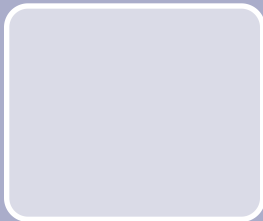


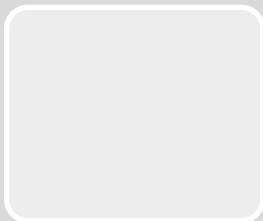
# 第2章 专家控制



## 2.1 专家系统



## 2.2 专家控制

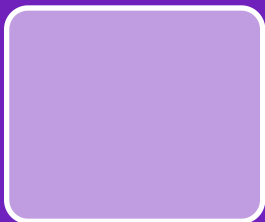


## 2.3 专家PID控制

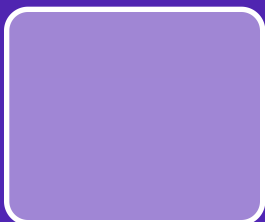
## 2.1 专家系统



### 2.1.1 专家系统概述



### 2.1.2 专家系统的构成



### 2.1.3 专家系统的建立

## 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。

## 2.1.1 专家系统概述

### 2、发展历史

初创期 (1965-1971)

成熟期 (1972-1977)

发展期 (1978至今)



## 专家系统的 初创期

(1965-1971) : 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

## 专家系统的 成熟期

(1972-1977)  
:Stanford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，标志着专家系统从理论走向应用。语音识别专家系统HEARASY的出现，标志着专家系统从理论走向成熟

## 专家系统的 发展期

(1978-至今)  
:专家系统走向应用领域，专家系统的数量和类型增加，例：个人理财专家系统、寻找油田的专家系统、贷款损失评估专家系统、各类教学专家系统

## 专家控制的出现

## 专家控制的发展

瑞典学者  
K. J. Astrom  
于1983年首先将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

早期的专家系统称为专家指导系统：LISP公司研制的蒸馏塔过程控制的分布式专家系统PICON、核反应堆的环境的辅助决策专家系统REACTOR，主要在于利用专家的信息进行控制指导

随着专家控制研究的进一步深入，人们开始用专家的经验直接提高传统控制的智能性，构造了各种结构精巧的专家控制器。例如Porter等的基于PI控制的实时调节器，我国周其鉴、李祖枢提出的仿人智能控制器

融合的思想与专家控制相结合，将信息融合作为专家控制信息输入的前处理，提高了信息综合能力。美国Gensym公司出品的专家系统开发工具G2，具有如下特点，并可与神经网络、模糊逻辑、模式识别等技术相结合，成功应用在化工、装配、军事、网络管理

# 专家系统的类型

类型专家系统	用途
解释专家系统	PROSPERCTOR地质勘探
预测专家系统	天气、虫害等
诊断专家系统	MYCIN、故障诊断
设计专家系统	花布立体感图案设计
规划专家系统	机器人规划、交通调度
控制专家系统	专家控制



# 专家系统的特点

## ■ 在功能角度出发

- 专家系统是一种知识信息处理系统，而不是数值信息计算系统。
- 它依靠知识表示技术确定问题的求解途径，而不是基于数学描述方法建立处理对象的计算模型；
- 它主要采用知识推理的各种方法求解问题，制订决策，而不是在固定程序控制下通过执行指令完成求解任务。

