

# 第 4 章 电感式传感器

电感式传感器是利用电磁感应原理，把被测物理量（如位移、振动、压力、应变、流量、相对密度等）转换成线圈的自感或互感系数的变化，从而导致线圈电感量改变，再由测量电路转换为电压或电流的变化量的输出，来实现非电量的测量。因此根据转换原理，电感式传感器可以分为自感式和互感式两大类。

电感式传感器具有以下特点。

① 结构简单、可靠，测量力小。

② 灵敏度和分辨力高。能测出  $0.1\mu\text{m}$  甚至更小的机械位移；输出信号强，电压灵敏度可达每毫米数百毫伏。

③ 重复性好，线性度优良。在几十微米到数百毫米的位移范围内，传感器的非线性误差可做到  $0.05\%\sim 0.1\%$ ，输出特性的线性度较好，且比较稳定。

④ 能实现远距离传输、记录、显示和控制。

⑤ 响应频率低，不适合高频动态测量。

电感式传感器的种类很多，本章介绍自感式、互感式和涡流式三种。

## 4.1 自感式传感器

### 4.1.1 自感式传感器的结构和工作原理

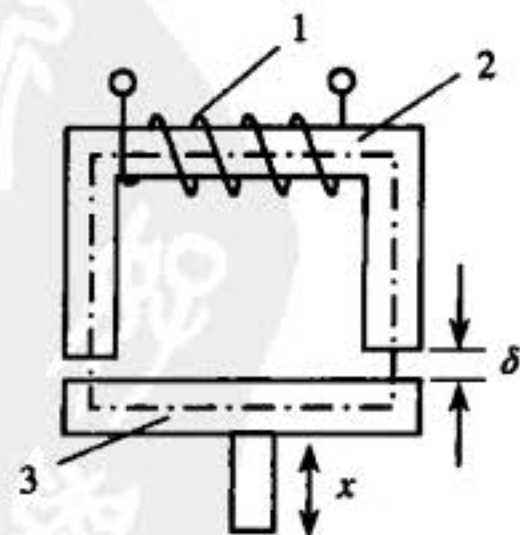
自感式传感器又称为变磁阻式传感器，图 4-1 为其结构示意图。传感器由线圈、铁芯和衔铁组成。图中点划线表示磁路。铁芯和衔铁都由导磁材料制成。在铁芯和活动衔铁之间有气隙，气隙厚度为  $\delta$ ，工作时被测物体与衔铁相接。当被测物体带动衔铁移动时，气隙的厚度  $\delta$  发生变化，引起磁路的磁阻发生变化，从而导致电感线圈的电感值  $L$  变化。

若线圈匝数为  $N$ ，通入线圈中的电流为  $I$ ，每匝线圈产生的磁通为  $\Phi$ ，由电感的定义有

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

设磁路总磁阻为  $R_M$ ，则磁通可表示为

$$\Phi = \frac{IN}{R_M}$$



1—线圈；2—铁芯；3—衔铁

图 4-1 自感式传感器

以上两式联立得

$$L = \frac{N^2}{R_M} \quad (4-1)$$

因为气隙较小 (一般为 0.1~1mm), 所以, 可以认为气隙中的磁场是均匀的。若忽略磁路铁损, 则磁路总磁阻  $R_M$  可看成是由铁芯磁阻  $R_F$  和空气隙磁阻  $R_\delta$  组成的, 即

$$R_M = R_F + R_\delta$$

而

$$R_F = \frac{L_1}{\mu_1 A_1} + \frac{L_2}{\mu_2 A_2}, \quad R_\delta = \frac{2\delta}{\mu_0 A}$$

式中:  $L_1$  为铁芯的磁路总长度;

$A_1$  为铁芯横截面积;

$\mu_1$  为铁芯材料的磁导率;

$L_2$  为衔铁的磁路总长度;

$A_2$  为衔铁横截面积;

$\mu_2$  为衔铁材料的磁导率;

$\delta$  为气隙的厚度;

$\mu_0$  为空气的磁导率 ( $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ );

