

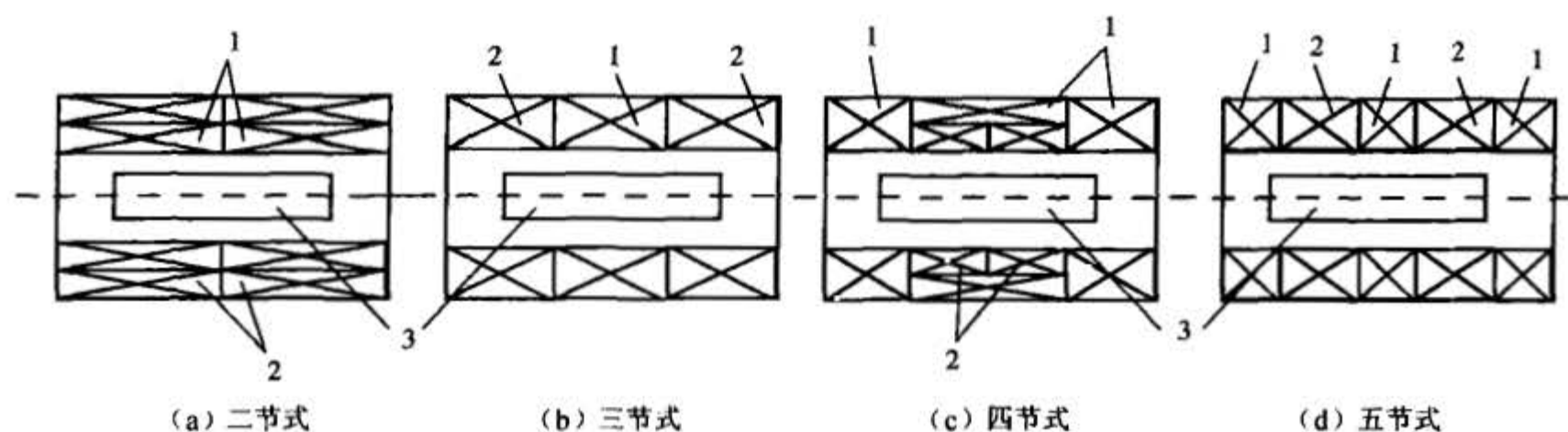
4.2 互感式传感器

4.2.1 互感式传感器的结构和工作原理

互感式传感器的结构形式较多，主要分气隙型和螺管型两种。螺管型互感传感器精度高、灵敏度高、结构简单、性能可靠，可以测量 $1\sim 100\text{mm}$ 的机械位移。目前多采用

螺管型。

互感式传感器的工作原理类似于变压器的工作原理。其结构主要包括有衔铁、初级绕组、次级绕组和线圈框架等。初级绕组、次级绕组的耦合能随衔铁的移动而变化,即绕组间的互感随被测位移的改变而变化。由于在使用时两个结构尺寸和参数完全相同的次级绕组采用反向串接,以差动方式输出,所以又把这种传感器称为差动变压器式电感传感器,通常简称为差动变压器。初级绕组作为差动变压器激励用,相当于变压器的初级,而次级绕组相当于变压器的次级。螺管型差动变压器根据初、次级排列不同有二节式、三节式、四节式和五节式等形式,如图4-10所示。三节式的零点电位较小,二节式比三节式灵敏度高、线性范围大,四节式和五节式改善了传感器线性度。



1—初级绕组; 2—次级绕组; 3—衔铁

图4-10 差动式变压器绕组的各种排列形式

在理想情况下(忽略涡流损耗、磁滞损耗和分布电容等影响),差动变压器工作的等效电路如图4-11所示。

图中: $\dot{U}_1$ 为初级绕组激励电压;

$\dot{U}_0$ 为输出电压;

M_1 、 M_2 为初级绕组与两个次级绕组间的互感;

L_P 、 R_P 为初级绕组的电感和有效电阻;

L_{S1} 、 L_{S2} 为两个次级绕组的电感;

