

# 第5章 现代测量系统硬件模块设计



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 5.1 传感器常用调理电路



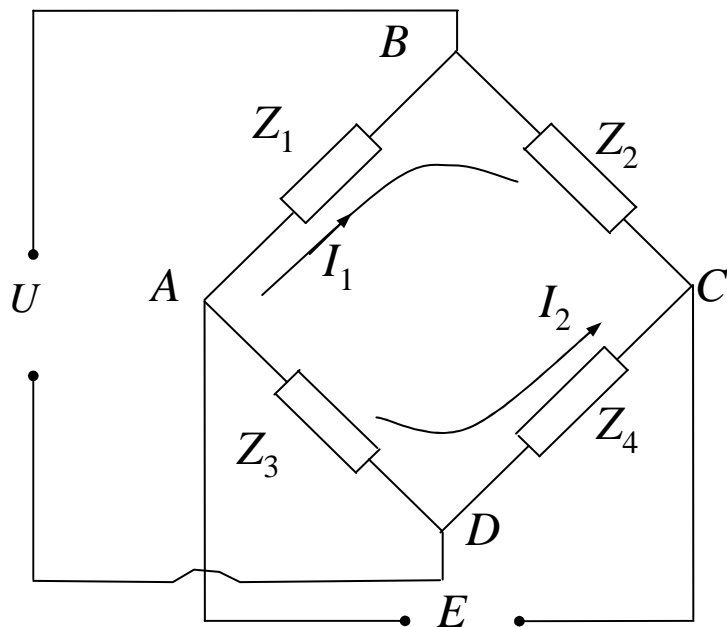
## 5.1.1 电桥

- ◆ 将电阻、电感、电容或阻抗参量的变化转换为电压或电流输出的一种测量电路。
- ◆ 特点：电路简单，较高的准确度和灵敏度，广泛使用
- ◆ 分类：（4种方法）
  - ✓ 按照激励电源的性质：直流与交流电桥；
  - ✓ 按照输出方式：平衡式电桥与不平衡式电桥。与传感器配接的电桥主要采用不平衡电桥。
  - ✓ 按照电源供电的方式：恒压源供电电桥和恒流源供电电桥。
  - ✓ 按照电桥的结构：单臂电桥、差动半桥、差动全桥。

# 5.1 传感器常用调理电路

## (1) 电桥的基本工作原理

$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  为四个桥臂阻抗。A, C 两端接电压源，则在 B, D 两端输出不平衡电压  $U_{BD}$  分别为：



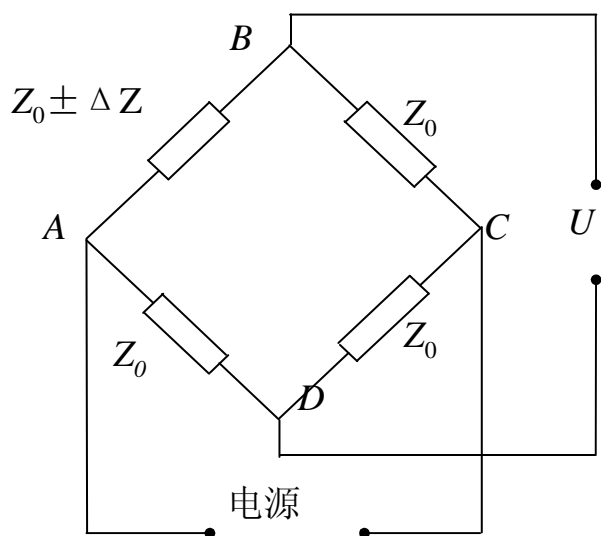
恒压源供电：

$$U = U_{AB} - U_{AD} = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} E$$

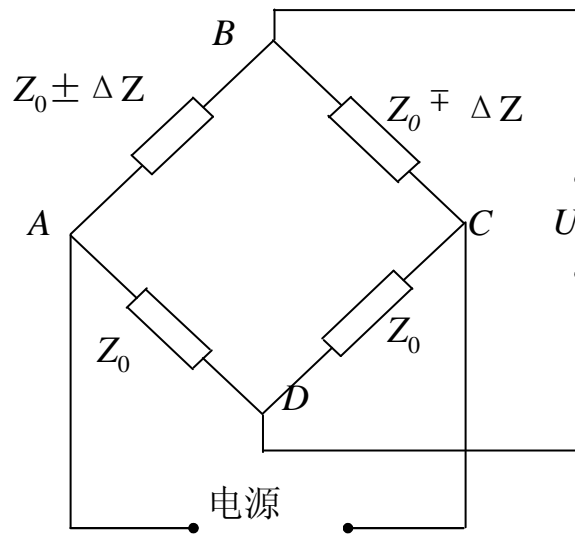
恒流源供电：

$$U = U_{AB} - U_{AD} = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} I$$

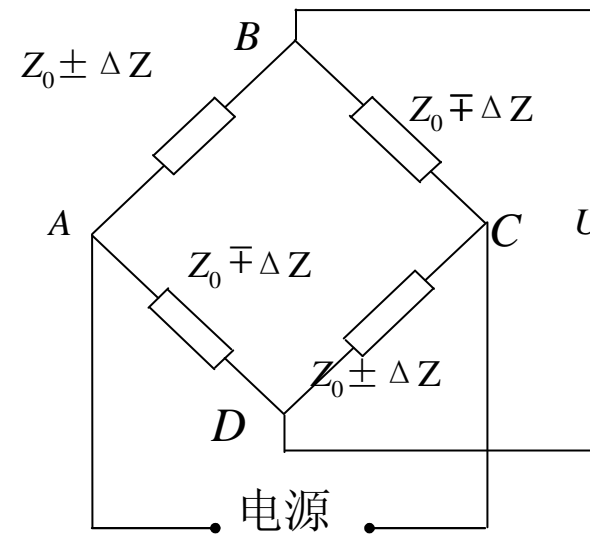
# 5.1.1 电桥



**单臂电桥:** 将电桥的一个桥臂阻抗接电参数型传感器的变换器 ( $Z_0 \pm \Delta Z$ ), 其余三个臂的阻抗均恒定  $Z_2=Z_3=Z_4=Z_0$ ,



**差动半桥:** 两个桥臂与电参数型传感器的两个差动变换器相接, 则构成差动半桥, 即两个桥臂阻抗发生差动变化 ( $Z_0 \pm \Delta Z, Z_0 \mp \Delta Z$ ) 其余两个臂的阻抗均恒定  $Z_3=Z_4=Z_0$ ,