$A$  为气隙磁通截面积。

当铁芯和衔铁采用同一种导磁材料, 且截面相同时, 因为气隙  $\delta$  一般较小, 可认为气隙磁通截面积和铁芯与衔铁之间的相对覆盖面积相等。

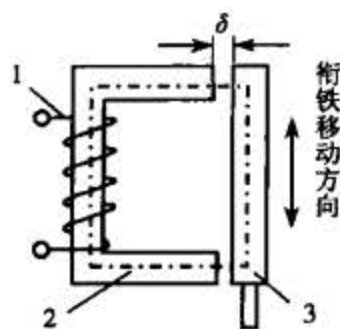
由于自感式传感器的铁芯一般在非饱和状态下, 其磁导率远大于空气的磁导率, 即铁芯的磁阻与空气隙的磁阻相比很小, 即  $R_F \ll R_\delta$ , 计算时可以忽略不计。故 (4-1) 式可表示为

$$L = \frac{N^2}{R_M} \approx \frac{N^2}{\frac{2\delta}{\mu_0 A}} = \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta} \quad (4-2)$$

可见, 自感  $L$  是气隙截面积  $A$  和气隙厚度  $\delta$  的函数, 即  $L = f(A/\delta)$ 。如果  $A$  保持不变, 则  $L$  为  $\delta$  的单值函数, 构成变气隙式自感传感器, 其结构如图 4-1 所示; 若保持  $\delta$  不变, 使铁芯与衔铁之间的相对覆盖面积  $A$  随被测量 (如位移) 变化, 则构成变截面式自感传感器, 其结构如图 4-2 所示。其中, 使用较广泛的是变气隙式自感传感器。

变气隙式自感传感器与变截面式自感传感器的特性曲线如图 4-3 所示。其中, 线圈电感量  $L$  与气隙厚度  $\delta$  是非线性的, 如图 4-3 中  $L = f(\delta)$  曲线; 线圈电感量与磁通截面积  $A$  成正比, 是一种线性关系, 如图 4-3 中  $L = f(A)$  特性曲线, 为一直线。

下面分析变气隙式自感传感器的输出特性。



1—线圈; 2—铁芯; 3—衔铁  
图 4-2 变截面式自感传感器

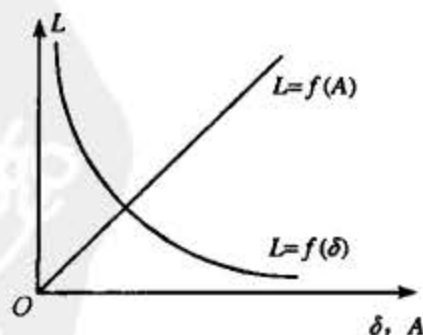


图 4-3 电感式传感器特性曲线

## 4.1.2 变气隙式自感传感器的输出特性

设自感传感器的初始气隙为  $\delta_0$ ，初始电感量为  $L_0$ ，衔铁位移  $\Delta\delta$  引起的气隙变化为  $\Delta\delta$ ，由 (4-2) 式可得初始电感量为

$$L_0 = \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0}$$

当衔铁下移  $\Delta\delta$  时，传感器气隙增大  $\Delta\delta$ ，气隙厚度变为  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ ，此时电感量  $L$  减小，电感量变化为  $\Delta L_1$

$$\begin{aligned}\Delta L_1 &= L - L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A}{2(\delta_0 + \Delta\delta)} - \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta_0} \\ &= \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta_0} \left( \frac{2\delta_0}{2\delta_0 + 2\Delta\delta} - 1 \right) \\ &= L_0 \frac{-\Delta\delta}{\delta_0 + \Delta\delta}\end{aligned}$$

电感量的相对变化为

$$\frac{\Delta L_1}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0 + \Delta\delta} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \cdot \frac{-\Delta\delta}{\delta_0} \quad (4-3)$$

当  $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \ll 1$  时，可将上式展开成泰勒级数形式

$$\frac{\Delta L_1}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3 + \dots \quad (4-4)$$

同理，当衔铁上移  $\Delta\delta$  时，传感器气隙减小  $\Delta\delta$ ，气隙厚度变为  $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$ ，此时电感量  $L$  增大，电感量变化为  $\Delta L_2$

$$\Delta L_2 = L - L_0 = L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta}$$

电感量的相对变化为

$$\frac{\Delta L_2}{L_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (4-5)$$

同样展开成泰勒级数形式

$$\frac{\Delta L_2}{L_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3 + \dots = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[ 1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 + \dots \right] \quad (4-6)$$

