

# 模块三

## 电感式及电容式传感器

电感式或电容式传感器就是把被测量的变化转换为电感或电容的变化,然后通过对电感或电容的测量达到对非电量检测的目的。电感式传感器有自感式传感器、互感式传感器、电涡流式传感器等。本模块从应用角度出发,介绍差动变压器式传感器、电涡流式传感器和电容式传感器的工作原理、测量转换电路及一些应用实例。

### 单元 1 差动变压器式传感器

电感式传感器是利用线圈的自感、互感或阻抗的变化来实现非电量检测的一种装置,而差动变压器式传感器是一种电感式传感器,它是根据互感的变化来感知被检测量的。

#### 一、电感式传感器简述

电感式传感器具有结构简单、分辨力好和测量精度高等一系列优点。它的主要缺点是响应较慢,不宜作快速动态测量。它应用很广,可用来测位移、压力和振动等参数。

电感式传感器可分为自感式、互感式和电涡流式三大类。自感式传感器是把被测位移量转换为线圈的自感变化;互感式传感器是把被测位移量转换为线圈间的互感变化;电涡流式传感器是把被测位移量转换为线圈的阻抗变化。人们习惯上讲电感式传感器通常指自感式传感器,而互感式传感器由于利用了变压器原理,又往往做成差动形式,故常称为差动变压器式传感器。由于篇幅所限,本模块仅介绍差动变压器式传感器和电涡流式传感器这两种电感传感器,下面先介绍差动变压器式传感器。

#### 二、差动变压器式传感器的工作原理

差动变压器的结构示意图如图 3-1 所示,它主要由一个线框和一个铁心组成。在线框上绕有一组一次侧线圈作输入线圈(或称初级线圈)。在同一线框上另绕两组完全对称的二次侧线圈作输出线圈(或称次级线圈),它们反向串联组成差分输出形式。理想差动变压器的原理图如图 3-2 所示。

当一次侧线圈加入励磁电源后,其二次侧线圈  $N_{21}$ 、 $N_{22}$  产生感应电动势  $\dot{E}_{21}$ 、 $\dot{E}_{22}$ ,输出电压分别为  $\dot{U}_{21}$ 、 $\dot{U}_{22}$ ,经推导,输出电压  $\dot{U}_o$  为

模块目标

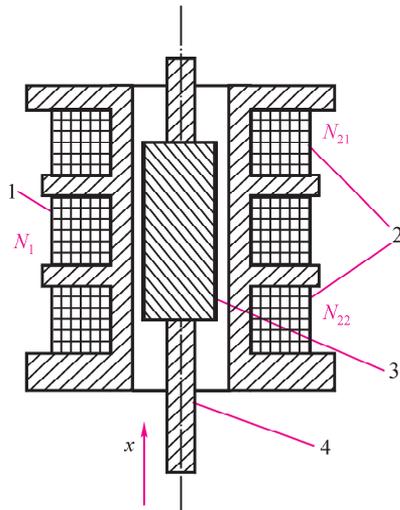


模块三学习目标

动画



差动变压器工作原理



1—一次侧线圈；2—二次侧线圈；3—衔铁；4—测杆。

图 3-1 差动变压器的结构示意图

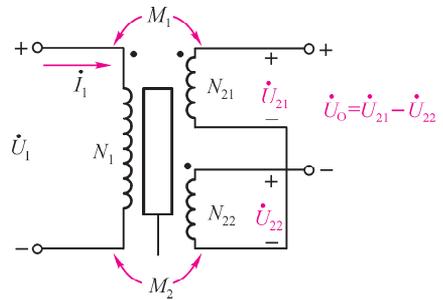


图 3-2 理想差动变压器的原理图

$$\dot{U}_O = \pm 2j\omega \Delta M \dot{I}_1 \quad (3-1)$$

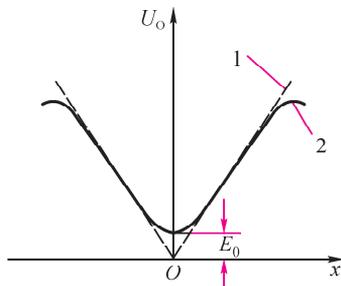
式中  $\omega$ ——励磁电源角频率；

$\Delta M$ ——线圈互感的增量；

$\dot{I}_1$ ——励磁电流。

理论和实践证明，线圈互感的增量  $\Delta M$  与衔铁位移量  $x$  基本成正比关系，所以输出电压的有效值为

$$U_O = K |x| \quad (3-2)$$



1—理想特性；2—实际特性。

图 3-3 差动变压器输出特性

式中  $K$  是差动变压器的灵敏度，它是与差动变压器的结构及材料有关的量，在线性范围内可近似看作常量。差动变压器的输出特性如图 3-3 所示。图中  $E_0$  称为零点残余电压，其数值约为零点几毫伏，有时甚至可达几十毫伏，并且无论怎样调节衔铁的位置均无法消除。当差动变压器的结构及电源电压一定时，互感  $M_1$ 、 $M_2$  的大小和衔铁的位置有关。差动变压器式传感器除以上结构形式外，还有其他结构形式，例

如变气隙式差动变压器，由于其自由行程小，应用不如螺管式差动变压器广泛。

产生零点残余电压的主要原因是：①差动变压器两个二次侧线圈的电气参数、几何尺寸或磁路参数不完全对称；②存在寄生参数，如线圈间的寄生电容、引线与外壳间的分布电容；③电源电压含有高次谐波；④磁路的磁化曲线存在非线性。减小零点残余电压的方法通常有：①提高框架和线圈

的对称性;②减少电源中的谐波成分;③正确选择磁路材料,同时适当减少线圈的励磁电流,使衔铁工作在磁化曲线的线性区;④在线圈上并联阻容移相网络,补偿相位误差;⑤采用相敏检波电路,可以使零点残余电压减小到能够被忽略的程度。

### 三、差动变压器式传感器的基本特性

#### 1. 灵敏度

差动变压器的灵敏度是指差动变压器在单位电压励磁下,铁心移动一单位距离时的输出电压,以  $\text{mV}/(\text{mm} \cdot \text{V})$  表示。一般差动变压器的灵敏度大于  $50 \text{ mV}/(\text{mm} \cdot \text{V})$ 。

影响灵敏度的因素有:电源电压和频率,差动变压器一、二次侧线圈的匝数比,衔铁直径与长度、材料质量,环境温度,负载电阻等。为了获得高的灵敏度,在不使一次侧线圈过热的情况下,尽量提高励磁电压,电源频率以  $400 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$  为佳。此外,还可以提高线圈的品质因素  $Q$  值( $Q = 20L/R$ );活动衔铁的直径在尺寸允许的条件下尽可能大些,这样有效磁通较大;选用导磁性能好、铁损小和涡流损耗小的导磁材料等。

#### 2. 线性范围

理想的差动变压器输出电压应与衔铁位移呈线性关系,实际上衔铁的直径、长度、材质和线圈骨架的形状、大小的不同等均对线性有直接影响。差动变压器一般线性范围约为线圈骨架长度的  $1/10 \sim 1/4$ 。由于差动变压器中间部分磁场是均匀的且较强,所以只有中间部分线性较好。

### 四、差动变压器式传感器的测量转换电路

差动变压器的电压是交流电压,它与衔铁位移成正比,其输出电压如用交流电压表来测量,同样无法判别衔铁移动方向。所以在差动变压器测量转换电路中常采用差动整流电路,几种典型差动整流电路如图 3-4 所示。

差动整流电路可分为全波电流输出差动整流电路、半波电流输出差动整流电路、全波电压输出差动整流电路和半波电压输出差动整流电路四种。其中图 3-4(a)和图 3-4(b)用于连接低阻抗负载的场合,是电流输出型。图 3-4(c)和图 3-4(d)用于连接高阻抗负载的场合,是电压输出型。由于整流部分在差动变压器输出一侧,所以只需两根直流输送线即可,而且可以远距离输送,因而得到广泛应用。下面以全波电流输出差动整流电路为例来分析其工作原理。

