

# 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](mailto:clchen@nju.edu.cn)

---

2025年3月25日

# 4 自动控制系统的基本控制过程

4.1 人工控制和自动控制

4.2 自动控制系统的基本控制方式

4.3 不同输入作用下的控制

4.4 不同特性信号下的控制

4.5 控制系统中的非线性现象

实例：

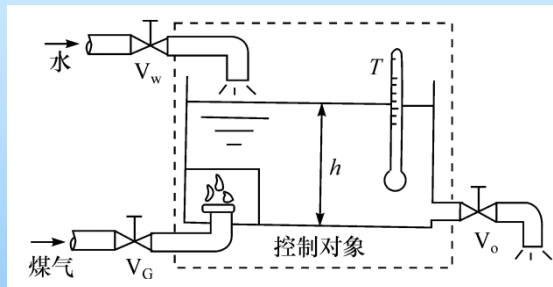


如何调节水温 and 液位在期望状态？

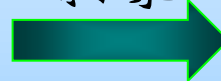
# 回顾：一个自动控制系统描述原理



抽象



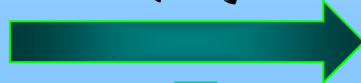
抽象



模型（方框图）

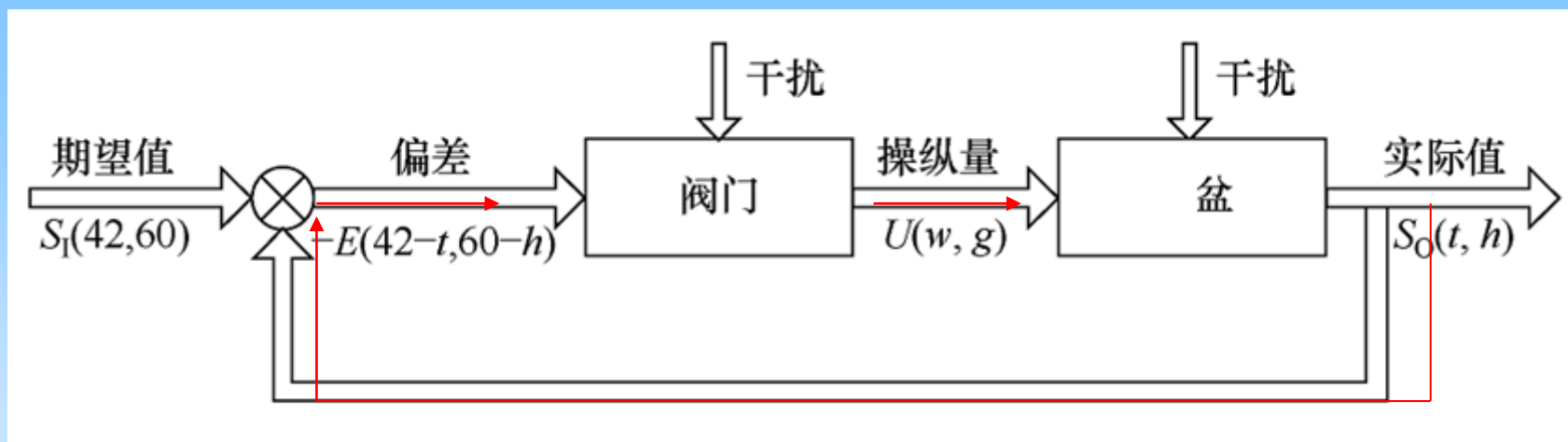
含物质、能量  
的流动过程

抽象



仅含信息的  
流动过程

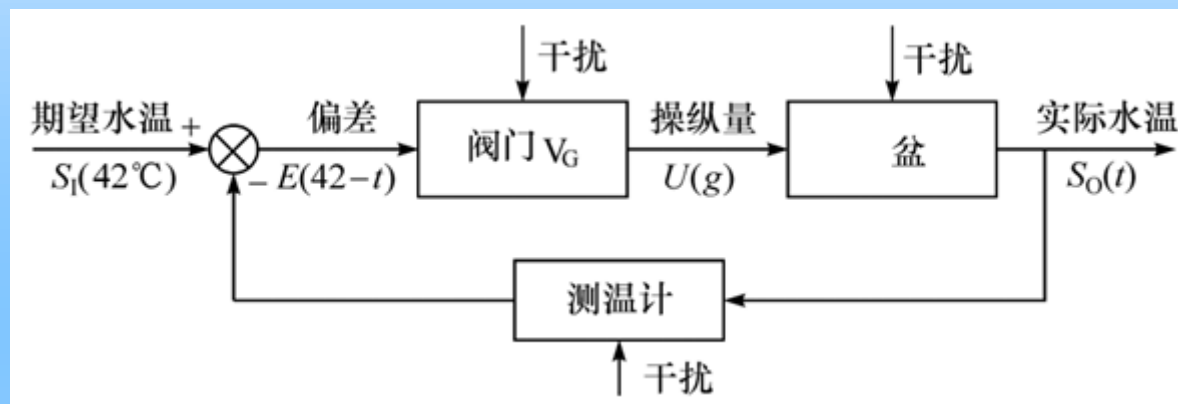
自己试画



控制过程的模型化（方框图）

# 4.1 人工控制和自动控制

## ◆ 单考虑温度控制情景



**人工控制：**对温度感知和对阀门的操作完全由用水者自己完成。

**自动控制：**没有人直接参与，从测量到操作阀门等全部过程都用相关装置（设备）代替人来完成。

**思考4-1：**人在此控制系统中担当了哪些角色和功能？

## 4.2 自动控制系统的基本控制方式

### 控制的目的是？

要求系统状态（实际水温）向期望状态（理想的水温）转移！