由 (4-4) 式、(4-6) 式可以看出，若忽略二次项以上的高次项后， $\Delta L_1$  和  $\Delta L_2$  与  $\Delta\delta$  为线性关系。可见高次项是造成非线性的主要原因，并且高次项还使得  $\Delta L_1$  和  $\Delta L_2$  不相等。显然， $\Delta\delta/\delta_0$  越小，高次项就减小得越快，非线性就越小。这说明输出特性与测量范围之间存在着矛盾。所以，自感式传感器只能用来测量微小的位移量。

由 (4-4) 式、(4-6) 式，忽略二次项以上的高次项，可得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \pm \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (4-7)$$

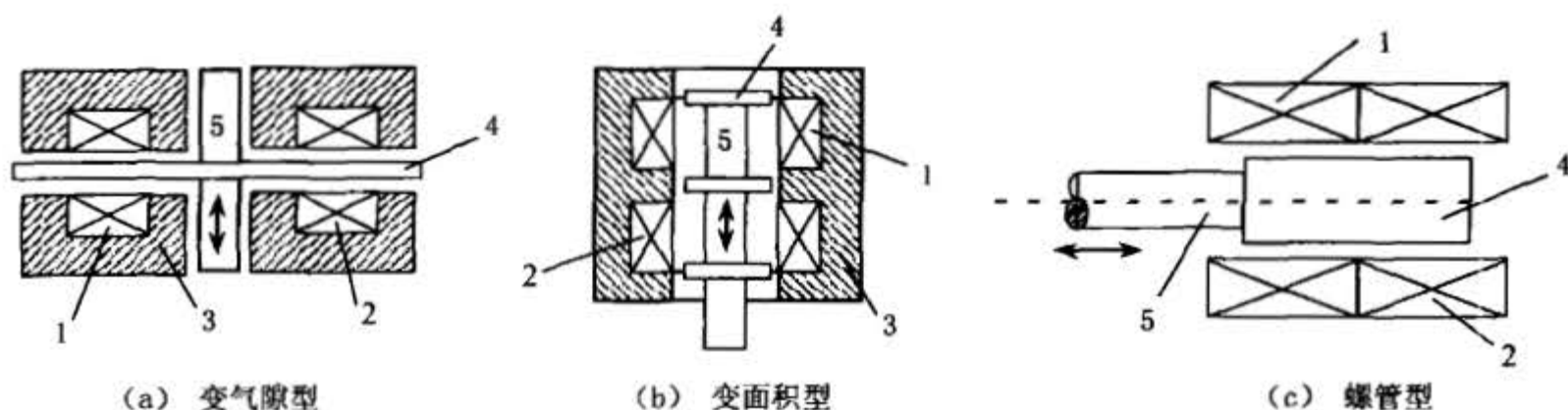
传感器的灵敏度为

$$K = \left| \frac{\Delta L}{\Delta \delta} \right| = \left| \frac{L_0}{\delta_0} \right| \quad (4-8)$$

在实际测量时,为了减小非线性误差,广泛采用差动式自感传感器。

### 4.1.3 差动式自感传感器

在实际使用中,常采用两个相同的传感线圈共用一个衔铁,构成差动式自感传感器,两个线圈的电气参数和几何尺寸要求完全相同。这种结构除了可以改善线性、提高灵敏度外,对温度变化、电源频率变化等的影响也可以进行补偿,从而减小了外界影响造成的误差。图4-4是变气隙型、变面积型及螺管型三种类型的差动式自感传感器的结构示意图。当衔铁移动时,一个线圈的电感量增加,另一个线圈的电感量减少,形成差动形式。尽管各种类型的差动式自感传感器的结构形式不同,但其工作原理都相似。如果将这两个差动线圈接成交流电桥的相邻桥臂,另外两只桥臂由电阻组成,它们就构成了交流电桥测量电路。



1—线圈 I; 2—线圈 II; 3—铁芯; 4—衔铁; 5—导杆

图 4-4 差动式自感传感器

以变气隙型差动自感传感器为例,当磁路总气隙改变  $\Delta\delta$  时,电感量的相对变化为

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_2 - L_1}{L_0} = 2 \left[ \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^5 + \dots \right] \quad (4-9)$$

