



## 第二讲：

---

---

# 基本的控制理论与方法



## 经典控制

---

---

- 波德图 (*Bode Plot*) 方法
- 奈魁斯特稳定性 (*Nyquist Stability*) 分析
- 代数稳定性判据和根轨迹方法
- **PID**控制
- 经典控制的特征
- 维纳滤波器方法的基本思想

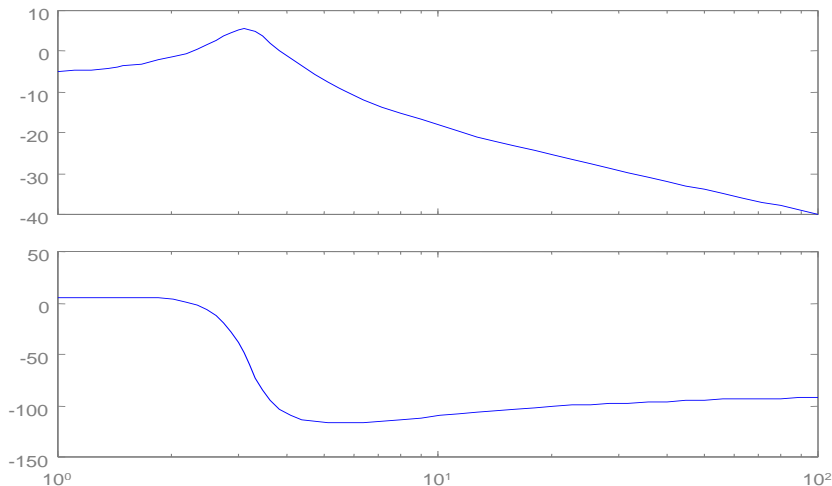
# 波德图 (Bode Plot) 方法

频率响应法:

(1) 幅频特性 (Magnitude)

(2) 相频特性 (Phase)

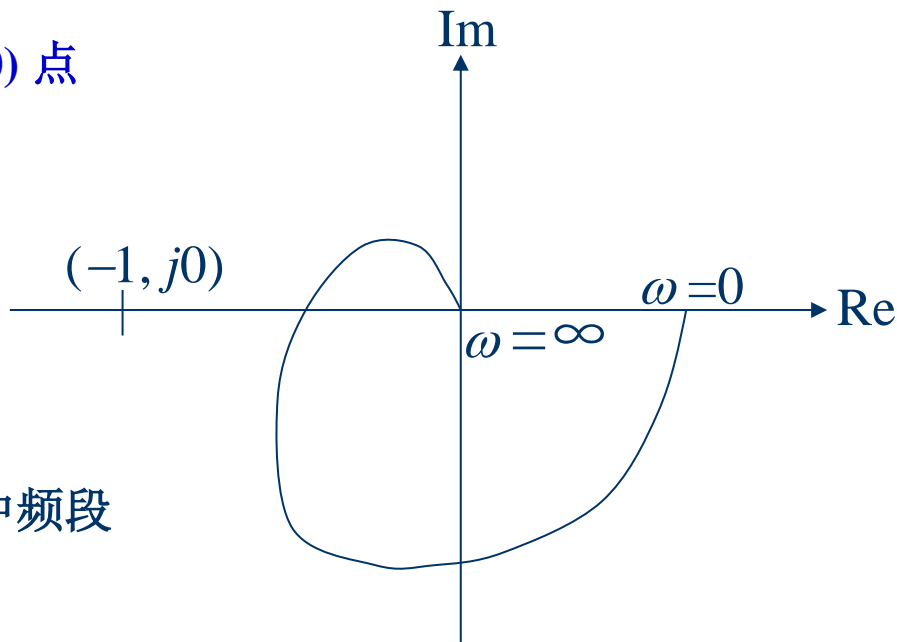
$$G(s) = \frac{s + 5}{s^2 + s + 10}$$



**增益和相位裕量 (Gain and Phase Margin)**

## 奈魁斯特稳定性 (Nyquist Stability) 分析

开环频率特性: 是否围绕  $(-1, j0)$  点



在保持稳定性的前提下, 改善中频段的特性, 从而提高系统的性能。

## 代数稳定性判据和根轨迹方法

- 劳斯稳定性 (*Routh Stability*) 分析

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 = 0$$

$s^n$	$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$	$a_{n-6}$	$\cdots$
$s^{n-1}$	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$	$a_{n-7}$	$\cdots$
$\vdots$	$\vdots$				
$s^0$	$\cdots$				

- 伊万斯根轨迹 (*Evans Root Locus, 1948*)方法

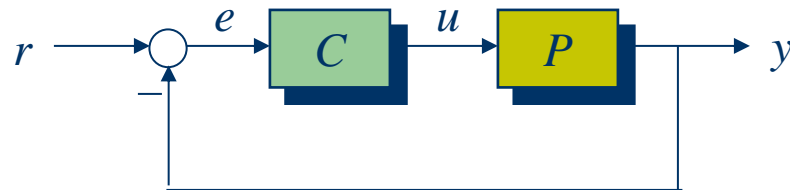
# PID控制

## • PID (Proportion-Integration-Differentiation) 控制

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^{\infty} e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(s) = (K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s) E(s)$$

$$C(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s$$





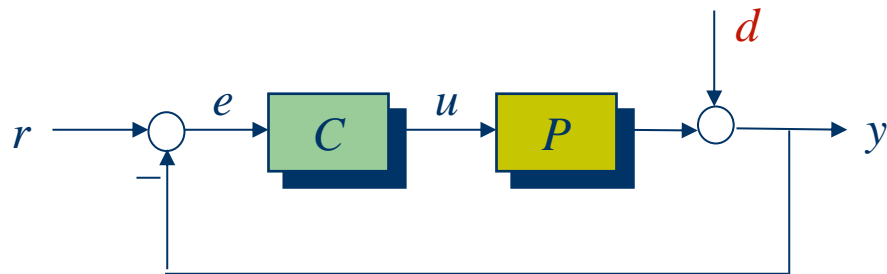
## 经典控制的特征

---

---

- **SISO (Single Input Single Output) 系统**
  - **LTI (Linear Time-Invariant) 系统**
  - 频域方法
  - 传递函数 (复变函数作为数学工具)
- » 外部扰动抑制和多变量系统问题:
- 维纳 (Wiener) 滤波器方法
  - 状态空间方法

## 维纳滤波器方法的基本思想



$d$ : 可以用某种随机过程来表示的外界扰动

把反馈控制问题变成数学上的某些优化问题

→ 卡尔曼-布西滤波器 (Kalman-Bucy Filter) 理论

→ 现代控制理论





# 现代控制

---

---

- 状态空间方法
- 能控性和能观性
- 内部稳定性问题
- LQ控制、LQR和LQG方法
- 最活跃的几个领域
- 现代控制的特征

# 状态空间方法

## • 状态空间模型 (*State Space Model*) 方法

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

$$x = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau$$

$$e^{At} = I + At + \frac{(At)^2}{2!} + \frac{(At)^3}{3!} + \dots$$

当 $t=0$ 时,  $x = e^{At} x(0)$  是  $\dot{x} = Ax$  的解。

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B + D$$



## 能控性 (Controllability) 分析

**定义:** 存在一个输入 $u(t)$ , 使 $x(t)$ 从任意的初始状态出发, 在有限时间内达到原点, 则  $(A, B)$  是能控的。

**定理:** 下述条件是等价的。

- $(A, B)$  是能控的;
- $\text{rank} [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] = n$ ;
- 存在实数矩阵 $F$ , 使 $A+BF$ 具有任意指定的 $n$ 个对称于实轴的复数特征根;
- 对于任意的复数 $\lambda$ , 有 $\text{rank} [\lambda I - A \ B] = n$ 。

## 能观性 (Observability) 分析

**定义:** 任意的初始状态, 可以由有限时间内的输出 $y(t)$ 和输入 $u(t)$ 来唯一决定, 则  $(C, A)$  是能观的。

**定理:** 下述条件是等价的。

- $(C, A)$  是能观的;
- $\text{rank} [C \ CA \ CA^2 \ \dots \ CA^{n-1}]^T = n$ ;
- 存在实数矩阵 $H$ , 使 $A+HC$ 具有任意指定的 $n$ 个对称于实轴的复数特征根;
- 对于任意的复数 $\lambda$ , 有 $\text{rank} [\lambda I - A \ C]^T = n$ 。

