

实验 13 锁相放大器

锁相放大器是一种高性能的通用测量仪器，它能精确地测量被掩埋在噪声中的微弱信号。随着科学技术的飞速发展，在电子学、信息科学、光学、磁学、力学、低温物理、声学、生物学等许多领域，越来越需要测量深埋在噪声中的微弱信号。

【预习提要】

- (1) 什么是相关接收原理？用什么电路可实现相关接收？
- (2) 实际的锁相放大器中主要使用了哪两种抑制噪声的技术？

【实验要求】

- (1) 了解锁相放大器各单元电路的作用和工作状况。
- (2) 掌握锁相放大器的基本使用方法。

【实验目的】

用实验证明锁相放大器能测量深埋在噪声中的微弱信号。

【实验器材】

音频信号发生器两台、双踪示波器一台、数字电压表一台、晶体管毫伏表一台、晶体管稳压电源一台、锁相放大器一台、数字式频率计一台。

【实验原理】

锁相放大器的最基本原理是相关接收原理，在相关接收中，可以把两个信号的函数 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的相关函数表示为：

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_2(t - \tau) dt \quad (4-13-1)$$

(4-13-1) 式的意思是把两个函数相乘后，对时间取平均值，式中 τ 为两函数间的延迟时间。若令：

$$f_1(t) = S_1(t) + n_1(t)$$

$$f_2(t) = S_2(t) + n_2(t)$$

式中 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 为信号， $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 为和信号混在一起的噪声，代入 (4-13-1) 式得：

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[\int_{-T}^T S_1(t) S_2(t) dt + \int_{-T}^T S_2(t) n_2(t - \tau) dt \right]$$

$$+ \int_{-T}^T S_2(t-\tau)n_1(t)dt + \int_{-T}^T n_1(t)n_2(t-\tau)dt \Big]$$

即

$$R(\tau) = RS_1S_2(\tau) + RS_1n_2(\tau) + Rn_1S_2(\tau) + Rn_1n_2(\tau)$$

其中 RS_1S_2 、 RS_2n_1 、 RS_1n_2 、 Rn_1n_2 分别为信号对信号、信号对噪声、噪声对噪声的相关函数。

由于噪声和信号是相互独立的，噪声之间也是相互独立的，则有 $RS_1n_2 = 0$ ， $RS_2n_1 = 0$ ， $Rn_1n_2 = 0$ ，因此 (4-13-1) 式为

$$R(\tau) = RS_1S_2(\tau) \quad (4-13-2)$$

上式表明两个信号都是和噪声混在一起的，但总的相关函数却等于两个信号（不含噪声）的相关函数，即表示通过相关器之后可以把噪声滤去。

设两个信号全是正弦信号，且频率相同。

即令

$$f_1(t) = S_1(t) + n_1(t) = A \sin \omega t + n_1(t)$$

$$f_2(t) = S_2(t) + n_2(t) = B \sin(\omega t - \theta) + n_2(t)$$

这里设两个信号的相位差为 θ

$$\tau = \frac{\theta}{\omega}$$

相关函数

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [A \sin \omega t + n_1(t)] \cdot [B \sin(\omega t - \theta) + n_2(t - \tau)] dt \quad (4-13-3)$$

由于信号和噪声，噪声和噪声之间是相互独立的，(4-13-3) 式为：

$$R(\tau) = \frac{1}{2} AB \cos \theta$$

从这里可以看出，两个频率相同的信号，虽然都和噪声混在一起，通过相关接收器后，就可以滤去噪声，其输出大小正比于两个信号振幅的乘积并与两信号之间的相位差成余弦关系。设两个信号的一个为正弦信号，另一个为其同频率的方波（相位差 $\theta = \omega \tau$ ），即

$$f_1(\tau) = A \sin(\omega t - \theta) + n_1(t)$$

$$f_2(t) = B \frac{4}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots) + n_2(t)$$

则相关函数为：

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left\{ [A(\sin(\omega t - \theta) + n_2(t))] \cdot \left[B \frac{4}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots) + n_2(t) \right] \right\} dt$$

$$= \frac{2}{\pi} AB \cos \theta$$

如果令 $B=1$ ，这时从电路上来讲，相乘就不必用模拟乘法量，而只要用开关电路就能实现相乘，这样电路简单稳定。这是较常用的相关器形式。这种相关器可以把它等效为一个按输入信号 V_s 的频率相同的频率改变其极性的双刀双掷开关，如图 4-13-1 所示。设使开关器换接的参考信号是 V_r 的方波，其频率与 V_s 的频率相同。

