

自动化导论

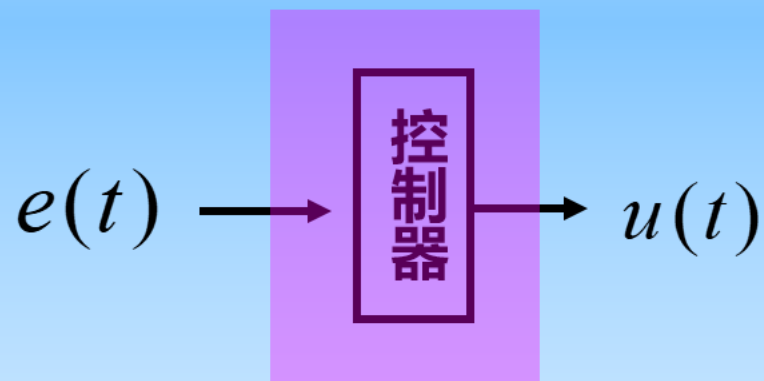
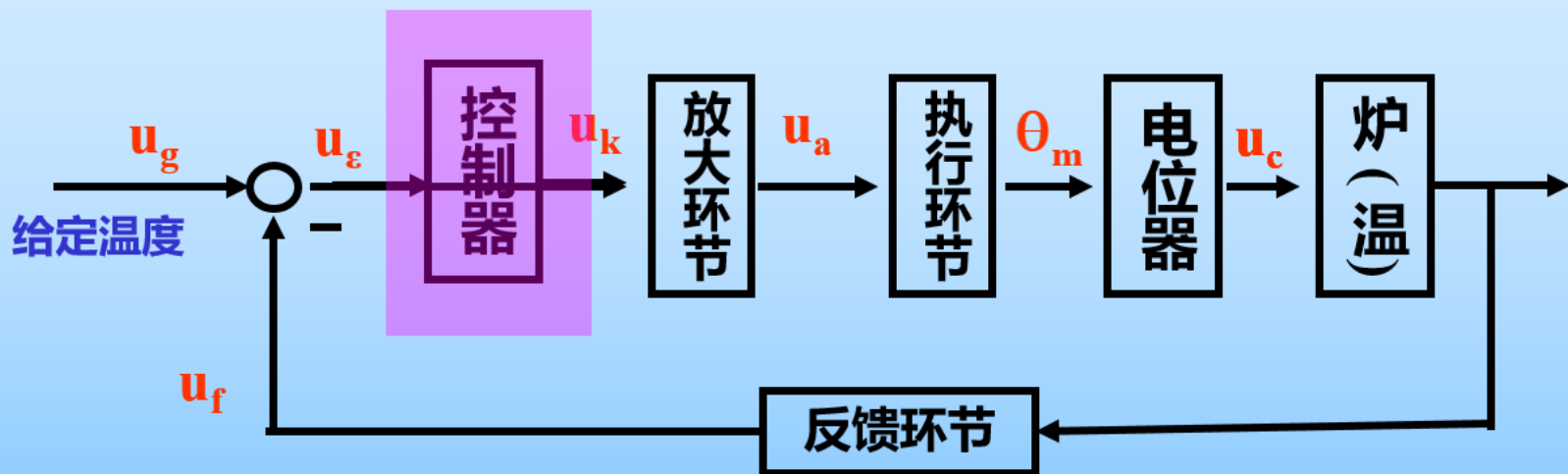
Automation: An Introduction

南京大学控制科学与智能工程系

陈春林

Email: clchen@nju.edu.cn

2025年4月1日



核心问题：控制器产生控制律的可能方法有哪些？

5 自动控制系统的基本控制方法

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

5.2 最优控制

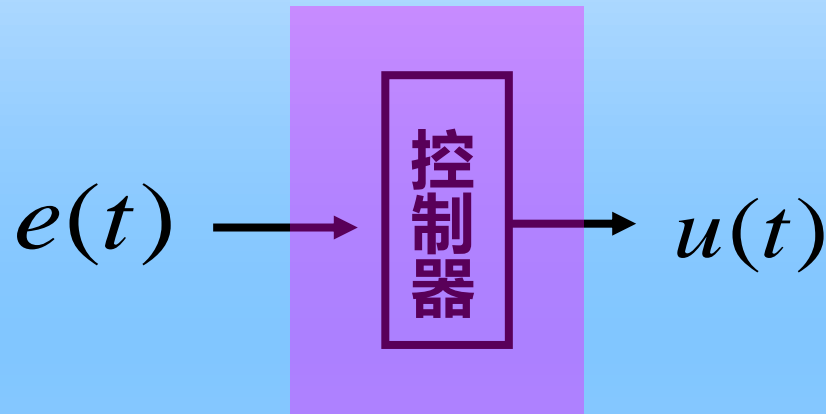
5.3 自适应控制

5.4 智能控制

5.5 非线性控制

5.1 比例积分微分控制

PID (Proportional Integral Derivative) Controller



$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

5.1 比例积分微分（PID）控制

◆ 比例控制（器）

$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$u(t) = K_C e(t)$$

1-○过程：只要一出现偏差，控制器即产生控制作用。

优点：控制及时，通过与偏差量大小成正比的“纠差力”减少偏差

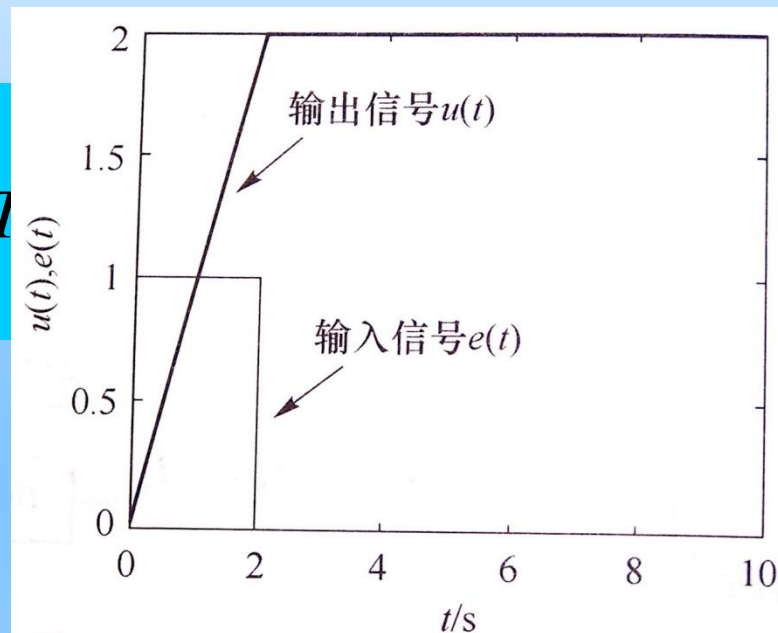
缺点：不能消除偏差

5.1 比例积分微分（PID）控制

◆ 积分控制（器）

$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$



I-O过程：输出 $u(t)$ 与输入偏差 $e(t)$ 的积分成正比。

优点：（1）积累作用——只要偏差存在，积分就起作用——可消除系统静差
（2）记忆作用——不会因一时的偏差为零而失去积分作用

缺点：延缓作用——输入突变时，输出不会突变——降低了系统的反应速度

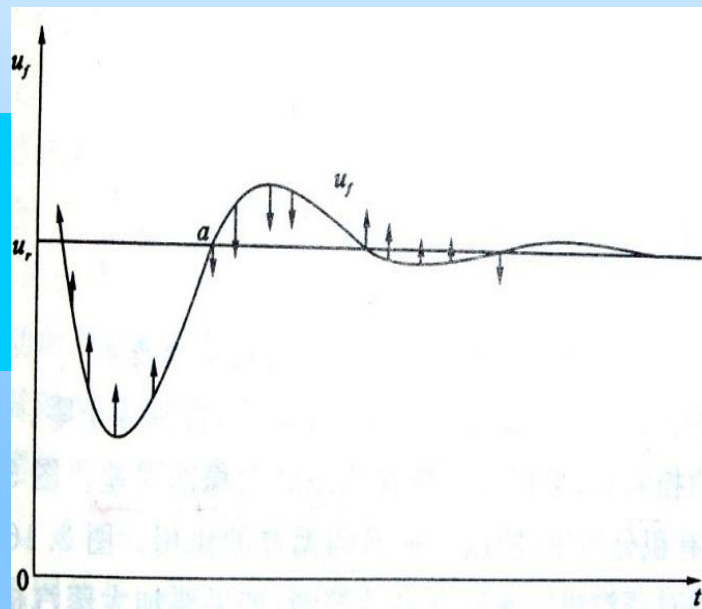
“滞后”控制作用

5.1 比例积分微分（PID）控制

◆ 微分控制（器）

$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

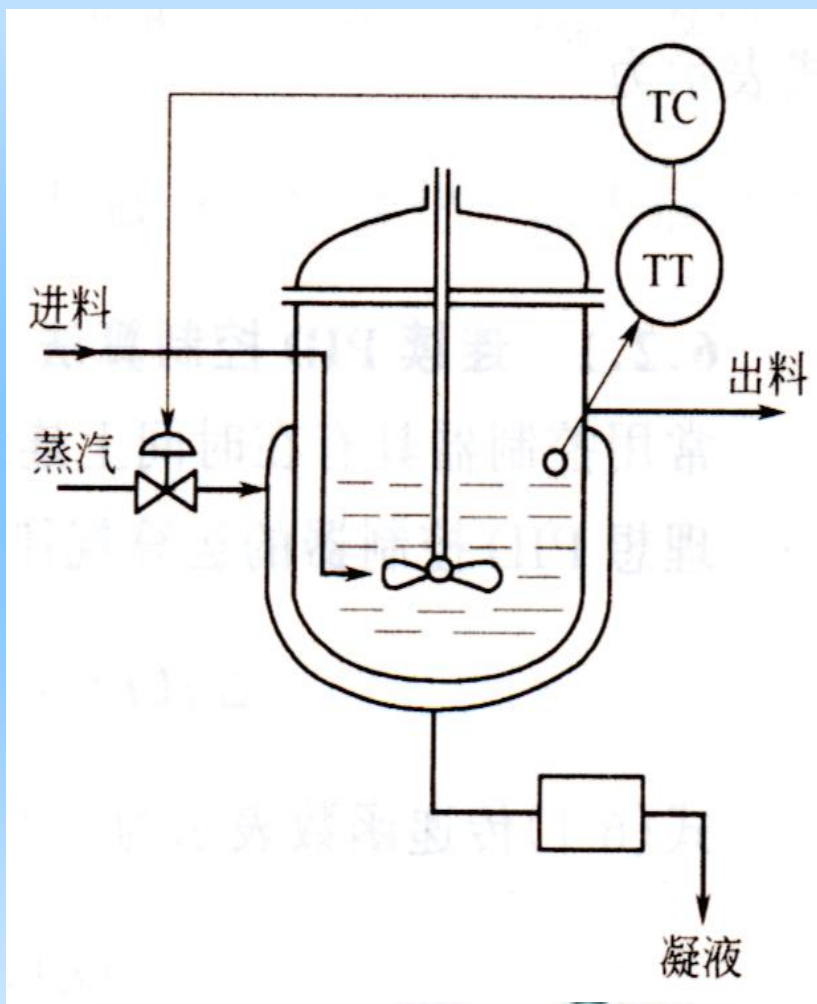


I-O过程：输出 $u(t)$ 与输入偏差 $e(t)$ 的变化速度成正比。

优点：减少超调量，缩短调节时间，提高系统的稳定性——超前控制作用

缺点：从工程实现上考虑，短时分偏差变化量大可能引起元件的性能变化。

以蒸汽加热反应釜为例说明P、I、D的作用及控制律的定义过程：



设反应温度：85度，轻微放热反应

- 操纵变量：蒸汽流量
- 被控变量：反应温度
- 干扰：蒸汽压力、进料流量等

E-0、人工开关控制

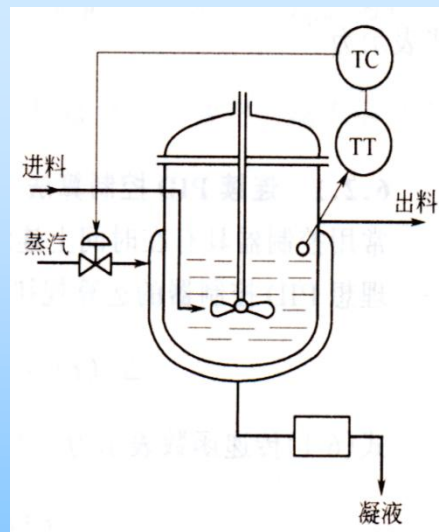
- ◆ 若温度低于85度，蒸汽阀门全开
- ◆ 若温度高于85度，蒸汽阀门全关

现象：温度持续波动，过程处于振荡中。

结果：控制品质差，满足不了生产要求。

反应器的温度控制

E-1、比例(P)控制



- ◆ 温度为85度，蒸汽阀门开度是3圈
- ◆ 若温度高于85度，每高5度就关一圈阀门
- ◆ 若温度低于85度，每低5度就开一圈阀门

即开启圈数 = $3 + \frac{1}{5}(85 - y)$

相应控制规律可写为： $u(t) = u(0) + K_C \times e'(t)$

$u(0)$ ：偏差为0时控制器输出 设 $e(t) = 85 - y(t)$,

K_C ：控制器比例放大倍数

$$\text{令 } e'(t) = \begin{cases} INT(e) & \text{if } y \leq 85 \\ INT(e) + 1 & \text{if } y > 85 \end{cases}$$

