

计算机控制系统

信息学院·谭树彬
tanshubin@ise.neu.edu.cn

2013年3月

课程教学内容:

- 一、计算机控制系统概述
- 二、信号转换与 z 变换
- 三、计算机控制系统数学描述与性能分析
- 四、数字控制器的模拟化设计方法
- 五、数字控制器的直接设计方法
- 六、基于状态空间模型的极点配置设计方法
- 七、先进控制规律的设计方法
- 八、基于网络的控制技术
- 九、计算机控制系统设计与实现
- 十、计算机控制系统应用实例

姓 名: 谭树彬
单 位: 自动化研究所
办公室: 信息学馆341或ROCKWELL实验室
办公电话: 83678396 / 83687752
Email: neutanshubin@163.com
QQ: ***** (常不在线)

计算机控制系统

第1章 计算机控制系统概述

信息学院·谭树彬
tanshubin@ise.neu.edu.cn

2013年3月

本章内容:

- 计算机控制系统的基本概念
- 过程通道与总线接口技术
- 模拟与数字信号之间的相互转换
- 计算机控制系统的理论问题
- 计算机控制系统的基本类型

1.1 引言

1.1.1 概述

计算机控制是以控制理论与计算机技术为基础的一门新的工程科学技术, 广泛应用于工业、交通、农业、军事等领域。

计算机参与的控制系统, 称为计算机控制系统, 也称数字控制系统;

由于计算机的引入, 产生了一系列新的基本理论和分析、设计方法。

1.1.2 发展历程

- 1) 开创时期 (1955—1962年)
难于直接参与系统的闭环控制。
计算机的主要任务是寻求最佳运行条件。
- 2) 直接数字控制时期 (1962—1967年)
计算机直接控制被控过程的变量, 取代了原来的模拟控制, 因而被称为直接数字控制 (DDC)。
- 3) 小型计算机时期 (1967—1972年)
各种类型适合工业控制的小型计算机。
许多小型工程项目、设备采用计算机控制系统。
- 4) 微型计算机时期 (1972年至今)
微型处理器参与控制, 使计算机控制系统得到更普及的应用。

5) 集散型控制

微型计算机性能提高, 价格下降以及计算机通信和网络的发展, 促使发展一种许多相关联的微计算机组合共同负担工作负荷的系统, 形成了目前广泛应用的集成分散型控制系统。

- 微型计算机的发展和普及, 促进发展了许多新型计算机的控制方式。
如: 嵌入式计算机控制系统;
网络计算机控制;
专用控制器迅速的发展。
- 依赖于计算机实时控制软件的进展
过去的几十年软件生产的进展不大。

- 性能完好的计算机控制系统, 要求计算机控制系统分析、设计理论的支持。

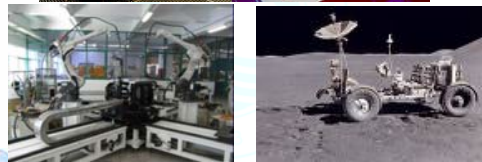
----采样系统的基本理论;

----现代离散控制理论;

----各种智能控制理论, 如模糊控制、神经网络。

限于现代理论应用的前提和条件, 实际难以满足, 应用受到了限制。

- 加强先进控制理论的可行性研究, 发展各种简便易行的先进控制策略, 提高系统控制水平。

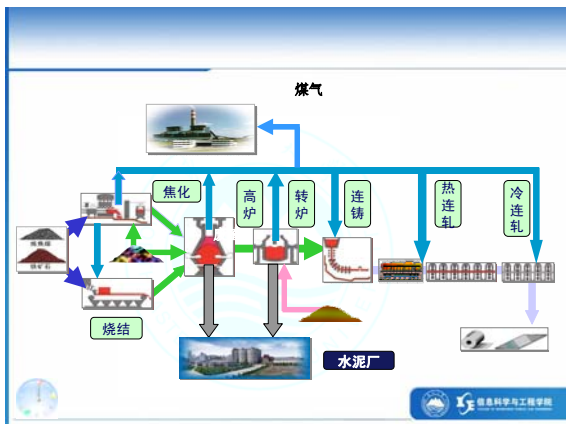


温度控制系统

请输入理想温度:

C pid 设置





1.1.3 课程讲述的内容

本课程将从**信号变换、对象建模与性能分析、控制算法设计、控制系统实现**等4个方面系统讲述计算机控制系统分析和设计的基本理论和方法；

其中在**信号变换的工程化、控制算法的工程化**，以及**控制系统实现的工程化**部分进行了重点阐述。

1.2 计算机控制系统的基本概念

1.2.1 计算机控制系统的组成

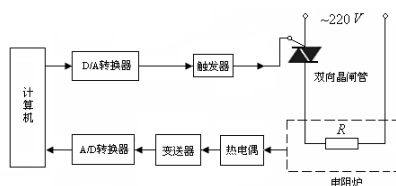


图 1.1 炉温计算机控制系统

将类似上述炉温计算机控制系统的各类计算机控制系统抽象化，得到图1.2所示的计算机控制系统典型结构。

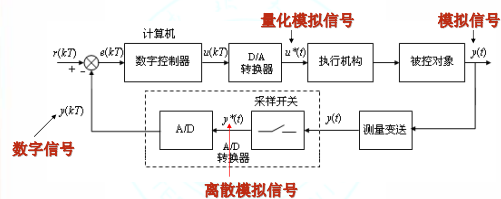


图 1.2 计算机控制系统典型结构

计算机控制系统与常规的连续（模拟）控制系统相比，通常具有如下优点：

- (1) 设计和控制灵活；
程序 VS 硬件
- (2) 能实现集中监视和操作；
- (3) 能实现综合控制；
- (4) 可靠性高，抗干扰能力强。

1.2.2 计算机控制系统的应用要求

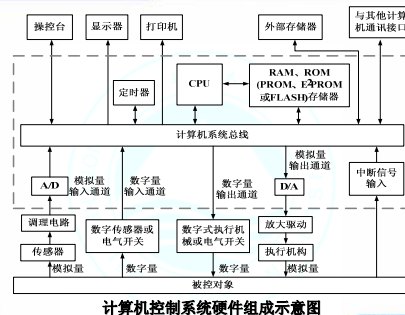
- (1) 可靠性高
- (2) 实时性好
- (3) 环境适应性强
- (4) 过程输入和输出配套较好
- (5) 系统扩充性好
- (6) 系统开放性
- (7) 控制软件包功能强

1.2.3 计算机控制系统的性能指标

- 1、**稳定性**：闭环系统的极点（s左半平面/单位圆）
- 2、**稳态指标**：稳态误差
- 3、**动态指标**：过渡过程时间，超调量等
- 4、**综合指标**：最优控制设计时，既要考虑到能对系统的性能做出正确的评价，又要考虑到数学上容易处理或工程上便于实现。如积分型指标：

$$J = \int_0^t e^2(t) dt$$

1.3 过程通道和总线接口技术

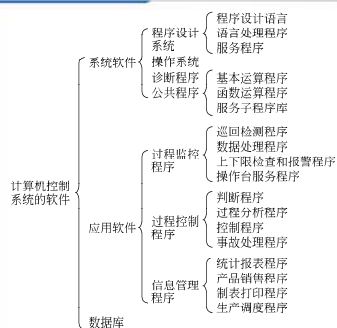


计算机控制系统的硬件构成：

- (1) **过程装置**：包括被控对象，执行机构和测量变送装置
- (2) **输入输出通道**：包括过程通道和总线接口
- (3) **计算机系统**：包括计算机和外部设备。外部设备包括人机联系设备（如鼠标、键盘等）和通用外部设备（如显示器、打印机等）

计算机控制系统的软件构成：

- (1) **系统软件**：指为提高计算机使用效率和扩大功能、为用户使用和维护计算机提供方便的程序的总称，一般包括操作系统、程序设计系统和公共程序与诊断系统；
- (2) **应用软件**：用户为解决实时控制问题、完成特定功能而设计和编写的各种程序的总称，一般包括过程监控程序、过程控制程序和信息管理程序；
- (3) **数据库系统**：用于支持数据管理、存取的软件，它包括数据库和数据库管理系统等。



1.3.1 过程通道

过程输入/输出通道分为模拟量输入通道、模拟量输出通道、开关量输入通道和开关量输出通道

过程输入通道：把生产对象的被控参数转换成计算机可以接收的数字信号

过程输出通道：把计算机输出的控制命令和数据，转换成可以对工业对象进行控制的信号

(1) 模拟量输入通道

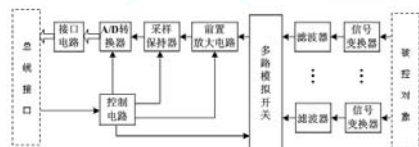
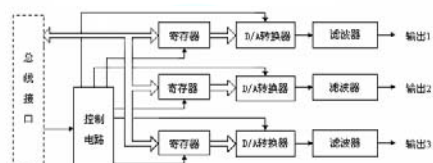


