

## 第 5 章 电感式传感器

电感式传感器的基本原理是利用磁路磁阻变化，引起传感器线圈的自感和线圈间的互感的变化来实现非电量电测的一种装置。利用这种转换原理可以测量位移、振动、压力、应变、流量、相对密度等参数。

电感式传感器根据转换原理，可以分为自感式和互感式两类。按照结构形式，自感式传感器又可分为变气隙式、变截面式和螺管式等形式，互感式传感器也有变气隙式和螺管式等结构。

电感式传感器与其他传感器相比，具有以下优点：

(1) 结构简单可靠，测量力小，当衔铁重力为 $(0.5\sim 200)\times 10^{-4}\text{N}$ 时，电磁吸力为 $(1\sim 10)\times 10^{-4}\text{N}$ 。

(2) 分辨率高，最小刻度值可达  $0.1\mu\text{m}$ 。

(3) 零点稳定，漂移最小可达  $0.1\mu\text{m}$ 。

(4) 测量精度高，输出线性误差最小可达  $\pm 0.1\%$ 。

(5) 输出功率较大，即使不用放大器，一般也有 $(0.1\sim 5)\text{V/mm}$ 的输出值。

电感式传感器的缺点主要是传感器本身频率响应较低，所以它不能用于快速动态信号的测量，而且传感器的分辨率与测量范围有关，测量范围越大，分辨率越低。

人们习惯上说的电感式传感器通常指自感式传感器，而由于互感式传感器是利用变压器原理，又往往做成差动式，故常称为差动变压器。

### 5.1 自感式传感器

#### 5.1.1 工作原理

图 5-1 所示为变隙式传感器的一种结构原理图，传感器主要由线圈、衔铁和铁芯等组成。图 5-1 中的点划线表示磁路，磁路中的空气隙总长为  $l_\delta$ ，工作时衔铁与被测体相连，被测体的位移引起气隙磁阻的变化，从而使线圈电感值变化，当将传感器线圈接入测量电路后，电感的变化进一步转换成电压、电流或频率的变化，完成了非电量到电量的转换。

在图 5-1 中，线圈的电感值可按式计算

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (5-1)$$

式中， $N$ ——线圈匝数；

$R_m$ ——以平均长度表示的磁路的总磁阻。

对于变气隙式电感传感器，因为空气隙厚度  $\delta$  较小，且不考虑磁路的铁损，则总磁阻为

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \frac{l_\delta}{\mu_0 A} \quad (5-2)$$

式中,  $l_1$ ——铁心的磁路长;

$l_2$ ——衔铁的磁路长;

$A$ ——气隙磁通截面积;

$A_1$ ——铁心横截面积;

$A_2$ ——衔铁横截面积;

$2\delta$ ——空气隙总长;

$\mu_1$ ——铁芯磁导率;

$\mu_2$ ——衔铁磁导率;

$\mu_0$ ——真空磁导率 ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )。

因此

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{\frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 A}} \quad (5-3)$$

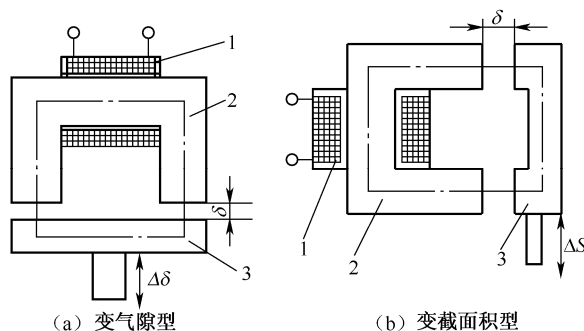


图 5-1 电感式传感器原理图

1—线圈; 2—铁心; 3—衔铁

当铁心、衔铁的结构和材料确定后, 式 (5-3) 中分母的第一、二项为常数, 此时电感  $L$  是气隙截面和长度的函数, 即  $L = f(A, \delta)$ 。如果将  $A$  保持不变, 则  $L$  为  $\delta$  的单值函数, 可构成变气隙式自感式传感器; 若保持  $\delta$  不变, 使  $A$  随位移而变, 则可构成变截面式自感式传感器。

$L = f(A, \delta)$  不是线性的, 当  $\delta = 0$  时,  $L$  不等于  $\infty$ , 而有一定的数值, 其曲线在  $\delta$  较小时, 如图 5-2 中虚线所示。如上下移动衔铁使面积  $S$  改变, 从而改变  $L$  值时, 则  $L = f(S)$  的特性曲线为一条直线。