现象：温度控制得比较平稳

结果：控制品质有一定改善，但负荷变化时，会有余差。如工况有变动，当阀门开3圈时，温度不再保持在85度。

E-2、增加积分作用

首先按照比例控制操作，然后**不断观察**

- ◆ 若温度低于85度，慢慢地持续开大阀门
- ◆ 若温度高于85度，慢慢地持续开小阀门直到温度回到85度。

即控制器输出变化的速度与偏差成正比：

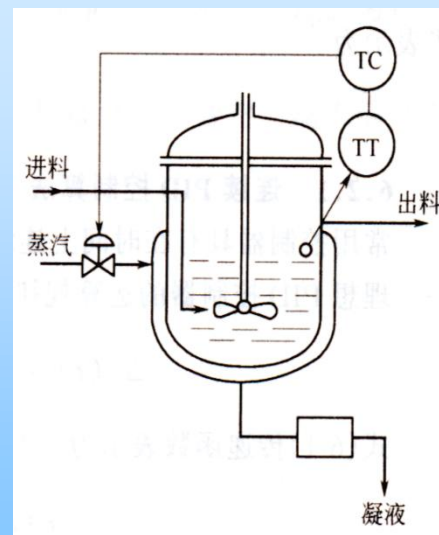
$$\frac{du(t)}{dt} = S_c e(t)$$

$$u(t) = u(0) + S_c \int_0^t e(t) dt$$

S_C ：积分控制作用放大倍数

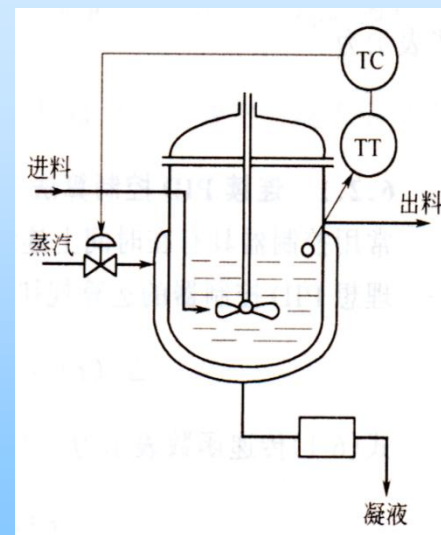
现象：只要有偏差，控制器输出就不断变化。

结果：输出稳定在设定的85度上，即消除了余差。



E-3、增加微分作用

- 由于温度过程容量滞后大，当出现偏差时，其数值已经较大
- 补充经验：根据偏差变化的速度来开启阀门，从而抑制偏差的幅度，使控制作用更加及时。

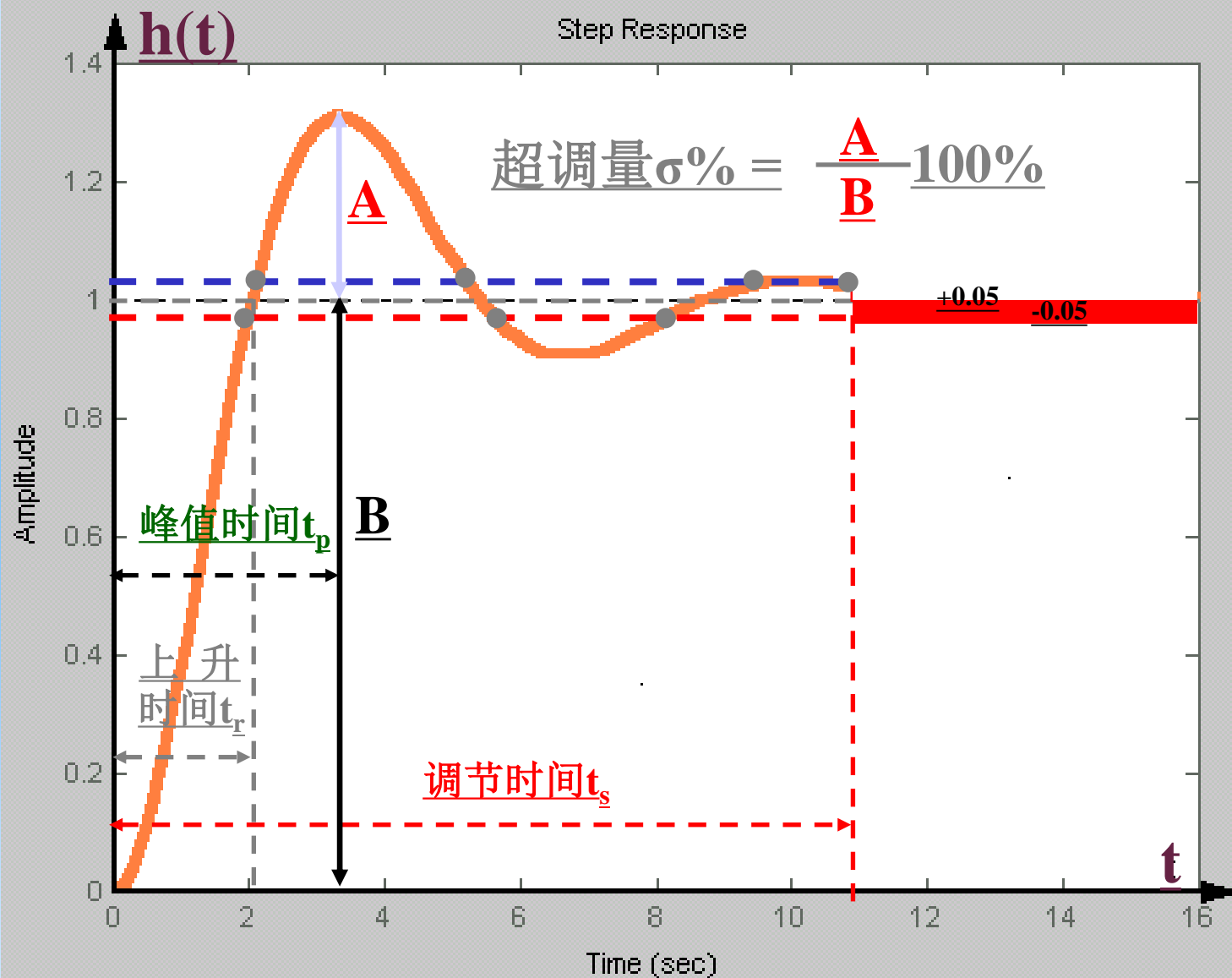


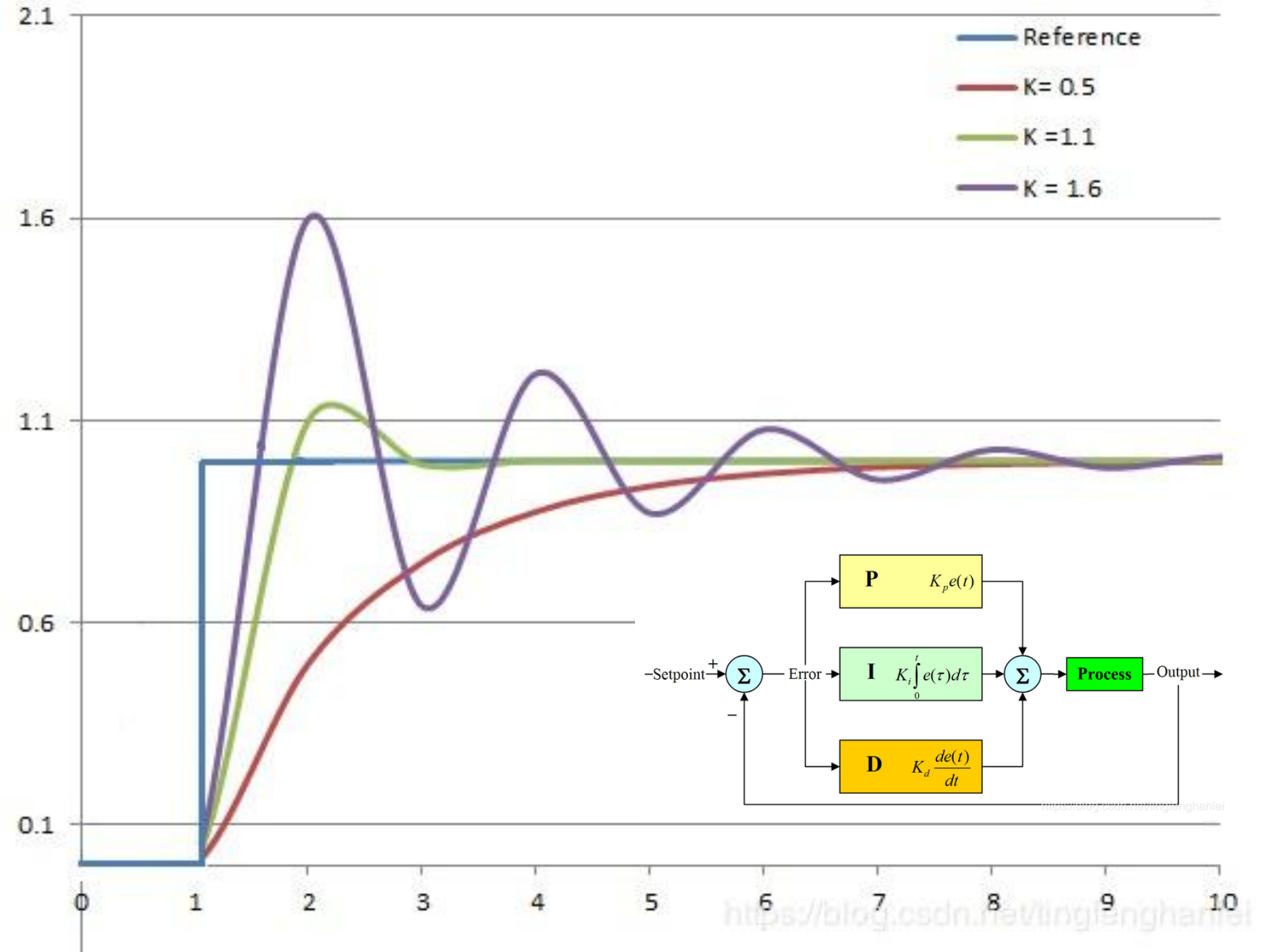
$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

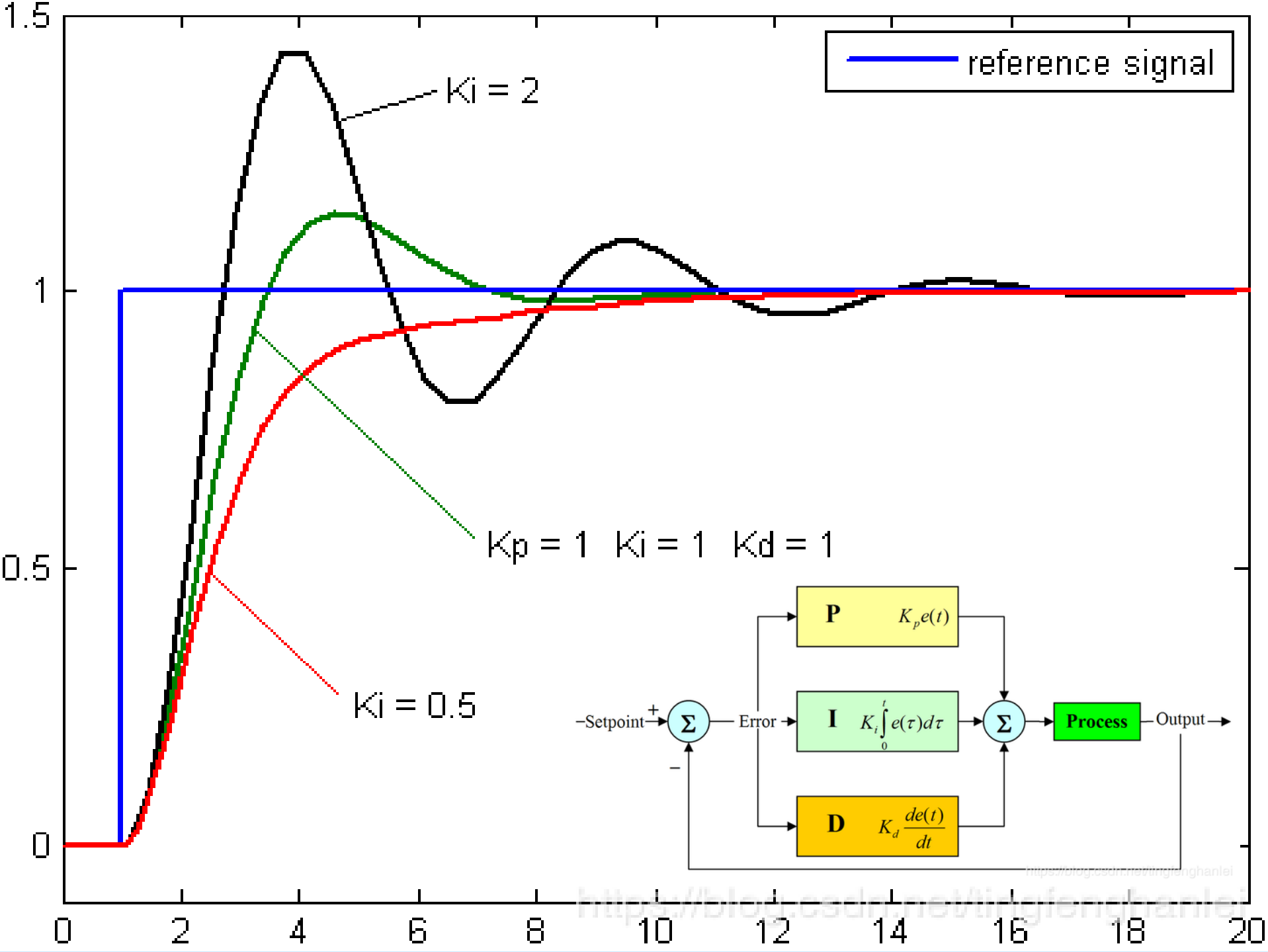
通用PID控制器（从误差 $e(t)$ 到控制量 $u(t)$ 转化的）数学表达式：

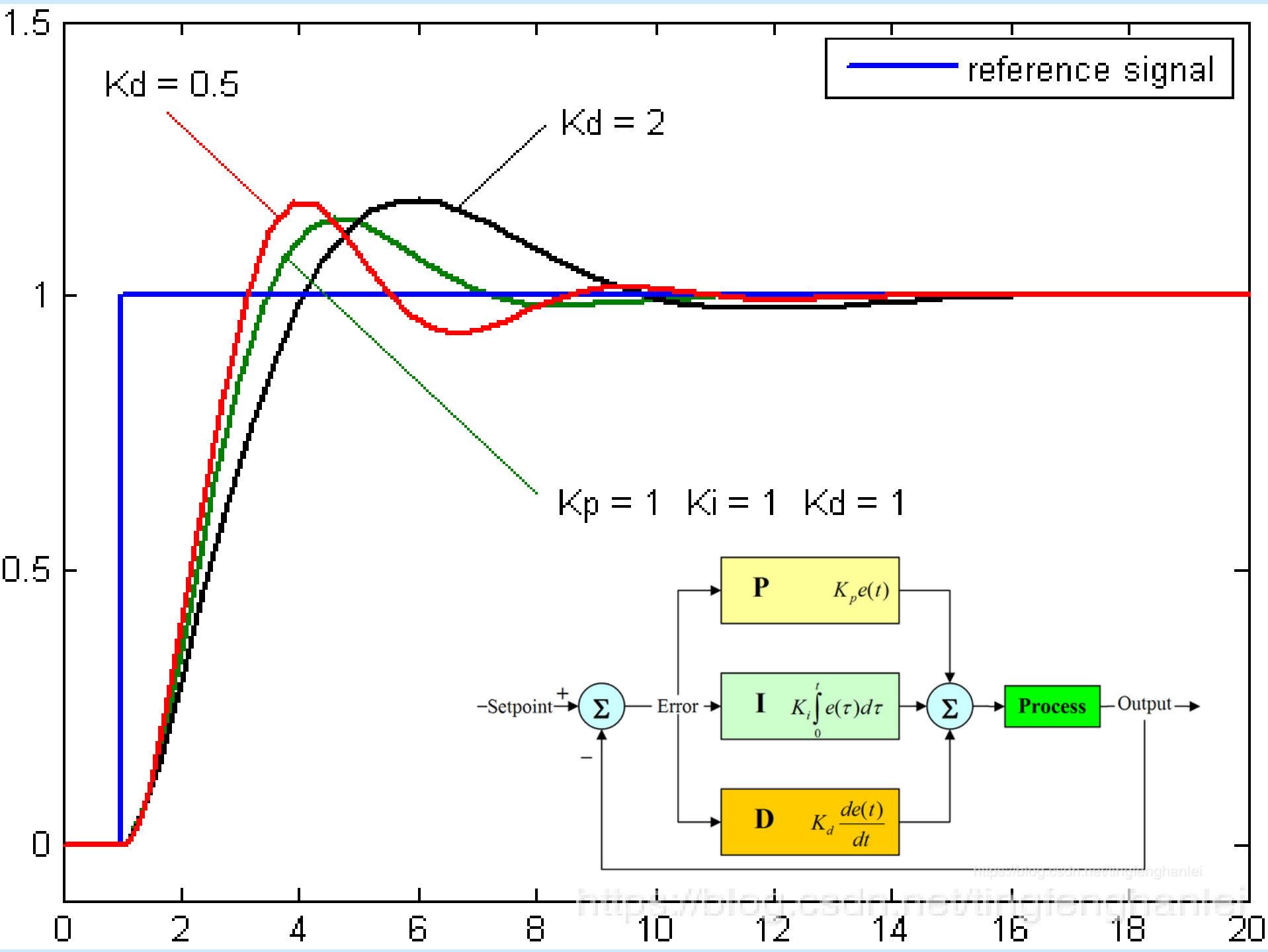
$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

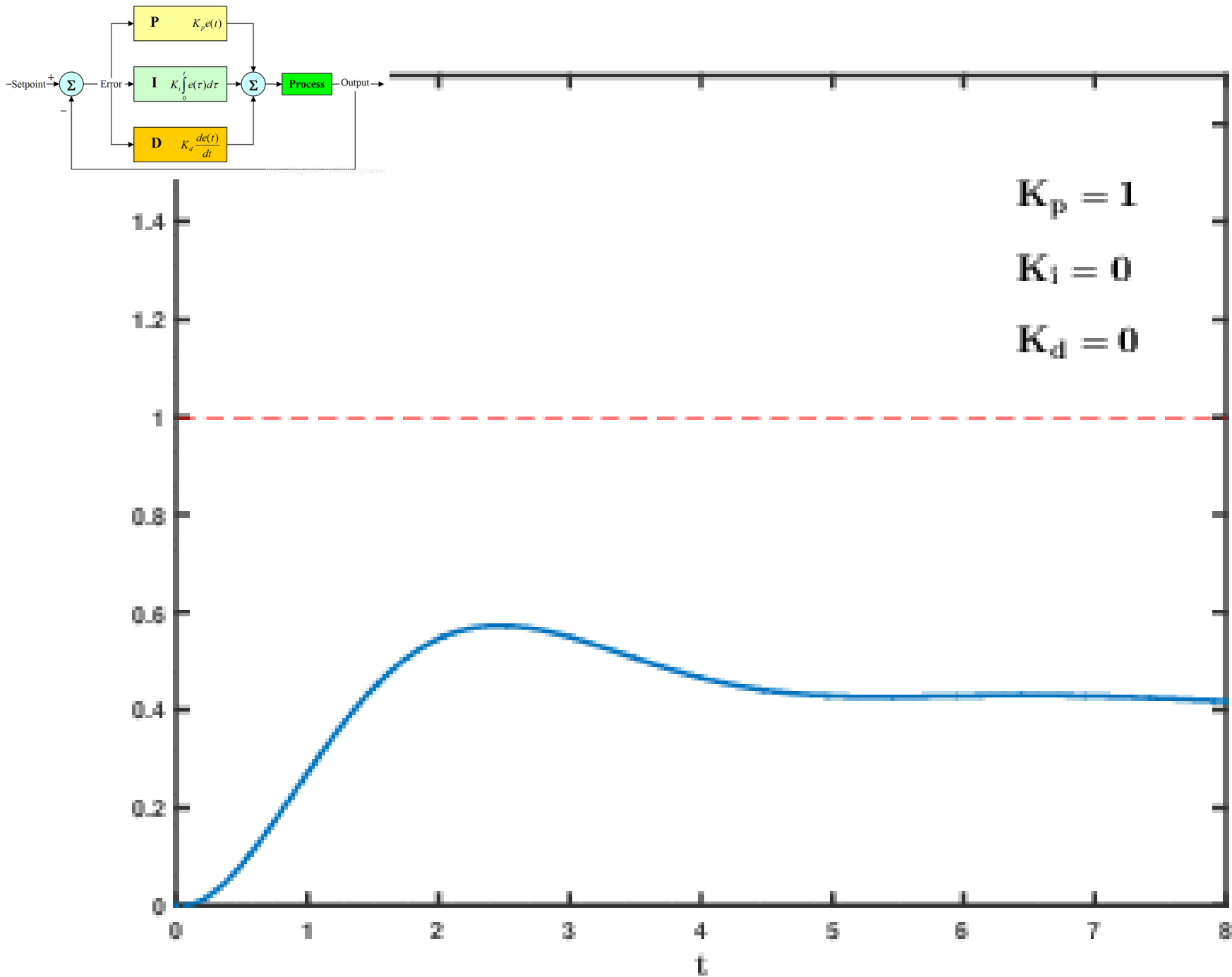
思考5-1 表达式中各参数的作用及获取方法？











5.1 比例积分微分（PID）控制

◆ PID控制器的参数整定方法

- **理论计算整定法**：依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数。（未必可以直接用）
- **工程整定方法**：依赖工程经验，直接在控制系统的试验中进行。（简单、实用）
- **PID参数的工程整定方法**：临界比例法、反应曲线法和衰减法等。

思考5-2 什么情况下一般不用PID控制？

5 自动控制系统的基本控制方法

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

5.2 最优控制

5.3 自适应控制

5.4 智能控制

5.5 非线性控制

5.2 最优控制

◆ 产生的背景

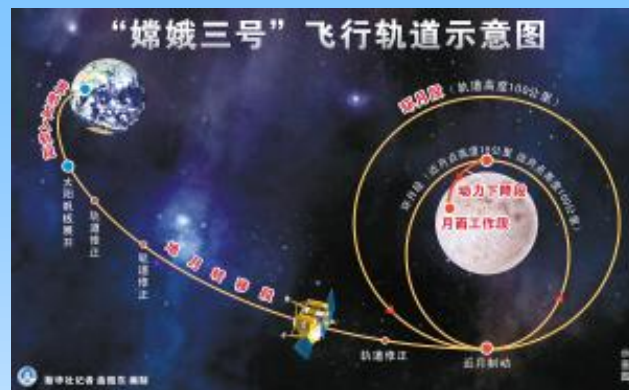
- (1) 要求被控对象的性能指标多样化;
- (2) 要求某些被控量或系统的某个性能指标达到最佳值 (如最短时间) 或给定值 (如速度为零);



倒立摆控制



导弹轨迹控制



嫦娥三号飞行控制

5.2 最优控制

◆ 最优控制的一般提法

对一个控制系统，在给定限制条件和性能指标下，寻求使系统性能在一定意义下为最优的控制规律（或控制器）。

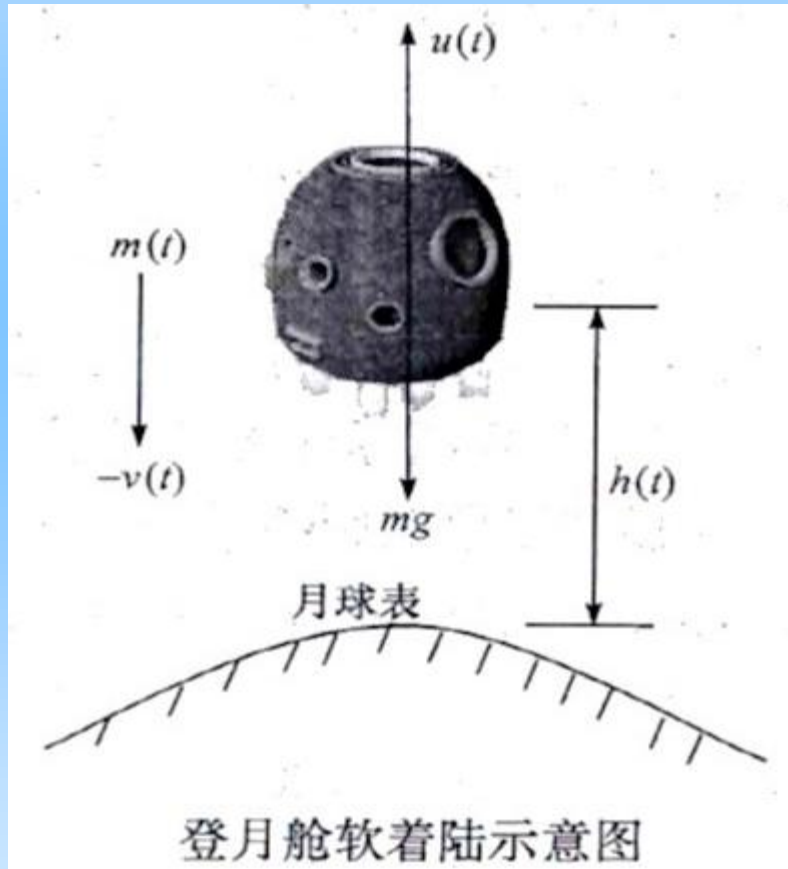
◆ 最优控制的形式化提法

最优控制的问题就是：从所有可供选择的允许控制中寻找一个最优控制 $\mathbf{u}^*(t)$ ，使状态 $\mathbf{x}(t)$ 由 $\mathbf{x}(t_0)$ 经过一定时间转移到目标集 S ，并且沿此轨线转移时，使相应的性能指标达到极值（极大或极小）。