当 V_r 作用在开关之上时，开关倒向的频率与信号 V_s 的极性变化频率刚好一样，但相位差 θ 不一定为 0，这里 V_s 、 V_r 、

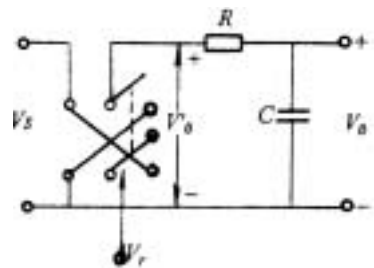


图 4-13-1

V'_0 、 V_0 的波形关系如图 4-13-2 所示。

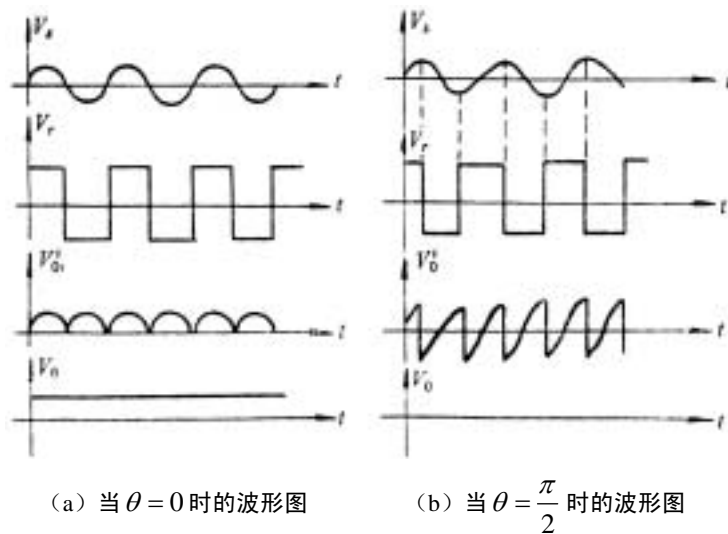


图 4-13-2

从图 4-13-2 可以看出，当 $\theta=0$ 时， V_s 为上正、下负时，开关倒向左方， $\frac{T}{2}$ 后， V_s 下正上负，但开关又倒向右边，故 V'_0 总是上正下负，输出的 V'_0 为正的脉冲波形，经 RC 滤波后得到正的最大输出。同理，当 $\theta=\pi$ ， V'_0 为负的脉冲波形，经 RC 滤波后得到负的最大输出。当 $\theta=\frac{1}{2}\pi$ 与 $\frac{3}{2}\pi$ 时，开关刚好在信号最大值时倒向， V'_0 都是正负交替的信号，滤波后输出为 0。

