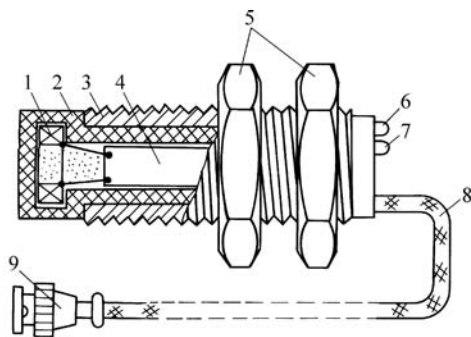


电涡流传感器是 20 世纪 70 年代以来得到迅速发展的一种传感器,它是利用电涡流效应进行工作的。由于其结构简单、灵敏度高、频响范围宽、不受油污等介质的影响、能进行非接触测量、适用范围广,因此一问世就受到各国的重视。目前这种传感器已广泛用来测量位移、振动、厚度、转速、温度、硬度等参数,还被用于无损探伤领域。

## 5.1 电涡流传感器的工作原理

### 5.1.1 高频反射式电涡流传感器

电涡流传感器结构比较简单,主要是一个安置在框架上的线圈,线圈可以绕成一个扁平圆形黏贴于框架上,也可以在框架上开一条槽,导线绕制在槽内形成一个线圈。如图 5-1 所示是高频反射式电涡流传感器的结构图。



1—电涡流线圈; 2—探头壳体; 3—壳体上的位置调节螺纹; 4—印制电路板;  
5—夹持螺母; 6—电源指示灯; 7—阈值指示灯; 8—输出屏蔽电缆线; 9—电缆插头。

图 5-1 电涡流传感器结构

根据法拉第电磁感应定律,将金属导体置于变化的磁场中,导体表面就会有感应电流产生。电流的流线在金属体内自行闭合,这种由电磁感应原理产生的旋涡状感应电流称为电涡流,这种现象称为电涡流效应。形成电涡流必须具备两个条件,一是存在交变磁场,二是导体处于交变磁场中。电涡流只集中在金属导体的表面,这一现象称为趋肤效应。当传感器线圈通以正弦交变电流  $I_1$  时,线圈周围空间必然产生正弦交变磁场  $H_1$ ,使置于此磁场中的金属导体中产生感应电涡流  $I_2$ , $I_2$  又产生新的交变磁场  $H_2$ 。根据楞次定律, $H_2$  的

作用将反馈给原磁场  $H_1$ ，由于磁场  $H_2$  的作用，涡流要消耗一部分能量，导致传感器线圈的等效阻抗发生变化。线圈阻抗的变化完全取决于被测金属导体的电涡流效应。

当电涡流线圈与金属板的距离减小时，电涡流线圈的等效电感  $L$  减小，等效电阻  $R$  增大，流过电涡流线圈的电流  $I_1$  增大，如图 5-2 所示。

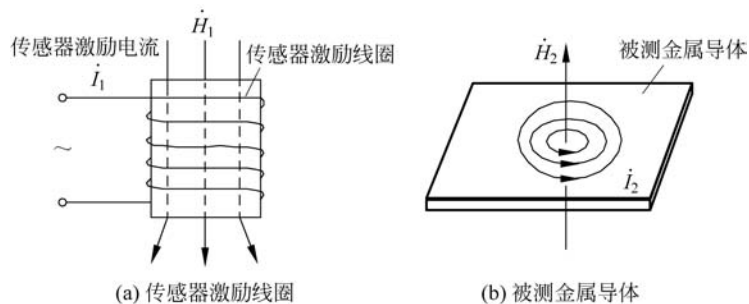


图 5-2 电涡流传感器的工作原理

磁场变化频率越高，涡流的穿透深度越小，其穿透深度  $h$  可表示为

$$h = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \text{ cm} \quad (5-1)$$

式中： $\rho$ ——导体电阻率，单位为  $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

$\mu_r$ ——导体相对磁导率；

$f$ ——交变磁场频率。

一般地，线圈电感量的变化与导体的电导率、磁导率、几何形状，线圈的几何参数、激励电流频率，以及线圈与被测导体之间的距离有关。如果控制上述参数中的一个参数改变，而其余参数恒定不变，则电感量就成为此参数的单值函数。如只改变线圈与金属导体间的距离，则电感量的变化即可反映出这二者之间的距离变化。

电涡流传感器的线圈与被测金属导体间是磁性耦合，电涡流传感器就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、尺寸和形状都与总的测量装置有关。一般地，被测物体的电导率越高，灵敏度也越高。磁导率则相反，当被测物体为磁性体时，灵敏度较非磁性体低。而且被测物体若含有剩磁，将影响测量结果，因此应予消磁。

被测物体的大小和形状也与灵敏度密切相关。若被测物体为平面，则被测物体的直径应不小于线圈直径的 1.8 倍。当被测物体的直径为线圈直径的一半时，灵敏度将减小一半；若直径更小时，灵敏度下降得更严重。若被测物体表面有镀层，镀层的性质和厚度不均匀也将影响测量精度。当测量转动或移动的被测物体时，这种不均匀将形成干扰信号。尤其当激励频率较高、电涡流的贯穿深度减小时，这种不均匀干扰的影响更加突出。当被测物体为圆柱形时，只有圆柱形的直径为线圈直径的 3.5 倍以上，才不影响测量结果；两者相等时，灵敏度会降低为 70% 左右。同样，对被测物体厚度也有一定的要求，一般厚度大于 0.2mm，即不影响测量结果（视激励频率而定），铜铝等材料的厚度更可减薄到  $70\mu\text{m}$ 。

### 5.1.2 低频透射式电涡流传感器

根据电路理论，由于趋肤效应，金属导体产生的电涡流的贯穿深度与传感器线圈激磁电

流的频率有关。频率越低,电涡流的贯穿深度越厚。利用此原理制成的低频透射涡流传感器适合测量金属材料的厚度。

图 5-3 所示为透射式电涡流厚度传感器的结构原理。在被测金属的上方设有发射传感器线圈  $L_1$ ,在被测金属板下方设有接收传感器线圈  $L_2$ 。当在  $L_1$  上加低频电压  $U_1$  时, $L_1$  上产生交变磁通  $\Phi_1$ ,若两线圈间无金属板,则交变磁场直接耦合至  $L_2$  中, $L_2$  产生感应电压  $U_2$ 。如果将被测金属板放入两线圈之间,则  $L_1$  线圈产生的磁通将导致在金属板中产生电涡流。在  $L_1$  与  $L_2$  之间放置一金属板后, $L_1$  产生的磁力线经过金属板,且在金属板中产生涡流,该涡流削弱了  $L_1$  产生的磁力线,使达到接收线圈的磁力线减少,从而使  $L_2$  两端的感应电势  $E$  减小。金属板中产生涡流的大小与金属板的厚度有关,金属板越厚,则板内产生的涡流越大,削弱的磁力线越多,接收线圈中产生的电势也越小。因此,可根据接收线圈输出电压的大小,确定金属板的厚度。透射式电涡流厚度传感器检测范围可达  $1\sim 100\text{mm}$ ,分辨率为  $0.1\mu\text{m}$ ,线性度为  $1\%$ 。

