《仪器系统设计基础》第三讲

信号调理及转换技术

仪器科学与工程系专业必修课

主讲: 宋开臣教授

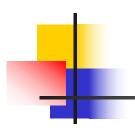
kcsong@zju.edu.cn

13600513662



信号调理技术讲座内容

- 一. 运算电路
- 二. 信号分离
- 三. 调制与解调
- 四. 模拟信号数字化
- 五. 模拟信号的重构
- 六. 细分与辨向电路

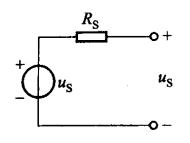


一. 运算电路

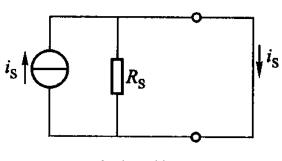
- 1.线性运算电路
- 2.对数、指数运算电路
- 3.微分和积分电路
- 4.绝对值、峰值、有效值运算电路



几个基本概 念



(a) 电压源等效电路



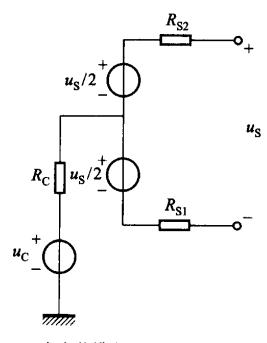
(b) 电流源等效电路

等效电路

共模电压、差模电压(常模电压)

差模放大倍数、共模放大倍数

共模抑制比

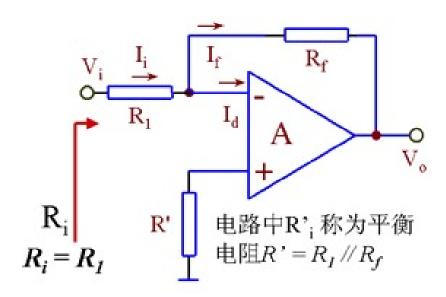


(c) 存在共模电压时的电压源等效电路

•

1. 线性运算电路

反相比例电路



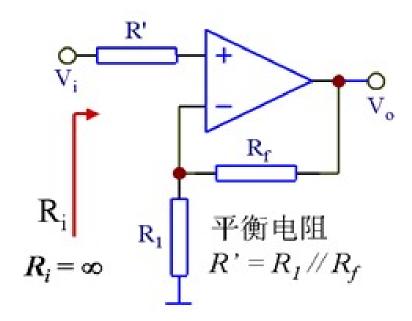
$$I_i = I_f \quad V_- = V_+ = 0$$

$$V_o = -\frac{Rf}{R_1}V_i$$

4

1. 线性运算电路

同相比例电路



$$V_{-} = V_{+} = V_{t}$$

$$V_{t} = \frac{R_{f}}{R_{f} + R_{1}} V_{o}$$

$$V_{o} = \left(1 + \frac{R_{f}}{R_{1}}\right) V_{t}$$

加减运算电路

$$V_{o1} = -R_f(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2})$$

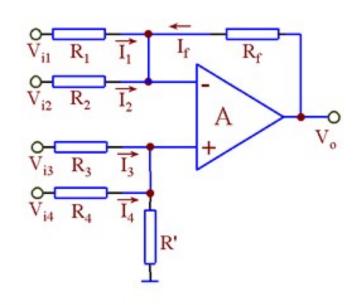
$$V_{i1} = V_{i2} = 0 \perp$$

$$R_p = R_3 // R_4 // R' \} R_n = R_1 // R_2 // R_f$$

$$R_n = R_1 // R_2 // R_f$$

$$R_n = R_p$$

$$V_{o2} = R_f \left(\frac{V_{i3}}{R_3} + \frac{V_{i4}}{R_4} \right)$$

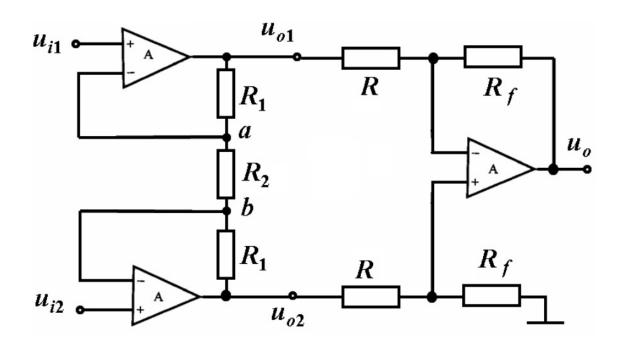


$$V_{o2} = R_f \left(\frac{V_{i3}}{R_3} + \frac{V_{i4}}{R_4} \right) \quad V_o = V_{o1} + V_{o2} = R_f \left(\frac{V_{i3}}{R_3} + \frac{V_{i4}}{R_4} - \frac{V_{i1}}{R_1} - \frac{V_{i2}}{R_2} \right)$$

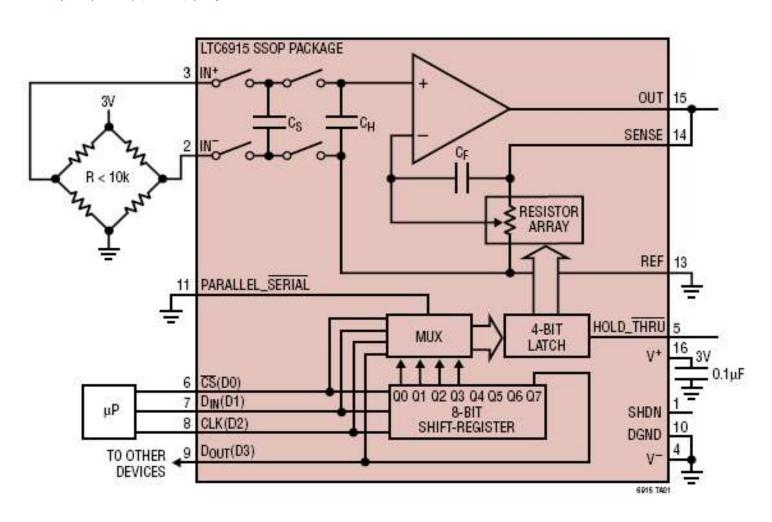


仪表放大器

$$u_o = -\frac{R_f}{R} \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) (u_{i1} - u_{i2})$$