## ■ 从结构角度出发

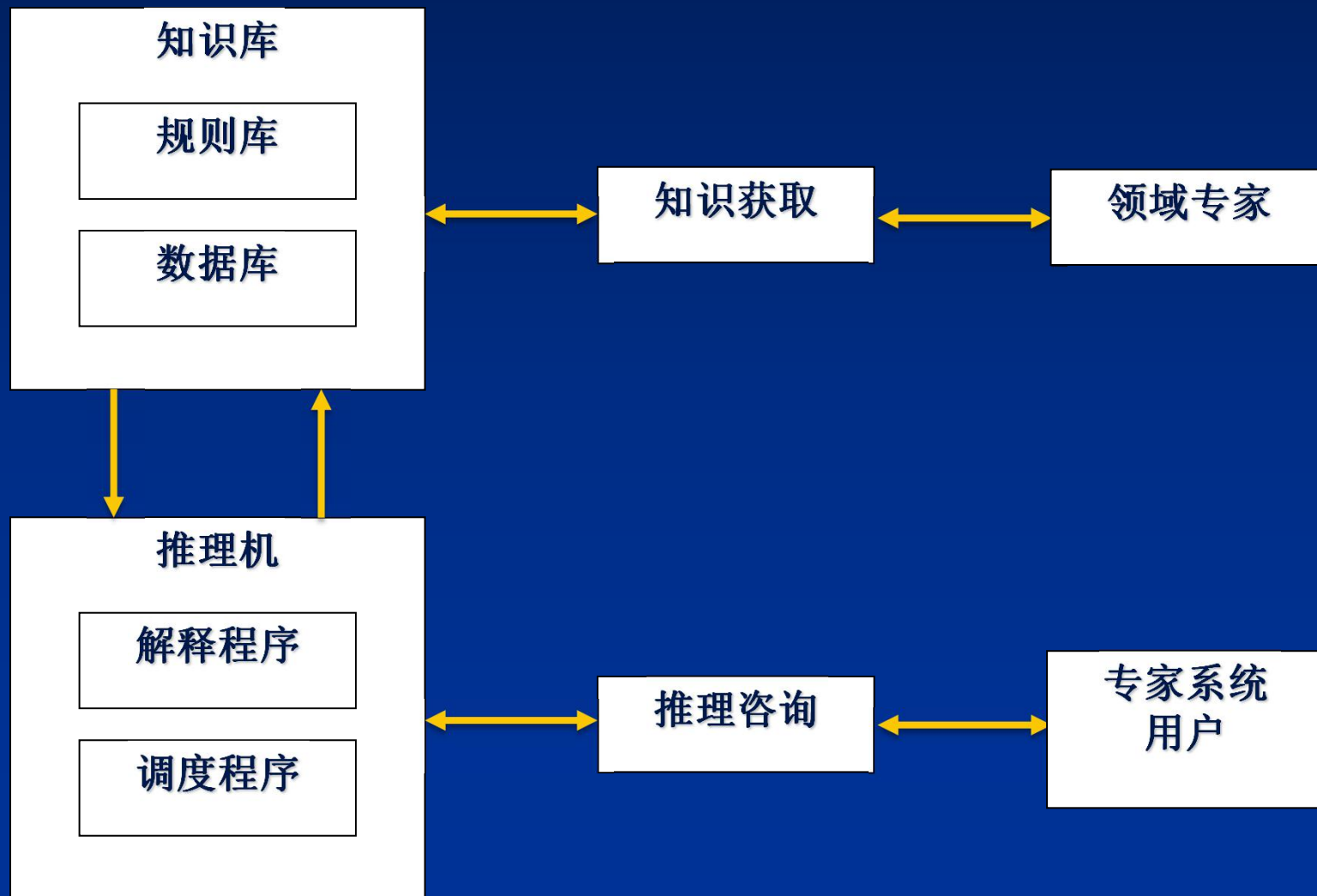
- 专家系统的两个主要组成部分——知识库和推理机是独立构造，分离组织，但又相互作用的。这不能简单地看作是一种编程技巧，而是说明一个知识基系统的首要特征是它具有一个知识体的核心部分。
- 维持专家系统的知识是明确的，可存取的，而且是可积累的。常规的软件程序尽管也包含许多领域知识，但这些知识往往是隐含的，他们与求解问题的方法混杂在一起，无法得到单独的操作和控制。