金属板中电涡流的大小除了受金属板厚度影响外,还与其电阻率有关,而电阻率与温度有关。因此在温度变化的情况下,根据电势判断金属板的厚度会产生误差。为此,在用涡流法测量金属板厚度时,要求被测材料温度恒定。为了较好地进行厚度测量,激励频率应选得较低,通常选  $1\text{kHz}$  左右。频率太高,贯穿深度小于被测厚度,不利于进行厚度测量。

一般地,测薄金属板时,频率应略高些,测厚金属板时,频率应低些。在测量电阻率较小的材料时,应选  $500\text{Hz}$  左右的较低频率;测量电阻率较大的材料时,则应选用  $2\text{kHz}$  左右的较高频率。这样,可保证在测量不同材料时能得到较好的线性度和灵敏度。

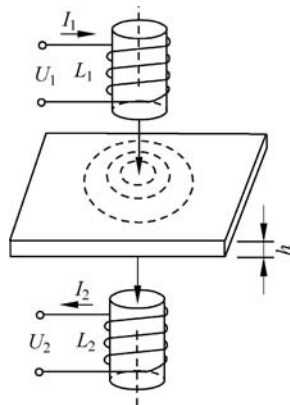


图 5-3 透射式涡流厚度传感器的结构原理

### 5.1.3 电涡流传感器的等效电路

若把导体等效成一个短路线圈,则可画出电涡流传感器的等效电路,如图 5-4 所示。根据基尔霍夫定律,可列出方程为

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (5-2)$$

解此方程组可得电涡流传感器的等效阻抗为

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + \\ &\quad j\omega \left( L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right) \\ &= R_{eq} + j\omega L_{eq} \end{aligned} \quad (5-3)$$

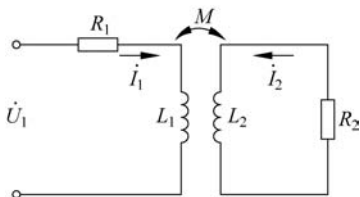


图 5-4 电涡流传感器的等效电路

式中： $\omega$ ——线圈激磁电流角频率；

$R_1$ ——线圈电阻；

$L_1$ ——线圈电感；

$L_2$ ——短路环等效电感；

$R_2$ ——短路环等效电阻；

$M$ ——互感系数；

$R_{\text{eq}}、L_{\text{eq}}$ ——线圈受电涡流影响后的等效电阻和等效电感。

由式(5-3)可以看出,有导体影响后,线圈阻抗的实部有效电阻增加,而虚部等效电感减小,这样使线圈阻抗发生了改变,这种作用称为反射阻抗作用。

为了同时研究阻抗实部、虚部两部分的作用,常使用品质因数  $Q$ 。根据品质因数的定义,当无金属导体影响时,线圈的品质因数

$$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (5-4)$$

有金属导体影响时,线圈的品质因数变为

$$Q = \frac{\omega L_{\text{eq}}}{R_{\text{eq}}} = \frac{L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2} \quad (5-5)$$

其中,

$$Z = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (5-6)$$

产生电涡流前后线圈的特征参数对比见表 5-1。

表 5-1 产生电涡流前后线圈的特征参数对比

对比量	电阻值	电感量	品质因数
产生电涡流前	$R_1$	$L_1$	$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$
产生电涡流后	$R_{\text{eq}} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2$	$L_{\text{eq}} = L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2$	$Q = \frac{\omega L_{\text{eq}}}{R_{\text{eq}}} = \frac{L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2}$

电涡流线圈受电涡流影响时的等效阻抗  $Z$  与金属导体的  $f、\mu、\sigma$  有关,与电涡流线圈的激励源频率  $f$  ( $f = \omega/2\pi$ ) 等有关,还与金属导体的形状、表面因素(粗糙度、沟痕、裂纹等)  $r$  有关,更重要的是与线圈到金属导体的间距(距离)  $x$  有关。等效阻抗  $Z$  可表示为

$$Z = R + j\omega L = f(\rho, \mu, x, f) \quad (5-7)$$

$Z$  为金属导体中产生涡流的圆环部分的阻抗,称涡流环流阻抗。可见,由于涡流的影响,线圈复阻抗的实数部分增大,虚数部分减小,线圈的品质因数  $Q$  下降。因此,可以通过测量  $Q$  值的变化来间接判断电涡流的大小。电涡流式传感器的等效电气参数,如线圈阻抗  $Z$ 、线圈电感  $L_{\text{eq}}$  和品质因数  $Q$  值都是互感系数  $M$  的函数,而  $M$  又是线圈与金属导体之间的距离  $x$  的非线性函数。由于  $H、R_2、L_2$  和  $M$  的大小取决于金属导体的电阻率  $\rho$ 、金属导体的磁导率  $\mu$  以及线圈激磁频率  $f$ ,因此,高频透射式传感器的阻抗  $Z$ 、电感  $L_{\text{eq}}$  和品质因

数  $Q$  都是由  $\rho, \mu, x, f$  等多个参数决定的多元函数,若只改变其中一个参数,其余参数保持不变,便可测定该可变参数。例如,若被测材料的情况不变,线圈激磁频率  $f$  不变,而  $Z = f(\rho, \mu, x, f)$ ,则阻抗  $Z$  就成为距离  $x$  的单值函数,由此可制成涡流位移传感器。

此外,电涡流式传感器还可利用导体电阻率随温度变换的特性实现温度测量;利用磁导率与硬度有关的特性实现非接触式硬度连续测量;利用裂纹引起导体电阻率、磁导率等变换的综合影响,进行金属表面裂纹及焊缝的无损检测等。

### 5.1.4 电涡流的强度和分布

#### 1. 电涡流的分布

因为金属存在趋肤效应,电涡流只存在于金属导体的表面薄层内,因此存在一个涡流区,涡流区内各处的涡流密度不同,存在径向分布和轴向分布。

##### 1) 电涡流的径向分布

导体系统产生的电涡流密度既是线圈与导体间距离  $x$  的函数,又是沿线圈半径方向  $r$  的函数。当  $x$  一定时,电涡流密度  $J$  与半径  $r$  的关系曲线如图 5-5 所示。

