

# 计算机控制技术

清华大学精密仪器系 朱 荣

## 课程安排:

- ◆ 学习方式: 课堂学习, 课后自主学习, 课程设计
- ◆ 学习内容: 课堂知识 (电子课件, 网络学堂下载)  
参考书籍 (见后), 习题, 文献调研
- ◆ 考试形式: 期中考试, 期末考查 — 课程设计
- ◆ 联系方式:

朱荣老师, [zr\\_gloria@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:zr_gloria@mail.tsinghua.edu.cn)

王亮齐 (助教), [wlq17@mails.tsinghua.edu.cn](mailto:wlq17@mails.tsinghua.edu.cn)

袁锦烽 (助教), [1441984058@qq.com](mailto:1441984058@qq.com)

## 参考书籍

计算机控制系统 何克忠,李伟编著, 清华大学出版社

计算机控制系统 高金源、夏洁编著, 清华大学出版社

计算机控制系统: 理论与设计 奥斯特隆姆,威顿马克著;周兆英等译, 高等教育出版社

.....

# 课程章节的安排

第一章：概论

模型和分析方法

第二章：线性离散系统的输入输出模型

第三章：状态空间模型

第四章：系统辨识和参数估计（第八章后讲授）

第五章：线性离散系统的分析

控制器设计和实现

第六章：连续控制器的模拟化设计方法

第七章：基于输入输出模型的设计方法

第八章：基于状态空间模型的设计方法

课程实践：课程设计

案例和实践

# 第一章 概 论

计算机控制系统(**Computer Control System**, 简称**CCS**)是应用计算机参与控制并借助一些辅助部件与被控对象相联系, 以获得一定**控制目的**而构成的系统。**控制目的**可以是使被控对象的状态或运动过程达到某种要求, 也可以是达到某种最优化目标。

计算机通常指数字计算机, 可以采用各种类型, 如微型、大型的通用或专用计算机。

辅助部件主要指输入输出接口、检测传感装置和执行装置等。与被控对象的联系和部件间的联系, 可以用有线方式进行联系; 也可以用无线方式进行联系。

被控对象的范围很广, 包括各行各业的生产过程、机械装置、交通工具、机器人、实验装置、仪器仪表、家庭生活设施、家用电器和儿童玩具等。

**计算机控制系统**是以**自动控制理论**（经典模拟控制）与**计算机技术**相结合而成。

**与经典模拟控制的区别**：利用计算机代替常规的模拟控制器，使计算机成为控制系统的一个组成部分，因而系统中信号为数字离散的。

**优点**：计算机控制系统的控制规律由计算机来实现，可以实现模拟控制方法难以实现的更为复杂的控制规律，可以避免模拟电路实现的许多困难，而且便于更换和改进。

**缺点**：量化误差、受采样频率影响控制带宽窄、速度低、离散特性可能影响稳定性。

# 提 纲

1.1 计算机控制的发展和应用

1.2 计算机控制系统分类

1.3 计算机控制系统组成

1.4 控制系统的信号处理和传递

1.5 计算机控制系统的分析方法

# 1.1 计算机控制的发展概况

- 计算机控制理论以**经典控制理论**（1868年）、**现代控制理论**（1955）、**智能控制理论**（1965）为基础；
- 计算机控制技术（1955年）是伴随着**计算机技术**（1946年）和**网络技术**（1969年）的发展而发展起来的；
- 计算机控制的发展和应用非常迅速，已深入到各行各业，并逐渐走向**智能化**、**网络化**和**综合化**。



# 计算机控制系统的发展过程

- 开创期 ≈ 1955年
- 直接式数字控制期 ≈ 1962年
- 小型计算机控制期 ≈ 1967年
- 微型计算机控制期 ≈ 1972年
- 数字控制普遍应用期 ≈ 1980年
- 集散型控制期 ≈ 1990年
- 现场总线网络控制期 ≈ 2000年
- 无线网络控制期 ≈ 2010年
- 人工智能控制期 ≈ 2019年

特点：大、笨重、昂贵、不可靠

特点：小、轻巧、价廉、灵活、高可靠性、智能化

计算机控制发展趋势：网络化、智能化、综合化

# 计算机控制理论发展中的主要思想

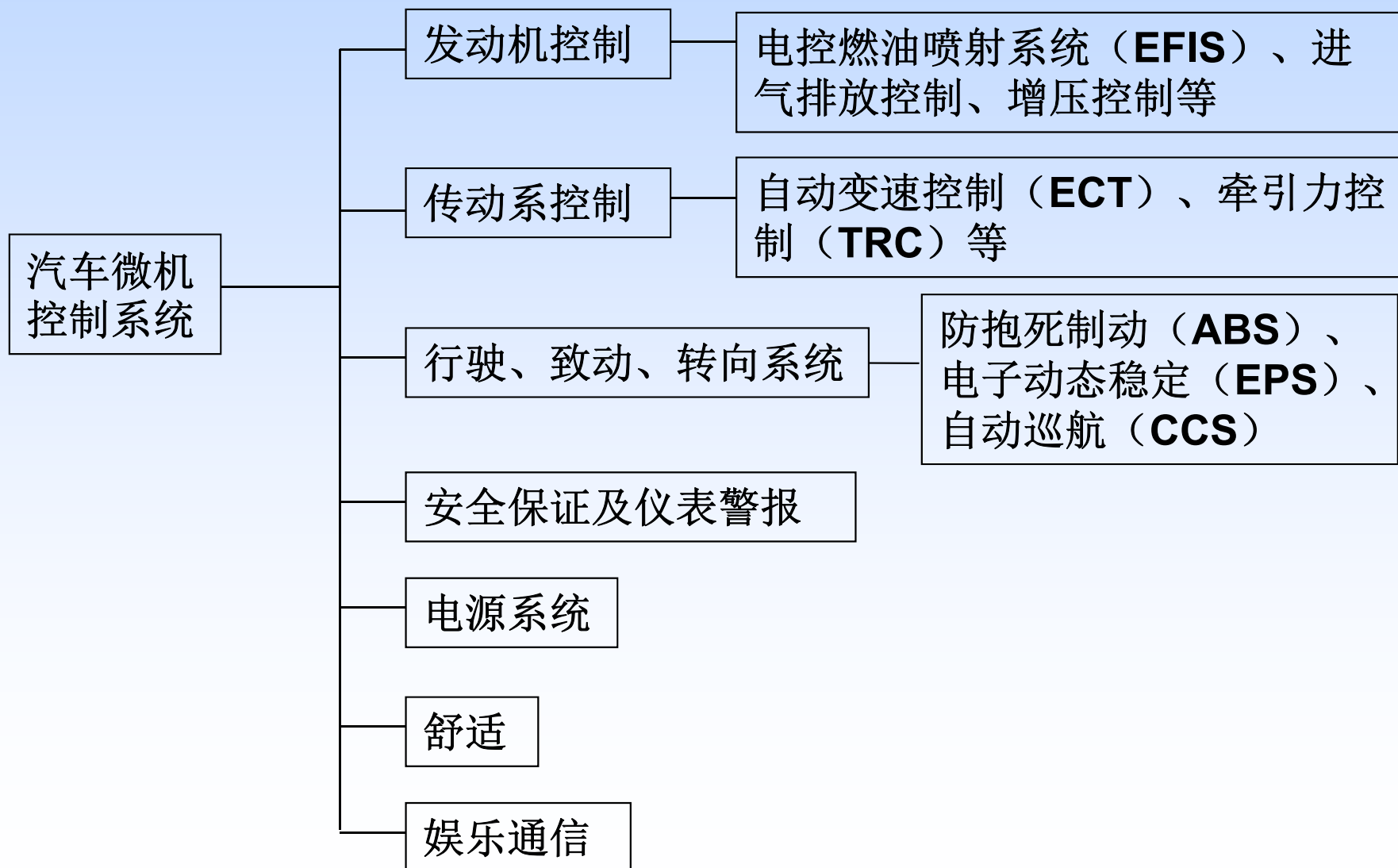
- 采样定理（1949）
- 差分方程（1948）
- 变换方程（1952）
- 状态空间理论（1958）
- 最优控制与随机控制（1957）
- 代数系统理论（1969）
- 系统辨识、智能控制（1971）
- 自适应控制（1973）