R_{S1} 、 R_{S2} 为两个次级绕组的有效电阻。

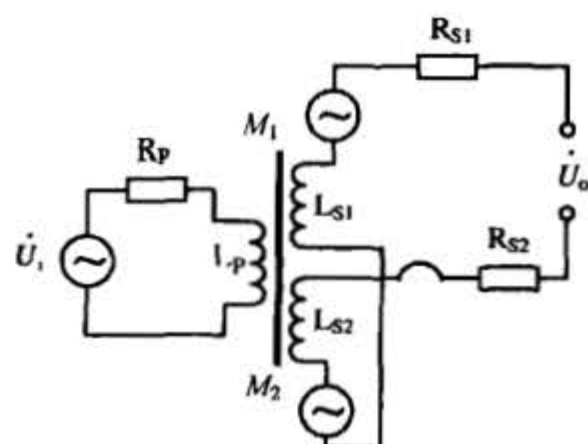


图4-11 差动变压器的等效电路

对于差动变压器,当衔铁处于中间位置时,两个次级绕组互感相同,因而由初级侧激励引起的感应电动势相同。由于两个次级绕组反向串接,所以差动输出电动势为零。

当衔铁移向次级绕组 L_{S1} 一边,这时互感 M_1 增大, M_2 减小,因而次级绕组 L_{S1} 内的感应电动势大于次级绕组 L_{S2} 内的感应电动势,这时差动变压器输出的电动势不为零。在传感器的量程内,衔铁位移越大,差动变压器输出的电动势就越大。

同样道理,当衔铁移向次级绕组 L_{S2} 一边,差动输出电动势仍不为零,但由于移动方向改变,所以输出电动势反相。因此通过差动变压器输出电动势的大小和相位可以知道衔铁位移量的大小和方向。

当次级开路时,初级绕组的交流电流为

$$\dot{I}_P = \frac{\dot{U}_i}{R_P + j\omega L_P}$$

次级绕组的感应电动势为

$$\dot{U}_1 = -j\omega M_1 \dot{I}_P$$

$$\dot{U}_2 = -j\omega M_2 \dot{I}_P$$

由于次级绕组反向串接, 所以差动变压器的输出电压为

$$\dot{U}_o = -j\omega(M_1 - M_2) \frac{\dot{U}_i}{R_P + j\omega L_P} \quad (4-19)$$

其有效值为

$$U_o = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_i}{\sqrt{R_P^2 + (\omega L_P)^2}}$$

下面分三种情况进行讨论。

① 铁芯处于中间位置时, $M_1 = M_2 = M$, $U_o = 0$ 。

② 铁芯上升时, $M_1 = M + \Delta M$, $M_2 = M - \Delta M$ 。

$$U_o = \frac{2\omega\Delta M U_i}{\sqrt{R_P^2 + (\omega L_P)^2}}$$

与 U_1 同极性。

③ 铁芯下降时, $M_1 = M - \Delta M$, $M_2 = M + \Delta M$ 。

$$U_o = -\frac{2\omega\Delta M U_i}{\sqrt{R_P^2 + (\omega L_P)^2}}$$

与 U_2 同极性。

4.2.2 差动变压器的输出特性

1. 输出特性曲线与零点残存电压

差动变压器的输出特性曲线如图 4-12 所示。图中, x 表示衔铁偏离中心位置的距离; U_o 为差动输出电动势, 其中实线部分表示实际的输出特性, 而虚线表示理想的输出特性; U_z 为零点残存电压。

当差动变压器的衔铁处于中间位置时, 理想条件下其输出电压为零。但实际上, 当使用桥式电路时, 在零点仍有一个微小的电压值 U_z (从零点几毫伏到数十毫伏) 存在, 称为零点残存电压。零点残存电压的存在造成零点附近的不灵敏区, 给测量带来误差。若零点残存电压输入放大器内, 会使放大器末级趋向饱和, 影响电路的正常工作。因此, 零点残存电压的大小是衡量差动变压器性能好坏的重要指标。