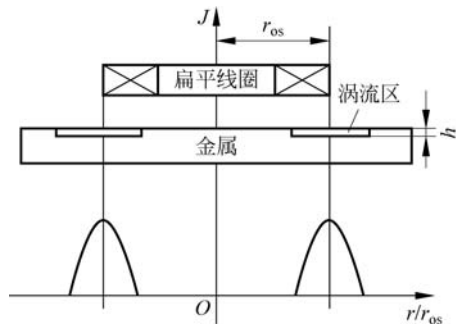


图 5-5 电涡流密度  $J$  与半径  $r$  的关系曲线

图 5-5 中  $J$  为金属导体在线圈外径处的电涡流密度。 $J_r$  为半径  $r$  处的金属导体表面的电涡流密度,由图 5-5 可知以下 3 点。

- (1) 电涡流径向形成的范围大约是传感器线圈外径  $r_{os}$  的 0.8~2.5 倍,且分布不均匀。
- (2) 电涡流密度在短路环半径  $r=0$  处为零,在  $r < 0.4 r_{os}$  处(以内)基本没有涡流。
- (3) 电涡流的最大值在  $r=r_{os}$  附近的一个狭窄区域内,当  $r=r_{os}$  时,金属涡流密度最大,当  $r=1.8 r_{os}$  时,涡流密度衰减到最大值的 5%。

##### 2) 电涡流的轴向分布

电涡流密度轴向分布曲线如图 5-6 所示,电涡流密度主要分布在表面附近。由于趋肤效应,涡流只在表面薄层内存在,沿磁场方向(轴向)也是分布不均匀的。在距离金属表面  $Z$  处,涡流按指数规律衰减,即

$$J_z = J_0 e^{-z/h} \tag{5-8}$$

式中:  $Z$ ——金属导体中某一点至表面的距离;

$J_z$ ——金属表面距离  $Z$  处的涡流;

$J_0$ ——金属导体表面的电涡流密度,即电涡流密度最大值;

$h$ ——电涡流轴向贯穿深度(趋肤深度)。

## 2. 电涡流的强度

当线圈与被测体距离改变时,电涡流密度发生变化,强度也要变化。根据线圈—导体系统,金属表面电涡流强度  $I_2$  与距离  $x$  呈非线性关系,如图 5-7 所示,  $I_2/I_1$  随  $x/r_{os}$  上升而下降。

$$I_2 = I_1 \left[ 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + r_{os}^2}} \right] \quad (5-9)$$

其中,  $I_1$  为线圈激励电流,  $I_2$  为金属导体中的等效电流(涡流),  $x=0$  时,  $I_2 = I_1$ ;  $x/r_{os} = 1$  时,  $I_2 = 0.3I_1$ ; 只有在  $x/r_{os} \ll 1$  时  $I_2$  才有较好的线性和灵敏度(测微位移);  $x > r_{os}$  时,电涡流很弱,所以测大位移时线圈直径要大。要增加测量范围就需加大线圈直径,使传感器体积增大,这是电涡流传感器应用的局限性。

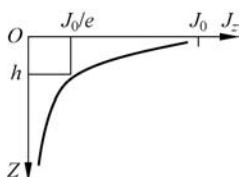


图 5-6 电涡流密度轴向分布曲线

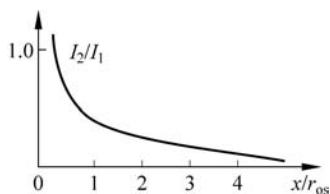


图 5-7 电涡流与距离的关系曲线

## 5.1.5 电涡流传感器的常用测量电路

由电涡流传感器的工作原理可知,该传感器把传感线圈与被测体之间的位移  $x$  的变化转换为线圈的等效电感、等效电阻、等效阻抗的变化。测量电路的任务就是将这些变化量转换为电压或电流的变化。电涡流传感器常用的测量电路有电桥电路、谐振电路等。

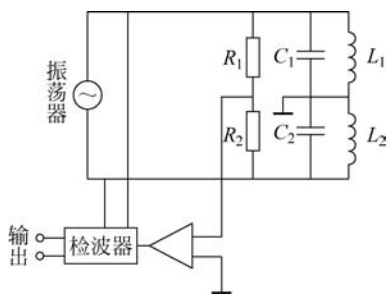


图 5-8 电桥测量电路

### 1. 电桥测量电路

在具有两个电涡流线圈的差动式传感器中,常采用如图 5-8 所示的电桥测量电路,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为传感器的两个差动线圈,它们与电容  $C_1$ 、 $C_2$  和电阻  $R_1$ 、 $R_2$  组成电桥的四个桥臂。初始状态时,电桥处于平衡状态。当有被测金属导体接近时,线圈的阻抗发生变化,电桥失去平衡,其输出端输出的信号经线性放大、检波后,就可以得到与被测量(距离)成比例的输出信号。

### 2. 谐振测量电路

这种方法是利用传感器的等效电感与电容组成并联谐振电路,当电涡流使传感器线圈电感发生变化时,谐振电路的阻抗  $Z$  和谐振频率  $f_0$  随之变化,测出  $Z$  和  $f_0$  的变化就可以反映出被测量的大小。相应的测量电路有调频式和调幅式两种。下面以调幅式电路为例说明此测量方法。

如图 5-9 所示,石英晶体振荡器相当于一个恒流源,经电阻  $R$  向  $LC$  并联谐振回路提供一个稳频( $f_0 = \text{常数}$ )、稳幅( $I_0 = \text{常数}$ )的高频激励信号,电阻  $R$  用来降低传感器对振荡器

工作状态的影响。

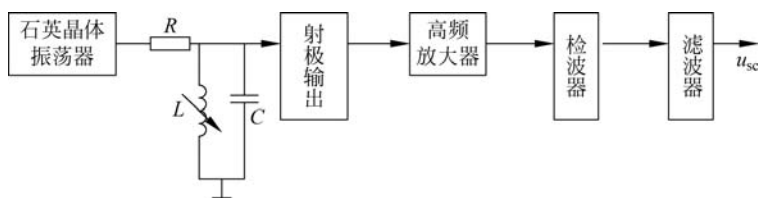


图 5-9 定频调幅式测量电路原理框图

LC 回路的阻抗越大,回路的输出电压也越大,其谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{5-10}$$

当被测体远离线圈( $x \rightarrow \infty$ )时, $L = L_1, f = f_0$ ,则有

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{5-11}$$

此时振荡回路的品质因数  $Q$  值最高,阻抗最大,经放大、检波、滤波后的输出电压最高。

当传感器接近被测导体时,线圈的等效电感  $L_1$  发生变化,品质因数  $Q$  值下降,阻抗减小,振荡器输出电压下降,回路的谐振峰值将向左右移动,如图 5-10(a)所示。

若被测体为非磁性材料或硬磁性材料,则传感器线圈的等效电感  $L_1$  减小,回路的谐振频率提高,谐振峰值逐渐右移,输出电压将由  $u$  降低为  $u'_1$  或  $u'_2$ ; 而对于磁性材料的被测体,由于磁路的磁导率增大而使传感器线圈的电感  $L_1$  增大,回路的谐振频率降低,谐振峰值逐渐左移,输出电压将由  $u$  降低为  $u_1$  或  $u_2$ ,因此可以用输出电压的变化表示传感器与被测导体间距离的变化,如图 5-10(b)所示。

