

## 4.3 电涡流式传感器

电涡流式传感器是一种建立在涡流效应原理上的传感器。电涡流式传感器可以实现非接触地测量物体表面为金属导体的多种物理量,如位移、振动、厚度、转速、表面温度、电解质浓度、应力、硬度等参数,还可用于无损探伤。另外,电涡流传感器还具有体积小、灵敏度高、频率响应宽等优点。

电涡流式传感器结构简单,频率响应宽,灵敏度高,测量范围大,抗干扰能力强,特别是具有非接触连续测量的优点,因此在工业生产和科学技术的各个领域得到了广泛的应用。

### 4.3.1 电涡流式传感器的基本原理

若将金属导体放置在磁场中,当通过金属导体的磁通发生变化时,导体内就会产生感应电流,这种电流在导体中是自行闭合的,就像水中旋涡那样在导体内转圈,故称之为电涡流或涡流。电涡流的产生必然要消耗一部分能量,从而使产生磁场的线圈阻抗(或等效电感、品质因数等)发生变化,这种现象就称为涡流效应。电涡流式传感器就是利用涡流效应,将非电量转换为阻抗(或等效电感、品质因数等)的变化来进行测量的。

线圈阻抗的变化是金属导体的电阻率 $\rho$ 、相对磁导率 $\mu_r$ 、金属的厚度 $H$ 、线圈激励信号频率 $\omega$ 以及线圈与金属块间的距离 $x$ 等参数的函数。若固定某些参数,就能按电涡流的大小测量出另一个参数。

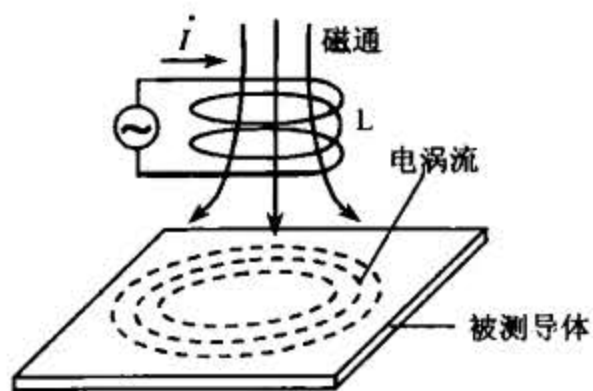


图 4-18 电涡流式传感器原理图

如图 4-18 所示,将传感器线圈靠近金属导体,当线圈中通有正弦交变电流  $I$  时,在线圈周围就会产生一个正弦交变磁场  $H_1$ ,置于这一磁场中的金属导体就会产生电涡流  $I_1$ ,电涡流  $I_1$  也将产生交变磁场  $H_2$ , $H_2$  的方向与  $H_1$  的方向相反。由于磁场  $H_2$  的反作用,抵消部分原磁场,从而导致线圈的电感量、阻抗和品质因数发生变化。

### 4.3.2 电涡流式传感器的等效电路

我们可以把被测导体上形成的电涡流等效成一个短路环中的电流,这样线圈与被测导体便可等效为两个相互耦合的线圈,如图 4-19 所示。图中  $R$ 、 $L$  为传感器线圈的电阻和电感。短路环可以认为是一匝短路线圈,其电阻为  $R_1$ 、电感为  $L_1$ 。线圈与导体间存在一个互感  $M$ ,它随线圈与导体间距  $x$  的减小而增大。

根据基尔霍夫定律,可列出下面的方程:

$$RI + j\omega LI - j\omega MI_1 = \dot{U}_1 \quad (4-20)$$

$$-j\omega MI + R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 = 0 \quad (4-21)$$