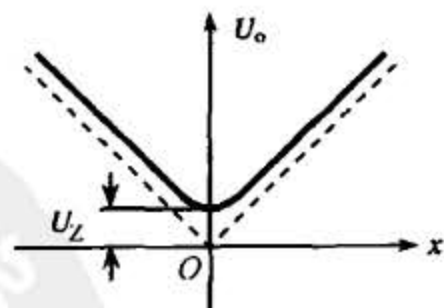


图 4-12 差动变压器输出特性曲线

2. 零点残存电压产生的原因

产生零点残存电压的原因主要有以下几种。

- ① 差动的两个线圈的电气参数及导磁体的几何尺寸不可能完全对称。
- ② 线圈的分布电容不对称。
- ③ 电源电压中含有高次谐波。
- ④ 传感器工作在磁化曲线的非线性段。

3. 减小零点残存电压的方法

为了减小零点残存电压,可采取以下方法。

① 尽可能保证传感器几何尺寸、线圈电气参数和磁路的对称。为保证线圈和磁路的对称性,首先,要求提高加工精度,线圈选配成对,采用磁路可调节结构。其次,应选高磁导率、低矫顽力、低剩磁感应的导磁材料,并应经过热处理,消除残余应力,以提高磁性能的均匀性和稳定性。磁路工作点应选在磁化曲线的线性段。

② 选用合适的测量电路。例如采用相敏整流电路,既可判别衔铁移动方向,又可改善输出特性,减小零点残存电压。

③ 采用补偿线路减小零点残存电压。图 4-13 所示是几种减小零点残存电压的补偿电路。在差动变压器次级绕组侧串、并联适当数值的电阻、电容元件,当调整这些元件时,可使零点残存电压减小。

图 4-13 (a) 在次级绕组侧并联电容。由于两个次级绕组感应电压相位不同,并联电容可改变绕组的相位,并联电阻起分流作用,使流入传感器绕组的电流发生变化,从而改变磁化曲线的工作点,减小高次谐波所产生的残余电压。

图 4-13 (b) 中串联电阻 R ,以调整次级绕组的电阻分量。

图 4-13 (c) 在次级绕组侧并联电位器 RP 用于电气调零,改变两个次级绕组输出电压的相位。电容 C 可防止调整电位器时使零点移动。

图 4-13 (d) 中接入补偿线圈 L ,以避免负载不是纯电阻而引起较大的零点残存电压。

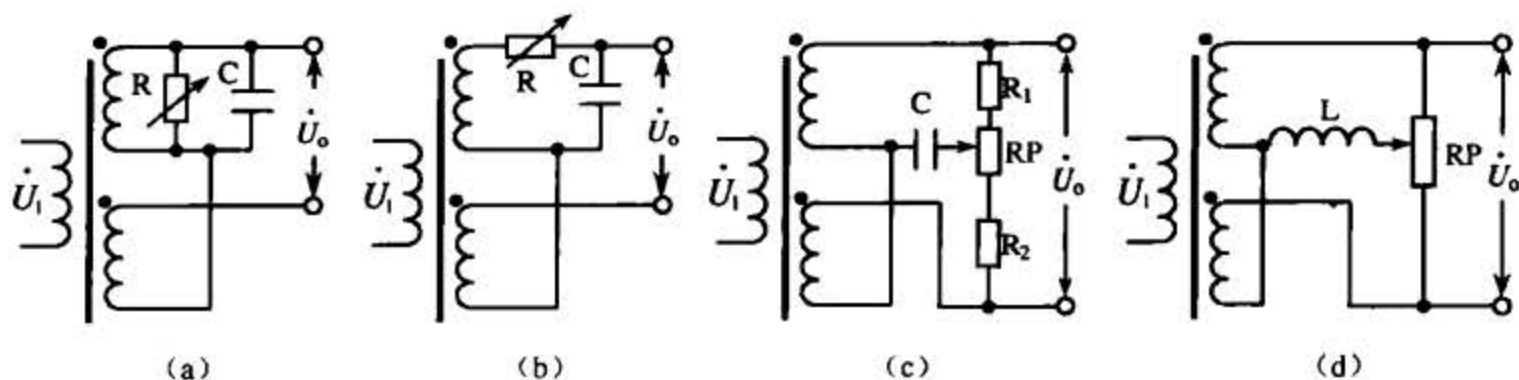


图 4-13 减小零点残存电压电路

4.2.3 差动变压器的测量电路

差动变压器的输出为交流电压,它与衔铁位移成正比。用交流电压表测量其输出值只能反映衔铁位移的大小,不能反映移动的方向,因此常采用差动整流电路和相敏检波电路进行测量。