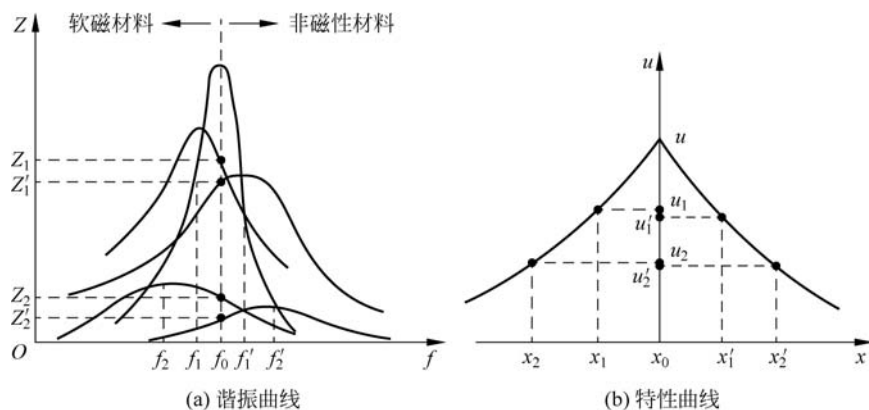


图 5-10 调幅式电路的谐振曲线和特性曲线

## 5.2 电涡流式传感器的应用

### 5.2.1 电涡流式转速传感器

如图 5-11 所示为电涡流式转速传感器工作原理图。在软磁材料制成的输入轴上加工

一个键槽,在距输入表面  $d_0$  处设置电涡流传感器,输入轴与被测旋转轴相连。

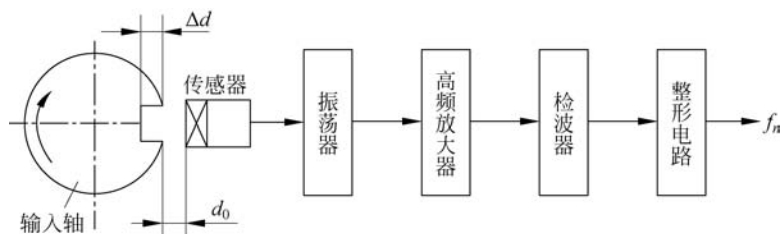
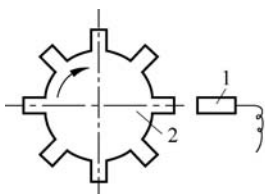


图 5-11 电涡流转速传感器工作原理

当被测旋转轴转动时,输出轴的距离发生  $d_0 + \Delta d$  的变化。由于电涡流效应,这种变化将导致振荡谐振回路的品质因素变化,使传感器线圈电感随  $\Delta d$  的变化而变化,它们将直接影响振荡器的电压幅值和振荡频率。因此,随着输入轴的旋转,从振荡器输出的信号中含有与转数成正比的脉冲频率信号。该信号经检波器检出电压幅值的变化量,然后经整形电路输出脉冲频率信号  $f_n$ 。该信号经电路处理便可得到被测转速。



1—传感器; 2—被测体。

图 5-12 转速测量

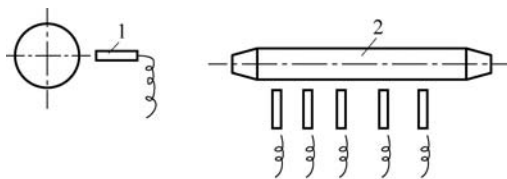
这种转速传感器可实现非接触式测量,抗污染能力很强,可安装在旋转轴旁长期对被测转速进行监视。最高测量转速可达 600 000r/min。

若做成齿状,如图 5-12 所示,转轴上开  $Z$  个槽,频率计的读数为  $f$ (单位为 Hz),则转轴的转速  $n$ (单位为 r/min)为

$$n = \frac{60f}{Z} \quad (5-12)$$

### 5.2.2 振动的测量

电涡流式传感器可以无接触地测量各种振动的振幅频谱分布。在汽轮机和空气压缩机中常用电涡流式传感器来监控主轴的径向、轴向振动,也可以测量发动机涡流叶片的振幅。在研究机器振动时,常常采用将多个传感器放置在机器的不同部位进行检测的方法,得到各个位置的振幅值、相位值,从而画出振形图。测量方法如图 5-13 所示。



1—传感器; 2—被测体。

图 5-13 振幅测量

### 5.2.3 电涡流探伤

利用电涡流式传感器可以检查金属表面裂纹、热处理裂纹,以及焊接的缺陷等。在探伤时,传感器与被测导体的距离保持不变。检测时,裂纹的出现会引起导体电导率、磁导率的

变化,从而引起输出电压的突变。

### 1. 钢管电涡流探伤的原理

电涡流探伤是以电磁感应理论作为基础的,一个简单的电涡流探伤系统包括一个交变电压发生器、一个检测线圈和一个指示器。交变电压发生器供给检测线圈以激励电流,从而在钢管及其周围形成一个激励磁场,这个磁场在钢管中感应出的旋涡状电流,称为涡流,钢管中的涡流又产生自己的磁场,涡流磁场的作用是削弱和抵消激励磁场,削弱和抵消的程度视被检钢管的材质以及涡流流经的路径上是否存在缺陷等因素而定。钢管中电涡流流动的方向也随交变磁场的变化而变化,其变化的频率与激励电压频率相同。由此可知,在电涡流磁场中包含了被检钢管好坏的信息,而检测线圈可以检测出钢管中电涡流磁场的变化,也就是检测出钢管质量好坏的信息,这些信息经过仪器处理后可用指示器指示出来。

### 2. 电涡流探伤方法的特点

(1) 电涡流探伤不需要耦合剂。电涡流探伤的传播介质是电磁波,电磁波不仅具有波动性,而且是一种粒子流,探头和被检材料之间不用耦合剂电磁波便可传播,电涡流探伤可以非接触地进行。

(2) 电涡流探伤速度快,能够实现在线生产。电涡流探伤设备的探伤速度可以达到3m/s,正常生产时速度为2m/s,完全能够适应自动生产线的要求,另外,调整和更换规格时间短,一般10~20min就可以完成设备的调整。

(3) 能够用于高温金属的探伤。电涡流探伤能够非接触进行,高温下导电试件仍有导电的性质,检测线圈不受材料居里温度的影响,电涡流可以对高温的钢管进行探伤。

(4) 探伤结果可靠性高。电涡流探伤设备能够将探钢管的信号情况由屏幕显示出来,分选装置自动将合格品和不合格品进行分选,自动打标装置能比较准确地标记出不合格品的缺陷位置,以便于人工确定缺陷的位置和类型。