图 4-13-1 中的等效开关电路，在实际相关器中多用场效应开关电路来实现。

根据相关器原理知道，实现相关接收的基本方框图如图 4-13-3 所示，由信号通道、参考通道、相关电路三部分构成。

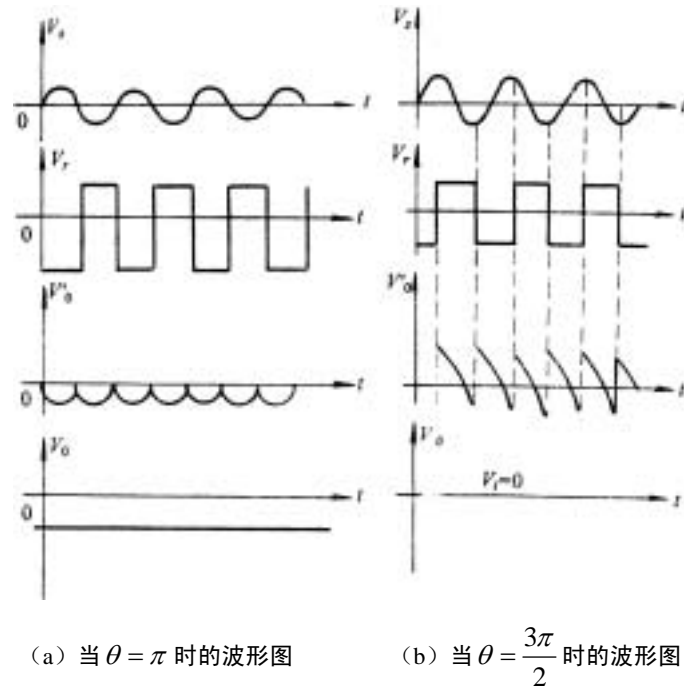


图 4-13-3

信号通道的作用是将伴有噪声的输入信号放大，并经选频放大器对噪声作初步处理。使大量的白噪声不能通过，于是使噪声大大得到了抑制。为了抑制工频干扰，在信号通道内还加入了 50Hz 的陷波电路。参考通道的作用是提供一个与输入信号同频的方波或正弦波(实验中，为了研究相关器的输出与相位之间的关系，相位是可调的)。正是由于锁相放大器总是将被测信号和参考信号的相位锁定，才得其名。相关器中相敏检波器的作用是对输入信号和参考信号完成乘法运算，从而得到输入信号与参考信号的和频与差频。当输入信号与参考信号频率相同时，差频为零，得到直流成分。低通滤波器的作用是滤除和频部分，保留直流成分，放大器输出与相位有关的直流成分。这时放大器的等效噪声带宽很窄，信噪比大大提高，从而可以提取深埋在噪声中的微弱信号。

我们实验中所用的锁相放大器的比较详细的方框如图 4-13-5 所示。前置放大电路由 5G28 高输入阻抗运放构成的同相放大器组成。陷波电路是由双 TRC 滤波电路构成。选频放大器由 5G24 构成的双 T 选频放大器组成。倒相电路由 5G24 组成的 1: 1 反相放大器构成。参考信号通道的移相电路是由 5G24 和 RC 元件组成的二阶有源相移式电路，可以实现 0° 到

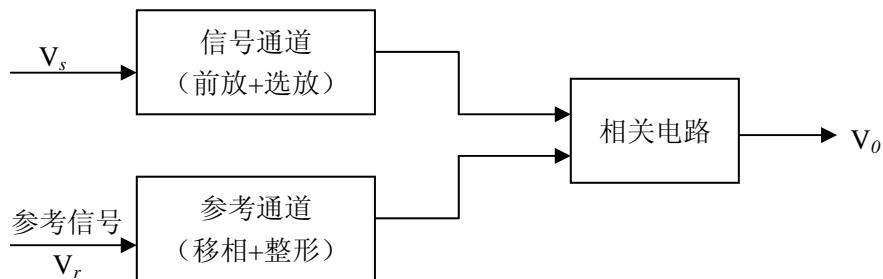


图 4-13-4

360° 的移相。方波整形电路由 5G24 构成的过零比较器组成，为使输出的方波稳定，加了由 2DW7 构成的限幅电路。倒相器由 5G24 构成的 1:1 的反相器组成。显示电路可用一般数字电压表。

为了增加信号通道的总增益，在选频放大器之后加了由 5G24 和 T 形反馈电路构成的反相型主放大器。为了实现锁相放大器的定标，信号通道增益可调，为此，在主放大器与选频放大器之间加了可调节幅度的衰减器。各单元电路的工作原理在李清泉等编写的“集成运算放大器原理与应用”一书中可以找到。

【实验内容】

本实验的主要内容有两个：

- 一、研究锁相放大器的基本工作原理；
- 二、研究锁相放大器的应用方法。

（一）研究锁相放大器的基本工作原理

1. 研究参考通道的移相电路和方波形成电路。

由低频信号发生器输入频率为 70Hz~130Hz，幅度 3~5V 的正弦交流信号到参考信号输入端，用 SR-8 双踪示波器同时观察移相电路的输入与输出波形。调节移相电位器观察输出波形对于输入波形的移相情况。画出同相，移相 $\frac{\pi}{2}$ ；反相，移相 $\frac{3}{2}\pi$ 时的波形图。再比较方波发生器的输出波形与经过倒相后的波形。注意，用 SR-8 示波器时，为了看清楚输出与输入之间的相位关系，必须将内触发源选择开关处于“拉 Y_B ”状态，且输入信号应接到 Y_B 输入端（为什么？）