#### (1) 铁心在中心位置时 ( $U_{21} \approx U_{22}$ )

若  $U_{ac} = U_{da}$ , 可调节  $R_p$ , 使  $R_1 = R_2$ ,

$$\text{则 } I_{mA} = \frac{U_{ac}}{R_1 + R_D} - \frac{U_{da}}{R_2 + R_D} = I_1 - I_2 = 0$$

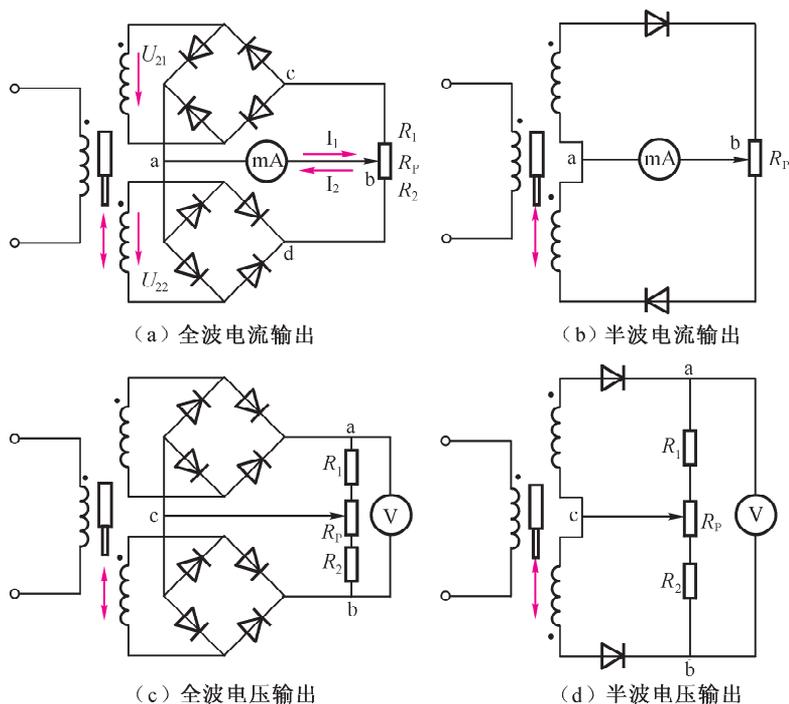


图 3-4 差动整流电路

式中  $R_D$  为桥式整流的正向电阻。

若  $U_{21} \neq U_{22}$  (存在零点残余电压), 则  $U_{ac} \neq U_{da}$ , 可调节  $R_P$ , 使  $R_1 \neq R_2$ , 可调整到  $I_{mA} = I_1 - I_2 = 0$ , 从而消除零点残余电压。

(2) 铁心上移 ( $U_{21} > U_{22}$ )

$$U_{ac} > U_{da} \quad \text{则} \quad I_{mA} = I_1 - I_2 > 0$$

(3) 铁心下移 ( $U_{21} < U_{22}$ )

$$U_{ac} < U_{da} \quad \text{则} \quad I_{mA} = I_1 - I_2 < 0$$

从而判别了位移的大小和方向。

通过以上分析可知, 全波电流输出型差动整流电路可消除零点残余电压, 也可判别位移的大小和方向。

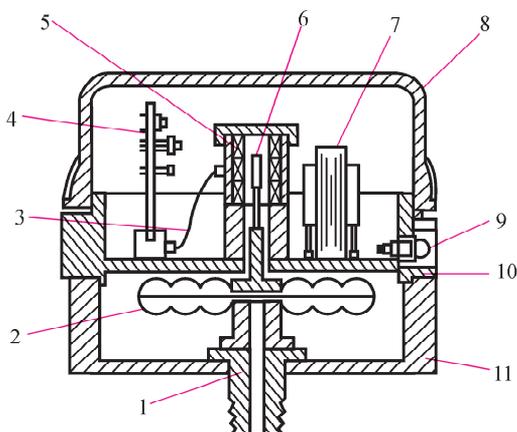
半波电流输出型差动整流电路、全波电压输出差动整流电路和半波电压输出差动整流电路经过分析(注意: 只有在二极管正向电阻不能忽略的情况下可调电阻才能在电压输出型中调零), 同样可以得到以上结论, 这里就不再赘述了, 读者可以自行分析。

## 五、差动变压器式传感器的应用案例

### 1. 差动变压器式压力变送器

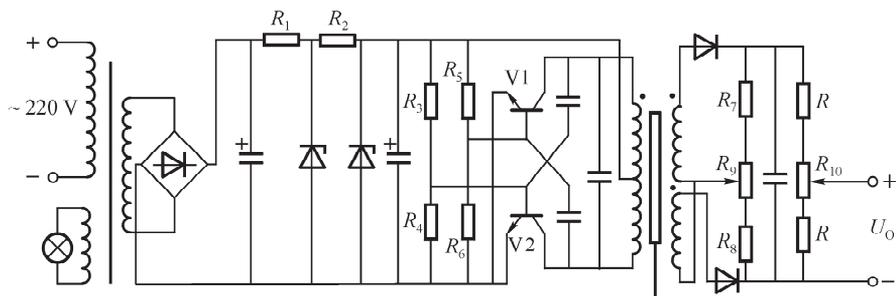
图 3-5 所示为 YST-1 型差动变压器式压力变送器。其结构示意图如图 3-5(a) 所示, 当被测压力未导入传感器时, 膜盒 2 无位移, 这时活动衔铁

在差动线圈中间位置,因而输出为零。当被测压力从输入口导入膜盒 2 时,膜盒在被测介质的压力作用下,其自由端产生一正比于被测压力的位移,测杆使衔铁向上移动,在差动变压器的二次侧线圈中产生的感应电动势发生变化而有电压输出,此电压经过安装在印制线路板 4 上的电子线路处理后,送给二次侧仪表,加以显示。



1—接头;2—膜盒;3—导线;4—印制线路板;5—差动线圈;6—衔铁;  
7—电源变压器;8—罩壳;9—指示灯;10—安装座;11—底座。

(a) 结构示意图



(b) 线路原理图

图 3-5 YST-1 型差动变压器式压力变送器

此压力变送器的电气线路如图 3-5(b)所示,220 V 交流电通过变压、整流、滤波和稳压后,由三极管 V1、V2 组成的多谐振荡器转变为 6 V、1 000 Hz 的稳定交流电压,作差动变压器的励磁电压。差动变压器二次侧输出电压通过差动整流电路、滤波电路后,作为变送器输出信号,可接入二次侧仪表加以显示。线路中  $R_9$  是调零电位器, $R_{10}$  是调量程电位器。二次侧仪表一般可选 XCZ-103 型动圈式毫伏计,或选用自动电子电位差计(如 XWD),但必须在信号端并联  $600\ \Omega$  左右的电阻。图 3-6 展示了差动变压器式压力变送器的另外两种结构,其中,(a) 图是弹簧管式,(b) 图是波纹膜片式。

动画



差动变压器厚度测量

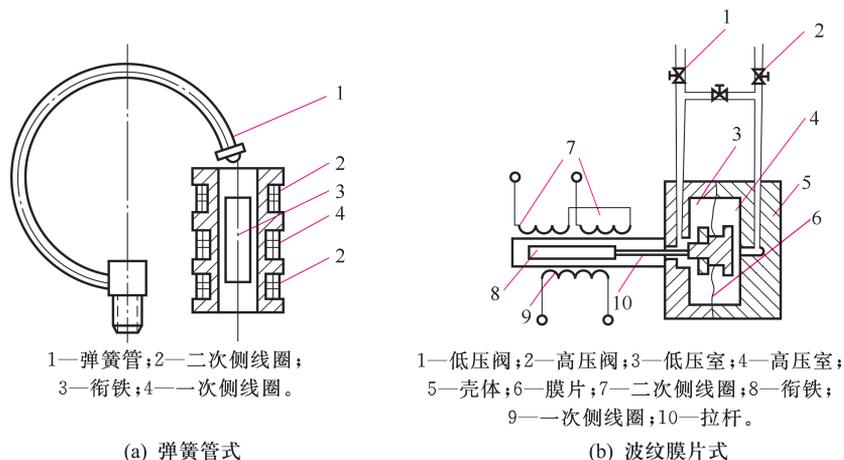


图 3-6 差动变压器式压力变送器的另外两种结构

## 2. 电感式位移检测在滚珠直径自动分选机中的应用

### (1) 轴承滚珠直径自动分选的要求

某轴承公司希望对本厂车间生产的汽车用滚珠的直径进行自动测量和分选,技术指标及具体要求如下:

① 滚珠的标称直径为 10.000 mm,允许公差范围为  $\pm 3 \mu\text{m}$ ,超出公差范围的均予以剔除(分别落入正偏差和负偏差两个废料箱中)。

② 在公差范围内,根据滚珠的直径 9.997~10.003 mm,分为 A~G 共 7 个等级,分别落入对应的 7 个落料箱中。

③ 滚珠的分选速度为 60 个/min,分选结果在 LCD 屏上显示。

### (2) 轴承滚珠直径自动分选的基本工作原理

如图 3-7 所示是滚珠直径自动分选机的工作原理示意图。其工作原理可以从以下几方面进行分析:

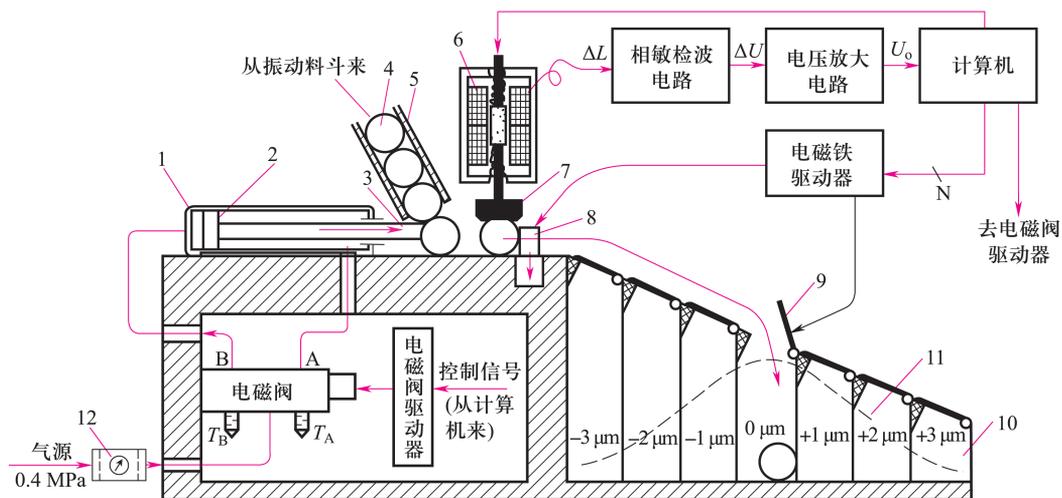
① **滚珠的推动与定位** 几千个滚珠放入图 3-7 上端的“振动料斗”中,在电磁振动力的作用下,自动排成队列,从给料管中下落到气缸的推杆右端。气缸的活塞在高压气体的推动下,将滚珠快速推至电感测微器的测标下方的限位挡板位置,为了延长测端的使用寿命,保证测杆压在滚珠的最高点上,可在图 3-7 测杆的末端加装一个钨钢测头。

② **气缸的控制** 气缸有后进/出气口 B 和前进/出气口 A。当 A 向大气敞开、高压气体从 B 口进入时,活塞向右推动,气缸前室的气体从 A 口排出。反之,活塞后退,气缸后室的气体从 B 口排出。气缸 A 口与 B 口的开启由电磁阀门控制。

③ **轴承滚珠直径自动检测** 由于被测滚珠的公差变化范围只有  $6 \mu\text{m}$ ,传感器所需要的行程较短,这里选择线圈骨架较短、直径较小的电感测微器(图 3-7 的 6)进行滚珠直径的自动测量,它与钨钢测头连接后,压在滚珠的最高点。由于滚珠直径大小的不同,电感测微仪产生位移变动,通

过相敏检波电路、电压放大电路输入到计算机,经计算机输出信号带动电磁阀驱动器、电磁铁驱动器。其中,电磁阀驱动器控制电磁阀带动气缸活塞运动,电磁铁驱动器控制限位挡板和电磁翻板使滚珠落入相应的落料箱中。

④ 落料箱翻板的控制 按设计要求,落料箱共 9 个,分别是  $-3\ \mu\text{m}$ 、 $-2\ \mu\text{m}$ 、 $-1\ \mu\text{m}$ 、 $0\ \mu\text{m}$ 、 $+1\ \mu\text{m}$ 、 $+2\ \mu\text{m}$ 、 $+3\ \mu\text{m}$  落料箱以及“偏大”“偏小”废料箱(图中未画出)。它们的翻板分别由 9 个交流电磁铁控制。当计算机计算出测量结果的误差值后,对应的翻板继电器驱动电路导通,翻板打开(见图 3-7 中的  $0\ \mu\text{m}$  翻板)。



1—气缸;2—活塞;3—推杆;4—被测滚珠;5—落料管;6—电感测微仪;7—钨钢测头;  
8—限位挡板;9—电磁翻板;10—滚珠的公差分布;11—落料箱;12—气源处理三联件。

图 3-7 滚珠直径自动分选机的工作原理示意图

## 【实践项目】

### 差动变压器式位移传感器的调试

#### 1. 项目要求

了解差动变压器的基本结构;掌握差动变压器的调试方法;掌握差动变压器及其差动整流电路的工作原理。

#### 2. 设备与工具

差动变压器式位移传感器(如 WY-5D 位移传感器)一个;螺旋测微仪一台;正弦信号发生器( $U_0=0\sim 5\text{V}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )一台;差动整流电路板一块;数字电压表一块。

#### 3. 项目内容

差动变压器式位移传感器工作原理图如图 3-8 所示。测量转换电路采用全波电压输出型差动整流电路,这个电路零点没有残余电压,性能较

小制作



感应式传感器制作的感应式讯响器

好。 $R_1$ 、 $R_2$  为限流电阻,  $R_P$  为电气调零电位器,  $R_L$  为负载电阻,  $R_3$ 、 $C$  组成滤波器。差动变压器的一次侧线圈和二次侧线圈之间的互感随铁心的移动而变化, 当铁心处于中间位置时, 两个二次侧线圈的互感系数相等。经两个全波电桥整流后的输出直流电压方向相反、大小相等, 所以输出到负载  $R_L$  上的电压为零。当铁心移动时, 两个二次侧线圈的感应电压不同, 输出就不为零。通过测量输出电压的大小和正负, 可以反映铁心位移的大小和方向。