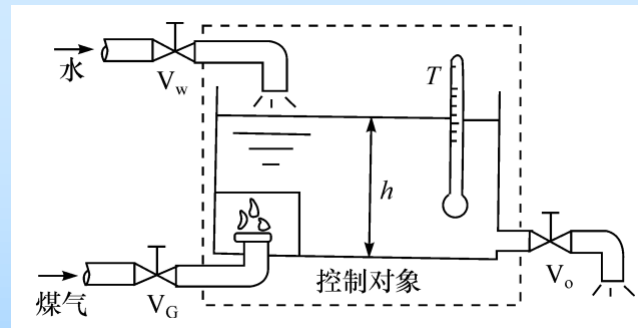
### 有哪些控制的方式？

开环控制方式

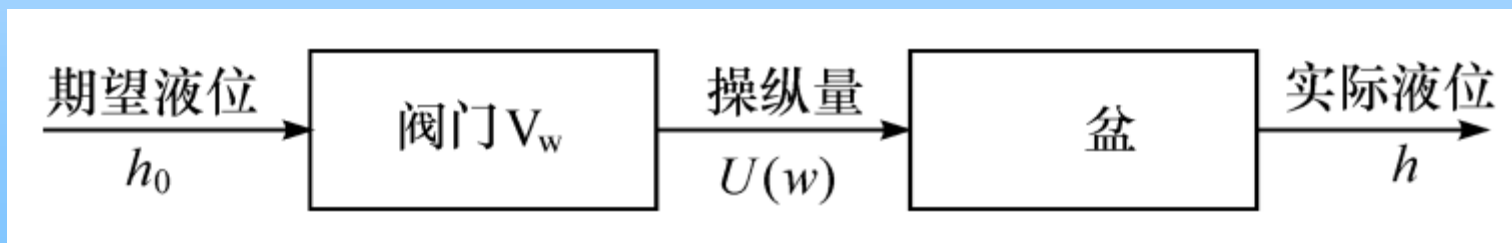
反馈控制方式

复合控制方式

## 4.2.1 开环控制方式



一种液位控制系统方框图：

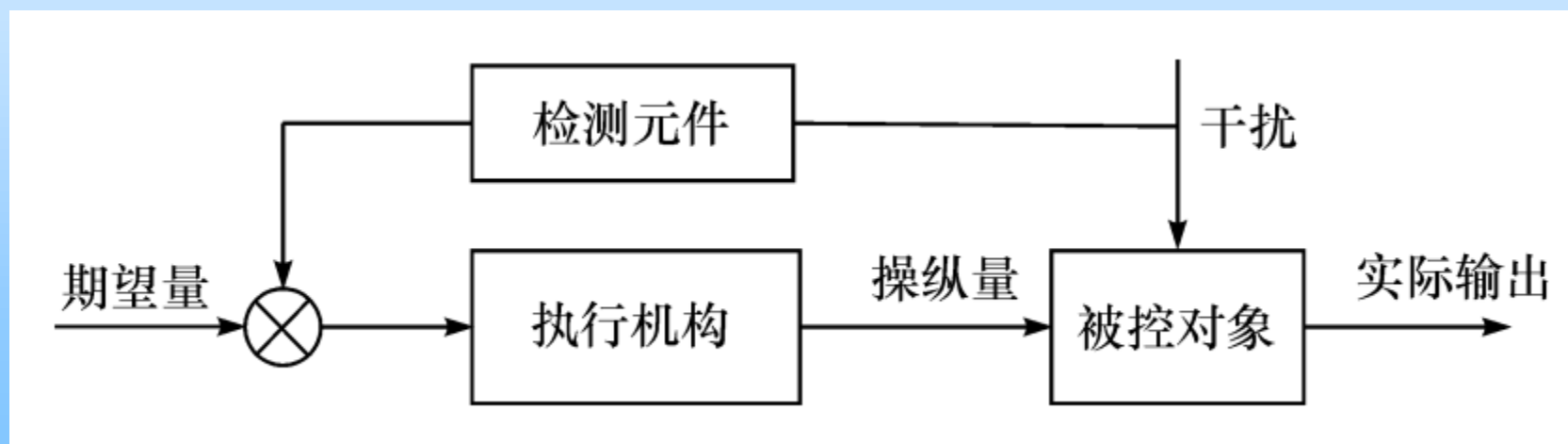


- 其信号是沿箭头方向单方面流动，不存在反馈，是典型的开环控制。
- 优点：结构简单、功耗小、动作快。
- 缺点：对干扰无能为力，会使系统存在（不允许的）误差，控制精度低



拓展4-1：打印机的打印控制方式？

## ● 按扰动控制的开环控制方式（顺馈控制）



◆ 利用可测量的扰动经测量变换后，作为**补偿**作用，用来消除或削弱扰动对被控量的影响。但当扰动作用较多时，将使得控制系统复杂化，很难协调地进行控制。

思考4-2：可实施顺馈控制的条件有哪些？

拓展4-2：随气温加减衣服的控制过程是什么？

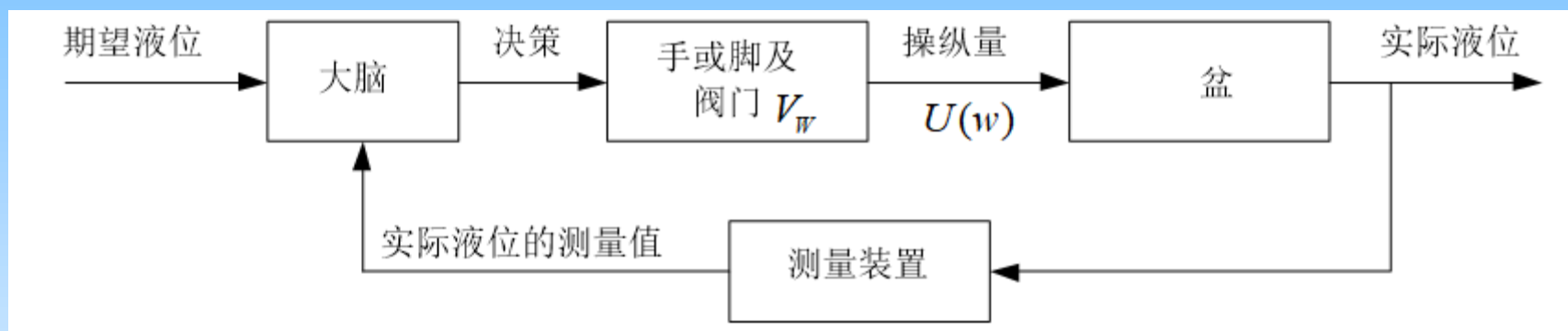


## 4.2.2 反馈控制方式

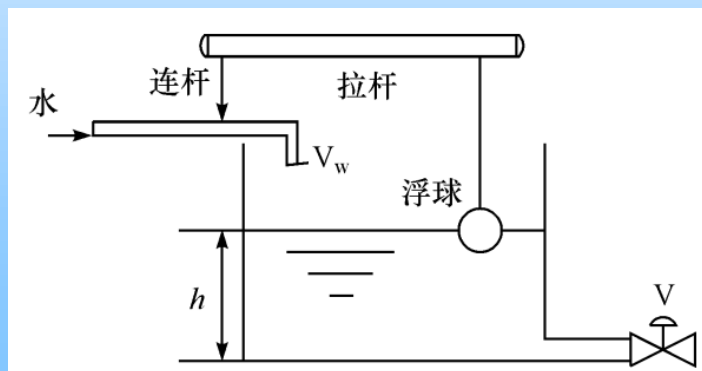
- 复习：什么叫反馈？

把输出量（信号/信息）传输出去后，又将其取出送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号，再对控制系统的再输出产生影响的过程。