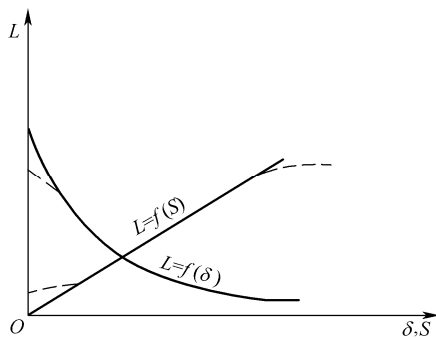


图 5-2 电感式传感器的特性曲线

分析单线圈自感式传感器特性，由图 5-2 可以看出：

(1) 不论气隙减少或增加，电感的变化与气隙变化均是非线性关系，其非线性程度随气隙相对变化  $\Delta l_0/l_0$  的增加而增加；

(2) 气隙减少  $\Delta l_0$  所引起的电感变化  $\Delta L_1$  与气隙增加同样  $\Delta l_0$  所引起的电感变化  $\Delta L_2$  并不相等， $\Delta L_1 > \Delta L_2$ ， $\Delta L_1$  与  $\Delta L_2$  的差值也随  $\Delta l_0/l_0$  的增加而变大。

上述介绍的自感式传感器的结构都是采用单个线圈，虽然结构简单，运行方便，但也有缺点。由于测量前线圈中的电流不可等于零，存在起始电流，而输出也取自该线圈的电流或电压，无输入而有输出会引起附加误差，不适用于精密测量，由于存在电源电压、频率及温度变化形成的一些干扰而产生的误差。因此在实际中应用较少，而常采用差动式电感传感器。

### 5.1.2 输入—输出特性

#### 1. 变气隙型自感式传感器

(1) 单一式变气隙型自感式传感器。单一式变气隙型自感式传感器的基本结构如图 5-3 所示。线圈 1 绕在铁心 2 上，铁心 2 与活动衔铁 3 之间留有空气隙。

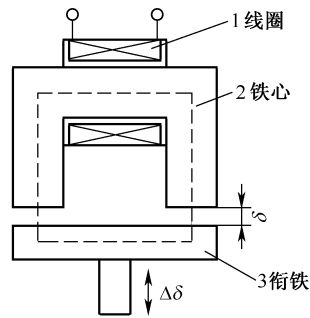


图 5-3 单一式变气隙型自感传感器

当铁心工作在非饱和状态时，铁心与衔铁的磁阻远小于空气隙的磁阻，于是式 (5-2) 中的前两项可忽略不计而简化为

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A} \quad (5-4)$$

将其代入式 (5-1) 得

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad (5-5)$$

设初始气隙为  $\delta_0$ ，初始自感由式 (5-5) 得

$$L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta_0}$$

当图 5-3 所示衔铁向下移动  $\Delta\delta$ ，即  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$  时，由式 (5-5) 得自感  $L$

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2(\delta_0 + \Delta\delta)} = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)} = \frac{L_0}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \quad (5-6)$$

为保证一定的测量范围和线性度,对变气隙型自感式传感器,常取  $\delta_0 = 0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ ,

$$\Delta\delta = \left( \frac{1}{5} \sim \frac{1}{10} \right) \delta_0。$$

(2) 差动式变气隙型自感式传感器。差动式结构采用两个相同的线圈(两个线圈的导线电阻、电感、匝数等电气参数完全一致,有定铁心时,两个定铁心的几何结构和材料完全相同,结构完全对称),共用一个活动铁心,输出为两个线圈输出之差。

差动式自感式传感器对于干扰、电磁吸力有一定的补偿作用,还能改善特性曲线的非线性。如图 5-4 所示,设  $\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta$ ,  $\delta_2 = \delta_0 - \Delta\delta$ ,则由式(5-6)可知,两线圈自感分别为

$$L_1 = L_0 / \left( 1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right), \quad L_2 = L_0 / \left( 1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)$$

