

第二节 电感式传感器

一、自感式传感器

自感式传感器常见的有气隙型（闭磁路）和螺管型（开磁路）两种结构。

（一）气隙型电感传感器

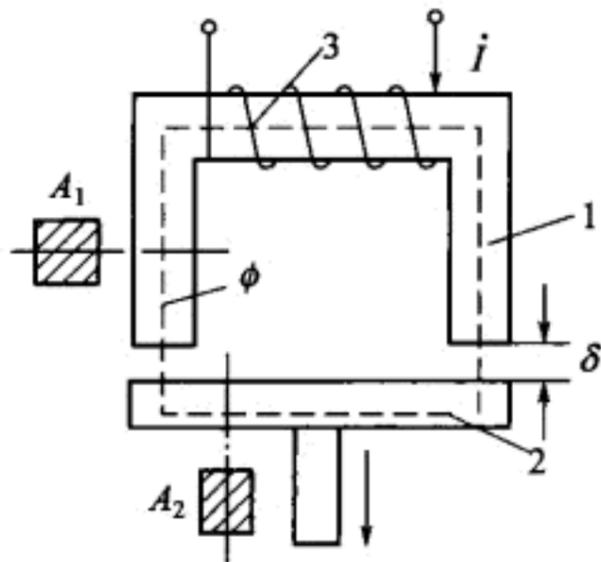


图 2-5 气隙型电感传感器的结构原理

1—铁芯；2—衔铁；3—线圈

图 2-5 所示是气隙型电感传感器的结构原理图。传感器主要由铁芯 1，衔铁 2 和线圈 3 等组成。铁芯和衔铁间有空气间隙（气隙）。工作时衔铁与被测体接触。被测体的位移引起气隙磁阻的变化，从而使线圈电感变化。当传感器线圈与测量电路连接后，可将电感的变化转换成电压、电流或频率的变化，完成从非电量到电量的转换。

由磁路基本知识可知，线圈电感为

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (\text{H}) \quad (2-15)$$

式中 N ——线圈匝数；

R_m ——磁路总磁阻。

磁路总磁阻为

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 A} \quad (2-16)$$

式中 $l_1, l_2, A_1, A_2, \mu_1, \mu_2$ ——铁芯、衔铁磁路的长度、截面积及磁导率；

δ, A, μ_0 ——空气隙的长度、等效截面积及磁导率。

铁芯一般工作在非饱和状态下，其磁导率 μ_1, μ_2 远大于空气的磁导率 μ_0 ，因此衔铁与铁芯磁阻远远小于气隙磁阻，所以式(2-16)可以简化为

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A} \quad (2-17)$$

将其代入式(2-15), 得

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad (2-18)$$

由上式可知: 只要被测的非电量能够引起空气隙长度 δ 或空气隙的等效截面积 A 发生变化。线圈的电感量 L 就会随之变化。由于线圈电感量 L 与空气隙 δ 成反比, 因此变气隙长度式传感器的线性度差、示值范围窄、自由行程小, 但灵敏度较高, 常用于小位移的测量。与此相反, 由于线圈的电感量与空气隙有效截面积 A 成正比, 因此变截面积式传感器具有良好的线性度、自由行程大、示值范围宽, 但灵敏度较低的特点, 通常用来测量比较大的位移。

(二) 螺管型电感传感器

螺管型电感传感器分为单线圈和差动式两种结构。图 2-6 所示为单线圈螺管型传感器结构原理, 主要元件为一只螺管线圈和一根圆柱形铁芯。传感器工作时, 因铁芯在线圈中进入长度的变化, 引起螺管线圈电感值的变化。当用恒流源激励时, 则线圈的输出电压与铁芯的位移量有关。

螺管型传感器的特点: 结构简单, 制造装配容易; 由于空气面积大, 磁路的磁阻高, 因此灵敏度低, 但线性范围大; 由于磁路大部分为空气, 易受外部磁场干扰; 由于磁阻高, 为了达到某一电感量, 需要的线圈匝数多, 因而线圈分布电容大。