式中:  $\Delta L$  为气隙改变  $\Delta\delta$  后,两线圈电感的变化量,  $\Delta L = L_1 - L_2$ ;

$L_0$  为衔铁在中央位置时,单个线圈的电感量,  $L_0 = \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0}$ ;

$L_1$  为气隙改变  $\Delta\delta$  后,线圈 I 的电感量,  $L_1 = \frac{\mu_0 AN^2}{2(\delta_0 + \Delta\delta)}$ ;

$L_2$  为气隙改变  $\Delta\delta$  后,线圈 II 的电感量,  $L_2 = \frac{\mu_0 AN^2}{2(\delta_0 - \Delta\delta)}$ 。

比较 (4-9) 式与 (4-4) 式或 (4-6) 式可以发现, (4-9) 式中不存在偶次项,显然差动式自感传感器的非线性误差在  $\pm\Delta\delta$  工作范围内要比单个自感传感器的小得多。图 4-5 可以说明这一点。图中图线 1 为线圈 I 的电感特性,图线 2 为线圈 II 的电感特性,图线 3 为线圈 I 与线圈 II 差接时的电感特性,图线 4 为两线圈差接后电桥输出电压与位移间的特性曲线。图 4-5 还说明:电桥输出电压的大小与衔铁的位移量  $\Delta\delta$  有关,它的相位则与衔铁的移动方向有关。若设衔铁向上移动  $\Delta\delta$  为负,则  $U_0$  为负;衔铁向下移动  $\Delta\delta$  为正,则  $U_0$  为正,相位差  $180^\circ$ 。

差动式自感传感器的灵敏度由 (4-9) 式忽略高次项以后可以得到

$$K = \left| \frac{2L_0}{\delta_0} \right| \quad (4-10)$$

与(4-8)式比较后可以看出,差动式自感传感器的灵敏度比单线圈传感器的提高了一倍。

由(4-10)式还可以看出,对差动气隙式传感器来说, $L_0$ 一定时, $\delta_0$ 越小,灵敏度越高;而若工作行程 $\Delta\delta$ 一定, $\delta_0$ 越小则 $\Delta\delta/\delta_0$ 越大,传感器的非线性失真越严重。即传感器的灵敏度与非线性失真是相互矛盾的,因此只能适当选取 $\Delta\delta/\delta_0$ 。

差动式自感传感器的非线性失真小,例如,当 $\Delta\delta/\delta_0=0.1$ 时,单线圈的非线性误差 $\gamma<10\%$ ,而差动式的非线性误差 $\gamma<1\%$ 。一般差动变气隙式自感传感器 $\Delta\delta/\delta_0=0.1\sim 0.2$ 时,可使传感器非线性误差在3%左右。其工作行程很小,若取 $\delta=2\text{mm}$ ,则行程为 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 。较大行程的位移测量,常利用螺管式自感传感器。

差动式与单线圈电感式传感器相比,具有下列优点。

- ① 线性好。
- ② 灵敏度提高一倍,即衔铁位移相同时,输出信号大一倍。
- ③ 温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响,由于能互相抵消而减小。
- ④ 电磁吸力对测力变化的影响也由于能相互抵消而减小。

#### 4.1.4 自感式传感器的等效电路

前面分析自感式传感器的工作原理时是假设自感线圈为一理想纯电感,但在实际传感器中,线圈不可能是纯电感,它应该包括线圈的铜损电阻 $R_c$ 、铁芯的涡流损耗电阻 $R_e$ 。由于线圈和测量设备电缆的接入,还存在线圈固有电容和电缆的分布电容,可用集中参数 $C$ 表示。因此,自感式传感器的等效电路如图4-6所示。它可以用一个复阻抗 $Z$ 来等效。