1. 差动整流电路

差动整流电路是根据半导体二极管的单向导通原理进行解调的。它把两个次级电压分别

整流,然后将整流后的电压或电流的差值作为输出。

图 4-14 所示为电压输出型全波差动整流电路。若传感器的一个次级绕组的输出瞬时电压极性在 e 点为“+”,f 点为“-”,则电流路径是 eacdbf。反之,如 e 点为“-”,f 点为“+”,则电流路径是 fbcdae。可见,无论次级绕组的输出瞬时电压极性如何,通过电阻 R_1 上的电流总是从 c 到 d。同理,分析另一个次级绕组的输出情况可知,通过电阻 R_2 上的电流总是从 g 到 h。以上分析得出的综合结论是:无论次级绕组的输出瞬时电压极性如何,整流电路的输出电压 U_o 始终等于 R_1 、 R_2 两个电阻上的电压差,即

$$U_o = U_{dc} + U_{gh} = U_{dc} - U_{hg}$$

整流电路输出的电压波形如图 4-15 所示。当铁芯在零位时,输出电压 $U_o = 0$; 当铁芯在零位以上或零位以下时,输出电压的极性相反,零点残存电压自动抵消。

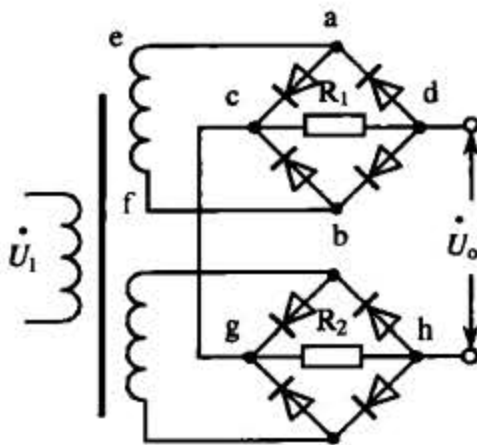


图 4-14 全波差动整流电路

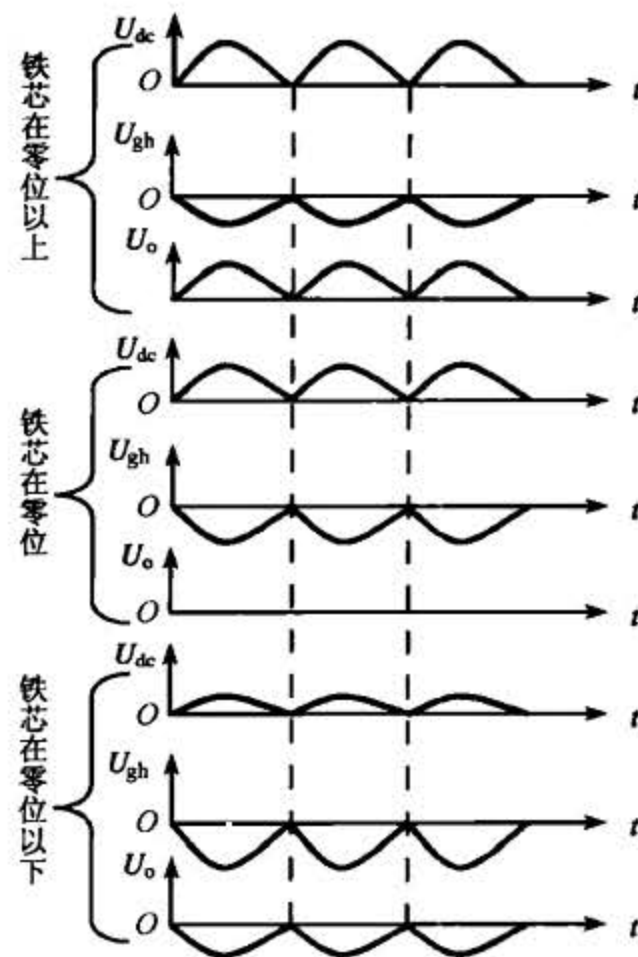


图 4-15 全波差动整流电路电压波形

2. 二极管相敏检波电路

相敏检波电路要求比较电压与差动变压器次级侧输出电压的频率相同,相位相同或相反。另外还要求比较电压的幅值尽可能大,一般情况下,其幅值应为信号电压的 3~5 倍。图 4-16 (a) 所示是差动相敏检波电路的一种形式。

VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 为四个性能完全相同的二极管,以同一方向串联成一个闭合回路,形成一个环形电桥。 R 为限流电阻,避免二极管导通时变压器 T_2 的次级电流过大。差动变压器输出的调幅波电压 $\dot{U}_1$ 通过变压器 T_1 加到环形电桥的一个对角线,参考电压 $\dot{U}_2$ 通过变压器 T_2 加到环形电桥的另一个对角线, $\dot{U}_2$ 与 $\dot{U}_1$ 的频率相同(要求 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_1$ 在正位移时,同频同相;在负位移时,同频反相),且 $\dot{U}_2 > \dot{U}_1$; R_L 为负载电阻,输出电压 U_L 从变压器 T_1 和 T_2 的中心抽头引出。