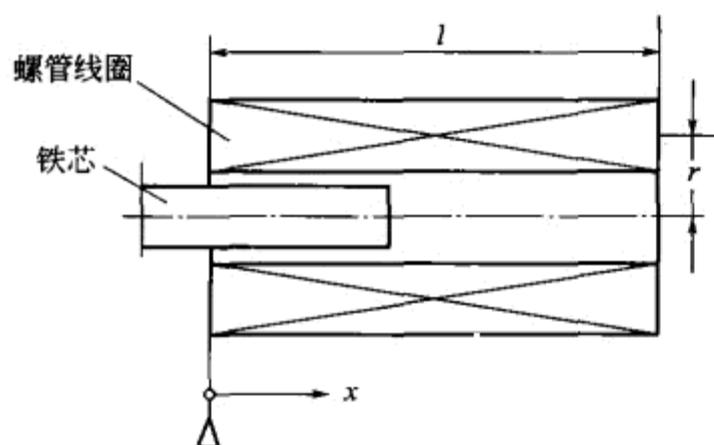


图 2-6 单线圈螺管型传感器结构原理

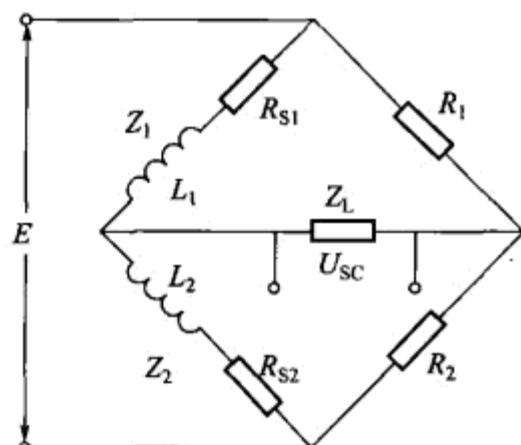


图 2-7 交流电桥原理

(三) 测量电路

1. 交流电桥

交流电桥是电感传感器的主要测量电路, 为了提高灵敏度, 改善线性度, 电感线圈一般接成差动形式, 如图 2-7 所示。 Z_1 , Z_2 为工作臂, 即线圈阻抗, R_1 , R_2 为电桥的平衡臂。

初始时, 电桥平衡, $U_{sc} = 0$ 。

$$\begin{aligned} \frac{Z_1}{Z_2} &= \frac{R_1}{R_2} \\ Z_1 = Z_2 = Z &= R_S + j\omega L \\ R_{S1} = R_{S2} &= R_S \\ L_1 = L_2 &= L \\ R_1 = R_2 &= R \end{aligned}$$

工作时, $Z_1 = Z + \Delta Z$, $Z_2 = Z - \Delta Z$, 由此求得

$$U_{sc} = E \frac{\Delta Z}{Z} \times \frac{Z_1}{2Z_1 + R + Z}$$

当 $Z_1 \rightarrow \infty$ 时, 上式可写成

$$U_{sc} = E \frac{\Delta Z}{2Z} = \frac{E}{2} \times \frac{\Delta R_s + j\omega \Delta L}{R_s + j\omega L} \quad (2-19)$$

当线圈的品质因数 Q 很高, 即 $\frac{\Delta R_s}{R_s}$ 很小时, 有

$$U_{sc} = \frac{E}{2} \times \frac{\Delta L}{L}$$

2. 变压器电桥

如图 2-8 所示, 它的平衡臂为变压器的两个副边。当输出端为开路时, 有

$$I = \frac{E}{Z_1 + Z_2}$$

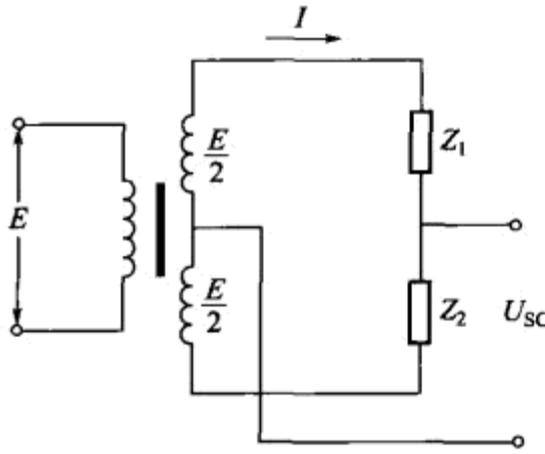


图 2-8 变压器电桥原理

所以, 输出电压为

$$U_{sc} = \frac{E}{Z_1 + Z_2} Z_2 - \frac{E}{2} = \frac{E}{2} \times \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2-20)$$