思考5-2 允许控制与最优控制的关系？

5.2 最优控制

◆ 登月舱的月球软着陆例



最优控制任务是在满足控制约束的条件下，寻求发动机推力最优变化律

$$u^*(t)$$

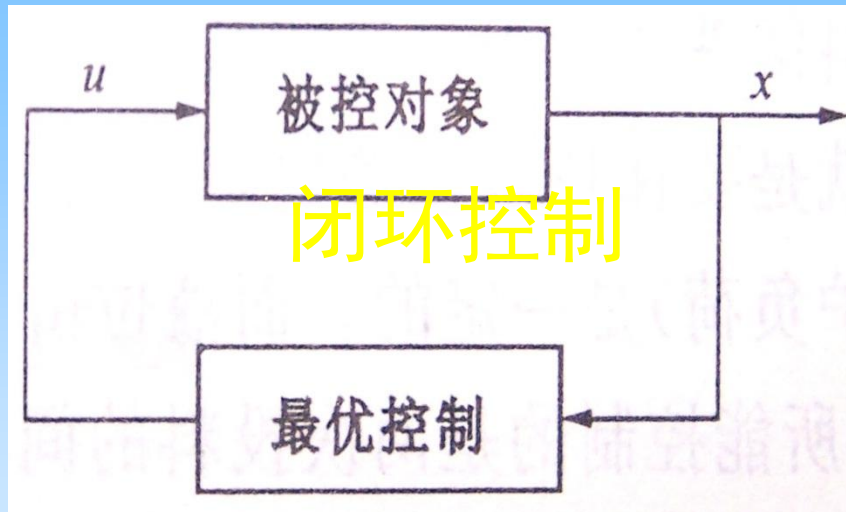
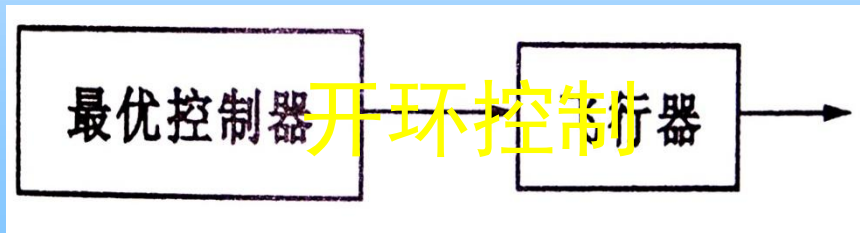
使得登月舱由已知的初态转为要求的末态，并使性能指标

$$J = m(t_f) = J_{\max}$$

从而实现登月过程中燃料消耗量最少。

5.2 最优控制

◆ 最优控制的基本方式



◆ 最优控制的研究方法

(1) 解析法

—— 变分法;

极大值原理和动态规划法

(2) 数值法

—— 最优化算法 (运筹学的内容)

(3) 基于二次型性能指标的最优线性系统理论

—— Kalman的状态空间系统理论

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制问题

(1) 最短时间问题

$$J = t_f - t_0 = \int_{t_0}^{t_f} dt \rightarrow \text{min}$$

$$F[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t] = 1$$



拦截导弹最短时间控制

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制问题

(2) 最小燃料消耗问题：控制量 $u(t)$ 与燃料消耗量成正比。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} |u(t)| dt \rightarrow \text{min}$$

$$F[\mathbf{x}(t), u(t), t] = |u(t)|$$



导弹最小燃料控制

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制问题

(3) 最小能量控制问题：考虑与消耗功率成正比。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u^2(t) dt \rightarrow \text{min}$$

$$F[\mathbf{x}(t), u(t), t] = u^2(t)$$



航天飞机最小能量控制

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制性能指标

(1) 积分型性能指标:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} F[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t] dt$$



导弹稳定控制

变分法中这类问题称为拉格朗日问题。它要求状态向量及控制向量在整个动态过程中都应满足一定要求。

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制性能指标

(2) 终值型性能指标

$$J = \theta \left[\mathbf{x}(t_f), t_f \right]$$



卫星的指向控制

在变分法中称为迈耶尔问题。它**只要求状态在过程终止时满足一定要求**，但在整个动态过程中对状态及控制的演变不作要求。

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制性能指标

(3) 复合型性能指标

$$J = \theta[\mathbf{x}(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} F[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t] dt$$



卫星的指向和稳定控制

在变分法中称为波尔札问题。它要求状态不但在过程终止时满足一定要求，而且状态向量及控制向量在整个动态过程中都应满足一定要求。

5.3 自适应控制

◆ 产生背景

- (1) 系统复杂，很难精确建模和分析（模型不确定性）——如化工过程中的反应炉，换热器；
- (2) 环境变化会引起被控对象的结构和参数发生变化（系统本身的不确定性）——如人的血压控制；
- (3) 环境变化对被控系统的干扰——当不可测量时——将直接导致被控量的不确定性变化，且不能通过前馈控制方式给以补偿。

在这些情况下，常规控制就往往达不到预定的控制要求。

因此出现了很多研究控制方法的改进问题，例如容错控制，鲁棒控制，自适应控制，智能控制。

◆ 自适应控制出现于 20 世纪 50 年代

5.3 自适应控制

◆ 基本思想

在系统运动过程中，控制系统不断地**测量**被控对象的状态，**估计**出对象的性能或参数，从而“认识”或“掌握”被控对象；然后，根据掌握的被控对象信息，与期望的性能相**比较**，进而作出**决策**，来**改变**控制器的结构、参数，并根据自适应规律来改变控制作用，**以保证**系统达到期望的或某种意义下最优或接近最优的**性能**。

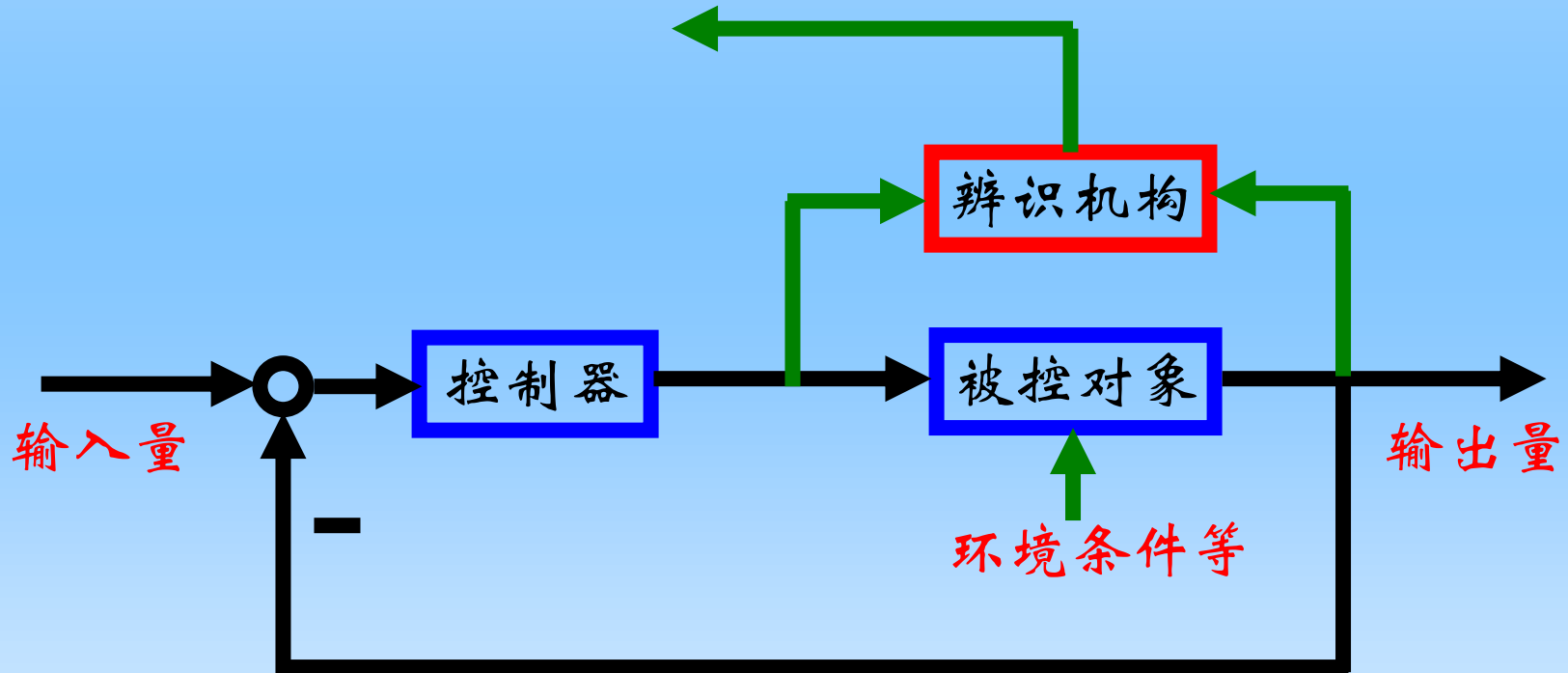
其中：**估计（辨识）、比较（决策）、改变（修正）**
三方面的功能是自适应控制系统所必须具有的功能。

按照这样的思想所建立的控制系统，称之为**自适应控制系统**。

5.3 自适应控制

◆ 基本原理

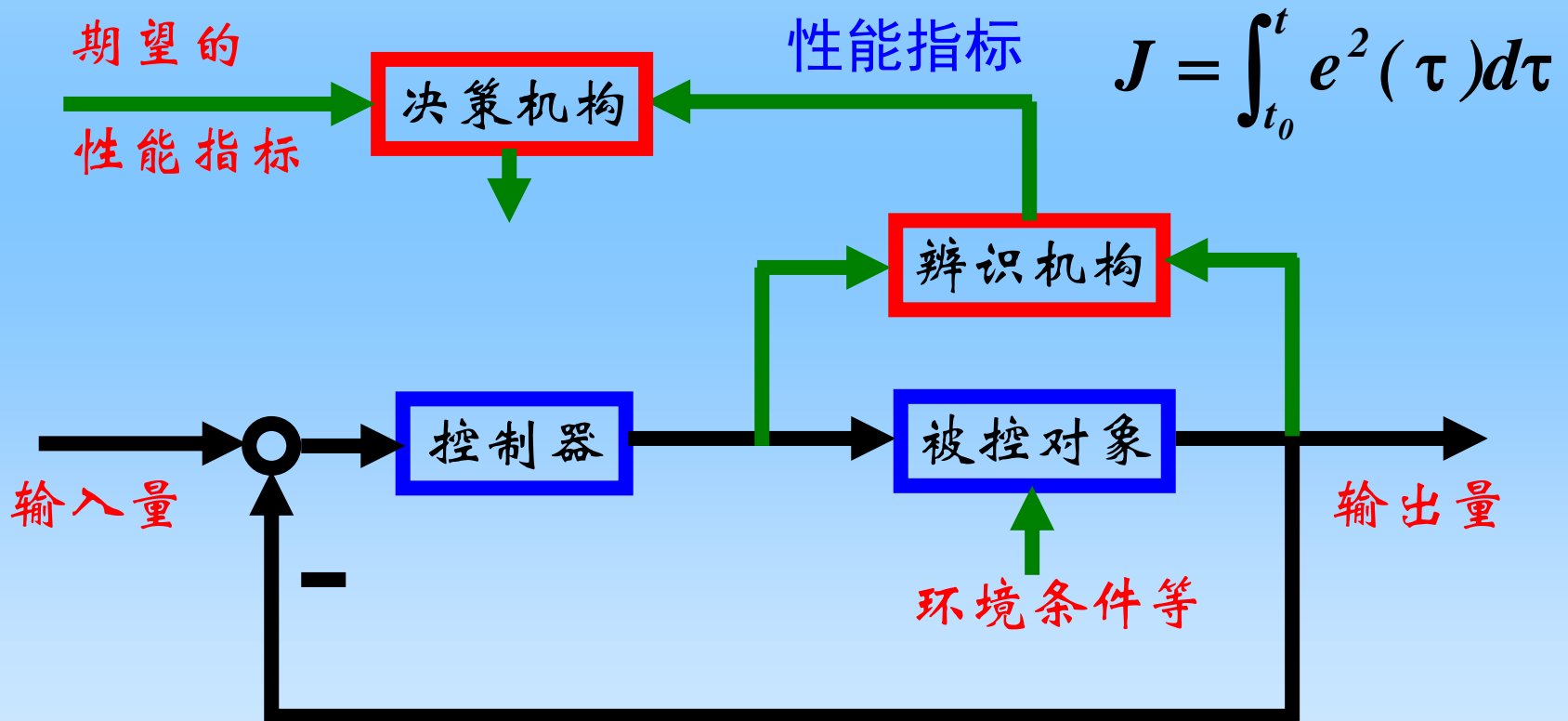
在自适应控制系统中,根据被控对象的输入输出信号对对象的参数或性能指标连续地或周期地进行在线辨识,



5.3 自适应控制

◆ 基本原理

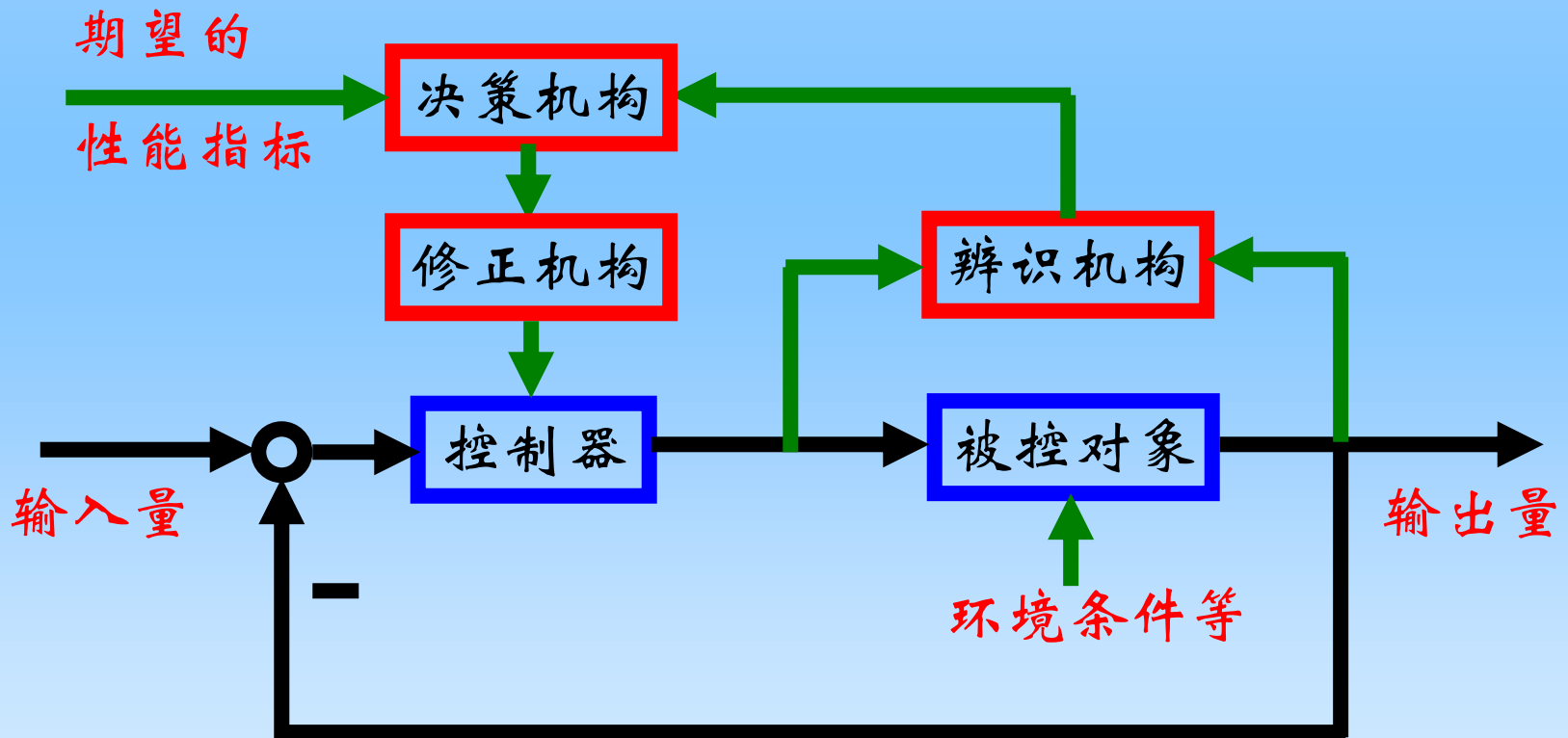
然后根据所获得的信息并按照一定的评价系统优劣的性能准则,判断决定所需的控制器参数或所需的控制信号。



