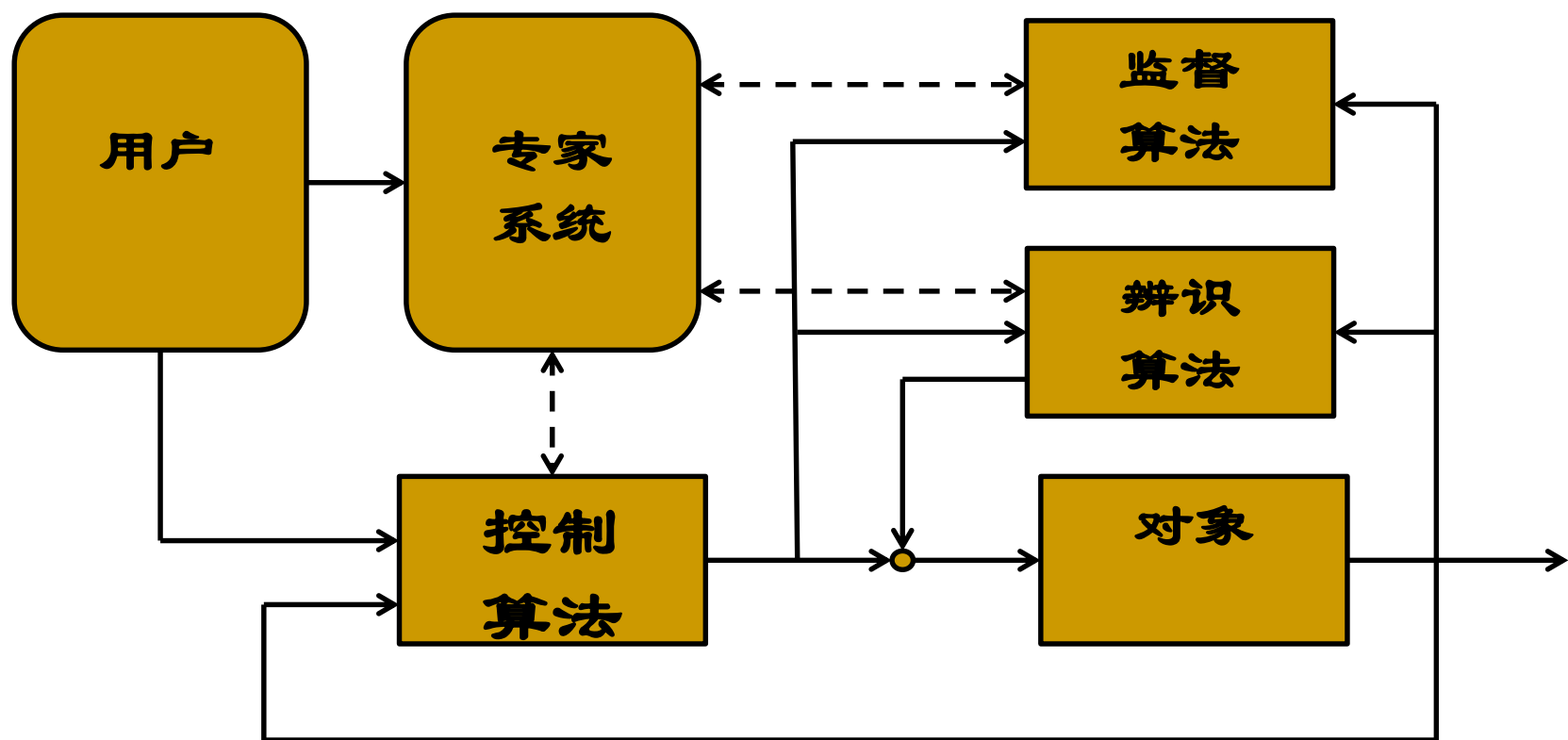
- 此类专家控制系统提供了专家系统结合其它技术（如神经网络，模糊模型）的能力。



# 基于模型的专家控制系统推理过程



# 专家控制系统的一种框图



# 专家控制的一个例子（一）

- 在实际控制系统中，核心的控制算法只是其中一部分，一般还需要许多其它的逻辑控制。

$$u(t) = k \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(s) ds + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

- **PID调节器需要考虑许多实际应用问题**

- 操作员接口，手动与自动的平滑切换
- 参数变化引起的过渡过程
- 非线性执行机构的影响
- 积分项的累积效应
- 控制量幅值限制

操作模式  
选择

输入信号  
滤波

幅值监视  
与报警

程序切换

PID

输入输出  
限制

异常情况  
操作

输出信号  
处理

抗积分饱  
和

# 专家控制的一个例子（二）

## ■ 对象模型：差分算子模型

$$Ay(t) = Bu(t) + Ce(t)$$

## ■ 最小方差控制

$$Ru(t) = -Sy(t)$$

其中  $R$  和  $S$  均为  $q$  的多项式，且满足关系式

$$z^{d-1}CB = AR + BS$$

其中  $d$  为系统的时延拍数

$$d = \deg A - \deg B$$

# 专家控制的一个例子（三）

## ■ 功能

### □ 纹波监测器

- 由于最小方差控制器要抵消控制对象的零点，因此要求控制对象为最小相位，即无零极点在单位圆外。
- 如果系统的零点很靠近单位圆周，则系统的响应中也将会出现纹波现象，可通过增大 $d$ 来消除纹波现象。