# 计算机控制系统的应用

- 应用领域广泛
- 应用形式多样
- 重要应用：
  - 工业自动化
  - 汽车
  - 船舶
  - 飞行器、航天器
  - 等等

# 应用举例1 — 汽车应用

汽车微机控制系统是计算机控制技术的应用。

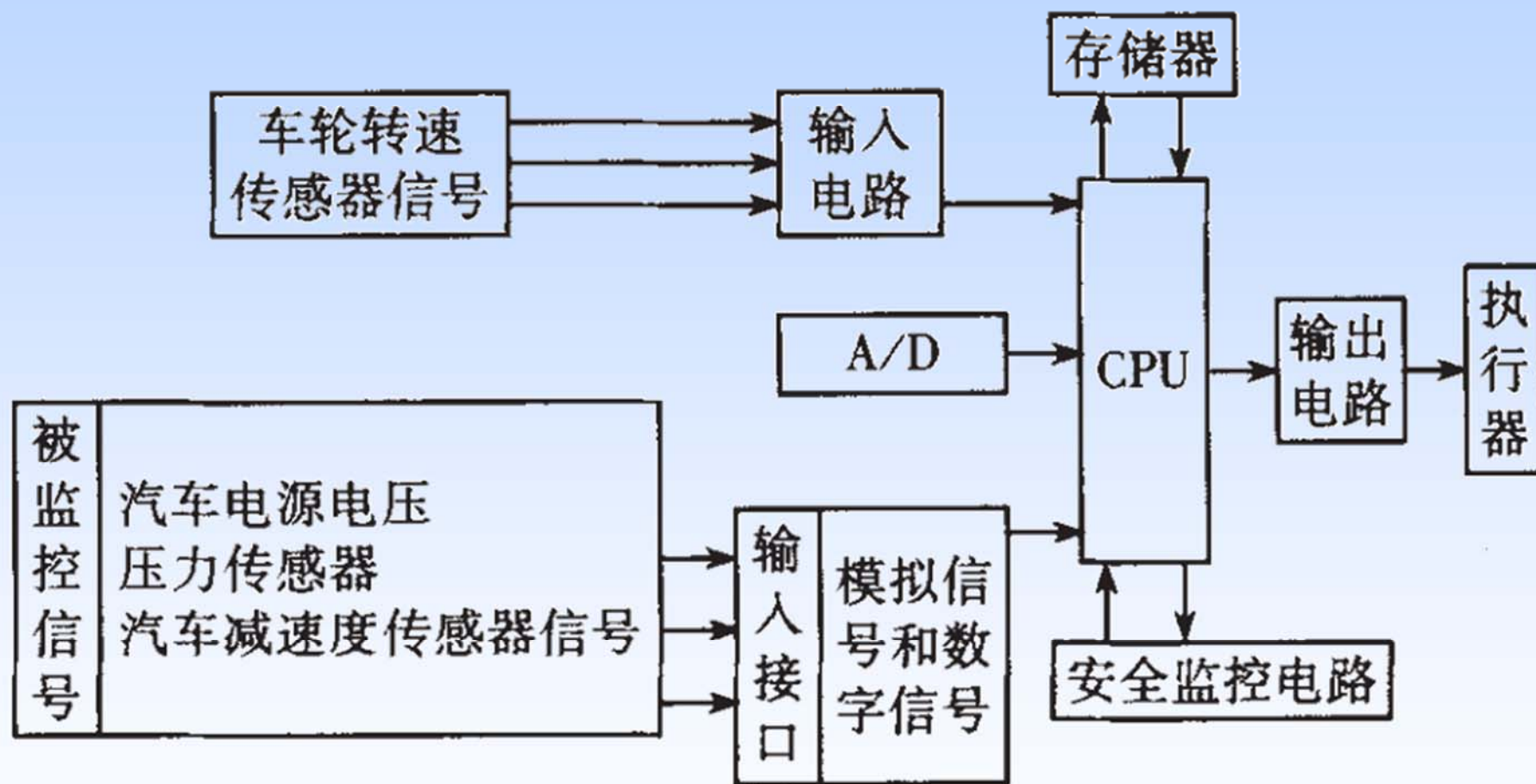


抱死：制动器将轮胎夹紧，轮胎对于制动器没有相对运动。换句话说，也就是轮胎不转了，车身仍在路面滑动，汽车失控了



**ABS和抱死的区别**

# ABS系统——防抱死系统



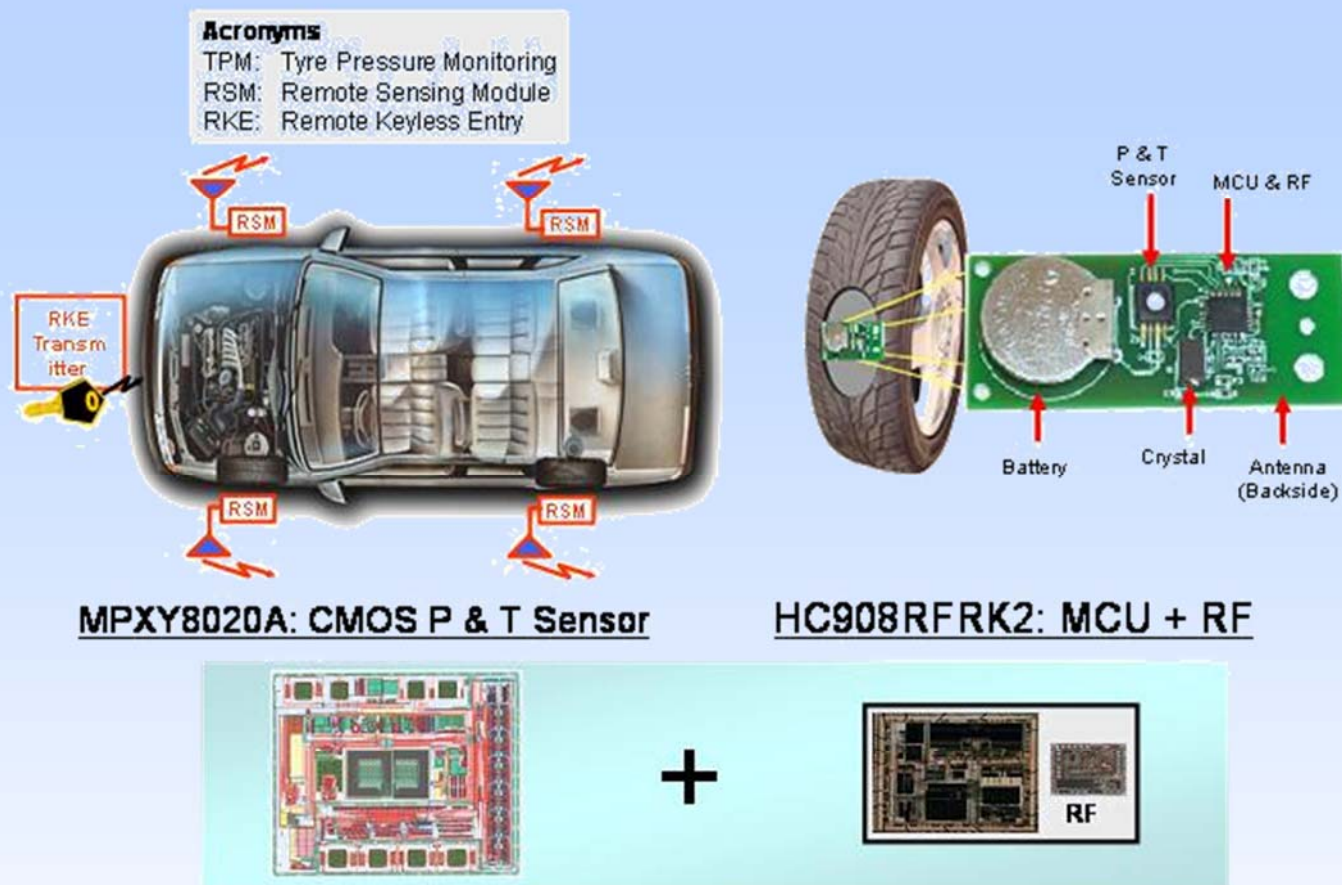
汽车的制动力取决于摩擦力，ABS系统的功能：即在车轮将要抱死时，通过计算机控制，降低制动力，而当车轮不会抱死时又增加制动力，如此反复动作，使制动效果最佳。

## EPS (电动助力转向 Electrically Powered Steering )



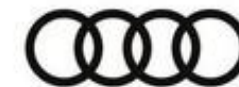
- EPS可以监控汽车行驶状态，并自动向一个或多个车轮施加制动力，以保持车子在正常的车道上运行。
- EPS一般需要安装转向传感器、车轮传感器、侧滑传感器、横向加速度传感器等。





**轮胎压力调节系统**——轮胎内部的传感器模块包括压力和温度传感器，微控制单元，RF输出，以及一个电池。该模块放置在每个轮胎中。同时使用了一个中央接收器，接受每个轮胎发出的信号，通过CAN总线为显示器提供信息。

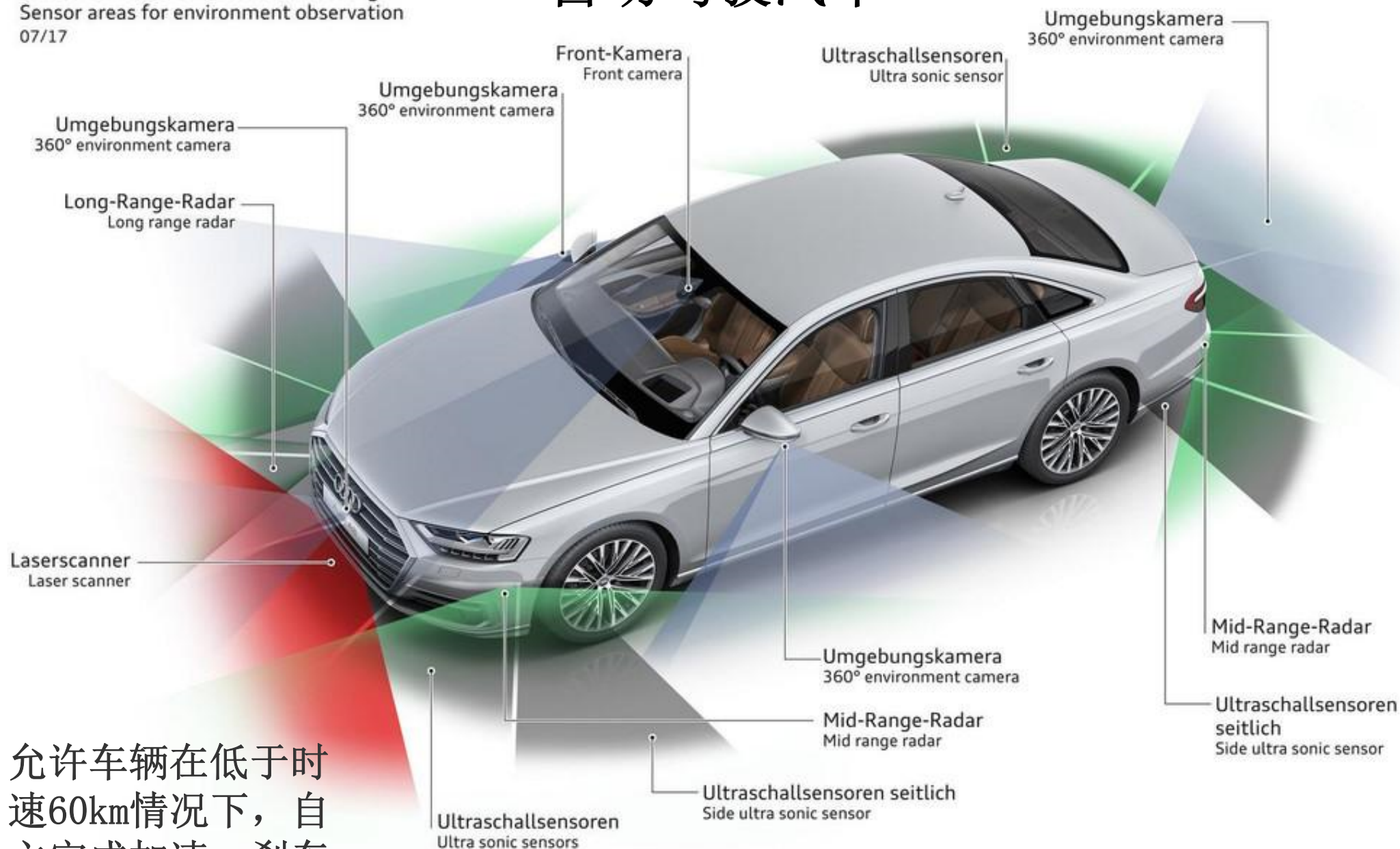




# Audi A8

Sensorfelder der Umfeldüberwachung  
Sensor areas for environment observation  
07/17

## 自动驾驶汽车



允许车辆在低于时  
速60km情况下，自  
主完成加速、刹车、  
转向等驾驶操作



# 应用举例2 — 机器人应用

What is MURATA BOY made of?

## Get to know MURATA BOY

MURATA BOY's body is filled with high performance electronic components. Let's look at each of them.

Two eyes to recognize obstacles

### Ultrasonic sensors

The right sensor transmits ultrasound and the left sensor receives ultrasound reflected from an obstacle. He calculates the distance from an obstacle based on the time gap between transmission and reception.



Detecting slants and turning motions

### Gyro sensor

The gyro sensor detects minute slanting angles or turning motions of the body. When it detects a slant, a disc inside his chest rotates to maintain his balance. The gyro sensor can also help MURATA BOY calculate his own current position.



Detecting impacts to the body

### Shock sensor

The shock sensor detects impacts to the body caused by bumps and unevenness in the road and sends signals to the control circuit.



New material suitable for lenses

### LUMICERA®

The lens for the eye camera is made of an amazing new transparent ceramic with a refraction factor higher than glass.



Wireless music transmission

### Bluetooth® module

It is possible to link wirelessly with PCs and cellular phones to transmit operating signals and sensor data. Music can also be transmitted.



Rapid recharging and high power output

### Lithium ion rechargeable battery

The battery is housed in the backpack and makes rapid recharging and high power output possible for MURATA BOY.



Supplying stable power to the body

### DC-DC converter

Voltage is converted precisely to supply stable current to the various circuits in MURATA BOY.



High quality sound from an ultra thin speaker

### Thin flat speaker

The bicycle is equipped with a speaker. In spite of its mere 1mm thickness, the speaker outputs very high quality sound.



\* In addition to the components above, MURATA BOY features many of Murata's electronic components such as "Chip Monolithic Ceramic Capacitor", "Ceramic Resonator (CERALOCK®)", "NTC Thermistor", "Trimmer Potentiometer", and "EMI Suppression Filter (EMIFIL®)".