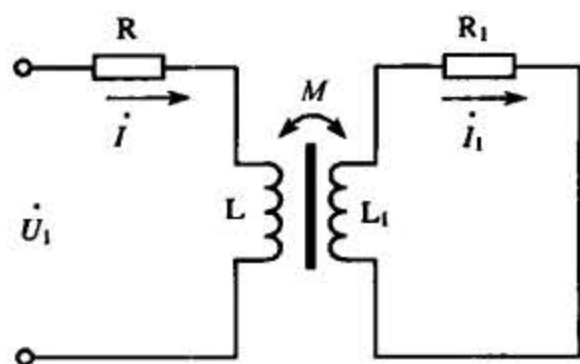


图 4-19 电涡流式传感器等效电路

由(4-21)式可得

$$\dot{i}_1 = \frac{j\omega M \dot{I}}{R_1 + j\omega L_1} \quad (4-22)$$

将(4-22)式代入(4-20)式可得

$$\begin{aligned} \dot{i} &= \frac{\dot{U}_1}{R + j\omega L - j\omega M \cdot \frac{j\omega M}{R_1 + j\omega L_1}} = \frac{\dot{U}_1}{R + j\omega L + \frac{\omega^2 M^2 (R_1 - j\omega L_1)}{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \\ &= \frac{\dot{U}_1}{\left[ R + \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} R_1 \right] + j\omega \left[ L - \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} L_1 \right]} \end{aligned}$$

当线圈与被测金属导体靠近时,考虑到涡流的反作用,传感器线圈的等效阻抗为

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{i}} = \left[ R + \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} R_1 \right] + j\omega \left[ L - \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} L_1 \right] \quad (4-23)$$

线圈的等效电阻和电感为

$$R_{eq} = R + \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} R_1 \quad (4-24)$$

$$L_{eq} = L - \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} L_1 \quad (4-25)$$

线圈的等效  $Q_{eq}$  值为

$$Q_{eq} = \frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \quad (4-26)$$

由(4-24)式和(4-25)式可以看出,线圈的等效电阻、等效电感都是互感系数  $M$  的函数,而互感系数  $M$  是随线圈与金属导体间距离  $x$  的变化而改变的。另外还可以看出,由于涡流的影响,线圈阻抗的实数部分增大,虚数部分减小,因此线圈的  $Q$  值下降,即当被测导体的某些参数发生变化时,可引起涡流式传感器线圈的阻抗  $Z$ 、电感  $L$  和品质因数  $Q$  发生变化,通过测量  $Z$ 、 $L$  或  $Q$  就可求出被测量参数的变化。

### 4.3.3 电涡流式传感器的种类

电涡流在金属导体内的渗透深度为

$$h = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (\text{cm}) \quad (4-27)$$

式中:  $\rho$  为导体的电阻率,单位为  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;

$f$  为交变磁场的频率;

$\mu_r$  为相对磁导率。

(4-27)式说明电涡流在金属导体内的渗透深度与传感器线圈的激励信号频率有关。故电涡流式传感器可分为高频反射式和低频透射式两类。目前高频反射式电涡流传感器应用较广泛。

#### 1. 高频反射式电涡流传感器

高频反射式电涡流传感器的结构很简单,主要部件是一个固定在框架上的扁平线圈。线

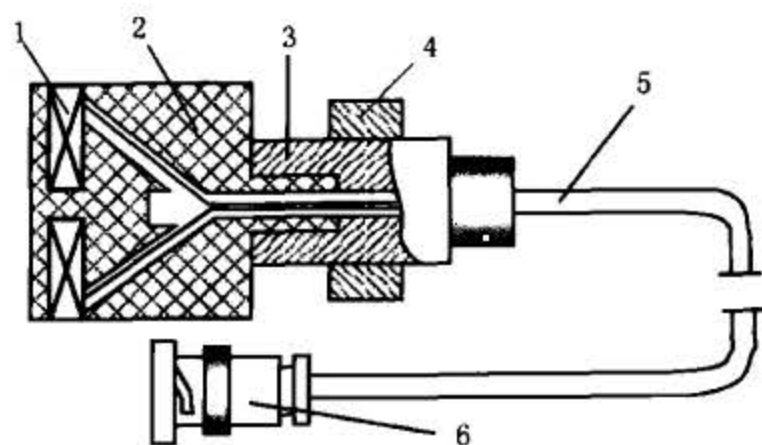
圈可以粘贴在框架的端部,也可以绕在框架端部的槽内。图 4-20 为一种高频反射式电涡流传感器的结构示意图。