# 内部稳定性分析

**外部稳定性:** 输入输出 (BIBO) 稳定性, 基于 $G(s)$ 进行分析

**内部稳定性:** 内部状态的收敛性, 基于系统矩阵 $A$ 进行分析  
( $A$ 的特征根具有负实部)



$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

能控性+能观性: 内部稳定性 = 外部稳定性

# LQ (Linear Quadratic) 最优控制

- LQ控制的基本特征:**
- 控制对象是线性的
  - 控制目标是使线性二次型性能指标为最小

**LQR问题:** 对于控制对象:  $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$   
寻找控制规律:  $u(t) = -Kx(t)$

$$J = \int_0^{\infty} \left[ \underset{\substack{\uparrow \\ \text{控制精度}}}{x^T(t)Qx(t)} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{控制能量(成本)}}}{u^T(t)Ru(t)} \right] dt$$

**控制系统设计:** 寻找控制规律 $u(t)$ , 实现 $\min J$

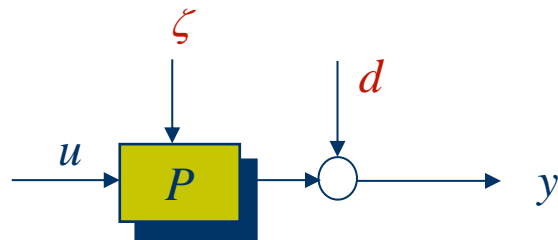
**控制问题的解:**  $K = R^{-1}B^T P$  ( $P$ 为Riccati方程的解)

# LQG (Linear Quadratic Gaussian) 方法

**LQG问题:** 对于控制对象:  $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \xi$

测量含有噪声:  $y = Cx + d$

$\xi$ 和 $d$ 满足: 
$$\begin{cases} E[\xi(t)\xi^T(\tau)] = \Xi\delta(t-\tau) \\ E[d(t)d^T(\tau)] = \Theta\delta(t-\tau) \end{cases}$$



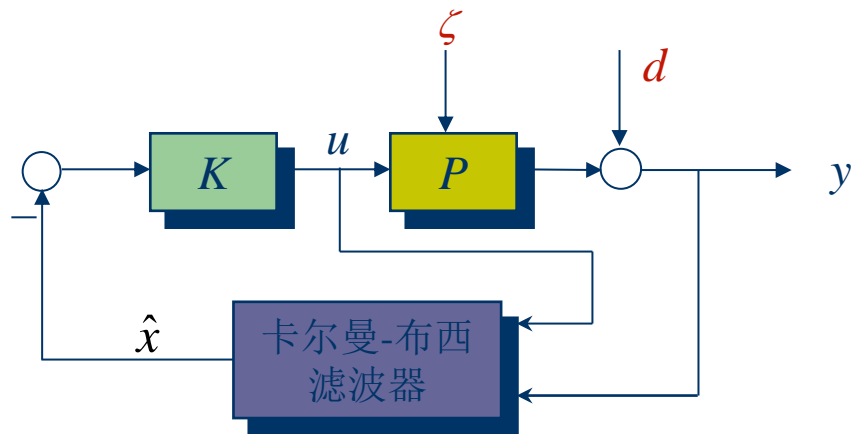
构造一个补偿器, 产生一个控制输入 $u$ , 使如下性能指标最小:

$$J = \lim_{t \rightarrow \infty} E[x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]$$

# LQG 控制器

## 控制问题的解 (分离原理):

- 设计卡尔曼-布西滤波器, 获得 $x$ 的估计值;
- 设计基于 $x$ 的估计值的状态反馈增益矩阵 $K$ 。



基于黎卡提方程的解进行设计





## 现代控制中最活跃的几个领域

- 最优控制 (*Optimal Control*)
- 自适应控制 (*Adaptive Control*)
- 随机控制 (*Stochastic Control*)
- 系统辨识 (*System Identification*)
- 线性多变量系统的频域方法
- 大系统理论 (*Large Scale System*):
  - (1) 递阶控制 (*Hierarchical Control*)
  - (2) 分散控制 (*Decentralized Control*)



## 现代控制的基本特征

- **MIMO (Multi-Input and Multi-Output) 系统**
- **扰动特性 (数学期望, 均方差) 已知的系统**
- **时域方法**
- **状态空间模型 (矩阵论作为数学工具)**

### 现代控制理论的问题点:

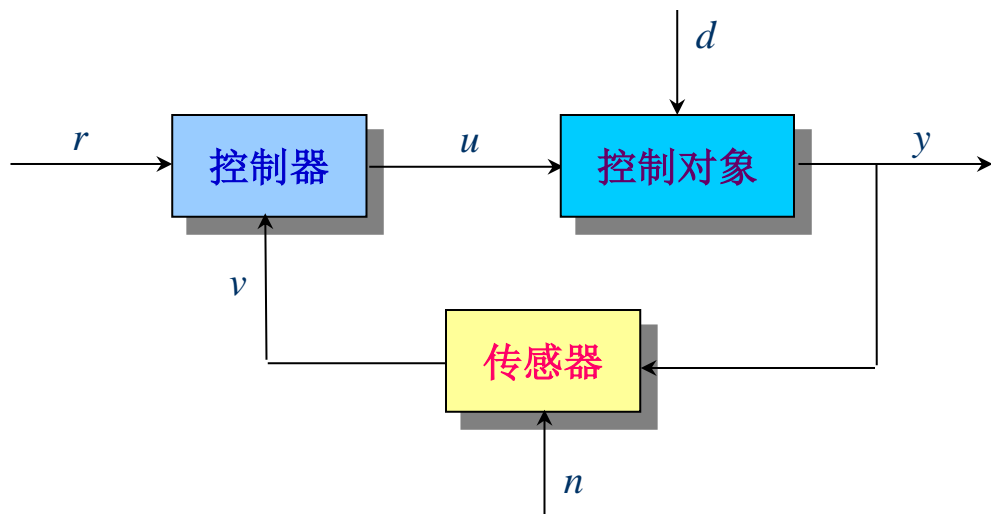
- **LQG控制—外界扰动和模型不确定性;**
  - **经典控制中的频域方法应用于多变量系统。**
- 鲁棒控制理论**



# 先进控制

- 鲁棒控制
  - 不确定系统的鲁棒控制问题
  - $H_\infty$ 控制方法
  - $\mu$ 分析和 $\mu$ 综合方法
- 智能控制
  - 专家控制
  - 模糊控制
  - 神经网络控制
- 集成控制

# 基本的反馈控制系统

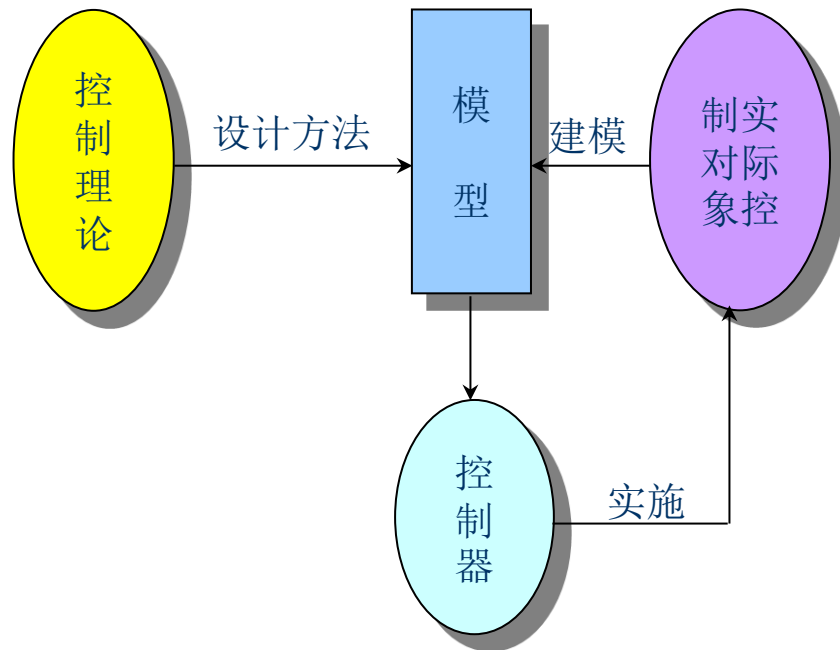


$r$  — 目标输入,  $y$  — 控制对象输出,  $u$  — 控制输入  
 $v$  — 传感器输出,  $n$  — 传感器噪声,  $d$  — 外部扰动