### □ 最小方差监控

- 监测系统是否处于最小方差控制的状态，可以通过计算系统输出的相关函数来判别。

### □ 自校正调节器

- 若缺乏精确模型，可改用自校正调节器。在一定条件下设计的自校正调节器可以收敛到最小方差控制器。

### □ 参数估计器

- 为实现自校正调节，必须引入参数估计器。

### □ 激励监测器

- 为获得准确的参数估计，必须有足够的激励。

# 专家控制的一个例子（三）

## □ 扰动信号发生器

- 没有足够的激励时，用于产生在感兴趣范围内的具有适当强度的扰动信号。

## □ 参数跳变监测器

- 对于不变或缓慢变化的过程参数，一般的估计算法能较好地估计出参数，对于参数突变的情况，参数估计必须重新初始化并重新估计。

## □ 稳定性监测器

- 在线调整采样周期时，监测系统稳定性。

## □ 阶次监测器

- 通过计算协方差函数可确定控制器中算子的多项式是否已经足够大。

## □ 关键增益和时延时间估计器

- 估计系统临界振荡时的增益和临界振荡周期的差从而计算时延时间。

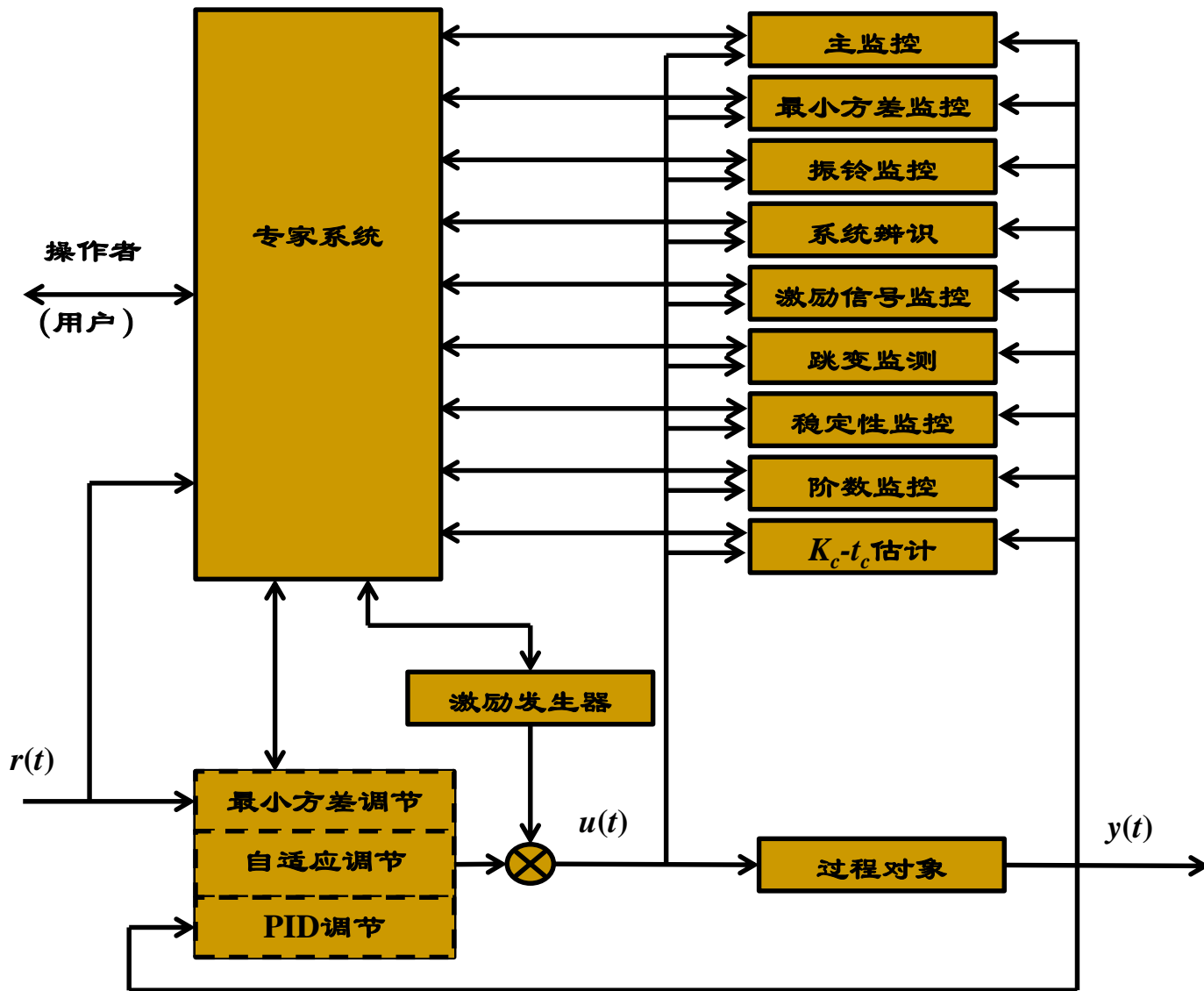
## □ PID备用控制

- 若系统远离最优点时仍能对过程进行控制。

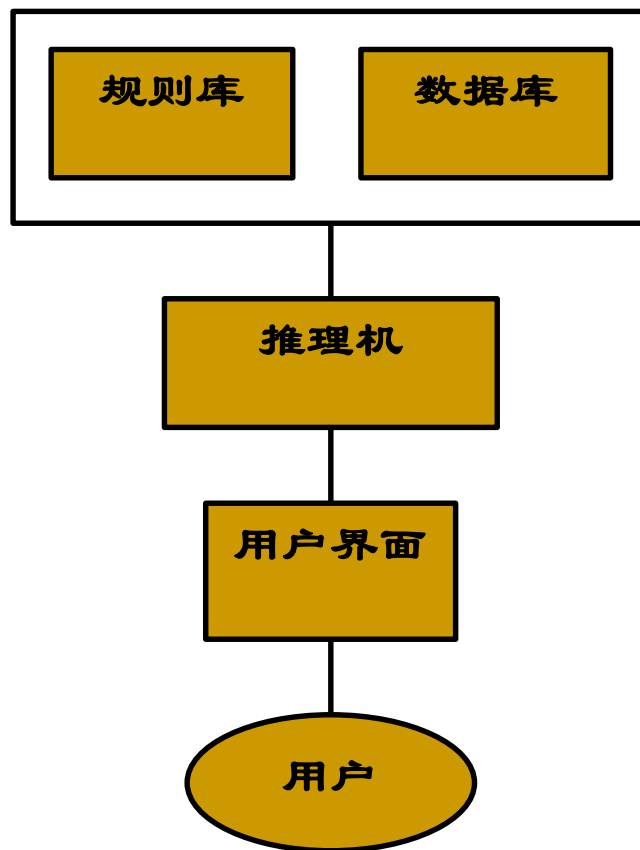
## □ 主监控器

- 监视系统的全局性能。





# 专家控制的架构



# 专家控制的一个例子（四）

## ■ 系统的数据库

- 系统的数据库用于存储当前的过程数据，以支持专门功能的检测和学习。
- 由事实，证据，假设和目标所构成的静态数据和动态数据均被存储在数据库中。
- 这些数据按性质划分的类型不同被分别存储在不同的数据平面上，这些平面是系统运行的知识源。
- 事件表和假设表是数据库中最重要两个数据平面。

# 专家控制的一个例子（五）

## ■ 事件表（框架）

稳定性监控器数据的事件表

Time	$\bar{u}$	$\bar{y}$	$\sigma_u$	$\sigma_y$	Stable	Regulator-type	...

PID控制模态使用的事件表

$K_c$	$t_c$	$P$	$I$	$D$

常增益最小方差控制使用的事件表

$N_R$	$N_S$	$d$	$h$	$P$	$I$	$D$

参数估计使用的事件表

Time	OC	Perturb	$h$	$d$	$N_R$	$N_S$	$P$	$I$	$D$

# 专家控制的一个例子（六）

- 假设表
  - 假设是以过程状态为条件导出的实际认识。
  - 假设表的组织结构常常采用分离的层次形式。
  - 较低层次的假设常常与来自传感器数据的直接推理有关。
    - 例如，“控制误差是小的”这一假设，可以容易地由“PID控制模态使用的事件表”中所列的当前过程的均值和方差导出。
  - 更高层次的假设要经过一系列推理才能导出。
    - 例如，对过程稳定性程度的假设，则需要通过推理过程才能做出估计。

# 专家控制的一个例子（七）

## ■ 知识源（知识库）

### □ 主要控制知识源

- 最小方差控制，最小方差监控器，纹波监测器，阶数监控器；

### □ 备份控制知识源

- PID控制，时延时间估计器；

### □ 估计知识源

- 参数估计，估计监控器，激励监控器，扰动信号产生器，跳变检测器；

### □ 自校正知识源

- 自校正控制；

### □ 学习知识源

- 即获取调节器参数，平滑并存储调节器参数，测试调度条件；

### □ 主监控知识源

- 稳定性监控器，均值和方差计算。

# 专家控制的一个例子（八）

## ■ 推理机

- 推理过程包括数字求值和经验推断。推断的依据是专家的启发式知识，以产生式规则表示。
- 推理采用事件驱动方式进行。根据当前事件，运用知识库中的知识（包括数字求值的算法知识和启发式逻辑知识），推断出一列假设，最后导出应该采取的动作，从而使整个系统协调运行。

# 专家控制的一个例子（九）

## ■ 调度（控制行为）

- 根据问题的初始状态，形成有次序的调度队列。
- 正常情况下，系统采用最小方差控制。
- 若检测到纹波现象较严重，则增大 $d$
- 若通过最小方差监测器监测到系统已不是处于最小方差控制状态，说明系统的模型不准确或参数发生了改变，则
  - 系统转入自校正调节状态；
  - 启动参数估计器；
  - 同时启动激励监测器，看是否有足够的激励。
  - 若激励不足，启动扰动信号发生器。
- 根据稳定性监视器来检测系统的稳定性。
  - 若系统稳定性能差，则启动时延时间估计器。
- 根据最小方差监测器可判断自校正控制是否已收敛到最小方差控制，若已收敛，则转入到最小方差控制。
- 若系统远离最优点，则启动备份PID控制。