图1.4 模拟量输入通道组成与结构图

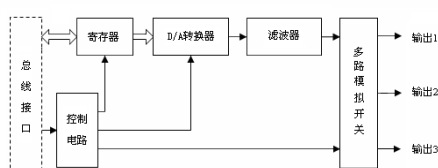
(2) 模拟量输出通道



(a) 每个通道配置一个D/A转换器

图1.5 模拟量输出通道组成与结构图

(2) 模拟量输出通道



(b) 通过多路模拟开关共用一个D/A转换器

图1.5 模拟量输出通道组成与结构图

(3) 数字量输入通道

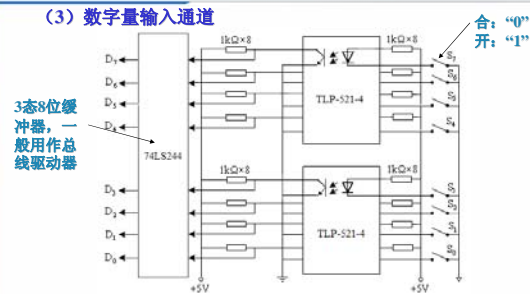


图1.6 数字量输入通道示意图

(4) 数字量输出通道

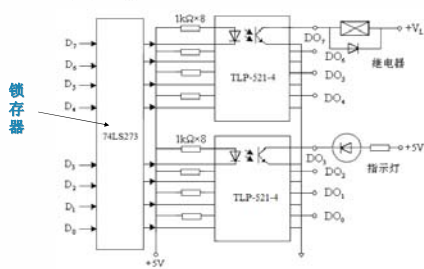


图1.7 数字量输出通道示意图

1.3.2 总线接口技术

任何一个微处理器都要与一定数量的部件和外围设备连接，但如果将各部件和每一种外围设备都分别用一组线路与CPU直接连接，那么连线将会错综复杂，甚至难以实现。

为了简化硬件电路设计、简化系统结构，常用一组线路，配置以适当的接口电路，与各部件和外围设备连接，这组共用的连接线路被称为**总线**。采用总线结构便于部件和设备的**扩充**，尤其制定了统一的总线标准则容易使不同设备间实现**互连**。

微机中总线一般有**内部总线**、**系统总线**和**外部总线**：

•**内部总线**：微机内部各外围芯片与处理器之间的总线，用于芯片一级的互连；

•**系统总线**：微机中各插件板与系统板之间的总线，用于插件板一级的互连；

•**外部总线**：微机 and 外部设备之间的总线，微机作为一种设备，通过该总线和其他设备进行信息与数据交换，它用于设备一级的互连。

按照传输数据的方式划分，可以分为**并行总线**和**串行总线**，分别对应于**并行通信**和**串行通信**方式。

并行总线：数据线通常超过2根

速度快、实时性好，但由于占用的口线多，不适用于小型化产品。如计算机并口、各种系统总线如ISA总线、PCI总线等。

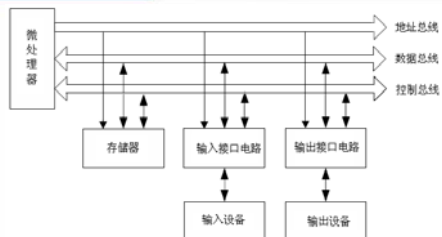


图1.8 内部并行总线及组成

串行总线：二进制数据逐位通过一根数据线发送到目的器件；速率虽低，但在数据通信吞吐量不是很大的微处理电路中则显得更加简易、方便、灵活。常见的串行总线有SPI、I²C、USB及RS232等。

按照时钟信号是否独立，串行总线进一步分为**同步总线**和**异步总线**。

同步总线的时钟信号独立于数据，而**异步总线**的时钟信号是从数据中提取出来的。SPI、I²C是同步串行总线，RS232采用异步串行总线。

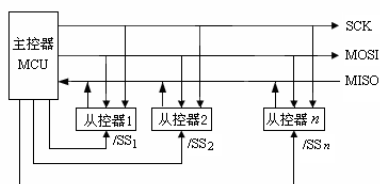
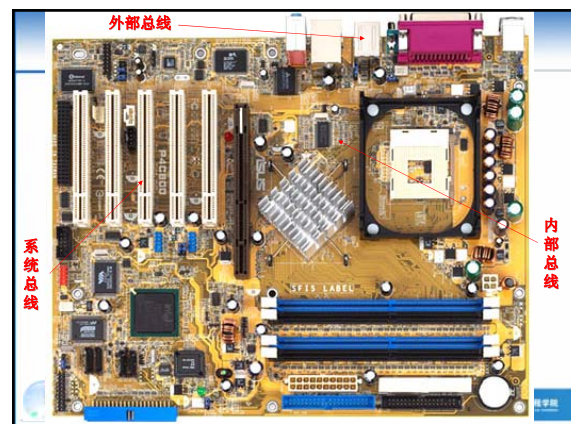


图1.9 内部串行总线SPI的组成



(1) 内部总线

微机内部各外围芯片与处理器之间的总线，用于芯片一级的互连。

① I²C总线 (Inter-IC)

10多年前由Philips公司推出，是近年来在微电子通信控制领域广泛采用的一种新型**串行总线**标准。它是**同步通信**的一种特殊形式，具有接口线少，控制方式简化，器件封装形式小，通信速率较高等优点。在主从通信中，可以有多个I²C总线器件同时接到I²C总线上，通过地址来识别通信对象。

(1) 内部总线

② SPI总线：串行外围设备接口SPI (serial peripheral interface)

Motorola公司推出的一种同步串行接口。Motorola公司生产的绝大多数MCU（微控制器）都配有SPI硬件接口，如68系列MCU。SPI总线是一种三线同步总线，因其硬件功能很强，所以，与SPI有关的软件就相当简单，使CPU有更多的时间处理其他事务。

(1) 内部总线

③ SCI总线：串行通信接口SCI (serial communication interface)