# Murata Boy主要控制单元及传感器:

- 前向控制 — 超声传感器、视觉传感器
- 转向控制 — 陀螺和振动传感器
- 倾斜和稳定控制 — 陀螺和振动传感器

- Murata Boy, 由计算机控制系统, 可按照预设线路自主行驶。利用传感器测定前进方向, 通过通信模块与控制计算机之间进行数据交换, 从而实现准确行驶。
- 在遇到前方障碍物时, 机器人既可以转向绕行, 也可以根据指令进行刹车。先进的传感器技术和控制技术是实现功能的关键。

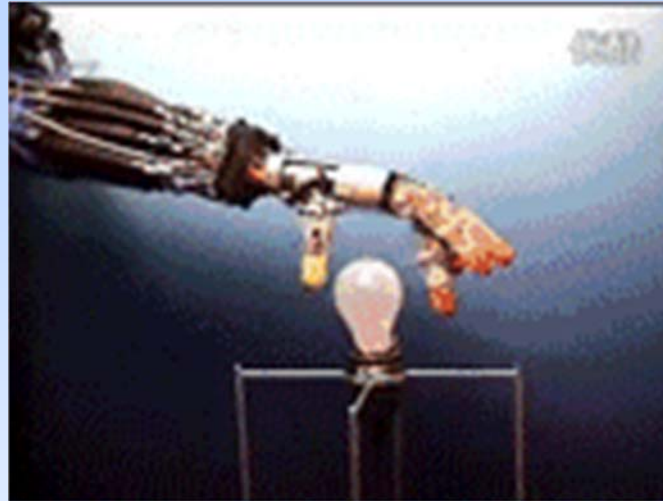




# Boston Dynamics



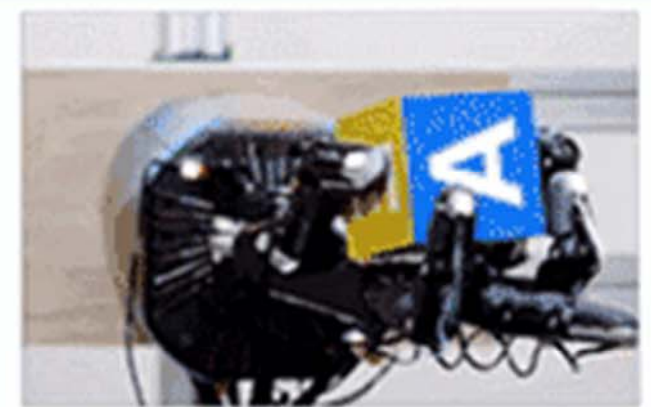
# 智能机械手



**FINGER PIVOTING**



**SLIDING**



**FINGER GAITING**

## 应用举例3：四旋翼飞行器/直升机（Quadrotor, Four-rotor, 4 rotors helicopter, X4-flyer）



【螺旋桨及电机】 十字交叉的4个螺旋桨，相对的为一组

【陀螺仪】 3个方向的陀螺仪

【加速度传感器】 3轴加速度传感器

【机身及机载系统】 电控模块及其他传感模块



## 👉 瑞士苏黎世联邦理工学院ETH 2011~2013



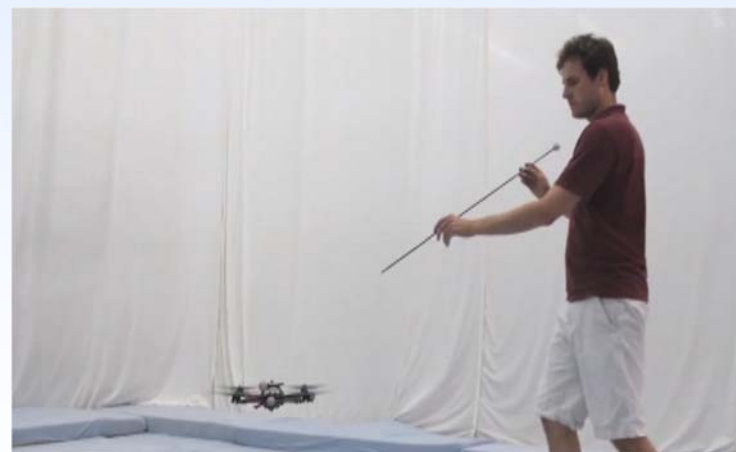
👉 手势控制 2X



👉 接抛球 2X



👉 稳定竹竿



👉 轨迹学习



# 1.2 计算机控制系统分类

## 1、以控制方式来分类

- 计算机开环控制

系统输出对被控对象行使控制，但控制结果（即被控对象的状态）不影响计算机控制系统，计算机、控制器、生产过程等环节没有构成闭合环路。

- 计算机闭环控制（反馈控制）

计算机对被控对象进行控制时，对象状态能直接影响计算机控制系统。在系统中，控制部件（执行器）按控制器发出的控制信息对运行设备（被控对象）进行控制，另一方面运行设备的运行状态作为输出，由检测部件测出后，作为输入反馈给控制计算机；从而使控制计算机、控制部件、生产过程、检测部件构成一个闭环回路。

- **在线控制（联机控制）**

计算机对被控对象或被控生产过程行使直接控制，不需要人工干预。

- **离线控制**

控制计算机没有直接参与控制对象或受控生产过程，它只完成被控对象或被控过程的状态检测，并对检测数据进行处理，而后制定出控制方案，输出控制指示，操作人员参考控制指示，人工手动操作使控制部件对被控对象或被控过程进行控制。

- **实时控制系统**

被控制的对象或被控过程，每当请求处理或请求控制时，控制器能及时处理并进行控制的系统。一个在线系统并不一定是实时系统，但是一个实时系统必是一个在线系统。

## 2、以系统结构来分类

- 直接数字控制系统（**DDC**）

由控制计算机取代常规的模拟调节仪表而直接对生产过程进行控制。控制信号通过输入/输出通道中的数/模(D/A)转换器将计算机输出的数字控制量转换成模拟量，来控制被控对象；对象的模拟状态量也要经输入/输出通道的模/数(A/D)转换器转换成数字量进入计算机。

- 计算机监督控制系统（**SCC**）

针对某一种生产过程，依据生产过程的各种状态，按生产过程的数学模型预测和估计出生产设备应运行的最佳给定值，并将最佳值自动地对**DDC**执行级的计算机或对模拟调节仪表进行**调正或设定控制的目标值**，由**DDC**或调节仪表对生产过程各个点(运行设备)行使控制。系统中包括**预测**和**控制**两个过程。

- **多级控制系统（MCS）**

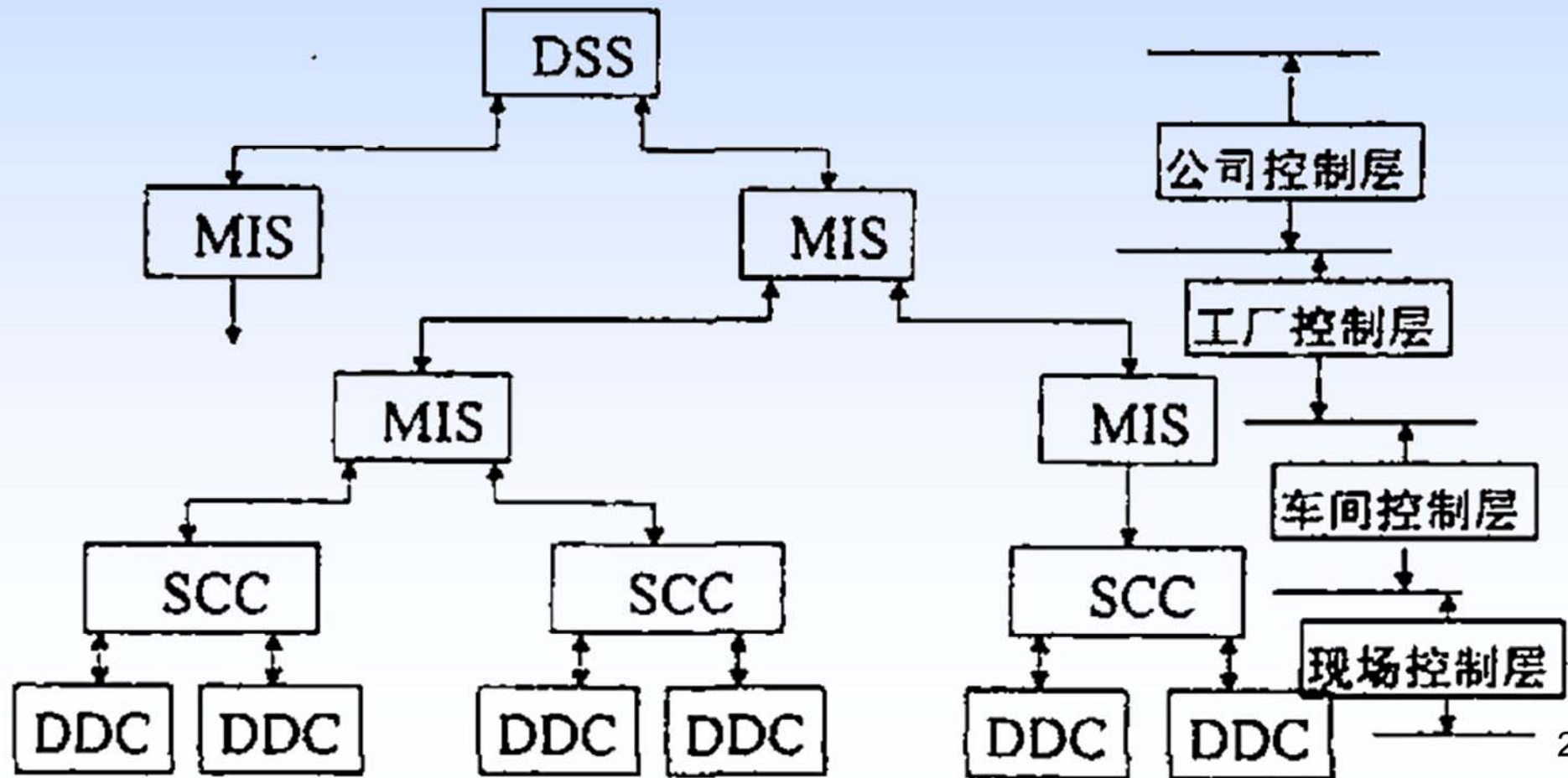
在现代生产企业中，不仅需要解决生产过程在线控制问题，而且还要求解决生产管理问题，每日生产品种、数量的计划调度以及月季计划安排，制定长远规划、预报销售前景等，于是出现了多级控制系统。

DDC级主要用于直接控制生产过程，进行PID或前馈等控制；SCC级主要用于进行最佳控制或自适应控制或自学习控制计算，并指挥DDC级控制同时向MIS（管理信息系统）级汇报情况。DDC级通常用微型计算机，SCC和MIS级一般用小型计算机或高档微型计算机。