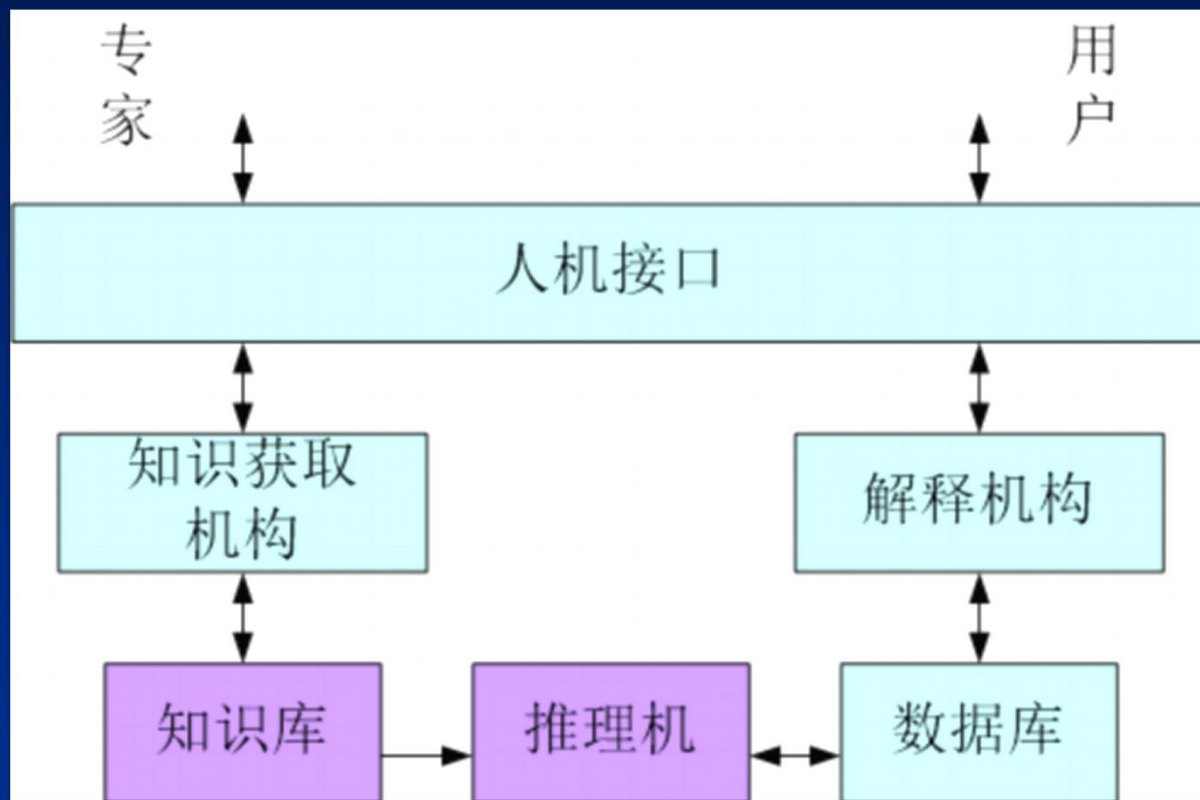


## ■ 从性能角度出发

- **专家系统具有启发性**，它能够运用专家的经验知识对不确定的或不精确地问题进行启发式推理，运用排除多余步骤或减少不必要计算的思维捷径和策略；
- **专家系统具有透明性**，它能够向用户显示为得出某一结论而形成的推理链，运用有关推理的知识（元知识）检查导出结论的精度、一致性和合理性，甚至提出一些证据来解释或证明它的推理；
- **专家系统具有灵活性**，它能够通过知识库的扩充和更新提高求解专门问题的水平或适应环境对象的某些变化，通过与系统该用户的交互使自身的性能得到评价和监护。

## 2.1.2 专家系统的构成





## 专家系统的结构



# 各部分功能

## 知识库

存放领域知识、常识性知识、推理规划等，这些知识使专家系统具有启发性。

## 数据库

存放推理的原始数据、中间结果、控制信息等，一般来说，知识库存放的信息具有规律性和普遍性，相对于数据库更为稳定。

## 推理机

利用知识库的推理规则，对数据库的信息进行推理，得到结论或决策。从结构上说，专家系统的推理机和知识库是彼此独立的。这一特点使专家系统便于维护和调整。

## 知识获取机构

获取专家的领域知识，对知识库进行修改和维护。保持器内容的一致性和完整性。知识获取机构使专家系统具有自学习和自适应的特点。

## 解释机构

对推理过程做出说明，并回答用户问题。解释机构使专家系统具有透明性，便于人机交互。

## 人机结构

人机交互的界面，可以充分发挥人机协作。

## 2.1.3 专家系统的建立

### 1、知识库（3种）

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

知识的查询、检索、增删、修改和扩充。

## 2.1.3 专家系统的建立

### 2、推理机（产生式规则推理）

□ 正向推理

□ 反向推理

□ 双向推理

用于对知识库中的知识进行推理得到结论的“思维”机构。

# 产生式规则推理过程

模式匹配



竞争消除



执行操作



将数据库中的数据与知识库中的规则的前提进行匹配，如果完全匹配或足够近似匹配，则把这条规则标记为触发规则



当符合条件的规则数大于1时  
解决方案一：根据一定的准则，从所有的触发规则中选择1条规则，作为启用规则；  
方案二：根据所有触发规则的结论进行综合，以获得一个最终的结论



根据推理的结论进行操作，并更新数据库的内容



# 正向推理

- 从已知事实出发，逐步推导出最后结果
- 推理过程
  - 用数据库的事实与规则库的规则前提条件进行匹配
  - 按冲突消解策略从匹配的规则中选择一条规则
  - 执行选中规则的动作（依次）。不断获得中间结果
  - 将中间结果作为新的前提，重复上述工作，不再得出结果或产生新的结果为止
- 事实驱动方式



# 反向推理

- 首先提出假设，然后验证这些假设的真假性，找到假设成立的所有证据或事实
- 推理过程
  - 在知识库中寻找结论和假设目标一致的规则
  - 将所有规则的前提作为新的子目标假设
  - 执行选中规则的动作（依次）。不断获得中间结果
  - 重复上述工作，直到假设与事实匹配或不存在新的激活规则
- 目标驱动方式

# 推理策略的选择

## ■ 推理目标推理过程

- 如果目标是从一组给定事实出发，找出所有可能的结论，可使用正向推理。

- 例如：疾病的诊断

- 如果目标是证实或否定某一结论，那么通常使用反向推理。

- 例如：电路的设计

搜索空间的形状

事实较少，正向推理

结论较少，反向推理



# 双向推理

## ■ 方法

- 自顶向下，又自底向上作双向推理，直至某个中间界面上两方向结果相符便成功结束。

- 例如：疾病的诊断

该方法较正向或反向推理所形成的中间结果少，在复杂系统中推理效果更高

## 2.1.3 专家系统的建立

### 3、知识的表示

□ 产生式规则

□ 框架

□ 语义网络

□ 过程

表示方法	提出	特    点	应用
产生式规则	1965年 Simmom	由“IF-THEN”的前提、结论对组成，便于理解 and 操作，但推理缺乏灵活性，维护困难	最为广泛，包括控制系统
语义网	1968年 Quuillia n	代表对象、概念及其相互关系的有向图，便于联想，推理效率高，但不 便于表达判断性等深层次知识	适合自然语言的理解
Petri网	1962 Petri 数学逻辑	含有状态可达性、位置有节性等内容的网络，可模拟逻辑图例、语义表达、状态变换等，具有相当的通用性	适于描述异步并行事件，进行离散时间的时序建模等
谓词逻辑	1963 Green 数学逻辑	将逻辑中的命题和推理符号化，具有严格的演绎推理体系，可实现自动推理，但效率不高	自动问题求解
面向对象表示	20世纪80年代，软件编程	一种针对复杂系统的编程方法，具有抽象性、封装性和继承性的特点，是一种相当通用的方法	便于软件实现