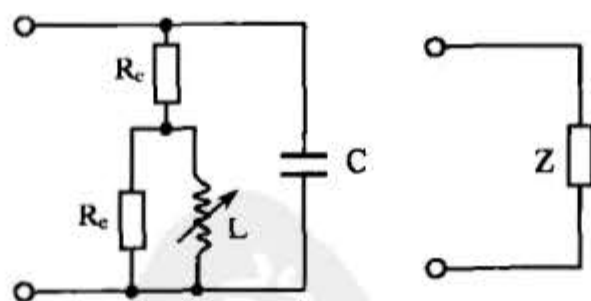


图 4-6 自感式传感器等效电路

#### 4.1.5 自感式传感器的测量电路

自感式传感器的测量电路有电阻平衡臂交流电桥、变压器式交流电桥、紧耦合电感臂交流电桥,还有把传感器作为振荡桥路中的一个组成元件的谐振式等。

##### 1. 电阻平衡臂交流电桥

交流电桥是自感传感器的主要测量电路,为了提高灵敏度、改善线性度,自感线圈一般

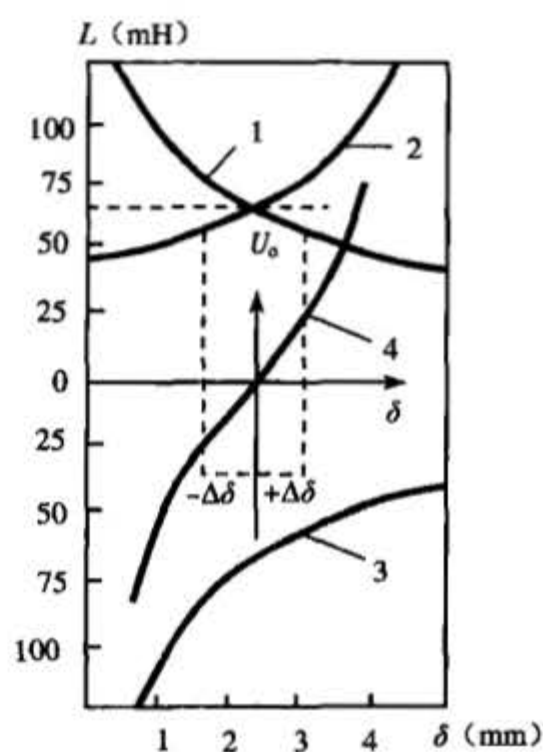


图 4-5 差动式自感传感器的输出特性

接成差动形式,如图 4-7 所示。差动的两个传感器线圈接成电桥的两个工作臂 ( $Z_1$ 、 $Z_2$  为两个差动传感器线圈的复阻抗),另外两个相邻的桥臂用平衡电阻  $R_1$ 、 $R_2$  代替。

设初始时  $Z_1 = Z_2 = Z = R_S + j\omega L$ ,  $R_1 = R_2 = R$ ,  $L_1 = L_2 = L_0$ 。

$\dot{U}_{AC}$  为桥路电源,  $Z_L$  是负载阻抗。

工作时,  $Z_1 = Z + \Delta Z$ ,  $Z_2 = Z - \Delta Z$ 。当电桥开路,即  $Z_L \rightarrow \infty$  时,

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta R_S + j\omega \Delta L}{R_S + j\omega L_0} \quad (4-11)$$

式中:  $L_0$  为衔铁在中间位置时单个线圈的电感值;

$R_S$  为线圈的损耗;

$\Delta L$  为两线圈电感的变化量。

当自感线圈的品质因数  $Q(Q = \frac{\omega L}{R_S})$  值很高时,上式可写成

$$\dot{U}_o \approx \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4-12)$$

将 (4-7) 式取绝对值

$$\Delta L = L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (4-13)$$

将 (4-13) 式代入 (4-12) 式,得

$$\dot{U}_o \approx \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (4-14)$$

可见,电桥输出电压与  $\Delta \delta$  有关,相位与衔铁移动方向有关。由于是交流信号,还要经过适当电路(如相敏检波电路)处理才能判别衔铁位移的大小及方向。

## 2. 变压器式交流电桥

变压器式交流电桥如图 4-8 所示。电桥两臂  $Z_1$ 、 $Z_2$  为传感器线圈的阻抗,另外两臂为交流变压器次级绕组的  $1/2$  阻抗。电桥 A 点的电位为

$$\dot{U}_A = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U}_{AC} \quad (\text{C 点为正, D 点为负})$$

或

$$\dot{U}_A = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U}_{AC} \quad (\text{D 点为正, C 点为负})$$

B 点电位为

$$\dot{U}_B = \frac{\dot{U}_{AC}}{2}$$

若电桥开路,负载阻抗无穷大,电桥输出电压为

$$\dot{U}_o = \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \left( \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U}_{AC} - \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \right)$$