5.3 自适应控制

◆ 基本原理

最后通过修正装置实现这项控制决策,使系统趋向所期望的性能。

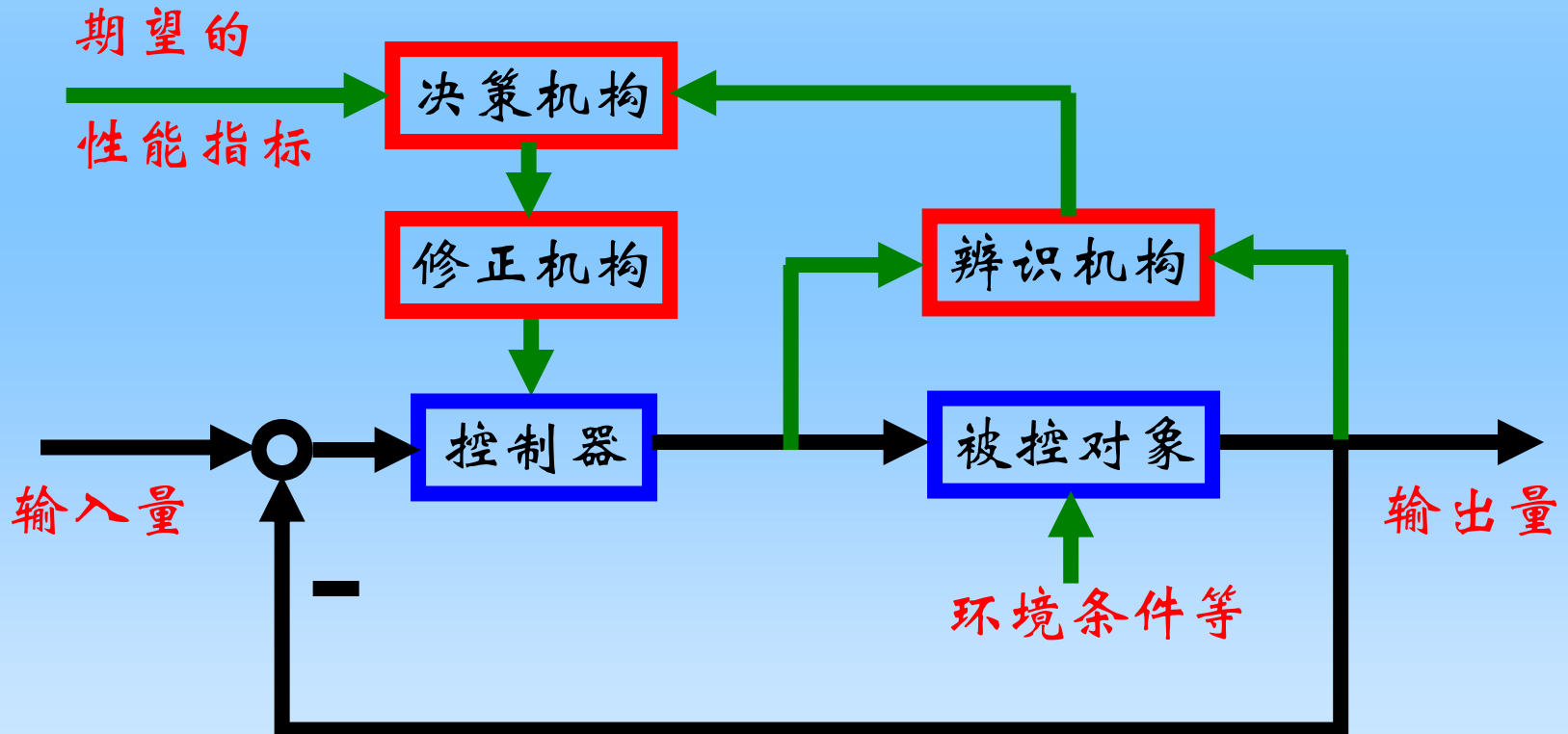


5.3 自适应控制

◆ 基本原理——常见修正方法

a 参数修正法：主要是修正控制器中有关参数。

b 信号综合法：根据需要综合出控制信号，直接加到被控对象上。



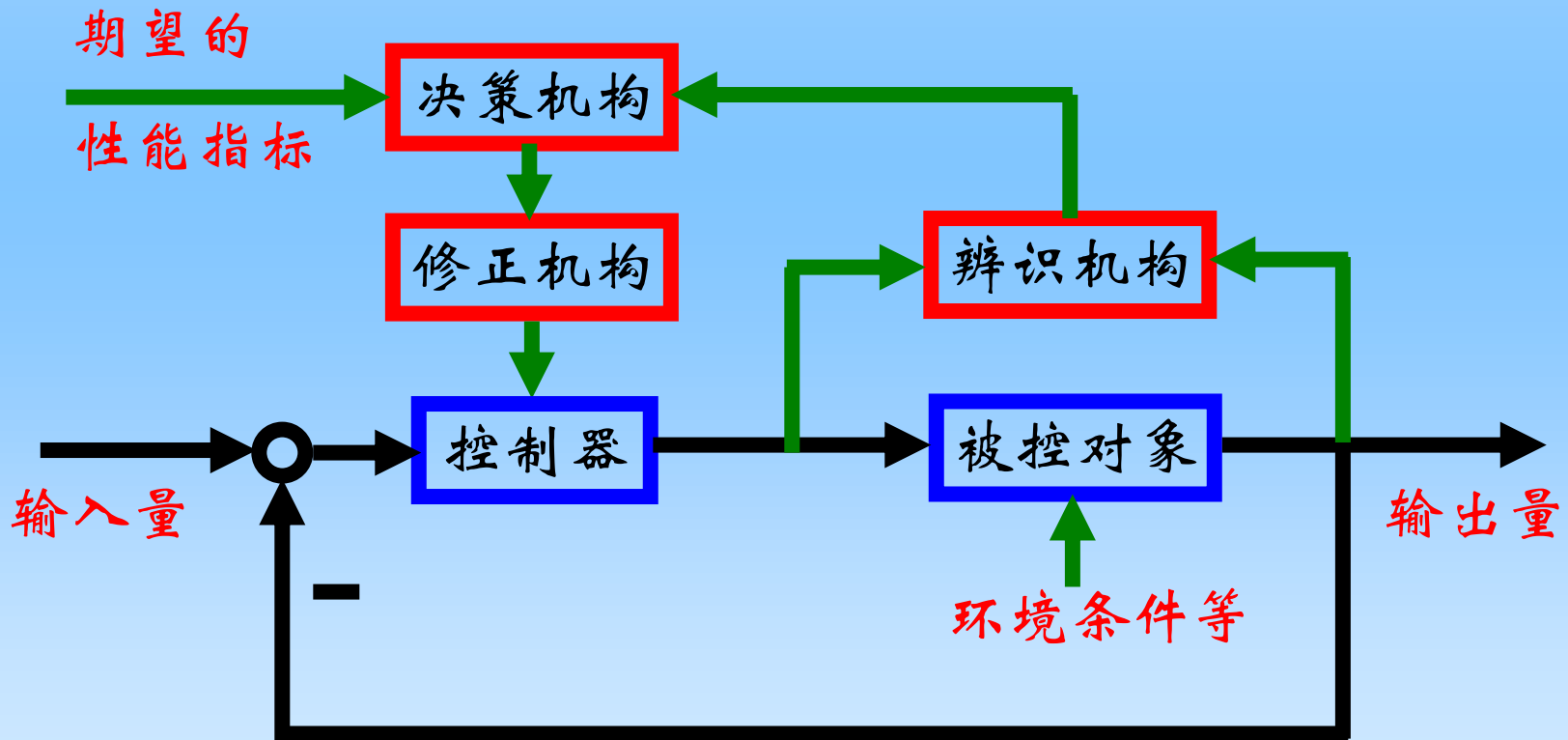
5.3 自适应控制

◆ 基本原理——小结

a 辨识被控对象的特性

b 在辨识的基础上作出控制决策

c 按照决策对控制器参数实行修正

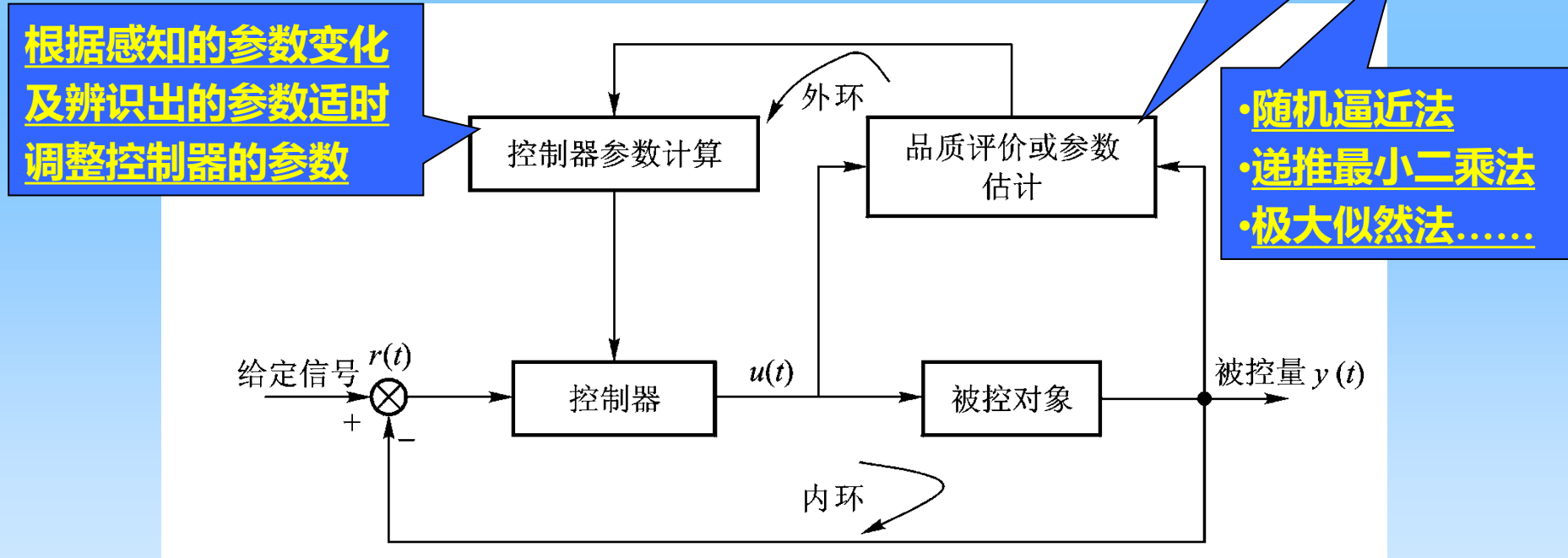


5.3 自适应控制

◆ 基本类型

自适应控制实质上是系统辨识与控制技术的结合，通常有自校正控制系统、模型参考自适应控制系统两种类型。

(1) 自校正控制系统（参数自适应控制）

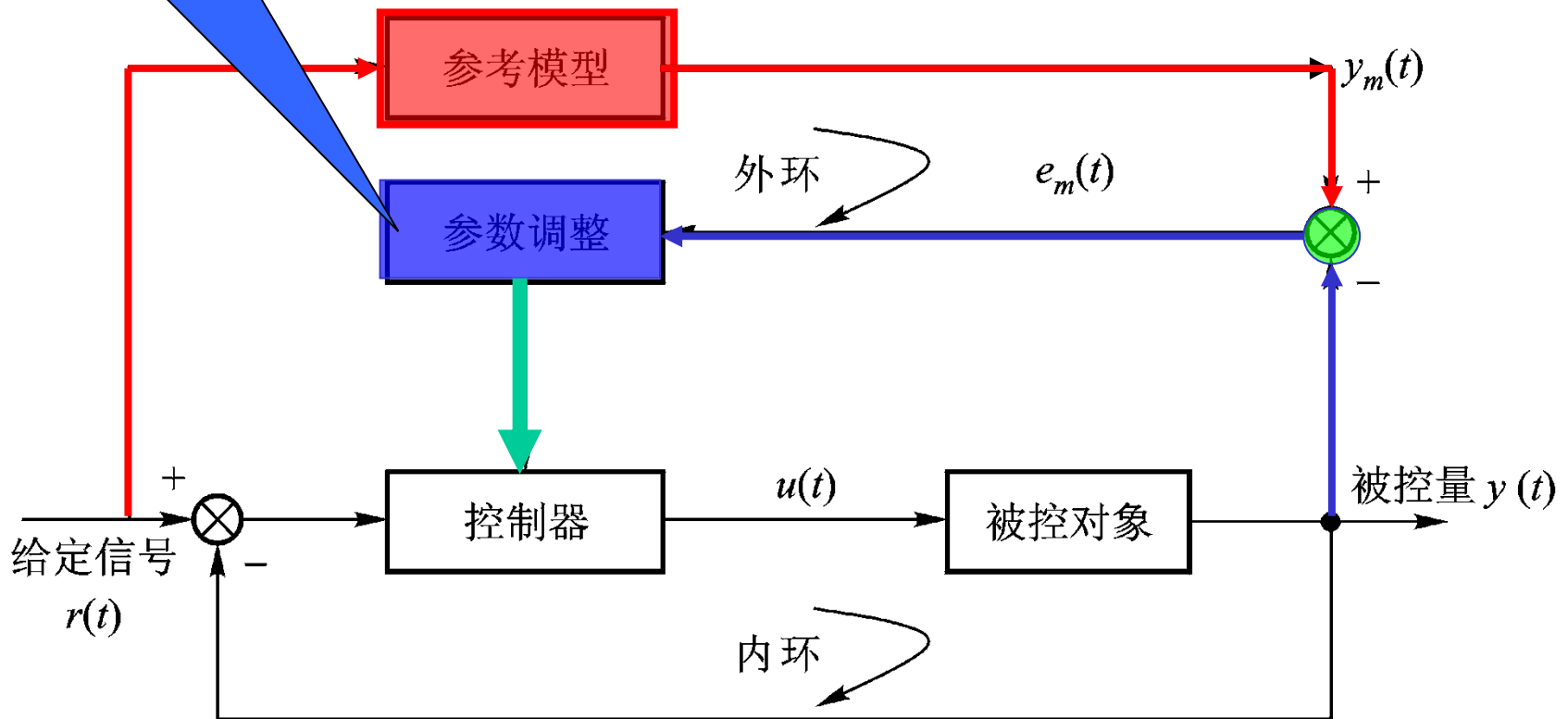


5.3 自适应控制

◆ 基本类型

(2) 模型参考自适应控制系统（目前的主要方法）

自适应机构



5.4 智能控制

◆ 产生背景

- (1) 被控对象与其环境的复杂性及不确定性的存在，使基于数学模型的控制方法已无能为力，但**熟练的操作工、技术人员或专家却能凭他们的经验施加控制仍能获得满意的控制效果**；
- (2) **人工智能（A I）**的发展及其与自动控制的结合，使人的经验知识与思维方式参与系统的控制成为可能。

智能控制是一种应用拟人化的思维方式和决策方法产生控制规律，以实现对被控对象有效控制的技术。

智能控制是自动控制发展的一个新阶段，是人工智能、控制论、系统论和信息论等多种学科的综合与集成，是控制理论研究持续的热点。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

智能控制已经出现了相当长的一段时间，并且已取得了初步的应用成果。但是究竟什么是“智能”，什么是“智能控制”等问题，至今仍没有统一的定义。

归纳起来，主要有如下三种说法（见教材90-91）

5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

- **定义一（依行为特征定义）**：智能控制是有知识的“行为舵手”，它把知识和反馈结合起来，形成感知—交互式、以目标导向的控制系统。系统可以进行规划、决策，产生有效的、有目的的行为，在不确定环境中，达到既定的目标。



5.4 智能控制

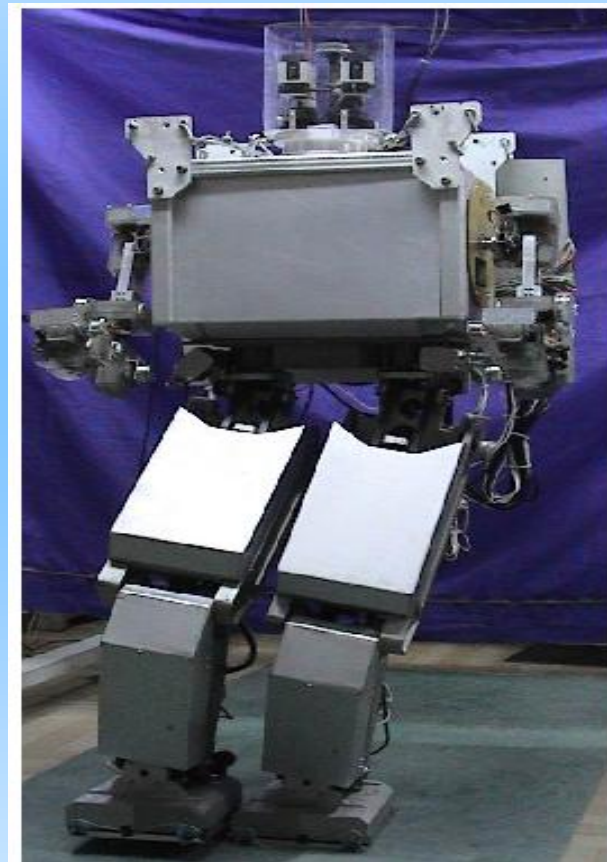
◆ 智能控制的基本概念

- **定义二（依人类认知定义）**:智能控制是一种计算上的有效过程，在非完整的指标下，通过最基本的操作，即归纳（Generalization）、集注（Focusing Attention）、和组合操作（Component Search），把不确定的复杂系统引向规定的目标。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

- **定义三（依机器智能定义）**：智能控制是认知科学、多种数学编程和控制技术的结合。它把施加于系统的各种算法和数学与语言方法融为一体。



5.4 智能控制

◆ 智能控制的特点

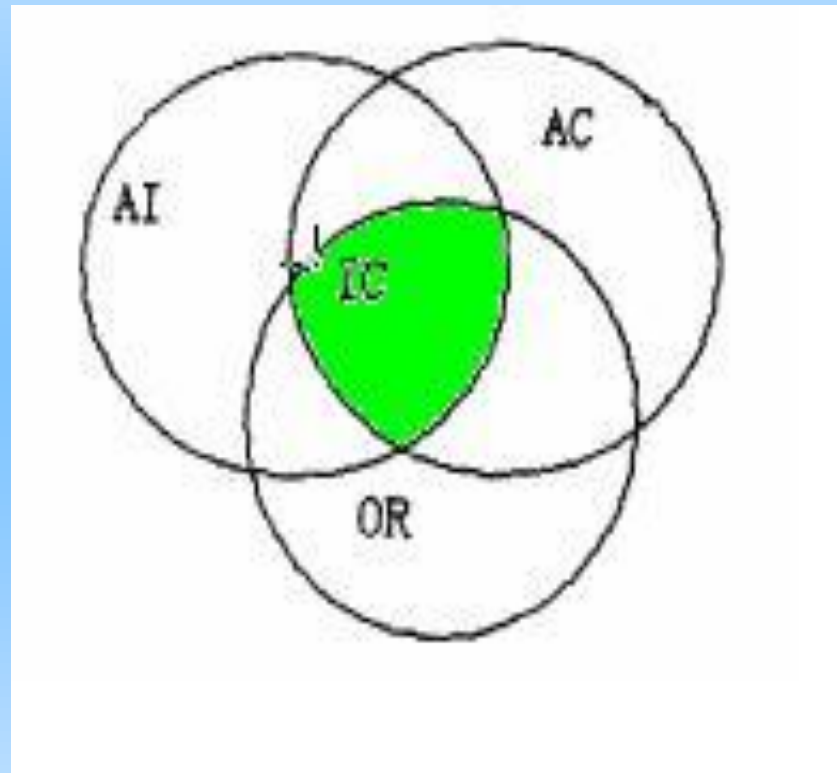
- 智能控制器具有非线性特性；
- 智能控制具有变结构特点；
- 智能控制器具有总体自寻优特性；
- 智能控制系统应能满足多样性目标的高性能要求；
- 智能控制是一门边缘交叉学科；
- 智能控制是一个新兴的研究领域。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的结构理论（对应定义三）

$$IC = AI \cap AC \cap OR$$

- IC — 智能控制
(Intelligent Control);
- OR — 运筹学
(Operation Research)
- AI — 人工智能
(Artificial Intelligence);
- AC — 自动控制
(Automatic Control);
- \cap — 表示交集.