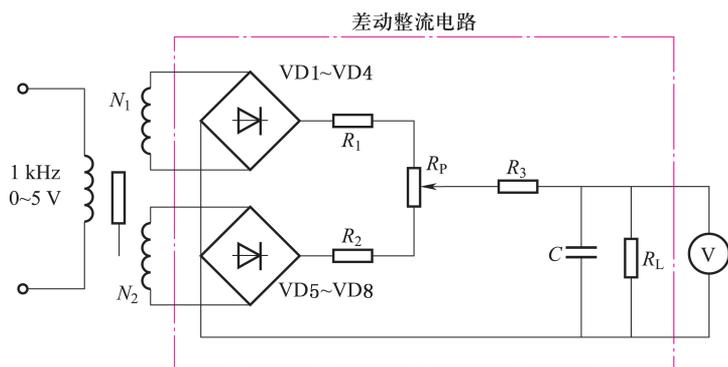


图 3-8 差动变压器式位移传感器工作原理图

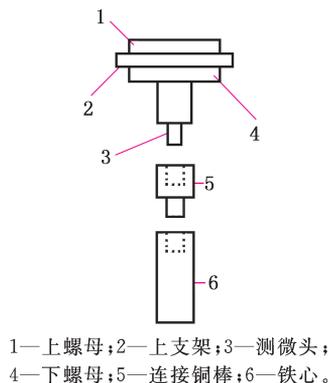


图 3-9 安装示意图

#### 4. 操作步骤

(1) 将螺旋测微仪用两个螺母固定在如图 3-9 所示的支架上并将铁心插入传感器螺线管内。

(2) 按图 3-8 接线。

(3) 系统零位、满度调节。

① 系统调零: 调节  $R_P$ , 使其基本位于中间位置。旋动测微仪, 使铁心基本位于机械零点(两线圈中间)。调节  $R_P$  使输出电压为零。

② 系统调满: 旋动测微仪, 使铁心上移(或下移)5 mm(满量程值), 调信号发生器输出电压, 使表头指示 200 mV(相当于 200 mV 挡的满量程值)。

③ 微调: 重复步骤①②。

(4) 表头读数为零时作为起点, 分别上旋、下旋测微仪各 5 mm, 每次移动 1 mm, 分别将位移量  $x$  和对应的输出电压  $U_o$  填入表 3-1 中。

表 3-1 输出满量程电压为 0.2 V 时位移  $x$  与输出电压  $U_o$  的关系表

$x/\text{mm}$	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
$U_o/\text{mV}$						0					

(5) 将正弦信号发生器输出电压提高到 5 V, 重复步骤(4), 并将数据填入表 3-2 中。

表 3-2 正弦信号发生器输出电压为 5 V 时位移  $x$  与输出电压  $U_o$  的关系表

$x/\text{mm}$	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
$U_o/\text{mV}$						0					

### 5. 项目结果分析及思考

- (1) 分别根据表 3-1 和表 3-2 进行数据处理, 绘出相应的输入输出特性曲线, 并计算出灵敏度。
- (2) 对实践项目实施中出现的现象进行分析。
- (3) 在差动整流电路中设置  $R_p$  的目的是什么?

## 单元 2 电涡流式传感器

电涡流式传感器结构简单, 其最大特点是既可以实现非接触测量, 又具有灵敏度高、抗干扰能力强、频率响应宽和体积小等优点, 因此在工业测量中得到了越来越广泛的应用。

### 一、基本工作原理

金属导体置于变化的磁场中, 导体内就会有感应电流产生, 这种电流在金属体内自行闭合, 通常称为电涡流。电涡流的产生必然要消耗一部分磁场能量, 从而使激励线圈的阻抗发生变化。电涡流式传感器的原理就是基于这种涡流效应。

电涡流式传感器基本原理示意图如图 3-10 所示。一个通有交变电流  $\dot{I}_1$  的传感线圈, 由于电流的周期性变化, 在线圈周围就产生一个交变磁场  $\dot{H}_1$ 。如被测导体置于该磁场范围之内, 被测导体便产生涡流  $\dot{I}_2$ , 电涡流也将产生一个新的磁场  $\dot{H}_2$ ,  $\dot{H}_2$  和  $\dot{H}_1$  方向相反, 由于磁场  $\dot{H}_2$  的反作用使通电线圈的有效阻抗发生变化。

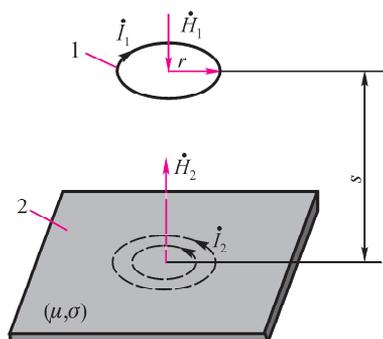
当金属导体靠近线圈时, 金属导体产生涡流的大小与金属导体的电阻率  $\rho$ 、磁导率  $\mu$ 、厚度  $t$ 、线圈与金属导体的距离  $s$  以及线圈激励电流大小和激励源角频率  $\omega$  等参数有关。如固定其中某些参数, 就能按涡流的大小测量出另外一些参数。为了使问题简化, 可把金属导体理解为一个短路线圈, 并用  $R_2$  表示这个短路线圈的电阻; 用  $L_2$  表示它的电感; 用  $M$  表示它与空心线圈之间的互感; 再假设空心线圈的电阻与电感分别为  $R_1$  和  $L_1$ , 就可画出如图 3-11 所示的等效电路。

经推导, 电涡流线圈受被测金属导体影响后的等效阻抗为

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \left( R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) + j \left( \omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \omega L_2 \right) = R + j\omega L \quad (3-3)$$

动画

电涡流式传感器的  
工作原理



1—传感线圈；2—金属导体。

图 3-10 电涡流式传感器基本原理示意图

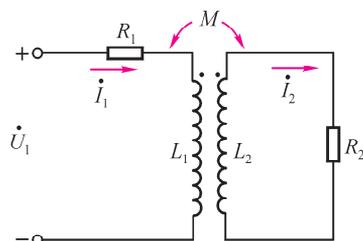


图 3-11 等效电路

式中  $R$ ——电涡流线圈工作时的等效电阻；

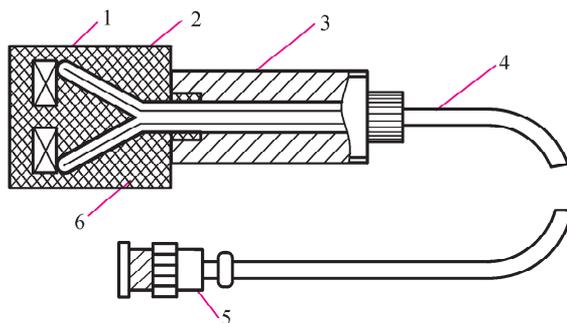
$L$ ——电涡流线圈工作时的等效电感。

从式(3-3)可知，等效电阻、等效电感都是此系统互感平方的函数。因此，只有当测距范围较小时才能保证一定的线性度。凡是能引起涡流变化的非电量，如金属的电导率、磁导率、几何形状、线圈和导体的距离等，均可通过测量线圈的等效电阻、等效电感和等效阻抗来获得，这就是电涡流式传感器的工作原理。

## 二、结构与测量转换电路

### 1. 电涡流式传感器的结构

电涡流式传感器的结构比较简单，图 3-12 所示为 CZF-1 型涡流传感器的结构。它主要是一个固定在框架上的扁平圆线圈，线圈的导线要求选用电阻率小的材料，一般由多股漆包铜线或银线绕制而成，放在传感器的端部。框架材料要求损耗小、电性能好、热膨胀系数小，一般可选用聚四氟乙烯、高频陶瓷等制成。



1—线圈；2—线圈管架；3—壳体；4—输出电缆；5—接插件；6—瓷罩。

图 3-12 CZF-1 型涡流传感器的结构

电涡流式传感器的线圈外径越大，线性范围也越大，但灵敏度也越低。线圈阻抗变化与金属导体的电导率、磁导率等有关。对于非磁性材料，被

• 拓展提高



电涡流式传感器的分类

测体的电导率越高,则灵敏度越高。但被测体为磁性材料时,其效果则相反。因此,与非磁性材料相比,磁性材料的灵敏度低。为了充分利用电涡流效应,被测体的半径应大于激励线圈半径的 1.8 倍,否则将导致灵敏度降低。被测体为圆柱体时,它的直径必须为线圈直径的 3.5 倍以上才不影响测量结果。而且被测体的厚度也不能太薄,一般情况下,只要厚度在 0.2 mm 以上测量就不受影响。另外,在测量时传感器线圈周围除被测导体外,应尽量避开其他导体,以免干扰磁场,引起线圈的附加损失。