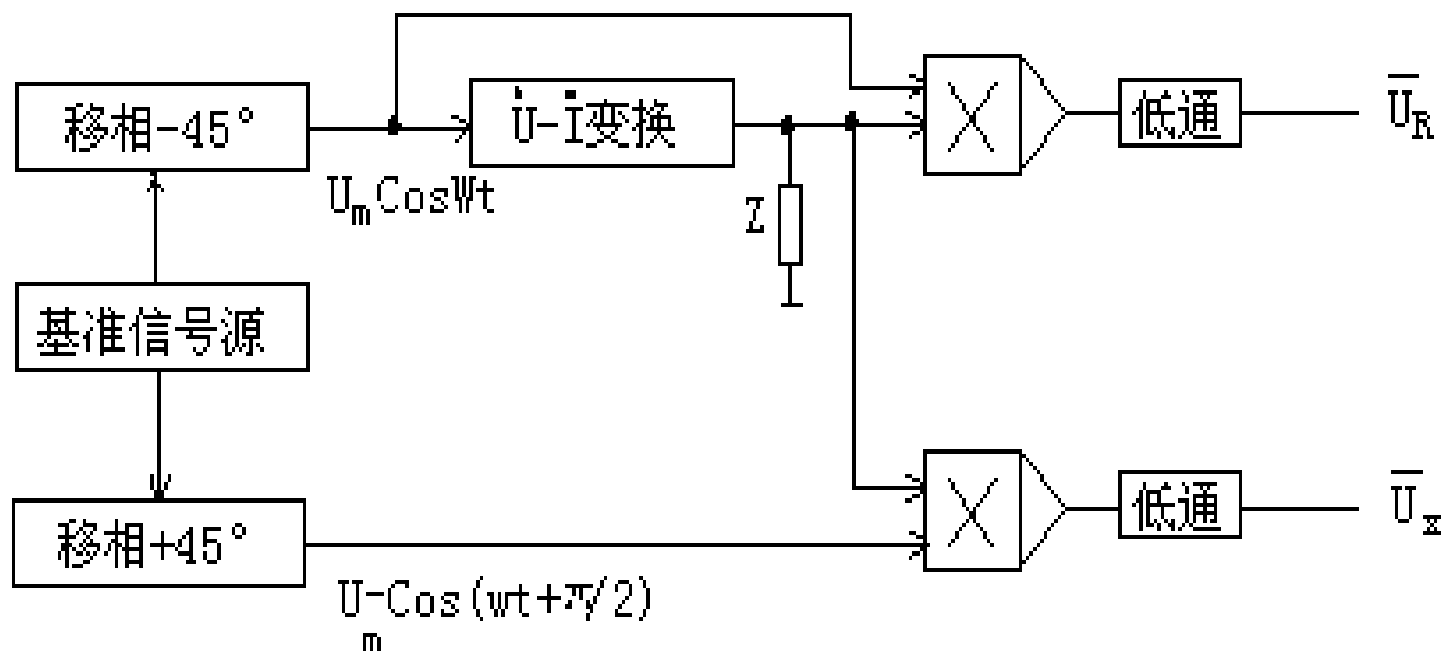


**差动全桥:** 四个桥臂阻抗均为电参数型传感器的四个差动变换器, 且四个桥臂阻抗发生差动变化 ( $Z_0 \pm \Delta Z, Z_0 \mp \Delta Z, Z_0 \mp \Delta Z, Z_0 \pm \Delta Z$ )

## 5.1.2 同步分离电路

**作用：**检测电容、电感分量，常用作电感或电容型传感器输出调理电路

**电路结构及工作原理：**



## 5.1.2 同步分离电路



阻抗 $Z$ 两端的电压为 $U_z = U_{zm} \cos(\omega t + \theta)$ ，所以

$$\begin{aligned} U_{zm} \cos(\omega t + \theta) \cdot U_m \cos \omega t &= U_{zm} U_m [\cos(\omega t + \theta) \cdot \cos \omega t] \\ &= \frac{1}{2} U_{zm} U_m [\cos(2\omega t + \theta) + \cos \theta] \end{aligned}$$

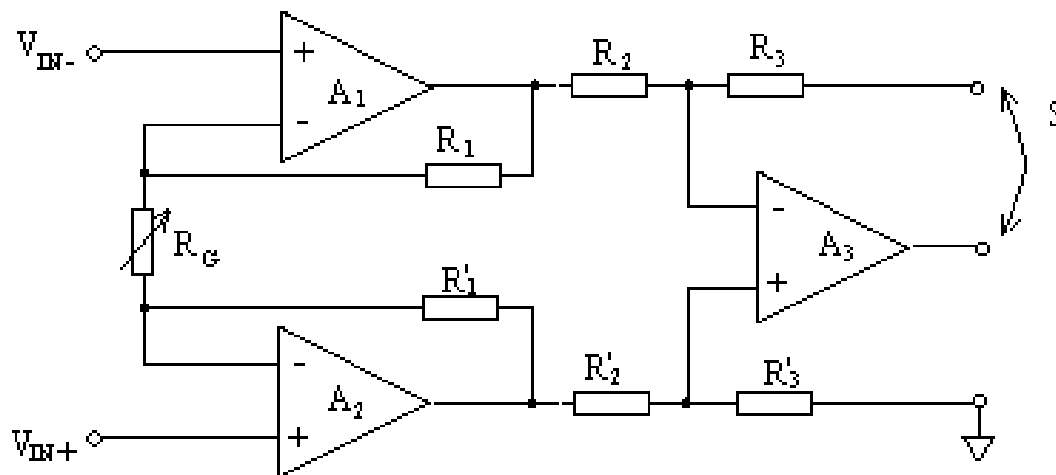
滤去 $2\omega t$ 项：
$$\overline{U_R} = \frac{1}{2} U_{zm} U_m \cos \theta$$

同理有：
$$\overline{U_x} = \frac{1}{2} U_{zm} U_m \sin \theta$$

# 5.1.3 前置放大器

## 1. 测量放大器

特点：(1) 很高的输入阻抗；  
(2) 共模抑制比大。



可用于一般场合，精度要求高时，可选用AD公司提供的AD521，AD522和612型，以及国产ZF60S型单片集成测量放大器。

$$A = \frac{U_{OUT}}{U_{IN+} - U_{IN-}} = \frac{R_3}{R_2} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_G} \right)$$

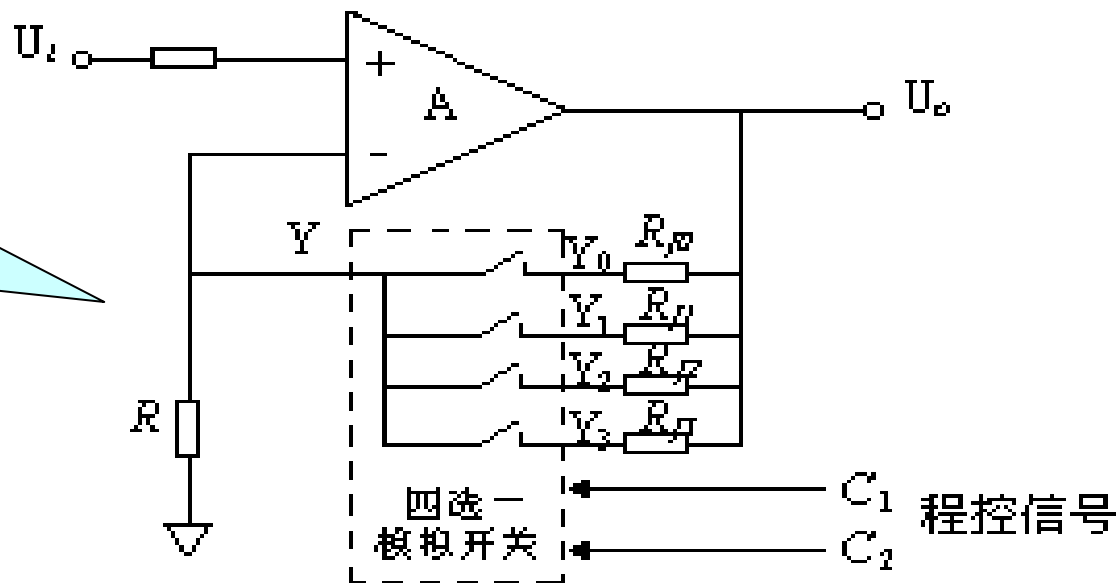


# 5.1.3 前置放大器

## 2. 程控放大器

**特点：**电路简单、容易实现，闭环增益取决于接入的反馈电阻阻值

可编程增益放大器的增益可通过数字逻辑电路来控制。



多档程控放大器，通过两位程控信号 $C_1$ 和 $C_2$ 来控制模拟开关来切换反馈电阻 $R_f$ ，可实现四个档的闭环增益值 $R_{f0}/R$ 、 $R_{f1}/R$ 、 $R_{f2}/R$ 和 $R_{f3}/R$ 。