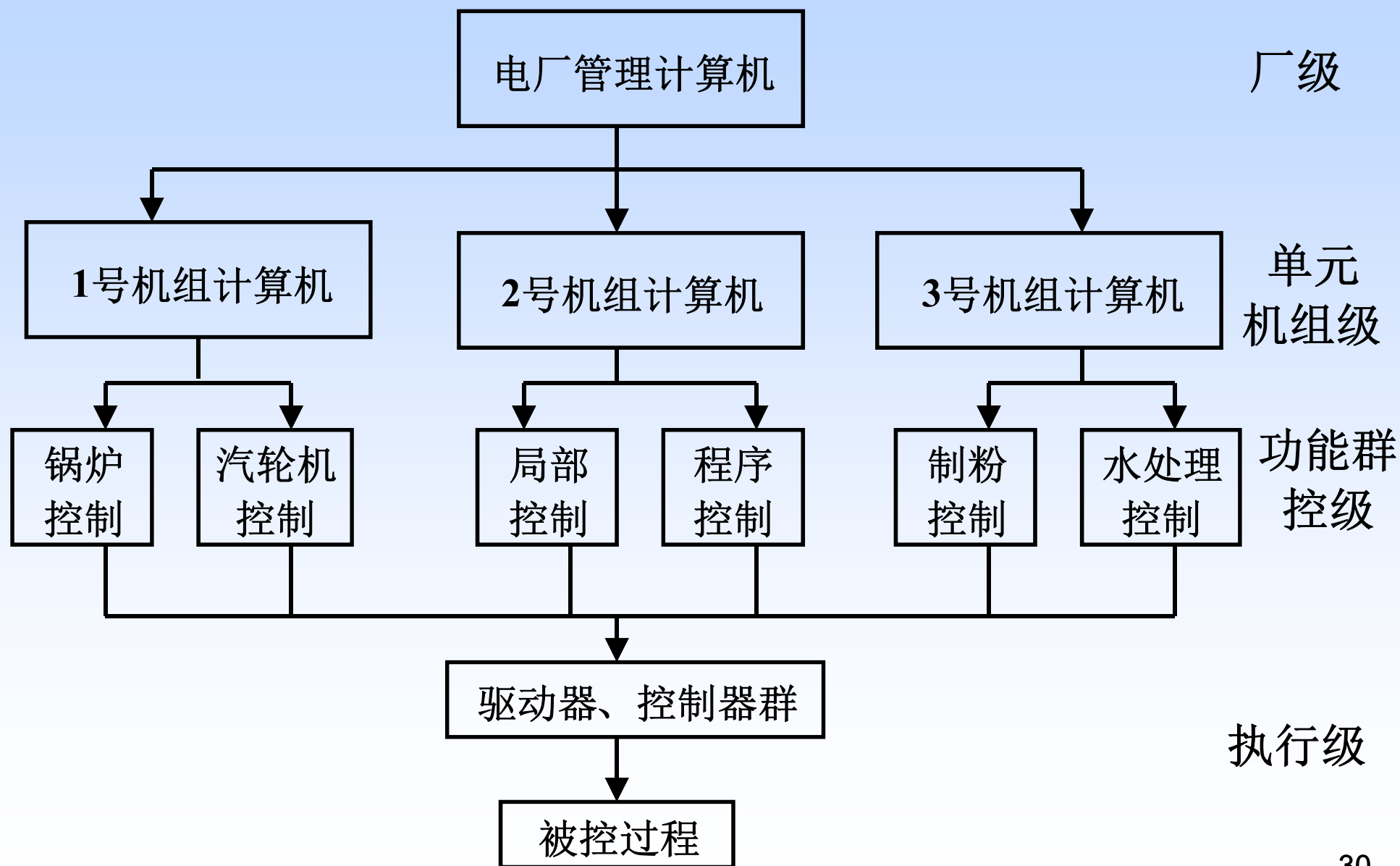
- **分布式控制或分散控制系统（DCS）**

分散控制或分布控制，是将控制系统分成若干个独立的局部控制子系统，用以完成受控生产过程自动控制任务。

**DCS**大量应用在自动化领域，将过程控制、监督控制和管理调度进一步结合起来，自下而上一般可分为过程控制级（**DDC**）、控制管理级（**SCC**，监督控制）、生产管理级（**MIS**，管理信息系统）和经营管理级（**DSS**，决策支持系统）四个层次。**DCS**是属于专用系统，开放程度不够。



# DCS在热电厂的应用



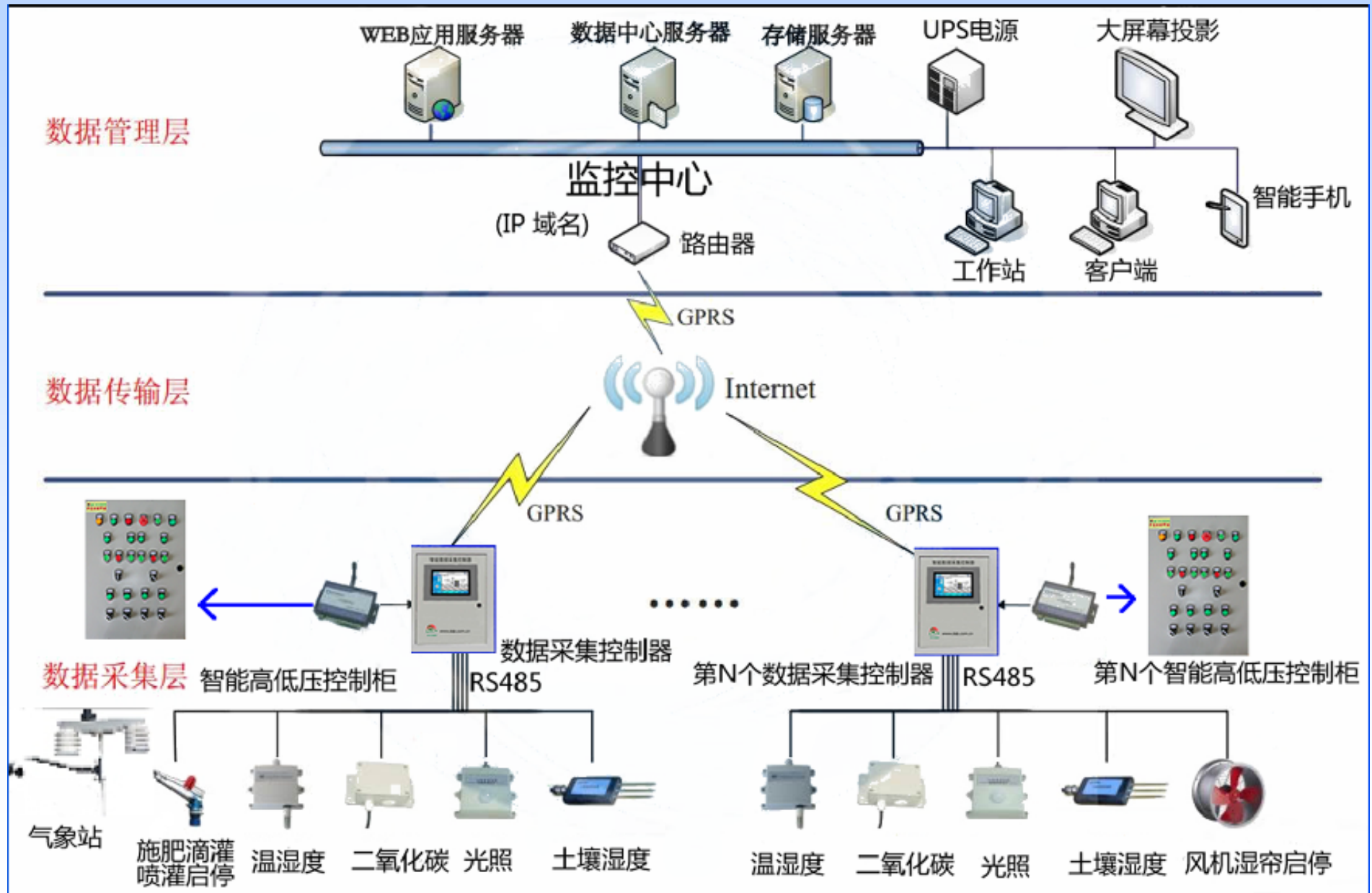


- 现场总线网络控制系统（**FCS, fieldbus control system**）

FCS为新型网络集成式全分布控制系统，它将操作站、现场智能仪表以及其它信息资源作为网络中的节点，**将原来封闭、专用的系统变成开放、标准的系统**，从过程控制走向了过程管理。现场总线是连接智能现场设备和自动化系统的数字式双向传输、多分支结构的通信网络。

现场总线系统具有以下技术特点：①系统**开放**；②**标准**统一，互可操作性与可用性；③全**数字**，现场设备的智能化与功能自治性；④系统结构的**高度分散**；⑤对现场环境的**适应性**。

# 例：物联网技术





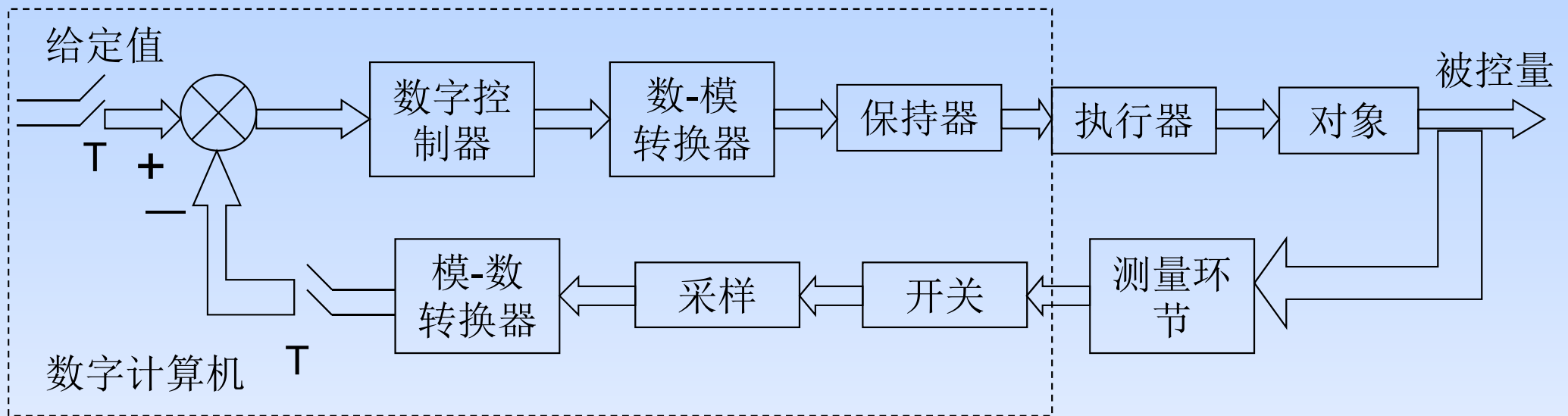
# FCS与DCS的区别

- 两者都为网络多层结构，但DCS采用专用网络，FCS使用标准的开放性网络—以太网。
- DCS可采用数字/模拟混合，FCS为全数字式系统。
- DCS采用专用的控制器（可靠性强），FCS采用标准的硬、软件平台，如PC机，可采用嵌入式PC机提高系统可靠性。

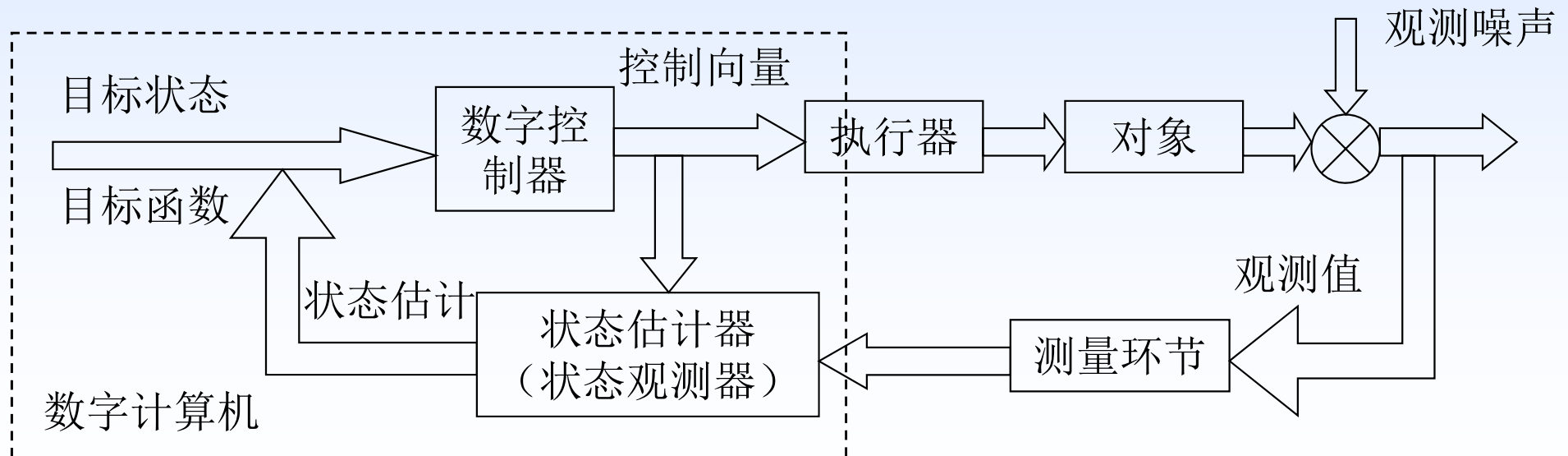
# 1.3 现代计算机控制系统主要内容

- 直接数字控制系统 (**DDC**)
- 计算机硬件技术 (**CPU**、存储、接口)
- 通信和网络技术 (信息传输、共享)
- 信息管理和处理 (分类、分析、决策等)