也是由Motorola公司推出的。它是一种通用异步通信接口UART，与MCS-51的异步通信功能基本相同。

(2) 系统总线

系统总线指计算机中各插件板与系统板之间的总线，用于插件板一级的互连，为计算机系统所特有，是构成计算机系统的总线。

系统总线通常为50-100根信号线，分为5个主要类型：

- (1) **数据线**：决定数据宽度；
- (2) **地址线**：决定直接选址范围；
- (3) **控制线**：包括控制、时序和中断线，决定总线功能和适应性的好坏；
- (4) **电源线和地线**：决定电源的种类及地线的分布和用法；
- (5) **备用线**：留给厂家或用户自己定义。

(2) 系统总线

商用PC机中系统总线：

- ISA总线
- EISA总线
- VESA总线
- PCI总线

为适应工业现场环境而设计的系统总线：

- STD总线
- VME总线
- PC/104总线
- Compact PCI总线

(2) 系统总线

① ISA总线：ISA (industrial standard architecture)

是IBM公司1984年为推出PC/AT机而建立的系统总线标准，所以也叫AT总线。它是对XT总线的扩展，以适应8/16位数据总线要求。它在80286至80486时代应用非常广泛，以至于现在奔腾机中还保留有ISA总线插槽。ISA总线有98只引脚。

(2) 系统总线

② EISA总线: ISA (extended industrial standard architecture)

是1988年由Compaq等9家公司联合推出的总线标准。它是在ISA总线的基础上使用双层插座,在原来ISA总线的98条信号线上又增加了98条信号线,也就是在两条ISA信号线之间添加一条EISA信号线。在实用中,EISA总线完全兼容ISA总线信号。

(2) 系统总线

③ VESA总线: VESA (video electronics standard association)

是1992年由60家附件卡制造商联合推出的一种局部总线,简称为VL(VESA local bus)总线。该总线系统考虑到CPU与主存和Cache的直接相连(CPU总线或主总线),其他设备通过VL总线与CPU总线相连。它定义了32位数据线,且可通过扩展槽扩展到64位,使用33MHz时钟频率,最大传输率达132MB/s,可与CPU同步工作。是一种高速、高效的局部总线,可支持386SX、386DX、486SX、486DX及奔腾微处理器。

(2) 系统总线

④ PCI总线: PCI (peripheral component interconnect)

当前最流行的总线之一,它是由Intel公司推出的一种局部总线。它定义了32位数据总线,且可扩展到64位。PCI总线主板插槽的体积比原ISA总线插槽还小,其功能比VESA、ISA有极大的改善,支持突发读写操作,最大传输速率可达132MB/s,可同时支持多组外围设备。**PCI局部总线不能兼容现有的ISA、EISA、MCA (micro channel architecture) 总线**,但它不受限于处理器,是基于奔腾等新一代微处理器而发展的总线。

(3) 外部总线

外部总线指计算机和计算机之间、计算机与外部其他仪表或设备之间进行连接通信的总线。

① RS-232-C总线:

是美国电子工业协会EIA (Electronic Industry Association) 制定的一种**串行**物理接口标准。RS是英文“推荐标准”的缩写,232为标识号,C表示修改次数。

设有25条信号线,包括一个主通道和一个辅助通道,在多数情况下主要使用主通道,对于一般**双工**通信,仅需几条信号线就可实现,如一条发送线、一条接收线及一条地线。**传输距离较短**,一般用于20m以内的通信。

(3) 外部总线

② RS-485总线:

在要求**通信距离为几十米到上千米**时,广泛采用RS-485 **串行总线**标准。RS-485采用平衡发送和差分接收,因此具有抑制共模干扰的能力。加上总线收发器具有高灵敏度,能检测低至200mV的电压,故传输信号能在千米以外得到恢复。RS-485采用**半双工**工作方式,任何时候只能有一点处于发送状态,因此,发送电路须由使能信号加以控制。RS-485用于多点互连时非常方便,可以省掉许多信号线。应用RS-485可以联网构成分布式系统,其允许最多并联32台驱动器和32台接收器。

(3) 外部总线

③ IEEE-488总线:

是**并行总线**接口标准。IEEE-488总线用来连接系统,如微计算机、数字电压表、数码显示器等设备及其他仪器仪表均可用IEEE-488总线装配起来。它按照位并行、字节串行双向异步方式传输信号,连接方式为总线方式,仪器设备直接并联于总线上而不需中介单元,但总线上最多可连接15台设备。最大传输距离为20米,信号传输速度一般为500KB/s,最大传输速度为1MB/s。

(3) 外部总线

④ USB总线: USB (universal serial bus)

通用串行总线USB是由世界著名的7家计算机和通信公司共同推出的一种新型接口标准。它基于通用连接技术,实现外设的简单快速连接,达到方便用户、降低成本、扩展PC连接外设范围的目的。它可以为外设提供电源,而不像普通的使用串、并口的设备需要单独的供电系统。另外,快速是USB技术的突出特点之一,USB的最高传输率可达12Mbps比串口快100倍,比并口快近10倍,而且USB还能支持多媒体。