程控增益放大器 (PGA)





2. 对数、指数运算电路

PN结V-I特性表达式

$$i_{\mathrm{D}} = I_{\mathrm{S}}(e^{v_{\mathrm{D}}/V_{T}} - 1)$$

其中

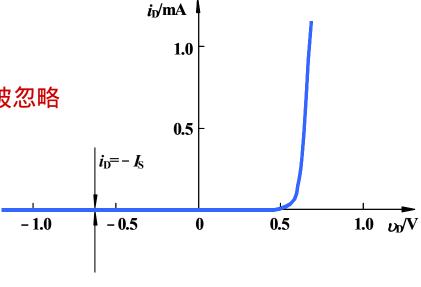
当vd>>VT时,-1项可以被忽略 此时该时变为对数函数

 $I_{\rm S}$ ——反向饱和电流

 V_{T} ——温度的电压当量

且在常温下(T=300K)

$$V_T = \frac{kT}{q} = 0.026 \text{V}$$



PN结的伏安特性

2. 对数、指数运算电路

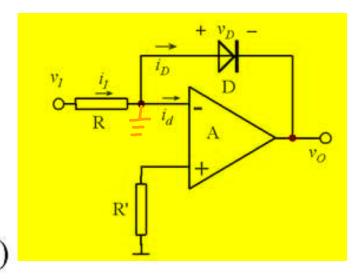
对数运算电路

$$i_D = i_I = \frac{v_I}{R}$$

$$v_D = -v_O$$

$$i_D = I_s(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$$

$$\approx I_s e^{\frac{v_D}{V_T}} = I_s e^{\frac{-v_O}{V_T}} = \frac{v_I}{R}$$



 $v_O \approx -V_T \ln \frac{v_I}{DI}$

用途: 对信号取对数,控制信号 大小信息



2. 对数、指数运算电路

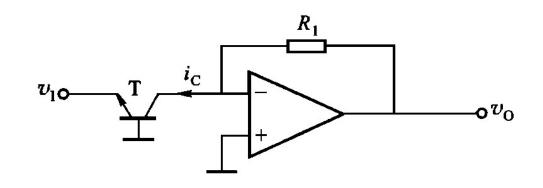
指数运算电路

输入端加入负电压,可得

$$i_C = I_s e^{\frac{v_{BE}}{v_T}} = I_s e^{-\frac{v_I}{v_T}}$$

于是得输出电压

$$v_o = I_C R_1 = I_s R_1 e^{-\frac{v_I}{v_T}}$$



3. 微分和积分电路

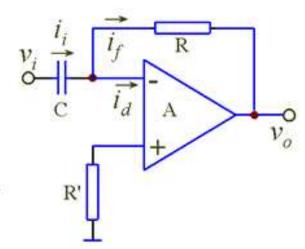
微分电路

$$i_{c}(t) = C \frac{dv_{c}(t)}{dt}$$
$$v_{c}(t) = \frac{1}{C} \int i_{c}(t) dt$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt$$

$$i_c(t) = C \frac{dv_i(t)}{dt} = -\frac{v_o(t)}{R}$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$



3. 微分和积分电路

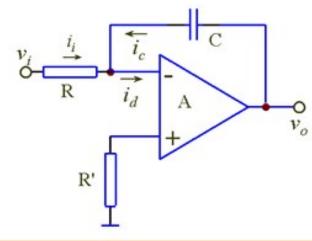
积分电路

$$i_{c}(t) = C \frac{dv_{c}(t)}{dt}$$

$$v_{c}(t) = \frac{1}{C} \int i_{c}(t) dt$$

$$i_{c}(t) = -C \frac{dv_{c}(t)}{dt}$$

$$= \frac{v_{i}(t)}{R}$$

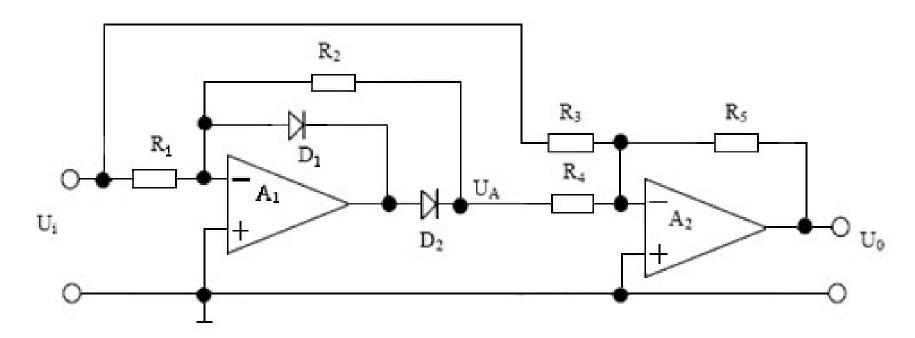


$$i_{c}(t) = -C \frac{dv_{o}(t)}{dt} \qquad v_{o}(t) = -\frac{1}{C} \int_{t_{1}}^{t_{2}} i_{c}(t) dt + v_{c} \Big|_{t_{1}}$$

$$= \frac{v_{i}(t)}{R} \qquad = -\frac{1}{RC} \int_{t_{1}}^{t_{2}} v_{i}(t) dt + v_{c} \Big|_{t_{1}}$$



绝对值运算电路

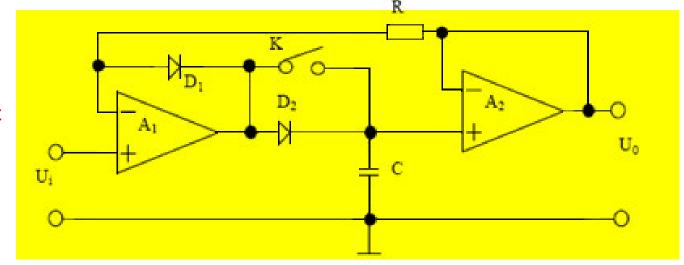


全波线性绝对值电路



峰值运算电路

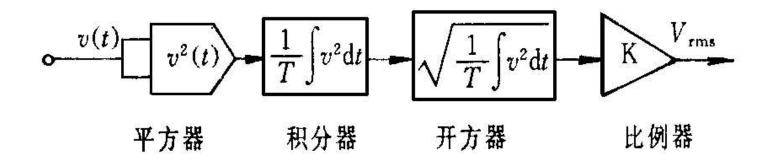
前后两个都是 电压跟随器



峰值运算电路的基本原理就是利用二极管单向导电特性,使电容单向充电,记忆其峰值。后级电压跟随器具有较高的输入阻抗,电容C可以保持峰值较长时间。开关K的作用是为了在新的测量开始时将电容C放电。