## 5.1.3 前置放大器



### 3. 低噪声前置放大器

◆ 微弱信号检测应用范围遍及光、电、磁、声、热、生物、环保、医学、材料等领域。微弱信号检测的目的是从强噪声中提取有用信号。

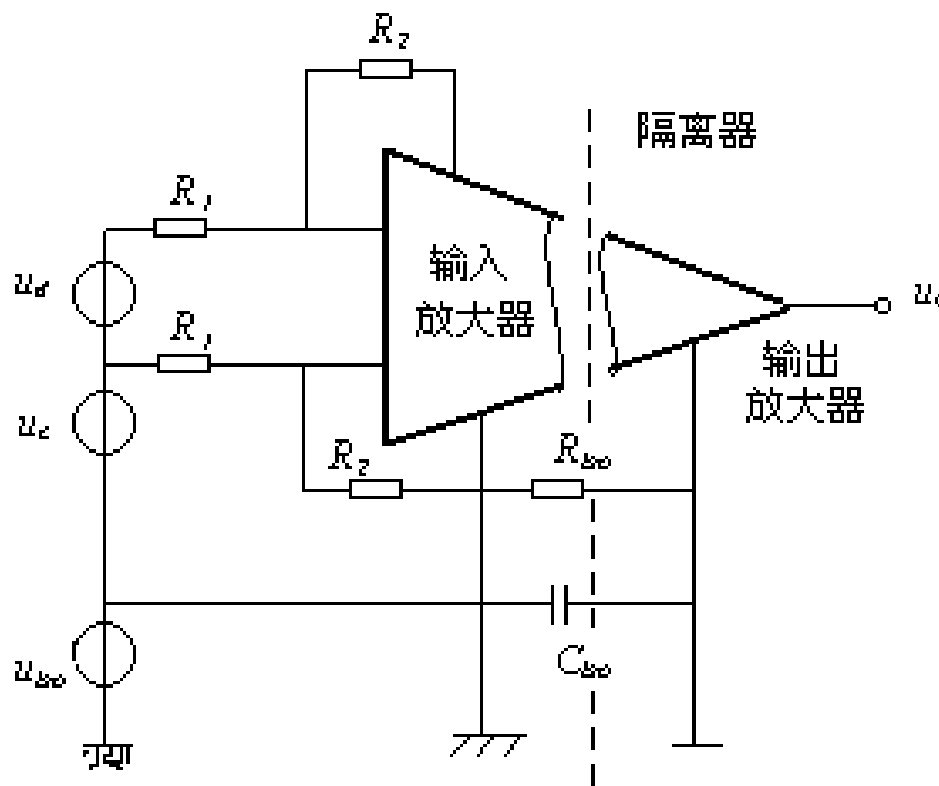
◆ 低噪声前置放大器是微弱信号检测的第一级，是任何一个微弱信号检测系统或装置的关键部件之一。

◆ 通过精心选择器件、合理采取抗干扰措施等手段，最大限度地降低或抑制放大器自身产生的噪声，从而保证信号的低噪声传输或放大。

◆ 低噪声放大器产品：PARC的113、116、118型； TOREX的XC2401、2404型

# 5.1.3 前置放大器

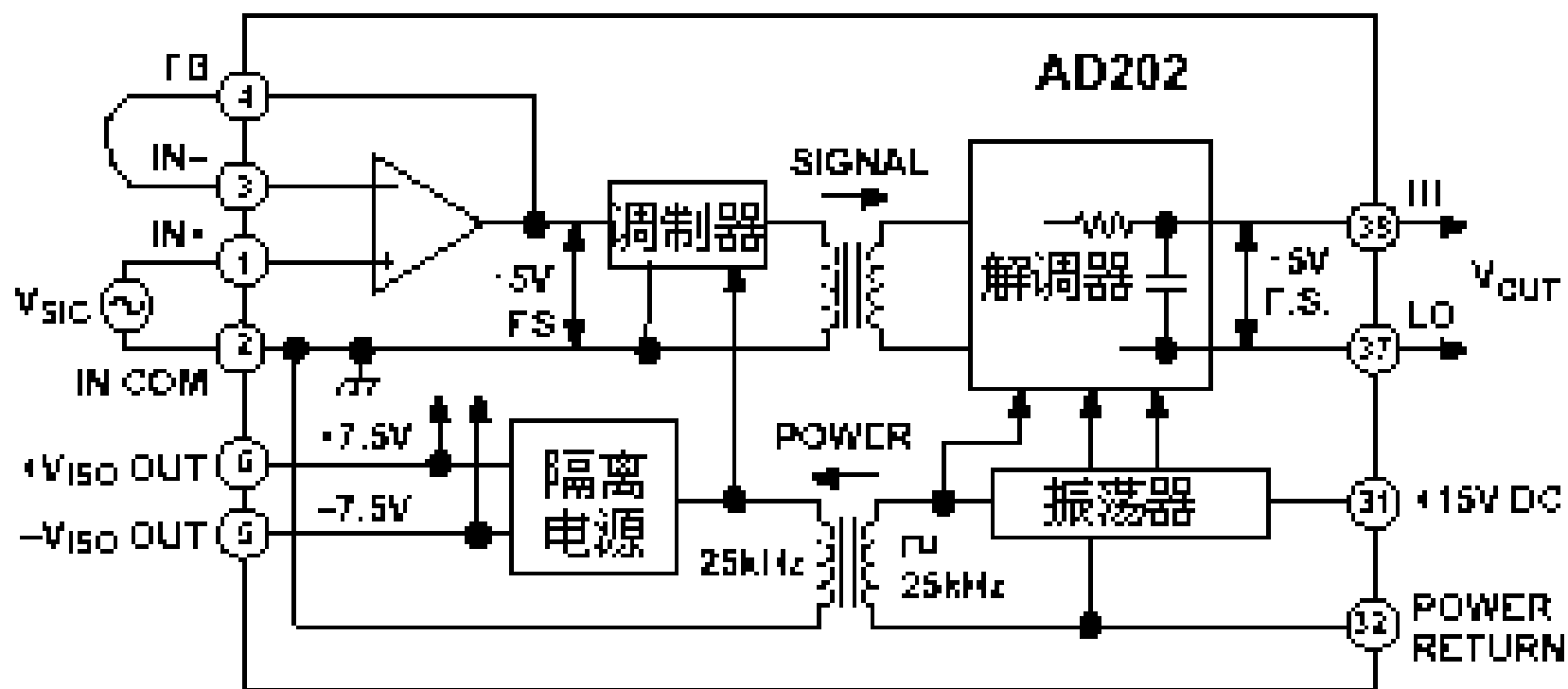
## 4. 隔离放大器



- ◆ 隔离放大器由输入放大器、输出放大器、隔离器以及隔离电源等几部分组成；
- ▶ 常用的隔离放大器主要有**电磁（变压器）耦合和光电耦合**两种形式。包括有光、超声波、无线电波和电磁等方式。
- ▶ 隔离运算放大器是指输入、输出没有电气联系。保证输入、输出更好的隔离。