1.4 模拟与数字信号之间的相互转换

数字信号 \longleftrightarrow 模拟信号

1.4.1 D/A转换及其误差

(1) D/A转换器原理

D/A转换器是按照规定的时间间隔T对控制器输出的数字量进行D/A转换的。

D/A转换器的工作原理,可以归结为“按权展开求和”的基本原则,对输入数字量中的每一位,按权值分别转换为模拟量,然后通过运算放大器求和,得到相应模拟量输出。

➤ 按与微机的接口形式分类DAC:

串行接口DAC: 芯片体积小,转换速度低,与CPU连线少。

并行接口DAC: 芯片体积大,转换速度高,与CPU连线多。

➤ 按DAC的输出形式分类:

电流输出型DAC

电压输出型DAC

典型芯片: DAC0832—8位并行接口,电流输出。

信号说明:

D—数字量输入信号(8位,10位,12位,16位等)

A—模拟量输出信号(5V,10V等)

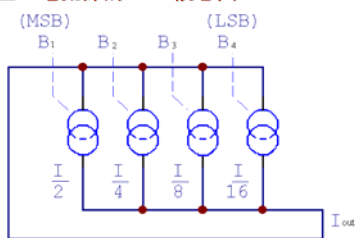
V_{ref} —参考电压

数/模(D/A)转换器示意图

$$V_{out} = V_{FSR} \left(\frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \dots + \frac{B_n}{2^n} \right)$$

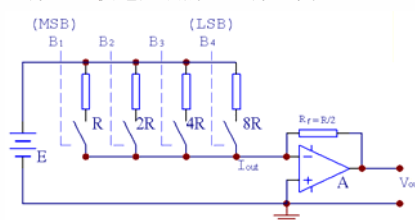
输出的满幅值电压

DAC原理: 电流源的DAC概念图

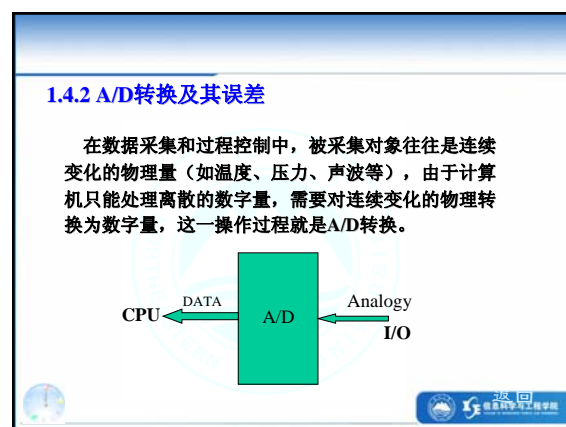
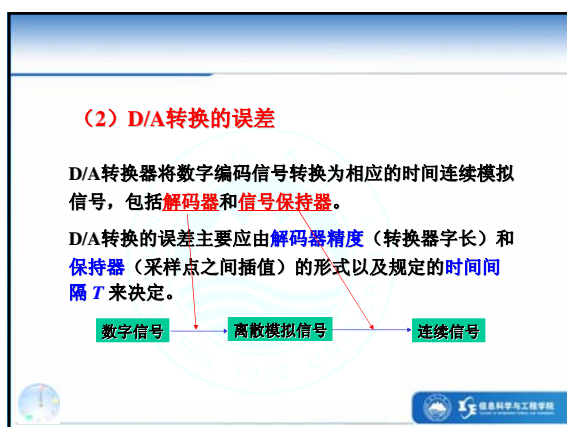
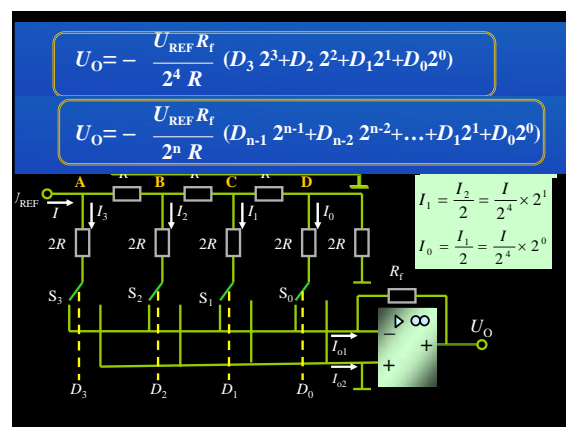
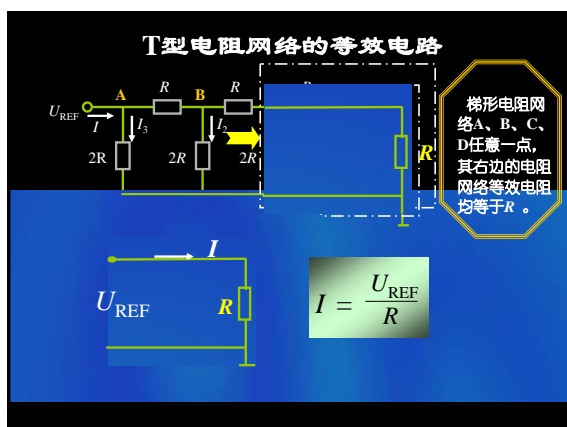
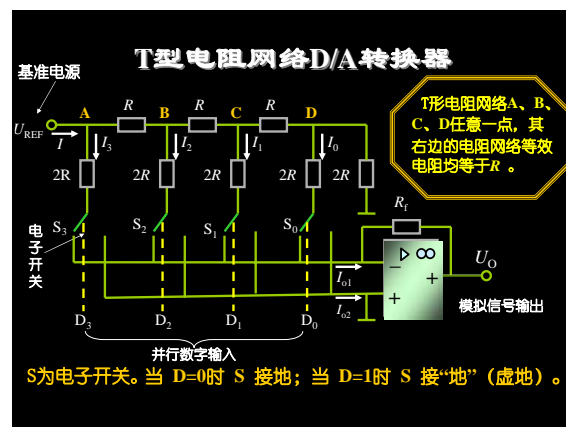