### 3、专家PID控制

# 专家整定PID控制系统

## ■ 数字PID控制算法

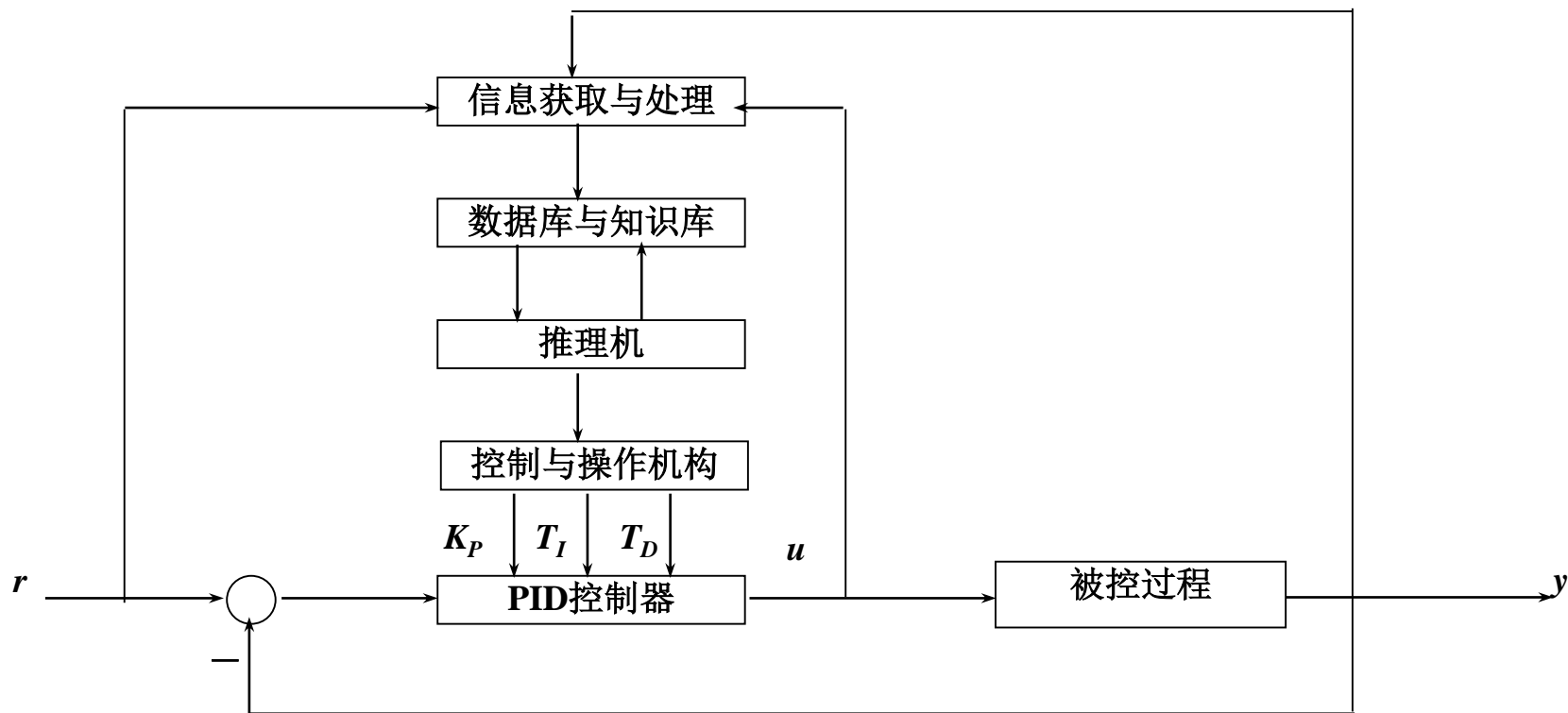
$$U(n) = K_p \left[ E(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{T_d}{T} (E(n) - E(n-1)) \right]$$

- 在实际应用中当被控对象的数学模型不确定时，控制参数由有经验的控制专家现场进行整定。专家在实践工作中积累了大量的经验，形成了一整套调试规程，即专家知识。系统整定就是根据对象的过程响应特性，运用调试规程，调整控制参数，使控制性能得到改善。
- 在专家整定PID控制系统中，PID参数的整定工作由专家系统实现，控制信号仍然由PID控制器给出，专家系统只是间接地影响控制过程。

# 专家整定PID控制系统

- 拥有整定专家的知识（调试规程），可以根据控制过程提供的实时信息，自动地在线整定PID参数，改善控制性能。
- 尤其适合于对象特性易于变化的情况。
- 整定过程：
  - 对系统控制性能的判别
  - 过程响应曲线的特征识别
  - 控制参数调整量的确定
  - PID控制参数的修改

# 专家整定PID控制系统



# 专家整定PID控制系统

## ■ 性能识别

- 控制系统的性能用稳定性、可控性和可观性、稳态特性、动态特性来表征，用稳定裕量，稳态指标，动态指标以及综合指标评价。
- 与控制专家不同，由于专家系统有强大的实时计算能力，应选择综合指标作为对系统性能的评价。
  - 误差平方的积分函数
  - 时间乘平方误差的积分函数
  - 绝对误差的积分函数
  - 时间乘绝对误差的积分函数

# 专家整定PID控制系统

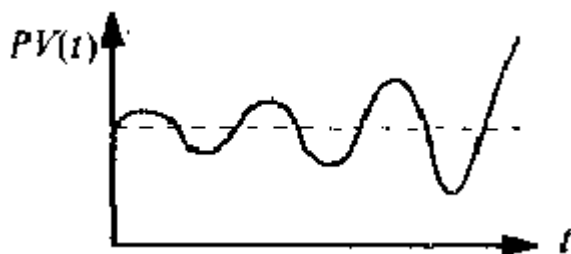
## ■ 特征识别

- 当系统的设定值变更，或负载变化，或扰动出现时，系统的响应曲线具有典型特征。
- 专家系统通过这些曲线对特征参数进行识别。
- 特征参数一般从系统响应的动态指标和静态指标中抽取。
  - 超调量，第一峰值时间，衰减比，振荡次数，延迟时间，上升时间，调节时间，稳态误差等。

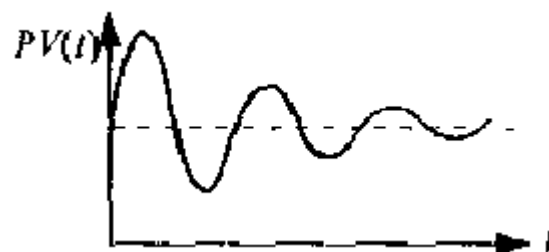
# 专家整定PID控制系统

## ■ 负载变化时的四种基本响应曲线

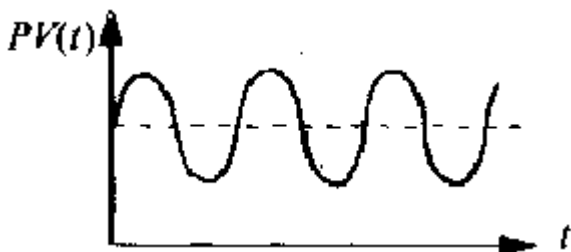
发散振荡



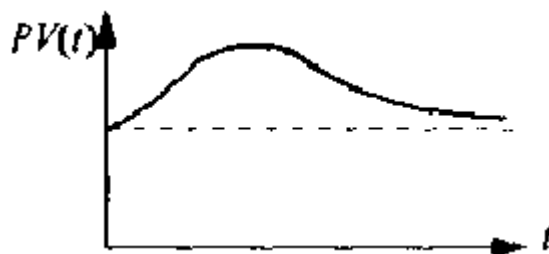
衰减振荡



等幅振荡



非周期振荡



# 专家整定PID控制系统

## ■ 知识表示

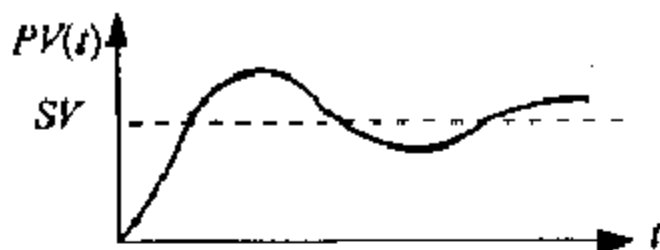
- 调试规程等整定的知识在专家系统中可用产生式规则表示。
  - 前提（前件）：基本响应曲线的特征描述。
  - 结论（后件）：对PID控制参数的调整。