## 2. 测量转换电路

电涡流式传感器的测量转换电路有电桥法、调幅法和调频法。下面简要介绍一下调频法的工作原理,其转换电路原理框图如图 3-13 所示。

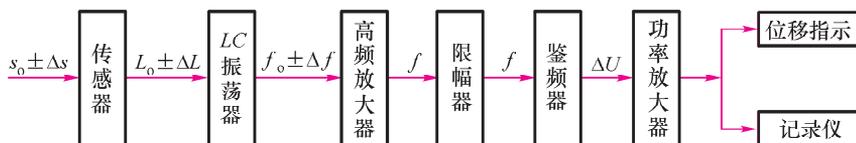


图 3-13 调频法转换电路原理框图

已知并联谐振回路的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-4)$$

当电涡流线圈与被测体的距离  $s$  改变时,电涡流线圈的电感量  $L$  也随之改变,引起  $LC$  振荡器的输出频率改变,此频率可直接用频率计测量。但多数情况下是通过鉴频器将频率的变化转换为输出电压的变化。调频法的特点是受温度、电源电压等外界因素的影响较小。

## 三、电涡流式传感器的应用

电涡流式传感器能实现非接触式测量,而且是根据与被测导体的耦合程度来测量的,因此可以通过灵活设计传感器的构造和巧妙安排它与被测导体的布局来达到各种应用的目的。另外,电涡流测温是非接触式测量,适用于测低温到常温的范围,且有不受金属表面污物影响和测量快速等优点。

### 1. 位移测量

如图 3-14 所示,电涡流式传感器可用来测量各种形状金属导体试件的位移量,如测量轴的轴向振动、磨床换向阀及先导阀的轴位移和金属试件的热膨胀系数等。测量位移范围为 1~30 mm,分辨率为满量程的 0.1%。

### 2. 振幅测量

如图 3-15 所示,电涡流式传感器可以无接触地测量旋转轴的径向振动,如图 3-15(a)所示;也可以测量汽轮机涡轮叶片的振幅,如图 3-15(b)所示;有时为了解轴的振动形状,可用数个电涡流式传感器并排地安置在附近测量,如图 3-15(c)所示。

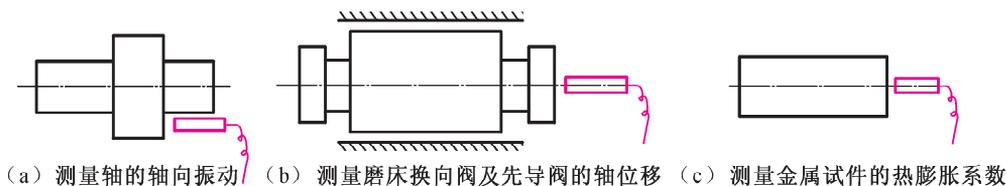
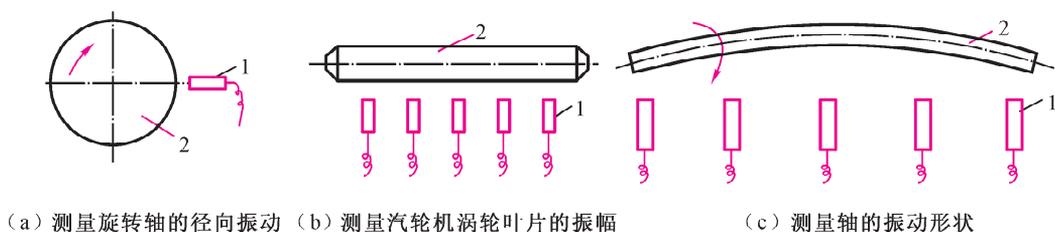


图 3-14 位移计的几种实例



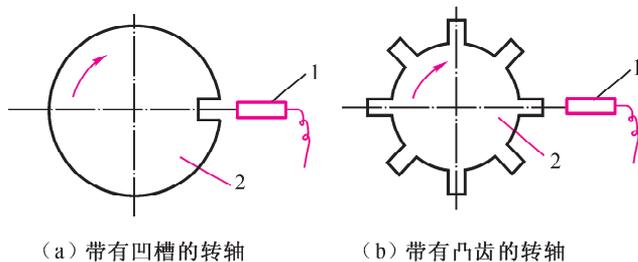
1—传感器；2—被测体。

图 3-15 振幅测量

### 3. 转速测量

在旋转体上开一条或数条槽或做成齿状,旁边安装一个电涡流式传感器,如图 3-16 所示,当转轴转动时,传感器周期地改变着与转轴之间的距离,于是它的输出也周期性地发生变化。此输出信号经放大、变换后,可以用频率计测出其变化频率,从而测出转轴的转速。若转轴上开  $Z$  个槽,频率计读数为  $f$  (单位为 Hz),则转轴的转速  $n$  (单位为 r/min) 的数值为

$$n = \frac{60f}{Z} \quad (3-5)$$



1—传感器；2—被测体。

图 3-16 转速测量

### 4. 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,以及焊接处的缺陷等。在探伤时,传感器应与被测导体保持距离不变。检测时,由于缺陷出现,将引起导体的电导率、磁导率的变化,即涡流损耗改变,从而引起输出电压的突变,达到探伤的目的。

此外,电涡流式传感器还可以探测金属表面温度、表面粗糙度、硬度,进行尺寸检测等,同时也可以制成开关量输出的检测元件,如接近开关及用于金属零件计数的传感器等。

• 动画



涡流转速测量

• 动画



无损检测

• 应用案例



机械轴的偏心测量

## 单元3 电容式传感器

电容式传感器是以各种类型的电容器作为传感元件,通过电容传感元件将被测物理量的变化转换为电容量的变化,再经测量转换电路转换为电压、电流或频率。电容式传感器有一系列优点,如结构简单,需要的作用能量小,灵敏度高,动态特性好,能在恶劣环境条件下工作等。随着微电子技术的发展,特别是集成电路的出现,电容式传感器的优点得到了进一步发挥,目前已成熟地运用到测厚、测角、测液位、测压力等方面。

### 一、基本工作原理及结构形式

电容式传感器的基本工作原理可以用图 3-17 所示的平板电容器来说明。当忽略边缘效应时,平板电容器的电容为

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3-6)$$

式中  $A$ ——极板面积;  
 $d$ ——极板间距离;  
 $\epsilon$ ——电容极板间介质的介电常数。

由式(3-6)可知,当  $d$ 、 $A$  和  $\epsilon$  中的某一项或某几项有变化时,就改变了电容  $C$  的容量,在交流工作时就改变了容抗  $X_C$ ,从而使输出电压或电流变化。 $d$  和  $A$  的变化可以反映线位移或角位移的变化,也可以间接反映弹力、压力等的变化; $\epsilon$  的变化,则可反映液面的高度、材料的温度等的变化。

实际应用时常使  $d$ 、 $A$ 、 $\epsilon$  三个参数中的两个保持不变,而改变其中一个参数来使电容发生变化。所以电容式传感器可以分为三种类型:改变极板间距离  $d$  的变间隙式;改变极板面积  $A$  的变面积式;改变介电常数  $\epsilon$  的变介电常数式。

图 3-18 所示为几种不同的电容式传感器的原理结构。其中图(a)(b)为变间隙式;图(c)(d)(e)和(f)为变面积式;图(g)和(h)为变介电常数式。图 3-18 中图(a)和(b)是线位移传感器;图(f)为角位移传感器;图(c)(d)和(e)是差动电容传感器。

变间隙式电容传感器一般用来测量微小的线位移( $0.1 \mu\text{m}$  至零点几毫米);变面积式电容传感器一般用于测量角位移(一角秒至几十度)或较大的线位移;变介电常数式电容传感器常用于固体或液体的物位测量以及各种介质的湿度、密度的测定。