初始时, $Z_1 = Z_2 = Z = R_s + j\omega L$, 故电桥平衡, $U_{sc} = 0$ 。双臂工作时, 即 $Z_1 = Z - \Delta Z$, $Z_2 = Z + \Delta Z$, 相当于差动式电感传感器的衔铁向一边移动, 可得

$$U_{sc} = \frac{E}{2} \times \frac{\Delta Z}{Z} \quad (2-21)$$

同理, 当衔铁向反方向移动时, $Z_1 = Z + \Delta Z$ 和 $Z_2 =$

$Z - \Delta Z$, 故

$$U_{sc} = -\frac{E}{2} \times \frac{\Delta Z}{Z} \quad (2-22)$$

由式(2-21)和式(2-22)可知: 当衔铁向不同方向移动时, 产生的输出电压 U_{sc} 大小相等、方向相反, 即相位互差 180° , 可以反映衔铁移动的方向。

二、差动变压器

差动变压器是把被测量的变化变换为线圈的互感变化。差动变压器本身是一个变压器, 初级线圈输入交流电压, 次级线圈感应出电动势, 当互感受外界影响变化时, 其感应电动势也随之产生相应的变化。由于它的次级线圈接成差动的形式, 故称差动变压器。

(一) 工作原理

差动变压器结构如图 2-9(a) 所示。由初级线圈 P 与两个相同次级线圈 S_1 、 S_2 和插入的可移动的铁芯 C 组成。其线圈连接方式如图 2-9(b) 所示, 两个次级反相串接。

当初级线圈 P 加上一定的正弦交流电压 \dot{U}_1 后, 次级线圈中产生的感应电动势 \dot{E}_{21} 、 \dot{E}_{22} 与铁芯在线圈中的位置有关。当铁芯在中心位置时, $E_{21} = E_{22}$, 输出电压 $\dot{U}_2 = 0$ 。铁芯向上移动时, $E_{21} > E_{22}$; 反之, 铁芯向下移动时, $E_{22} > E_{21}$ 。在上述两种情况下, 输出电压 \dot{U}_2 的相位相差 180° 。

(二) 等效电路

理想差动变压器的等效电路如图 2-10 所示。当次级开路时, 初级线圈的交流电流为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1}$$

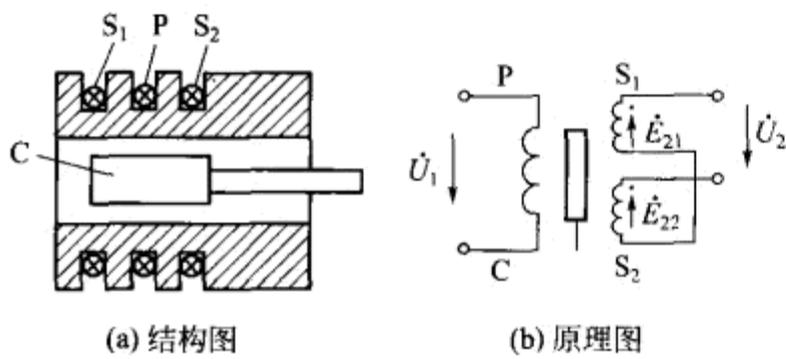


图 2-9 差动变压器结构原理

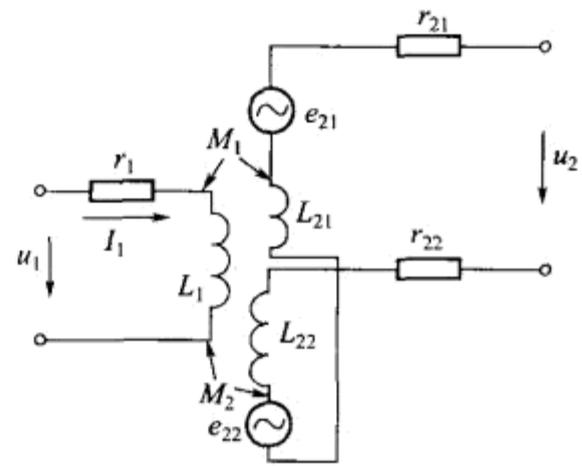


图 2-10 理想差动变压器的等效电路

次级线圈的感应电动势为

$$\begin{aligned}\dot{E}_{21} &= -j\omega M_1 \dot{I}_1 \\ \dot{E}_{22} &= -j\omega M_2 \dot{I}_1\end{aligned}$$