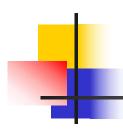


有效值运算电路

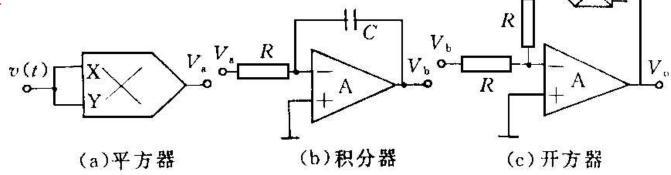


测量原理如图,根据电压有效值的定义

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$$



有效值运算电路



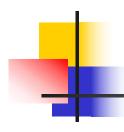
$$V_{b} = -\frac{1}{RC} \int_{0}^{T} V_{a} dt =$$

$$-\frac{T}{RC} \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{T} V_{a} dt \right) =$$

$$-K_{2} \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{T} K_{1} v^{2}(t) dt \right) =$$

$$-K_{1}K_{2} \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v^{2}(t) dt \right)$$

$$V_{o} = \sqrt{\frac{1}{K_{3}}} V_{c} = \sqrt{-\frac{1}{K_{3}}} V_{b} = \sqrt{\frac{K_{1}K_{2}}{K_{3}}} \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v^{2}(t) dt\right) = K \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v^{2}(t) dt}$$



概述

在传感器获得的测量信号中,往往 包含有许多与被测量无关的信号,如 果这些信号在频率上与有用信号有区 别,可用信号分离电路,抑制噪声, 取出有用的信号。

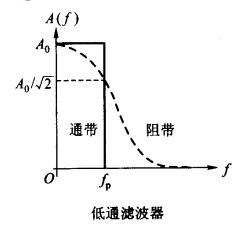
基本概念

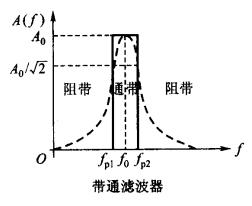
通带增益 A_0

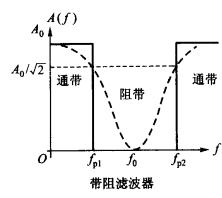
谐振频率 f_0 、截至频率 f_p

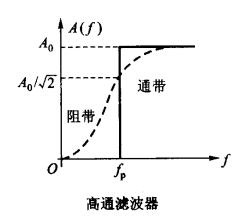
频带宽度BW

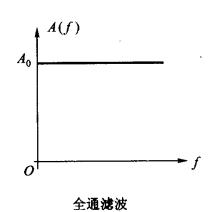
品质因数Q、阻尼系数 ξ





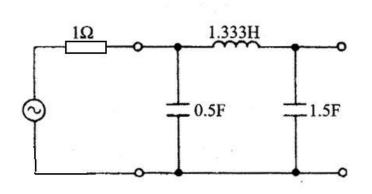


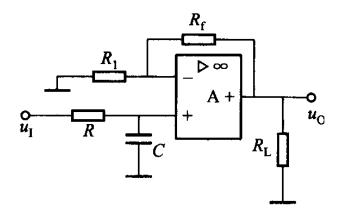






无源滤波器和有源滤波器





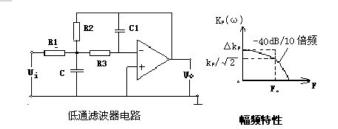
$$A(\omega) = \frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_0}} (1 + \frac{R_f}{R_1})$$

$$\begin{cases} \omega_0 = \omega_p = \frac{1}{RC} \\ A_0 = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \end{cases}$$

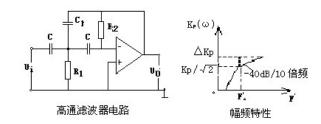


有源滤波器的种类

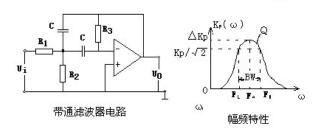
低通滤波器



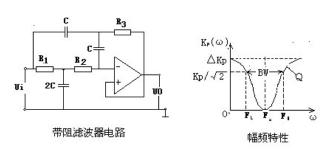
高通滤波器



带通滤波器



带阻滤波器

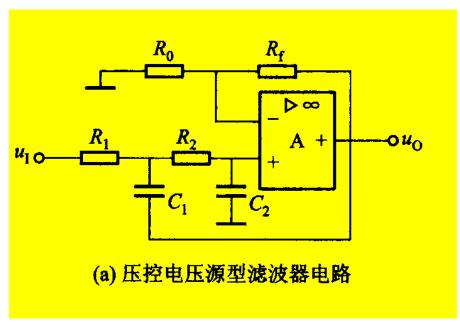


例:二阶RC有源压控电压源低通滤波器

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + j\alpha \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ \xi = \frac{R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_1 C_1 (1 - A_0)}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \end{cases}$$

$$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_0}$$



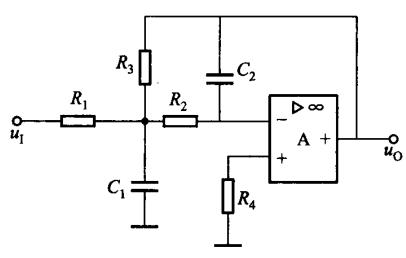
4

二. 信号分离

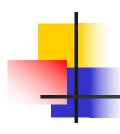
例:二阶RC有源无限增益低通滤波器

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + j\alpha \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}} \\ \xi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{R_1 \sqrt{R_2 R_3}} \\ A_0 = -\frac{R_3}{R_1} \end{cases}$$



(b) 无限增益多路负反馈型滤波器电路



三.调制与解调

概述

作用:

为了<u>提高仪器选择信号、排除干扰的能力</u>,常常采用信号调制的方法;从经放大后的高频已调波中恢复出调制信号的过程称为解调。

信号调制的方式可以分为调幅、调频。



三. 调制与解调

调幅式测量电路

调幅:

传感器调制:交流调制、机械或光学调制 电路调制:乘法器、开关电路、相加

解调:二极管与三极管包络检波

调幅就是用调制信号x去控制高频载波信号的幅值。常用的是线性调幅,即让调幅信号的幅值 按调制信号x的线性函数变化。

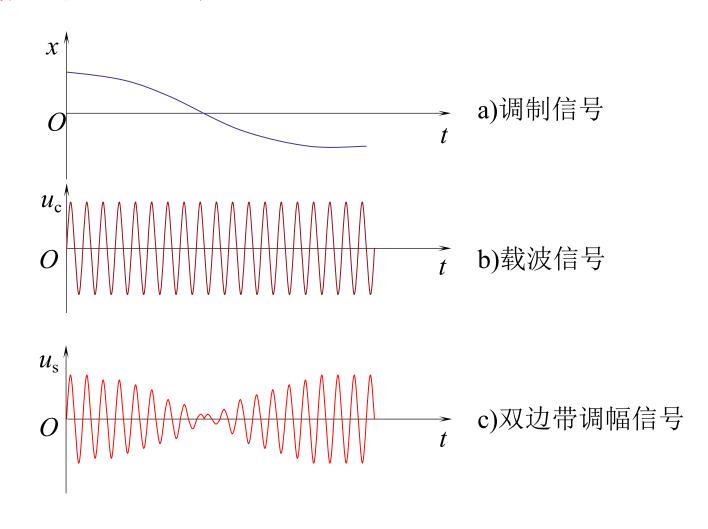
调幅信号的一般表达式可写为:

$$u_{s} = (U_{m} + mx)\cos\omega_{c}t$$



三.调制与解调

调幅式测量电路



三. 调制与解调

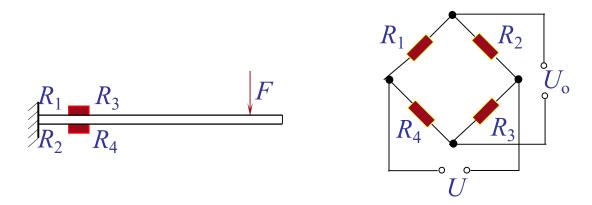
调幅式调制电路

一、传感器调制

为了提高测量信号抗干扰能力,常要求从信号一形成就已经是已调信号,因此常常在传感器中进行调制。

(1) 通过交流供电实现调制

如,电阻式传感器、电感式传感器和电容式传感器。



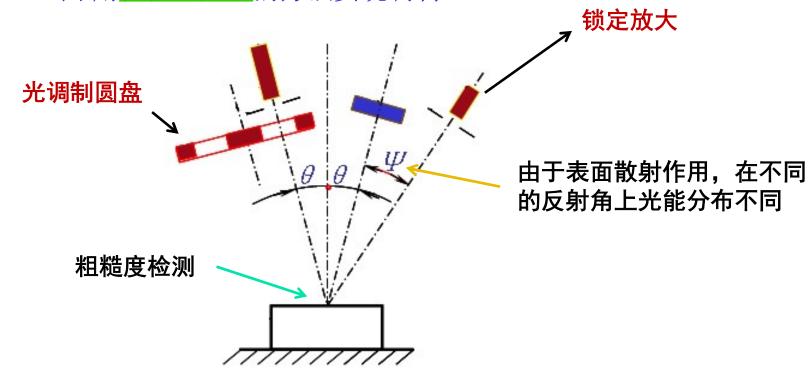
应变式传感器输出信号的调制



三.调制与解调

调幅式调制电路

- 一、传感器调制
- (2) 用机械或光学的方法实现调制

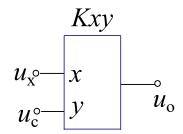


三. 调

三.调制与解调

调幅式调制电路

- 二、电路调制
- (1)乘法器调制



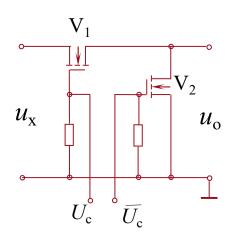


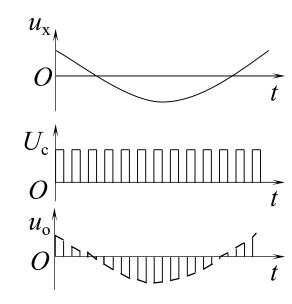
三.调制与解调

调幅式调制电路

二、电路调制

(2) 开关电路调制





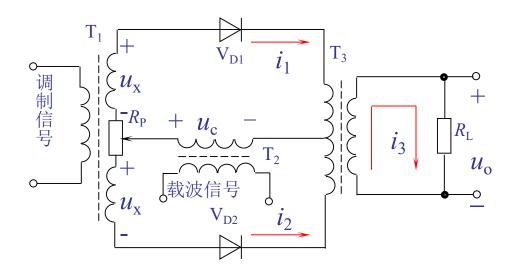


三.调制与解调

调幅式调制电路

二、电路调制

(3)信号相加调制

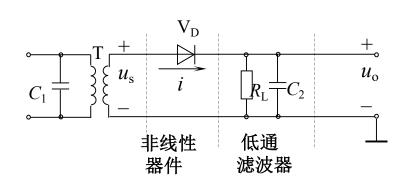


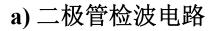
•

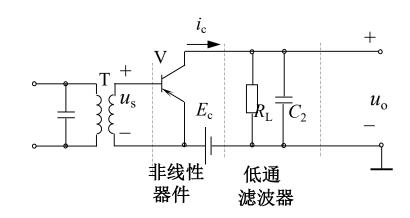
三.调制与解调

调幅式解调电路

二极管与三极管包络检波







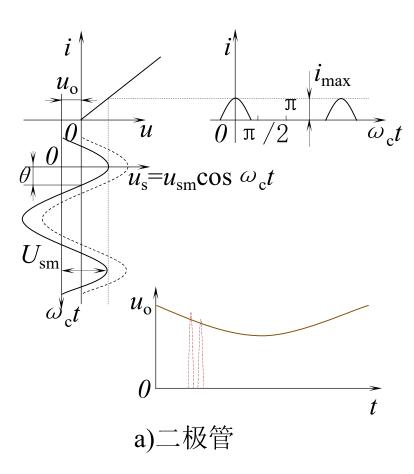
b) 晶体管检波电路

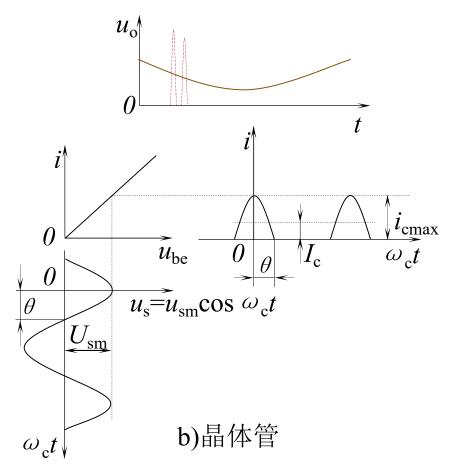


三.调制与解调

调幅式解调电路

二极管与三极管包络检波







三. 调制与解调

调频式测量电路

调频:

传感器调制、电路调制

解调: 微分鉴频、窄脉冲鉴频

调频就是用调制信号x去控制高频载波信号的 频率。常用的是线性调频,即让调频信号的频率 按调制信号x的线性函数变化。

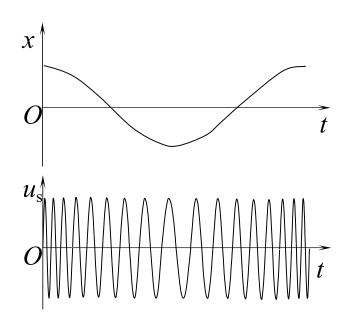
调频信号的一般表达式可写为:

$$u_s = U_{\rm m} \cos(\omega_c + mx)t$$



三.调制与解调

调频式测量电路



a) 调制信号

b) 调频信号

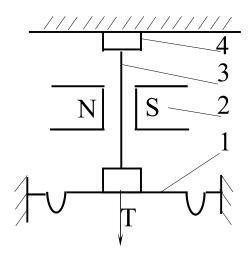
调频信号的波形



三.调制与解调

调频式调制电路

一、传感器调制



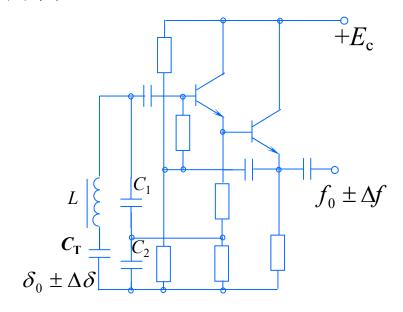
测力或压力的振弦式传感器

4

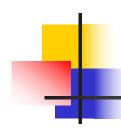
三. 调制与解调

调频式调制电路

二、电路调制



电容三点式LC振荡器调频电路



三.调制与解调

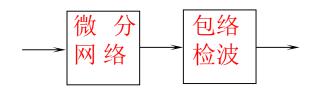
调频式解调电路

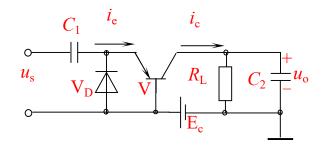
(1) 微分鉴频

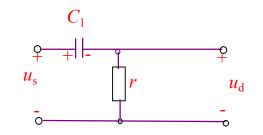
将调频信号

us=Umcos(wc+mx)t 对t求导数得到

-*U*m (*wc*+*mx*)sin(*wc*+*mx*)*t*这一调频调幅信号。利用包络检波检出其幅值变化,即可得到含有调制信号的信息 *U*m (*wc*+*mx*)。





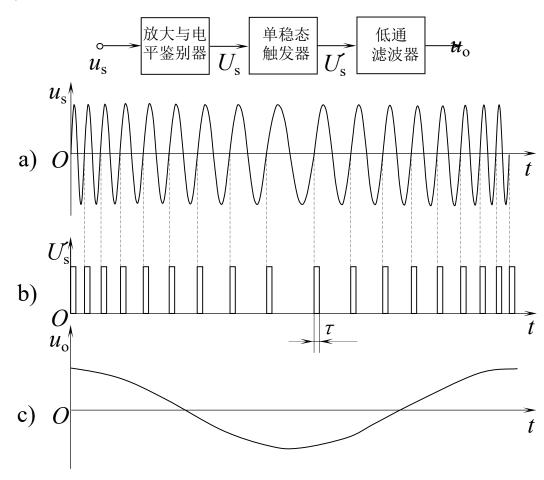




三.调制与解调

调频式解调电路

(2) 窄脉冲鉴频电路



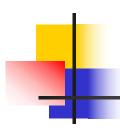


四. 模拟信号数字化

- 1、电压-频率转换 用频率的大小来表征电压的大小
- 2、采样与量化
- 3、双积分式A/D转换

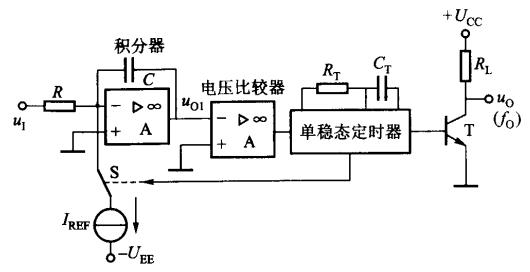
见电工"数字电压表"PPT

- 4、逐次逼近式A/D转换器
- 5、增量调制型(Σ-Δ型)A/D转换
- 6、流水线式A/D转换器

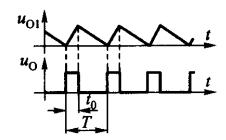


1、电压-频率转换

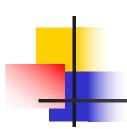
电压一频率转换<u>将模拟输入电压转换成与之成正比的振荡</u> 频率。可提高信号传输的抗于扰能力,还可节省系统接口 资源。



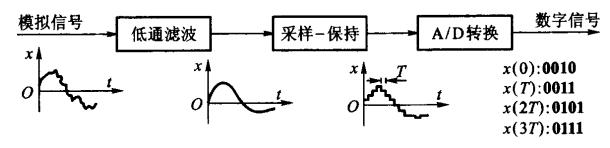
$$f = \frac{u_I}{RI_{REF}t_0}$$



(b) 积分器与单稳定时器输出波形



2、采样与量化

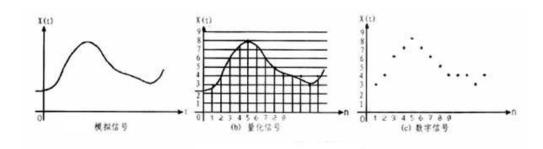


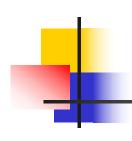
A/D 转换系统构成

采样过程:

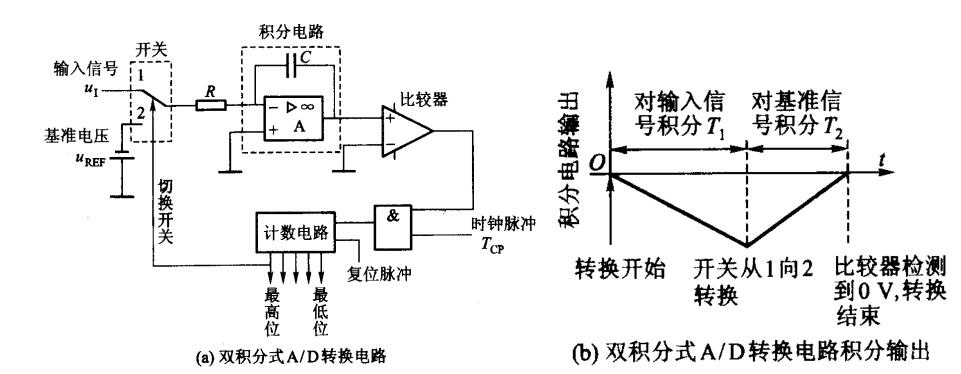


量化原理:





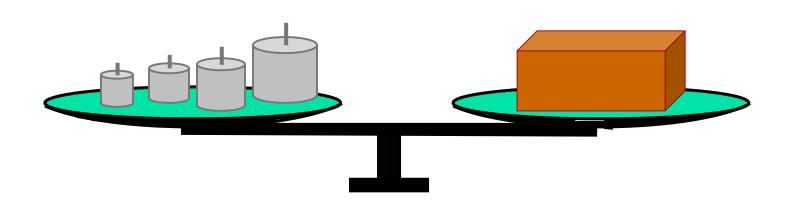
3、双积分式A/D转换





4、逐次逼近式A/D转换器

逐次逼近式A/D转换器是一种采用对分搜索原理来实现A/D转换的方法。

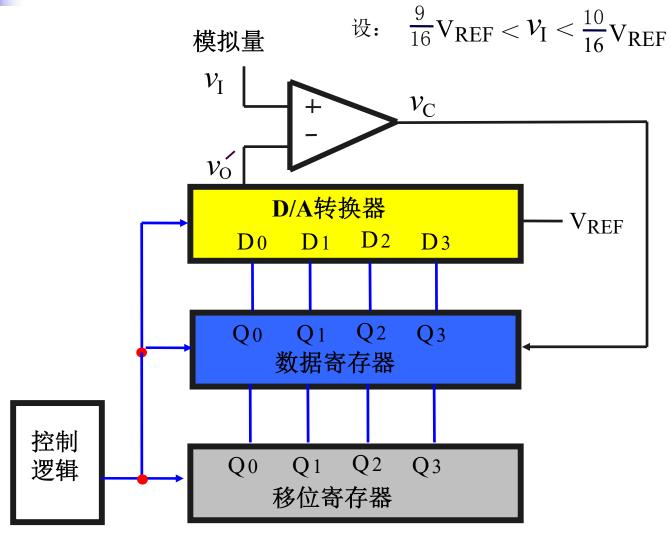


$$G \approx d_3g_3 + d_2g_2 + d_1g_1 + d_0g_0$$

$$d_i < \frac{1}{0}$$
 有效



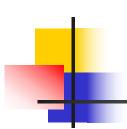
4、逐次逼近式A/D转换器





5、增量调制型(Σ-Δ型)A/D转换

■ Σ-Δ式A/D转换器也称为过采样式 A/D转换器。是一种以极低分辨率 (通常1位)和极高的采样速度将 模拟信号转换为数字信号的A/D转换器。利用过采样和数字滤波技术,降低数据输出率,从而提高分辨率 (一般在16位以上)。

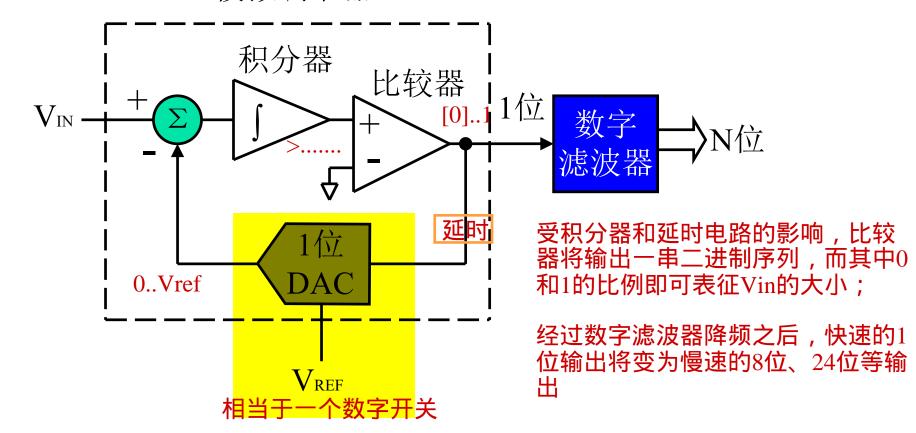


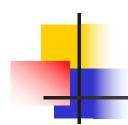
5、增量调制型(Σ-Δ型)A/D转换

■ Σ - Δ 式A/D转换器工作原理

前提条件: Vin<Vref, 且Vin为单极性

模拟调节器

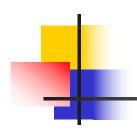




5、增量调制型(Σ-Δ型)A/D转换

$(\Sigma-\Delta 型)$ A/D转换的特点

- 1. 模拟器件数字化,性能稳定。
- 2. 速度快,分辨率高。
- 3. 不需要采样保持器。
- 4. 不需要抗混叠滤波器。
- 5. 内部数字滤波。
- 6. 存在数据刷新周期,不适合多路切换。