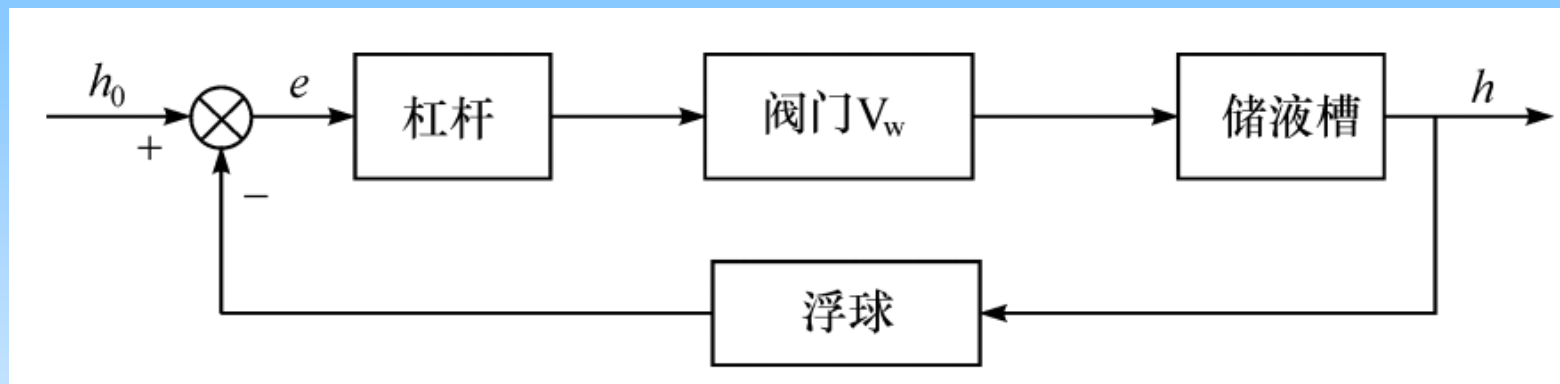
- 示例：人工液位控制过程



- 如果能用一些相应的元部件来代替人工控制时各部分的功能，可以组成仿人液位控制系统：

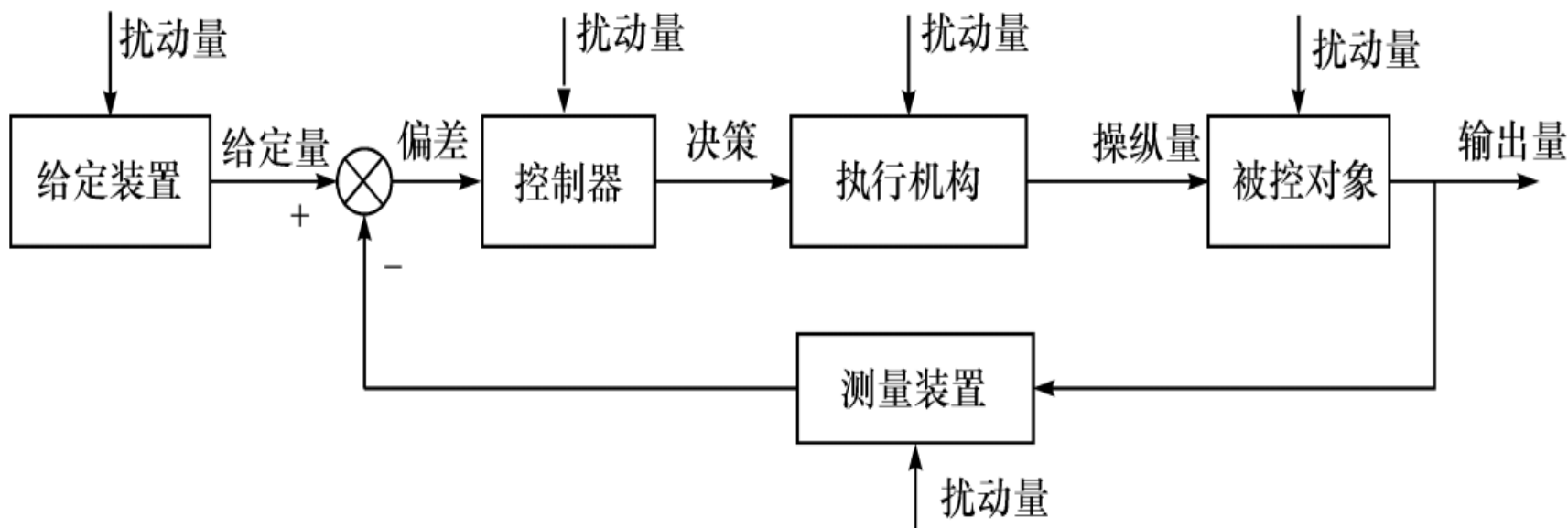


自己试画



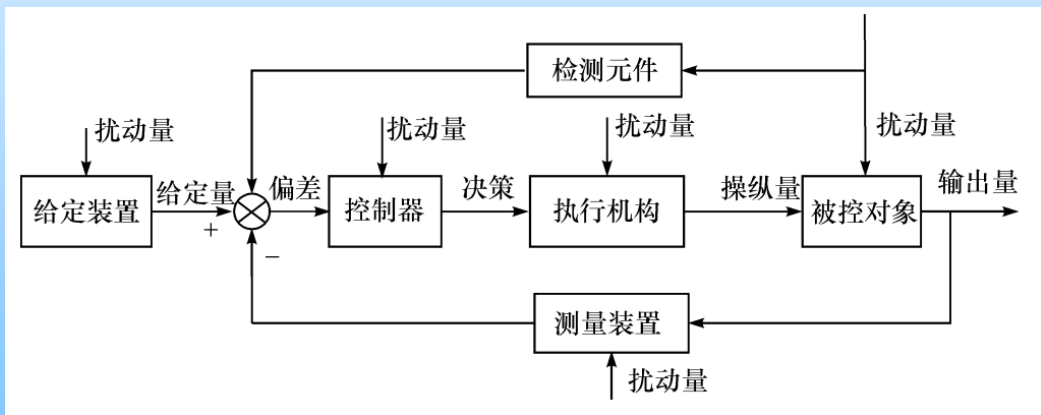
液位控制系统的控制过程

- 更一般的反馈控制方式



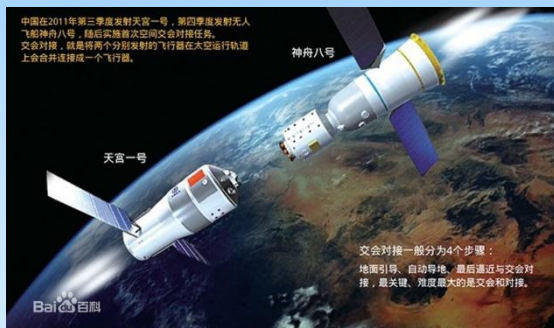
思考4-3：那么多扰动该怎么办？

## 4.2.3 复合控制方式



- **复合控制是顺馈控制和反馈控制的有机结合**，系统中的补偿控制（顺馈控制）能及时地抵消可测扰动量对被控量的不利影响，而反馈控制能保证系统的高精度。这是一种得到广泛应用的控制方式。

**拓展4-3：神舟飞船与天宫空间站交会对接为什么要进行人工手控和自动控制两种方式实验？（组合/冗余控制）**



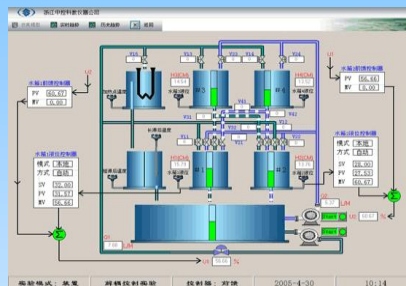
## 4.3 不同输入信号作用下的控制

### 4.3.1 控制系统的基本类型

#### (1) 恒值控制（或称自动调节、自动镇定）

**控制系统的特点：**参据量是一个恒定的数值（**常值**），要求被控量也是一个常值。

**典型应用：**空调、工业生产中的**恒温、恒压、恒液位**等过程控制系统等。



**分析与设计的重点：**各种扰动对被控对象的**影响**及抗扰动的**措施**。

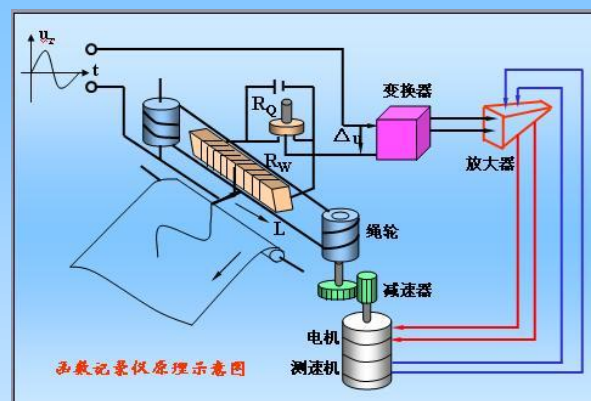
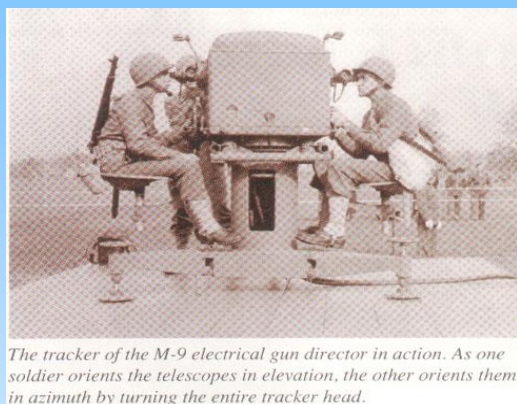
## 4.3 不同输入信号作用下的控制

### 4.3.1 控制系统的基本类型

#### (2) 随动控制（如被控量为机械量，又称伺服控制）

**控制系统的特点：**参据量是一个预先未知的随时间任意变化的函数，要求被控量以尽可能小的误差跟随参据量的变化。

**典型应用：**火炮（调炮）、函数记录仪等系统。



**分析与设计的重点：**被控量跟随未知的任意变化量的快速性和准确性。

## 4.3 不同输入信号作用下的控制

### 4.3.1 控制系统的基本类型

#### (3) 程序控制

**控制系统的特点：**参据量是预先规定的随一定规律变化的函数，要求被控量快速、准确地加以复现。

**典型应用：**数控机床、家用电器、航（空）天器、先进制造车间等。



**分析与设计的重点：**控制精度准确性、控制算法快速性和控制程序可靠性。



# 4.3 不同输入信号作用下的控制

## 4.3.2 不同控制系统的典型输入信号

◆ 先思考几个问题：

(思考4-4)