# 控制系统设计与不确定性

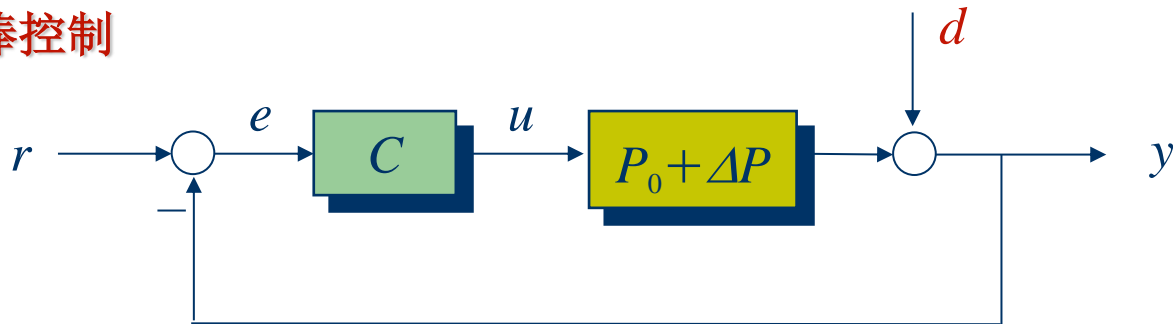
## 需要考虑的不确定性:

- 来自控制对象的模型化误差;
- 来自控制系统本身和外部的扰动信号。

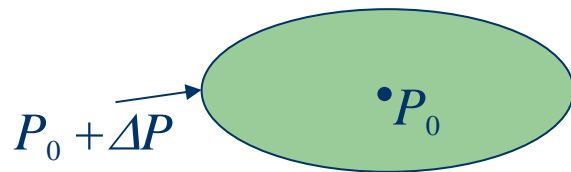


# 鲁棒控制研究的基本问题

## • 不确定系统的鲁棒控制



- 不确定性系统的描述方法；
- 鲁棒性分析和设计方法；
- 鲁棒控制的应用领域。

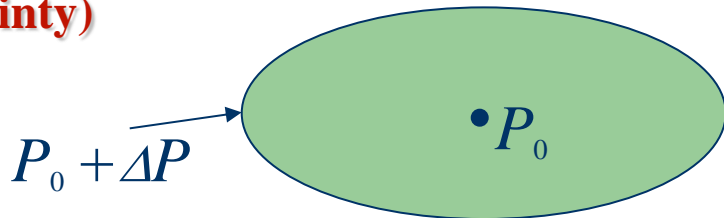


$$\|d(s)\| \leq \|W(s)\|$$

# 系统不确定性

- 非结构不确定性 (Unstructured Uncertainty)

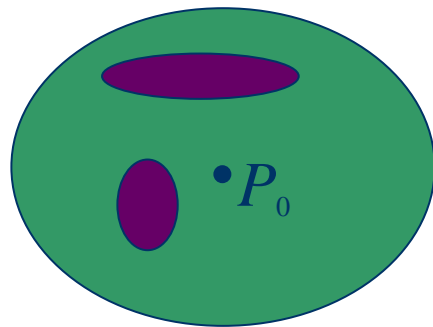
—— $H_\infty$ 控制



- 结构不确定性 (Structured Uncertainty)

—— $\mu$ 分析与 $\mu$ 综合

$$U_S = \left\{ \frac{c}{s^2 + as + b} : a \in [a_{\min}, a_{\max}]; b \in [b_{\min}, b_{\max}]; a + b < k \right\}$$



## 模型不确定性的描述

- 公称模型
- 表示不确定性的摄动及其与公称模型的关系
- 摄动的最大值

$$P_A(s) = P(s) + \Delta(s)$$

$$|\Delta(j\omega)| \leq |W(j\omega)|, \forall \omega \in R$$



$$U_A = \left\{ P(s) + \Delta(s) : |\Delta(j\omega)| \leq |W(j\omega)|, \forall \omega \in R \right\}$$



## 加性和乘性不确定性

**加性不确定性：**实际控制对象的传递函数 $P_A(s)$ 与公称模型的传递函数 $P(s)$ 之差，即

$$\Delta(s) = P_A(s) - P(s)$$



$$P_A(s) = P(s) + \Delta(s)$$

**乘性不确定性：**实际控制对象 $P_A(s)$ 与公称模型 $P(s)$ 之相对差，即：

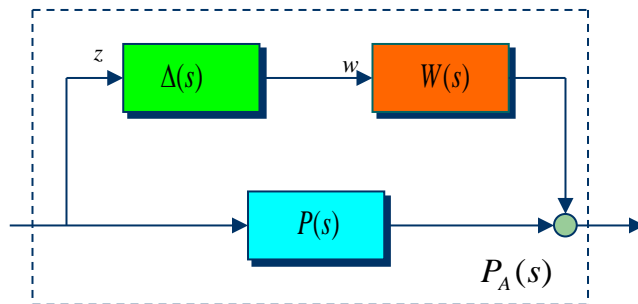
$$\Delta(s) = [P_A(s) - P(s)]P^{-1}(s)$$



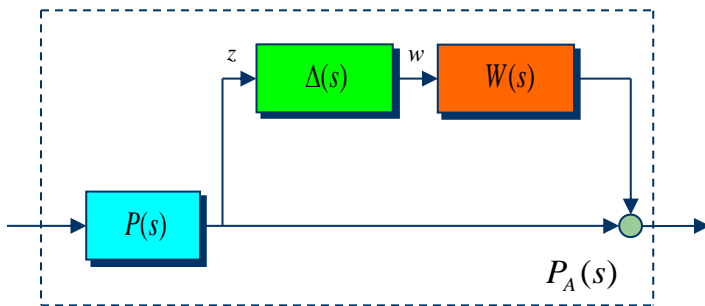
$$P_A(s) = [I + \Delta(s)]P(s)$$

## 加性和乘性不确定性系统框图

加性不确定性的系统:



乘性不确定性的系统:



## 加性不确定性的系统描述

**例：**对于参数变化的情况，考虑

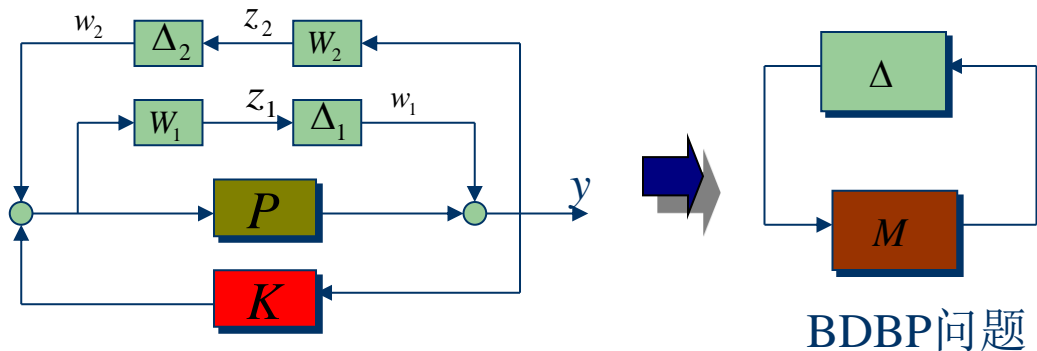
$$P_A(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad 1 \leq T \leq 3 \quad \Rightarrow U_A = \{P_A(s) = P(s) + W(s)\Delta(s), \|\Delta(s)\|_\infty < 1\}$$

设公称模型为  $P(s) = \frac{1}{2s + 1}$ ，则  $\Delta(s) = P_A(s) - P(s) = \frac{(2 - T)s}{(Ts + 1)(2s + 1)}$

$$|P_A(j\omega) - P(j\omega)| = \left| \frac{j\omega(2 - T)}{(j\omega T + 1)(j2\omega + 1)} \right| \leq \left| \frac{j\omega}{(j\omega + 1)(j2\omega + 1)} \right|$$

$$W(s) = \frac{s}{(s + 1)(2s + 1)} \quad \Rightarrow P_A(s) = \frac{1}{2s + 1} + \frac{s}{(s + 1)(2s + 1)} \Delta(s)$$