## ■ 产生式规则

- 产生式规则主要描述了前提和结论之间的关系。
- 一般形式为：
  - IF<前提> THEN<结论>
- 在控制中，前提可以是控制的条件，如输出误差，结论是控制大小，
- 例如
  - IF 偏差增大， THEN控制输入增大



## ■ 语义网

- 语义网络是通过概念及其相互间语义关系，图解表示知识的网络。其中，节点表示事物或时间的概念，节点用弧连接，弧上加有标记说明语义关系。另外，节点可以是变量，通过增加中间节点可以使语义网络表示多元关系。基于语义网络的最简单的推理是通过继承关系得到结点事物的属性值。基于语义网络表示的专家系统有自然语言问题系统NLQS。PROSPECTOR系统用语义网络和规则共同表示知识。

## ■ 逻辑谓词

- 逻辑谓词是一种符号逻辑，它将命题解析成主次、谓词、逻辑连接词和量词，其中谓词用来刻画命题中个体词的性质或事物之间的关系，代表了命题的核心。
- 例如“所有车间的温度是 $30^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度50%”
- 由于将谓词从命题中提取出来，谓词逻辑具有很强的概括能力和表达能力。而且量词的引入，也使谓词逻辑可以进行三段论式的推理，适合于高层知识的表达。



## 面向对象表示方法

- 对象是指人类认识的客观事物，在形式上用以下四元组表示
- 对象::=<ID, DS, MS, MI>

其中:ID(Identifier)为对象标识符，即对象名。如电机、回转窑

DS(Data Structure)为对象的数据结构，描述了对象的一组状态属性。例如温度、压力等事实性知识

MS(Method Set)为方法集合，可以用来描述各种决策。例如，对应不同状态下的控制策略。

MI(Message Interface)为对象接收外部信息的窗口，可以用来控制信息的流向，驱动时间的运行。

- 面向对象的表示方法很符合人类认识世界的模式。不但可以将知识模块化，更可以通过封装、继承的方法，或得很好的安全和开发性能。而且C++等开发工具都基于面向对象技术，也为这一方法的使用提供了便利。目前，面向对象的方法正向面向主体的方法发展，以进一步提高系统的自主性能。