### 3. 电涡流探伤设备对钢管的探伤

电涡流探伤可以很容易地检测出钢管外表面和近表面的缺陷,电涡流探伤方法不是一种自然伤的绝对测量方法,而是一种相对测量方法,就是将自然伤与人为加工的“人工伤”相比较的一种探伤方法。用样管对电涡流探伤设备进行校准后,就可以对钢管进行无损探伤。

(1) 样管的选取及制作。探伤用样管应与被探钢管的公称尺寸相同,化学成分、表面状态、热处理状态相似,并且样管平直,无影响探伤的自然缺陷。一般采用穿过式涡流探伤方法,样管的人工伤采用钻孔作为校准人工伤,样管上有5个孔,5个孔分布为头、尾各1个,中间3个,中间3个孔的轴向距离大于200mm。

(2) 设备调整。在电涡流探伤前要用样管对电涡流探伤设备进行校准,调整后的设备参数要使设备的性能指标达到标准要求。

(3) 缺陷的处理。钢管电涡流探伤后,系统自动将合格品和不合格品分开,若不合格品的缺陷位置在管端则可以将缺陷切除,若不合格品的缺陷位置在钢管的中部且修磨后钢管的壁厚仍在公差范围内则可以进行修磨,对于无法挽救的不合格品只能降级。

电涡流探伤技术在钢管生产中的应用对严格把握钢管的产品质量是至关重要的。无缝钢管厂中电涡流探伤设备的使用,完善了生产工艺,为其产品达到国际标准要求提供了保证。

电涡流式传感器可以用于检查金属的表面裂纹、热处理裂纹,以及用于焊接部位的探伤

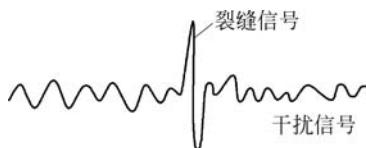


图 5-14 用涡流探伤时的测试信号

等,如图 5-14 所示。即使传感器与被测体距离不变,如果有裂纹出现,也会引起金属电阻率、磁导率的变化。裂纹处也可以解释为有位移值的变化。综合参数  $x$  的变化将引起传感器参数的变化,导致输出波形发生变化,通过测量传感器参数的变化即可达到探伤的目的。

### 5.2.4 位移的测量

电涡流传感器可用来测量各种形状的金属导体试件的位移量。如汽轮机主轴的轴向位移,磨床换向阀、先导阀的位移和金属试件的热膨胀系数等。测量位移范围从  $0 \sim 1\text{mm}$  到  $0 \sim 30\text{mm}$ ,分辨率为满量程的  $0.1\%$ 。

目前,电涡流位移传感器的分辨力最高已达到  $0.05\text{m}$ (量程  $0 \sim 15\text{m}$ )。凡是可转换为位移量的参数,都可用电涡流传感器测量,如机器转轴的轴向窜动、金属材料的热膨胀系数、钢水液位、纱线张力、流体压力等。

电涡流式传感器构成的液位监控系统如图 5-15 所示,通过浮子与杠杆带动涡流板上下位移,由电涡流式传感器探头发信号控制电动泵的开启从而使液位保持一定。

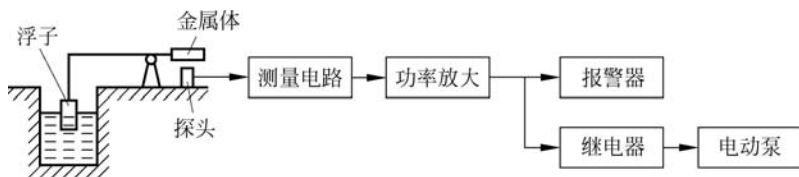


图 5-15 液位监控系统

图 5-16 所示为用于测量汽轮机主轴轴向位移的工作原理图,涡流传感器的探头靠近主轴,当主轴轴向移动时,涡流传感器的输出电感发生变化。

### 5.2.5 温度测量

在较小的温度范围内,导体的电阻率与温度的关系为

$$\rho_1 = \rho_0 [1 + \alpha(t_1 - t_0)] \quad (5-13)$$

式中:  $\rho_1$ ——温度  $t_1$  时的电阻率;

$\rho_0$ ——温度  $t_0$  时的电阻率;

$\alpha$ ——在给定温度范围内的电阻温度系数。

若保持电涡流传感器的其他各参数不变,使传感器的输出只随被测导体电阻率变化,则可测得温度的变化。上述原理可用于测量液体、气体介质温度或金属材料的表面温度,适合低温到常温的测量。

如图 5-17 所示为一种测量液体或气体介质温度的电涡流传感器。它具有不受金属表面涂料、油、水等介质的影响,可实现非接触式测量,反应快等优点。目前已制成热惯性时间常数仅为  $1\text{ms}$  的电涡流温度计。除了上述应用外,电涡流传感器还可利用磁导率与硬度有

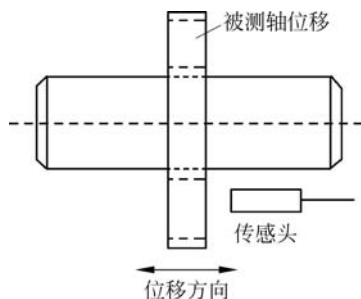


图 5-16 主轴轴向位移测量原理图

关的特性实现非接触式硬度连续测量,并可用作接近开关以及用于尺寸检测等。

### 5.2.6 电涡流安全通道检查门

安检门的内部设置有发射线圈和接收线圈,如图 5-18 所示。当有金属物体通过时,交变磁场就会在该金属导体表面产生电涡流,并在接收线圈中感应出电压,计算机根据感应电压的大小、相位来判定金属物体的大小。在安检门的上、中、下部安装多个电涡流线圈,当有金属穿过时,对应位置将报警。还在一侧安装一台“软 x 光”扫描仪,它能显示衣服内物体的形状和密度,对人体、胶卷无害。

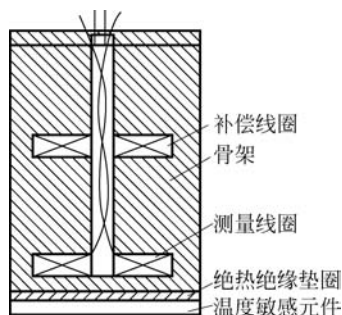
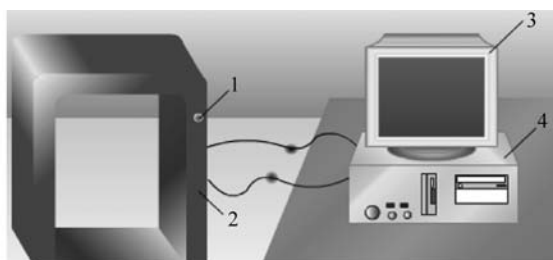