# 5.1.3 前置放大器

## 隔离放大器实例：AD202



## 5.1.2 前置放大器



### 隔离放大器的作用

- ◆ 排除干扰信号;
- ◆ 保证人身安全考虑。输入端往往是接大电压，输出端（测量端）接小电压，对测量人员有益。

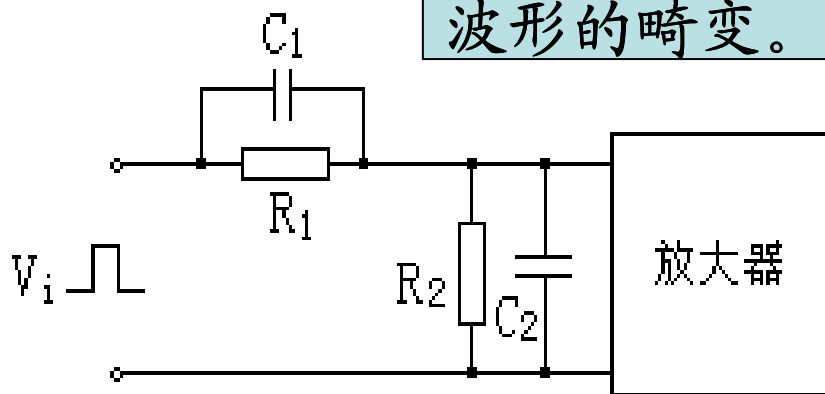
# 5.1.3 前置放大器

## 5. 量程变换

- ◆ 低频信号
- ◆ 高频信号

脉冲分压器

当  $R_2C_2=R_1C_1$  时，脉冲分压器的传递函数与信号频率无关。此时即使输入为高频信号，脉冲分压器的输出波形也不会发生畸变。克服了在对高频信号进行分压时，由于分布电容的影响所导致的分压电路输出波形的畸变。



$$= \frac{R_2}{R_2 + R_1 \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_1 C_1}}$$

# 5.1.4 相关技术与锁定放大器



## 1. 相关原理

噪声没有规律，不同时刻的噪声是没有关联的。利用信号的规律性（相关性）来检测信号，也可以利用一个与被测信号规律性部分相同的已知信号来检测被测信号，达到去除噪声的目的，这就是相关原理。

## 2. 相关函数

### 1) 自相关函数和自相关检测

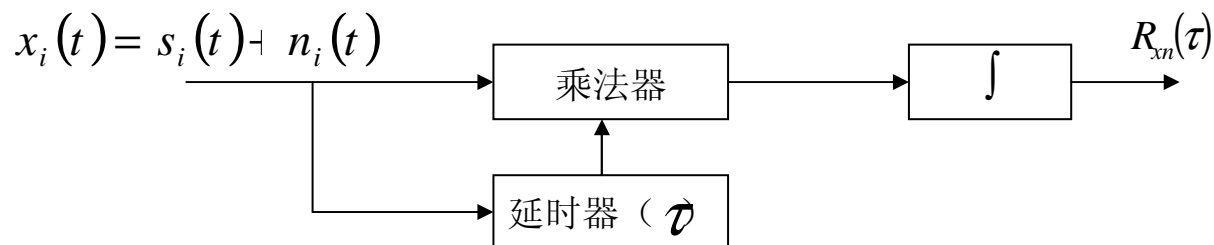
自相关函数:描述信号 $f(t)$ 与延时 $\tau$ 时间间隔后同一信号的相关性。

$$R(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t)f(t-\tau)dt$$

## 5.1.4 相关技术与锁定放大器



### 自相关检测原理框图



设输入  $x_i(t)$  由被测信号  $s_i(t)$  和噪声  $n_i(t)$  组成，得自相关输出为：

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t)x_i(t-\tau)dt = R_{ss}(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) + R_{nn}(\tau)$$

根据互相关函数的性质，由于信号  $s_i(t)$  与噪声  $n(t)$  不相关，得

$R_{sn}(\tau) = 0$ ,  $R_{ns}(\tau) = 0$ ，且随着  $\tau$  的增大有： $R_{nn}(\tau) \rightarrow 0$ ，则  $R_{xx}(\tau) = R_{ss}(\tau)$ 。

于是信号  $s(t)$  的自相关函数  $R_{sn}(\tau) = s(t)$  将包含  $s(t)$  所携带的信息。



## 5.1.4 相关技术与锁定放大器



### 2) 互相关函数和互相关检测

描述两个不同信号的相关性。

互相关函数:

$$R_{f,y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t)y(t-\tau)dt$$

设输入  $f(t)$  由被测信号  $s(t)$  和噪声  $n(t)$  组成,  $y(t)$  为参考信号, 则自相关输出为:

$$R_{fy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)y(t-\tau)dt = R_{sy}(\tau) + R_{ny}(\tau)$$

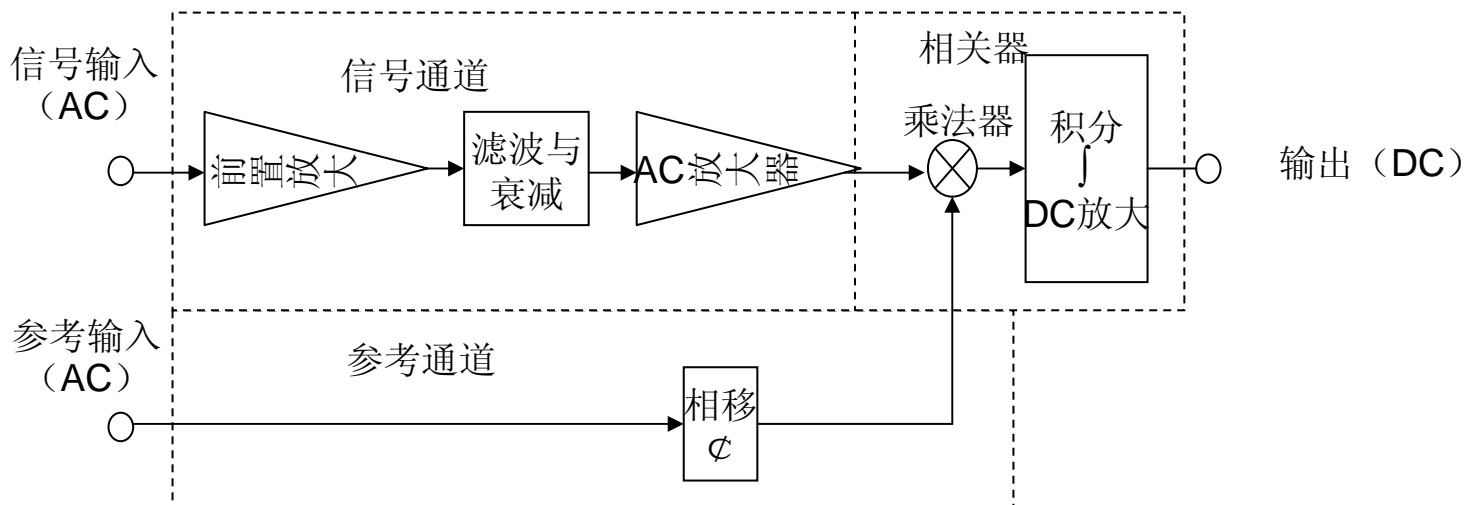
当参考信号  $y(t)$  与被测信号  $s(t)$  相关, 而  $y(t)$  与噪声  $n(t)$  无相关性即  $R_{ny}(\tau) = 0$ , 于是:

$$R_{fy}(\tau) = R_{sy}(\tau)$$

尤其是当  $y(t)$  与被测信号  $s(t)$  同频、同相时, 二者相关性最大 ( $R_{sy}(\tau)$  最大)