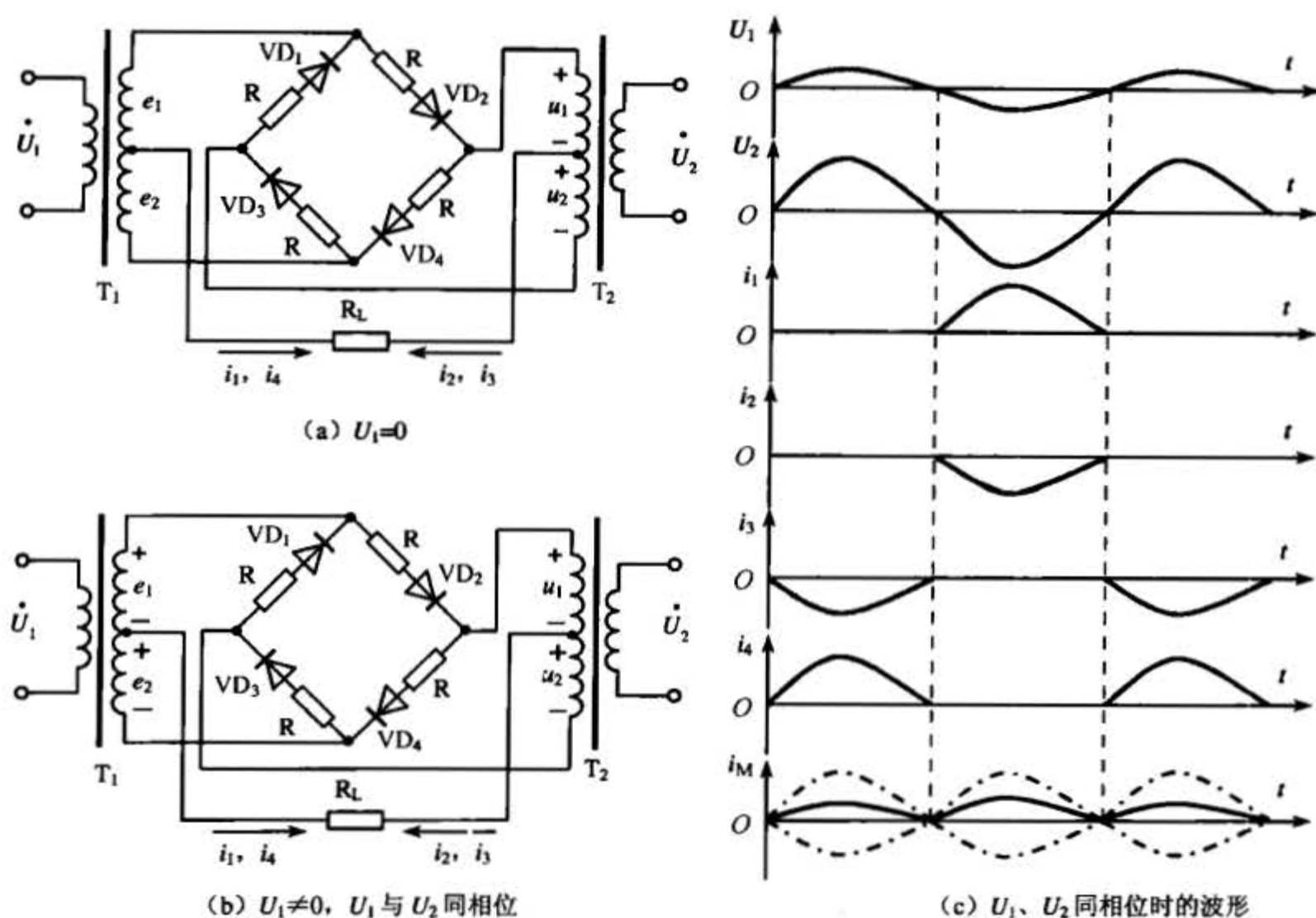


图 4-16 二极管相敏检波电路和波形

下面分析相敏检波电路的工作过程。

① 当衔铁在中间位置时, 位移 $x(t)=0$, 传感器输出电压 $\dot{U}_1=0$ 。

如图 4-16 (a) 所示。由于 $\dot{U}_2$ 的作用, 在正半周时, 电流 i_4 自 u_1 的正极出发, 流过 VD_4 , 再经过变压器 T_1 的下部线圈, 自左向右经过负载电阻 R_L (规定该方向为正方向) 后回到 u_1 的负极。 i_4 的大小为

$$i_4 = \frac{u_1}{R + R_L}$$

电流 i_3 自 u_2 的正极出发, 自右向左经过负载电阻 R_L (与规定的正方向相反, 方向为负), 经过变压器 T_1 的下部线圈, 再流过 VD_3 , 然后回到 u_2 的负极。 i_3 的大小为

$$i_3 = \frac{u_2}{R + R_L}$$

因为是从中心抽头, 所以 $u_1 = u_2$, 故 $i_3 = i_4$ 。流经 R_L 的电流为两个电流的代数和, 即

$$i_o = i_4 - i_3 = 0$$

在负半周时, 电流 i_1 自 u_2 的正极出发, 流过 VD_1 , 再经过变压器 T_1 的上部线圈, 自左向右经过负载电阻 R_L (方向为正) 后回到 u_2 的负极; 电流 i_2 自 u_1 的正极出发, 自右向左经过负载电阻 R_L (方向为负), 经过变压器 T_1 的上部线圈, 再流过 VD_2 , 然后回到 u_1 的负极。

$$i_1 = \frac{u_2}{R + R_L}$$

$$i_2 = \frac{u_1}{R + R_L}$$

同理可知 $i_1 = i_2$, 电流输出也为零。

由以上讨论可以得出结论：衔铁在中间位置时，无论参考电压是正半周还是负半周，在负载 R_L 上得到的输出电压始终为零。

② 当衔铁在零位以上移动时，位移 $x(t) > 0$ ， $\dot{U}_1$ 与 $\dot{U}_2$ 同频同相。

如图 4-16 (b) 所示，在正半周时由于 $\dot{U}_2 > \dot{U}_1$ ，电流 i_4 的流向与 $\dot{U}_1 = 0$ 时完全相同，只是回路中多了一个与 u_1 同向串联的电压 e_2 ，所以