$$I_{out} = I \left(\frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \frac{B_4}{2^4} \right)$$

DAC原理: 权电阻法的DAC原理图



$$V_{out} = -2E \frac{R_f}{R} \left(\frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \frac{B_4}{2^4} \right) = -E \left(\frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \frac{B_4}{2^4} \right)$$



A/D 转换器的作用是将输入的模拟量数字化。
主要分为两大类：

直接转换器：逐次逼近型、并联比较型等

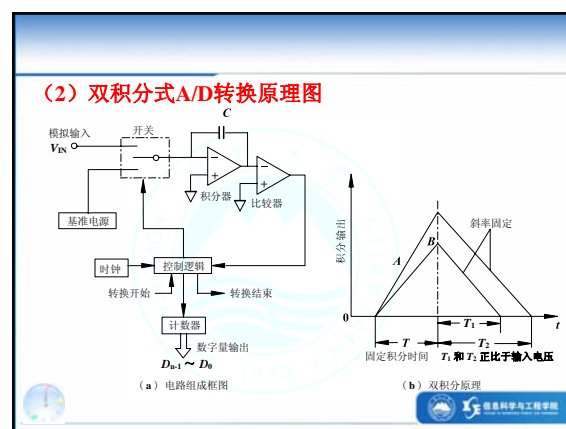
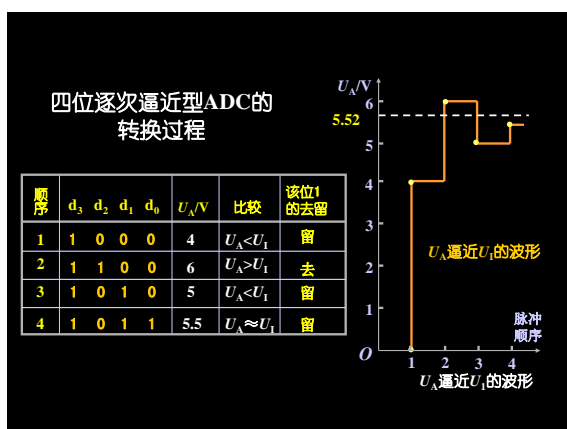
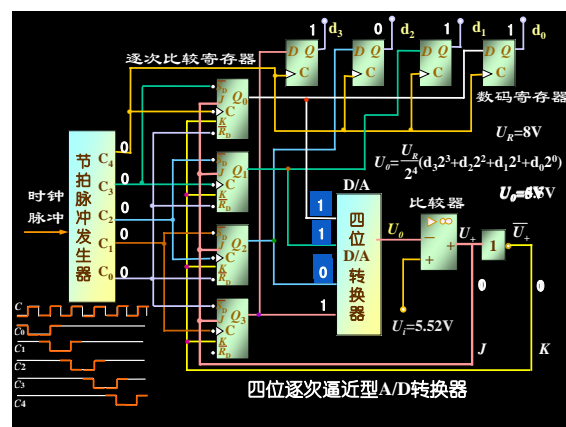
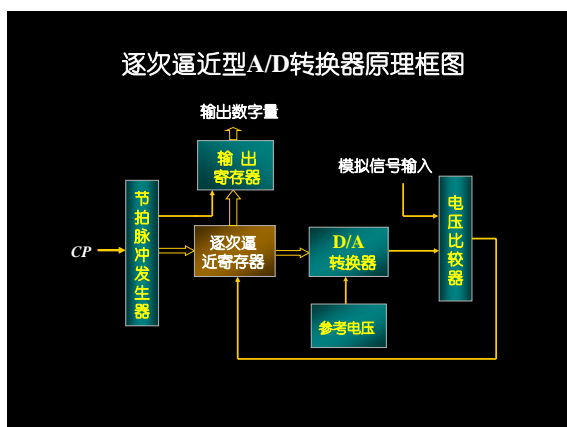
间接转换器：单积分型、双积分型等