图 5-17 测温的电涡流传感器



1—报警指示灯; 2—电涡流线圈; 3—显示器; 4—图像处理系统。

图 5-18 电涡流式通道安全检查门简图

电涡流式通道安全检查门电路原理框图如图 5-19 所示,  $L_{11}$ 、 $L_{12}$  为发射线圈,  $L_{21}$ 、 $L_{22}$  为接收线圈,密封在门框内。晶振产生的音频信号通过  $L_{11}$ 、 $L_{12}$  在线圈周围产生同频率的交变磁场。因为  $L_{11}$ 、 $L_{12}$  与  $L_{21}$ 、 $L_{22}$  相互垂直,呈电气正交状态,无磁路交链,  $U_o = 0$ 。当有金属物体通过  $L_{11}$ 、 $L_{12}$  形成的交变磁场  $H_1$  时,交变磁场就会在该金属导体表面产生电涡流。电涡流也将产生一个新的微弱磁场  $H_2$ ,但与  $L_{21}$ 、 $L_{22}$  不再正交,因此可以在  $L_{21}$ 、 $L_{22}$  中感应出电压。计算机根据感应电压的大小确定金属物体的大小。

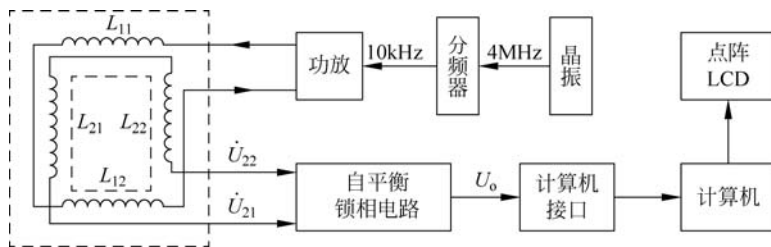


图 5-19 电涡流式通道安全检查门电路原理框图

### 5.3 接近开关及应用

接近开关无须与运动部件进行机械接触就可以控制位置开关,当物体接近开关感应面时,不需要机械接触及施加任何压力即可使开关动作,驱动交流或直流电器或给计算机装置

提供控制指令。接近开关是一种开关型传感器(即无触点开关),它既有行程开关、微动开关的特性,也具有传感性能,且动作可靠,性能稳定,频率响应快,应用寿命长,抗干扰能力强,并具有防水、防振、耐腐蚀等特点。其产品有电感式、电容式、霍尔式、交流型、直流型。接近开关又称无触点接近开关,是理想的电子开关量传感器。当金属检测体接近开关感应区域时,开关就能无接触、无压力、无火花地迅速发出电气指令,准确反映出运动机构位置和行程,用于一般行程控制,其定位精度、操作频率、使用寿命、安装调整方便性和对恶劣环境的适应能力是一般机械式行程开关所不能比的。它广泛应用于机床、冶金、化工、轻纺和印刷等行业。在自动控制系统中可用于限位、计数、定位控制和自动保护。接近开关具有使用寿命长、工作可靠、重复定位精度高、无机械磨损、无火花、无噪声、抗振能力强等特点。到目前为止,接近开关的应用范围日益广泛,其自身发展和创新也极其迅速。

接近开关的核心部分是感辨头,它对正在接近的物体有很高的感辨能力。在生物界,眼镜蛇的尾部能感辨人体发出的红外线;而电涡流探头能感辨金属导体的靠近。应变片、电位器之类的传感器无法用于接近开关,因为它们属于接触式测量。

### 5.3.1 接近开关的主要功能

#### 1. 检验距离

检测电梯和升降设备的停止、启动、位置;检测车辆位置,防止两物体相撞;检测工作机械设定位置,移动机器或部件极限位置;检测回转体停止位置,阀门开或关位置;检测气缸或液压缸内活塞的移动位置。

#### 2. 尺寸控制

金属板冲剪尺寸控制装置;自动选择、鉴别金属件的长度;检测自动装卸时堆物的高度;检测物品的长、宽、高和体积。

#### 3. 转速与速度控制

控制传送带的速度;控制旋转机械转速;与各种脉冲发生器一起控制转速和转数。

#### 4. 计数及控制

检测生产线上流过的产品数;高速旋转轴或盘转数计量;零部件计数。

#### 5. 检测异常

检测瓶盖有无;判断产品合格与不合格;检测包装盒内的金属制品是否缺乏;区分金属与非金属零件;检测产品有无标牌;起重机危险区报警;自动启停安全扶梯。

#### 6. 计量控制

自动计量产品或零件;检测计量器、仪表指针范围;检测浮标控制测面高度、流量;检测不锈钢桶中铁浮标;控制仪表量程上限或下限;控制流量和水平面。

### 5.3.2 接近开关分类及结构

接近开关的作用是当某物体与接近开关接近并达到一定距离时发出信号。它不需要外力施加,是一种无触点式主令电器。它的用途已远远超出行程开关所具备的行程控制及限位保护。接近开关可用于高速计数、检测金属体、测速、液位控制、检测零件尺寸,以及用作无触点式按钮等。接近开关按工作原理可以分为以下几种类型。

### 1. 电涡流式接近开关

电涡流式接近开关有时也叫电感式接近开关。它利用的是导体在接近能产生电磁场的接近开关时,其内部会产生涡流。这个涡流反作用到接近开关,使开关内部电路参数发生变化,由此识别出有无导电物体接近,进而控制开关的通断。这种接近开关所能检测的物体必须是导体。

### 2. 电容式接近开关

电容式接近开关的测量通常利用设备构成电容器的一个极板,而另一个极板是开关的外壳。这个外壳在测量过程中通常接地或与设备的机壳相连接。当有物体移向接近开关时,不论它是否为导体,都会使电容的介电常数发生变化,从而使电容量发生变化,使得和测量头相连的电路状态也随之发生变化,由此便可控制开关的接通或断开。这种接近开关检测的对象不限于导体,也可以是绝缘的液体或粉状物等。

### 3. 霍尔式接近开关

霍尔元件是一种磁敏元件。利用霍尔元件做成的开关,称为霍尔式接近开关。当磁性物件接近霍尔式接近开关时,开关检测面上的霍尔元件会产生霍尔效应,从而使开关内部电路状态发生变化,由此识别出附近有磁性物体存在,进而控制开关的通断。这种接近开关的检测对象必须是磁性物体。

### 4. 光电式接近开关

利用光电效应做成的开关称为光电式接近开关。它将发光器件与光电器件按一定方向装在同一个检测头内,当有反光面(被检测物体)接近时,光电器件接收到反射光后便输出信号,由此便可检测出有物体接近。

### 5. 热释电式接近开关

用能感知温度变化的元件做成的开关称为热释电式接近开关。这种开关是将热释电器件安装在开关的检测面上,当有与环境温度不同的物体接近时,热释电器件的输出便变化,由此便可检测出有物体接近。