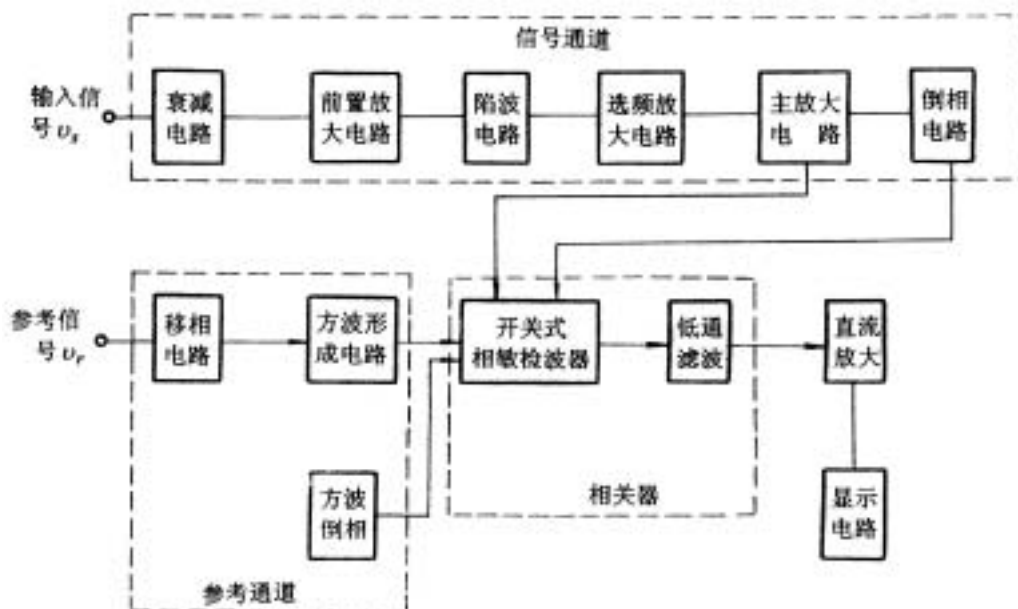


图 4-13-5

2. 研究选频放大器的选频功能

将输入选择开关放在“定标”位置，用 DA-16 毫伏表监测前放输入端，保持输入为 0.1~0.5mV 再用另一个毫伏表与 SR-8 示波器监测选频放大器的输出大小与波形。调节信号源频率调节度盘，使选频放大器输出最大，并记下读数值 V_{om} ，再测出半功率点频率(怎样测?预习时必须解决方法问题)。测五次，列表记录。

3. 校正信号通道的放大倍数

在前叙步骤调好选频放大器的中心频率后，就可以对整个信号通道的放大倍数进行校正，用毫伏表监测信号通道的输入端，使定标信号为 0.1~0.5mV。用数字电压表监测整个锁相放大器的输出，并用 SR-8 双踪示波器监视相关器的输出波形，调节移相电路使参考方波信号与输入信号同相，数字电压表指示最大，波形如图 4-13-2(a)所示。这时，再调节信号通道的增益调节旋钮使输出电压指示为 1.000V~5.000V，表示通道总增益校正到 80dB。(相当于放大倍数为多少倍?)

4. 研究相关器的相关检测作用

将定标信号调到 0.1~0.5mV，调节移相电路，用 SR-8 示波器观察相关器的输出波形的变化情况，画出 $\theta = 0^\circ$ 、 90° 、 180° 、 270° 时相敏检波器的输出波形图，并测出输出直流电压的值，列表记录。

5. 研究锁相放大器对于干扰信号的抑制能力

用一个信号求和电路，使被测小信号上迭加一个不同频率不同相位的大的干扰信号。调节干扰信号的大小，观察输出直流电压的变化情况，有什么样的结论?

(二)研究锁相放大器的应用

锁相放大器的应用很多(参看附录 I)。但最基本的应用是测量微弱信号。

1. 图 4-13-6 是用锁相放大器测定差动放大器的共模抑制比的框图。要求根据框图，拟制方案测出差动放大器的共模抑制比，写出测试步骤与测试结果

2. 用锁相放大器测定运算放大器的共模抑制比。研究说明书，写出测试步骤与测试结果。

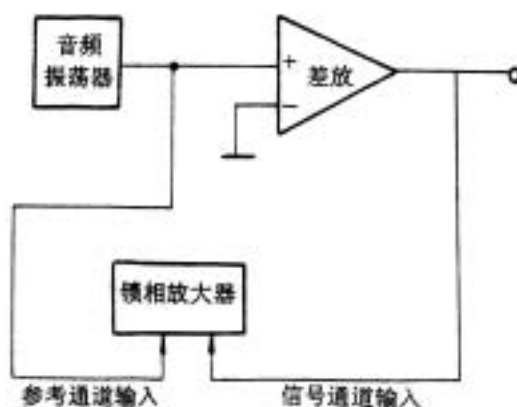
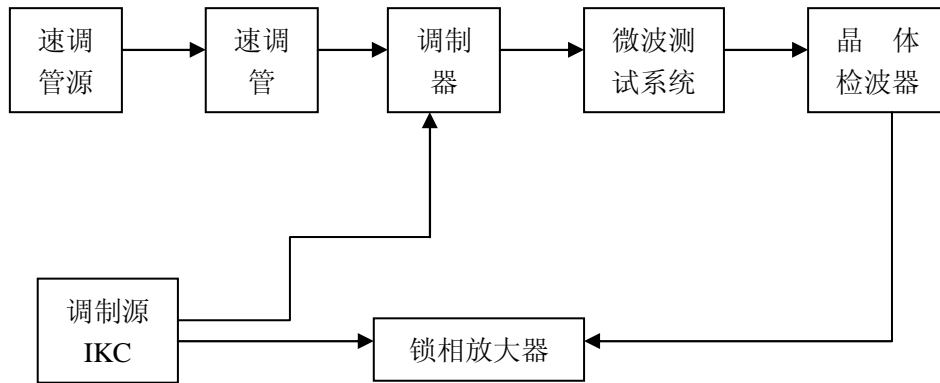