6. 流水线式A/D转换器

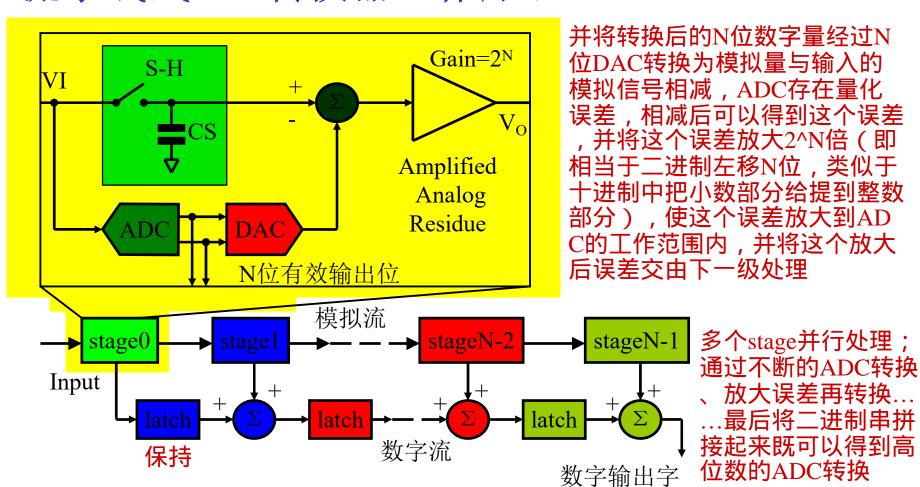
■流水线(Pipe Line)式A/D转换器是一种对于几Msps到100Msps的8位高速和16位低速模数转换器(ADC),流水线已经成为最流行的模数转换器结构,它可以涵盖很广的应用范围,包括CCD成像、超声成像、数字接收、基站、数字视频(如HDTV)、xDSL、线缆调制解调器以及快速以太网。



6. 流水线式A/D转换器

流水线式A/D转换器工作原理N位ADC转换为N位的数字量;

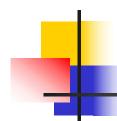
对于每个stage,





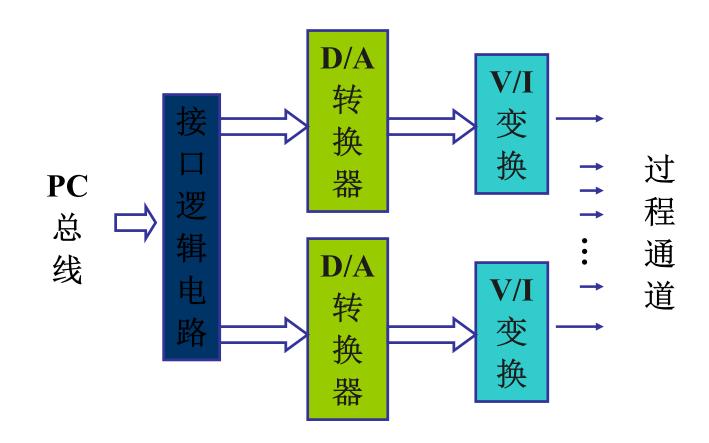
五. 模拟信号的重构

- 1、模拟信号的重构
- 2、D/A转换器



1. 模拟信号的重构

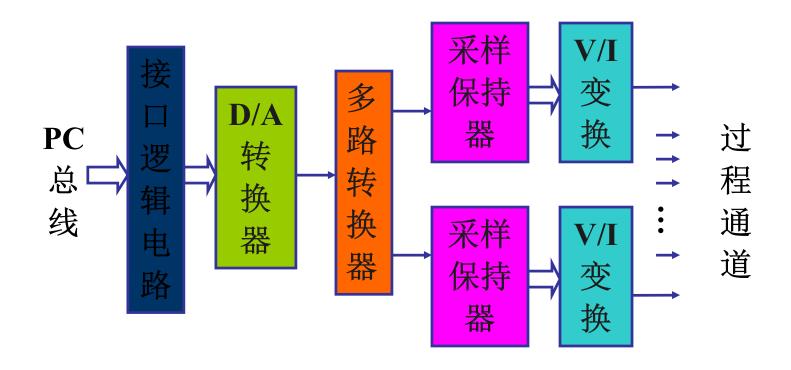
一个通路设置一个D/A的形式

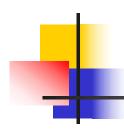




1. 模拟信号的重构

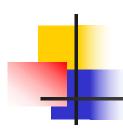
多个通路共用一个D/A的形式





2. D/A转换器

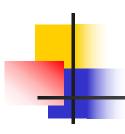
- D/A转换器<mark>有并行和串行</mark>两种,在工业控制中,主要使用并行D/A转换器。D/A转换器的原理可以归纳为"按权展开,然换器的原理可以归纳为"按权展开,然后相加"。因此,D/A转换器内部必须要有一个解码网络,以实现按权值分别进行D/A转换。
- ■解码网络通常有两种: 二进制加权电阻 网络和T型电阻网络。



2. D/A转换器

T型电阻网络四位D/A转换器的工作原理 -节点电流恰好对半分 Vref [′]I3 可等效为串联电阻R; 前级同理 2R 2R 2R 2R 虚断: δ So S₃ S_2 S_1 Rf Vout=Irf*Rf 0017 0 p i \ 1 0 p i \p1 0 e i \ 1 Lout1 A =-Iout1*Rf OA Vout 由DAC寄存器控制的· ·组数字开关 b3 b2 b_1 bo. 四位DAC寄存器 $Iout1 = S0*I0^0 + S1*I0^1 + S2*I0^2 + S3*I0^3$

其中I0=Vref/R*(1/2^3) DAC寄存器(高位到低位):S3 S2 S1 S0



六. 细分电路

- 1、概述
- 2、直传式细分电路
- 3、平衡补偿式细分电路

1.概述

信号<mark>细分</mark>电路又称插补器,是采用电路手段对周期性的测量信号进 行插值提高仪器分辨力的一种方法。

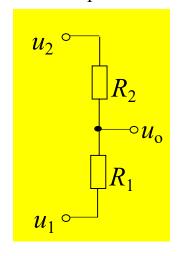
由于位移传感器一般允许在正、 反两个方向移动,故在进行计数和 细分电路的设计时往往要综合考虑 辨向的问题。