5.4 智能控制

◆ 智能控制的结构理论

- **人工智能**（AI）：是一个知识处理系统，具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发式推理等功能。
- **自动控制**（AC）：描述系统的动力学特性，是一种动态反馈。
- **运筹学**（OR）：是一种定量优化方法，如线性规划、网络规划、调度、管理、优化决策和多目标优化方法等。

5.4 智能控制

◆ 智能控制与传统控制的关系

传统控制 (Conventional control)：经典反馈控制和现代理论控制。它们的主要特征是基于精确的系统数学模型的控制。适于解决线性、时不变等相对简单的控制问题。

智能控制 (Intelligent control) 以上问题用智能的方法同样可以解决。智能控制是对传统控制理论的发展，传统控制是智能控制的一个组成部分，在这个意义下，两者可以统一在智能控制的框架下。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的类型

智能控制系统一般包括

- ◆ 专家控制系统
- ◆ 模糊控制系统
- ◆ 人工神经网络控制系统
- ◆ 强化学习控制系统
- ◆

5.4 智能控制

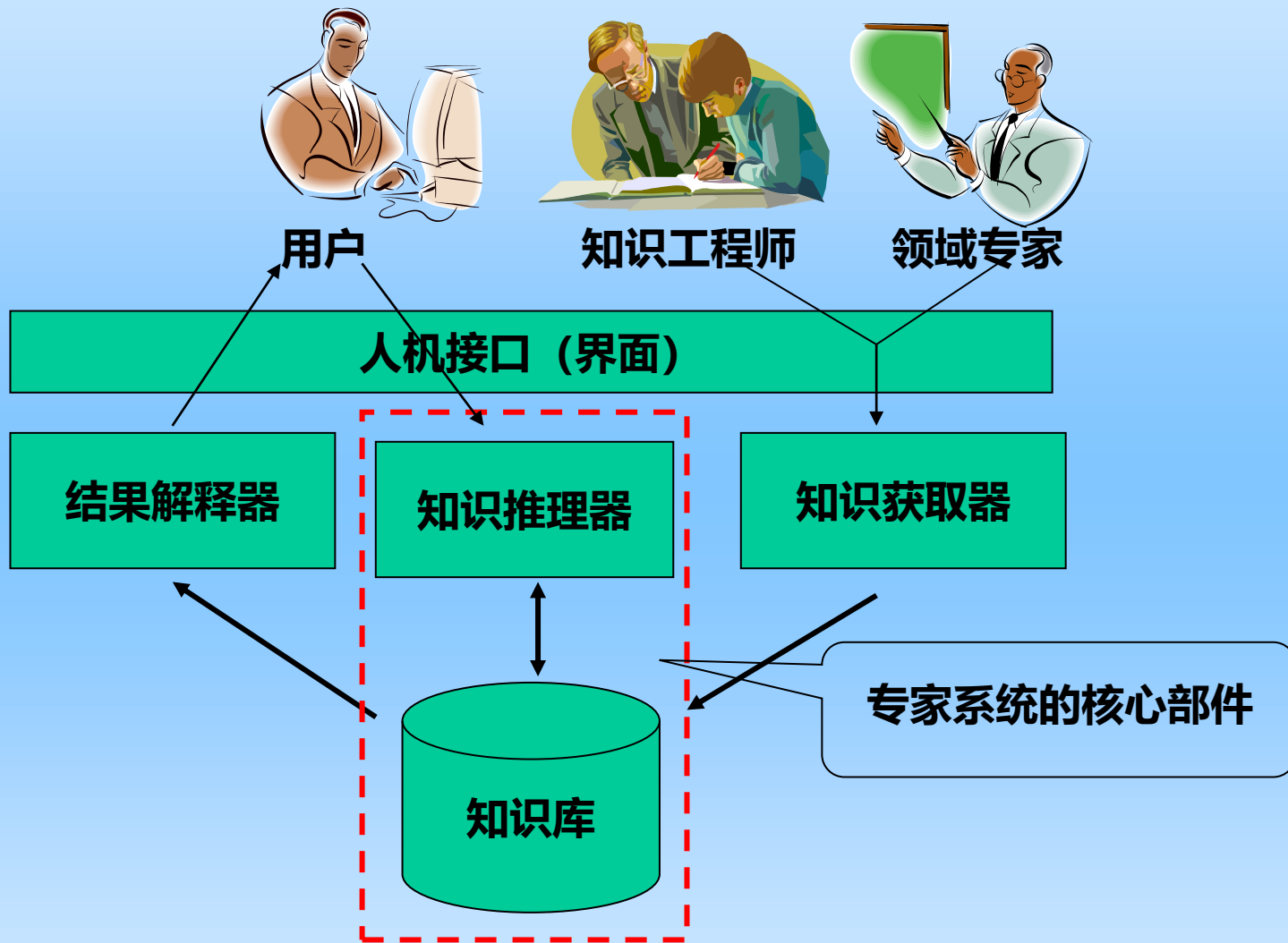
◆智能控制的类型

(1) 专家控制系统 (Expert System)

专家指的是那些对解决专门问题非常熟悉的人们，他们的这种专门技术通常源于丰富的经验，以及他们处理问题的详细专业知识。

专家系统主要指的是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解决问题的经验方法来处理该领域的高水平难题。它具有启发性、透明性、灵活性、符号操作、不确定性推理等特点。**应用专家系统的概念和技术，模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统，称为专家控制系统。**

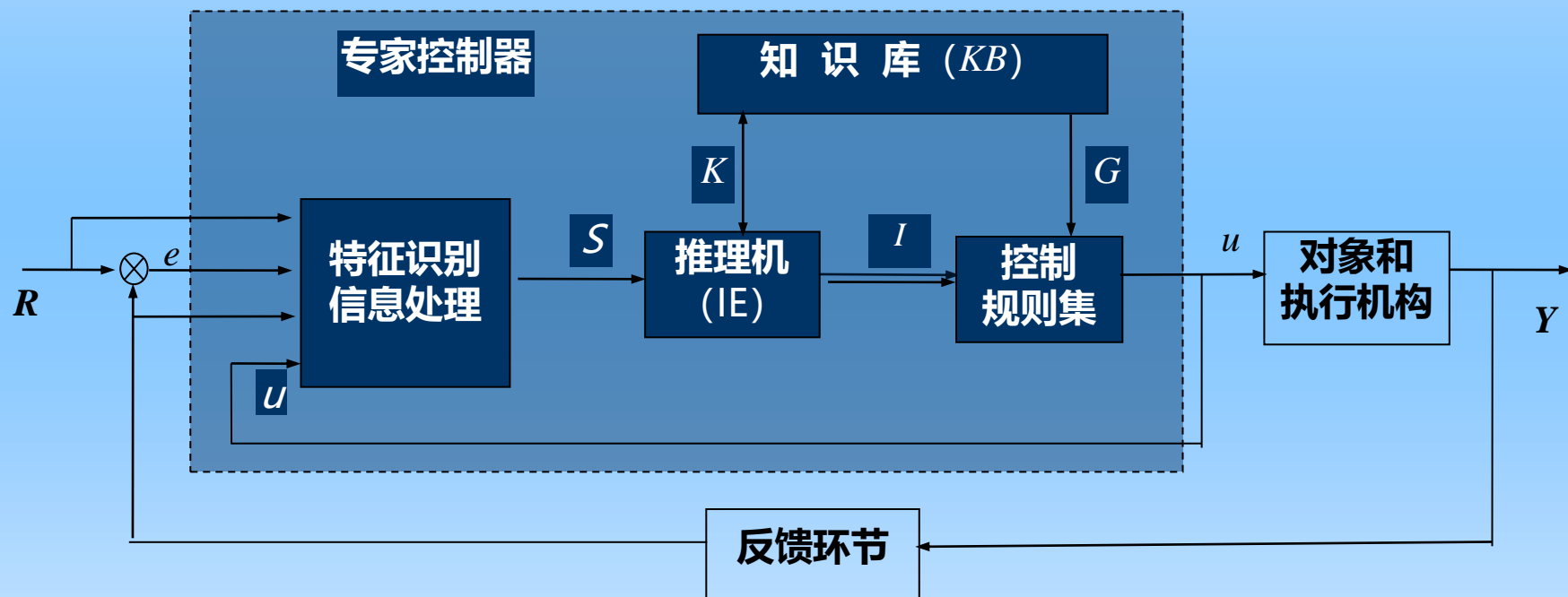
专家系统主要由**知识库**和**推理机**两部分组成。



① 专家控制系统 是应用专家系统于自动控制的理想形式，它把自动控制系统视为基于知识的系统，并把有关控制的知识分类组织，形成数据库和规则库。

② 专家控制器 直接用专家系统作为传统反馈控制系统的控制器，使控制器具有智能。

$$e(t) \longrightarrow \text{控制器} \longrightarrow u(t)$$



5.4 智能控制

◆智能控制的类型

(2) 模糊控制系统

所谓模糊控制，就是在被控制对象的模糊模型的基础上，运用模糊控制器近似推理手段，实现系统控制的一种方法。

模糊模型是用模糊语言和规则描述的一个系统的动态特性及性能指标。

“模糊量”是现实生活中人们最常用的对事物状态进行描述的“量”，如：



风的强弱



人的胖瘦



年龄大小



个子高低

5.4 智能控制

◆ 模糊控制的基本思想

是用机器去模拟人对系统的控制。它是运用模糊理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理的知识，把这些模糊的语言上升为数值运算，从而能够利用计算机来完成对这些规则的具体实现，达到以机器代替人对某些对象进行自动控制的目的。

通常，操作人员根据他的知识和经验在对被控量（输出）的特征进行识别，后者常常是用语言信息表示的。例如，炉温作为一个语言变量，其温度集T可为：

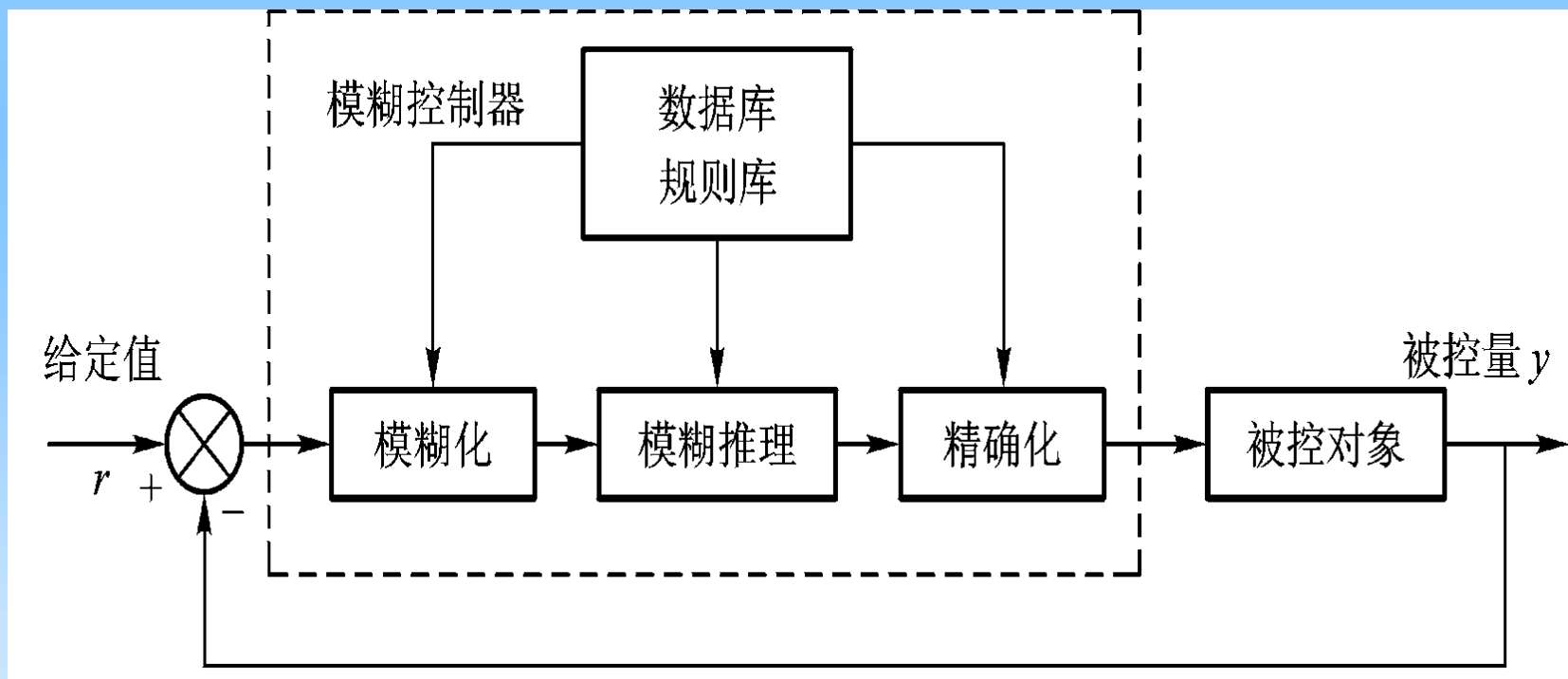
$T(\text{温度}) = \{\text{超高, 很高, 较高, 中等, 较低, 很低, 过低}\}.$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

◆ 模糊控制器

它用模糊控制器替代了传统的控制器，模糊控制器由知识库、模糊化处理器、模糊推理器、精确化处理器四部分组成。

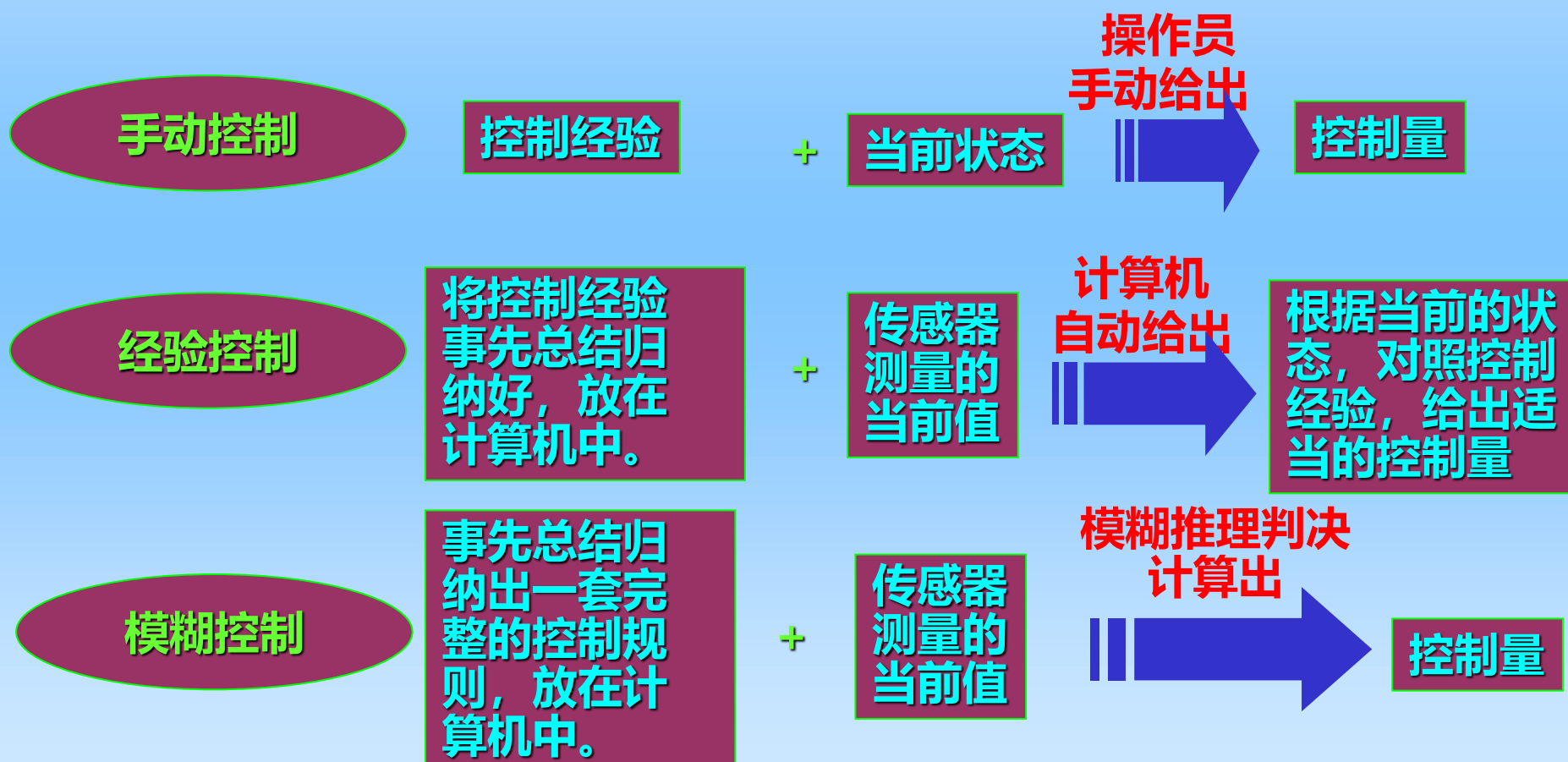


5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

◆ 模糊控制器的特点

手动控制、经验控制和模糊控制的比较



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊控制发展的三个阶段

1965年-1974年

模糊控制发展的第一阶段，即模糊数学发展和形成阶段(L.A. Zedeh, 1965)

1974年-1979年

模糊控制发展的第二阶段，产生了简单的模糊控制器

1979年—现在

模糊控制发展的第三阶段，即高性能模糊控制阶段

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊集合:

如果 X 是对象 x 的集合, 则 X 的模糊集合 A :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

X 称为论域或域

$\mu_A(x)$ 称为模糊集合 A 的隶属函数 (简写为 MF)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ (0,1) & x \text{ 属于 } A \text{ 的程度} \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊集合离散形式 (有序或无序) :

例: $X = \{\text{上海 北京 天津 西安}\}$ 为城市的集合

模糊集合 $C = \text{“对城市的爱好”}$ 可以表示为:

$$C = \{(\text{上海}, 0.8), (\text{北京}, 0.8), (\text{天津}, 0.8), (\text{西安}, 0.8)\}$$

例: $X = \{0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\}$ 为一个家庭可拥有自行车数目的集合

模糊集合 $C = \text{“合适的可拥有的自行车数目”}$

$$C = \{(0, 0.1), (1, 0.3), (2, 0.7), (3, 1.0), (4, 0.7), (5, 0.3), (6, 0.1)\}$$

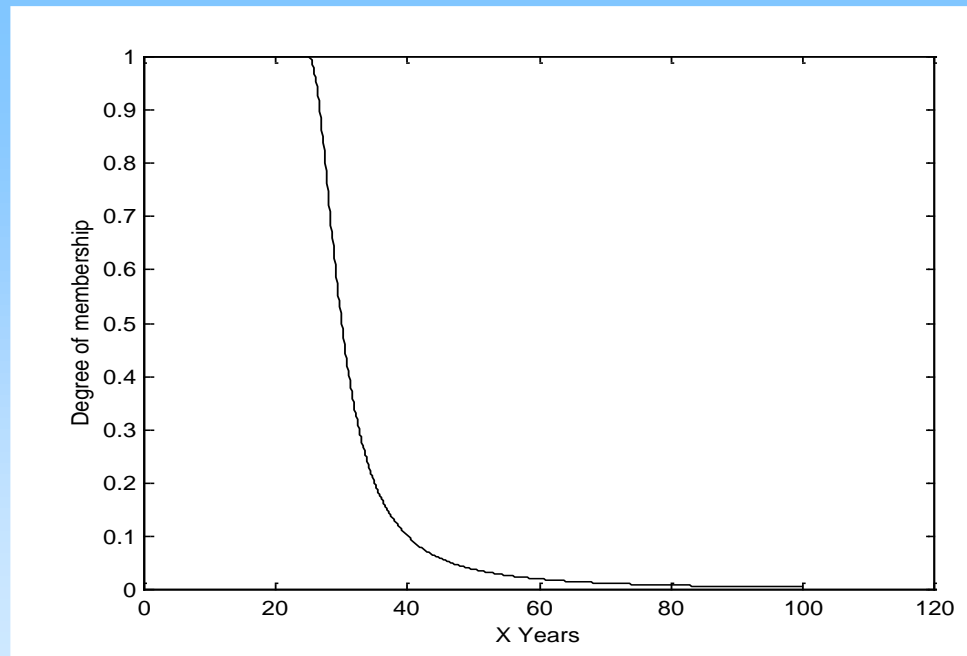
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊集合连续形式:

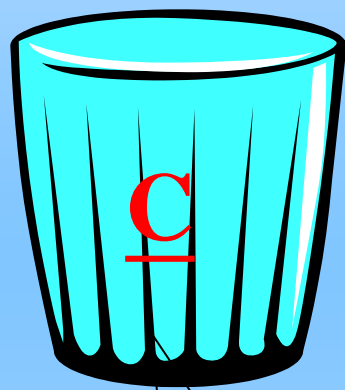
令 $X = \mathbb{R}^+$ 为人类年龄的集合, 模糊集合 $Y = \text{“年轻”}$ 则表示为:

$$Y(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 25 \\ \left[1 + \left(\frac{x - 25}{5} \right)^2 \right]^{-1} & 25 < x \leq 100 \end{cases}$$



模糊与概率的差别

口渴的人饮用哪杯液体？



$$\mu_L(C) = 0.91$$

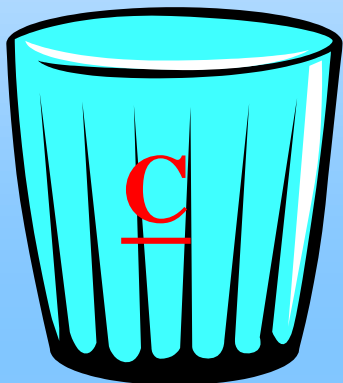


$$P_r[A \in L] = 0.91$$

$L = \{\text{可饮液体的集合}\}$



啤酒



$$\mu_L(C) = 0.91$$

0.09

盐酸

0.91

矿泉水等



$$P_r[A \in L] = 0.91$$

- 1) 模糊隶属函数表示物体（对象）对不精确定义性质的相似程度
- 2) 概率把信息转变为事件发生或出现的频度

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) \triangleq \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) \triangleq [\mu_A(x) \bullet \mu_B(y)]$$