# 5.1.4 相关技术与锁定放大器

## 3. 锁定放大器工作原理及组成



设输入信号为： $x(t) = S(t) + N(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) + N(t)$

$S(t)$ 为有用信号，幅值为 $A$ ，角频率为 $\omega_0$ ，初相角为 $\varphi$ ； $N(t)$ 为噪声。参考信号为 $y(t) = B \sin \omega_0(t + \tau)$ ， $\tau$ 为时间位移，则二者的互相关函数为：

## 5.1.4 相关技术与锁定放大器



$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T B \sin \omega_0 (t + \tau) [A \sin(\omega_0 t + \phi) + N(t)] dt = \frac{AB}{2} \cos(\omega_0 \tau - \phi) + R_{ny}(\tau)$$

由于参考信号  $y(t)$  与噪声  $N(t)$  互不相关，所以  $R_{ny}(\tau) = 0$ 。因此，

$$R_{xy}(\tau) = \frac{AB}{2} \cos(\omega_0 \tau - \phi)$$

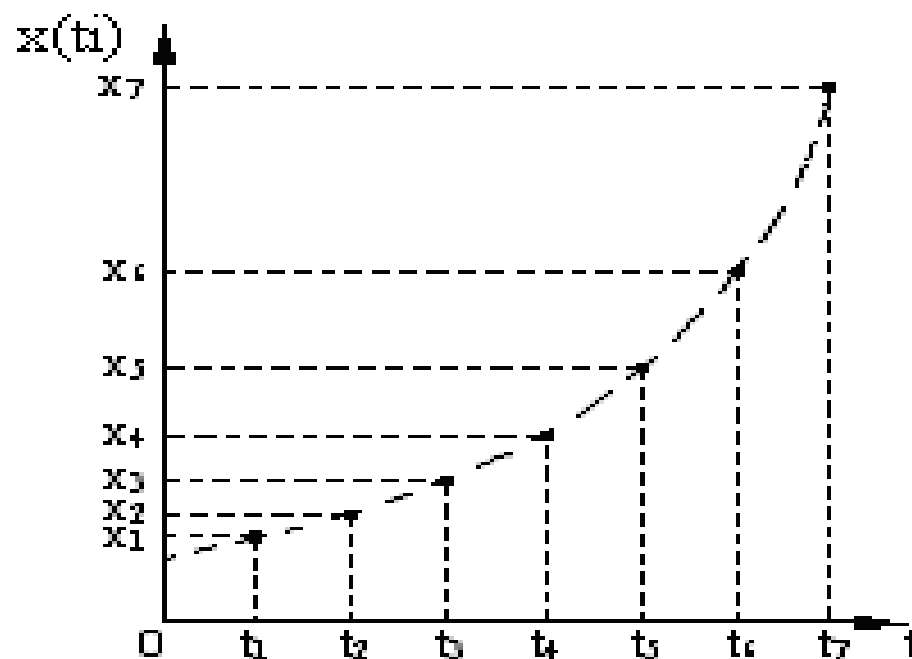
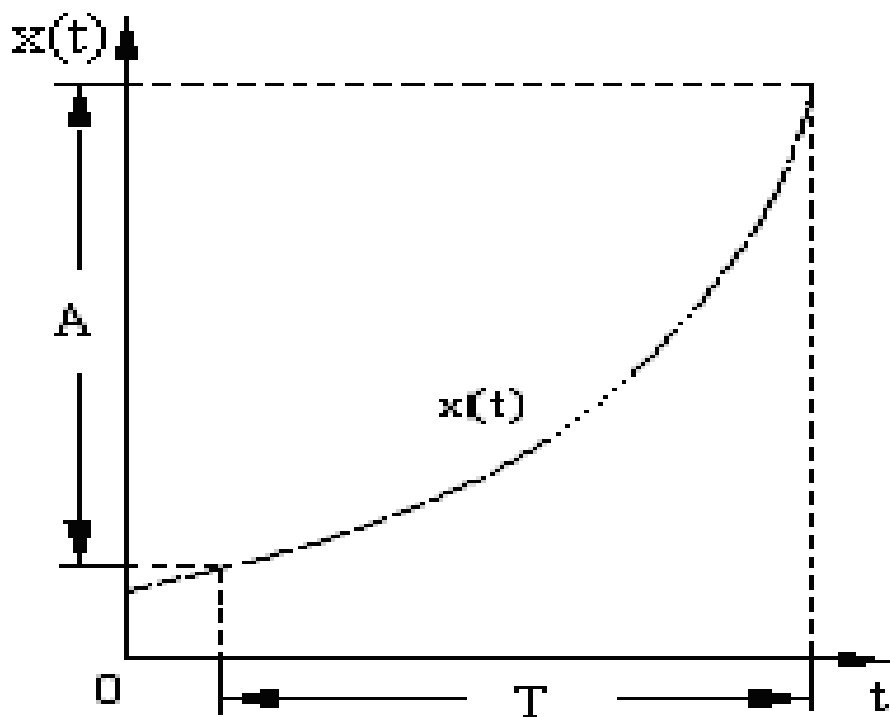
$R_{xy}(\tau)$  正比于有用信号的幅值。若  $\omega_0 \tau - \phi = 0$ ，则  $R_{xy}(\tau)$  取最大值。

由以上分析可知，锁定放大器就是利用噪声信号不可能与待测信号同频同相的特点，利用一个与待测信号同频的参考信号，通过对参考信号相位搜索，在满足与待测信号同相的条件下，最有效地检测出待测信号，并同时消除噪声信号的影响。