## ■ 知识获取

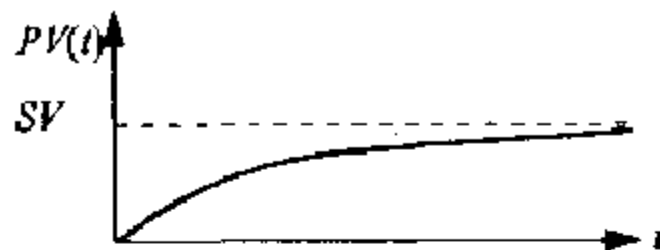
- 专家系统的整定训练。
- 可借助仿真培训系统，进行控制系统仿真，调节调试规程。



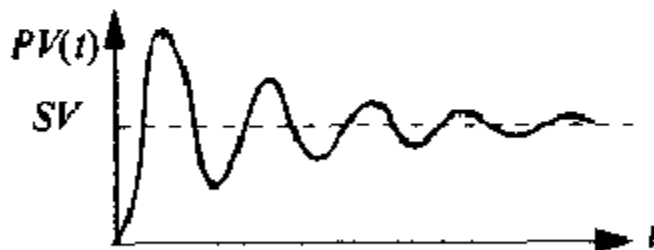
# 专家整定PID控制系统



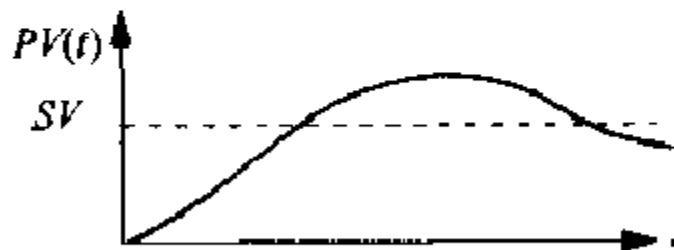
(a)曲线: 振荡, 超调量小  
调试:  $K_p \rightarrow$  小, 大  
 $T_i \rightarrow$  小



(b)曲线: 无振荡, 收敛慢  
调试:  $K_p \rightarrow$  大  
 $T_i \rightarrow$  小



(c)曲线: 超调大, 收敛快  
调试:  $K_p \rightarrow$  小, 大  
 $T_i \rightarrow$  大, 小



(d)曲线: 振荡周期长, 收敛慢  
调试:  $K_p \rightarrow$  大  
 $T_i \rightarrow$  大

# 专家整定PID控制系统

## ■ 推理机

- 采用数据驱动的前向推理。
- 根据用户指定的性能指标函数，计算控制系统的性能，当不满足要求时，开始进行推理。
- 根据当前系统的测量值响应曲线的特征描述，分别与产生式规则的条件部分进行匹配，选择适合的规则执行该规则的操作，确定对PID参数的调整方向和调整量，使之逐步改善控制系统的控制性能，直到获得满意的性能为止。

# 专家整定PID控制系统

## ■ 推理过程

### □ 启动特征识别程序

- 对系统的响应进行特征识别，获得控制系统当前控制状态的描述。

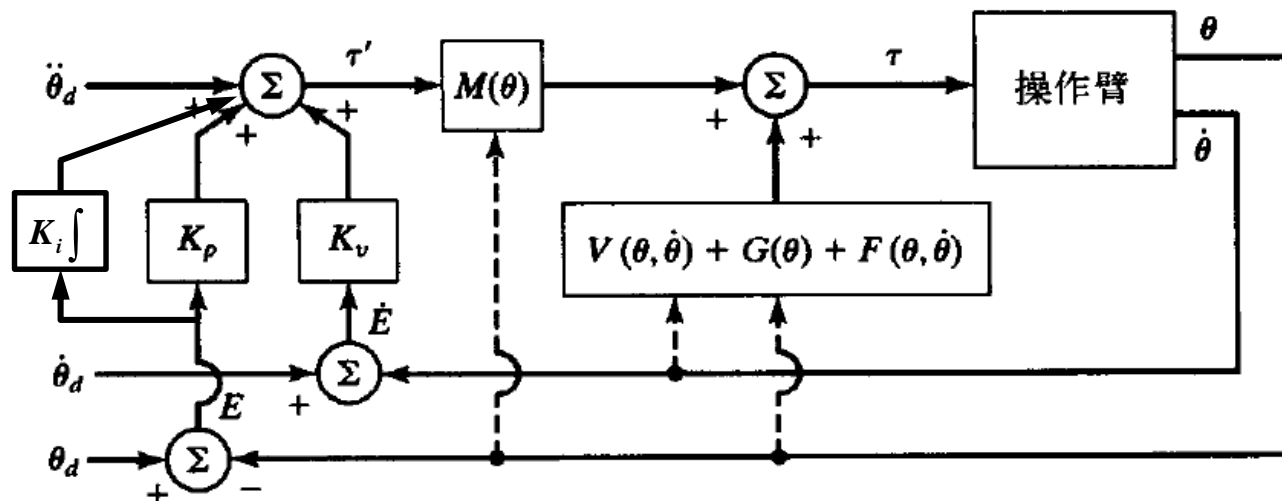
### □ 推理求解

- 根据状态描述，运用知识库中的调试规程知识进行推理求解，确定PID控制参数的调整方向和调整量。

### □ 整定

- 推理求解的PID参数经过用户或专家认可后，改变PID控制器的控制参数。
- 控制器将用新的控制参数运行，以期得到控制性能的改善。当控制系统性能满足控制要求时，控制参数整定过程结束，否则再次进入整定推理过程。

# 例：基于模型的机械臂反馈线性化



设计中依据的理想模型： $\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) + F(\Theta, \dot{\Theta})$

实际模型： $\tau = \hat{M}(\Theta)\ddot{\Theta} + \hat{V}(\Theta, \dot{\Theta}) + \hat{G}(\Theta) + \hat{F}(\Theta, \dot{\Theta})$

$$\tau = \alpha \tau' + \beta$$

$$\alpha = M(\Theta)$$

$$\beta = V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) + F(\Theta, \dot{\Theta})$$