工程隐含：出于计算的简单性，保留因果关系，但非因果关系，不同于传统的命题逻辑推理

$$(p \rightarrow q) \leftrightarrow \sim [p \wedge (\sim q)]$$

$$(p \rightarrow q) \leftrightarrow (\sim p) \vee q$$

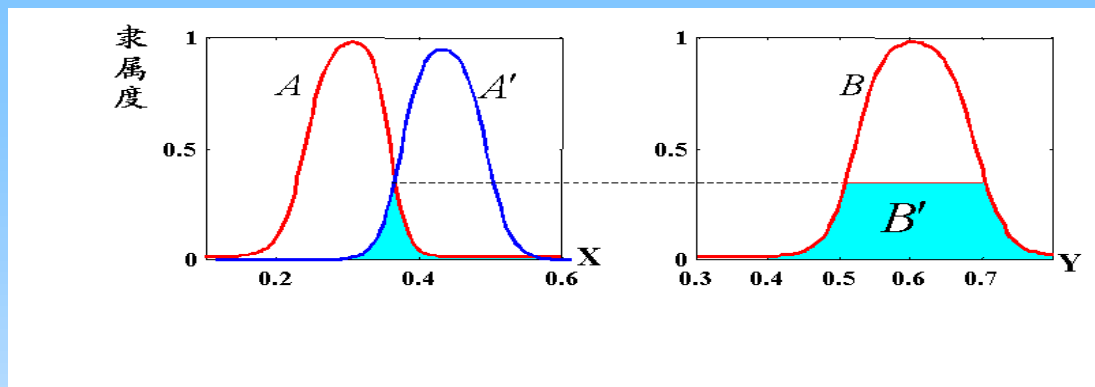
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

1. 单个前提单个规则:

前提1(事实)	x 是 A'
前提2(规则)	$if\ x\ 是A, then\ y是B$
结果(结论)	y 是 B'



$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y) &= \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \\ &= [\bigvee_x (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x))] \wedge \mu_B(y) \\ &= \omega \wedge \mu_B(y) \quad (\text{max-min 复合运算})\end{aligned}$$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

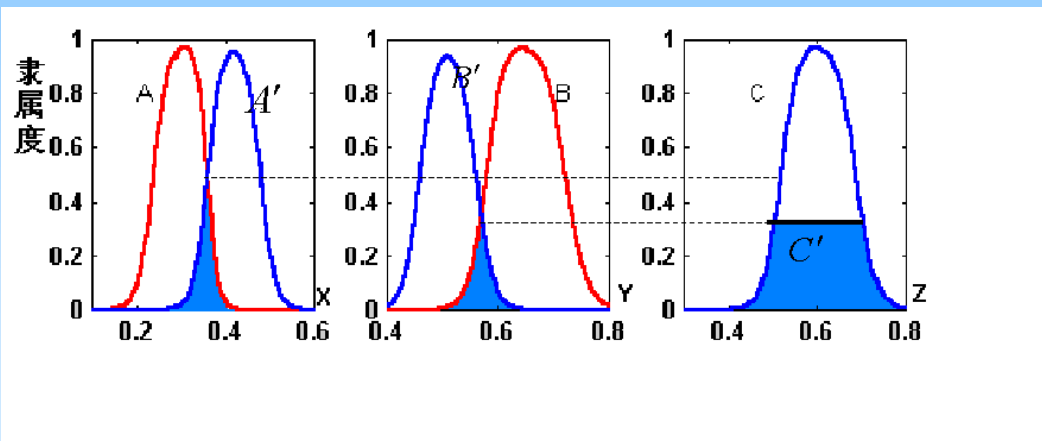
模糊推理

2. 多前提单规则:

前提1(事实) x 是 A' , y 是 B'

前提2(规则1) *if* x 是 A 和 y 是 B , *then* Z 是 C

结果 (结论) z 是 C'



$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y) &= \bigvee_{x, y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \\ &= \bigvee_{x, y} [(\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y))] \wedge \mu_C(z) \\ &= \{ \bigvee_x [(\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x))] \} \wedge \{ \bigvee_y [\mu_{B'}(y) \wedge \mu_B(y)] \} \wedge \mu_C(z) \\ &= (\omega_1 \wedge \omega_2) \wedge \mu_c(z)\end{aligned}$$

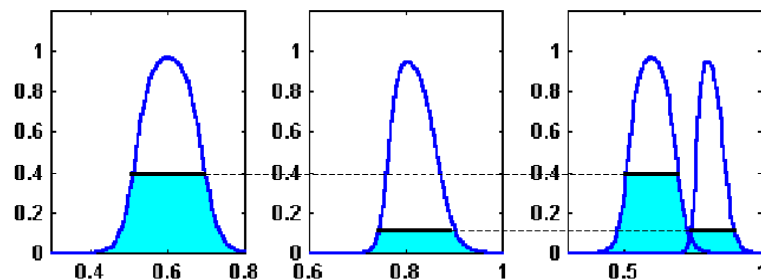
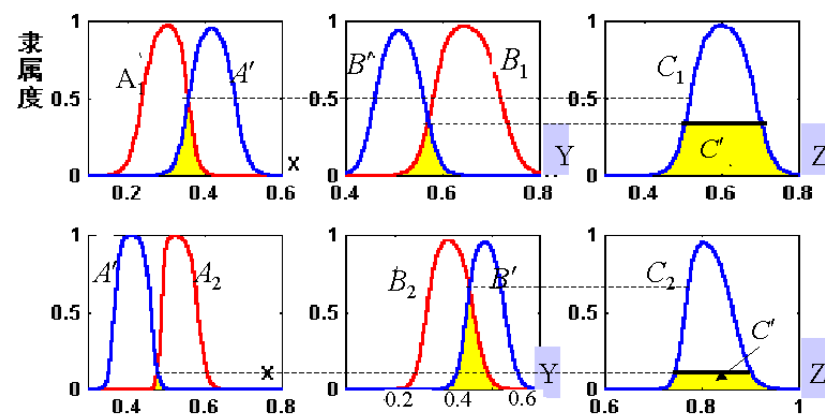
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

3. 多前提多规则

前提1(事实)	x 是 A' , y 是 B'
前提2(规则1)	if x 是 A_1 和 y 是 B_1 , then Z 是 C_1
前提3(规则2)	if x 是 A_2 和 y 是 B_2 , then Z 是 C_2
结果(结论)	z 是 C'



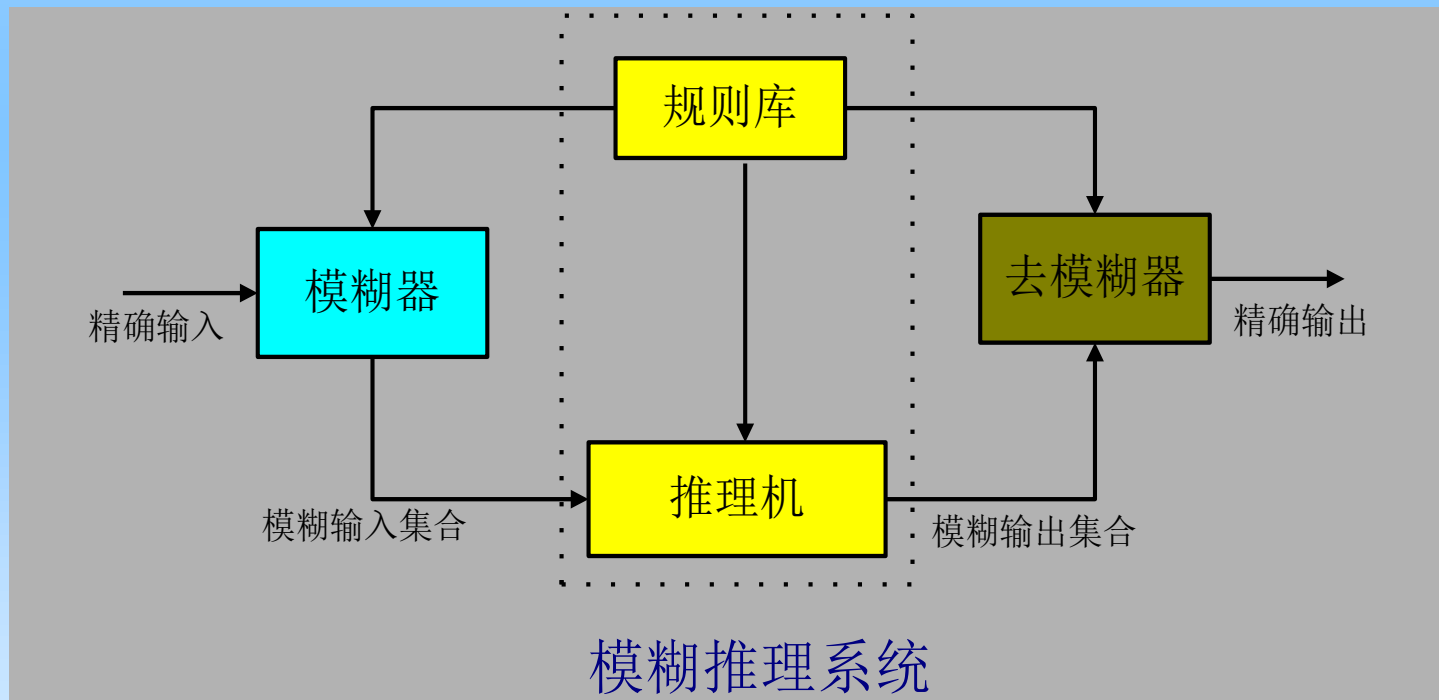
$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \{\vee_{x, y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_{A_1}(x) \wedge \mu_{B_1}(y) \wedge \mu_{C_1}(z)]\} \vee \\ &\quad \{\vee_{x, y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_{A_2}(x) \wedge \mu_{B_2}(y) \wedge \mu_{C_2}(z)]\} \\ &= \{(\omega_{11} \wedge \omega_{12}) \wedge \mu_{C_1}\} \vee \{(\omega_{21} \wedge \omega_{22}) \wedge \mu_{C_2}\} \end{aligned}$$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

模糊推理系统

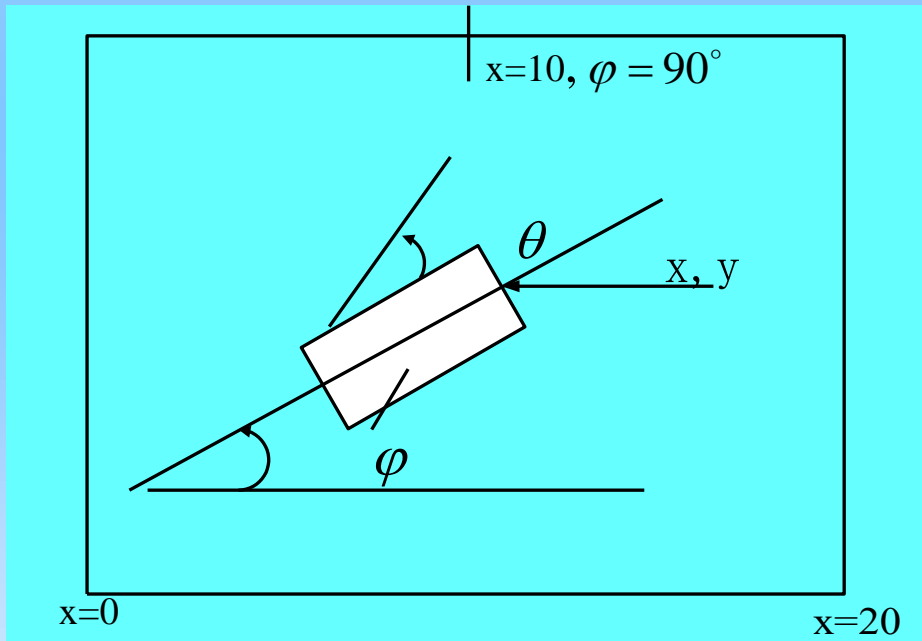


5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

例：货车倒车

装卸站台



$$\varphi \in [90^\circ, 270^\circ]$$

$$\theta \in [-40^\circ, 40^\circ]$$

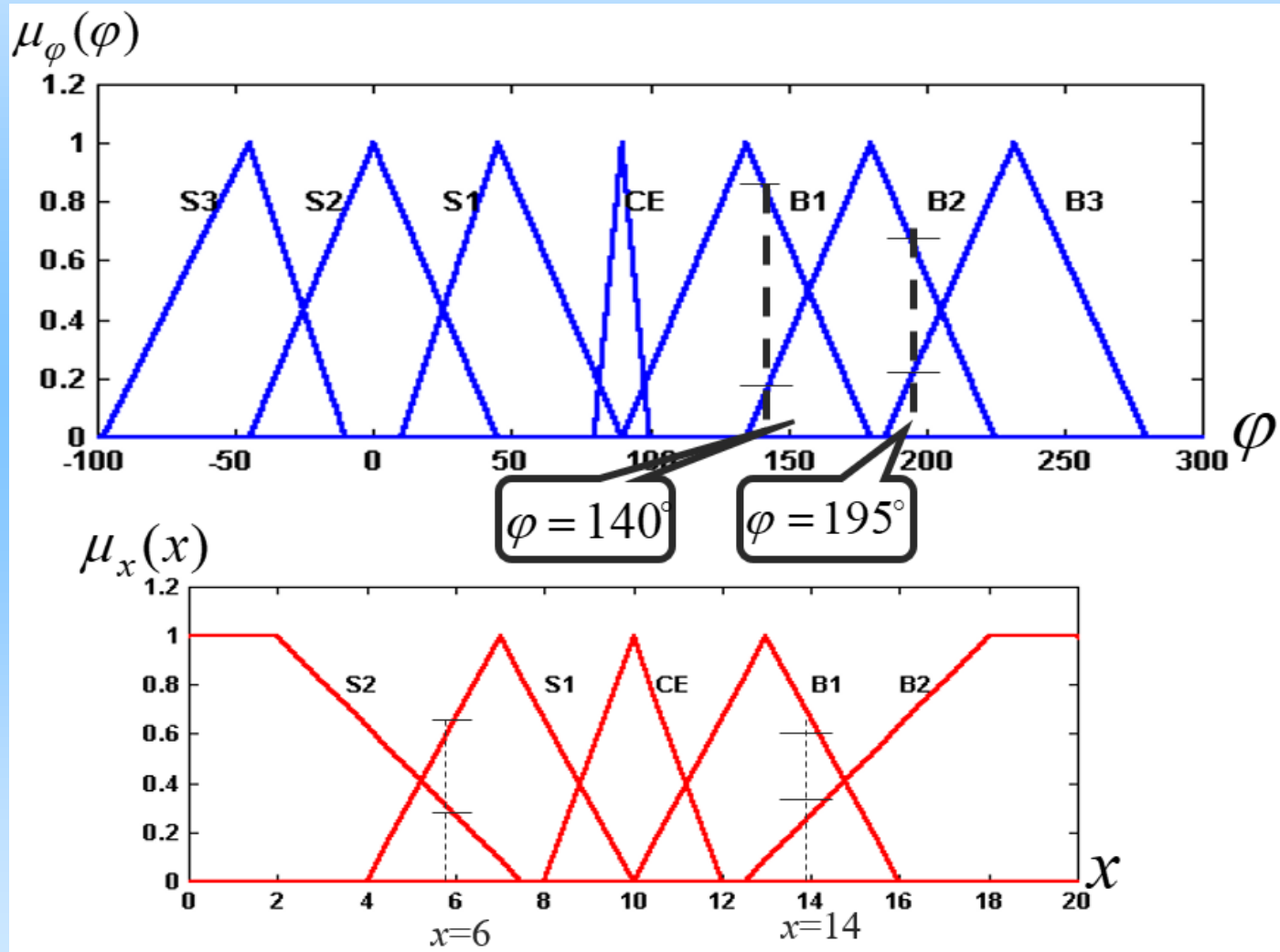
$$x \in [0, 20]$$

货车终点位置

$$(x_f, \varphi_f) = (10, 90)$$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

规则:

$R^{(1,2)}$: if φ 是 S_3 和 x 是 S_1 ,
then θ 是 S_3 ;
 $R^{(3,5)}$: if φ 是 S_1 和 x 是 B_2 ,
then θ 是 S_2 ;
 $R^{(4,3)}$: if φ 是 CE 和 x 是 CE ,
then θ 是 CE ;
.....
 $R^{(7,5)}$: if φ 是 B_3 和 x 是 B_2 ,
then θ 是 B_2 ;

$\underline{S_3}$	$\underline{S_2}$	S_3			
$\underline{S_2}$	S_2	S_3	S_3	S_3	
$\underline{S_1}$	B_1	S_1	S_2	S_3	S_2
\underline{CE}	B_2	B_2	CE	S_2	S_2
$\underline{B_1}$	B_2	B_3	B_2	B_1	S_1
$\underline{B_2}$		B_3	B_3	B_3	B_2
$\underline{B_3}$				B_3	B_2
	$\underline{S_2}$	$\underline{S_1}$	\underline{CE}	$\underline{B_1}$	$\underline{B_2}$

φ

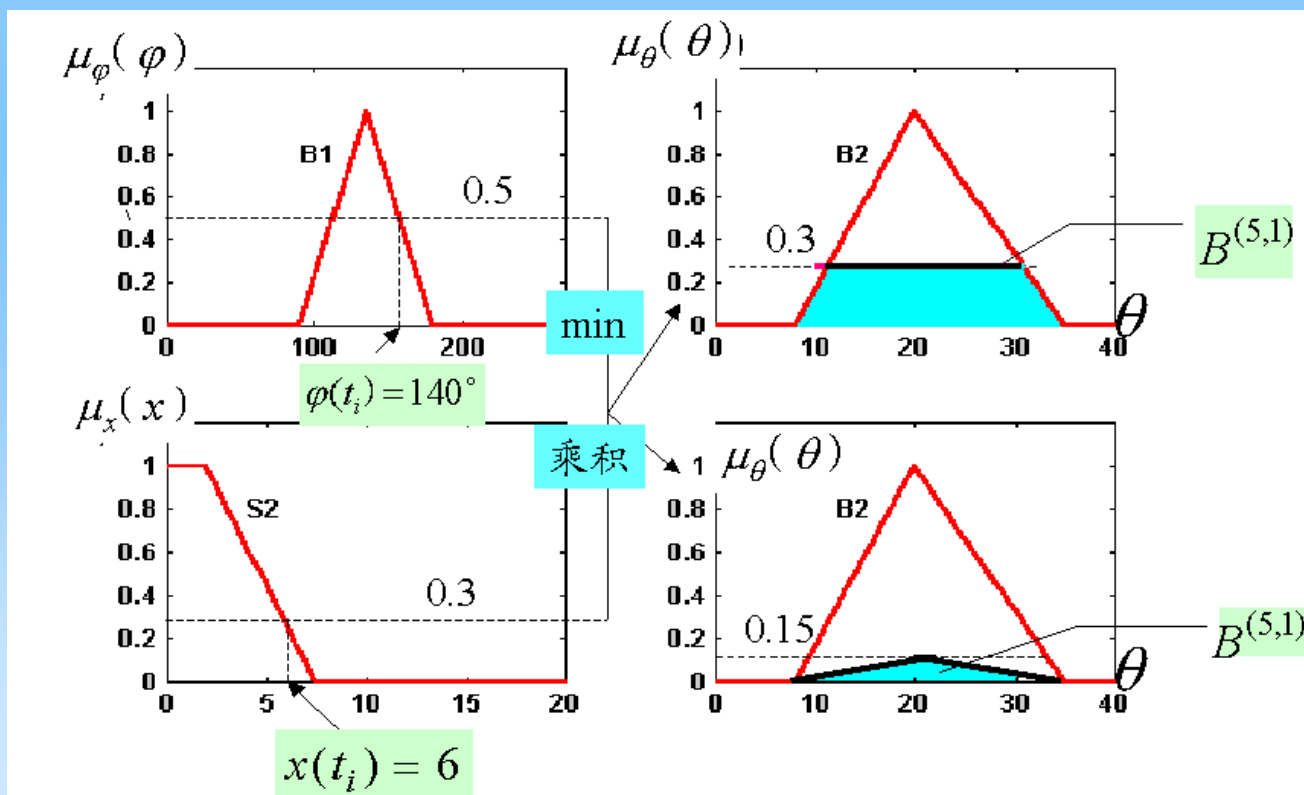
x

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

当货车状态为 $\varphi(t_i) = 140^\circ$, $x(t_i) = 6$ 时, 激活3条规则:

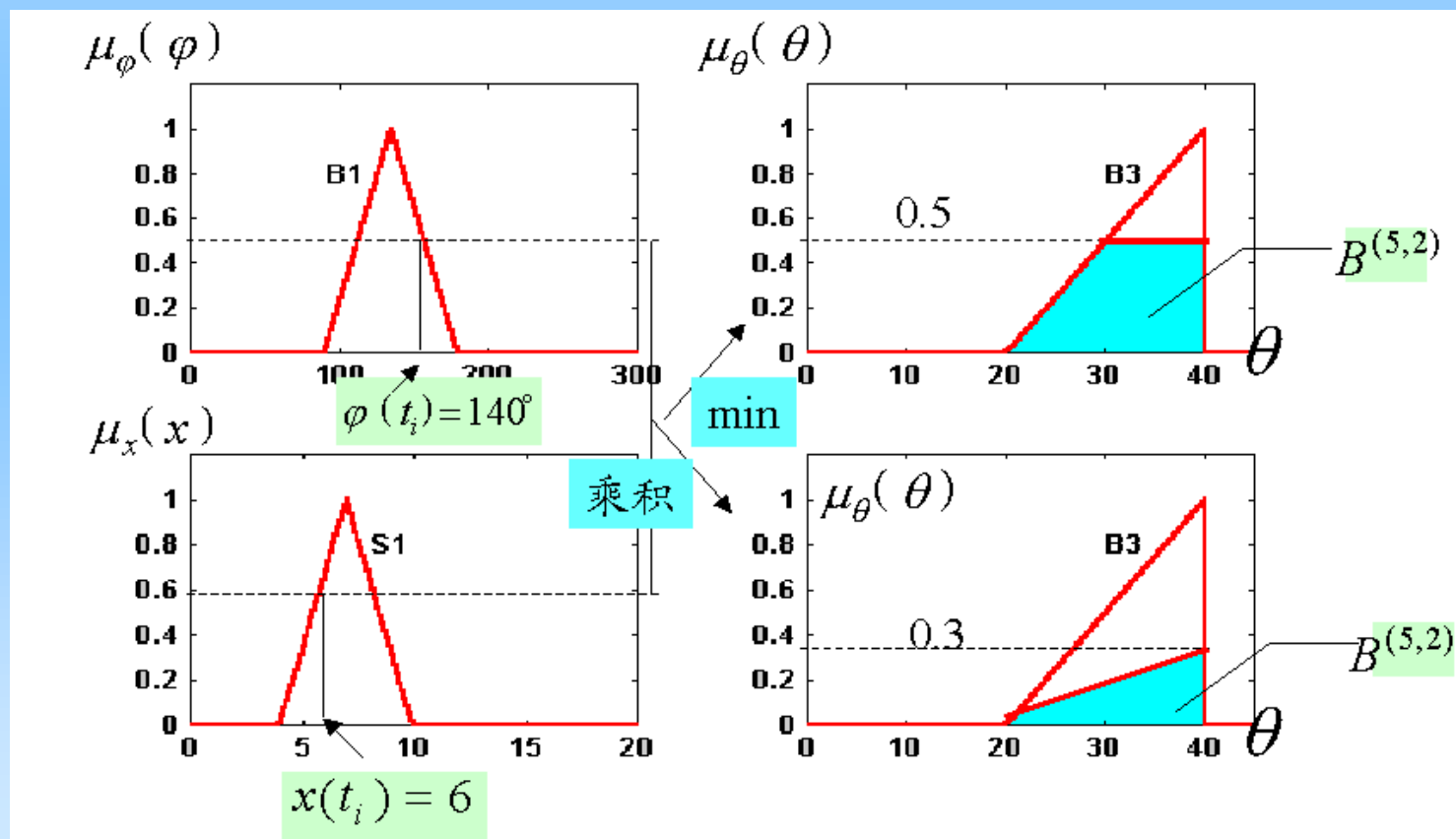
1) $R^{(5,1)}$: if φ 是 B_1 和 x 是 S_2 , then θ 是 B_2



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

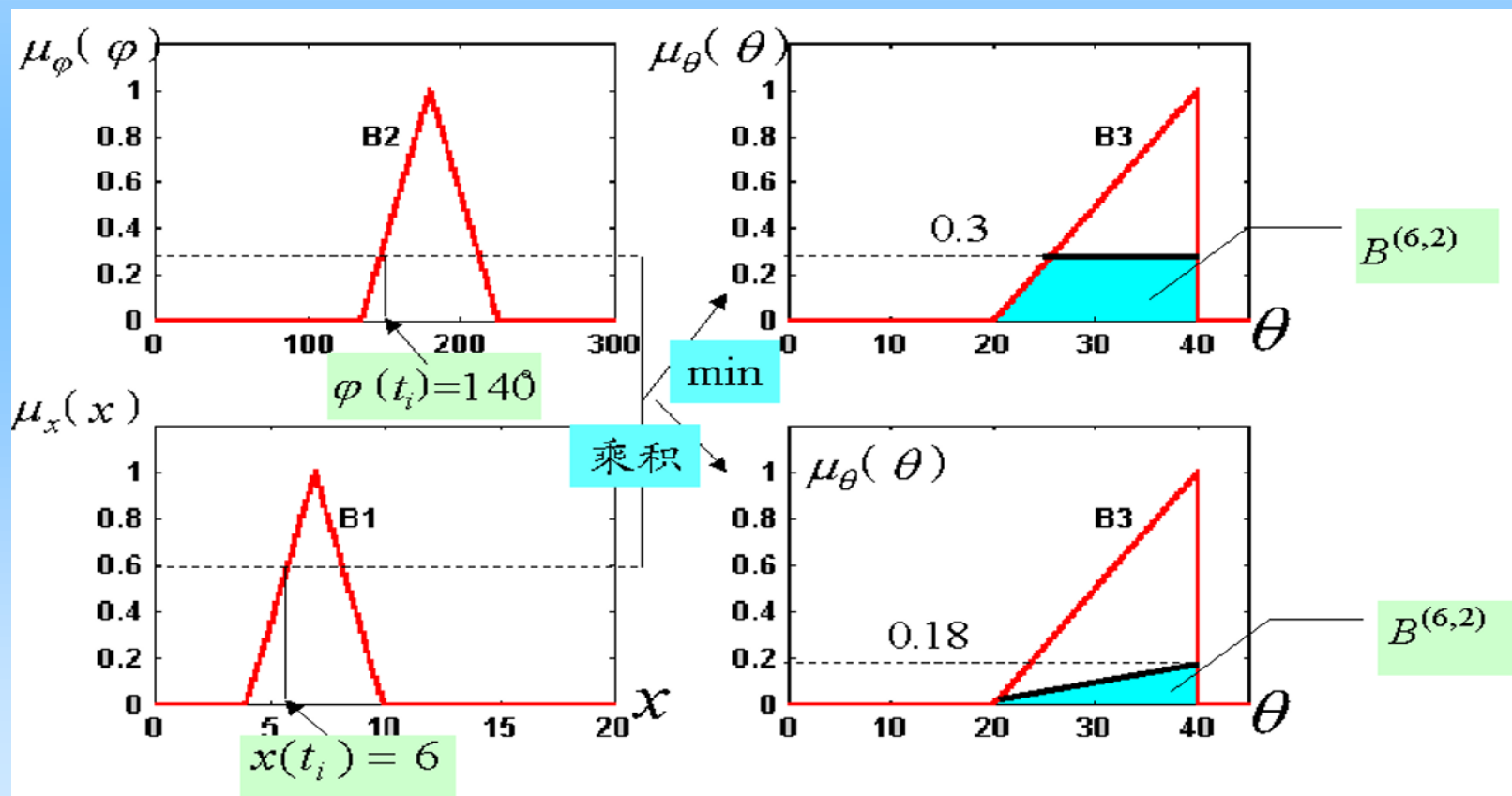
2) $R^{(5,2)}$: if φ 是 B_1 和 x 是 S_1 , then θ 是 B_3



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

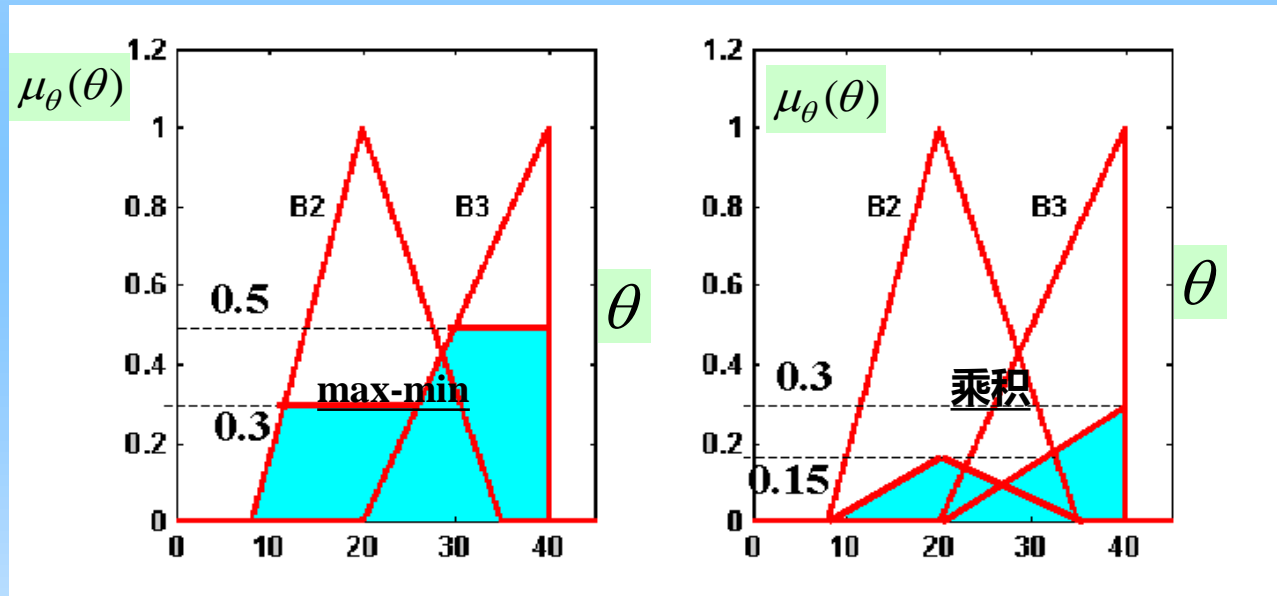
3) $R^{(6,2)}$: if φ 是 B_2 和 x 是 S_1 , then θ 是 B_3



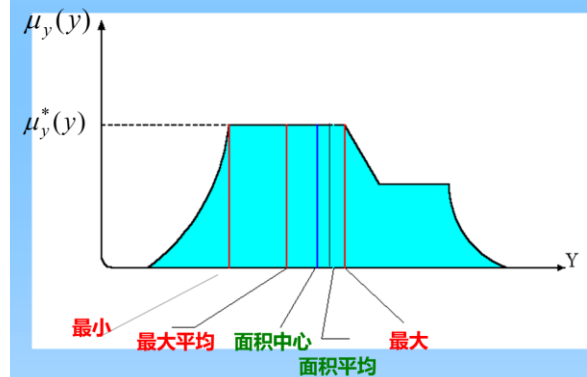
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

3条规则合成所获得的输出为:



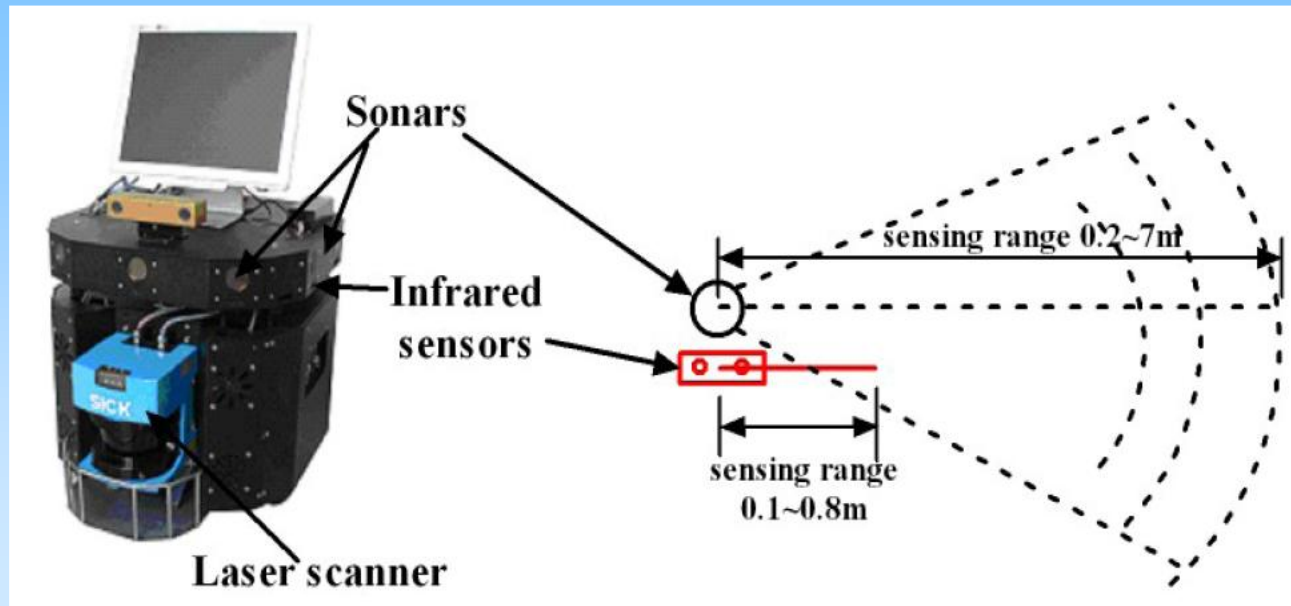
总的输出模糊集合



去模糊化

例：某移动机器人的距离传感器共六组均匀分布于机器人四周，每组距离传感器由一个超声波传感器和一个红外传感器组成，负责测量某一方向距离障碍物的距离，测距范围如图，注意由于有两种传感器配合使用，0.2~0.8m范围内的测距结果是较为精确的。

- 试建立一个模糊系统，用来表示每个方向上机器人距离障碍物的距离{极近、很近、近、中、远、很远、极远}；
- 假定只取左、中、右三个方向上距离障碍物的距离信息作为输入，输出为机器人的前进方向（前进角度范围：正负45°，分为负大、负小、零、正小、正大五个语言变量），给出其隶属函数图形；
- 根据常识，设计推理规则，基于模糊控制实现机器人的避障漫游。



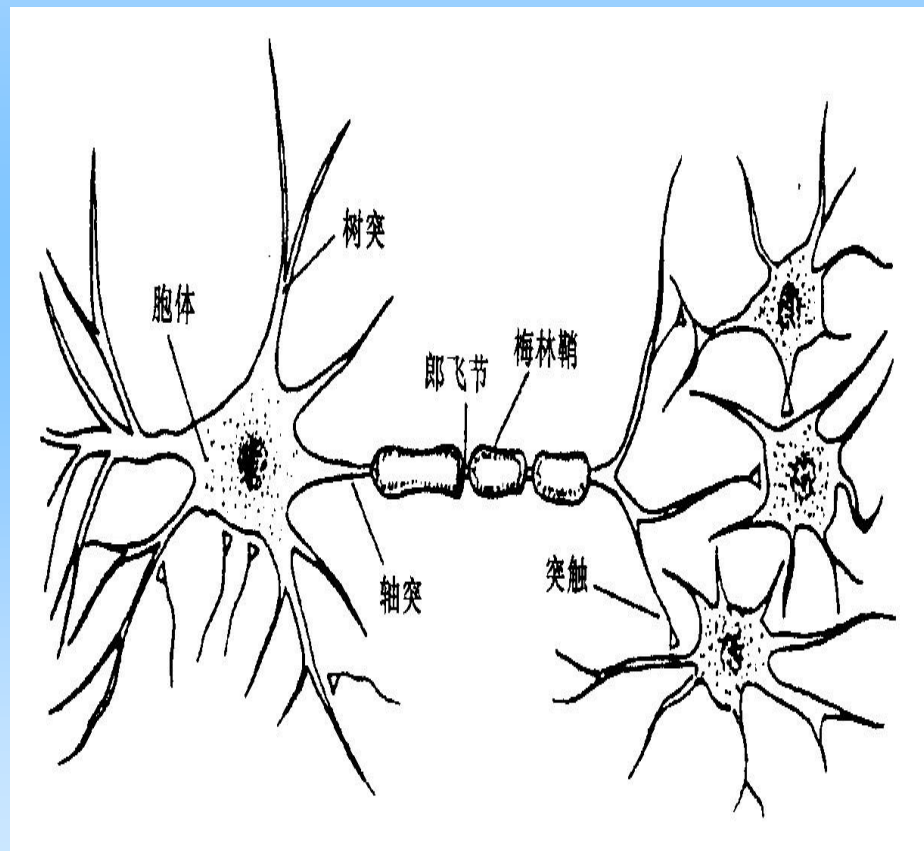
5.4 智能控制

◆智能控制的类型

(3) 人工神经网络控制系统

人脑大约包含 10^{11} 个神经元，分成约1000种类型，每个神经元大约与 $10^2 \sim 10^4$ 个其他神经元相连接，形成极为错综复杂而又灵活多变的神经网络。

每个神经元虽然都十分简单，但是如此大量的神经元之间、如此复杂的连接却可以演化出丰富多彩的行为方式。同时，大量的神经元与外部感受器之间的多种多样的连接方式也蕴含了变化莫测的反应方式。

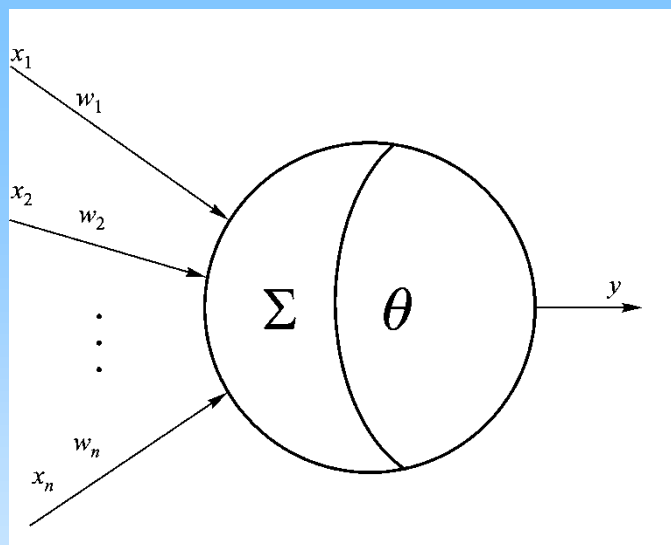


(3) 人工神经网络控制系统

◆ 人工神经元

人工神经网络(Artificial Neural Network, 即ANN)模拟大脑神经元之间的连接, 实现信息处理、存储等功能。一个简单的人工神经元模型, 它的输入 x_1-x_n 和输出 y 关系可以描述为

$$y = f\left[\sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta\right]$$

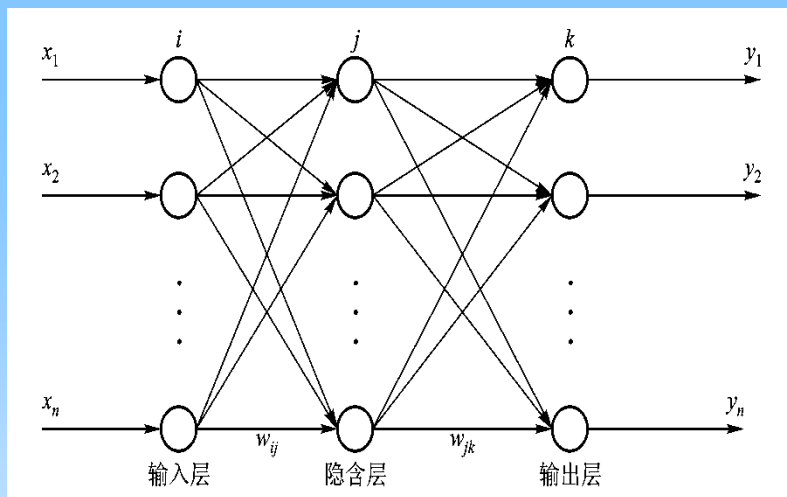


其中, $x_j (j=1,2,\dots,n)$ 是从其他神经元传来的输入信号; w_{ij} 表示从神经元 j 到神经元 i 的连接权值; θ_i 为阈值; $f(\bullet)$ 称为激发函数或作用函数。