典型芯片：**ADC0809**—8位逐次逼近型，并行接口

(1) 逐次逼近型A/D转换器

逐次逼近的基本思想：类似于用天平称物

顺序	砝码重量	比较判断	砝码去留	结果表示
1	8g	$8g < 13g$	留	1
2	$8g + 4g$	$12g < 13g$	留	1
3	$8g + 4g + 2g$	$14g > 13g$	去	0
4	$8g + 4g + 1g$	$13g = 13g$	留	1



(3) A/D转换的误差

通常A/D转换器要完成采样、量化和编码3个变换：

采样保持器：对连续的模拟输入信号，按一定的时间间隔 T 进行采样，变成时间离散、幅值等于采样时刻输入信号值的序列信号。

量化：将采样时刻的信号幅值按最小量化单位取整的过程。量化单位越小，采样时刻信号的信号幅值与变换成的有限位数的二进制数码的差异也越小。

编码：将整量化的分层信号变换为二进制数码形式，编码只是信号表示形式的改变，是一个无误差的等效变换过程。

通常A/D转换器要完成采样、量化和编码3个变换：



A/D转换的误差：主要应由A/D转换器转换速率（孔径时间）和转换精度（量化误差）来决定。

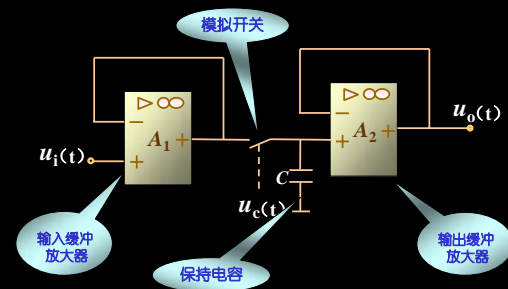
采样保持电路：

对变化较慢的模拟信号(即所谓低频信号)在A/D芯片之前可不加采样保持电路；

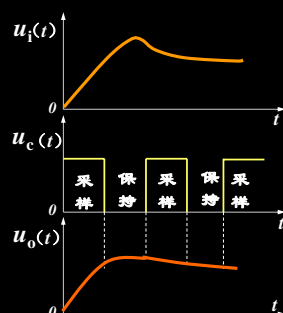
确切的说，若A/D转换器的速度比模拟信号变化速度高很多倍，我们可将模拟信号直接加到A/D转换器上；

如果模拟信号变化比较快，为了保证转换精度，就要在A/D之前加上采样保持电路，使得在转换期间保持输入信号不变。

采样-保持 (S/H) 电路



采样-保持电路波形图



1.5 计算机控制系统的理论问题

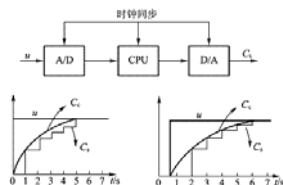
1.5.1 信号变换问题

计算机控制系统除有连续（模拟）信号外，还有离散模拟信号、数字信号等，是一种混合信号系统。

这种系统结构和信号形式上的特点，使信号变换问题成为计算机控制系统特有的、必须面对和解决的问题。

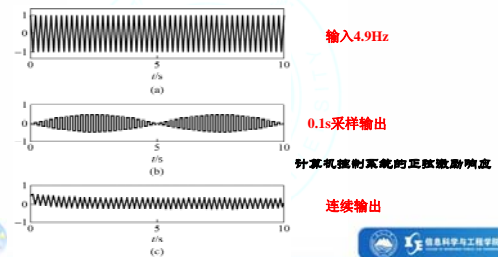
本课程将在教材第2章讲述计算机控制系统的信号变换问题。

- 1) 若被控对象是时不变线性系统，通常所形成的连续控制系统也是时不变系统。但当将其改造成计算机控制系统后，它的时间响应与外作用的作用时刻和采样时刻是否同步有关。



采样系统的时变特性

- 2) 连续系统在正弦输入信号的激励下，稳态输出为同频率的正弦信号，但对计算机控制系统而言，其稳态正弦响应则与输入信号频率和采样周期有关。



计算机控制系统的正弦激励响应

- 3) 一个连续系统是可控可观的，将其变成计算机控制系统时，若采样间隔时间选取的不合适，则可能会变得不可控。
如 围绕地球运动的同步卫星，其运动周期为1天，对其实现断续控制，控制间隔时间为1天，则卫星是不可控的。

- 4) 系统的稳定性也是值得关注的问题

总之：

在计算机控制系统中，由于信号的采样，所产生的一些现象无法用连续控制理论解释和说明，必须采用与采样有关的理论进行说明和解释。

- 5) 在计算机控制系统中字长有限的问题

由于数字字长有限，在某些情况下，将会使计算机控制系统响应产生极限环振荡。

1.5.2 对象建模与性能分析

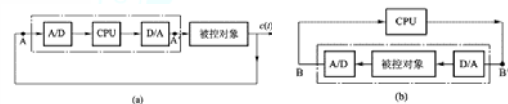
使用时域的差分方程、复数域的 z 变换和脉冲传递函数、频域的频率特性以及离散状态空间方程作为系统数学描述的基本工具，并根据系统的数学描述对计算机控制系统进行性能分析。