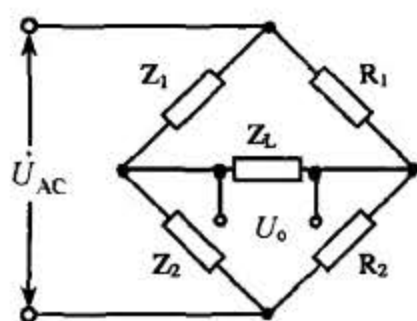


图 4-7 交流电桥

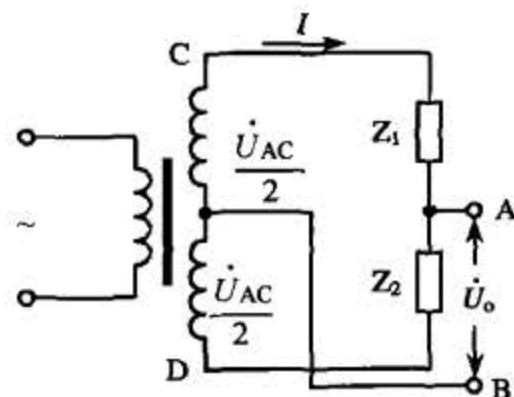


图 4-8 变压器式交流电桥

$$= \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

或

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4-15)$$

下面分三种情况进行讨论。

① 当传感器的衔铁处于中间位置时,  $Z_1 = Z_2 = Z$ ,  $\dot{U}_o = 0$ , 电桥平衡。

② 当衔铁下移时, 下面线圈的  $\delta$  减小, 电感增大, 故其阻抗增加, 即  $Z_2 = Z + \Delta Z$ ; 上面线圈的  $\delta$  增大, 电感减小, 故其阻抗减小,  $Z_1 = Z - \Delta Z$ 。电桥输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{j\omega\Delta L}{R + j\omega L} \quad (4-16)$$

③ 当衔铁上移同样的距离时, 下面线圈的阻抗减小,  $Z_2 = Z - \Delta Z$ ; 上面线圈的阻抗增加,  $Z_1 = Z + \Delta Z$ 。电桥输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = -\frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = -\frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{j\omega\Delta L}{R + j\omega L} \quad (4-17)$$

若线圈的  $Q$  值很高, 损耗电阻可忽略, 则 (4-16) 式和 (4-17) 式可写为

$$\dot{U}_o = \pm \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (4-18)$$

由 (4-18) 式可知, 当衔铁向上、向下移动相同的距离时, 产生的输出电压大小相等, 但极性相反。由于  $\dot{U}_{AC}$  是交流信号, 要判断衔铁位移的大小及方向同样需要经过相敏检波电路的处理。

变压器电桥与电阻平衡臂电桥相比, 具有元件少、输出阻抗小、桥路开路时电路为线性的优点, 但因为变压器次级不接地, 易引起来自初级的静电感应电压, 使高增益放大器不能工作。

### 3. 紧耦合电感臂交流电桥

紧耦合电感臂交流电桥如图 4-9 所示。它以差动式电感传感器的两个线圈作电桥工作臂, 而紧耦合的两个电感作为固定臂组成电桥电路。采用这种测量电路可以消除与电感臂并联的分布电容对输出信号的影响, 使电桥平衡稳定, 另外简化了接地和屏蔽的问题。

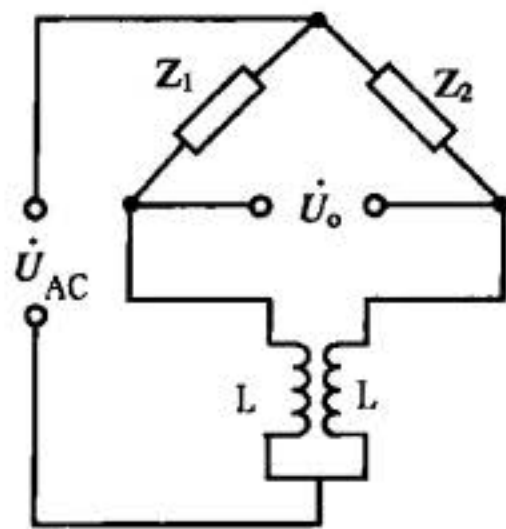


图 4-9 紧耦合电感臂交流电桥