## 2.1.3 专家系统的建立

### 4、专家系统开发语言

- C语言，人工智能语言

- 专家系统开发工具

已经建立好的专家系统框架，包括知识表达和推理机。在运用专家系统开发工具开发专家系统时，只需要加入领域知识

## 2.1.3 专家系统的建立

### 5、专家系统建立步骤

#### □ 知识库的设计

- ◆ 确定知识类型：叙述性/过程性/控制性知识
- ◆ 确定知识表达方法
- ◆ 知识库管理系统的设计：实现规则的保存/编辑/删除/着呢国家/搜索等功能

#### □ 推理机的设计

- ◆ 选择推理方式
- ◆ 选择推理算法：选择各种搜索算法，深度优化搜索/广度优化搜索/启发式优化搜索等

## 2.1.3 专家系统的建立

### 5、专家系统建立步骤

#### □ 人机接口的设计

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



设计初始知  
识库

原型机的开  
发与试验

知识库的改  
进与归纳

## 问题知识化

- 辨别研究问题的实质，如要解决的问题是什么，它是如何定义的，可否把它分解为子问题或子任务，它包含哪些典型数据等。

## 知识概念化

- 概括知识表示所需要的关键概念及其关系，如数据类型/已知条件（状态）和目标（状态）、提出的假设以及控制策略等。

## 概念形式化

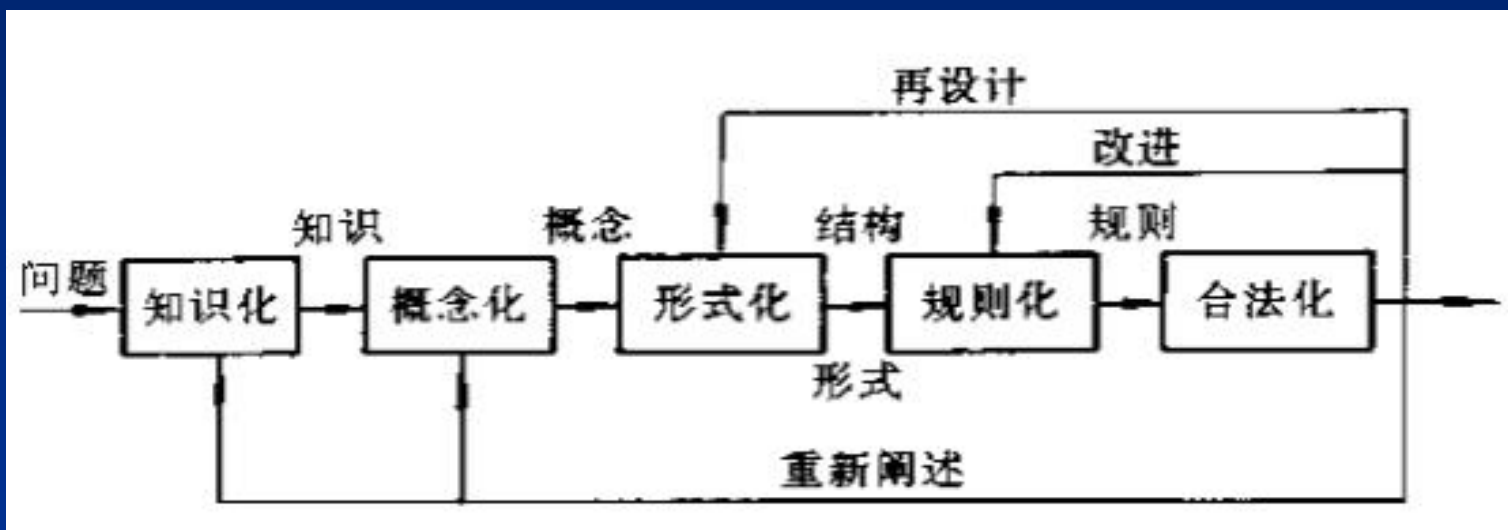
- 确定用来组织知识的数据结构形式，应用人工智能中各种知识表示方法把与概念化过程有关的关键概念、子问题及信息流特性等变换为比较正式的表达，它包括假设空间、过程模型和数据特性等。