传感器线圈与被测金属导体间是磁性耦合,电涡流传感器是利用这种耦合程度的变化来进行测量的。因此,被测物体的物理性质,以及它的尺寸都与总的测量装置特性有关。一般来说,被测金属导体的电导率越高,传感器的灵敏度也越高。

为了充分有效地利用电涡流效应,对于平板型的被测导体,则要求其半径应大于线圈半径的 1.8 倍,否则灵敏度要降低。当被测导体是圆柱体时,其直径必须为线圈直径的 3.5 倍以上,灵敏度才不受影响。

## 2. 低频透射式电涡流传感器

低频透射式电涡流传感器采用低频激励,因而有较大的贯穿深度,适合于测量金属材料的厚度。图 4-21 所示为这种传感器的工作原理图。



1—线圈; 2—框架; 3—衬套; 4—支架; 5—电缆; 6—插头

图 4-20 高频反射式电涡流传感器

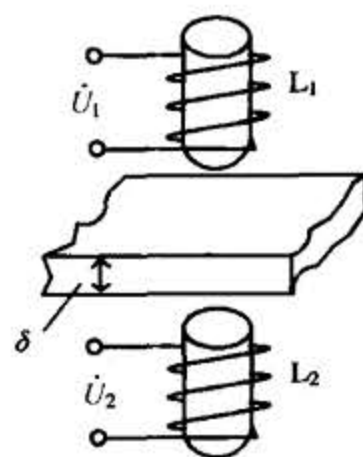


图 4-21 低频透射式电涡流传感器

传感器有发射线圈  $L_1$  和接收线圈  $L_2$ 。 $L_1$  和  $L_2$  分别位于被测材料的两侧。由振荡器产生的低频电压  $\dot{U}_1$  加到发射线圈  $L_1$  两端,接收线圈  $L_2$  两端产生感应电压  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{U}_2$  的大小与  $\dot{U}_1$  的幅值、频率以及两个线圈的匝数、结构和两者的相对位置有关。若两线圈间无金属导体,则  $L_1$  的磁通能较多地穿过  $L_2$ ,在  $L_2$  上产生的感应电压  $\dot{U}_2$  最大。

如果在两个线圈之间放置一块金属板,由于在金属板内产生电涡流,消耗了部分磁场能量,到达接收线圈  $L_2$  的磁通量减小,从而引起  $\dot{U}_2$  的下降,而且,金属板厚度越大,电涡流损耗越大, $\dot{U}_2$  就越小。可见  $\dot{U}_2$  的大小可以反映出金属板的厚度。

线圈  $L_2$  的感应电压与被测厚度的增大按负幂指数的规律减小,即

$$\dot{U}_2 \propto e^{-\frac{\delta}{h}}$$

式中:  $\delta$  为被测金属板的厚度;

$h$  为贯穿深度,由 (4-27) 式可知,  $h \propto \sqrt{\frac{\rho}{f}}$ 。

为了较好地进行厚度测量,激励频率应选得较低。频率太高,贯穿深度小于被测厚度,不利于进行厚度测量,通常选激励频率为 1kHz 左右。

一般地说,测薄金属板时,频率应略高些;测厚金属板时,频率应低些。在测量电阻率  $\rho$  较小的材料时,应选较低的频率(如 500Hz);测量  $\rho$  较大的材料时,应选用较高的频率