$$i_4 = \frac{u_1 + e_2}{R + R_L}$$

电流 i_3 的流向与 $\dot{U}_1 = 0$ 时也一样，只是回路中多了一个与 u_2 反向串联的电压 e_2 ，所以

$$i_3 = \frac{u_2 - e_2}{R + R_L}$$

故 $i_4 > i_3$ ， $i_o = i_4 - i_3 > 0$ 。这表示 i_o 的方向与 i_4 的相同，为规定的正方向。

负半周时，电流 i_1 的流向与 $\dot{U}_1 = 0$ 时完全相同，只是回路中多了一个与 u_2 同向串联的电压 e_1 ，所以

$$i_1 = \frac{u_2 + e_1}{R + R_L}$$

电流 i_2 的流向与 $\dot{U}_1 = 0$ 时也一样，只是回路中多了一个与 u_1 反向串联的电压 e_1 ，所以

$$i_2 = \frac{u_1 - e_1}{R + R_L}$$

因为 $u_1 = u_2$ ，故 $i_1 > i_2$ ， $i_o = i_1 - i_2 > 0$ 。这表示 i_o 的方向也与规定的正方向相同。

由以上讨论可知：衔铁在零位以上移动时，无论参考电压是正半周还是负半周，在负载 R_L 上得到的输出电压始终为正。 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 同相位时各部分电压与电流的波形图如图 4-16 (c) 所示。

③ 当衔铁在零位以下移动时，位移 $x(t) < 0$ ， $\dot{U}_1$ 与 $\dot{U}_2$ 同频反相。

在 $\dot{U}_2$ 为正半周、 $\dot{U}_1$ 为负半周时，由于 $\dot{U}_2 > \dot{U}_1$ ，电流 i_4 的流向与 $x(t) > 0$ 时相同，只是回路中 u_1 与 e_2 是反向串联的，所以

$$i_4 = \frac{u_1 - e_2}{R + R_L}$$

电流 i_3 的流向与 $x(t) > 0$ 时也一样，只是回路中 u_1 与 e_2 是同向串联的，所以

$$i_3 = \frac{u_2 + e_2}{R + R_L}$$

故 $i_4 < i_3$ ， $i_o = i_4 - i_3 < 0$ 。这表示 i_o 的方向与规定的正方向相反。同理，在 $\dot{U}_2$ 为负半周、 $\dot{U}_1$ 为正半周时， $i_1 < i_2$ ， $i_o = i_1 - i_2 < 0$ 。这表示 i_o 的方向也与规定的正方向相反。

由以上讨论可以得出结论：衔铁在零位以下移动时，无论参考电压是正半周还是负半周，在负载 R_L 上得到的输出电压始终为负。

综上所述，经过相敏检波电路后，正位移输出正电压，负位移输出负电压。电压值的大小表明位移的大小，电压的正负表明位移的方向。因此，差动变压器的输出经过相敏检波以后，特性曲线由图 4-17 (a) 变成图 4-17 (b)，可见零点残存电压自动消失。

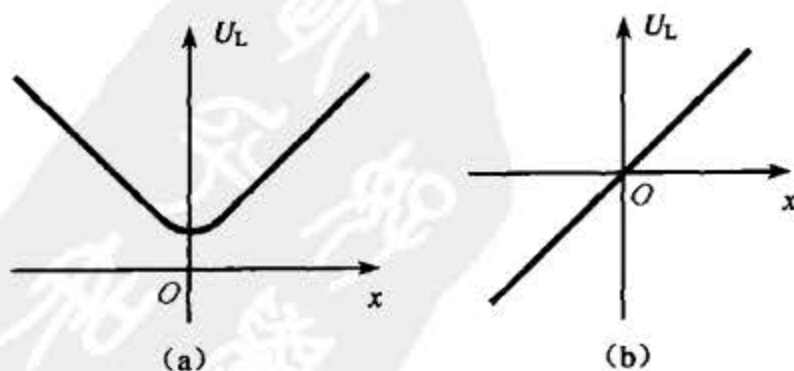


图 4-17 相敏检波前后的输出特性曲线