可得

$$\frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (5-7)$$

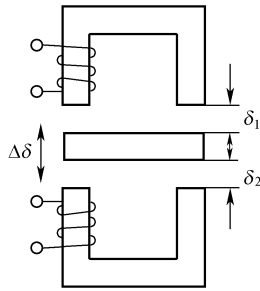


图 5-4 差动式变气隙型自感式传感器

## 2. 变面积式型自感传感器

(1) 单一式变面积型自感传感器。单一式变面积型自感传感器的结构如图 5-5 所示。

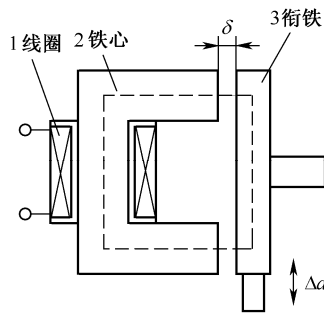


图 5-5 单一式变面积型自感传感器

式(5-5)对单一式变面积型自感传感器和差动式变面积型自感传感器仍然适用,但变面积型自感传感器只是改变气隙截面积而并不改变铁心截面积,由于自感与气隙截面积成正比,因此,变面积型自感传感器的输入—输出关系恒为线性。

$$L = \frac{N^2 \mu_0 b(a_0 + \Delta a)}{2\delta} = L_0 \left( 1 + \frac{\Delta a}{a_0} \right) \quad (5-8)$$

(2) 差动式变面积型自感传感器。差动式变面积型自感传感器结构如图 5-6 所示。设图 5-6 中,  $A_1 = (a_0 - \Delta a)b$ ,  $A_2 = (a_0 + \Delta a)b$ , 代入式 (5-5) 中, 得

$$L_1 = L_0 \left( 1 + \frac{\Delta a}{a_0} \right), \quad L_2 = L_0 \left( 1 - \frac{\Delta a}{a_0} \right)$$

则

$$\frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2} = \frac{\Delta a}{a_0} \quad (5-9)$$

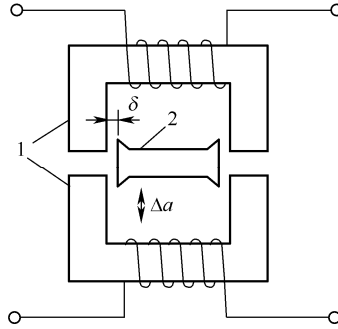


图 5-6 差动式变面积型自感传感器

### 3. 螺管型自感传感器

(1) 单一式螺管型自感传感器。单一式螺管型自感传感器结构如图 5-7 所示。

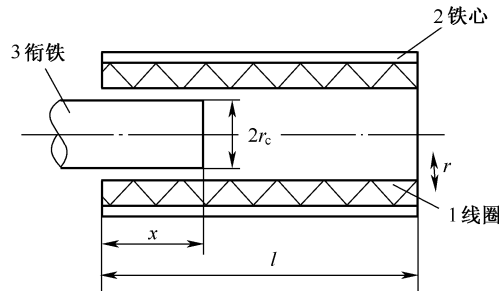


图 5-7 单一式螺管型自感传感器

它由螺管线圈 1、衔铁 3 和磁性套筒 2 等组成。磁性套筒构成线圈的外部磁路, 并作为传感器的磁屏蔽。随着衔铁插入深度的不同将引起线圈漏磁通路径中磁阻的变化, 从而使线圈的自感发生变化。

为分析简单起见, 假设线圈的长径比  $\frac{l}{r}$  足够大, 因此线圈内部的磁场可以认为是均匀的, 这样可求得未插入衔铁时空心线圈电感为

$$L_0 = \frac{\pi r^2 \mu_0 N^2}{l} \quad (5-10)$$

式中,  $l$ ——线圈长度;

$r$ ——线圈半径;

$N$ ——线圈匝数。

当衔铁进入线圈时，被其覆盖的线圈局部电感增大，

$$L = L_0 \left[ 1 + (\mu_r - 1) \frac{r_c^2}{r^2} \cdot \frac{x}{l} \right] \quad (5-11)$$

式中， $x$ ——衔铁插入线圈中的长度；

$r_c$ ——衔铁的半径；

$\mu_r$ ——相对磁导率。

(2) 差动式螺管型自感传感器。差动式螺管型自感传感器结构如图 5-8 所示。

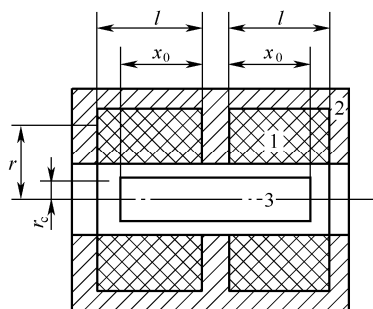


图 5-8 差动式螺管型自感传感器

当衔铁处于中间位置时， $x_1 = x_2 = x_0$ ，两个电感  $L_1 = L_2$ ，即

$$L_1 = L_2 = L_0 = L_0 \left[ 1 + (\mu_r - 1) \frac{r_c^2}{r^2} \cdot \frac{x_0}{l} \right] \quad (5-12)$$