## 形式规则化

- 编制规则，把形式化了的知识变换为编程语言表示的可供计算机执行的语和程序

## 规则合法化

- 确认规则化了知识的合理性，检验规则的有效性

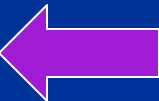


在选定知识表达方式之后，即可着手建立整个系统所需要的实验子集，它包括整个模型的典型知识，使系统在一定范围内达到人类专家的水平

设计初始知  
识库

原型机的开  
发与试验

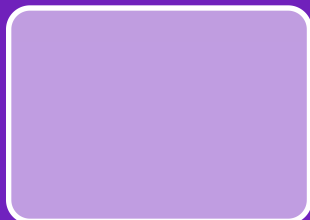
知识库的改  
进与归纳



## 2.2 专家控制



### 2.2.1 专家系统概述



### 2.2.2 专家控制的基本原理



### 2.2.3 专家控制的关键技术及特点



## 2.2.1 专家控制概述

### 定义

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。

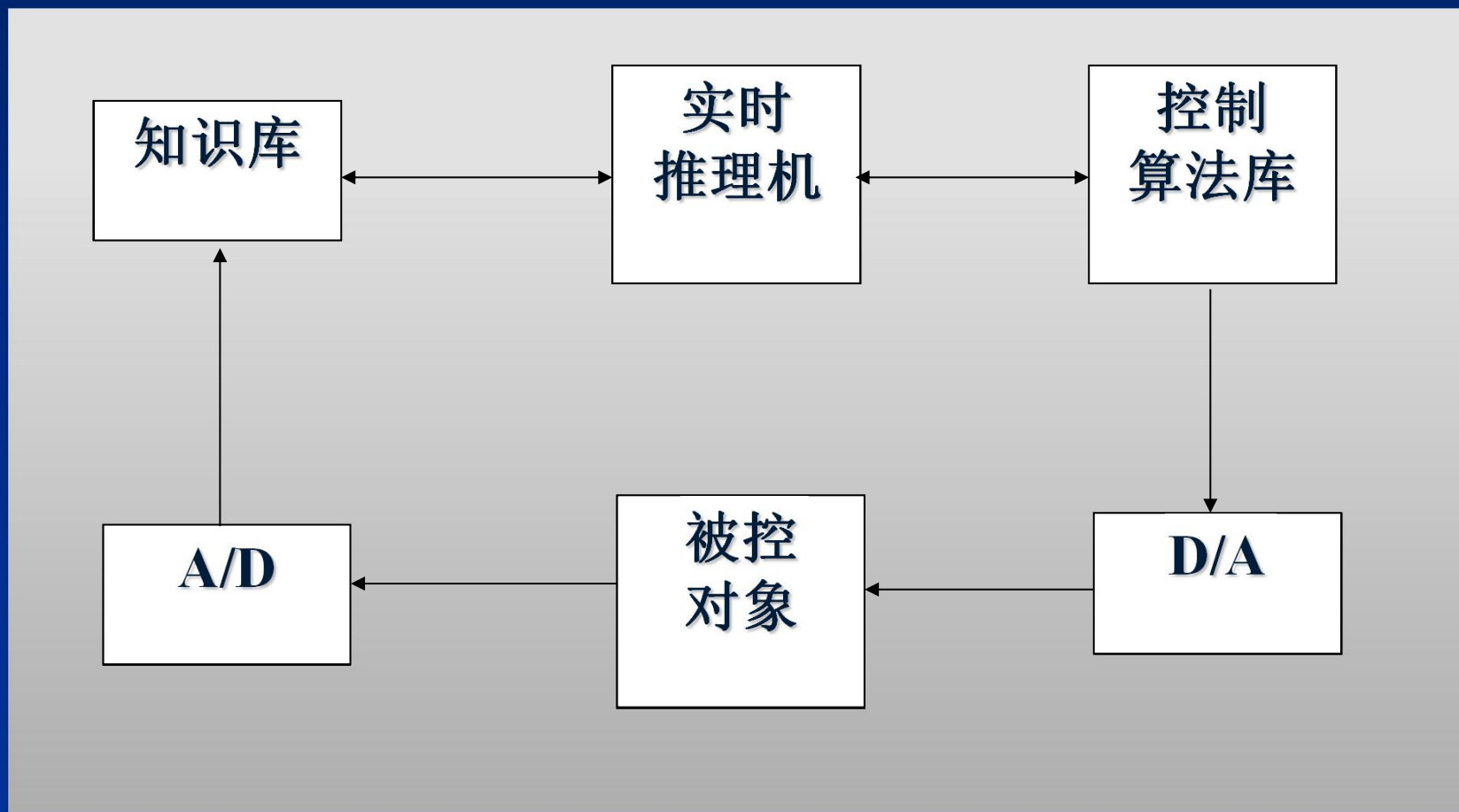
## 2.2.1 专家控制概述

### 实质

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择恰当的规则进行推理输出，实现对实际对象的控制。

## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 1、结构



## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 2、功能

- 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
- 控制过程可以利用对象的先验知识；
- 通过修改、增加控制规则，可不短积累知识，改进控制性能；
- 可以定性地描述控制系统的性能，如超调小、偏差增大等；
- 对控制性能可进行解释；
- 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

## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 3、与专家系统的区别

■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。

■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。



## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 4、知识表示

#### ■ 受控过程的知识

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

#### ■ 控制、辨识、诊断知识

- 定量知识：各种算法
- 定性知识：各种经验、逻辑、直观判断

## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 数据库

- 事实：知识的静态数据，如传感器测量误差、运行阈值、报警阈值等
- 证据：测量到的动态数据，如传感器的输出值、仪器仪表的测试结果等。
- 假设：由事实和证据推出的中间结果，作为当前事实集合的补充，如通过对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，如对稳定性的要求，对形态工作点的寻优、对现有控制规律是否需要改进的判断等

## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 规则库

- 采用产生式规则表示：

- IF 控制局势（事实和数据）  
THEN 操作结论

## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 5、分类

#### ■ 直接型专家控制器

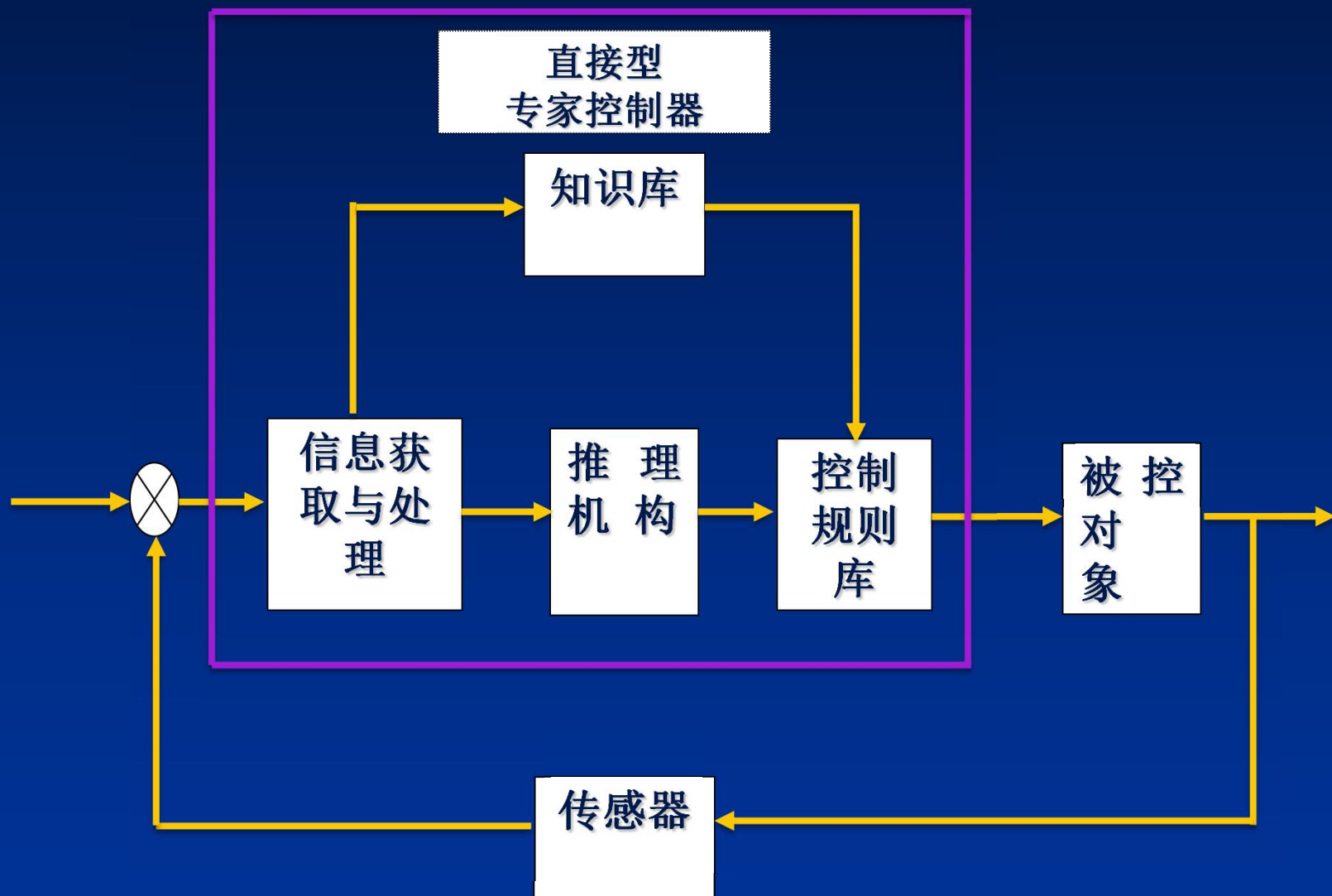


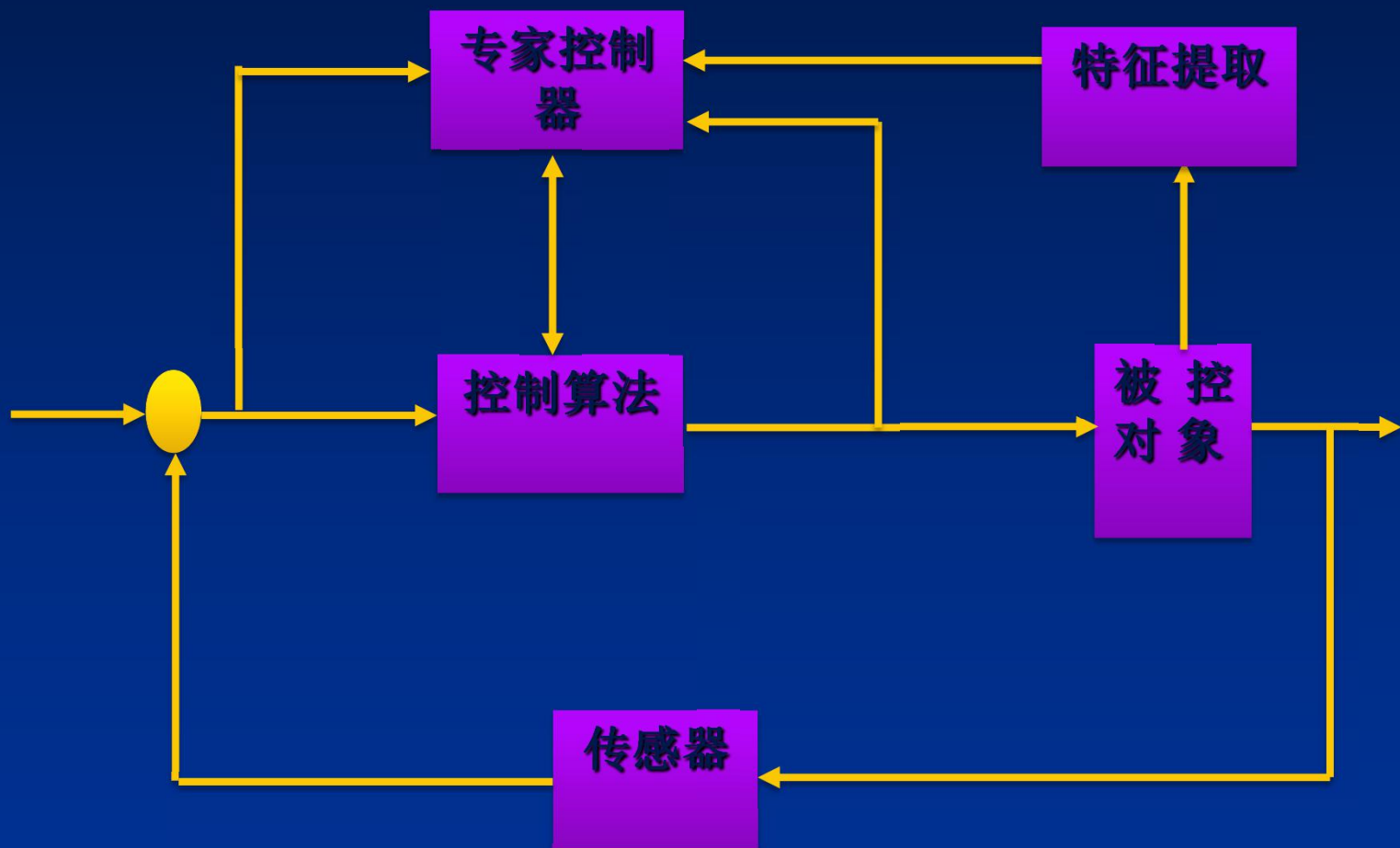
图 直接型专家控制器



## 2.2.2 专家控制的基本原理

### 5、分类

#### ■ 间接型专家控制器



间接型专家控制器

## (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：

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。



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。



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。

## 2.2.3 专家控制的关键技术及特点

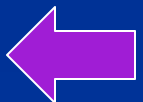
### 1、关键技术

- 知识的表达方式
- 从传感器中识别和获取定量的控制信号
- 将定性知识转化为定量的控制信号
- 控制知识和控制规则

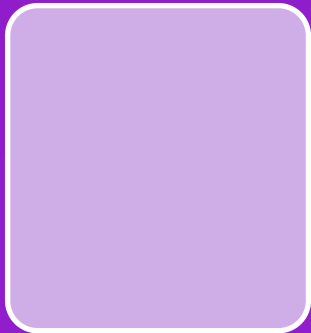
## 2.2.3 专家控制的关键技术及特点

### 2、专家控制的特点

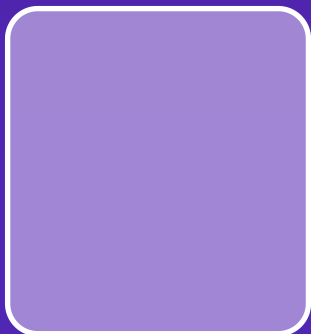
- 灵活性：根据系统的工作装填及误差情况，可灵活地选取相应的控制律