(如 2kHz), 从而保证在测量不同材料时能得到较好的线性和灵敏度。

#### 4.3.4 电涡流式传感器的转换电路

电涡流式传感器转换电路的作用就是将  $Z$ 、 $L$  或  $Q$  转换为电压或电流的变化。阻抗  $Z$  的转换电路一般用电桥, 电感  $L$  的转换电路一般用谐振电路, 又可以分为调幅法和调频法两种。

##### 1. 交流电桥

交流电桥法是将传感器线圈的阻抗变化转化为电压或电流的变化。图 4-22 是交流电桥法的电原理图, 图中  $L_1$ 、 $L_2$  是两个差动传感器线圈, 它们与电容  $C_1$ 、 $C_2$  的并联阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  作为电桥的两个桥臂, 即

$$Z_1 = L_1 // C_1, Z_2 = L_2 // C_2$$

另两个桥臂由纯电阻  $R_1$ 、 $R_2$  组成。初始状态, 使电桥平衡。当被测物体与线圈耦合时, 由于传感器线圈的阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  发生变化, 电桥失去平衡, 将电桥不平衡造成的输出信号进行放大并检波, 就可得到与被测量成正比的输出。

电桥法主要用于两个电涡流线圈组成的差动式传感器。

##### 2. 调幅式电路

这种方法是将传感器线圈的等效电感的变化转换为电压或电流的变化。谐振调幅法的测量原理如图 4-23 所示, 电涡流式传感器线圈与电容并联组成 LC 并联谐振回路, 由石英晶体振荡器供电。石英晶体振荡器起一个恒流源的作用, 给谐振回路提供一个稳定频率 ( $f_0$ ) 的激励电流  $I_0$ 。

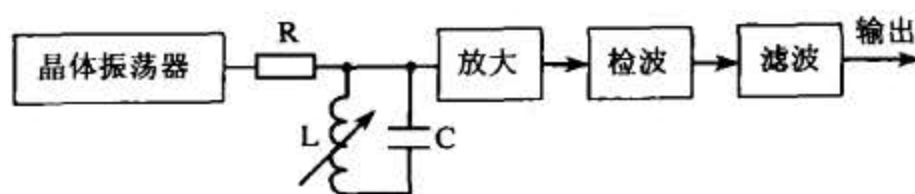


图 4-23 调幅式测量电路原理框图

在没有被测物体时, 并联谐振回路的谐振频率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  等于激励振荡器的频率  $f_0$ ,

此时 LC 并联回路呈现阻抗最大。

谐振回路上的输出电压  $U_0$  为

$$U_0 = I_0 Z \quad (4-28)$$

式中:  $I_0$  为恒流源给谐振回路提供的高频激励电流, 为定值;

$Z$  为 LC 并联回路的等效阻抗。

可以看出, LC 回路的阻抗  $Z$  越大, 回路的输出电压越大。因此, 在没有被测物体时, 回路输出电压  $U_0$  为最大。

当金属导体靠近传感器线圈时, 线圈的等效电感  $L$  发生变化, 导致回路失谐, 使回路阻抗  $Z$

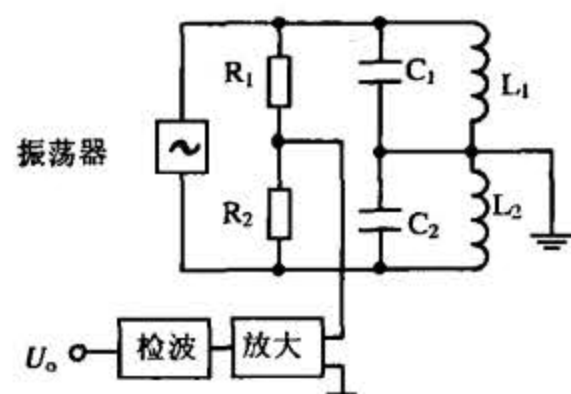


图 4-22 交流电桥测量电路

降低, 输出电压  $U_0$  也跟着降低。  $L$  的数值随导体与传感器线圈距离  $x$  的变化而变化, 因此输出电压  $U_0$  也随  $x$  而变化。  $U_0$  经过放大、检波、滤波后, 由指示仪表直接显示出  $x$  的大小。