# 5.2 数据采集系统

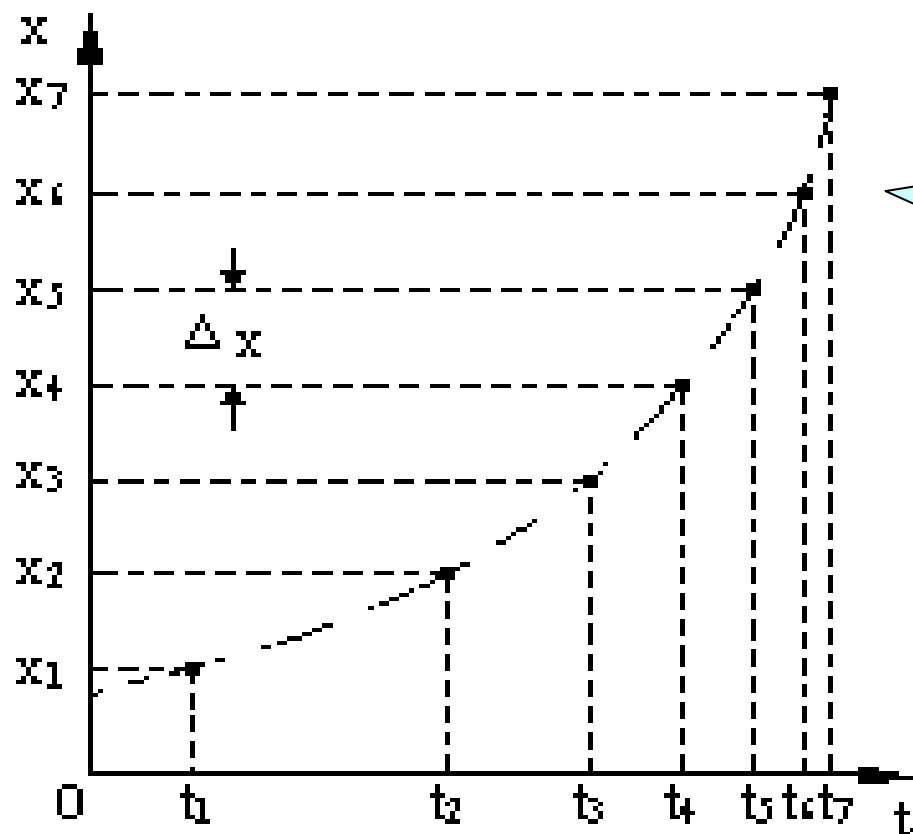
作用：连续量的离散化（时间）和量子化（幅值）

## 5.2.1 连续量的离散化



# 5.2 数据采集系统

## 5.2.2 连续量的量子化

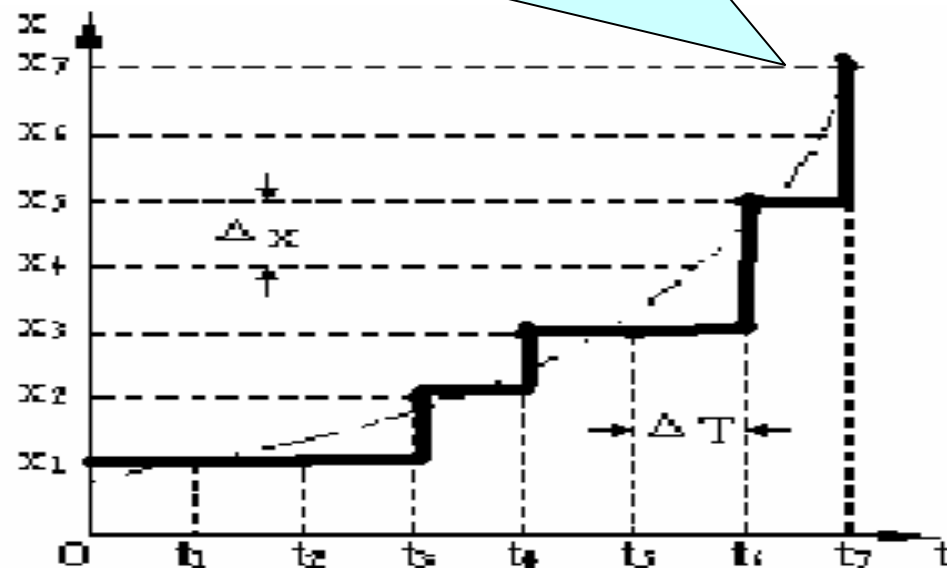
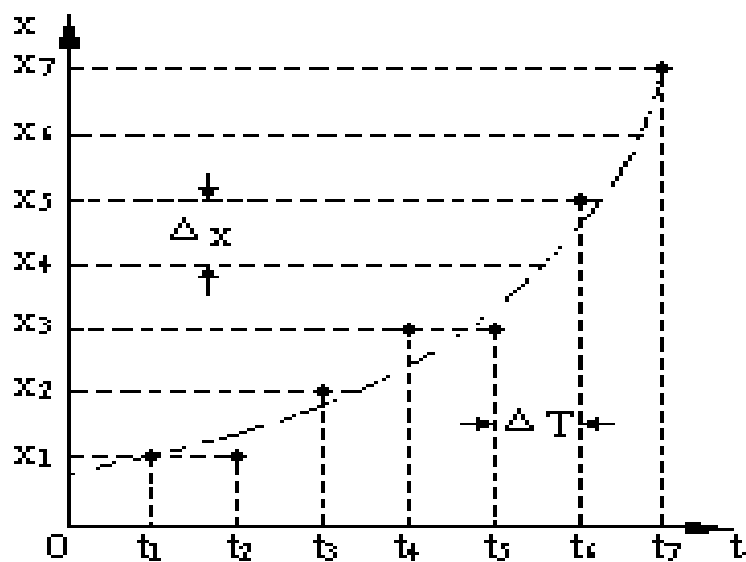


若以固定量值  $\Delta x$  为量距增量对连续量的幅值进行采样，称为幅值的量子化。

# 5.2 数据采集系统

## 5.2.3 连续量的离散化和量子化

遵守四舍五入的原则，连续量 $x(t)$ 经离散化和量子化后是阶梯型变化量，不能全面地反映 $x(t)$ 函数的实际情况，带来了的量化误差



**A/D转换器的作用：模拟量转换为数字量。**

量化误差：

Q——量化值，最低有效值所对应的模拟输入量



## 5.2.4 A/D转换器



**A/D转换器的作用：**模拟量转换为数字量；

**A/D转换器的分类：**

**A/D转换器的主要技术指标**

◆ **量化误差：** $e=Q/2$ ,  $Q = \Delta X = \frac{V_{F.S}}{2^n}$

◆ **转换时间：**指完成一次**A/D**转换所需时间

◆ **分辨力：**指能够引起**A/D**转换器变化一个字的输入量的变化量。对于**n**位**A/D**转换器中，其分辨力为 $1/2^n-1$ ，约等于 $1/2^n$ ，或直接称为**n**位分辨力。

◆ **其它**

## 5.2.5 D/A转换器及主要参数



### 1. D/A转换器的作用与分类

**作用：**将计算机系统输出的数字量转换为模拟量。

**分类：**并行D/A转换器和串行D/A转换器，其中并行D/A转换器的转换速度极高。

### 2. D/A转换器的基本表达式

$$U_0 = \frac{U_R}{2^n} (a_n \cdot 2^0 + a_{n-1} \cdot 2^1 + \dots + a_1 \cdot 2^{n-1}) = \frac{U_R}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i$$

$\frac{U_R}{2^n}$  : D/A转换器的量化单位。

## 5.2.5 D/A转换器及主要参数



### 3. D/A转换器的技术参数

绝对精度

相对精度:

分辨率

建立时间

温度系数

其它参数

## 5.2.6 采样保持电路



### 1. 采样保持器的作用

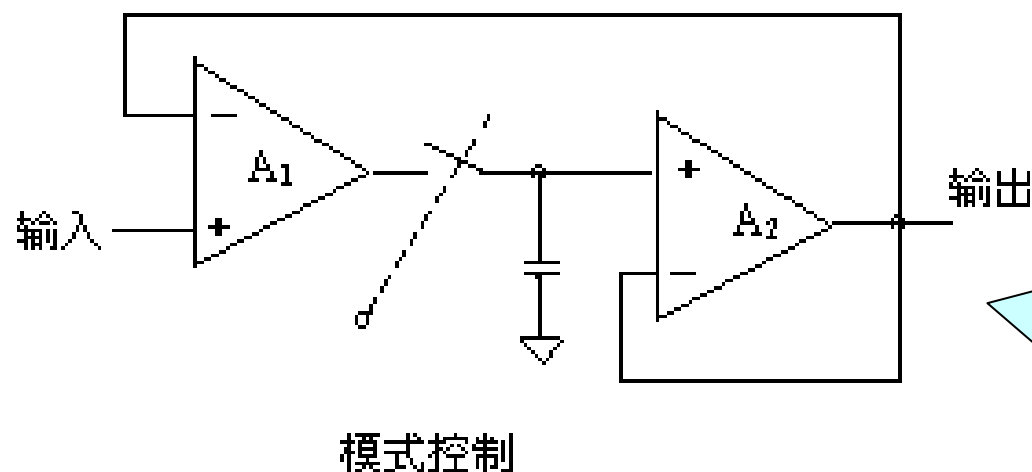
连续量 $V_x(t)$ 转变为时间序列值 $V_x(nT)$ 。

- ◆ 保证A/D转换器在模数转换期间输入电压是稳定不变的；
- ◆ S/H是以“快采慢测”的方法实现对快速变化信号进行测量的有效手段。

## 5.2.6 采样保持电路

### 2. 采样保持器的结构

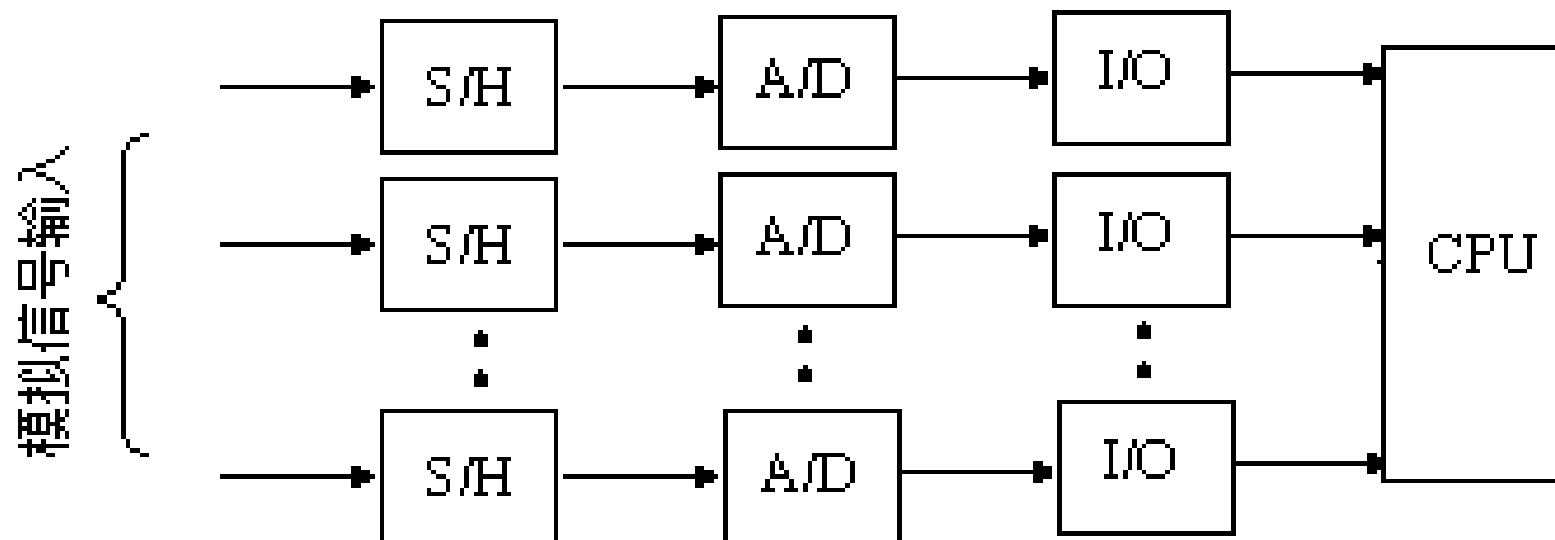
采样保持电路通常由保持电容器，输入输出缓冲放大器，逻辑输入控制的开关电路等组成



**采样期间：**开关闭合，模拟输入信号向保持电容充电，A2的输出电压跟随输入信号的变化。

**保持期间：**开关断开，电容器上的电压可维持不变，A2的输出电压送至A/D转换器进行模数转换。

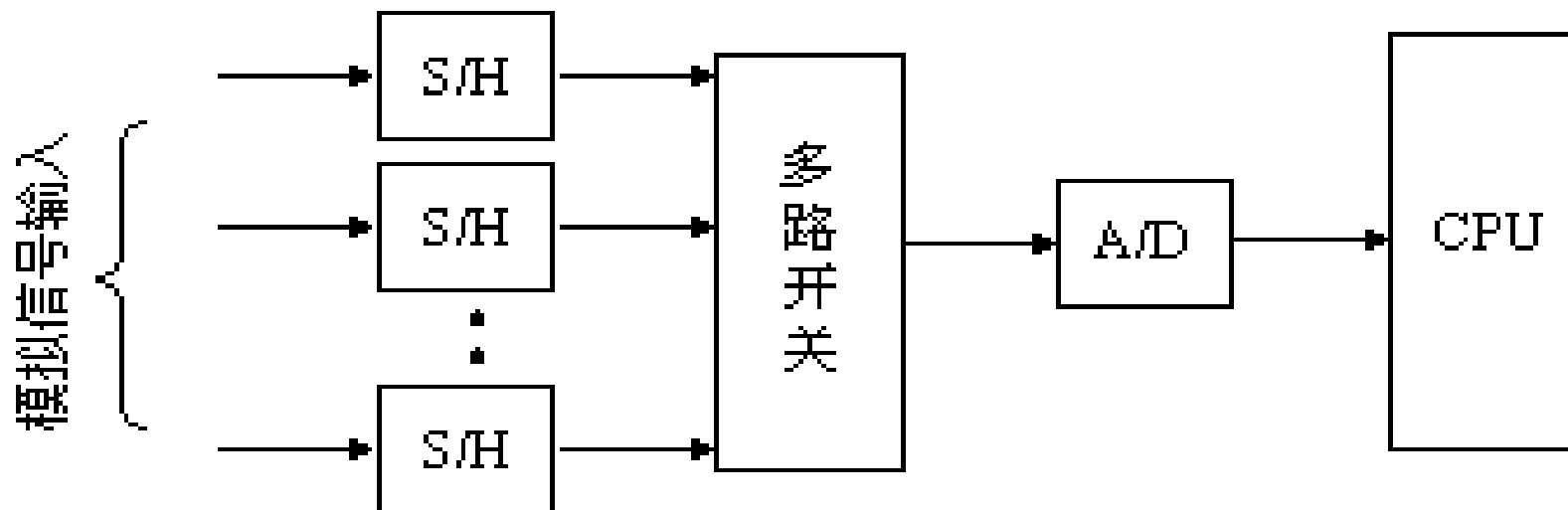
## 5.2.7 多通道数据采集系统的几种结构形式



多通道A/D转换

每个通道都有各自独立的采样保持器与A/D转换器，这种结构形式可以对各通道输入信号进行同步、高速数据采集。

## 5.2.7 多通道数据采集系统的几种结构形式

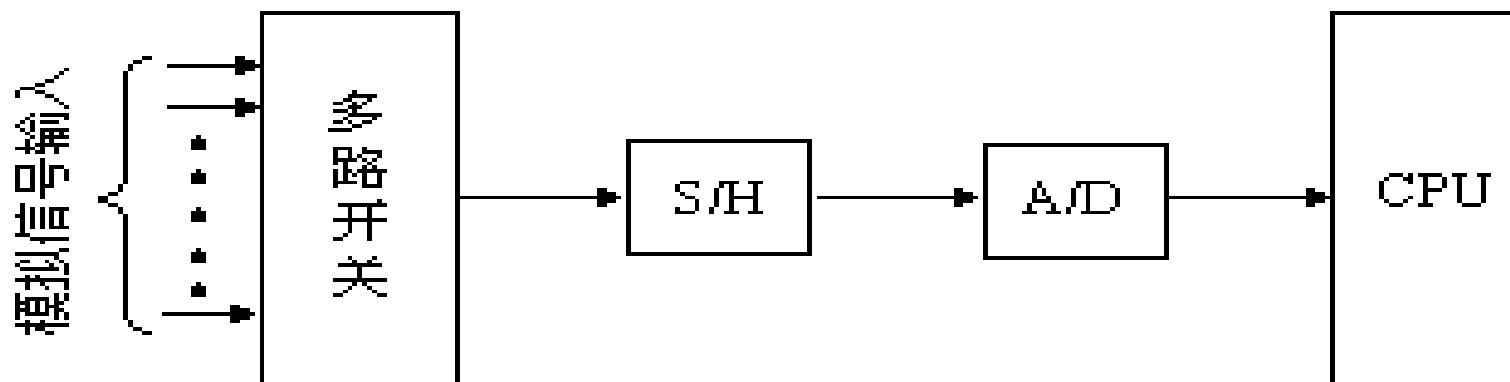


单通道共享A/D转换器

各通道有各自独立的采样保持器，但公用一个A/D转换器。通过多路开关分，对各路信号分时进行A/D转换。能够**实现多路信号的同步采集**，但**采集速度稍慢**。



## 5.2.7 多通道数据采集系统的几种结构形式



多通道共享采样保持器与A/D转换器

各通道公用一个采样保持器和A/D转换器。工作时，通过多路开关将各路信号分时切换，输入到公用的采样保持器中，实现**多路信号的分时采集**，而非**同步采集**。并且**采集速度最慢**。优点是**节省硬件成本**，适于对采集速度要求不高的应用场合。

## 5.3 测试系统设计举例

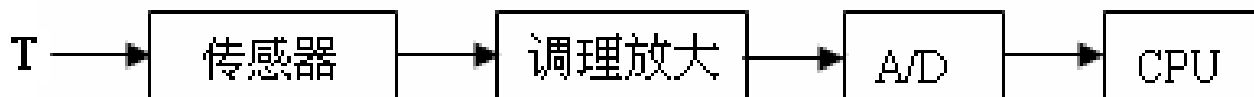


**例4-1:** 设计一个测温系统，采用热电阻 $R_T$ 作测温传感器。已知：电阻 $R\sim T$ 的关系式为： $R_T(T)=R_0(1+AT)$ 其中， $R_0=100$ （ $0^\circ\text{C}$ 时铂电阻值）， $A=3.9\times 10^{-3}^\circ\text{C}$ 要求：测温范围 $0\sim 200^\circ\text{C}$ ，分辨率为 $1^\circ\text{C}$ 。

- 1) 画出系统结构框图，说明各电路的作用。