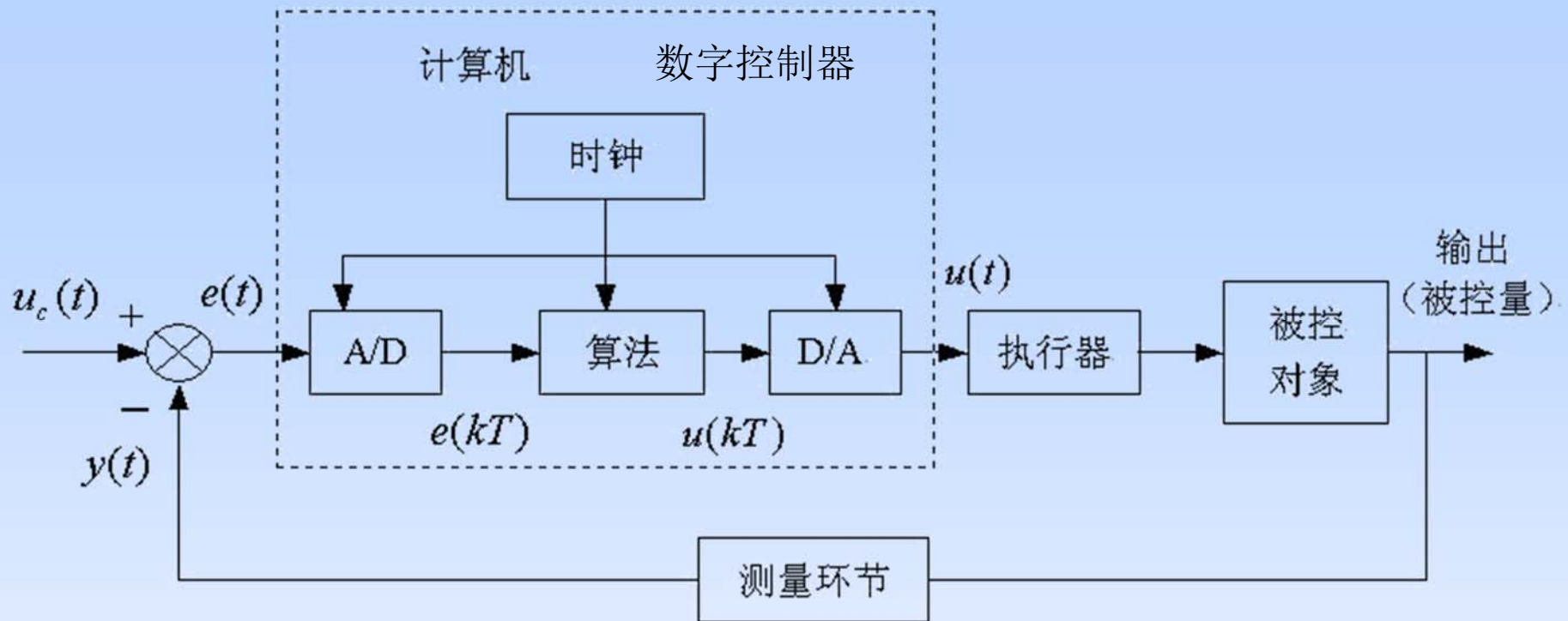
# 数字控制系统（DDC）基本组成



输出反馈数字控制系统



状态反馈数字控制系统



输出反馈数字控制系统结构框图

- 数字控制系统由**数字控制器**、**执行器**、**被控对象**、**测量环节**等组成。
- 数字控制器用计算机实现，一般由计算机核心硬件、控制算法（或称控制律，由计算机程序实现）、模-数(A/D)转换器、数-模(D/A)转换器组成。

## 1.3.1 被控对象

被控对象是指所要控制的装置或设备。被控对象用**传递函数**来表征时，其特性可以用放大系数  $K$ 、惯性时间常数  $T_n$ 、积分时间常数  $T_i$ 、滞后时间系数  $\tau$  来描述。被控对象的传递函数可以归纳为如下几类典型环节的组合：

放大环节  $G(s) = K$

惯性环节  $G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s) \cdots (1 + T_n s)}$

积分环节  $G(s) = \frac{K}{T_i s^n}$

纯滞后环节  $G(s) = e^{-\tau s}$

## 1.3.2 执行器

执行器是控制系统中的重要部件，是向被控对象提供运动动力的装置。执行器根据控制信号，改变输出的直线位移或角位移。

执行器按照采用的动力方式可以分为电动、气动、液动、热动等。

可以用传递函数来表示，多为比例或一阶或二阶惯性环节。

### 1.3.3 测量环节

测量环节由传感器和测量线路构成，它把被控参数转换成某种形式的信号（一般为电信号）。

传感器：旋转变压器，感应同步器，光电编码器，光栅传感器，电位器，加速度计，陀螺，磁场计，压力传感器，温度传感器等。

**MEMS**传感器：采用微机电技术，将传感器结构、电路等集成实现微型化系统，其体积和功耗小、可实现批量生产、成本低、易制成大规模和多模式阵列等。**MEMS**传感器是一个多学科交叉的新兴研究领域，由于其具有性能高、价格便宜、适合大批量生产等特点，正逐步替代一些传统的传感器。

## 1.3.4 数字控制器

数字控制器以计算机为核心，控制规律由编制的计算机程序来实现。输入通道包括模-数转换器(A/D)，输出通道包括数-模转换器(D/A)。

- **采样周期：**两次相邻采样之间的时间，记作 $T$

最常用的是周期性采样

- **采样时刻：**采样发生的时刻， $kT$



# 1.4 数字控制器中信号处理和传递

1.4.1 采样

1.4.2 量化 (A/D)

1.4.3 保持 (D/A)  $\longrightarrow$  数字控制器的输出

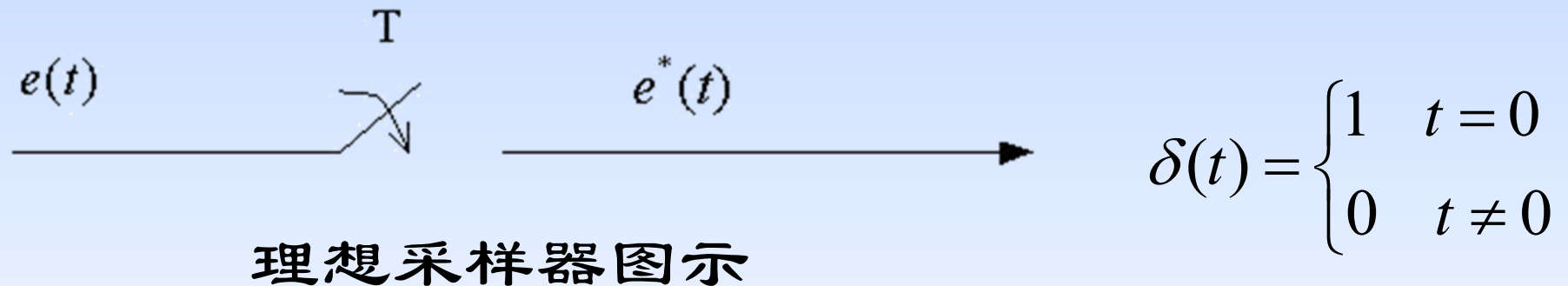
} 数字控制器的输入

常用零阶保持器 (Zero order holder ZOH)

1.4.4 控制算法

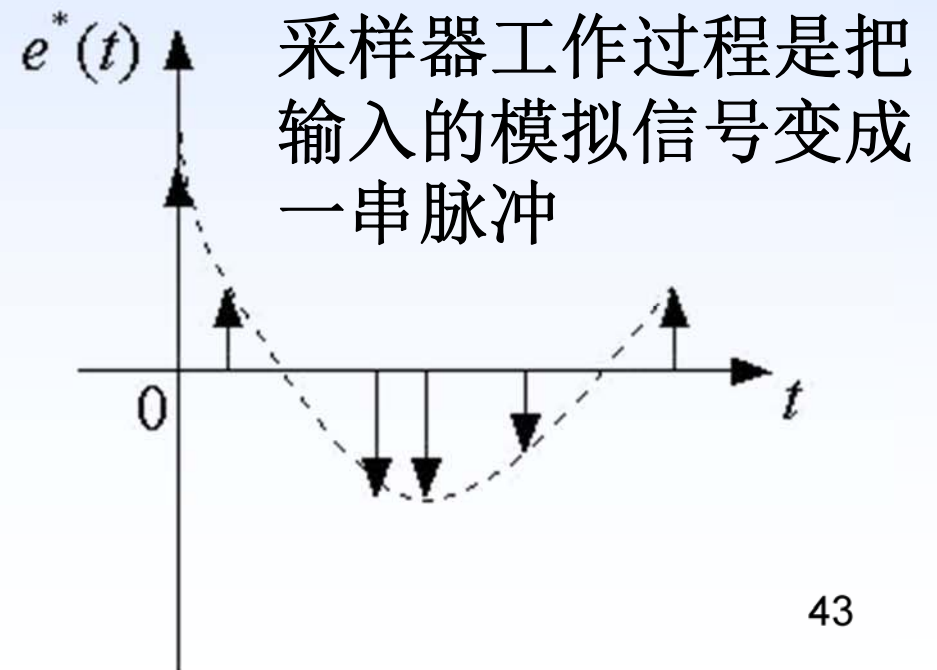
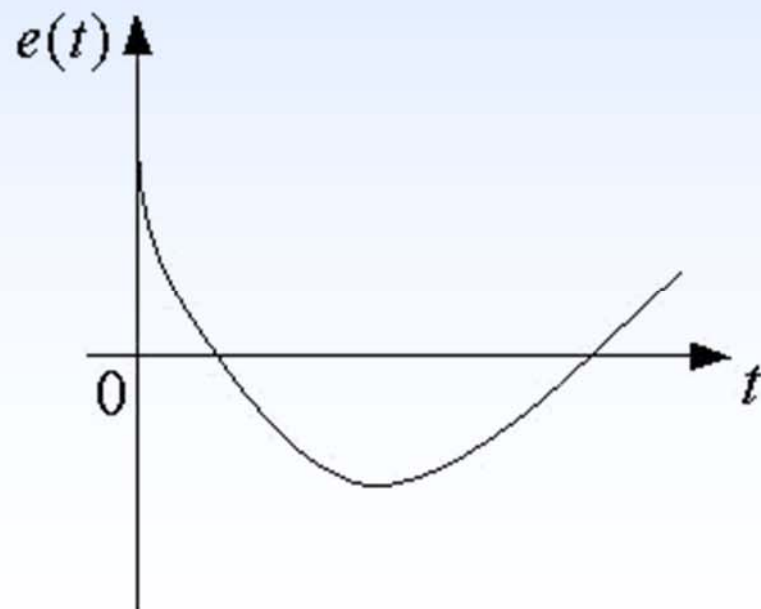
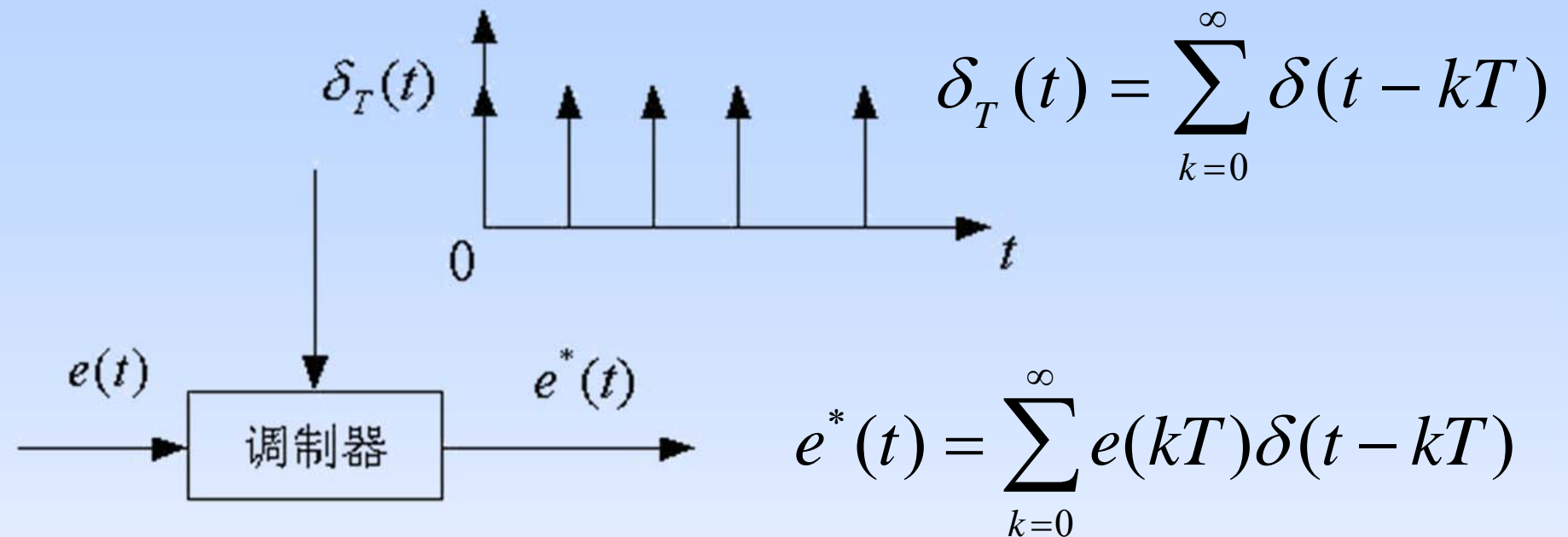
## 1.4.1 采样