- (1) 输入信号有什么作用？
- (2) 为什么要引入典型输入信号？
- (3) 有哪些类型的输入信号？

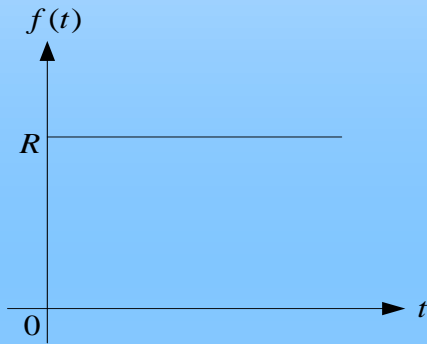
◆ 可选作典型输入信号的函数应具备的条件（与数学的关联）

- (1) 这种函数在现场和实验中容易得到；
- (2) 控制系统在这种函数作用下的性能应代表在实际工作条件下的性能；
- (3) 这种函数的数学表达式简单，便于理论分析和计算。

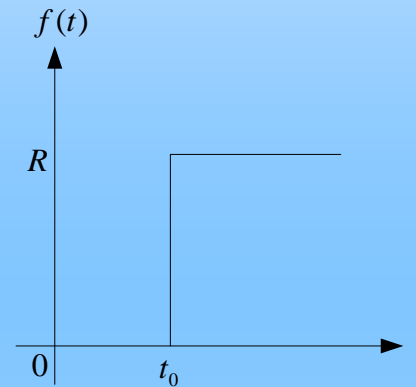


## 4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

### (1) 阶跃信号



$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ R & t \geq 0 \end{cases}$$

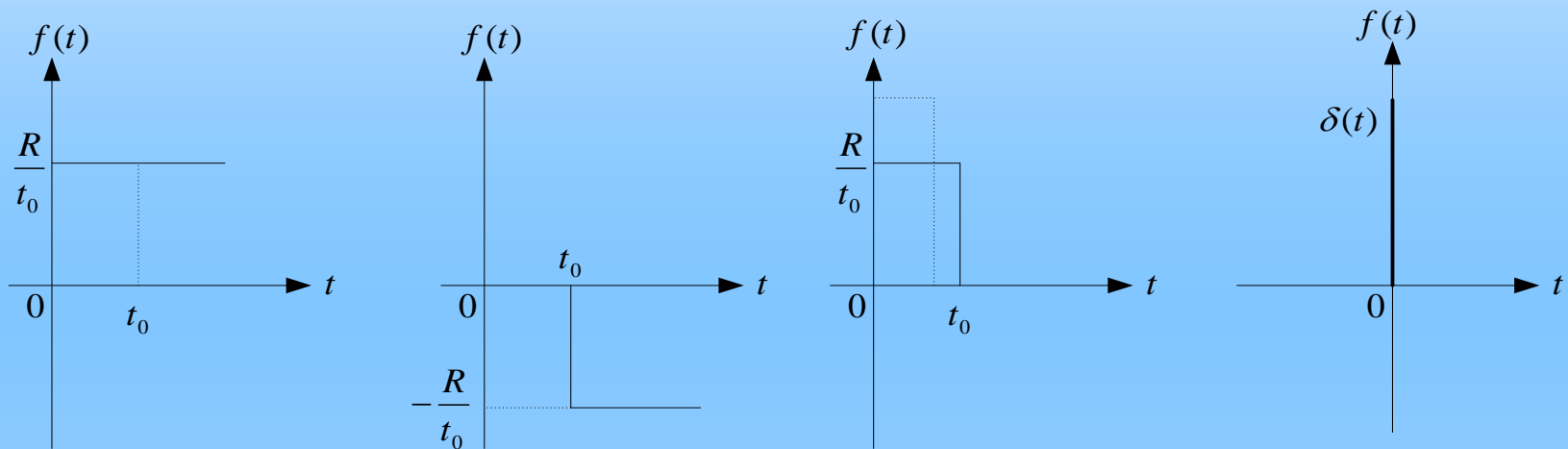


$$f(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R & t \geq t_0 \end{cases}$$

**典型应用：**一般用于恒值控制系统的分析、设计、调试和检验等。 (时域)

## 4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

### (2) 脉冲信号

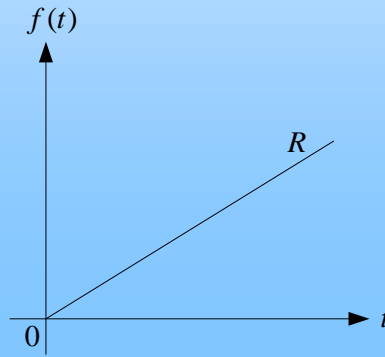


$$f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{R}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)] = \delta(t)$$

**典型应用：**一般用于控制系统的稳定性分析。（时域）

## 4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

### (3) 斜坡信号

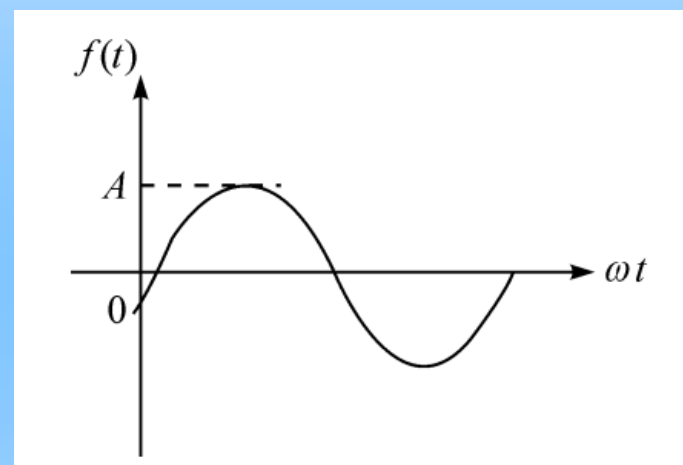
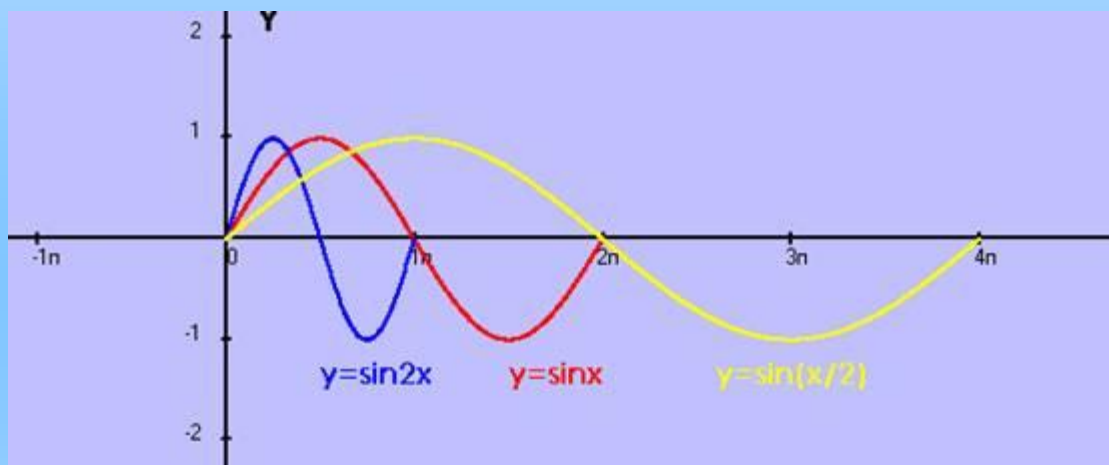


$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Rt & t \geq 0 \end{cases}$$