则  $\ddot{\Theta} = \tau'$  （单位质量模型）

$$\text{令 } E = \Theta_d - \Theta$$

$$\tau' = \ddot{\Theta}_d + K_v \dot{E} + K_p E + K_i \int E dt$$

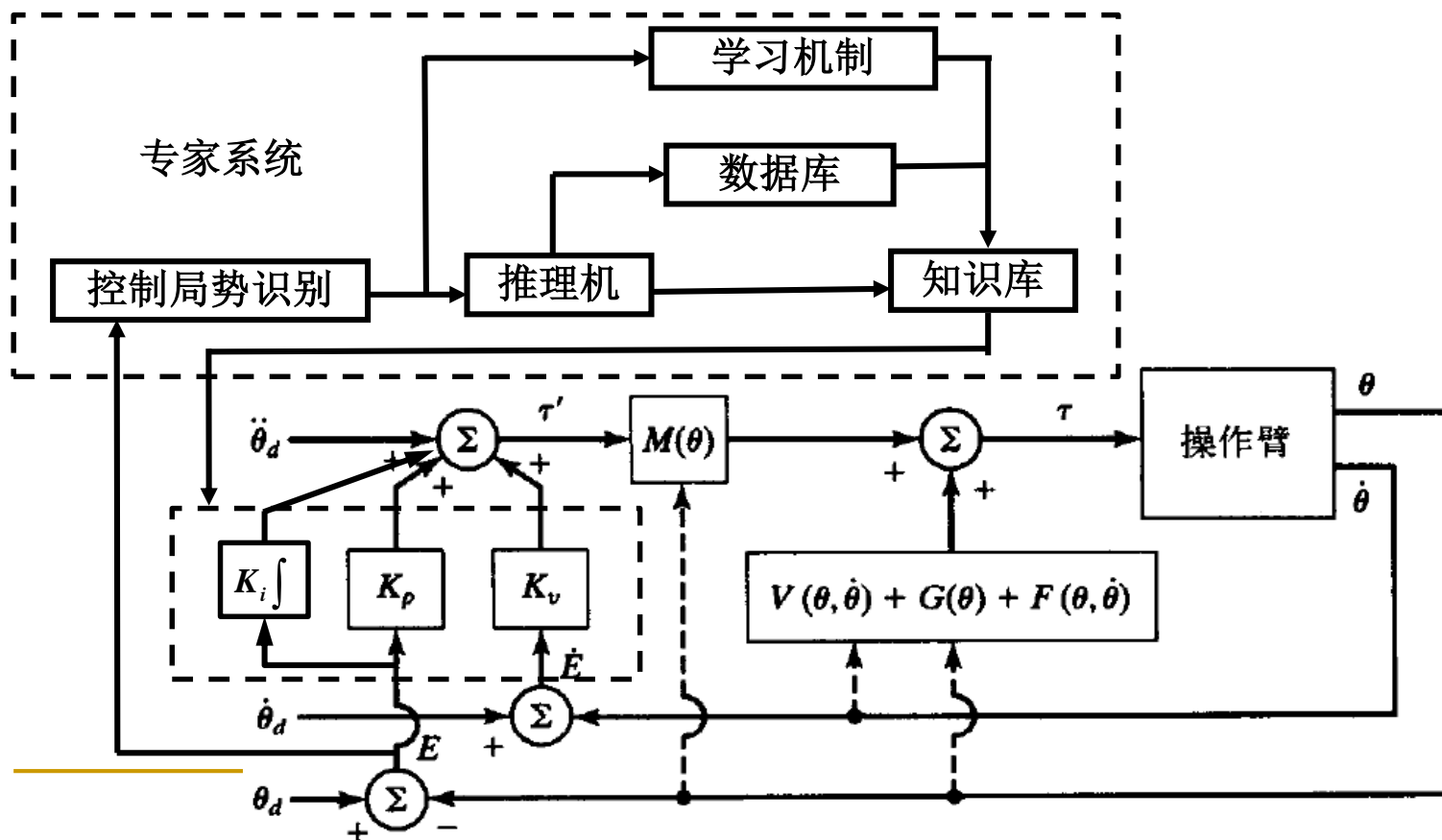
矩阵  $K_v, K_p$  和  $K_i$  为对角阵。

则闭环方程  $\ddot{E} + K_v \dot{E} + K_p E + K_i \int E dt = M^{-1}[(M - \hat{M})\ddot{\Theta} + (V - \hat{V}) + (G - \hat{G}) + (F - \hat{F})]$

思路：通过观测机器人响应的性能指标，动态调整各关节的PID参数，使系统具有较好的抗干扰性能，较快的响应时间和较小的超调量，获得更好的控制性能。

# 采用专家系统调节机械臂PID控制

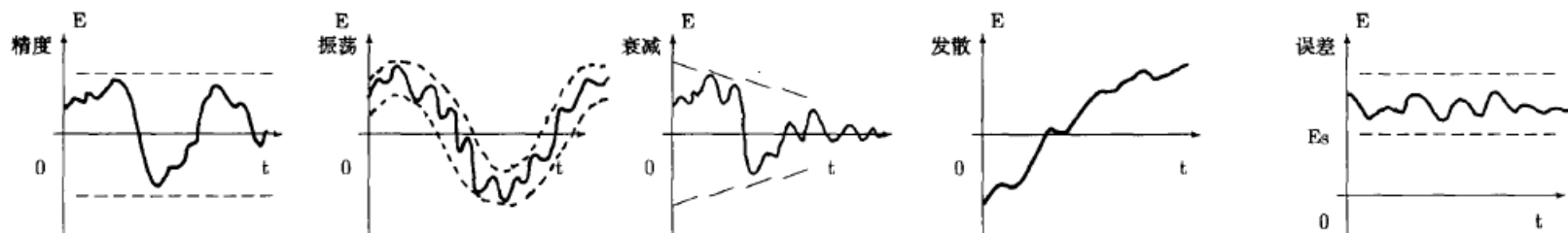
- 带有**PID**控制参数动态调节功能的机械臂智能控制系统
  - 底层由反馈线性化和**PID**调节器组成
  - 高层由专家系统组成，包括知识库，推理机和学习机制



# 采用专家系统调节机械臂PID控制

## ■ 建立控制知识库

- 机械臂响应性能指标：误差幅值，振荡幅值，收敛速度
- 根据控制工程知识，模型机理和以前运行经验形成调节规则
- 规则例子：对应的规则需进行量化以适合计算
  - 响应误差值不很好，比例和积分系数应有较小的增加，微分系数不变
  - 响应误差值不太好，比例和积分系数应有较大的增加，微分系数不变
  - 响应速度不好，比例应有较小的增加，积分系数不变，微分系数较小增加
  - 响应的振荡性不很好，比例应有较小的减小，积分系数不变，微分系数较小增加
  - 响应的振荡性不太好，比例应有较大的减小，积分系数不变，微分系数较大增加



# 采用专家系统调节机械臂PID控制

## ■ 推理

- 基于模式匹配-触发方式进行
- 匹配规则的冲突解决策略是将规则进行排序，优先级高的规则先启用，加快推理速度

## ■ 记忆

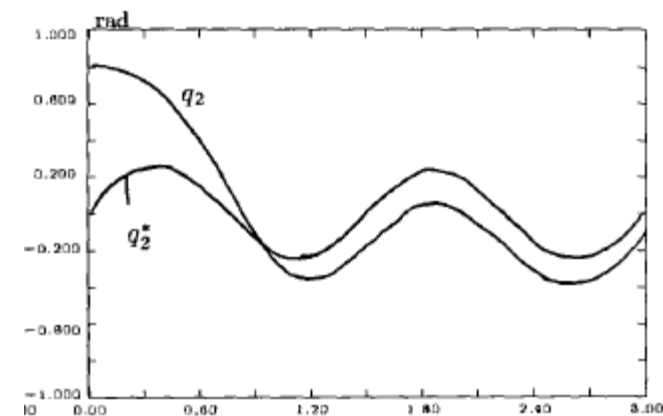
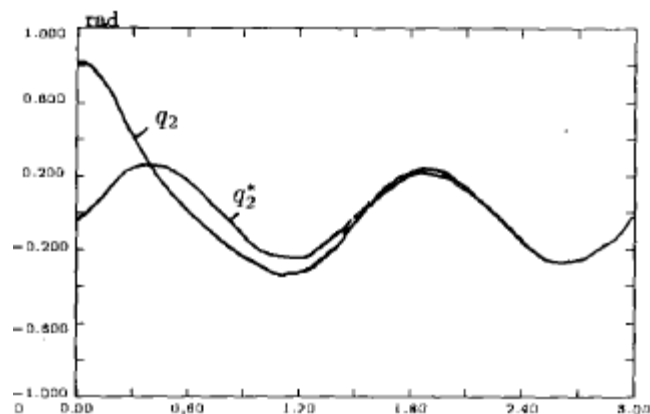
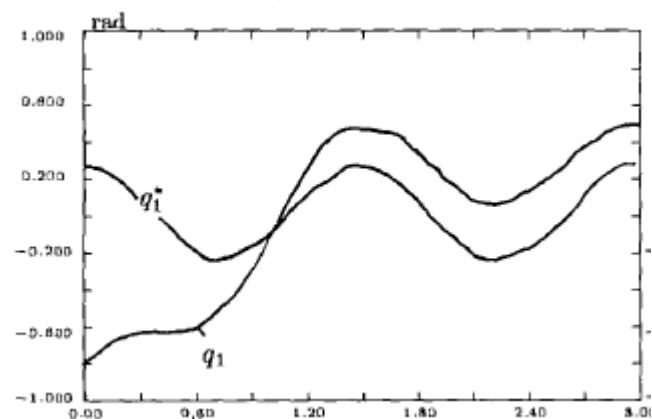
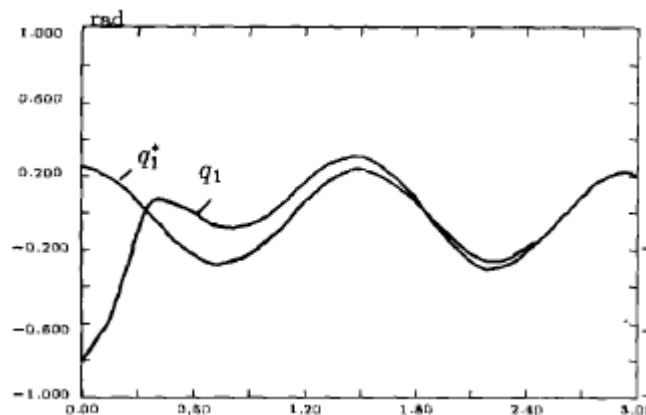
- 采用数据库存储系统运行的决策、中间信息和结果，包括静态和动态数据，一般将数据分层存储