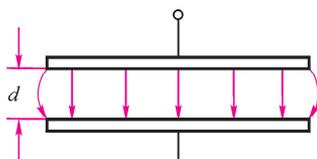


图 3-17 平板电容器

动画



变间隙式电容传感器工作原理

动画



变面积式电容传感器工作原理

动画



变介电常数式电容传感器工作原理

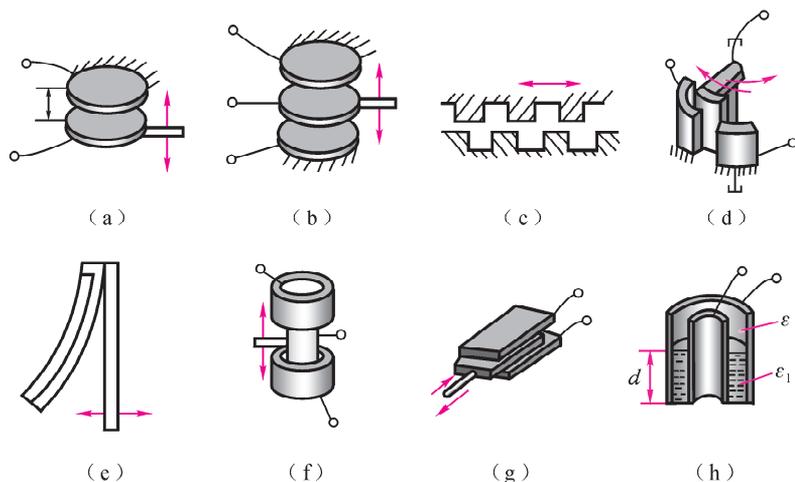


图 3-18 几种不同的电容式传感器的原理结构

## 二、测量转换电路

电容式传感器将被测物理量转换为电容变化后,必须采用测量转换电路将其转换为电压、电流或频率信号。电容式传感器的测量转换电路种类很多,下面介绍一些常用的测量转换电路。

### 1. 桥式电路

图 3-19 所示为桥式转换电路。图 3-19(a)为单臂接法的桥式转换电路,作为输入电压  $U_1$  的高频电源经变压器变压后的电压  $U$  接到电桥的一条对角线上,电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_x$  构成电桥的四臂, $C_x$  为电容传感器,交流电桥平衡时:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_x}{C_3}, \dot{U}_0 = 0 \quad (3-7)$$

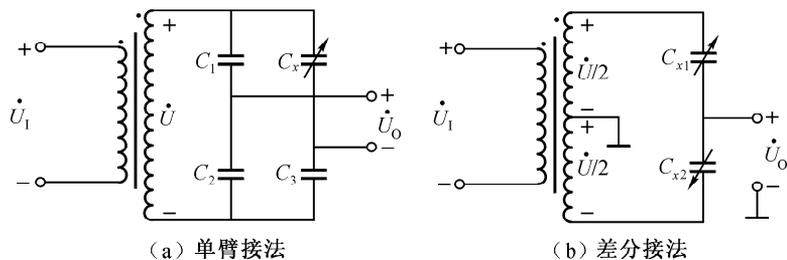


图 3-19 电容式传感器的桥式转换电路

当  $C_x$  改变时,  $U_0 \neq 0$ , 有输出电压。在图 3-19(b)中,接有差动电容传感器  $C_{x1}$  和  $C_{x2}$ ,其空载输出电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{Z_{Cx1} + Z_{Cx2}} \cdot Z_{Cx2} - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{Z_{Cx2} - Z_{Cx1}}{Z_{Cx1} + Z_{Cx2}} \cdot \frac{\dot{U}}{2} = \frac{\frac{1}{j\omega C_{x2}} - \frac{1}{j\omega C_{x1}}}{\frac{1}{j\omega C_{x1}} + \frac{1}{j\omega C_{x2}}} \cdot \frac{\dot{U}}{2}$$

$$= \frac{C_{x1} - C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} \cdot \frac{\dot{U}}{2} = \frac{(C_0 \pm \Delta C) - (C_0 \mp \Delta C)}{(C_0 \pm \Delta C) + (C_0 \mp \Delta C)} \cdot \frac{\dot{U}}{2} = \pm \frac{\Delta C}{C_0} \cdot \frac{\dot{U}}{2} \quad (3-8)$$

式中： $C_0$ ——传感器初始电容值；

$\Delta C$ ——传感器电容的变化值；

$U$ ——变压器输出电压的有效值。

该线路的输出还应经过相敏检波才能分辨  $\dot{U}_0$  的相位，即判别电容传感器的位移方向。

## 2. 调频电路

电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分，当输入量使电容量发生变化后，就使振荡器的振荡频率发生变化，频率的变化在鉴频器中变换为振幅的变化，经过放大后就可以用仪表指示或用记录仪器记录下来。

调频接收系统可以分为直放式调频和外差式调频两种类型。外差式调频线路比较复杂，但选择性好，特性稳定，抗干扰性能优于直放式调频。

图 3-20(a)和(b)分别表示这两种调频系统。

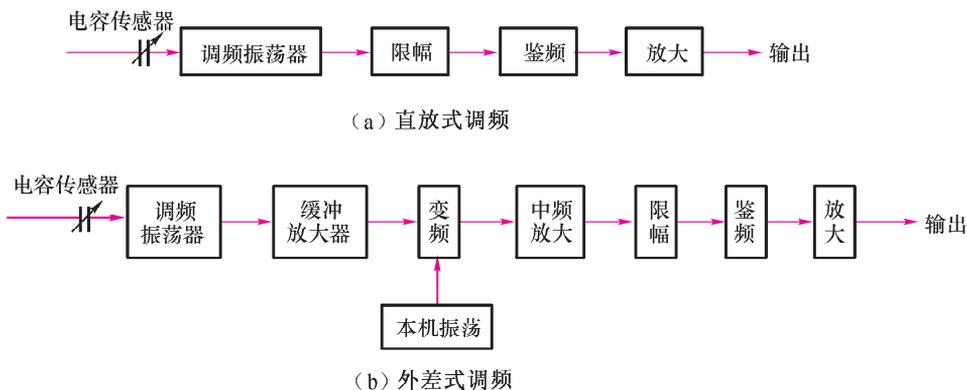


图 3-20 调频电路方框图

用调频系统作为电容式传感器的测量电路主要具有抗外来干扰能力强、特性稳定、能取得高电平的直流信号(伏特数量级)等特点。

## 3. 脉冲宽度调制电路

脉冲宽度调制电路是利用对传感器电容的充放电，电路输出脉冲的宽度随电容传感器的电容量变化而改变，通过低通滤波器得到对应于被测量变化的直流信号。脉冲宽度调制电路如图 3-21 所示。它由比较器  $A_1$ 、 $A_2$ 、双稳态触发器及电容充放电回路所组成。 $C_1$ 、 $C_2$  为差动电容传感器。经分析推导，可得

$$U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_1 = \frac{\Delta C}{C_0} U_1 \quad (3-9)$$

式中  $U_0$  ——输出直流电压值；

$U_1$  ——触发器输出高电平值。

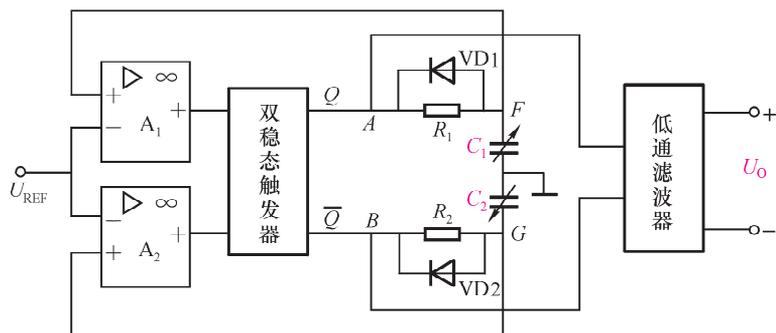


图 3-21 脉冲宽度调制电路

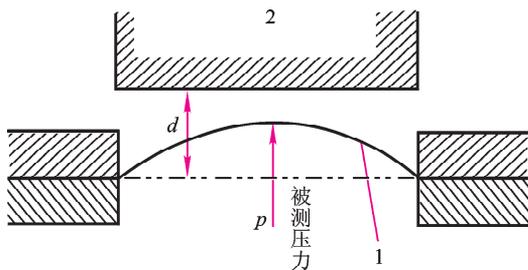
由式(3-9)可知,输出电压  $U_O$  与  $\Delta C$  呈线性关系。脉冲宽度调制电路具有如下特点:不论是对于变面积式或变间隙式等电容传感器均能获得线性输出;双稳态输出信号一般为  $100\text{ Hz}\sim 1\text{ MHz}$  的矩形波,所以只需经滤波器简单地引出,不需要相敏检波即能获得直流输出;电路只采用直流电源,虽然要求直流电源的电压稳定度较高,但这比其他转换电路中要求高稳定度的稳频、稳幅的交流电更易于实现;对输出矩形波的纯度要求不高。