**典型应用：**一般用于随动控制系统的分析、设计、调试和检验等。 (时域)

## 4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

### (4) 正弦信号



$$f(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$$

**典型应用：**一般用于控制系统的分析、设计、调试和检验等。 (频域)

## 4.4 不同特性信号作用下的控制

思考4-5：当控制系统中存在数字式环节时该怎么办？

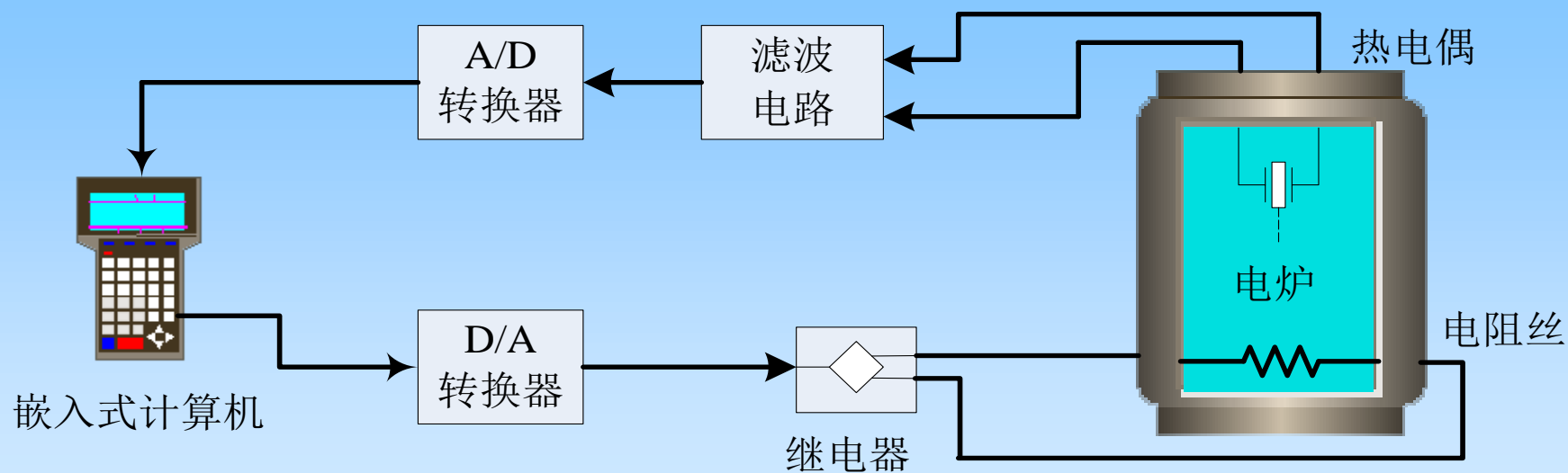
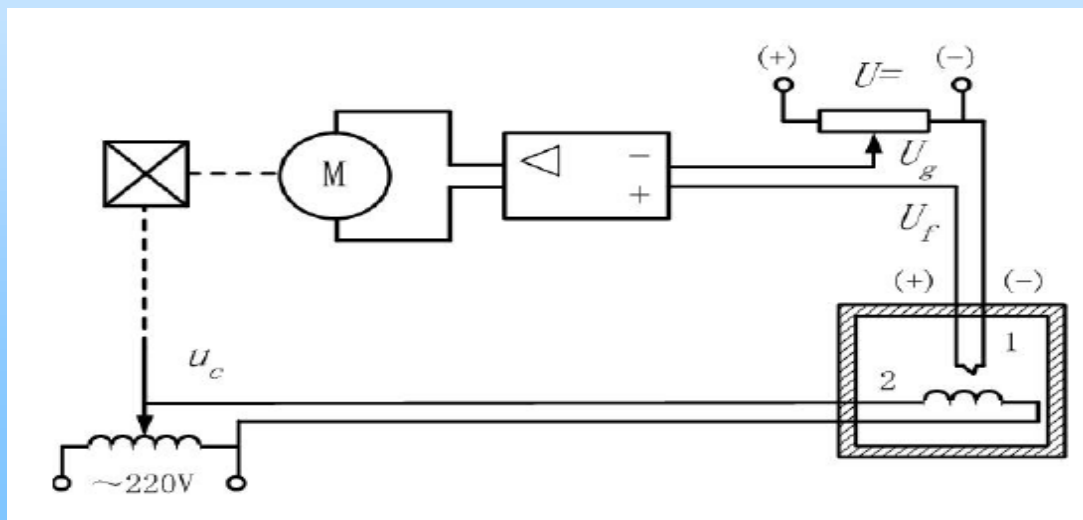
### 4.4.1 连续与离散控制

从控制信号的特性角度，我们可以简单地将所有控制系统分为连续控制系统和离散控制系统两大类。

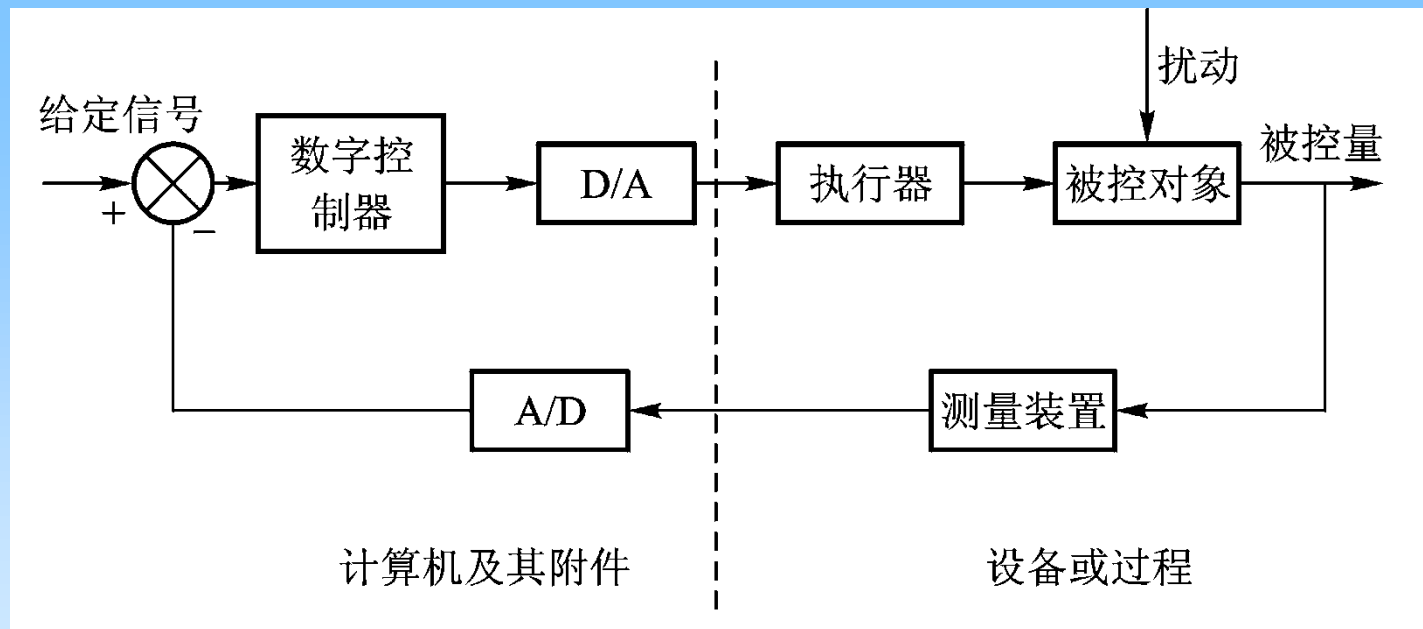
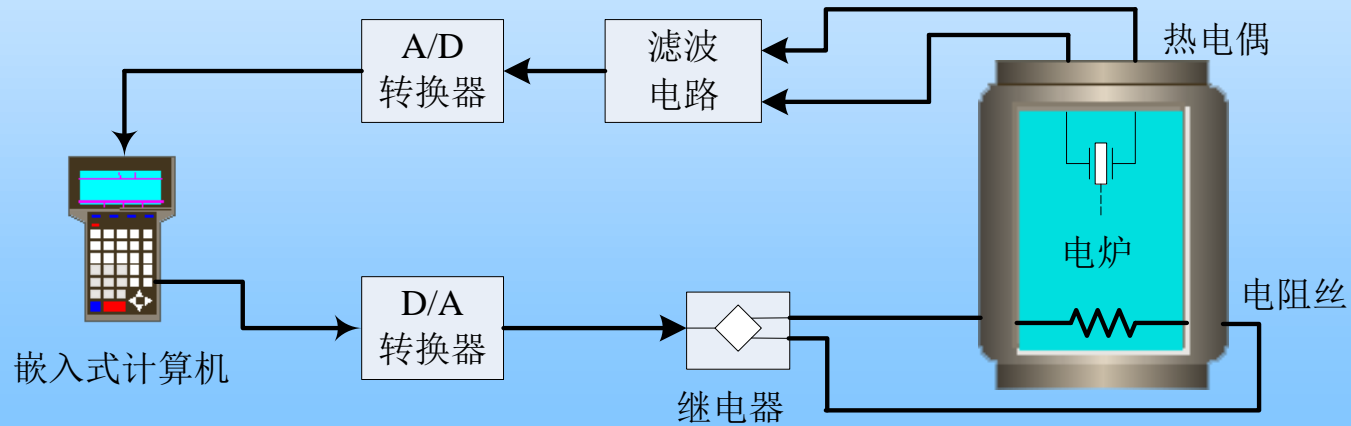
**连续控制系统：**指系统中所有传递的信号都是时间上的连续函数。