若衔铁偏离中间位置  $\Delta x$ ，令  $x_1 = x_0 - \Delta x$ ， $x_2 = x_0 + \Delta x$ ，则

$$L_1 = L_0 \left[ 1 + (\mu_r - 1) \frac{r_c^2}{r^2} \cdot \frac{x_0 - \Delta x}{l} \right]$$

$$L_2 = L_0 \left[ 1 + (\mu_r - 1) \frac{r_c^2}{r^2} \cdot \frac{x_0 + \Delta x}{l} \right]$$

可得

$$\frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2} = \frac{(\mu_r - 1) \left( \frac{r_c}{r} \right)^2 \cdot \frac{\Delta x}{l}}{1 + (\mu_r - 1) \left( \frac{r_c}{r} \right)^2 \cdot \frac{x_0}{l}} \approx \frac{\Delta x}{x_0} \quad (5-13)$$

变气隙型、变面积型和螺管型三种类型自感传感器相比较，变气隙型灵敏度最高，螺管型灵敏度最低。变气隙型的主要缺点是非线性严重，为了限制非线性误差，示值范围只能较小；它的自由行程受铁心限制，制造装配困难。变面积型和螺管型的优点是具有较好的线性，因而示值范围可取大些，自由行程可按需要安排，制造装配也较方便。此外，螺管型与变面积型相比，批量生产中的互换性更好。由于具备上述优点，而灵敏度低的问题可在放大电路方面加以解决，因此目前螺管型自感传感器的应用越来越多。

### 5.1.3 等效电路分析

在分析自感传感器工作原理时，本书把自感线圈看成一个理想的纯电感  $L_0$ 。实际上线圈导线存在铜损电阻  $R_c$ ，传感器中铁磁材料在交变磁场中一方面被磁化，另一方面形成涡流及损耗，这些损耗可分别用磁滞损耗电阻  $R_h$  和涡流损耗电阻  $R_e$  表示，此外还存在线圈的匝间电容和电缆线分布电容  $C$ ，因此，自感传感器的等效电路如图 5-9 (a) 所示。

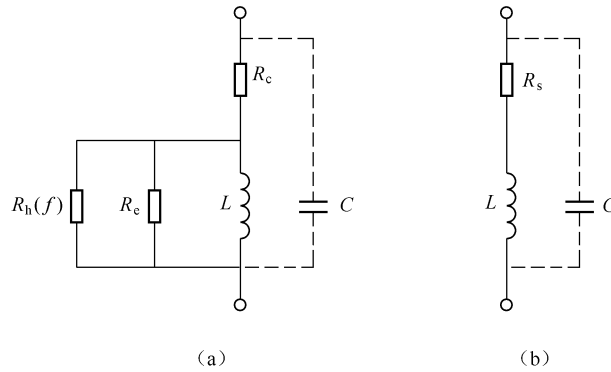


图 5-9 等效电路

在图 5-9 (b) 中  $R_s$  为总的等效损耗电阻，其对线圈能量的损耗程度可以用耗散因数  $D$  表示，设线圈品质因数为  $Q$ ，则

$$D = \frac{1}{Q} = D_c + D_e + D_h = \frac{C_c}{f} + C_e f + C_h$$

式中， $D_c$ 、 $D_e$ 、 $D_h$ ——电阻的铜耗、涡流损耗及磁滞损耗的耗散因子；

$f$ ——激励磁场频率。

由于各损耗电阻的存在使线圈电感的品质因数降低且与激励频率有关，因此最好选择最佳激励频率——使线圈电感品质因数最高的激励频率。取激励频率  $f \ll f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  时，可以

获得最佳激励频率值品质因数。

在不考虑电容  $C$  时，其串联回路阻抗为  $Z = R_s + j\omega L$ 。

当考虑到实际存在的电容  $C$  时，且品质因数  $Q \gg 1$  时，阻抗  $Z_p$  可用下式表示

$$Z_p = \frac{R_s}{(1 - \omega^2 LC)^2} + j \frac{\omega L}{(1 - \omega^2 LC)^2} = R_p + j\omega L_p \quad (5-14)$$