- 适应性：根据专家知识和经验，调整控制器的参数，适应对象特性及环境的变化
- 鲁棒性：通过利用专家规则，系统可以在非线性、大偏差下可靠的工作



## 2.3 专家PID控制



### 2.3.1 专家PID控制原理



### 2.3.2 仿真实例

# 一、专家PID控制原理

**PID专家控制的实质是，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。对于典型的二阶系统阶跃响应过程作如下分析。



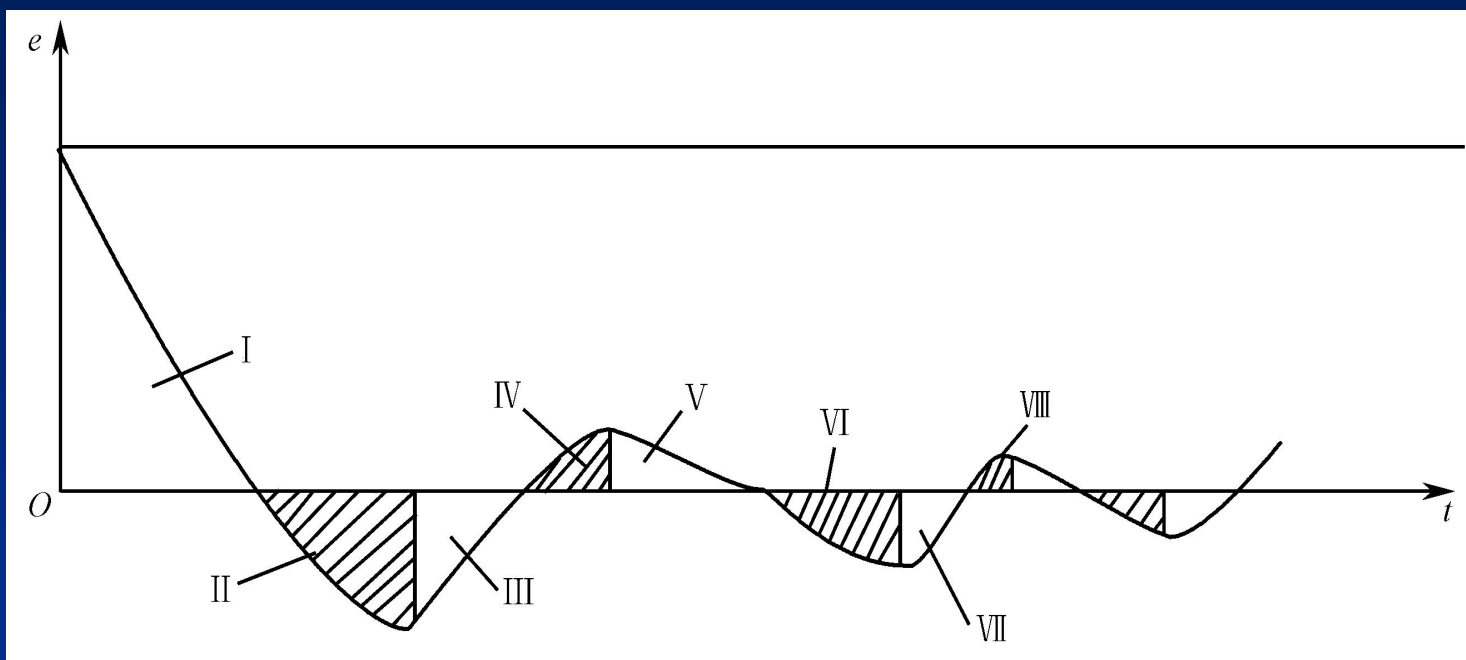


图 典型二阶系统单位阶跃响应误差曲线

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 $|e(k)| > M$ 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

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

如果  $|e(k)| \geq M_2$  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。

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

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。

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

(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。

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。

## 二、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**