**离散控制系统：**指在系统的局部或全部是时间上的断续信号。  
(即离散信号)

# 1、连续与离散控制系统

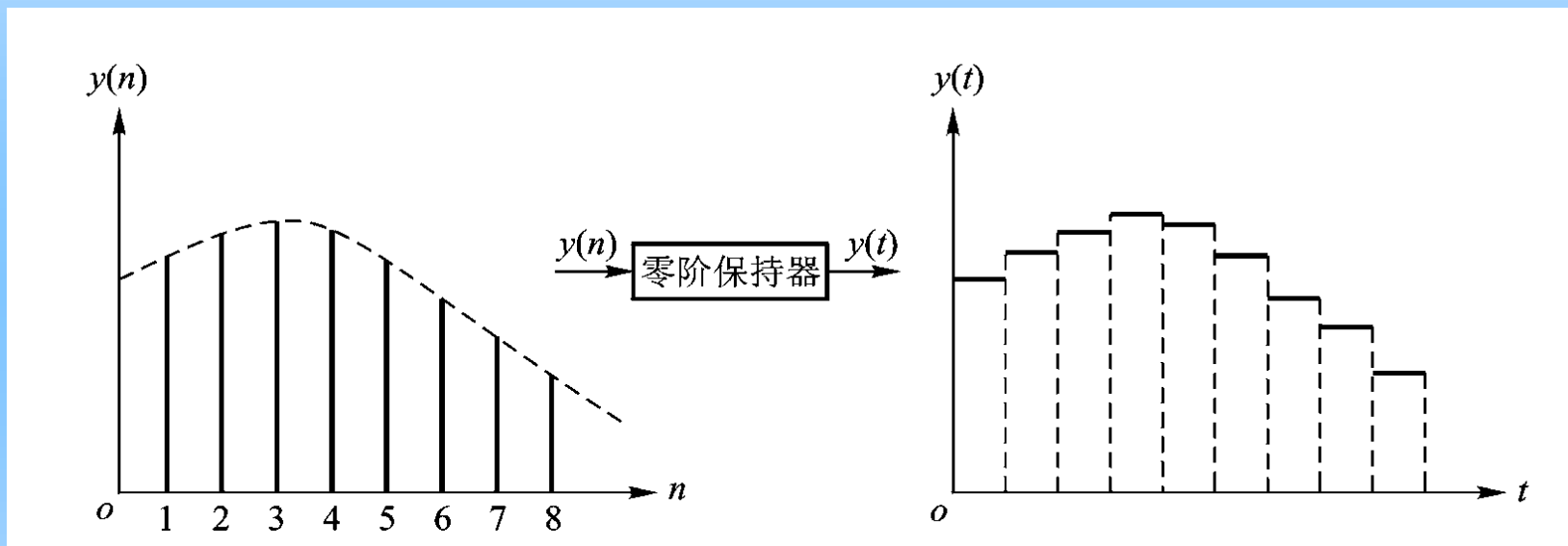


# 典型的离散控制系统结构



## 2、连续信号的离散化

### 保持

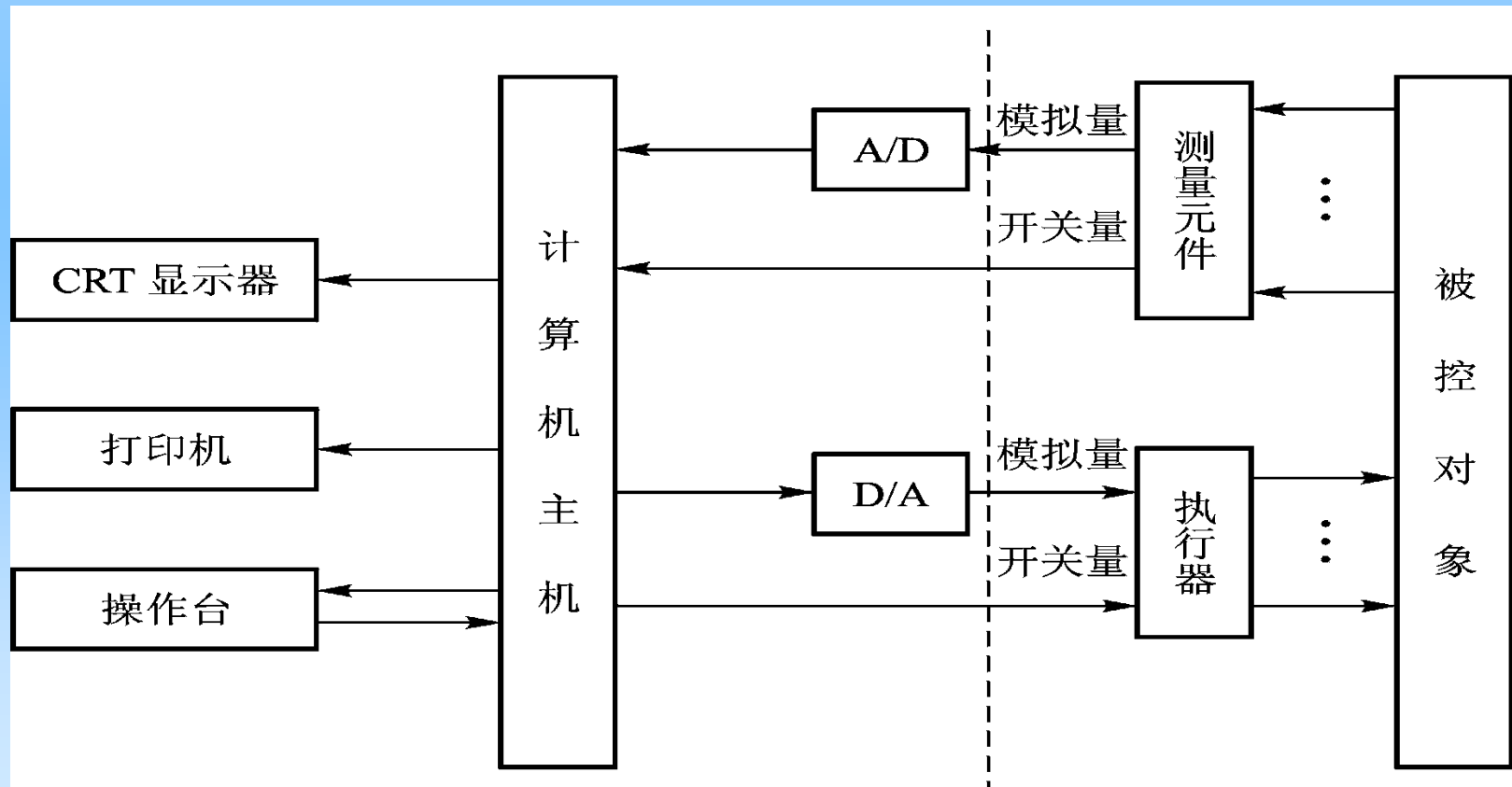
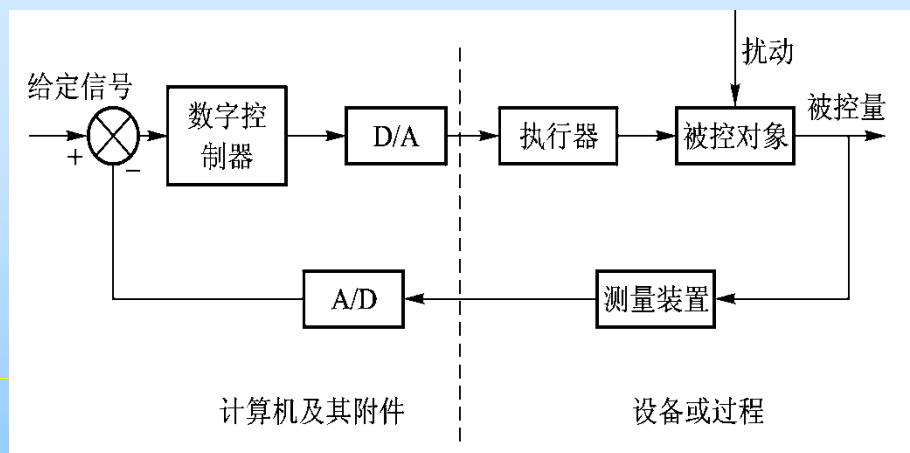