### 三、电容式传感器的应用

电容式传感器不但应用于位移、角度、振动、加速度和荷重等机械量的精密测量,还广泛应用于压力、差压力、料位、成分含量及热工参数的测量。现举例如下:

#### 1. 压力测量

电容式压力传感器的结构示意图如图 3-22 所示。其中膜片电极 1 为电容器的动极板,2 为电容器的固定电极。当被测压力或差压作用于膜片电极上,并使它产生位移时,两极板间距离将发生改变,从而导致电容器的电容量也改变。当两极板间距离  $d$  很小时,被测压力  $p$  和电容量之间为线性关系。



1—膜片电极;2—固定电极。

图 3-22 电容式压力传感器的结构示意图

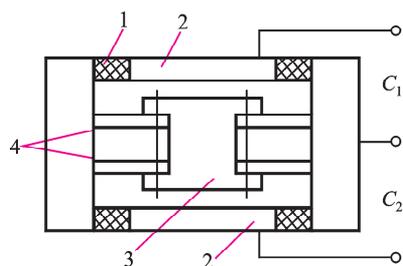
1—绝缘体;2—固定电极;  
3—质量块(动电极);4—弹簧片。

图 3-23 空气阻尼电容式加速度传感器

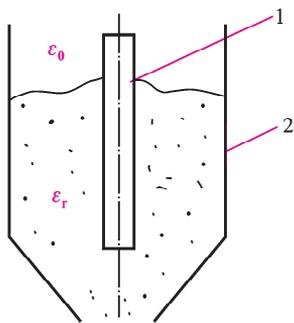
#### 2. 加速度测量

图 3-23 所示为一种空气阻尼电容式加速度传感器。该传感器采用差

动式结构,有两个固定电极 2,两极板间有一用弹簧支撑的质量块 3。此质量块的两个端平面经磨平抛光后作为可动电极。当传感器测量垂直方向的振动时,由于质量块的惯性作用,使两固定电极相对质量块产生位移,此时上下两个固定电极与质量块端面之间的电容量产生变化而使传感器有一个差动的电容变化量输出。

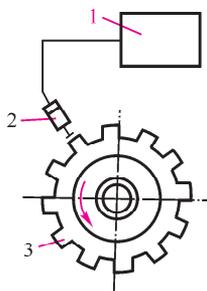
### 3. 固体料位测量

测量固体块状、颗粒体及粉料的料位时,由于固体摩擦力较大,容易产生滞留现象,所以一般可用极棒和容器壁组成电容器的两个电极来测量非导电固体物料的料位,如图 3-24 所示。当固体物料的料位发生变化时,会引起极间不同介电常数介质的高度发生变化,因而导致电容变化。如果要测量导电固体料位,可以在电极外套以绝缘套管。



1—极棒;2—容器壁。

图 3-24 电容式固体料位传感器



1—频率计;2—电容式传感器;3—齿轮。

图 3-25 电容式转速传感器

### 4. 转速测量

电容式转速传感器如图 3-25 所示。当电容极板与齿顶相对时电容量最大,而电容极板与齿隙相对时电容量最小。当齿轮旋转时,电容量发生周期性变化,通过转换电路即可得到脉冲信号。频率计显示的频率  $f$  与转速  $n$  成正比关系。设齿数为  $Z$ ,由计数器得到的频率为  $f$ ,则转速  $n$ (单位: r/min) 为

$$n = \frac{60f}{Z} \quad (3-10)$$

在应用或制造电容式传感器时,应注意当电容器极板间距离  $d$  过小时,虽能使灵敏度提高,但这样两极板间就有被击穿的危险,一般可在极板间放置云母片来改善。变极间距离的电容式传感器可用来测量微米级的位移,一般极板间距离不超过 1 mm,而最大位移量应限制在间距的 1/10 以内,在变面积的电容传感器中,可以测量  $10^{-2}$  m 数量级的位移。

### 5. 1151 电容式智能压力变送器

图 3-26 所示为 1151 电容式智能压力变送器的外形图。它利用差动电容原理,对压力参数进行测量,测量精度一般为  $\pm 0.2\% \sim \pm 0.25\%$ ,最高

动画



电容加速度测量

动画



电容转速测量

## • 拓展提高



电容式压力变送器故障分析与处理方法



图 3-26 1151 电容式智能压力变送器的外形图

可达 $\pm 0.1\%$ 。敏感部件设计为微位移形式,采用熔焊形成的全密封球形电极差动电容感压结构,直接测量各种压力变化;而工作位移量小于 $10\ \mu\text{m}$ ,可以有效地克服由机械内部传递冲击振动带来的影响,具有良好的稳定性。由于采用独特的球形电极设计,变送器具有极优良的抗单向过载能力(一般可达 $14\ \text{MPa}$ ),恢复单向变压后仍能正常工作。

## (1) 主要技术性能

① **测量范围**: $0\sim 0.12\ \text{kPa}$ ,  $0\sim 41.37\ \text{kPa}$ ;量程比为 $1:15$ (智能型), $1:6$ (普通型);

② **测量精度**: $\pm 0.1\%$ (智能型), $\pm 0.2\%\sim \pm 0.25\%$ (普通型), $\pm 0.5\%$ (微差压);

③ **输出信号**:直流电流 $4\sim 20\ \text{mA}$ ; **供电电源**:直流电压 $12\sim 45\ \text{V}$ 。

## (2) 压力(差压)变送器的耐腐蚀和防爆

① **耐腐蚀** 由于压力(差压)变送器在使用中要接触不同的化工介质,必然会遇到防腐蚀问题。但现实中还没有找到一种材料能够抵御所有介质的腐蚀,又能制成弹性材料的;故在 1151 型、ST3000 型、PM10 型压力(差压)变送器中,有不同接触介质的材料供用户选择,以满足用户需要。

② **防爆** 国家制定了 GB3836.1—2010 标准,规定了《爆炸性环境用防爆电气设备通用要求》。其中规定了我国爆炸性环境用防爆电气设备的种类。在工业自动化仪表中,一般只选择两种来满足用户要求:一种是隔爆型(GB3836.2—2010),其防爆等级为 $d\ \text{II}\ \text{BT4}$ ;一种是本安型(GB3836.4—2010),其防爆等级为 $ia\ \text{II}\ \text{CT6}$ 。

## 【实践项目】

## 压力变送器的认识与校验

## 1. 项目要求

通过本项目训练认识各种压力变送器的外形、结构和信号输入、输出的位置,并且掌握压力变送器校验的方法。

## 2. 设备与工具

压力发生装置一套; $0\sim 30\ \text{V}$  直流稳压电源一台;智能型压力变送器一台(若有其他压力、差压变送器也可展示);数字电压表一台;标准电阻箱一台;钳子、螺丝刀各一把;导线若干。