差动变压器的输出电压为

$$\dot{U}_2 = -j\omega(M_1 - M_2) \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1} \quad (2-23)$$

输出电压的有效值为

$$U_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad (2-24)$$

可见输出电压与互感有关，当铁芯在中间位置时， $M_1 = M_2$ ，所以 $U_2 = 0$ 。

(三) 测量电路

常用的差动变压器的测量电路有两种形式：一种是差动整流电路；另一种是相敏检波电路。

1. 差动整流电路

差动整流是常用的电路形式，它对次级绕组线圈的感应电动势分别整流，然后再把两个整流后的电流或电压串成通路合成输出。这样，次级电压的相位和零点残余电压都不必考虑。几种典型的电路如图 2-11 所示。图 2-11(a) 和 (b) 用在连接低阻抗负载的场合，是电流输出型。图 2-11(c) 和 (d) 用在连接高阻抗负载的场合，是电压输出型。图中可调电阻是用于调整零点输出电压的。

下面结合图 2-11(c)，分析电路的工作原理。

设变压器两个次级线圈的同名端均在上端，由图可见，无论两个次级线圈的输出瞬时极性如何，流过两个电阻的电流总是从 a 到电位器中心抽头，从 b 到电位器中心抽头。故当铁芯在零位时整流电路的输出电压 $U_o = 0$ ；铁芯在零位以上或零位以下时，输出电压的极性相反。

2. 相敏检波电路

相敏检波电路的形式很多，过去通常采用分立元件构成的电路，它可以利用半导体二极管或三极管来实现。图 2-12 所示为二极管相敏检波电路。这种电路容易做到输出平衡，而且便于阻抗匹配。图中调制电压 e_r 和 e 同频，经过移相使 e_r 和 e 保持同相或反相，且满足 $e_r \gg e$ 。调节电位器 R 可调平衡，图中电阻 $R_1 = R_2 = R_0$ ，电容 $C_1 = C_2 = C_0$ ，输出电压为 U_{CD} 。