## ■ 学习

- 通过规则应用后，系统响应变化与预期变化的比较，判断应用是否成功，根据成功和失败数据修正规则的排序，调整规则优先级
- 根据成功和失败的数据和误差的具体值修改PID系数改变值的量化大小，改进知识库

# 采用专家系统调节机械臂PID控制

## ■ 两关节机械臂上的关节位置跟踪运行结果比较



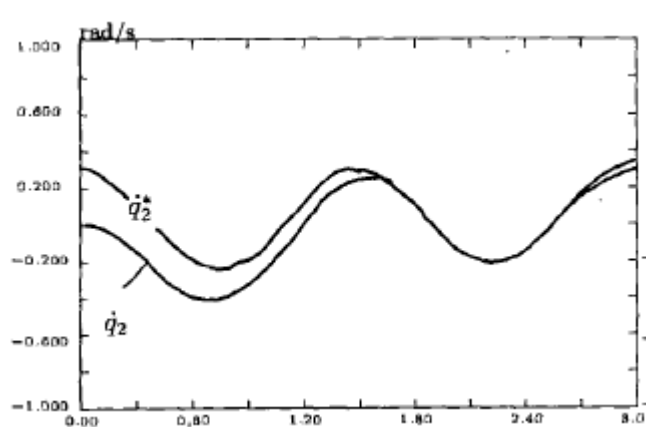
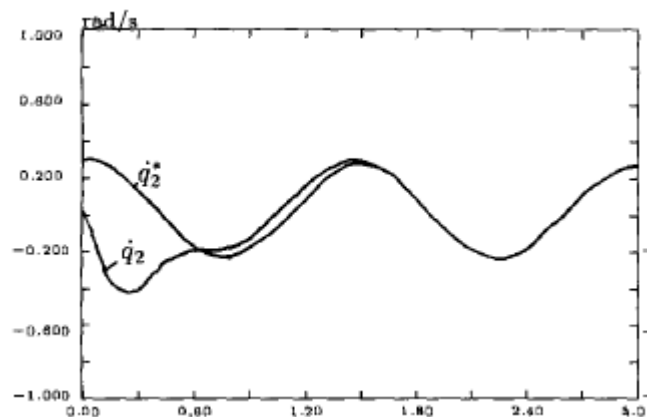
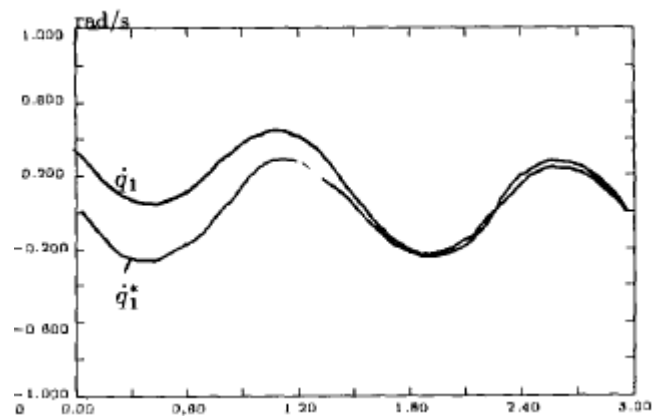
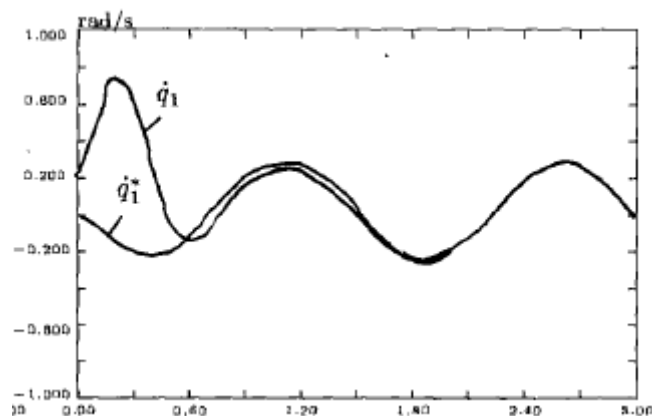
专家PID控制