# 块对角结构不确定性

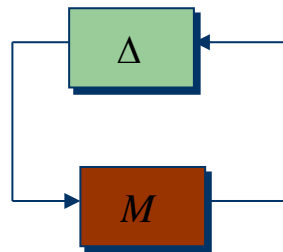


控制对象:  $P_A(s) = P(s) + W_1(s)\Delta_1(s)$

控制性能:  $\|T_{z_2 w_2}(s)\|_\infty < 1$

$$M = \begin{bmatrix} W_1 K (I - PK)^{-1} & W_1 (I - KP)^{-1} \\ W_2 (I - PK)^{-1} & W_2 P (I - KP)^{-1} \end{bmatrix} \quad \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_1 & 0 \\ 0 & \Delta_2 \end{bmatrix} \quad \|\Delta_i\|_\infty < 1, i = 1, 2$$

## 块对角不确定性的更一般形式



$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta_m \end{bmatrix} = \text{block-diag} \{ \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_m \}$$

# 控制系统的鲁棒性

## 鲁棒控制系统(*Robust Control System*):

- 在某一类特定的不确定性条件下具有使稳定性、动态特性和稳态特性保持不变的特性，即这一反馈控制系统具有承受这一类不确定性影响的能力。

## 鲁棒性(*Robustness*):

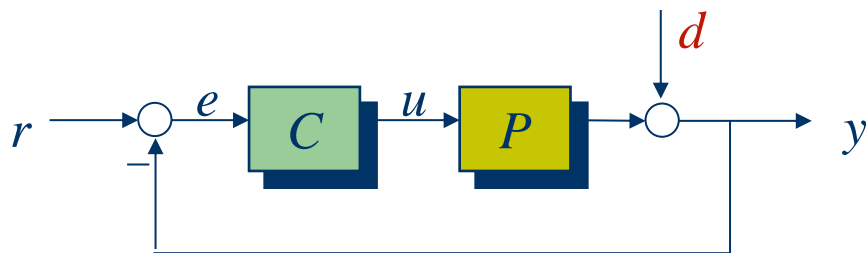
- 鲁棒稳定性——在一组不确定性的作用下仍然能够保证反馈控制系统的稳定性。
- 鲁棒动态特性——通常称为灵敏度特性，即要求动态特性不受不确定性的影响。
- 鲁棒稳态特性——在一组不确定性的影响下仍然可以实现反馈控制系统的渐近调节功能。

## $H_\infty$ 控制的提出与发展

- 1981: Zames利用 $H_\infty$ 范数作为性能指标, 提出最小灵敏度控制问题—— $H_\infty$ 控制问题;
- 1988: Zhou获得 $H_\infty$ 控制问题的状态反馈控制解;
- 1989: Doyle等发表著名的DGKF论文, 获得 $H_\infty$ 控制问题的输出反馈控制解—— $H_\infty$ 控制理论形成。

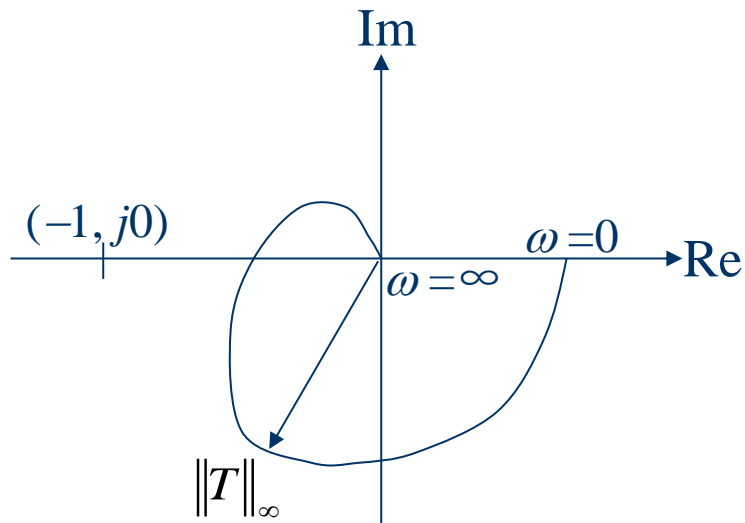
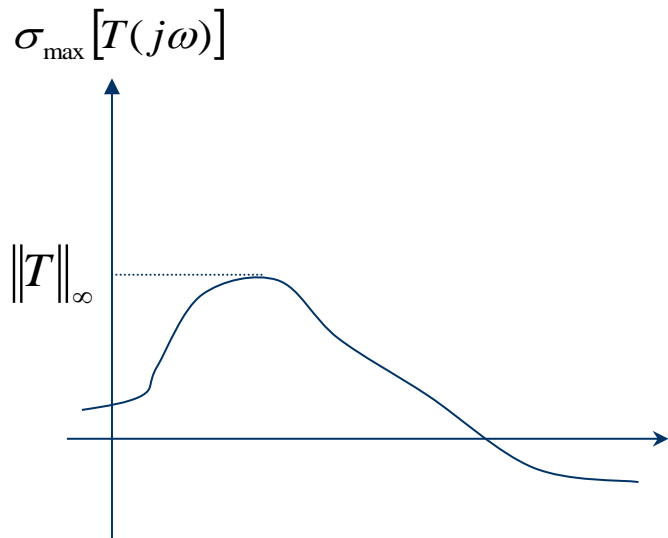
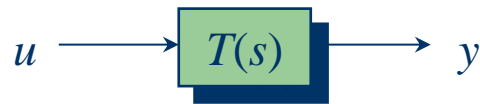
$$S = \frac{1}{1 + PC}$$

$$\|WS\|_\infty < \gamma$$



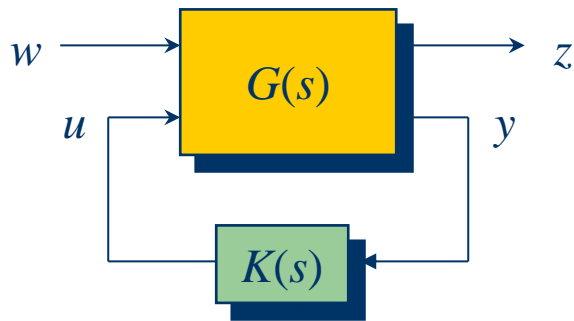
# $H_\infty$ 控制的基本思想

$H_\infty$  范数:  $\|T\|_\infty = \sup_{\omega} \sigma_{\max}[T(j\omega)]$





# $H_\infty$ 控制问题



$$G(s) = \left[ \begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{21}(s) \end{bmatrix}$$

$$T_{zw}(s) = F_l(G, K) = G_{11} + G_{12}K(I - G_{22}K)^{-1}G_{21}$$

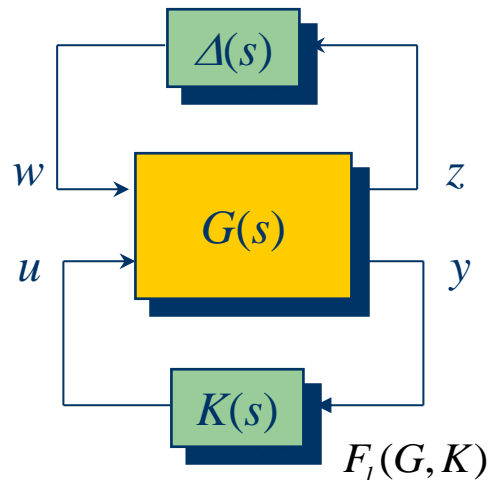
$$G(s) : \begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \\ z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{cases}$$

$$G_{ij}(s) = C_i(sI - A)B_j + D_{ij}$$

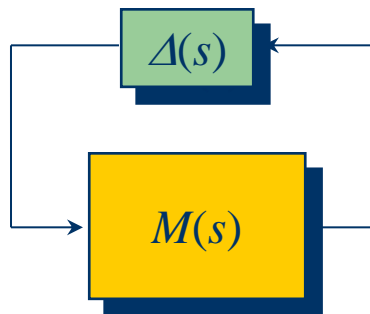
最优:  $\min \|F_l(G, K)\|_\infty$

次优:  $\|F_l(G, K)\|_\infty < \gamma$

# $\mu$ 分析与 $\mu$ 综合



$$\Delta = \text{diag}(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m) \in \underline{\Delta}$$



$$M = F_l(G, K)$$

$$= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mu[M(s)] = \frac{1}{\inf_{\Delta \in \underline{\Delta}} \{ \sigma_{\max}(\Delta) : \det(I - \Delta M) = 0 \}}$$