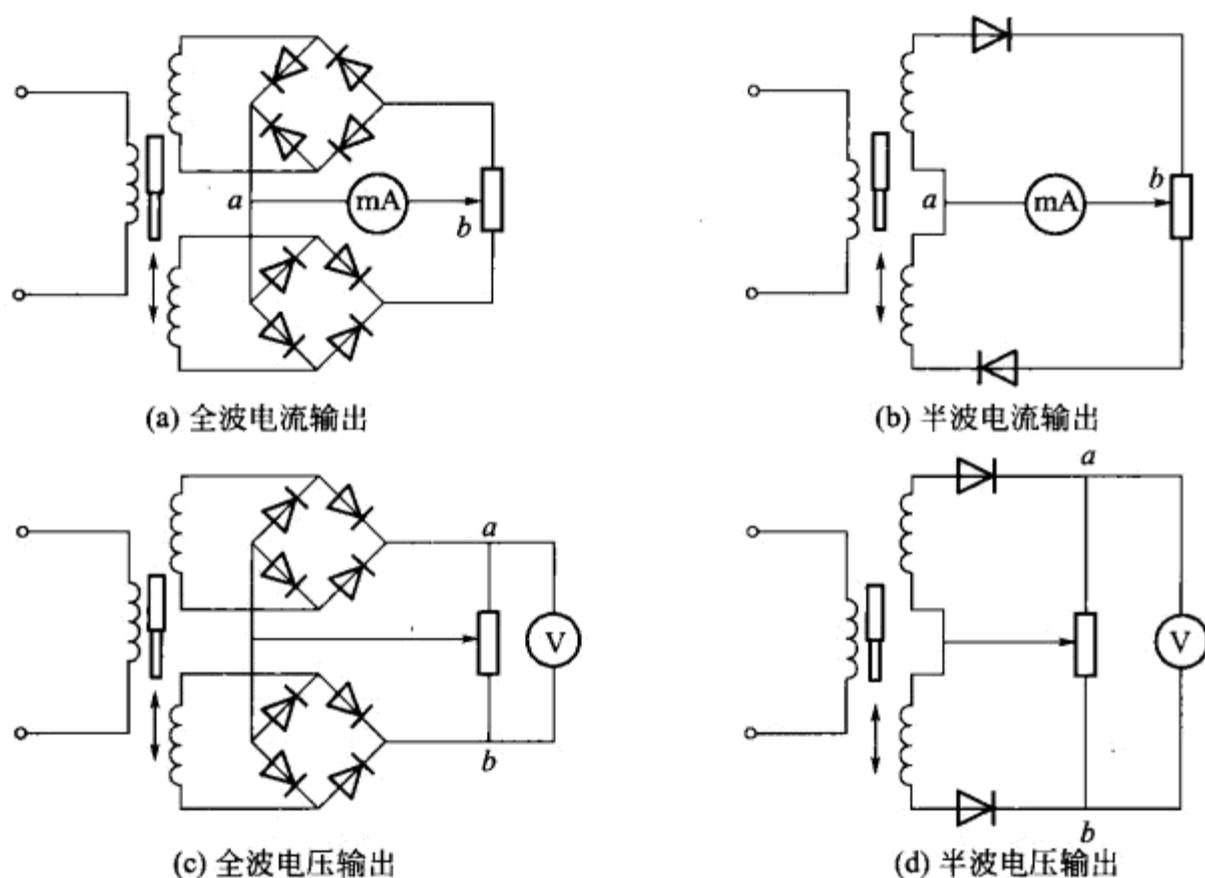


图 2-11 差动整流电路

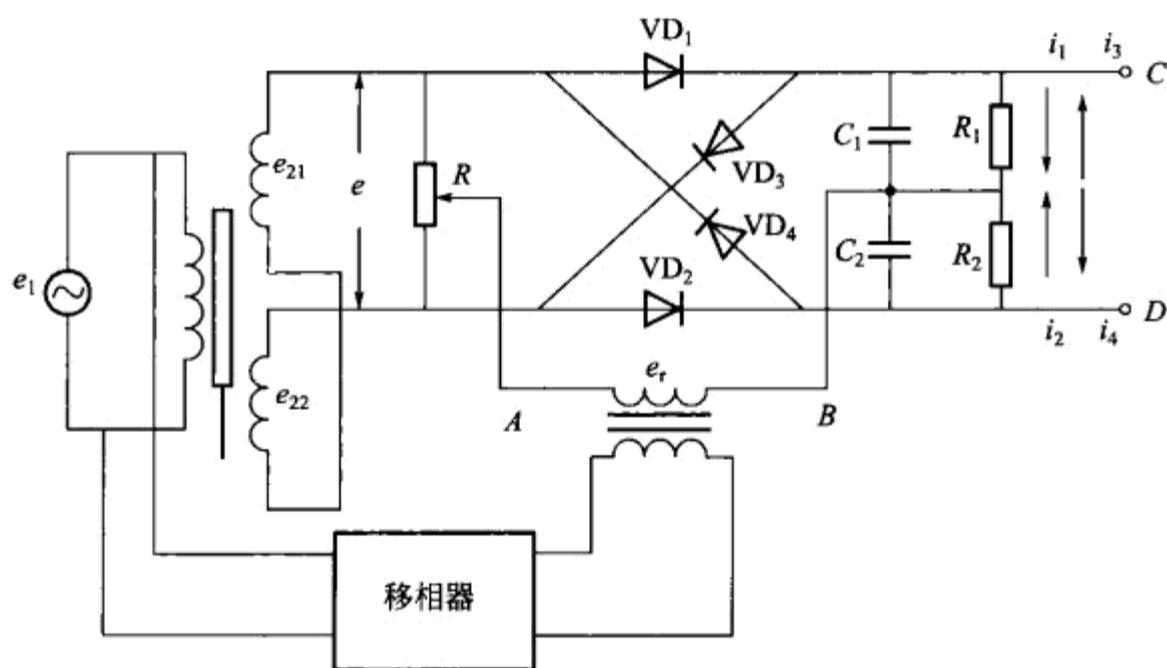


图 2-12 二极管相敏检波电路

随着电子技术的迅速发展，各种性能的集成电路相继出现。LZX1 即是一种全集成化的全波相敏整流放大器，它是以晶体管作为开关组件的全波相敏解调器，能完成把输入交流信号经全波整流后变为直流信号，并具有鉴别输入信号相位等功能。LZX1 器件具有重量轻、体积小、可靠性高、调整方便等优点。