## • 视频



虚拟仪器电容式接近开关计数检测的硬件连线及运行调试

### 3. 项目内容

① 认识压力变送器的结构,熟悉各调节螺钉的位置和用途;② 调整仪表的零点和量程;③ 仪表的精度校验;④ 进行零点迁移;⑤ 量程调整。

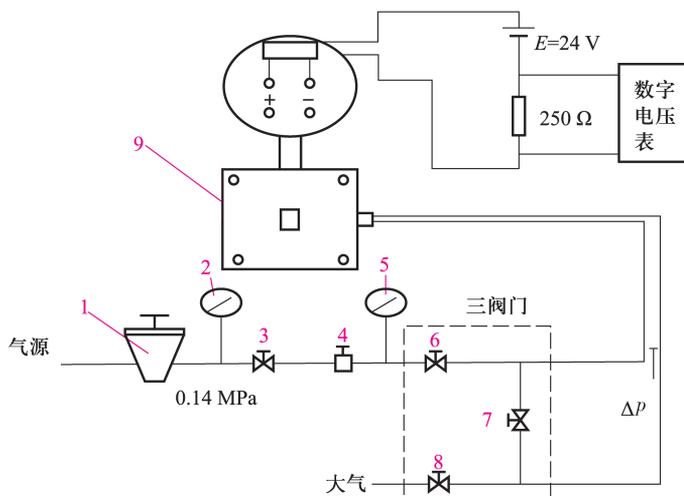
### 4. 操作步骤

#### (1) 认识压力(差压)变送器

仔细观察各种压力变送器的外表、铭牌,学会从外部辨认仪表的类型。查找各变送器输入、输出信号的位置。打开仪表外壳,大体认识内部结构,找到调零点、调量程的挡位和调节螺钉。

#### (2) 调校接线

电容式差压变送器校验接线如图 3-27 所示。



1—过滤器;2、5—标准压力表;3—截止阀;4—动定值器;  
6—高压阀;7—平衡阀;8—低压阀;9—被校变送器。

图 3-27 电容式差压变送器校验接线

#### (3) 调校

接线后,通电,打开气源,进行零点和量程的调整。

① 关闭阀 6,打开阀 7 和阀 8,使正负压室都通大气,差压信号为零时,调整零点螺钉,使电压表读数为  $1.000 \pm 0.004$  V DC。

② 关闭阀 7,打开阀 6,用定值器加压至仪表测量上限,调整量程螺钉,使电压表读数为  $5.000 \pm 0.004$  V DC。

**注意:**在差压不变的情况下,零点和量程螺钉都是顺时针输出增加,逆时针输出减小。反复调整零点和量程,直到合格为止。

③ 精度校验。将差压测量范围平分为 5 点,进行刻度校验。先做正行程,后做反行程,将检验结果填入数据表。

④ 迁移调整。加输入下限差压(迁移量),调零点螺钉使电压表读数为  $1.000 \pm 0.004$  V DC;加输入上限差压,调量程螺钉使电压表读数为  $5.000 \pm 0.004$  V DC。逐点校验,将检验结果填入数据表。

⑤ **改变量程**。调整零点,取消原有正、负迁移量,输入差压为零,调整零点螺钉,使输出电压为  $1 \pm 0.004 \text{ V DC}$ 。

调整量程到需要值,若量程缩小,则当输入差压  $\Delta P$  为零时,顺时针转动量程螺钉,使输出电压为:(原有量程/现有量程) $\times 1 \text{ V}$ ;若量程增大,则当输入差压为原有量程时,逆时针转动量程螺钉,使输出电压为:(原有量程/现有量程) $\times 5 \text{ V}$ 。

复校零点和量程,最后进行零点迁移调整。

### 5. 数据处理及思考

(1) 将校验数据填入表 3-3。根据校验数据,计算基本误差和变差。

表 3-3 精度校验数据记录表

输入差压	0%	25%	50%	75%	100%
标准输出电压(U)/V	1	2	3	4	5
上行输出电压( $U_u$ )/V					
上行误差( $\Delta_u$ )/V					
下行输出电压( $U_d$ )/V					
下行误差( $\Delta_d$ )/V					
基本误差 $[\Delta = (\Delta_u + \Delta_d) / 2] / \%$					
变差( $\Delta_u - \Delta_d$ ) / %					
精度( $\Delta / 5$ ) / %					

(2) **思考问题**: 几种压力变送器有何特征? 三阀门有什么作用?

## 综合训练

### 【认知训练】

**3-1** 差动变压器式传感器产生零点残余电压的主要原因有哪些? 减小或消除零点残余电压的方法有哪些?

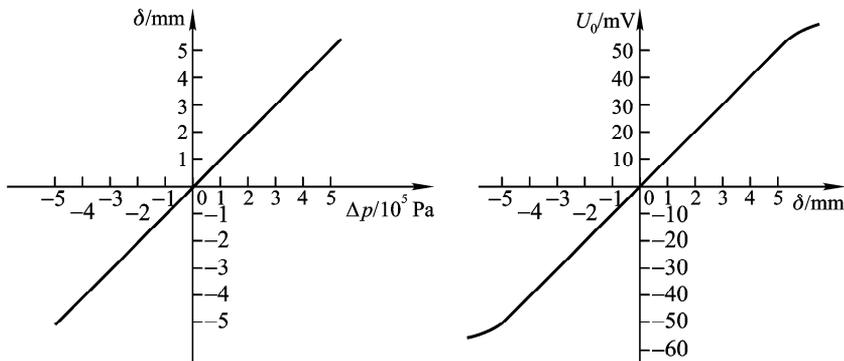
**3-2** 试分析图 3-4(b)所示差动整流半波电流输出电路的工作原理。(提示:输入电压分正半周和负半周进行分析)

**3-3** 试分析图 3-4(c)所示差动整流全波电压输出电路的工作原理(提示:二极管有一定的正向电阻)。

**3-4** 差动变压器式压力变送器见图 3-5,其差压与膜盒位移的关系和差动变压器衔铁的位移与输出电压的关系如图 3-28 所示。求:当输出电压为  $50 \text{ mV}$  时,差压  $\Delta p$  为多少? 作图表示(提示:注意信号传输的顺序)。

**3-5** 用一电涡流式测振仪测量某种机器主轴的轴向振动,已知传感器的灵敏度为  $20 \text{ mV/mm}$ ,最大线性范围为  $5 \text{ mm}$ 。现将传感器安装在主轴的右侧,如图 3-29(a)所示,使用高速记录仪记录下来的振动波形如

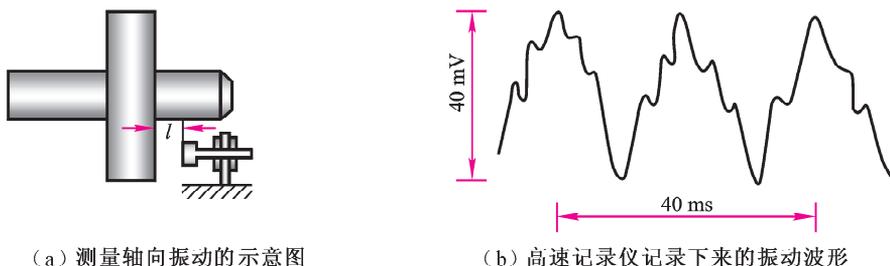
图 3-29(b)所示。问：



(a) 膜盒压差与位移的关系曲线 (b) 差动变压器衔铁的位移与输出电压的关系

图 3-28 习题 3-4 题图

- ① 传感器与被测金属的安装距离  $l$  为多少毫米时可得到较好的测量效果？为什么？
- ② 轴向振幅的最大值  $A$  为多少？
- ③ 主轴振动的基频  $f$  是多少？



(a) 测量轴向振动的示意图

(b) 高速记录仪记录下来的振动波形

图 3-29 电涡流式测振仪测量示意图

**3-6** 电容式传感器有什么主要特点？一般可做成哪几种类型的电容式传感器？

**3-7** 脉冲宽度调制电路用于电容式传感器时有何特点？

**3-8** 试解释为什么电容式传感器不能测量黏度较大的导电液体的液位？

**【能力训练】**

**3-1** 试绘出运用电容式传感器测量小位移的可能方案及原理图。

文本



模块三  
答案参考