图 4-13-6

附录 1 锁相放大器应用举例

锁相放大器在微弱信号的测量方面，使用十分广泛，下面举一些例子。

(一)微波测量



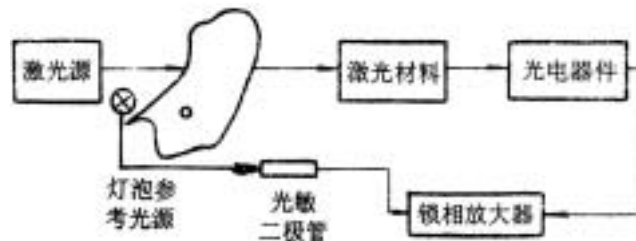
附图 4-13-1

微波由速调管产生,通过调制器(Pm管或铁氧体调制器)把微波能量调制成IKC的方波,或通过对速调管源进行调制,使输入微波能量形成调制形式,调制的微波能量通过待测系统,由晶体检波器检波输给锁相放大器,由于晶体管检波器是低阻抗信号源。锁相放大器的前置放大器用低阻抗输入。同时,由调制源引入一电信号,作为放大器的参考信号,为了得到好的测试效果,注意消除地回路电流影响。

(二)激光材料测定

由激光光源发出激光,通过由马达带动的调制器,对激光和参考光源同时进行调制,调制后的激光通过待测激光材料后由光电器件变成电信号输入到锁相放大器。调制的参考光源通过光敏二极管后的电信号作为锁相放大器的参考信号。

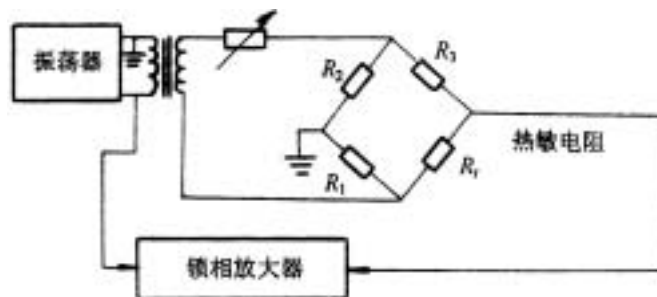
锁相放大器要采用和光电器件相适应的输入阻抗。如用光电倍增管,就用高阻抗输入;若用其它低阻抗光电器件,则由低阻抗输入。用锁相放大器,可消除杂散光干扰的影响,如测量激光材料的消光比,激光材料的非线性,用锁相放大器都可以得到较好的效果。



附图 4-13-2

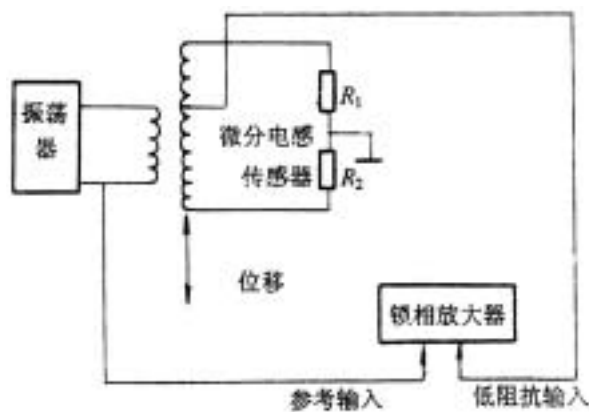
(三) 温度测量

这里介绍的热敏电阻电桥法，振荡器电路通过变压器耦合。作为电桥的交流源，由 R_1 、 R_2 、 R_i 、 R_3 组成。 R_i 为热敏电阻，温度由电平的不平衡信号的大小来度量。