### 6. 其他形式的接近开关

当观察者或系统与波源的距离发生改变时,其接收到的波的频率会发生偏移,这种现象称为多普勒效应。声呐和雷达就是利用这个效应的原理制成的。利用多普勒效应可制成超声波接近开关、微波接近开关等。当有物体接近时,接近开关接收到的反射信号会产生多普勒频移,由此可以识别出有物体接近。

接近开关按供电方式可分为直流式和交流式,按输出形式又可分为直流两线制、直流三线制、直流四线制、交流两线制和交流三线制。

两线制接近开关安装简单,接线方便,应用比较广泛,但却存在残余电压和漏电流大的缺点。直流三线式接近开关输出有NPN和PNP两种,20世纪70年代,日本的产品绝大多数是NPN输出,西欧各国NPN、PNP两种输出都有。PNP输出开关多用于控制PLC或计算机控制指令,NPN输出开关多用于控制直流继电器,在实际应用中要控制电路特性以选择其输出形式。

## 5.3.3 接近开关选型

针对不同材质的检测体和不同的检测距离,应选用不同类型的接近开关,以使其系统具

有高性能性价比,为此选型时应遵循以下原则。

(1) 当检测体为金属材料时,应选用高频振荡式接近开关,该类型接近开关对铁镍、A3 钢类检测体的检测最灵敏。对于铝、黄铜和不锈钢类的检测体,其检测灵敏度较低。

(2) 当检测体为非金属材料时,如木材、纸张、塑料、玻璃和水等,应选用电容式接近开关。

(3) 金属体和非金属要进行远距离检测和控制时,应选用光电式接近开关或超声波式接近开关。

(4) 当检测体为金属时,若检测灵敏度要求不高,则可选用价格低廉的磁性接近开关或霍尔式接近开关。

### 5.3.4 接近开关的特点及性能指标

与机械开关相比,接近开关具有如下特点。

- (1) 非接触检测,不影响被测物的运行工况,不需施加机械力。
- (2) 不产生机械磨损和疲劳损伤,工作寿命长。
- (3) 响应时间可小于几毫秒。
- (4) 采用全密封结构,防潮、防尘性能较好,故障率低。
- (5) 动作时,无触点、无火花,适用于要求防爆的场合。接近开关的缺点是触点容量较小,输出短路时易烧毁。

接近开关的主要性能指标如表 5-2 所示。

表 5-2 接近开关的主要性能指标

参 数	定 义
动作距离	标准检测体从轴向靠近接近开关,在接近开关动作时,从接近开关壳体到检测体的距离(单位为 mm,下同)
设定距离	接近开关在实际使用中设定的安装距离。在此距离内,接近开关不会因温度变化、电源波动、机械抖动等外界干扰而产生误动作
复位距离	检测体远离接近开关,在接近开关的输出电平复归时,从接近开关壳体到检测体的距离
动作滞差	动作距离与复位距离之差。动作滞差越大,准确度就越低,但对抗被测物抖动干扰的能力就越强
动作频率	被测物体允许每秒连续不断地进入接近开关的动作距离后又离开的最高次数

接近开关的主要结构形式如图 5-20 所示,可根据不同的用途选择不同的型号。图 5-20(a)的形式便于调整与被测物体的间距;图 5-20(b)和图 5-20(c)的形式可用于板材的检测;图 5-20(d)和图 5-20(e)可用于线材的检测。

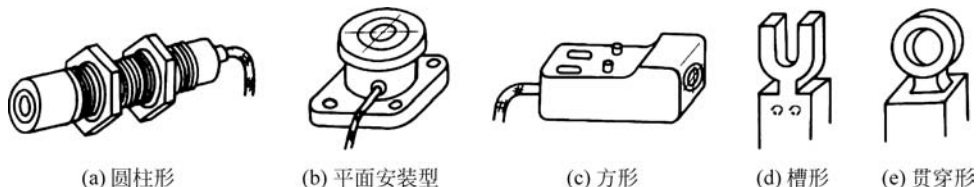


图 5-20 接近开关的几种结构形式

### 5.3.5 接近开关的规格及接线方法

接近开关有常开、常闭之分,还要区分继电器输出型和 OC 门输出型。OC 门又有 PNP 和 NPN 之分。一种较为常见的三线制、NPN 常开输出型接近开关如图 5-21 所示。棕色引线为正电源(18~35V);蓝色接地(电源负极);黑色为输出端。

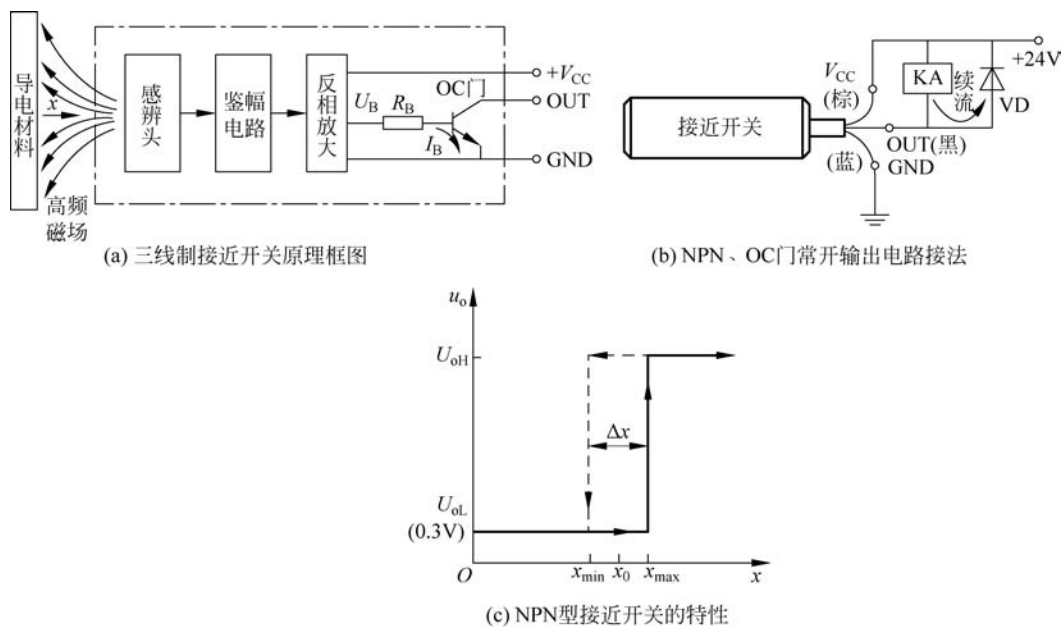


图 5-21 三线制、NPN 常开输出型接近开关

当被测物体未靠近接近开关时,OC 门的基极电流  $I_B = 0$ ,OC 门截止,OUT 端为高阻态(接入负载后为高电平,此时测量 OUT 端的电压接近电源电压);当被测物体靠近,到达动作距离( $x_{\min}$ )时,OC 门的输出端对地导通,OUT 端对地为低电平(约 0.3V)。将该接近开关所控制的中间继电器 KA 跨接在  $V_{CC}$  与 OUT 端上时,KA 就处于得电(吸合)状态。当被测物体远离该接近开关,到达复位距离  $x_{\max}$  时,OC 门再次截止,KA 处于失电(释放)状态。