$\mu$ 分析: 鲁棒稳定性定理; 鲁棒性能定理。

$$\mu \text{ 综合: } \min \| \mu[F_l(G, K)] \|_{\infty}, \quad \| \mu[F_l(G, K)] \|_{\infty} < \gamma$$



## 鲁棒控制的研究方法

- 奇异值曲线 (*Singular Value Plot, SVD*) 方法
- 结构奇异值曲线 (*Structured Singular Value Plot*) 方法
- $H_\infty$  控制 ( *$H_\infty$  Control*)
- $\mu$  综合 ( *$\mu$  Synthesis*)
- LMI (*Linear Matrix Inquation*)
- 尤拉参数化 (*Youla Parametrization*)
- 二次稳定化控制 (*Quadratically Stabilizing Control*)
- 参数空间稳定性分析: **Kharitonov定理, 棱边定理**

# 智能控制 (*Intelligent Control*) 的发展

## 基于知识的控制 (*Knowledge Based Control*)

### ——人工智能与自动控制相结合的产物

**1965年:** 傅京孙提出把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统。

**1967年:** Leondes首次使用“智能控制”一词。

**1971年:** 傅京孙论述了人工智能与自动控制的关系。

**1985年:** IEEE在美国纽约召开第一届智能控制学术讨论会。

**1987年:** 在美国费城召开智能控制国际会议。



## 智能控制涉及的领域

---

---

- (1) 分级递阶智能控制 (*Hierarchical Intelligent Control*)
- (2) 学习控制 (*Learning Control*)
- (3) 专家控制 (*Expert Control*)
- (4) 模糊控制 (*Fuzzy Control*)
- (5) 神经网络控制 (*Neural Network Control*)

## 专家系统研究进展

- ❑ 1965年由Stanford大学开始研制的DENDRAL系统是世界上公认的最早和最成功的专家系统之一，它模拟化学家的工作过程，对未知有机化合物的质谱实验数据进行解释，从而推断出可能存在的分子结构及原子结构。
- ❑ 上世纪70年代初期开发的MYCIN是很有影响的一个医疗诊断专家系统，用于诊断和治疗传染性疾病。
- ❑ PROSPECTOR是一个较为大型的探矿专家系统，始建于上世纪80年代初期，可以估计钼、铜、锌等多种矿的蕴藏量，提供钻探井位。
- ❑ 上世纪80年代是专家系统研究和应用最活跃的时期，1986年Åström提出专家系统的概念，专家控制应用于冶金、化学、电力和石油等行业，为过程控制提供了有力手段。

# 专家控制的基本概念

- 知识的描述 (知识库):

  - 产生式规则 (*Production Rule*)——规则模型 (*Rule Model*);
  - 框架模型 (*Frame Model*);

.....

- 推理策略 (推理机):

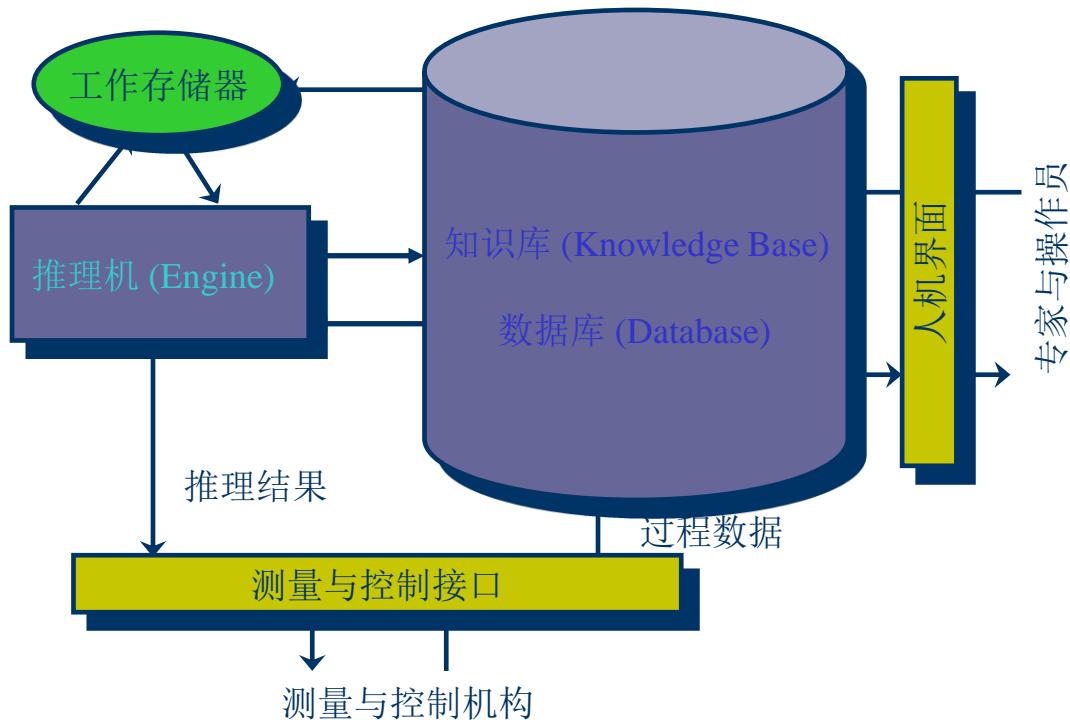
  - 前向推理 (*Forward Chaining*);
  - 后向推理 (*Backward Chaining*);
  - 基于模型的推理 (*Model Based Reasoning*);

.....

- 数据库 (Database) 和工作内存 (Working Memory)