由式 (5-14) 可知，并联电容  $C$  的存在增加了有效损耗电阻和有效电感，而有效  $Q_p$  值

$$Q_p = \frac{\omega L_p}{R_p} = (1 - \omega^2 LC)Q \quad (5-15)$$

则减少了。

$$\text{其电感的相对变化值} \quad \frac{dL_p}{L_p} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \frac{dL}{L} \quad (5-16)$$

得到提高。

根据以上分析, 由于电缆线分布电容时, 并联寄生电容  $C$  的存在会引起传感器性能的一系列的变化, 因此自感传感器在更换连接电缆后需要重新校正或采用并联电容加以调整。

### 5.1.4 测量电路

电感式传感器可将位移等非电量转换为电感的变化, 而为了将电感的变化转换为电压、电流或频率, 还须选择适当的接口电路。选择的基本原则是尽可能使输出电压、电流或频率与被测非电量成线性关系。

#### 1. 变压器电桥

变压器电桥的电路结构如图 5-10 所示。

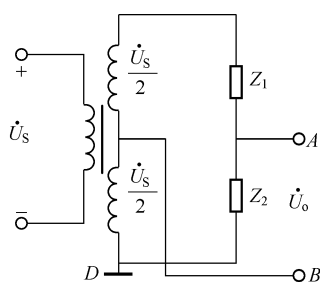


图 5-10 变压器电桥

变压器电桥中两个桥臂为电源变压器的两个副边绕组, 它们的电气参数完全相同; 令两个臂  $Z_1$  和  $Z_2$  为差动式自感传感器的两个线圈的阻抗。

设  $D$  点为电位为零, 则  $\dot{U}_B = \frac{\dot{U}_s}{2}$ , 当负载阻抗为无穷大时, 输出电压为

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \frac{\dot{U}_s}{Z_1 + Z_2} Z_2 - \frac{\dot{U}_s}{2} = \frac{\dot{U}_s}{2} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5-17)$$

当传感器的铁心处于中间位置, 两线圈完全对称,  $Z_1 = Z_2 = Z$  时,  $\dot{U}_0 = 0$ , 电桥平衡, 无输出电压。

当自感传感器衔铁的上移量很小时, 上面的线圈阻抗增加, 即  $Z_1 = Z + \Delta Z$ , 而下面的线圈阻抗减小, 即  $Z_2 = Z - \Delta Z$ , 此时由式 (5-17) 得

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_s}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \quad (5-18)$$

当衔铁下移时, 得

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_s}{2} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \quad (5-19)$$

设线圈  $Q$  很高, 则式 (5-18) 和 (5-19) 可写为

$$\dot{U}_0 = \mp \dot{U}_s \cdot \frac{\Delta L}{2L} \quad (5-20)$$

可见当衔铁上、下移动时, 输出电压相位相反, 大小随衔铁的位移而变化。如果采用适当的处理电路如相敏整流器, 可以鉴别位移的大小和方向。

#### 2. 带相敏整流的交流电桥

采用变压器电桥只能判别位移的大小, 不能判别位移的方向; 采用带相敏整流的交流电



桥既能判别位移的大小，又能判别位移的方向。

图 5-11 中  $Z_1$  和  $Z_2$  为差动自感传感器线圈的阻抗，与两个平衡电阻  $R_1 = R_2$  组成交流电桥，电桥 A、B 端接交流电源  $\dot{U}_s$ ，电桥输出 C、D 端接有双向指示的直流电压表， $VD_1 \sim VD_4$  构成相敏整流器。

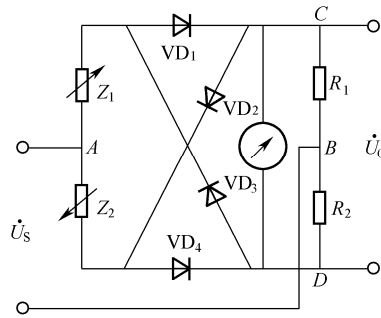


图 5-11 带相敏整流的交流电桥

当差动衔铁处于中间位置时， $Z_1 = Z_2 = Z$ ，输出电压  $U_0$  为零。

当衔铁偏离中间位置而使  $Z_1 = Z + \Delta Z$  增加，则  $Z_2 = Z - \Delta Z$  减少，这时当电源  $U$  上端为正、下端为负时，电阻  $R_2$  上的压降大于  $R_1$  上的压降，当电源  $U$  下端为正、上端为负时，在电阻  $R_1$  上的电压降大于  $R_2$  上的压降，则电压表  $V$  有输出：下端为正，上端为负。