- 2) 画出所选用的调理电路，写出温度输入和调理电路输出的关系式。
- 3) 选择A/D转换和放大器的放大倍数。
- 4) 证明所设计的系统能达到测温范围和分辨率要求。

## 5.3 测试系统设计举例

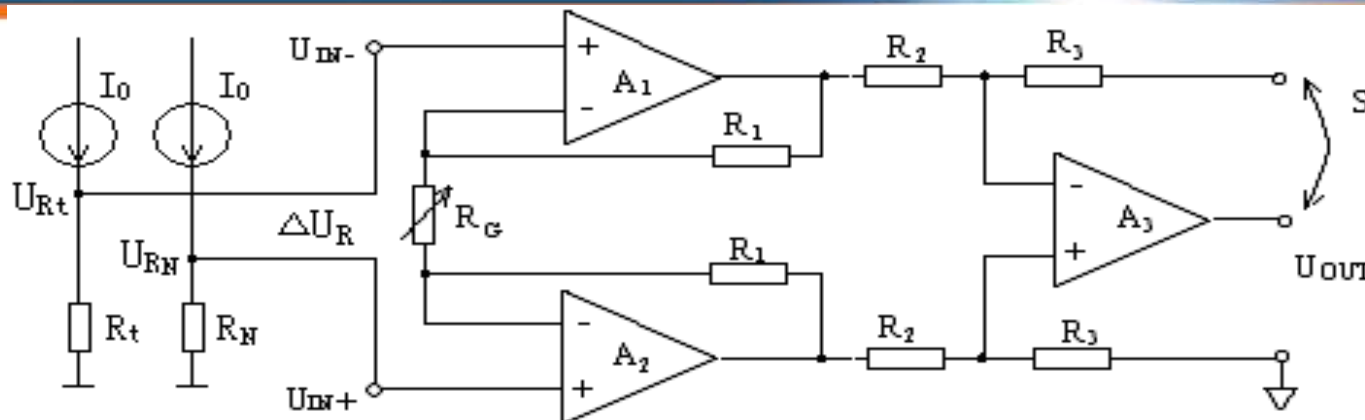
1) 系统结构框图，各环节的功能说明如下：



- 传感器：将输入的待测非电量信号（这里为温度信号）转换为电信号；
- 调理电路：将传感器输出的电信号进行调理放大，转换成适合A/D转换器输入的信号；
- A/D转换器：将模拟信号转换为数字信号，送入CPU系统；
- CPU系统：对信号进行分析处理并显示结果。

## 5.3 测试系统设计举例

### 2) 调理电路



### 3) 恒流源输出:

$$\begin{aligned}\Delta u_R &= u_{R_t} - u_{R_N} \\ &= R_0 I_0 [1 + AT] - R_0 I_0 \\ &= I_0 R_0 AT\end{aligned}$$

若  $I_0=3\text{mA}$ , 选择8位A/D, 满量程  $V_{FS}=10.24\text{V}$

则A/D的量化值为  $q = \frac{10.24}{2^8} = 40\text{mV}$

因为系统分辨率为  $1^\circ\text{C}$ , 所以当系统输入为  $1^\circ\text{C}$  时, 双恒流源输出  $\Delta u_R'$

$$\Delta u_R' = I_0 R_0 A \Delta t_{\min} = I_0 R_0 A \times 1 = 1.17\text{mV}$$

于是放大器的放大倍数应为:  $K = \frac{q}{s} = 34.2$ , 取  $K=35$

## 5.3 测试系统设计举例



4) 在选定以上放大倍数之后，测温范围则为：

$$T_{\max} = \frac{V_{FS}}{\Delta U_R' \times K} = \frac{10.24V}{1.17 \times 10^{-3} \times 35} = 250^{\circ}\text{C}$$

即测温范围为：0~250<sup>0</sup>C，大于0~200<sup>0</sup>C，因此系统设计满足要求。