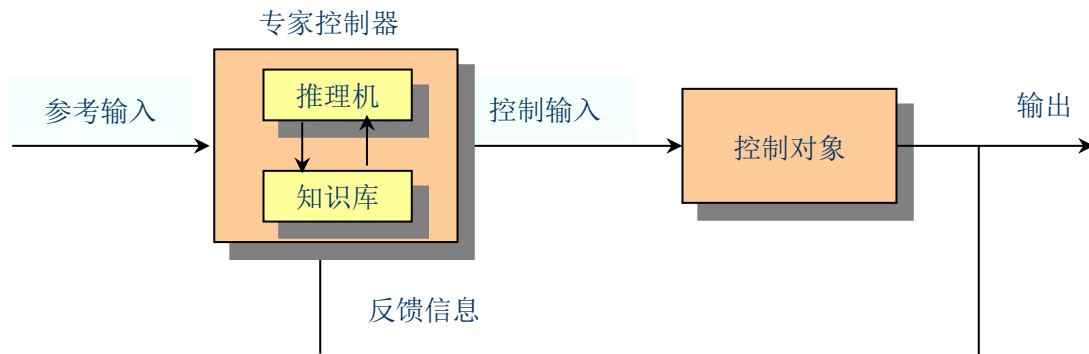
- 接口

# 专家控制 (专家控制器)



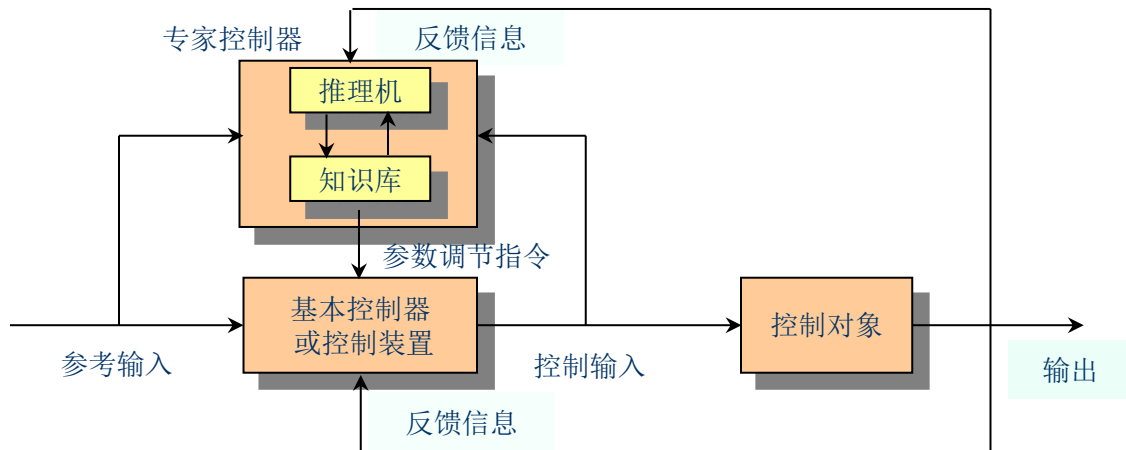


# 直接专家控制系统



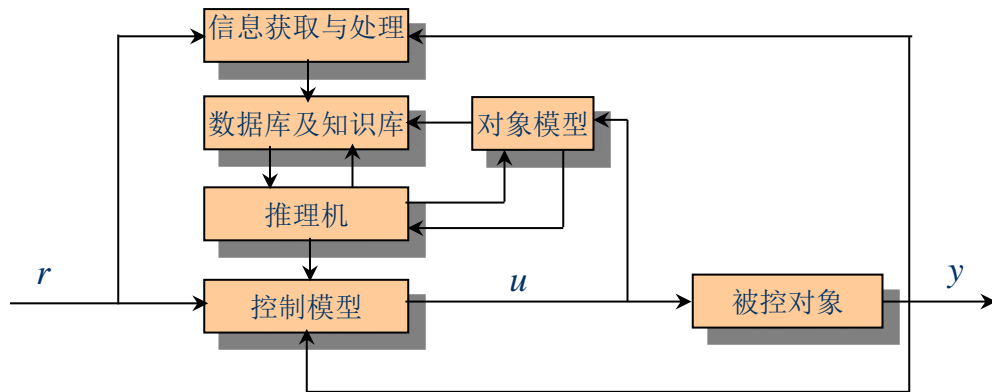
- **特点：**专家控制器直接作用于推理对象。
- **专家控制器：**除了知识库和推理机外，还有信息获取与处理以及控制与操作机构。

## 间接专家控制系统



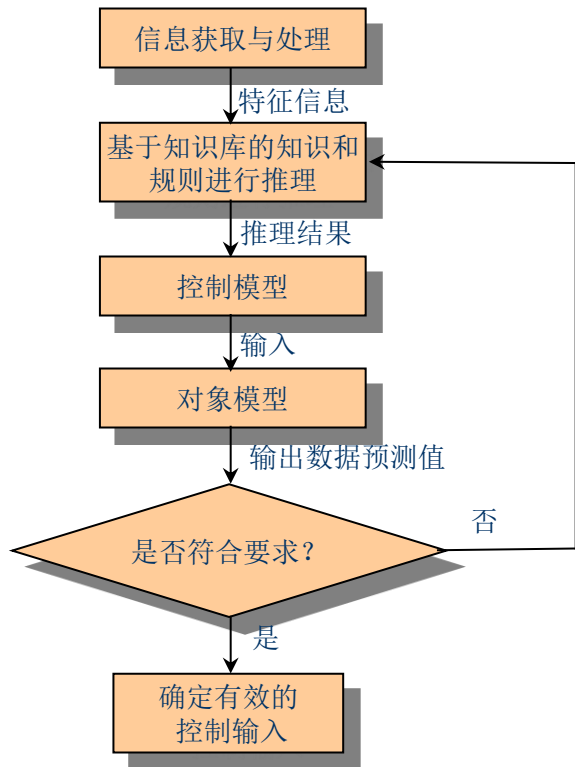
- **特点:** 直接作用于推理对象的是基本控制器或控制装置，专家控制器则用于调节基本控制器或控制装置参数，对控制系统起间接作用。

# 基于模型的专家控制



- **对象模型**: 可以基于物理和化学反应规律、物料平衡关系、过程输入输出数据离线建立起来，在实际运行中进行修正。
- **模型的作用**: 用于预测过程的未来行为，估计控制输入对控制对象的影响。

# 基于模型的专家控制系统推理过程



- 首先是获取过程的状态与信息，进行特征处理；
- 基于知识库的知识和规则进行推理，根据推理结果由控制模型获得控制输入；
- 利用对象模型预测在这种控制输入下过程的输出特性；
- 判断特性是否符合要求，是则确定有效控制，否则继续进行推理，直到获得有效的控制输入为止。

## 专家控制系统的应用领域

- ❑ **大型发电站系统：**设备的自动化和优化操作指导；确定设备故障的原因
- ❑ **电力系统：**准确确定故障点，进行故障恢复操作
- ❑ **冶金工业和化学工业：**基于专家的操作人员的长期工作经验，实现优化控制，确定过程的优化运行，提高产品质量和降低成本
- ❑ **工厂自动化：**建立大型复杂的事件驱动控制系统
- ❑ **产业机器人和智能机器人领域：**建立一种高级的问题求解机能，实现一种与人类的直观感觉相适应的柔性信息处理功能

# 模糊控制的发展概况

## □ 模糊数学和模糊控制的概念

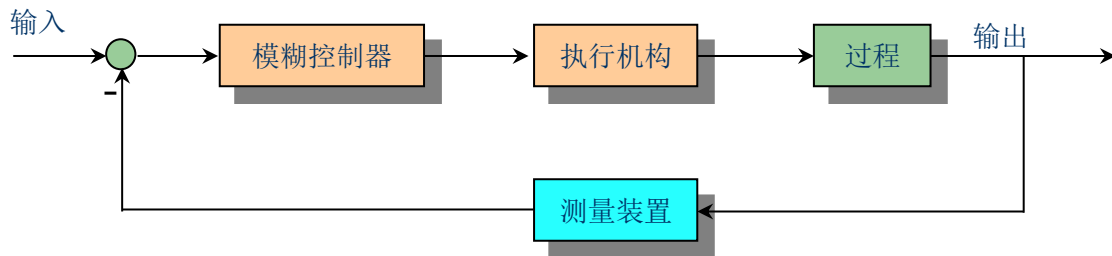
由美国加利福尼亚大学著名教授Zadeh提出

- ✓ 1965: *Fuzzy Sets*
- ✓ 1968: *Fuzzy Algorithm*
- ✓ 1972: *A Rationale for Fuzzy Control*

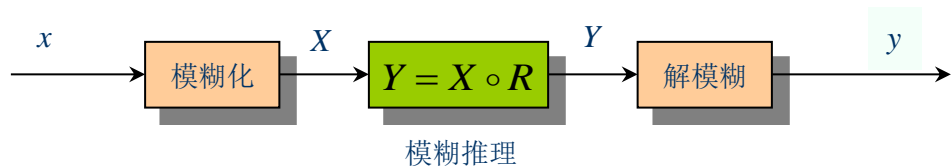
## □ 模糊控制的应用

- ✓ 1974年：英国伦敦大学教授Mamdani应用模糊控制语句组成模糊控制器，应用于锅炉和汽轮机的运行控制
- ✓ 1975年：工业反应过程的温度控制
- ✓ 1976年：热水装置、压力容器、压力与液面控制
- ✓ 1977年：多变量热变换过程控制、交通枢纽指挥控制
- ✓ 1979年：自组织模糊控制器
- ✓ 上世纪80年代开始大规模应用于化工、机械、冶金、工业窑炉、水处理、食品生产等大型工业过程控制中

# 模糊控制系统的结构



系统核心是模糊控制器:



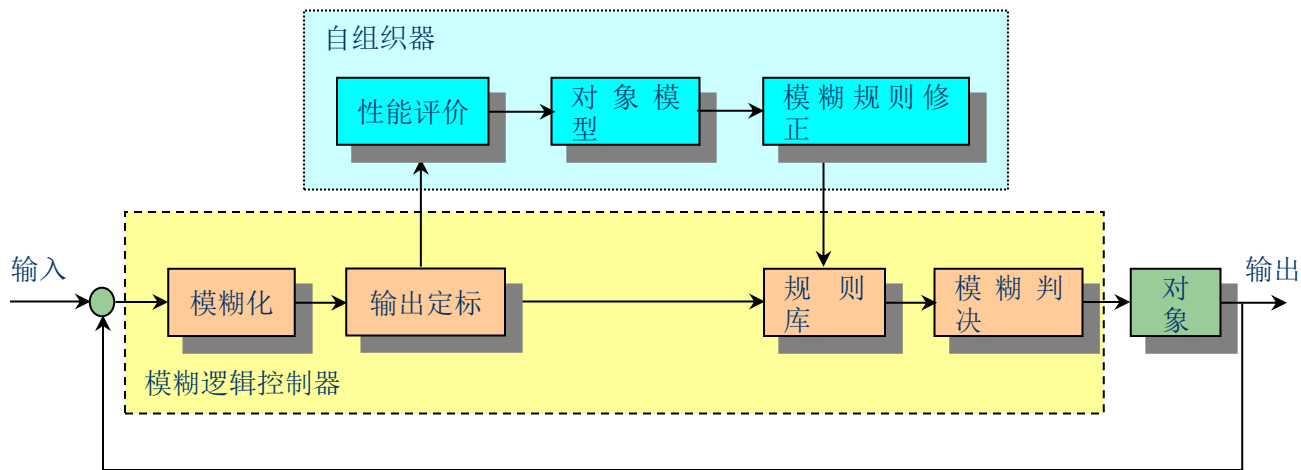
**模糊化:** 把精确量变成模糊量，即语言变量

**模糊推理:** 模糊决策，基于输入输出的模糊关系 $R$ ，进行集合运算，得到模糊量

**解模糊:** 采用模糊判决，把模糊变量变成精确量

# 自组织模糊控制器

由英国Mamdani于70年代末提出

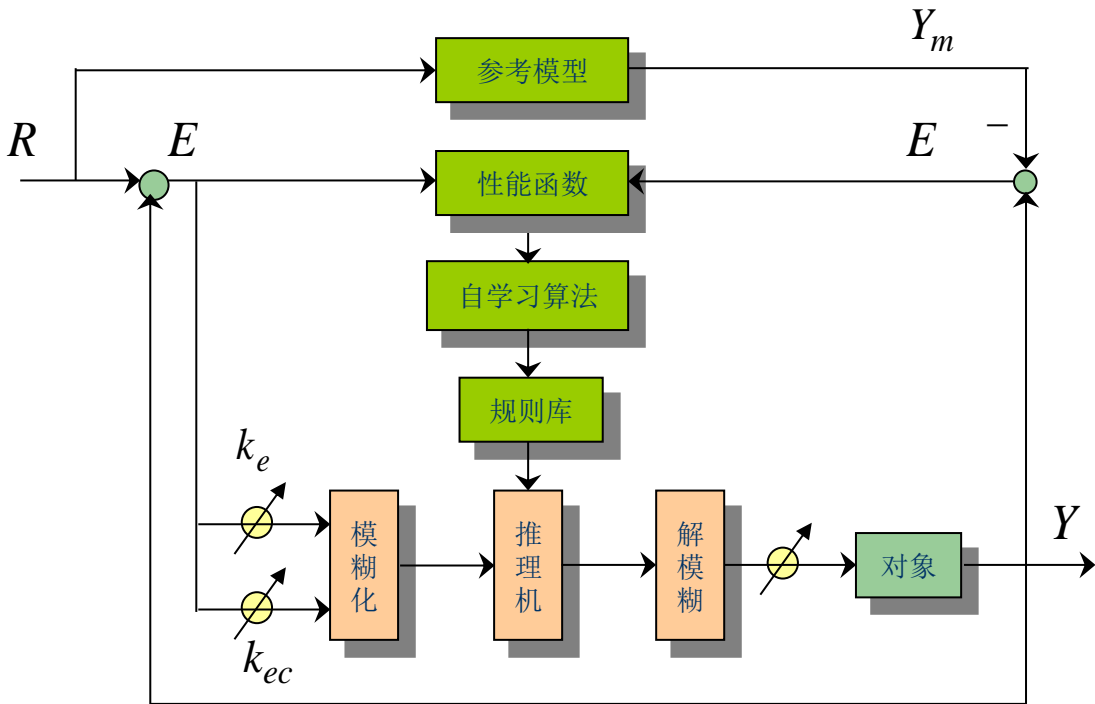


- **自组织器**：对每一输入/输出响应的采样进行评价，对控制器产生修正作用
- **模糊逻辑控制器**：作为基本控制器使用



# 自学习模糊控制器

- 把自学习功能引入模糊控制器中，使之能从环境和变换过程中学习足够相关信息，辨识、分类和决策产生出新的控制律。
- 此外，还有专家模糊控制器等。



# 模糊控制的应用领域

- 过程控制
  - ✓ 凝聚反应过程的浑浊度、碱度和pH值
  - ✓ 排水过程的水位、水位变化、排水量和泵转速
  - ✓ 化学反应热力系统的温度和转矩
  - ✓ 供气过程的电极高低、转炉吹炼设定等
- 核反应堆控制
  - ✓ 核反应过程的输出量、燃料温度和冷却层温度等
- 自动销售机控制和机器人控制

# 神经网络控制

90年后迅速发展，在控制中主要使用：

- BP (*Backpropagation Network*) 网络
- RBF (*Radial Basis Function*) 网络

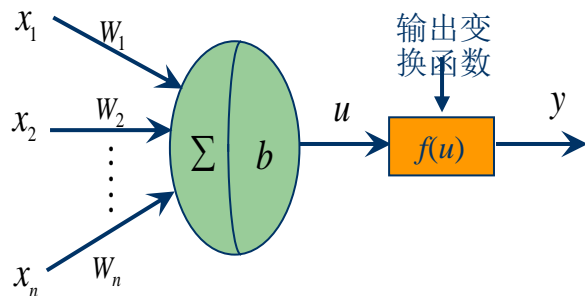
神经网络的基本概念：

- 网络结构 (*Network Architecture*)
- 训练 (*Training*) 或学习

$w$ : Weight

$b$ : Bias

$f$ : Sigmoid Transfer Function



# Sigmoid 函数

## □ 二值函数

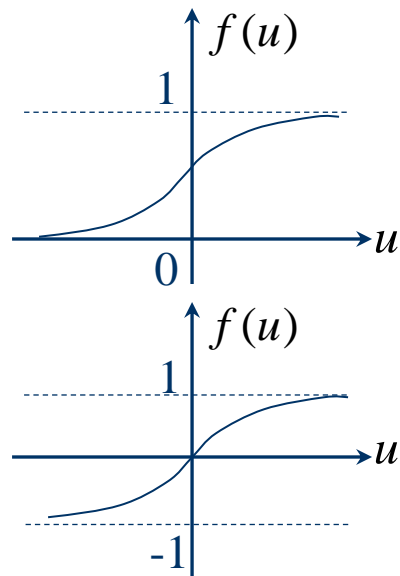
$$f(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases}$$

## □ S形函数

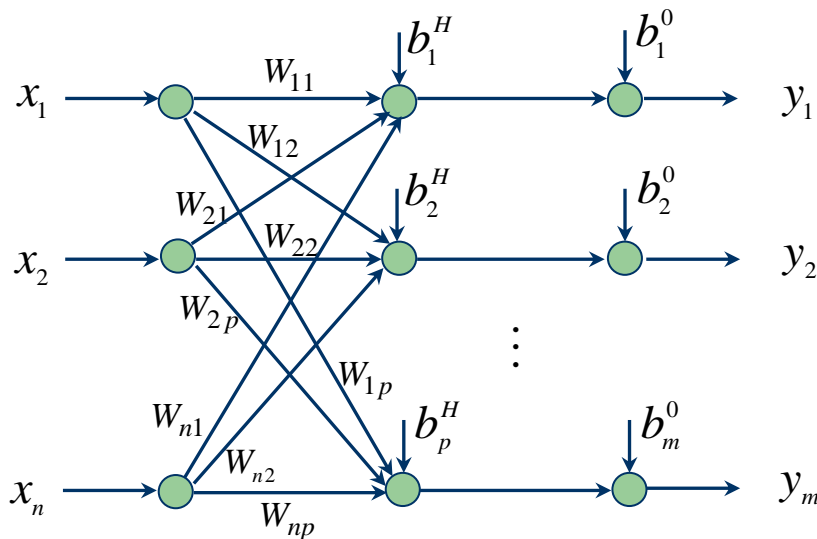
$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha u}} \rightarrow [0, 1]$$

$$f(u) = \frac{1 - e^{-\alpha u}}{1 + e^{-\alpha u}} \rightarrow [-1, 1]$$

$$f(u) = -\frac{2}{1 + e^{-2u}} \rightarrow [-1, 1]$$



## BP神经网络结构 (3层)



输入层的神经元：输入与输出相等

输出层的神经元：输出等于输入加上阈值

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ij} x_i + b_j^H\right) + b_j^0$$