思考4-5：如用高阶保持器会得到什么样的 $y(t)$ ？



## 4.4.2 数字计算机控制

### 典型的计算机控制系统结构



# 几点说明

◆ 数字计算机控制系统是典型的离散控制系统，因此类控制系统的主要信息处理设备是数字计算机，故常称其为计算机控制系统。

## ◆ 计算机控制系统的硬件组成

- 1) 计算机主机
- 2) 输入输出设备
- 3) 人机接口设备

## ◆ 计算机控制系统的软件组成

- 1) 系统软件
- 2) 应用软件

## 4.5 控制系统中的非线性现象

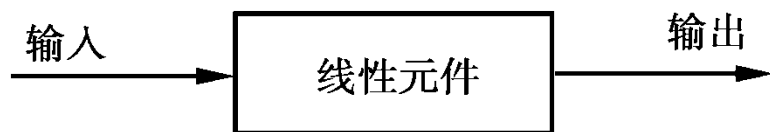
思考4-6：实际控制系统中的所有环节都呈线性特性吗？

- A. 理想的线性系统是不存在的，仅是实际系统的一种近似；
- B. 只要控制系统中存在非线性元件，则系统必是非线性的；
- C. 要**基本了解**非线性环节对控制系统性能影响的有利和不利面。

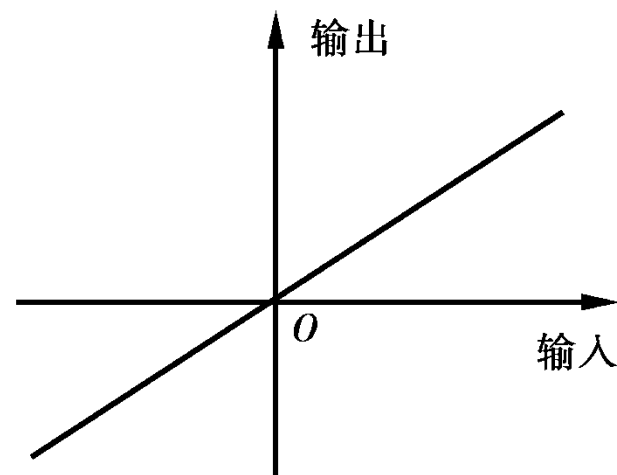
## 5.5 控制系统中的非线性现象

### A. 线性元件及其特性

如元件（环节）的**输入/输出特性满足叠加原理**，则称该元件（环节）**具线性特性**，或称该元件（环节）是线性的。



(a)

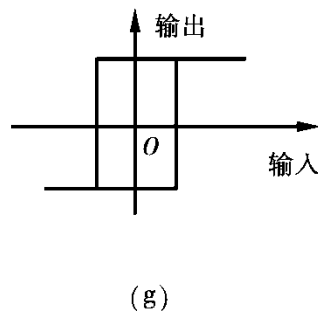
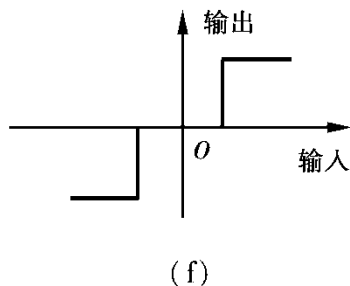
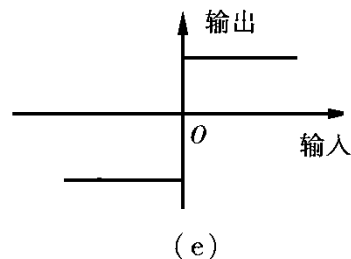
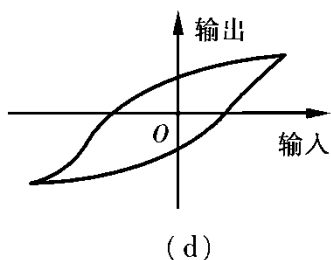
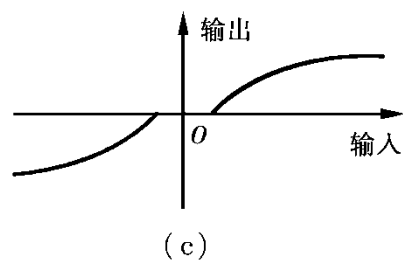
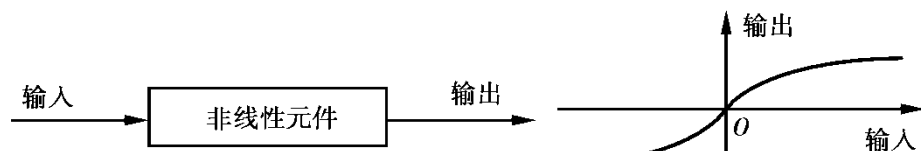


(b)

线性元件的特性 (a) 方框图; (b) 特性图

## B. 非线性元件及其特性

如元件（环节）的输入/输出特性不满足叠加原理，则称该元件（环节）具非线性特性，或称该元件（环节）是非线性的。



非线性元件特性举例：

- (a) 方框图
- (b) 饱和非线性；
- (c) 死区非线性；
- (d) 磁滞非线性；
- (e) 继电器非线性；
- (f) 带有死区的继电器非线性；
- (g) 具有磁滞的继电器非线性

## 4.5 控制系统中的非线性现象

### 4.5.1 线性与非线性控制系统

#### 线性控制系统：

如控制系统中各元件的**输入/输出特性均是线性的**，则该控制系统被称为线性控制系统，其动态过程**可以用线性微分方程或（线性）状态空间模型描述**

#### 非线性控制系统：

如控制系统中有一个或一个以上元件的**输入/输出特性是非线性的**，则该控制系统被称为非线性控制系统，其动态过程就要**用非线性方程来描述**。

## 4.5 控制系统中的非线性现象

### 4.5.2 非线性特性元件对控制系统的影响

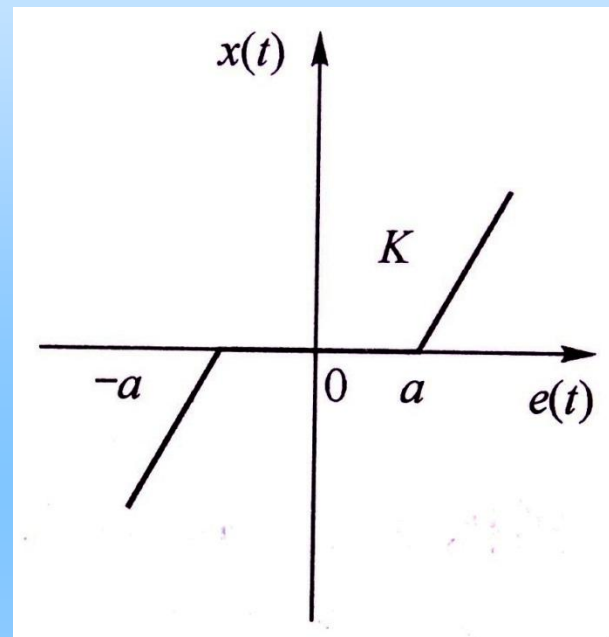
- 不同非线性特性元件对控制系统性能的影响是不同的；
- 要一分为二地看待不同非线性特性元件对控制系统性能的有利和不利影响；
- 有时，人们会有意识地利用非线性特性元件的特性，获得特定的系统输出信号形式。