- **采样**：指每隔一定的时间间隔把连续信号抽样成采样信号的过程。
- **理想采样器**：理想采样器是一种数学抽样。



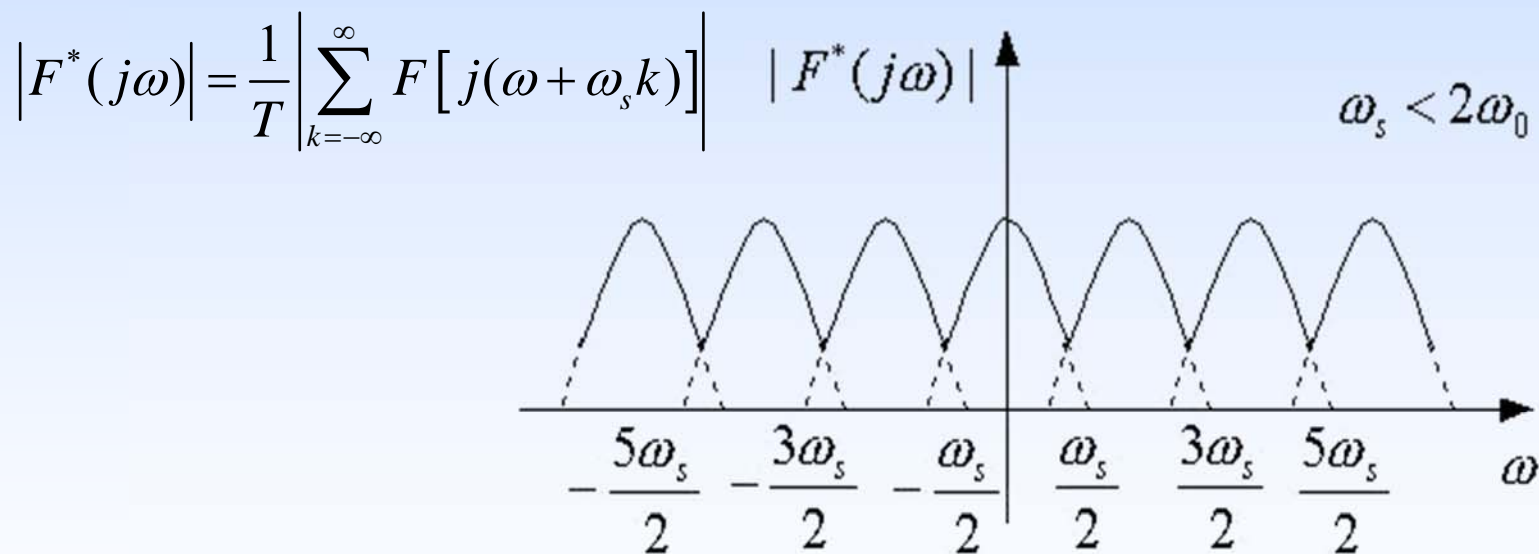
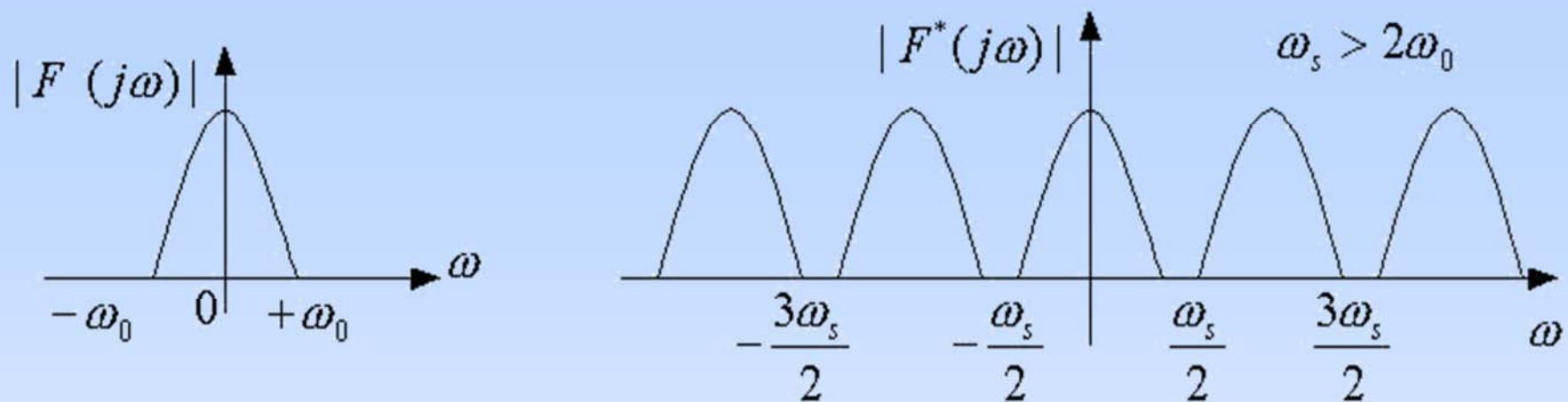
- **单位脉冲（冲激）序列**： $\delta_T(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT)$
- **采样信号**：采样信号可以看成是连续信号被采样间隔为  $T$  的冲激序列抽样得到的冲激函数序列  $e^*(t)$ ，每个冲激的间隔为  $T$ ，而冲激强度等于连续信号的抽样值  $e(kT)$ 。

# 采样示意图



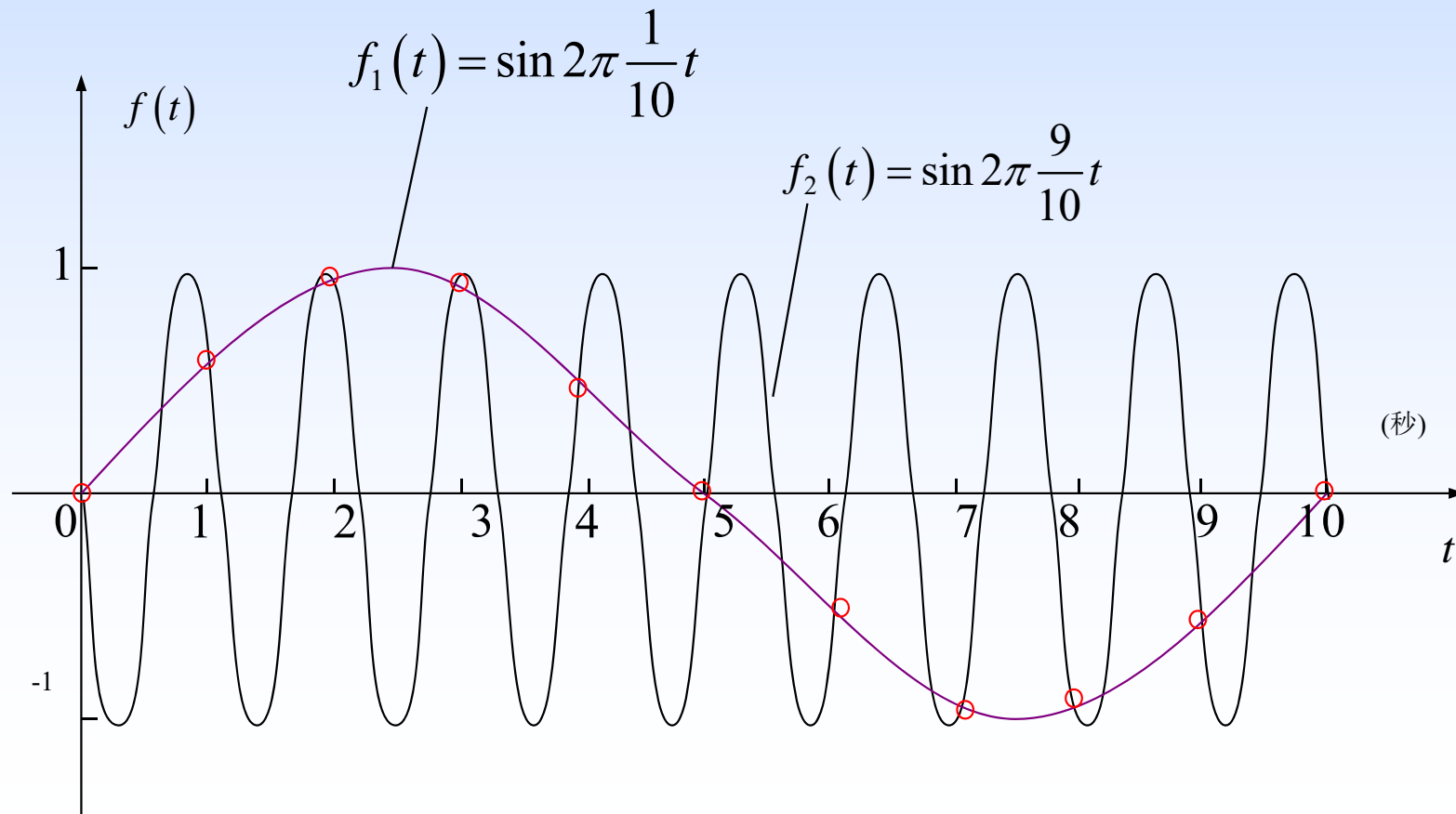
- **采样定理：**采样后的离散信号能够恢复原连续信号的条件是采样频率要高于信号中最高频率的2倍。即如果连续信号  $f(t)$  的傅里叶变换在  $(-\omega_0, \omega_0)$  以外为零，则当采样角频率  $\omega_s$  大于  $2\omega_0$  时，此信号完全可由其等周期采样点上的值唯一确定。
- 定义乃奎斯特频率：