# 神经网络的学习

## 学习的目标函数:

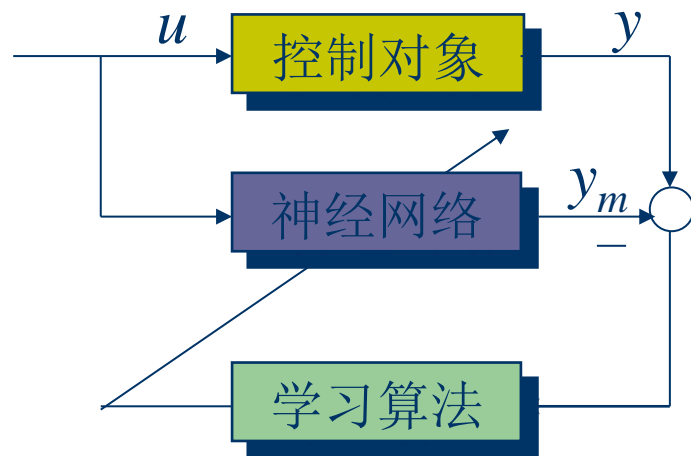
$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y(i) - y_m(i)]^2$$

## 学习算法:

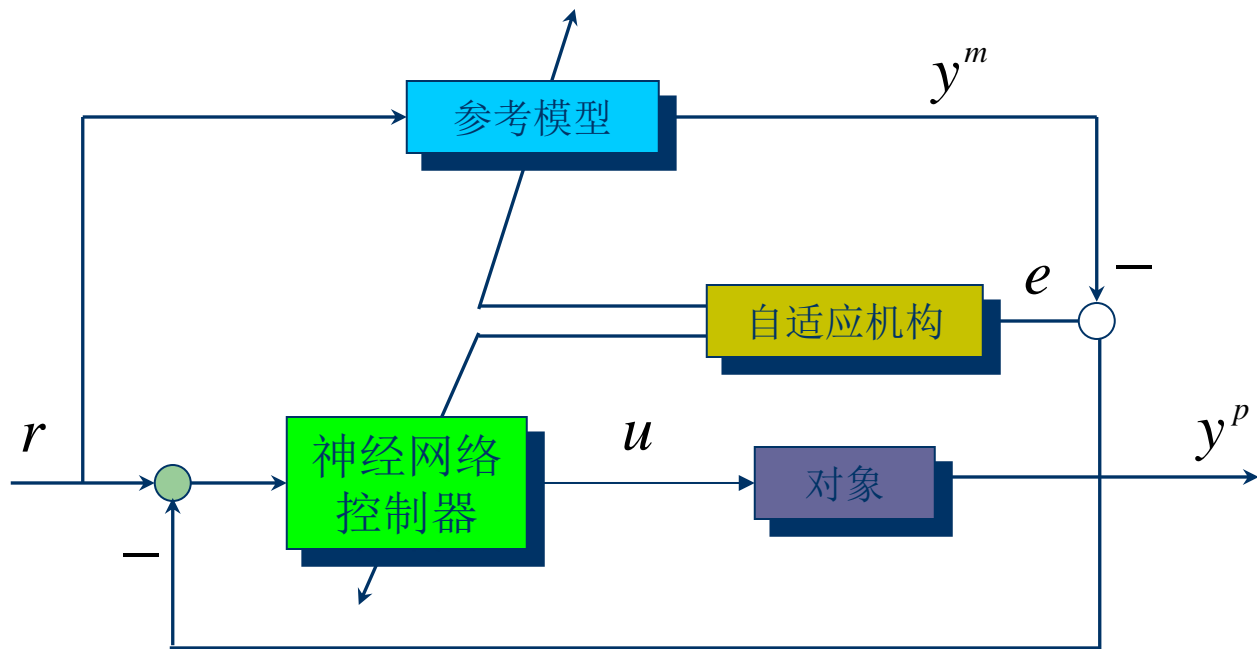
- 基本的BP学习算法等;
- Matlab Neural Network Toolbox

## 梯度下降学习算法:

$$\begin{cases} x_{wb}(k+1) = x_{wb}(k) - \eta_{wb}(k) g_{wb}(k) \\ g_{wb}(k) = \frac{\partial J}{\partial x_{wb}}(k) \end{cases}$$

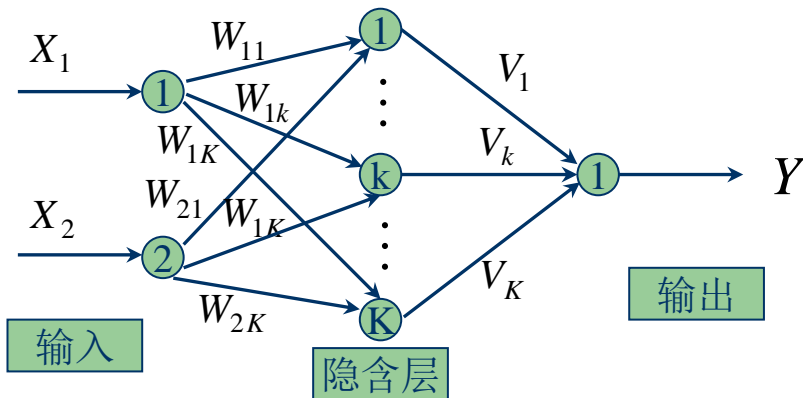


# 神经网络模型参考自适应控制系统



# 模糊神经网络(FNN)

## 具有模糊信号和模糊权值的神经网络



$X_1, X_2$ : 模糊输入信号

神经元 $k$ 的输入为:  $I_k = X_1W_{1k} + X_2W_{2k}, k=1,2,\dots, K$

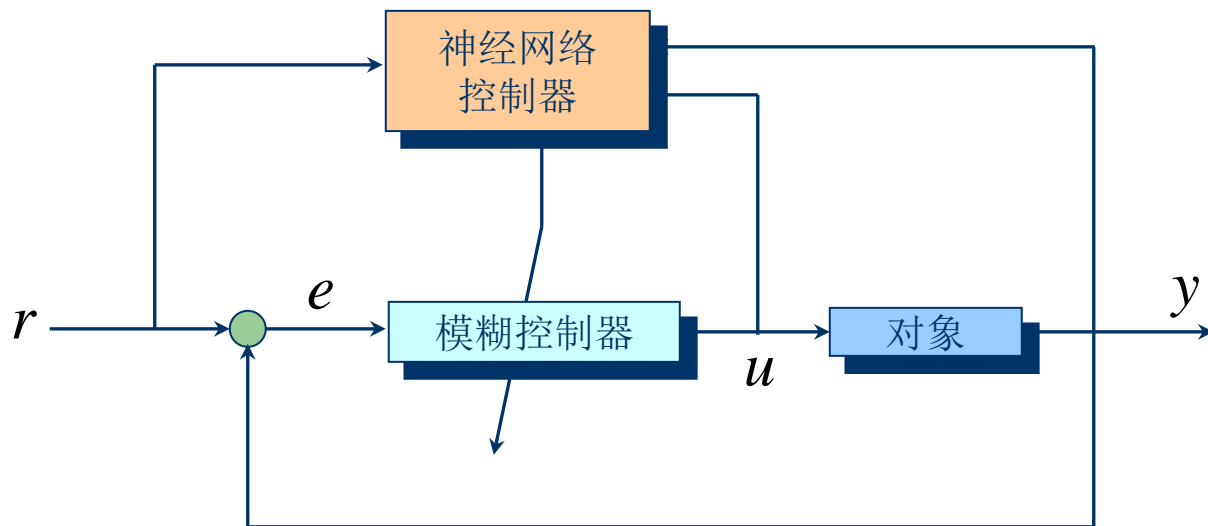
神经元 $k$ 的输出为:  $Z_k = f(I_k), k = 1,2,\dots, K$

输出神经元的输入为:  $I_0 = Z_1V_1 + Z_2V_2 + \dots + Z_KV_K$

最后输出为:  $Y = f(I_0)$



# 神经网络模糊控制系统



**神经网络控制器：**用于学习，确定对象的非线性特性

**模糊控制器：**进行似然推理，获得平滑的控制信号



## 神经网络在控制中的作用

- 非线性系统辨识
- 冶金过程控制
- 水轮发电机同步控制
- 高速列车控制
- 石化过程控制
- 机器人控制
- 图象识别与在线控制
- 在线故障监测与诊断

# 集成控制

## 基于模型和知识的控制 (*Model and knowledge Based Control*)

- 基于解析模型的专家控制
- 自适应+模糊控制
- 神经网络+鲁棒控制 ( $H_{\infty}$ 控制) .....

## 集成控制器(*Integrated Controller*)