LZX1 全波相敏整流放大器与差动变压器的连接电路如图 2-13 所示。由于相敏整流电路要求参考电压（或称比较电压）和差动变压器次级输出电压同频率，相位相同或相反，因此需要在线路中接入移相电路。对于差动变压器测量的小位移变量，由于输出信号小，还需在差动变压器的输出端接入放大器，将放大后的信号输入 LZX1 的信号输入端。

经过相敏检波和差动整流输出的信号，还需通过低通滤波器，把调制时引入的高频信号衰减掉，只允许铁芯运动所产生的有用信号通过。

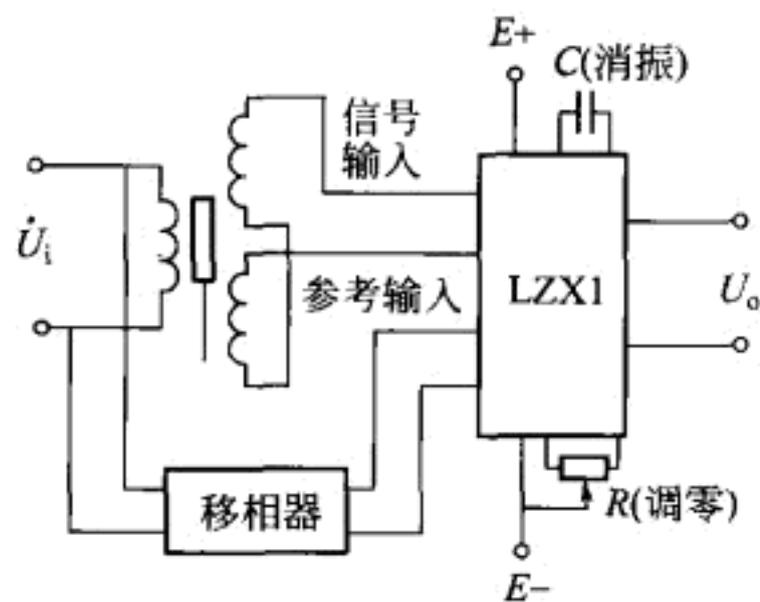


图 2-13 差动变压器与 LZX1 的连接电路

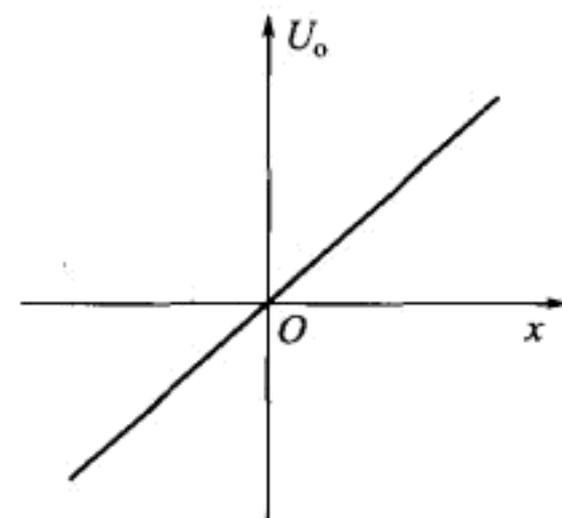


图 2-14 采用相敏检波后的输出特性

采用相敏检波电路不仅可以鉴别衔铁移动方向，而且可把衔铁在中间位置时，因高次谐波引起的零点残余电压消除掉。如图 2-14 所示，采用相敏检波后输出的信号电压 U_o 与位移 x 的关系是通过零点的一条直线，位移为正时输出正电压，位移为负时输出负电压。电压的正负极性表明位移的方向。

相敏检波电路的形式很多，过去通常采用分立元件构成的电路，现在多采用集成电路形式。