$$\omega_N = \omega_s / 2$$

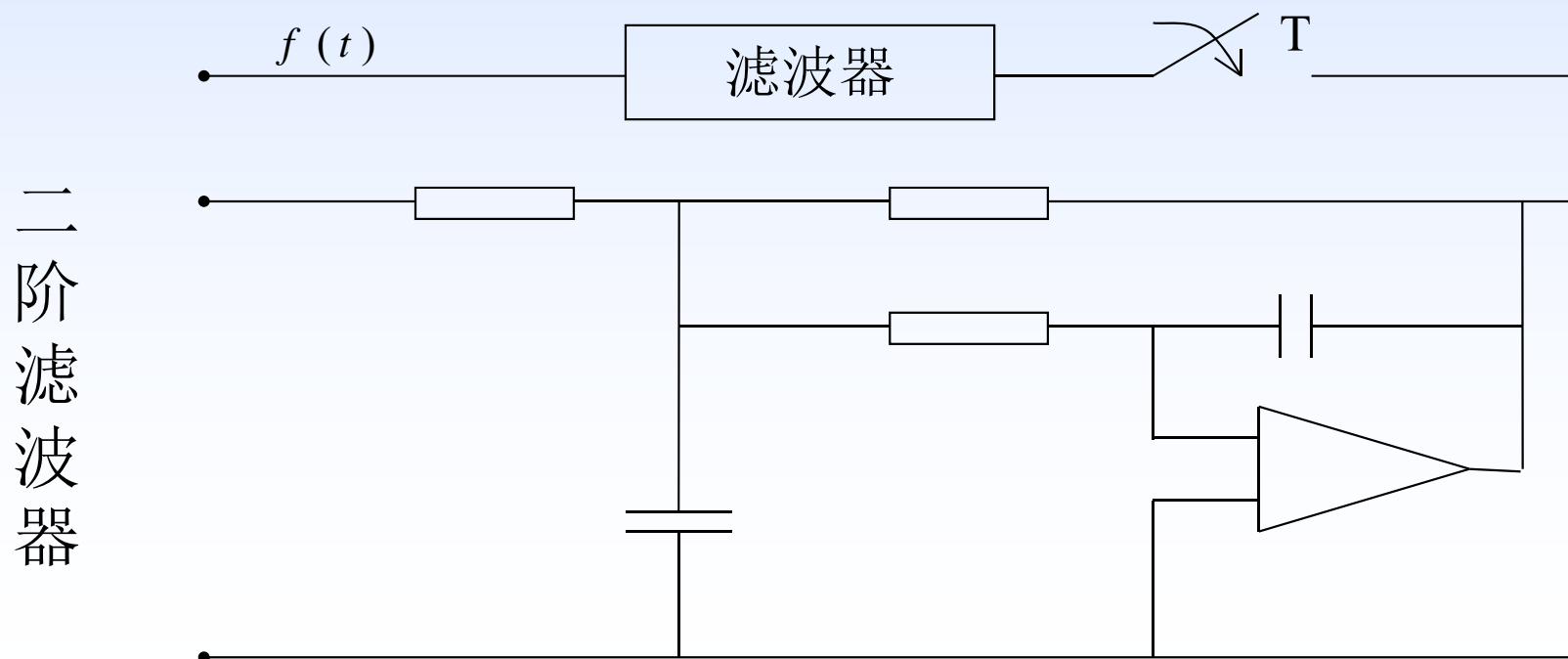


连续信号  $f(t)$  与采样信号  $f^*(t)$  的频谱

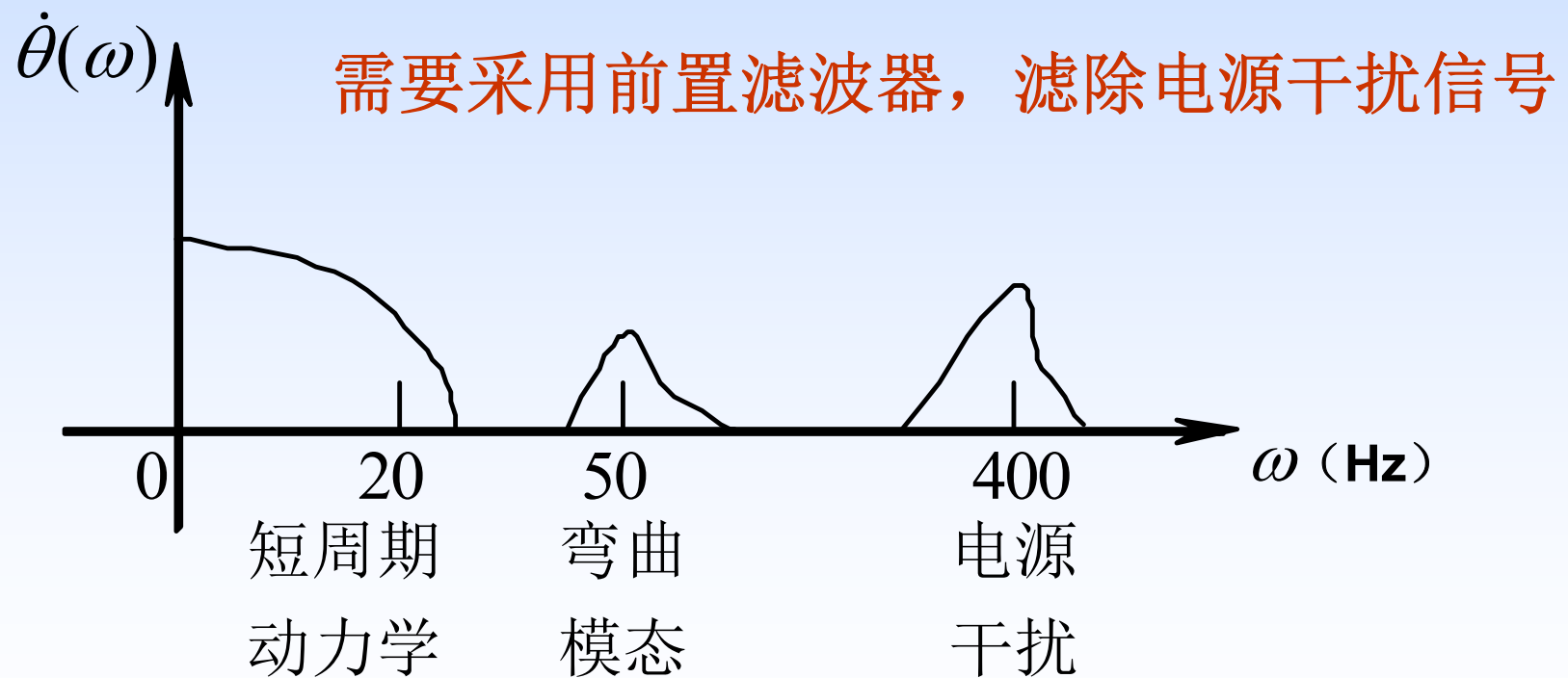
- **混叠现象**: 如果  $\frac{\omega_s}{2} < \omega_0$  , 或  $T > \frac{\pi}{\omega_0}$  , 则不能由离散信号  $f(kT)$  恢复出连续信号  $f(t)$ 。例如两个周期信号的频率分别为0.1赫兹和0.9赫兹, 如果采样频率为1赫兹, 可以看出在采样点它们具有相同的数值。从采样点的数值就不可能恢复出0.9赫兹的周期信号。



- **前置滤波**：在实际应用中，常常会遇到难以满足采样定理的情况。由于混叠效应，**连续信号被离散后其高频分量将以低频的形式出现**，而破坏了控制系统的工作。克服这个困难的一个有效办法是用**前置滤波器**，使滤波后的信号将不再包含高于乃奎斯特频率（ $\omega_N = \omega_s / 2$ ）的信号分量。



例：用一个速率陀螺来测量飞机的俯仰角速度 $\dot{\theta}$ 。实际的角速度信号中包含有各种噪声，其中较严重的是 400Hz 电源的干扰。要使 $\omega_s > 800\text{Hz}$  是不现实的，也不必要。为了能利用角速度信号控制飞机就必须把电源干扰信号滤掉，否则当采用较慢的采样速率（ $\omega_s < 800\text{Hz}$ ）时，高频干扰信号就会以低频的形式出现。



飞机俯仰角速度频率特性

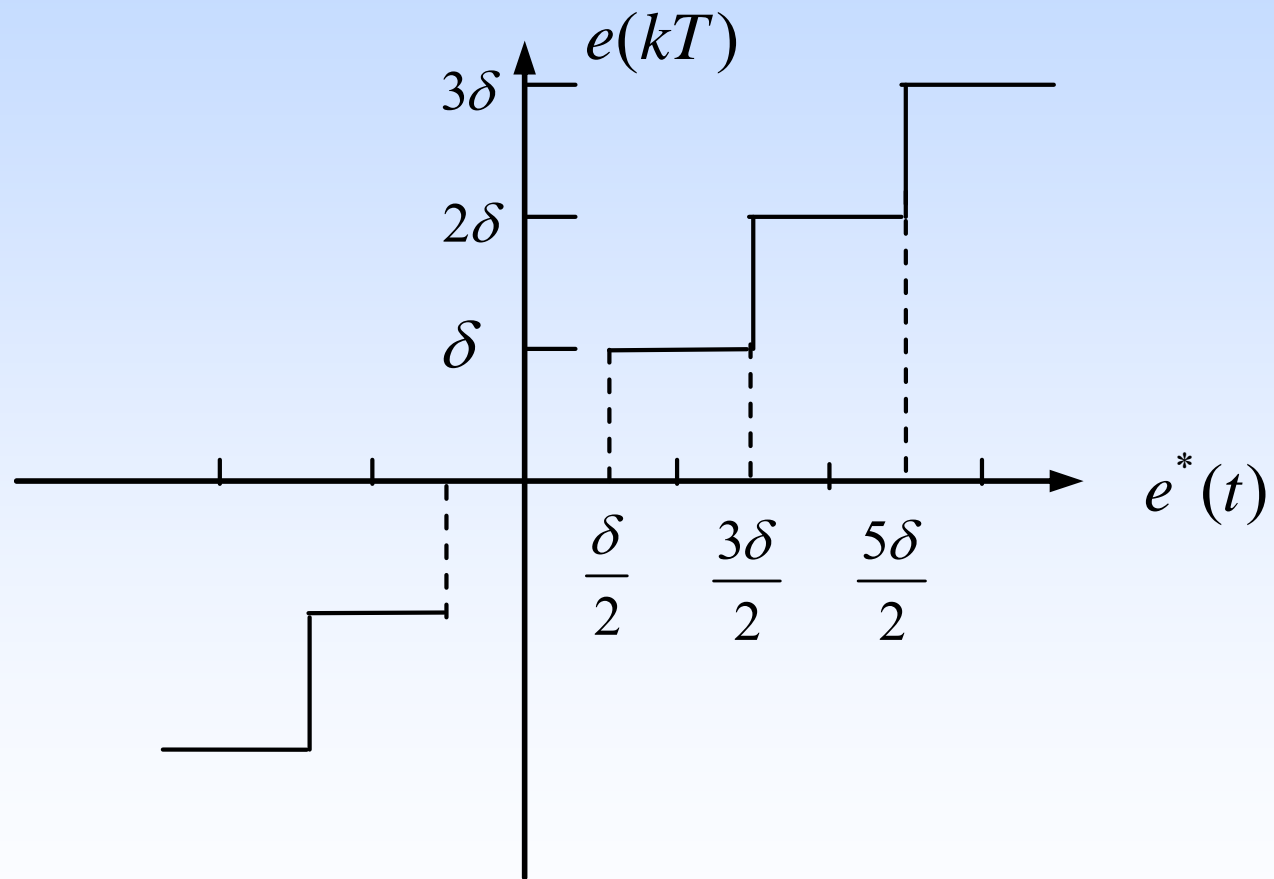


## 1.4.2 量化

- **量化**：把采样信号转变成数字信号码的过程。
- 量化精度取决于**A/D**转换器的位数  $n$ 。当位数足够多时，转换可以达到足够高的精度。
- 量化单位：

$$\delta = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2^n - 1}$$

- 其中，  $y_{\max}$ ,  $y_{\min}$  分别表示转换器输入的最大值和最小值。
- 量化误差：  $\varepsilon = \delta/2$