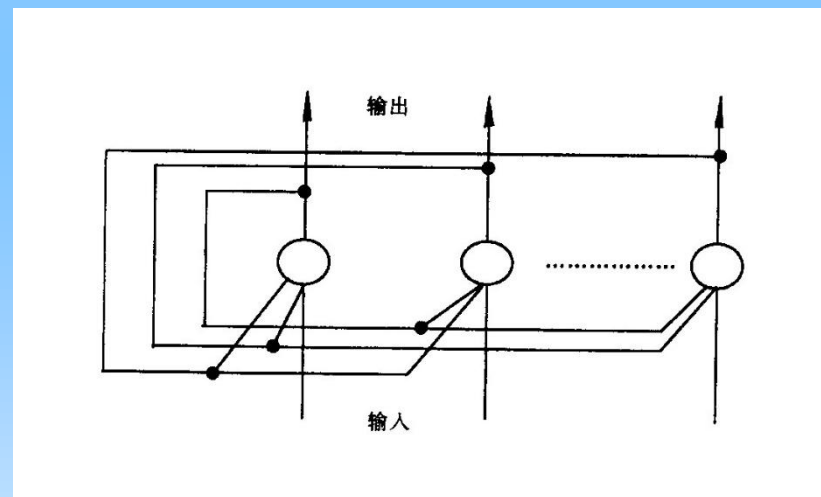
(3) 人工神经网络控制系统

◆ 人工神经网络

- 利用人工神经元可以构成各种不同拓扑结构的神经网络，它是生物神经网络的一种模拟和近似。
- 不同的神经网络模型有数十种，其中前馈型网络和反馈型网络是两种典型的结构模型。



三层前馈神经网络



单层反馈神经网络

◆ 人工神经网络工作原理

学习算法是神经网络的主要特征，也是当前研究的主要课题。学习的概念来自生物模型，它是机体在复杂多变的环境中进行有效的自我调节。

神经网络具备类似人类的学习功能。一个神经网络若想改变其输出值，但又不能改变它的转换函数，只能改变其输入，而改变输入的唯一方法只能修改加在输入端的加权系数。

5.4 智能控制

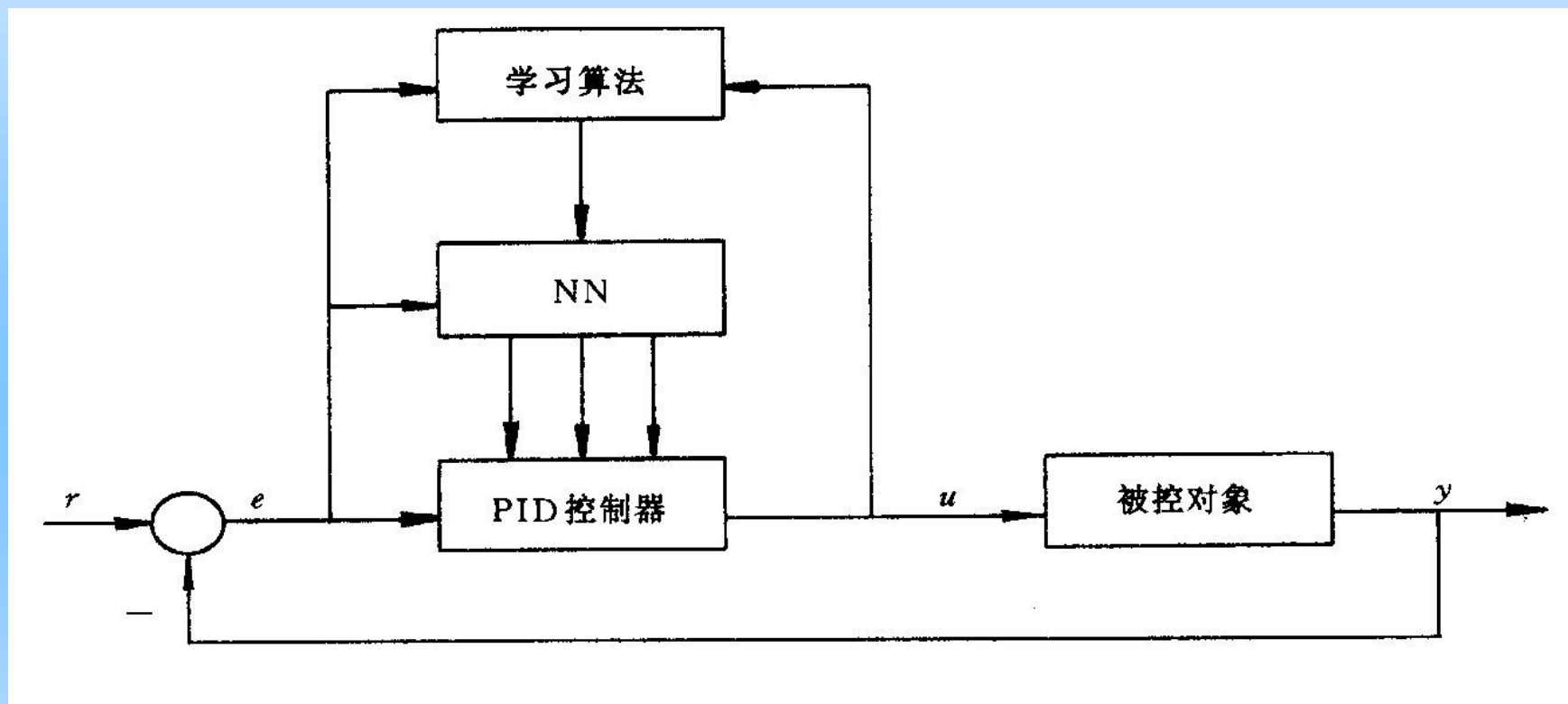
◆智能控制的类型

(3) 人工神经网络控制系统

◆人工神经网络在控制中的应用

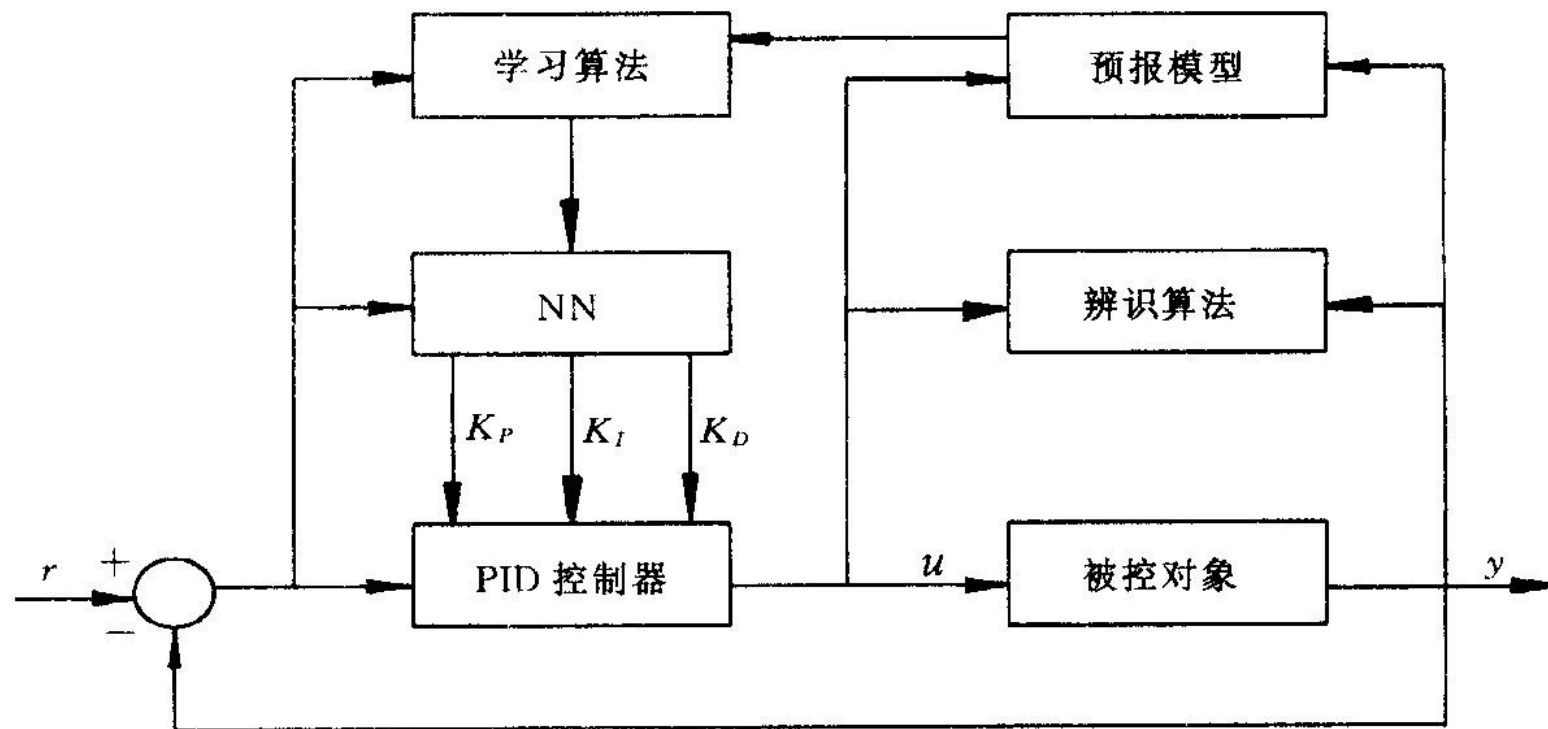
1. 在传统的控制系统中用以动态系统建模，充当对象模型；
2. 在反馈控制系统中直接充当控制器的作用；
3. 在传统控制系统中起优化计算作用；
4. 与其他智能控制方法如模糊逻辑、遗传算法、专家控制等相融合。

□ 基于神经网络控制参数自学习PID控制



在传统控制系统中起优化计算作用

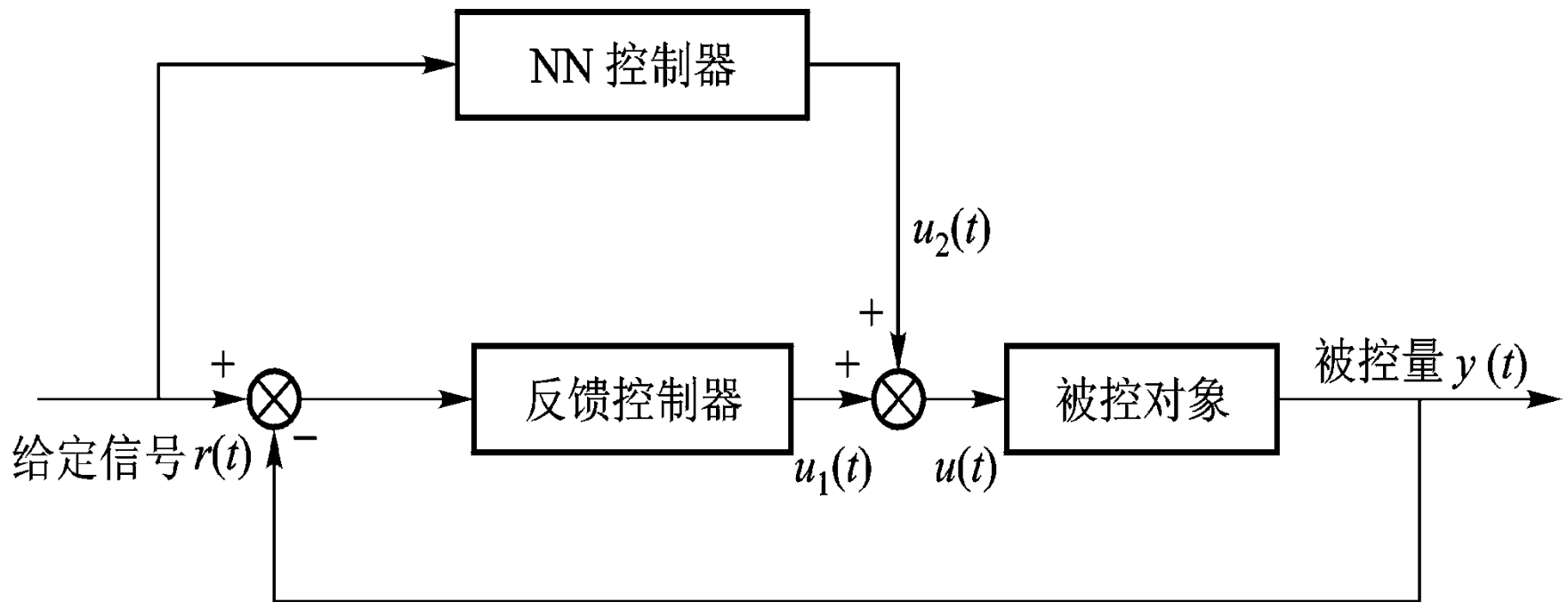
□采用预测模型的NN控制参数自学PID控制



将神经网络用于控制器的设计或直接学习计算控制器的输出（控制量）

□ 神经网络监督控制

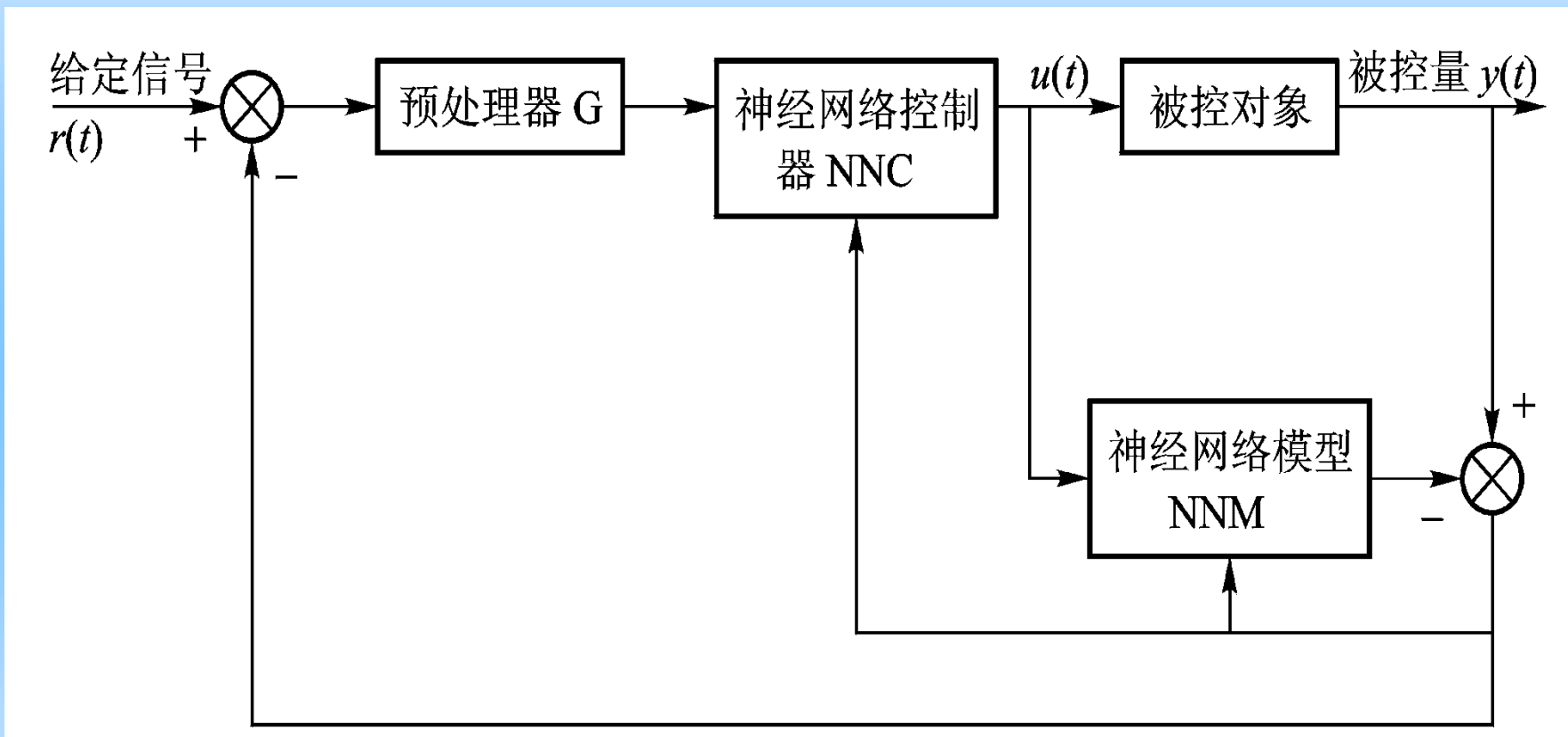
系统在原有反馈控制的基础上增加人工神经网络作为控制器的前馈控制。



在反馈控制系统中直接充当控制器的作用

□ 神经网络内模控制

系统中NNM为被控对象的模型，用于充分逼近被控对象的动态特性，而NNC（神经网络控制器）为对象的逆模型。



在传统的控制系统中用以动态系统建模，充当对象模型

5.5 非线性控制

◆非线性控制系统的主要特点

- (1) 叠加原理不适用；
- (2) 动态性能不仅与系统的结构和参数有关，而且还与输入的信号和初始条件有关；
- (3) 当输入是正弦信号时，输出会出现畸变的波形；
- (4) 输出响应模态呈复杂形态（如突变、分岔等）；
- (5) 没有成熟的精确分析方法，多采用近似分析法。

5.5 非线性控制

◆非线性控制系统的主要分析方法

(1) 相平面法

相平面法是时域分析法在非线性系统中的推广应用。但相平面法仅适用于一、二阶非线性系统的分析。

(2) 描述函数法

描述函数法是一种频域的分析方法，它是线性理论中的频率法在非线性系统中的推广应用，有较广泛应用。

(3) 计算机求解法

用计算机直接求解非线性微分方程，对于分析和设计复杂的非线性系统，几乎是唯一有效的方法。随着计算机的广泛应用，这种方法定会有更大的发展。

5.5 非线性控制

◆ 非线性控制系统研究方法的特点

- (1) 主要解决非线性控制系统的“分析”方法
强调稳定性分析
- (2) 对非线性控制系统的“综合”方法研究不够
尚未出现某种简单且实用的综合方法。
- (3) 新理论、新方法正在不断出现

本章小结

- PID控制方法是一种经典的、在实际工业过程控制中最常用的方法，可通过对P、I、D的不同组合及其参数的选取获得较理想的控制效果；
- 最优控制是在要求被控对象的性能指标多样化、及要求某些被控量或系统的某个性能指标达到最佳值（如最短时间）或给定值（如速度为零）时产生的，具有强烈的工程背景和较丰富的理论成果；
- 自适应控制实质上是系统辨识与控制技术的结合，可根据环境变化对被控对象（系统）的结构和参数的影响自适应地调整控制器的参数，通常有自校正控制系统、模型参考自适应控制系统两种类型；
- 智能控制是对传统控制理论的发展，是自动控制发展的新阶段，是人工智能、控制论、系统论和信息论等多种学科的综合集成。