常规PID控制



# 采用专家系统调节机械臂PID控制

## ■ 两关节机械臂上的关节速度跟踪运行结果比较



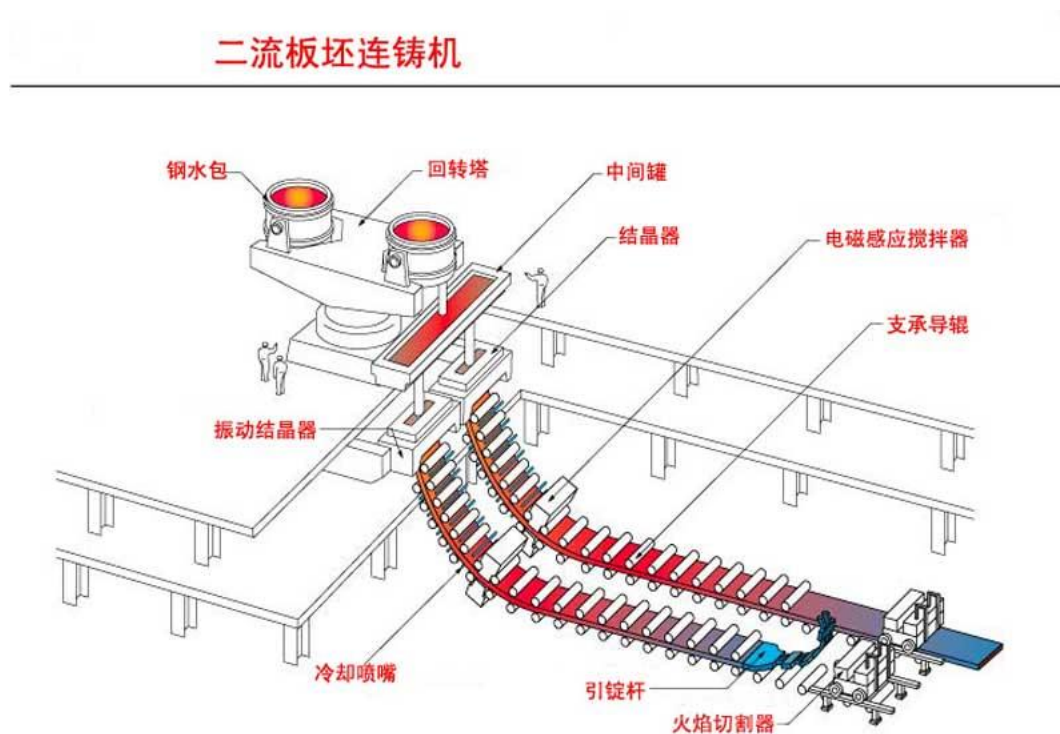
专家PID控制

常规PID控制

## 4、专家控制系统应用

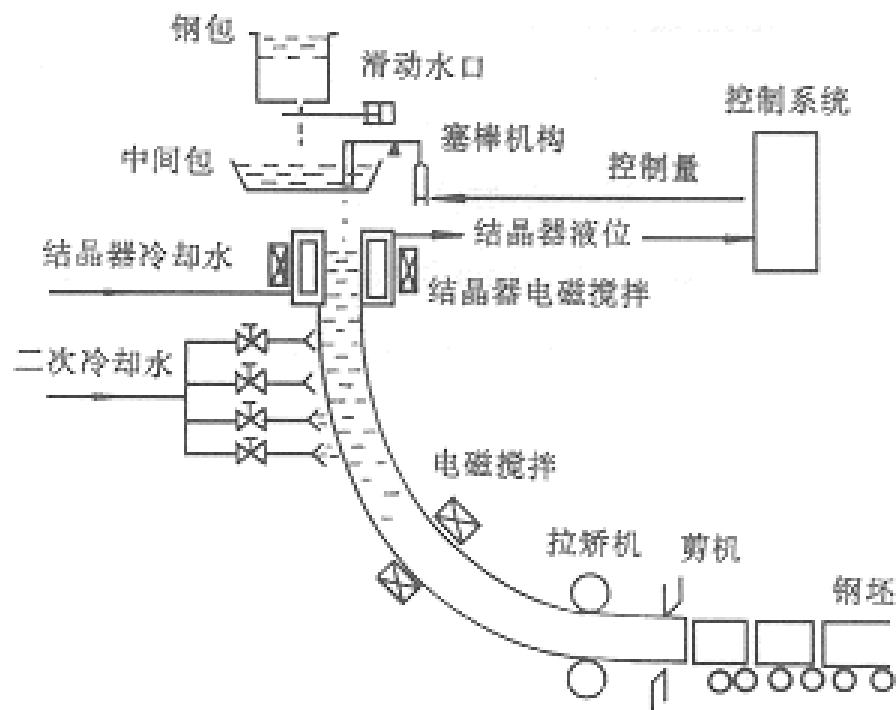
# 冶金连铸工业过程 实时专家控制系统

## ■ 连铸工艺流程



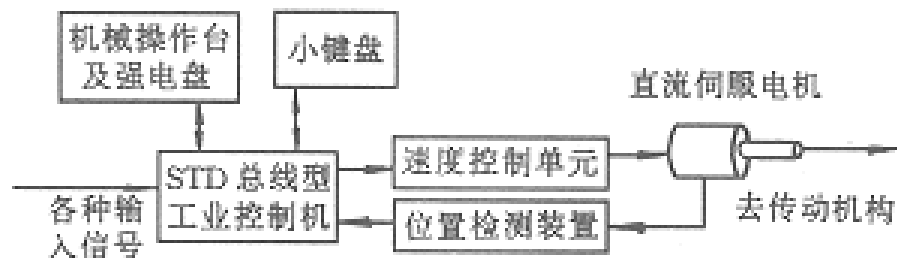
# 冶金连铸工业过程 实时专家控制系统

- 钢水通过钢包流入到中间包，
- 在塞棒的开启机构控制下，中间包的钢水以一定的流量注入到结晶器内，
- 然后再从结晶器中拉出，经二次冷却水冷却后形成中心尚未结晶的拉坯，而电磁搅拌器使拉坯中心部分的钢液更加均匀地结晶。
- 拉坯则在辊道上按规定的尺寸长度进行剪切，得到不同规格的产品。



# 控制系统设计

- 控制目标：保持结晶器中钢水的液位稳定
  - 在整个浇铸过程当中，塞棒开启机构的任务就是把结晶器中钢水的液位控制在60%（即认定的0mm位置）附近，从而有效地保证钢坯质量，防止溢钢、漏钢等事故的发生，确保连铸生产过程顺利进行。
- 控制系统组成情况

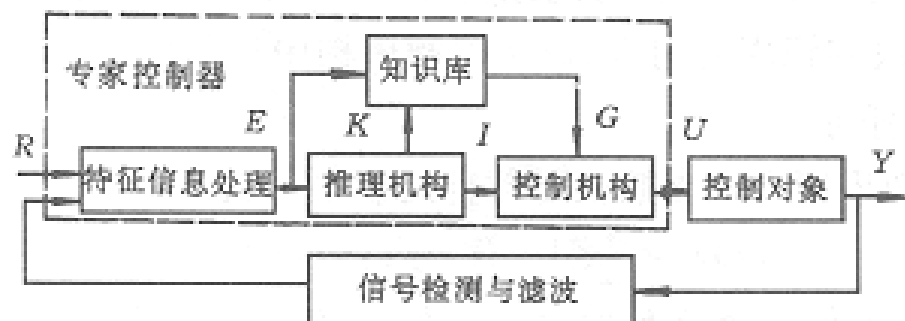


# 采用工业专家控制器

- 结合连铸生产工艺特点，按专家控制器思想设计一个用于小方坯连铸的实用 专家控制系统。被控的直接对象为直流伺服电机传动机构，最终的控制效果是通过结晶器中液位的波动情况来反映。
- 整个专家控制系统由三个部分组成：
  - 被控对象
  - 检测机构
  - 专家控制器

# 专家控制系统设计

## ■ 专家控制系统的结构



- 被控过程的动态信息经过特征信息处理后得到信息 $E$ ，推理机构根据信息 $E$ 进行判断、推理，将推理结果 $I$ 送到控制机构，控制机构再综合知识库提供的知识 $G$ ，给出合适的控制 $U$ ，对被控过程进行实时控制。
- 知识库存放工业过程控制领域的专门知识，为推理机构提供推理用的经验知识，并且可以根据信息 $E$ 决定是否补充或修改数据库的经验知识。

# 专家控制模型描述

$$E_C = f(E^*, U^*, I^*)$$

- 其中智能算子  $f$  为几个算子的复合运算  $f = p.n.m$ ,
  - $m: (R, Y) \rightarrow E$ ,  $n: E \times K \rightarrow G$ ,  $p: G \times I \rightarrow U$ ;
  - $m, n, p$  均为智能算子, 其基本形式为 (产生式规则)  
 $IF$  (条件)  $THEN$  (结论);
  - 控制的特征模态集  $E^*$ ,  $E^* = (E_1, E_2)$ ;
    - $E_1$  为知识库的特征模型
    - $E_2$  为控制机构的特征模型
  - 控制 (决策) 模态集合  $U^*$ ,  $U^* = (G, U)$ ;
    - $G$  为参数校正与自适应集
    - $U$  为控制规则集
  - 整个专家控制器的启发与直觉推理规则集  $I^*$ ,  $I^* = (K, I)$ 
    - $K$  是实现  $E_1 \rightarrow G$  的规则集
    - $I$  是实现  $E_2 \rightarrow U$  的规则集



# 特征信息处理机构的设计

- 对采集到的原始信息进行加工、处理和特征抽取，为推理机构进行实时推理提供决策依据。
- 特征模态的抽取和划分应围绕实时控制和稳定性这两方面进行。
- 特征模态集为 $E^* = (E_1, E_2)$ 
  - 知识库的特征模态集为 $E_1 = \{a_{1i} \mid i=1, \dots, n\}$ ;
    - 根据历史液位偏差，偏差变化率与相应的阈值的关系得到。
  - 控制机构的特征模态集 $E_2 = \{a_{21}, a_{22}, a_{23}\}$ 
    - 根据当前液位偏差，偏差变化率与相应的阈值的关系得到。

# 特征模态集

- 知识库的特征模态集为  $E_1 = \{a_{1i}\} \ (i=1, \dots, 10)$ ;

$$a_{11} = \{|e_n| > A_1 \cap |\dot{e}_n| < B_3\}; \quad a_{12} = \{|e_n| > A_1 \cap |\dot{e}_n| > B_1\};$$

$$a_{13} = \{|e_n| < A_1 \cap |\dot{e}_n| > B_2\}; \quad a_{14} = \{|e_n| < A_1 \cap |\dot{e}_n| < B_4\};$$

$$a_{15} = \{|e_n| > A_2 \cap |\dot{e}_n| > B_4\}; \quad a_{16} = \{e_n > A_m\}; \quad a_{17} = \{e_n < -A_m\};$$

$$a_{18} = \{|e_n| \leq A_m\}; \quad a_{19} = \{c_1 > c_m\}; \quad a_{110} = \{c_2 > c_m\}$$

- 其中  $A_1, A_2$  为偏差的阈值, 且  $A_1 > A_2$ ;  $B_1, B_2, B_3, B_4$  为偏差变化率的阈值, 且  $B_1 > B_2 > B_3 > B_4$ ;  $e_n$  及其导数分别为第  $N$  次偏差值和为第  $N$  次偏差变化率;  $A_m$  为控制允许误差值;  $c_m$  为次数阈值;  $c_1, c_2$  为在线实际误差连续超过控制允许误差的次数