### 1.4.3 保持（D/A转换）

- **保持**：把采样信号转变成模拟信号的过程。
- **保持器**：实现保持作用的电路。保持器起外推器的作用，根据过去时刻的离散值，外推出采样点之间的数值。
- **零阶保持器(Zero Order Holder, ZOH)**：  
把  $kT$  时刻的信号一直保持到  $kT+T$  时刻前的瞬间，其外推公式为

$$u(kT + \Delta t) = u(kT), \quad 0 \leq \Delta t < T$$

零阶保持器的输入为：

$$u_{\lambda}(t) = \sum_{k=0}^N u(kT) \cdot \delta(t - kT) \quad \delta(t - kT) = \begin{cases} 1 & t = kT \\ 0 & t \neq kT \end{cases}$$

$$u_{\lambda}(s) = \sum_{k=0}^N u(kT) \cdot e^{-kTs}$$

相应的输出为：

$$1(t - kT) = \begin{cases} 1 & t \geq kT \\ 0 & t < kT \end{cases}$$

$$u_{\text{出}}(t) = \sum_{k=0}^N u(kT) \cdot [1(t - kT) - 1(t - kT - T)]$$

$$u_{\text{出}}(s) = \sum_{k=0}^N u(kT) \cdot \left[ \frac{e^{-kTs}}{s} - \frac{e^{-(k+1)Ts}}{s} \right] = \sum_{k=0}^N u(kT) \cdot \frac{e^{-kTs} (1 - e^{-Ts})}{s}$$

- 零阶保持器的传递函数

$$G_0(s) = \frac{u_{\text{出}}(s)}{u_{\text{入}}(s)} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} = L[g_0(t)]$$

- 零阶保持器的单位脉冲响应

$$g_0(t) = 1(t) - 1(t - T)$$

- 零阶保持器的频率特性

$$G_0(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega}$$

- 零阶保持器的幅频特性和相频特性

$$|G_0(j\omega)| = \left| T \frac{\sin \omega T/2}{\omega T/2} \right| \quad \angle G_0(j\omega) = -\omega T/2$$

- 零阶保持器具有低通特性和相角滞后特性。

## 一阶保持器

为了改善保持器输出信号的平滑程度，可以采用简单的预测保持电路，这就构成了一阶保持器。它利用过去的两个数据来预测下一个采样时刻之前的曲线斜率，其基本关系式为：

$$u(kT + \Delta t) = u(kT) + \frac{u(kT) - u[(k-1)T]}{T} \cdot \Delta t, 0 \leq \Delta t < T$$

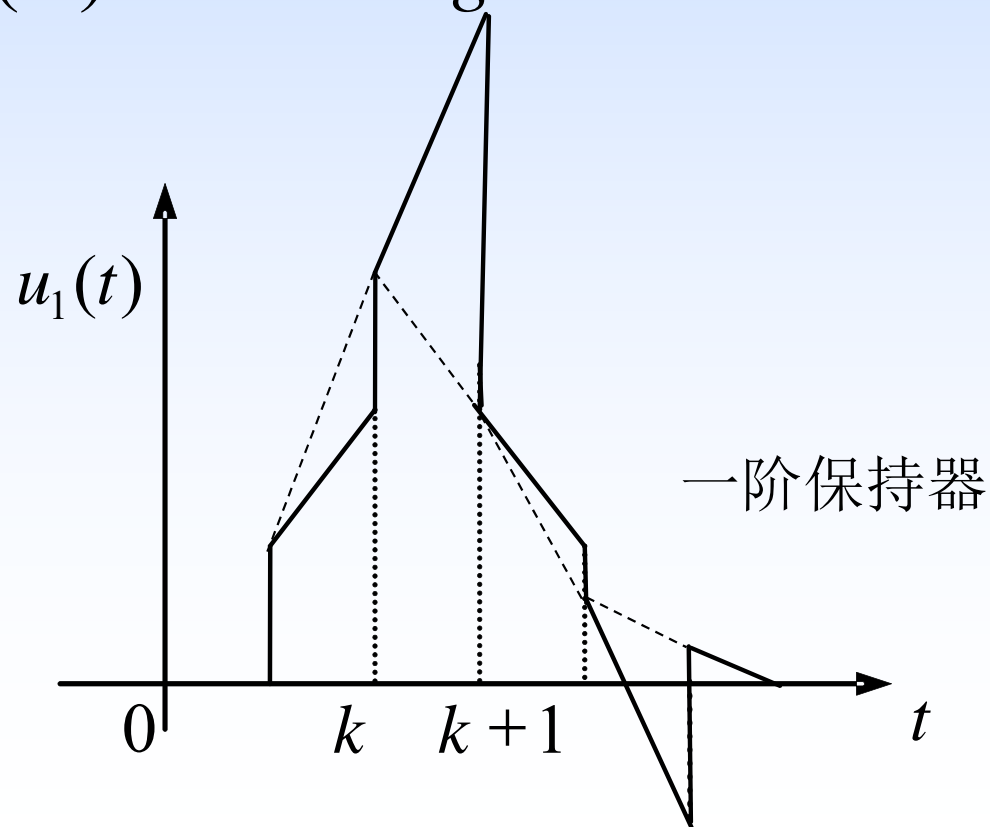
一阶保持器的传递函数为：

$$G_1(s) = T(1 + Ts) \left( \frac{1 - e^{-Ts}}{Ts} \right)^2$$

幅频特性和相频特性分别为：

$$A_1(\omega) = T \sqrt{1 + (\omega T)^2} \left( \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \right)^2 \quad \text{低通}$$

$$\varphi_1(\omega) = -\omega T + \text{tg}^{-1} \omega T \quad \text{相角滞后}$$



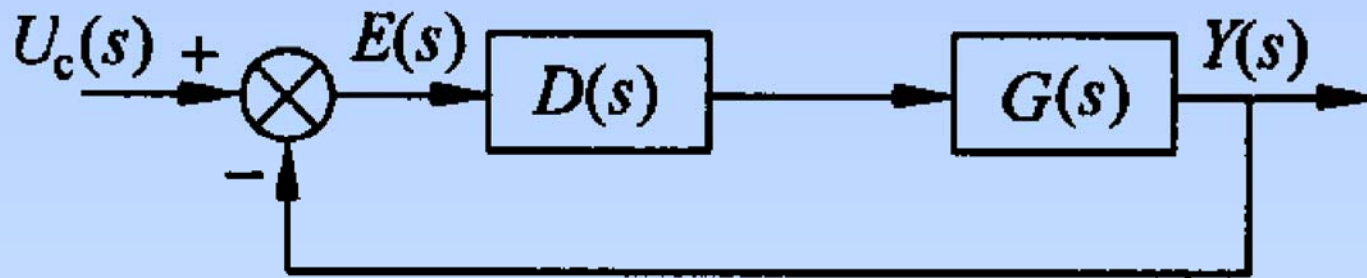
## 1.4.4 控制算法

- PID方法
- 极点配置法
- 最优控制方法
- 智能控制方法
  - 模糊控制
  - 神经网络控制
  - 专家控制等



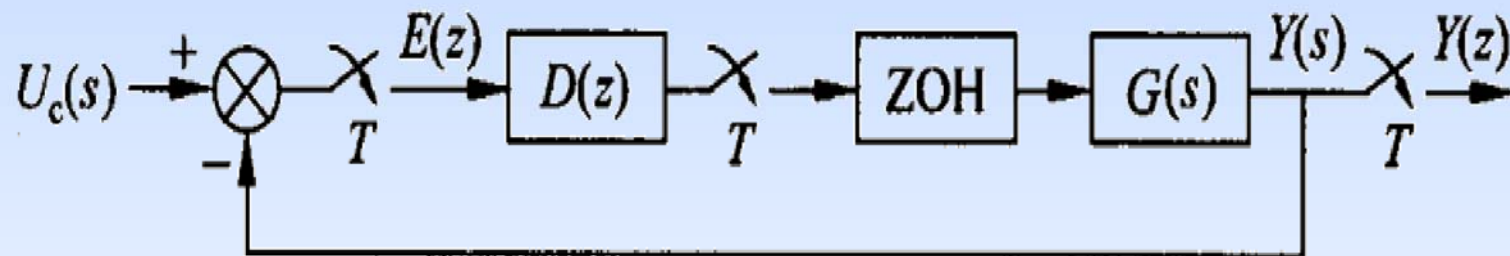
# 1.5 计算机控制系统的分析方法

- 由于数字信号所固有的时间上离散、幅值上量化的效应，从而使得计算机控制系统分析与连续控制系统分析在本质上有许多不相同的性质
- 计算机控制系统分析方法：“连续控制系统”、“采样控制系统”、“离散控制系统”



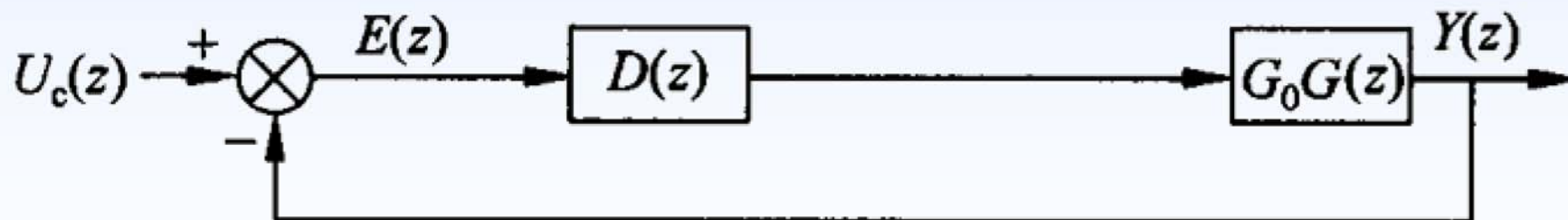
模拟

连续控制系统框图



模拟/数字

代替连续控制系统的采样控制系统框图



数字

将采样控制系统中的连续环节离散化得到的  
离散控制系统框图

本章小结:

## 关键内容

计算机控制系统的种类、组成和特征

数字信号处理的主要步骤:

采样 — 采样定理  $\omega_s > 2\omega_0$  , 混叠现象

量化 — 量化精度取决于A/D转换器的位数

保持 — 零阶保持器（低通滤波、相角滞后）