# 不同非线性特性元件对控制系统性能的影响

## ◆ 死区特性

常见于测量（如反馈）、变换、放大等元件

$$x(t) = \begin{cases} 0 & |e(t)| \leq a \\ K[e(t) - a \cdot \text{signe}(t)] & |e(t)| > a \end{cases}$$



1-0过程：当输入的绝对值小于等于a时，无输出。

缺点：（1）会导致系统产生稳态误差；（2）会导致系统输出滞后输入。

优点：可抑制输入端的小扰动信号，对提高系统的抗干扰能力有积极作用

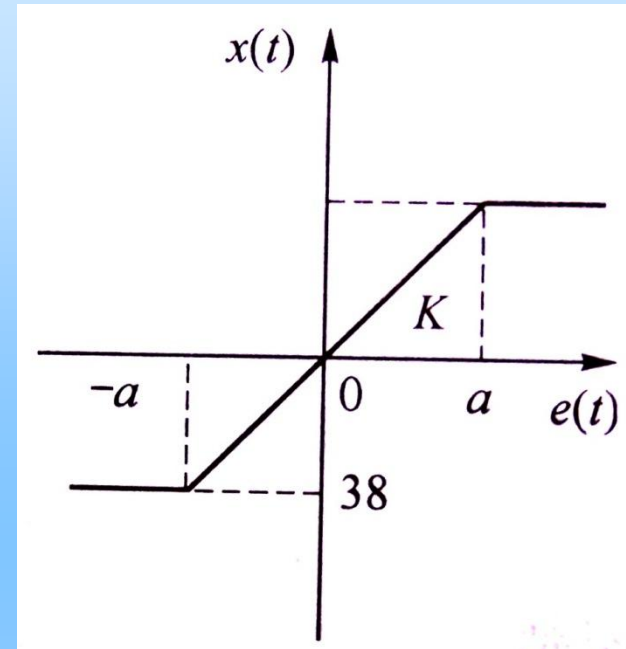


# 不同非线性特性元件对控制系统性能的影响

## ◆ 饱和特性

常见于反馈、放大、执行等元件

$$x(t) = \begin{cases} ke(t) & |e(t)| \leq a \\ K \cdot a \cdot \text{signe}(t) & |e(t)| > a \end{cases}$$



I-O过程：当输入绝对值大于等于a时，输出保持不变。

缺点：进入饱和时系统等效开环增益下降，导致过渡时间增加和稳态误差增大，甚至会使系统丧失闭环控制作用！

优点：可抑制系统的振荡（但可能出现等幅振荡）；

可保护元件正常工作等。

## 4.5 控制系统中的非线性现象

### 4.5.3 非线性控制系统的典型特征

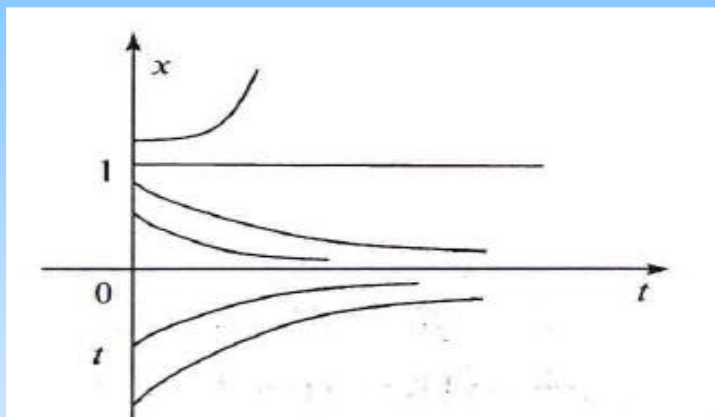
- **稳定性** 不仅与系统的结构和参数有关，而且与运动的初始条件、输入信号有直接关系。

对于非线性系统，不存在系统是否稳定的笼统概念，必须针对系统某一具体的运动状态，才能讨论其是否稳定的问题。

$$\dot{x} = -x + x^2 = -x(1 - x)$$

设 $t=0$ 时，系统的初始条件为 $x_0$ ，可以求得上述微分方程的解为：

$$x(t) = \frac{x_0 e^{-t}}{1 - x_0 + x_0 e^{-t}}$$



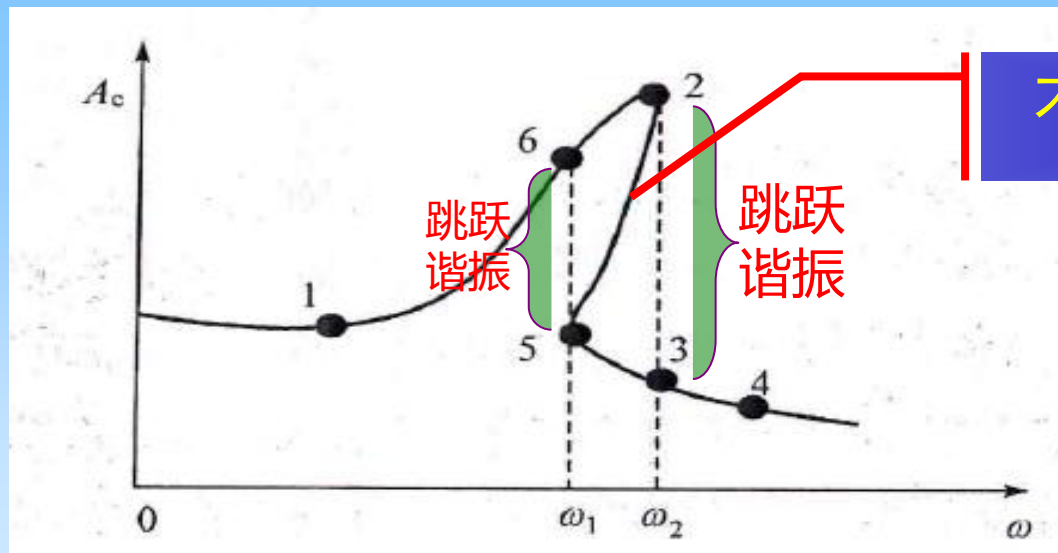
几个平衡态？

几个稳定态？

## 4.5 控制系统中的非线性现象

### 4.5.3 非线性控制系统的典型特征

- **自持振荡**——系统在没有外界周期变化信号的作用下，系统中就能产生具有固定振幅和频率的稳定周期运动。
- **对正弦信号的响应**——非线性系统输出的幅值 $A_c$ 与 $\omega$ 的关系可能会发生跳跃谐振和多值响应。



不稳定振荡

## 小 结

- 控制的目的是要求系统状态向期望状态转移，而要实现这种转移则必须采用适当的控制方式。在自动控制系统中，有前（顺）馈控制（开环控制）、反馈控制（闭环控制）和复合控制三种基本的控制方式。
- 根据系统响应的参据量的特点，自动控制系统可分为恒值控制、随动控制和程序控制三种基本类型。每种类型下的系统各有其分析和设计的重点话题。
- 根据系统中采集、传输、处理和使用诸环节信号的特性，自动控制系统可以分为连续控制系统和离散控制系统。
- 正确认识非线性特性元件对控制系统带来的有利和不利影响。