本课程将在教材第3章讲述计算机控制系统的数学描述和性能分析问题。

1.5.3 控制算法设计

- (1) 数字控制器两种经典的设计方法：模拟化设计方法和直接数字设计方法（教材第4、5章内容）
- (2) 以状态空间模型为基础的数字控制器的设计方法（教材第6章内容）
- (3) 先进控制规律的设计方法：最优化，自适应，模型预测，模糊控制（教材第7章内容）
- (4) 基于网络的控制技术（教材第8章内容）

- 计算机控制系统是一种混合信号系统。
- 从AA'两点来看，将计算机系统看作黑箱，系统可以看成是连续系统；
- 从BB'两点来看，又可将其看成是纯离散信号系统。



计算机控制系统等效结构

- 在实际工程设计时有两种设计方法：

1) 连续域设计—离散化方法

- 将计算机控制系统看成是连续系统，在连续域上设计得到连续控制器；
- 采用不同方法将其数字化（离散化）；
- 目前常用的近似设计方法。

2) 直接数字域(离散域)设计

- 将系统看成是纯离散信号系统，直接在离散域进行设计，得到数字控制器；
- 准确的设计方法，日益受到重视。

- 正确选择采样间隔时间是需要特别重视的问题。
- 软件编程值得注意。

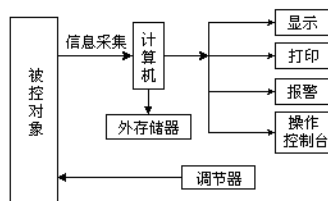
1.5.4 控制系统实现技术

在计算机控制系统中，由于采用了数字控制器而会产生数值误差，这些误差的传播，都会极大的影响系统的控制精度和它的动态性能。因此计算机控制系统的工程设计是一项复杂的系统工程。

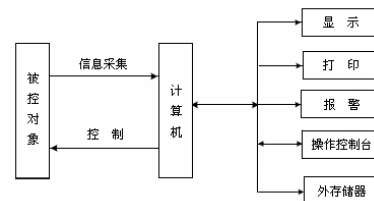
本课程在教材第9、10章描述了计算机控制系统实现技术的工程化问题。

1.6 计算机控制系统的基本类型

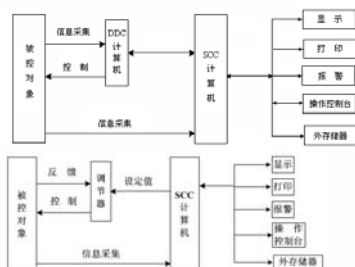
(1) 操作指导控制系统（产生于20世纪50年代前后）



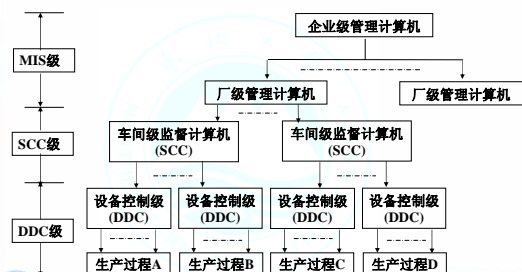
(2) 直接数字控制系统（DDC，产生于20世纪60年代初）



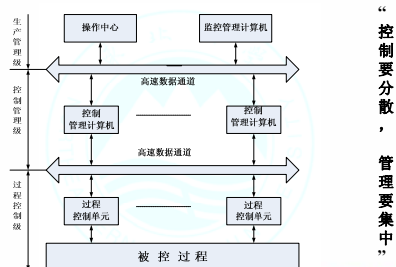
(3) 计算机监督控制系统（SCC，产生于20世纪60年代）



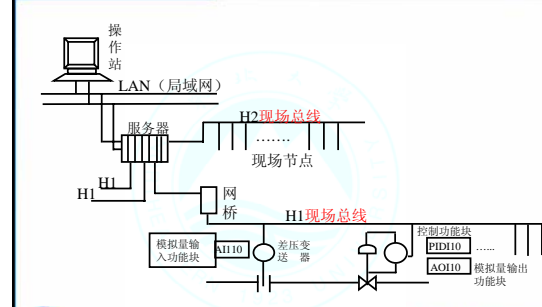
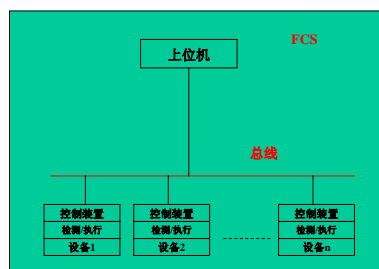
(4) 分级控制系统



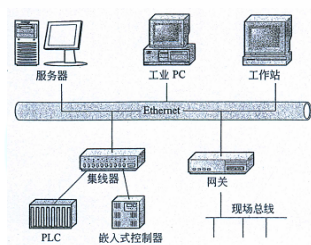
(5) 集散控制系统 (DCS, 产生于20世纪70年代中期)



(6) 总线控制系统 (FCS, 产生于20世纪80年代中后期)



(7) 控制网络系统 (NCS, 产生于21世纪初)



•本章结束•