### 5.3.6 接近开关的应用

#### 1. 电涡流式接近开关

电涡流式接近开关由高频振荡电路、检波电路、放大电路、整形电路及输出电路组成,如图 5-22 所示。使用敏感元件作为检测线圈,它是振荡电路的一个组成部分。

当检测线圈通交流电时,在检测线圈的周围就产生一个交变的磁场,当金属物体接近检测线圈时,金属物体就会产生电涡流而吸收磁场能量,使检测线圈的电感  $L$  发生变化,从而使振荡电路的振荡频率减小,以至停振。振荡和停振这两个信号由电路转换成开关信号,经输出电路放大后送给后续电路。

#### 2. 电容接近开关

电容接近开关的核心是以电容极板作为检测端的 LC 振荡器,电容接近开关的结构及

原理框图如图 5-23 所示。两块检测极板设置在接近开关的最前端,测量转换电路安装在接近开关壳体内,棕色引线为正电源(18~35V);蓝色接地(电源负极);黑色为输出端。

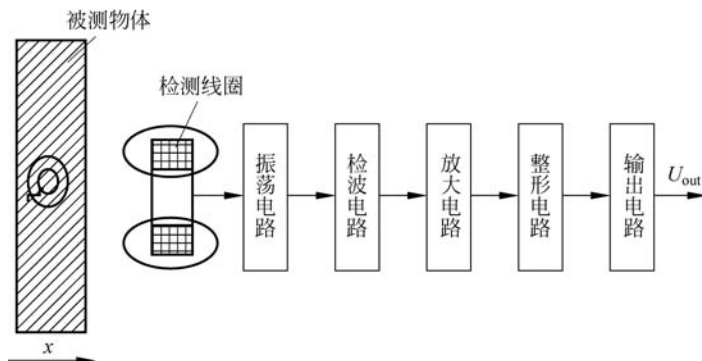
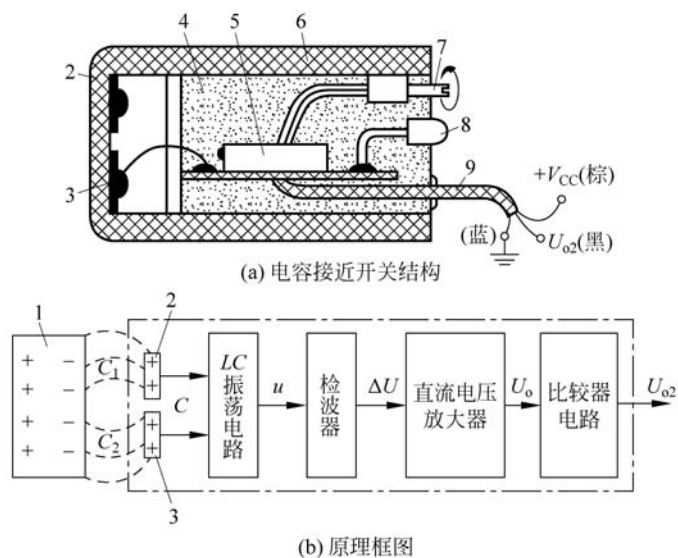


图 5-22 电涡流式接近开关原理框图



1—被测物；2—上检测极板；3—下检测极板；4—充填树脂；5—测量转换电路板；6—塑料外壳；7—灵敏度调节电位器；8—工作指示灯；9—三线电缆。

图 5-23 圆柱形电容接近开关的结构及原理框图

当没有物体靠近检测极板时,上、下检测极板之间的电容量  $C$  非常小,它与电感  $L$  (在测量转换电路板 5 中)构成高品质因数的  $LC$  振荡电路。

当被检测物体为导体时,上、下检测极板经过与导体之间的耦合作用,形成变极距电容  $C_1$ 、 $C_2$ 。电容量比未靠近导体时增大了许多,引起  $LC$  回路的  $Q$  值下降,输出电压  $U$ 。随之下降,当  $Q$  值下降到一定程度时振荡器停振。

可以将电容接近开关安装在饲料加工料斗上方。当谷物高度达到电容接近开关的底部时,电容接近开关就产生报警信号,关闭输送管道的阀门。也可以将它安装在一些水箱的玻璃连通器外壁上,用于测量和控制水位。

## 小结

电涡流传感器的工作原理是电涡流效应,根据法拉第电磁感应定律,将金属导体置于变化的磁场中,导体表面就会有感应电流产生。电流的流线在金属体内自行闭合,这种由电磁感应原理产生的旋涡状感应电流称为电涡流,这种现象称为电涡流效应。电涡流传感器的测量电路是电桥测量电路和谐振测量电路。

电涡流式传感器的应用主要有电涡流式转速传感器、高频反射式涡流厚度传感器、低频透射式涡流厚度传感器、振动的测量、电涡流探伤、位移的测量。

电涡流式传感器具有结构简单、频率响应宽、灵敏度高、测量范围大、抗干扰能力强等优点,特别是电涡流式传感器可以实现非接触式测量,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。应用电涡流式传感器可实现多种物理量的测量,也可用于无损探伤。

本章还介绍了接近开关的定义、分类及应用。接近开关被广泛应用于机床、冶金、化工、轻纺和印刷等行业。接近开关具有使用寿命长、工作可靠、重复定位精度高、无机械磨损、无火花、无噪声、抗振能力强等特点。到目前为止,接近开关应用范围日益广泛,其自身发展和创新也极其迅速。

## 习题

1. 电涡流传感器检测导电物体的各种物理参数,利用的物理效应是\_\_\_\_\_。  
A. 应变效应      B. 热电效应      C. 电涡流效应      D. 霍尔效应
2. 电涡流式接近开关可以检测出下列哪个物体的靠近程度\_\_\_\_\_。  
A. 塑料零件      B. 水泥制件      C. 人体      D. 金属零件
3. 不能用电涡流式传感器进行测量的是\_\_\_\_\_。  
A. 位移      B. 材质鉴别      C. 探伤      D. 非金属材料
4. 电涡流传感器在金属体上产生的涡流,由于电涡流的趋肤效应,其渗透深度与传感器的激励电流的频率成\_\_\_\_\_。
5. 接近开关复位距离与动作距离之差称为\_\_\_\_\_。
6. 接近开关有哪几种类型?
7. 电涡流传感器的线圈机械品质因数在测量时会发生什么变化?为什么?
8. 接近开关的主要功能有哪些?
9. 电涡流传感器的测量转换电路有哪几种?
10. 接近开关有哪几种接线方式?