附图 4-13-3

(四) 位移的测定

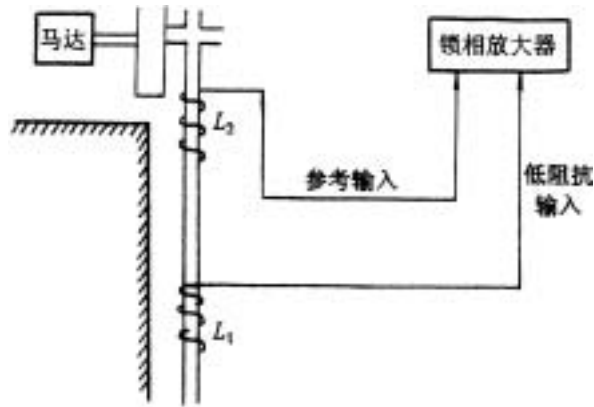


附图 4-13-4

位移的测量有微分电感法和微分电容法。都是把位移的改变转变成电感或电容的改变，然后由电感或电容电桥测出这些对应于位移的变化量。

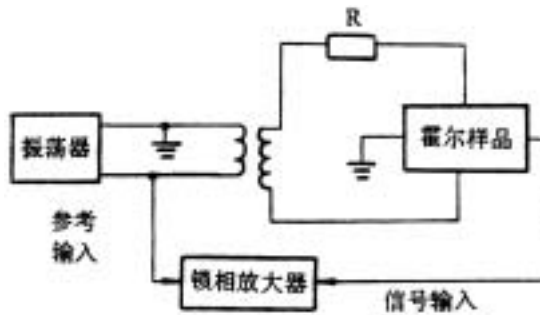
(五) 振动样品磁强计

由马达带动磁性材料样品和另一作为参考的磁性材料，两磁性材料在 L_1 和 L_2 中周期运动， L_2 感应的电压作为放大器的参考信号。 L_1 的感应电压和样品有关作为锁相放大器的输入信号。



附图 4-13-5

(六) 霍尔效应的测定



附图 4-13-6

用锁相放大器测定半导体的霍尔效应，使精度和灵敏度都有较大提高。

(七) 差分共模抑制比的测定

锁相放大器可以用来测定高共模抑制比。振荡器输给放大器作共模输入，同时输给锁相放大器作参考信号，放大器的共模输出输给锁相放大器作输入信号。

(八) 微分电阻测定

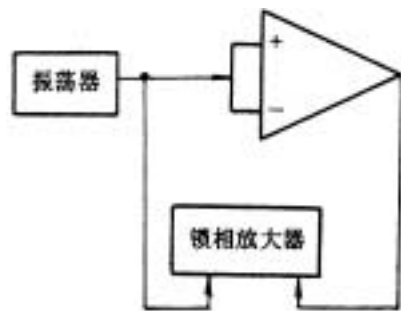
有些非线性元件的性能和它的微分电阻有关。微分

电阻的定义为 $R_d = \frac{dV}{dI} E$ ， I 一定，为待测元件的工作电

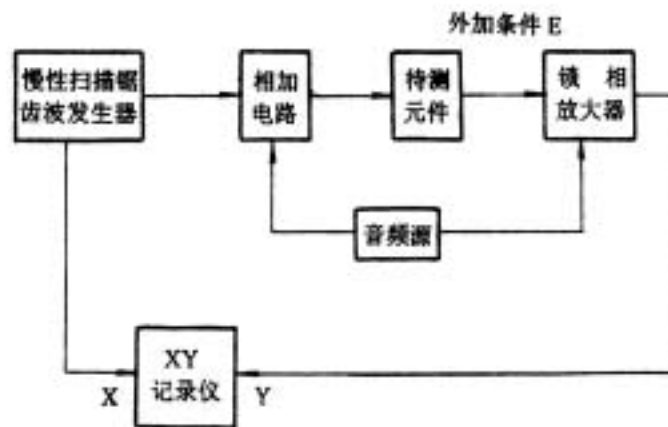
流， E 为影响元件性能的外加条件。若加的电流

$I + \Delta I = I + A \cos \omega t$ ， A 为一个较小量，很容易证明 $\frac{d^2V}{dI^2}$ 和 $\cos 2\omega t$ 的振幅成正比。因此，

只要能精确测出多次谐波的振幅时，就测出了各次微分电阻比例常数。



附图 4-13-7



附图 4-13-8