电阻链分相细分

设电阻链由电阻 R_1 和 R_2 串联而成,电阻链两端加有交流电压 u_1 、 u_2 ,其中, u_1 = $E\sin\omega t$, u_2 = $E\cos\omega t$ 。

通过R1、R2的配比, 从正交的u1、u2中, 细分出任意相位的输出



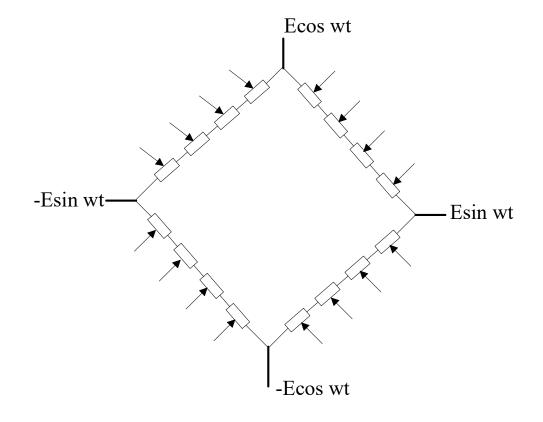
$$\frac{ER_1}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{ER_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{om} = E\sqrt{R_1^2 + R_2^2} / (R_1 + R_2)$$
 $\varphi = \arctan(R_1 / R_2)$ 输出电压Uo可写作 $U_o = u_{om} \sin(\omega t + \varphi)$



电阻链分相细分

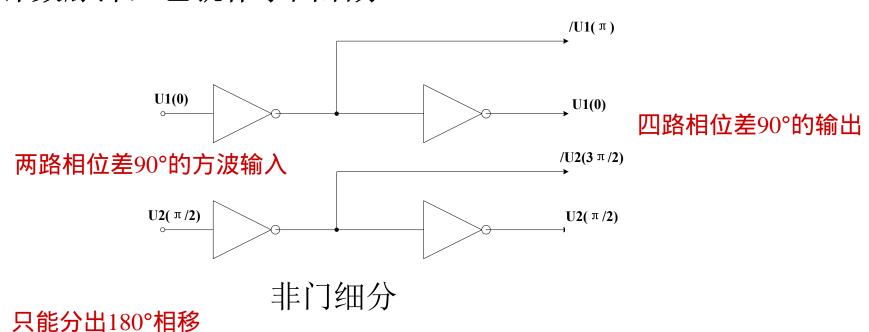


串联桥



门电路细分

两路相位差90°的正弦信号,经放大整形为两列方波u1、u2。此二方波送入下图反相电路,便可得到四路依次相位差90°的方波,经后继电路,就能在一个测量信号周期内获得四个计数脉冲,也就作了四细分。





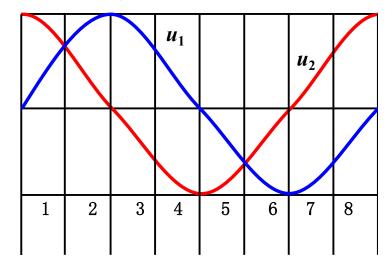
计算机量化细分

微型计算机具有丰富的运算和逻辑功能,它可用来完成细分,从而简化仪器电路(硬件)结构,增强仪器功能,提高仪器精度。

两路原始正交信号 $u_1=A\sin\theta nu_2=A\cos\theta$ 作为输入。微机通过判别两信号的极性和绝对值的大小,实现8细分。



计算机量化细分



1、4、5、8卦限

$$\left| \tan \theta \right| = \frac{\left| A \sin \theta \right|}{\left| A \cos \theta \right|} = \frac{\left| u_1 \right|}{\left| u_2 \right|}$$

卦限 u_1 的极性 u_2 的极性 $|u_1|$ 、 $|u_2|$ 大小

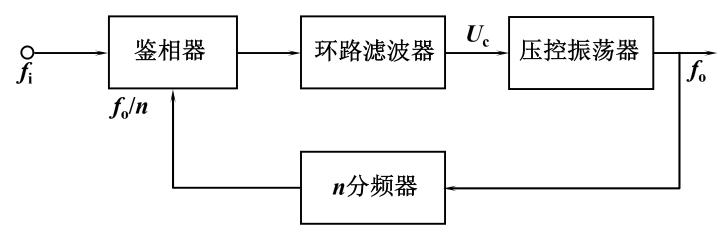
1 + + |
$$u_1$$
| $<|u_2|$ |
2 + + | u_1 | $>|u_2|$ |
3 + - | u_1 | $>|u_2|$ |
4 + - | u_1 | $<|u_2|$ |
5 - - | u_1 | $<|u_2|$ |
6 - - | u_1 | $>|u_2|$
7 - + | u_1 | $>|u_2|$
 $+ |u_1|<|u_2|$
 $+ |u_1|<|u_2|$

$$\left|\cot\theta\right| = \frac{\left|A\cos\theta\right|}{\left|A\sin\theta\right|} = \frac{\left|u_2\right|}{\left|u_1\right|}$$



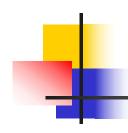
3.平衡补偿式细分电路

频率跟踪细分——锁相倍频细分



n分频,频率变为原来的1/n

优点:结构较简单, 细分数高的, 对信号失真度无严格要求。 缺点:为有差系统, 对输入信号的角频率的稳定性要求高, 不能辨向。



参考资料

- 1、《测控电路》张国雄等 机械工业出版社
- 2、《现代测控技术及应用》吴国庆等 电子工业出版社
- 3、《传感器与应用电路设计》赵继文等 科学出版社
- 4、《精密仪器电路》张国雄等 机械工业出版社
- 5、《仪器电路设计与应用》郝晓剑等 电子工业出版社
- 6、《计算机控制技术》 张艳兵等编著 国防工业出版社



课后作业

- 1、简述对数放大器的原理,指出它的应用场合。
- 2、模拟滤波器有几种?画出有源压控低通滤波器的原理图。
- 3、信号调理中调制和解调的作用是什么?
- 4、简述Σ-Δ型A/D转换器和流水线式A/D转换器的工作原理,并说明其特点。
- 5、简述T型电阻网络D/A转换器的工作原理。
- 6、常用细分电路有几种?各有什么特点?