图 4-23 中的电阻  $R$  称为耦合电阻, 它既有降低振荡器负载的作用, 又可视为恒流源内阻。  $R$  变大, 灵敏度降低;  $R$  变小, 灵敏度提高。但  $R$  太小时, 由于谐振回路的旁路作用, 反而会使灵敏度降低。耦合电阻的选择应考虑振荡器的输出阻抗和传感器线圈的品质因数。

### 3. 调频式电路

调频式测量电路的原理是被测量变化引起传感器线圈电感的变化, 而电感的变化导致振荡频率发生变化。频率变化间接反映了被测量的变化。这里电涡流传感器的线圈是作为一个电感元件接入振荡器中的。图 4-24 所示是调频式测量电路的原理图, 它包括克拉泼电容三点式振荡器 ( $C_2$ 、 $C_3$ 、 $L$ 、 $C$  和  $VT_1$ ) 和射极跟随器两个部分。

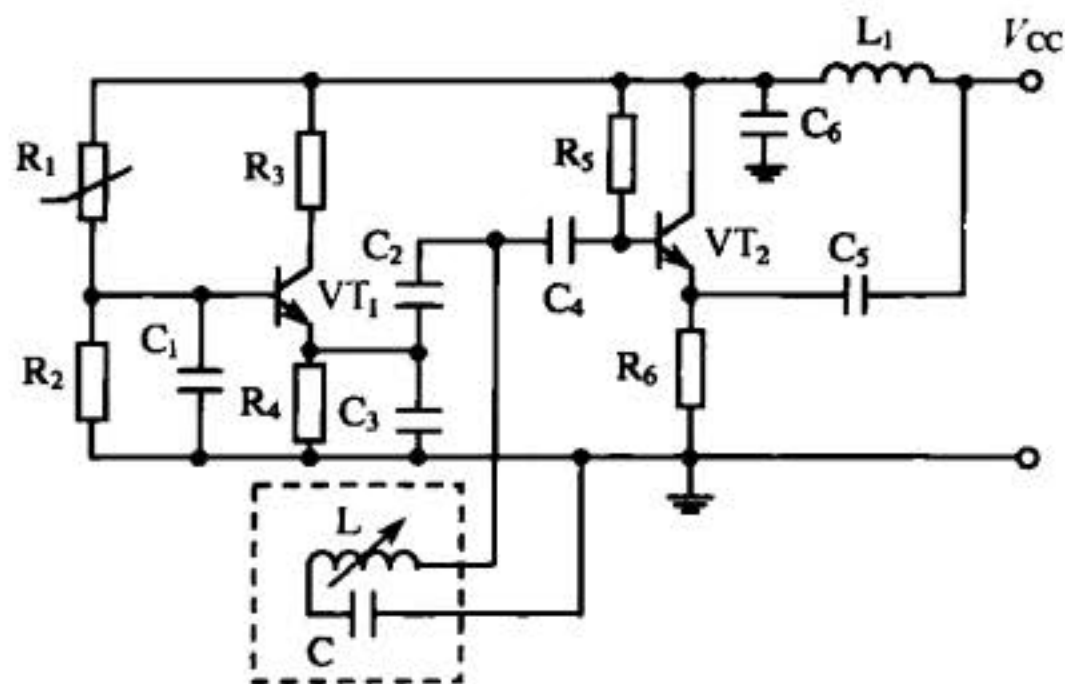


图 4-24 调频式测量电路

振荡器的频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(x)C}}$$

为了减小传感器输出电缆的分布电容的影响, 通常把传感器线圈  $L$  和调整电容  $C$  都封装在传感器中, 这样电缆分布电容的影响并联到大电容  $C_2$ 、 $C_3$  上, 因而对谐振频率的影响大大减小了。