- 控制机构的特征模态集  $E_2 = \{a_{21}, a_{22}, a_{23}\}$

$$a_{21} = \{|e_n| > A_0\}; \quad a_{22} = \{|e_n| < A_2 \cap |\dot{e}_n| < B_4\}; \quad a_{23} = \{not(|e_n| > A_0) \cap not(|\dot{e}_n| > A_2 \cap |\dot{e}_n| > B_4)\}$$

- $A_0$  为偏差的阈值, 且  $A_0 > A_1 > A_2$

# 知识库的建立

- 知识库由学习与自适应机构和经验数据库组成。
- 在经验数据库中存储的都是在大量仿真实验和实控试验基础上建立的非常实用的经验知识；
- 学习与自适应机构的功能是根据特征信息 $E_1$ ，能自动补充或修改知识库的内容，解决控制机构中控制模态的参数自校正问题，保证控制机构稳定地完成控制任务。
- 专家控制的知识库中存储了关于自动浇铸过程塞棒开启机构实时控制及常规故障判断的专门知识。
- 控制规则集和特征模态集是对被控过程中各种经验和控制方法的归纳与总结，它集中反映了浇铸过程控制的独有特性，使系统能进行实时推理，实现高速高精度的控制。

# 控制机构的建立

- 控制机构的模态集为（即可提供的控制方式）

$$U = \{U_1, U_2, U_3\}$$

- 式中

- $U_1 = \{u_n = \text{Sgn}(e_n) \cdot U_m\};$
- $U_2 = \{u_n = u_{n-1}\};$
- $U_3 = \{u_n = k_p \cdot e_n + k_i \cdot \Sigma e_n + k_d \cdot e_n'\};$
- $u_n$  为控制级第  $n$  次输出;
- $U_m$  为控制级输出最大值;
- $\text{Sgn}(e_n)$  为符号函数.

# 知识库中的参数校正与自适应集设计

$$G = \{g_i\} \quad (i=1, \dots, 10)$$

■ 式中

- $g_1 = \{k_p = k_p + \alpha_1 \cdot k_p\}$  ;
- $g_2 = \{k_p = k_p - \alpha_2 \cdot k_p; k_d = k_{d0}\}$  ;
- $g_3 = \{k_p = k_p - \alpha_1 \cdot k_p; k_d = k_d + \alpha_1 \cdot k_d\}$  ;
- $g_4 = \{k_p = k_p + \alpha_3 \cdot k_p\}$  ;
- $g_5 = \{k_p = k_p - \alpha_3 \cdot k_p\}$  ;
- $g_6 = \{c_1 = c_1 + 1; c_2 = 0\}$  ;
- $g_7 = \{c_1 = 0; c_2 = c_2 + 1\}$  ;
- $g_8 = \{c_1 = 0; c_2 = 0\}$  ;
- $g_9 = \{d = \varphi_1(e_n); c_1 = 0\}$  ;
- $g_{10} = \{d = \varphi_2(e_n); c_2 = 0\}$  ;

- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  是调整比例或微分系数的参数, 且  $\alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_3$ ;
- $k_p$  为比例系数;
- $k_d$  为微分系数;
- $d$  为特征点基准位置;
- $\varphi_1, \varphi_2$  是经验公式

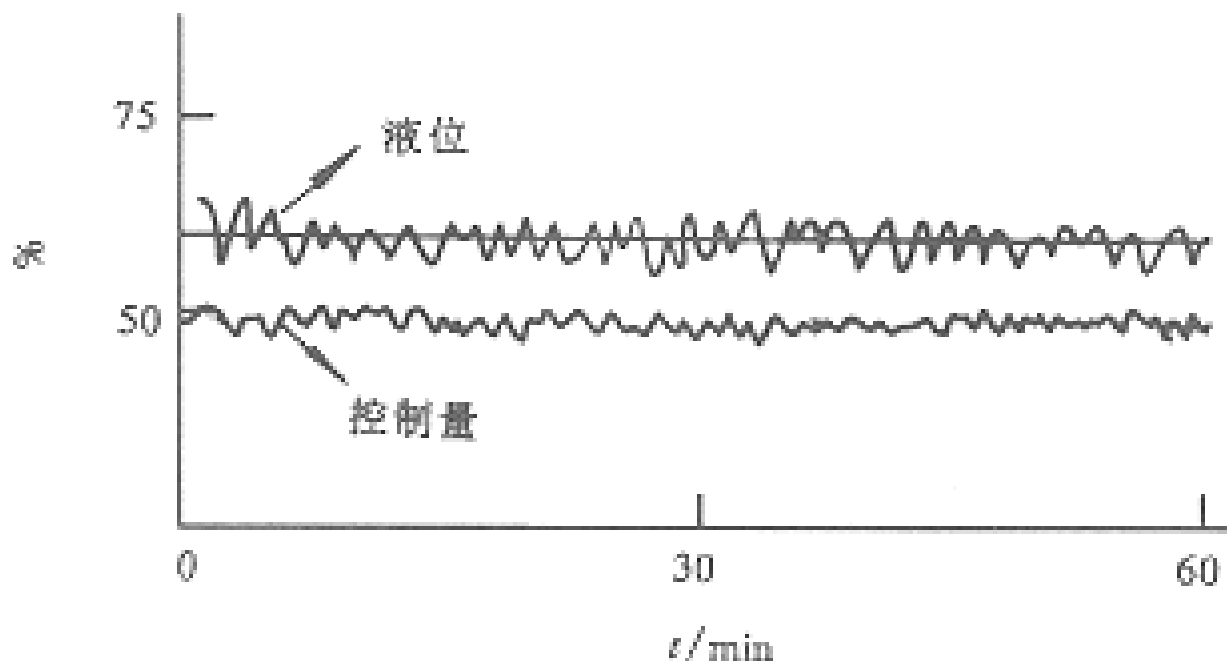
# 推理机构的设计

- 推理机构的功能是实现实时推理和决策，使整个专家控制器以逻辑方式协调地工作。
- 推理机构直接采用数据驱动的正向推理策略，可保证控制决策的实时性。
- 推理规则集为

$$I^* = \{K, I\},$$

- 其中
  - $K: E_1 \rightarrow G,$
  - $K = \{k_i\} \quad (i = 1, \dots, 10),$
  - $k_i: a_{1i} \rightarrow g_i \quad (i=1, \dots, 10);$
  - $I: E_2 \rightarrow U,$
  - $I = \{h_1, h_2, h_3\},$
  - $h_1: a_{21} \rightarrow u_1,$
  - $h_2: a_{22} \rightarrow u_2,$
  - $h_3: a_{23} \rightarrow u_3.$

# 相应的液位曲线及控制量输出



- 控制结晶器液位精度：±10 mm
- 控制周期为300ms
- 系统控制量的输出在较小范围内进行调节
- 钢水液位较好地稳定在设定位置附近，实际液位变化在±5mm以内

# 小结

## ■ 专家控制适用于

- 时变系统，非线性系统，易受到各种干扰的受控过程
- 操作环境频繁变化，数学模型不清楚，常规算法实现需很大计算量和高昂代价的对象。



# 小结

## ■ 专家控制系统与专家系统比较

比较内容	专家控制系统	专家系统
执行速度	高速、实时操作	低速、咨询为主
知识库	小巧而简单	庞大而复杂
知识来源	专家经验和在线学习	专门知识
推理方式	符号或数值推理，速度很快	主要是启发式推理，功能强大但耗时长
解释说明	非常简略	非常详尽
实现方法	常规语言	人工智能语言

# 小结

## ■ 专家控制系统与常规控制的比较

比较内容	专家控制系统	常规控制
系统结构	基于知识	基于模型
信息处理	符号推理和数值计算	数值计算
知识来源	文档或经验知识	文档知识
外界输入	可以是不完整的	必须是完整的
搜索方式	启发式或算法式	算法式
过程模型	可以是不完整或定性的	必须很精确
维护和升级	相当简单	通常很困难
解释说明	可以提供	一般没有
执行方式	启发式、逻辑式和算法式	纯算法式
用户感受	使用简单	使用困难