当衔铁偏离中间位置而使  $Z_2 = Z + \Delta Z$  增加，则  $Z_1 = Z - \Delta Z$  减少，这时当电源  $U$  上端为正，下端为负时，电阻  $R_1$  上的压降大于  $R_2$  上的压降；当  $U$  上端为负、下端为正时， $R_2$  上的压降则大于  $R_1$  上的压降，电压表  $V$  也有输出：上端为正，下端为负。

比较上述两种情况，可知输出电压幅值相等，极性相反。

## 5.2 差动变压器

差动变压器属于互感传感器，可以把被测位移转换为传感器线圈的互感的变化量。

### 5.2.1 工作原理与结构

差动变压器的工作原理基于变压器的原理。差动变压器主要由一个线框和一个铁心组成。在线框上绕有一组一次线圈作为输入线圈，一次线圈（初级线圈）上加交变的激励电压，在同一框架上另绕两组二次线圈作为输出线圈，二次线圈（次级线圈）即产生电动势，在负载上输出相应的电压。在线框中央圆柱孔中放入铁心，如图 5-12 (a) 所示。

一般变压器铁心相对线圈没有位置变动，互感  $M$  是常数，输出电压只反映激励电压的变化。差动变压器的铁心是活动的或部分活动的，相对线圈有位置变动，一、二次线圈的互感  $M$  则随动铁心的移动而变化。在激励电压大小为定值的情况下，二次线圈的输出电压的大小反映铁心位移的大小。

差动变压器的二次线圈一般采用两个结构尺寸和参数都相同的绕组线圈反接而成（同名端串接在一起），以差动方式输出。

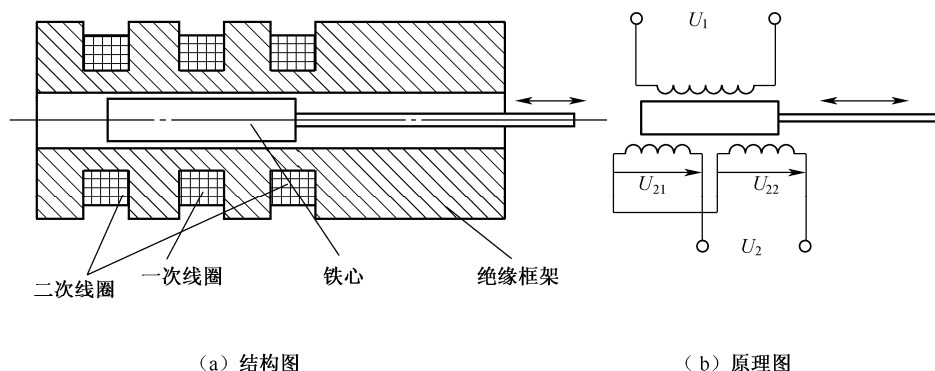


图 5-12 差动变压器

在初级线圈上加一定的正弦交流电压  $\dot{U}_1$  后，次级线圈中的感应电动势  $\dot{U}_{21}$  和  $\dot{U}_{22}$  与铁心在线圈中的位置有关。当铁心在中间位置时，两个次级线圈同初级线圈的互感相等， $M_1 = M_2$ ，因而由初级线圈激励引起的感应电势相同  $\dot{U}_{21} = \dot{U}_{22}$ ，次级差动输出电压  $\dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22} = 0$ 。当铁心向左或向右移动时，互感  $M_1$  减小、 $M_2$  增大或  $M_1$  增大、 $M_2$  减小，两个次级线圈感应电势不同， $\dot{U}_{21} > \dot{U}_{22}$  或  $\dot{U}_{21} < \dot{U}_{22}$ ，则差动输出电压  $\dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22} \neq 0$ 。 $\dot{U}_2$  的大小反映了铁心位移  $x$  的大小， $\dot{U}_2$  的相位不同反映了位移  $x$  的不同方向，因此由  $\dot{U}_2$  可测量位移。

差动变压器也有气隙型、变面积型和螺管型三种形式，如图 5-13 所示。其中变气隙型灵敏度高但测量范围小，一般用于测量几微米到几百微米的位移，由于行程小，结构复杂，因此应用较少；变面积型，一般可分辨零几点角秒以下的角位移，线性范围达  $\pm 10^\circ$ ；螺管型可测量几纳米到 1m 的位移，但灵敏度稍低。

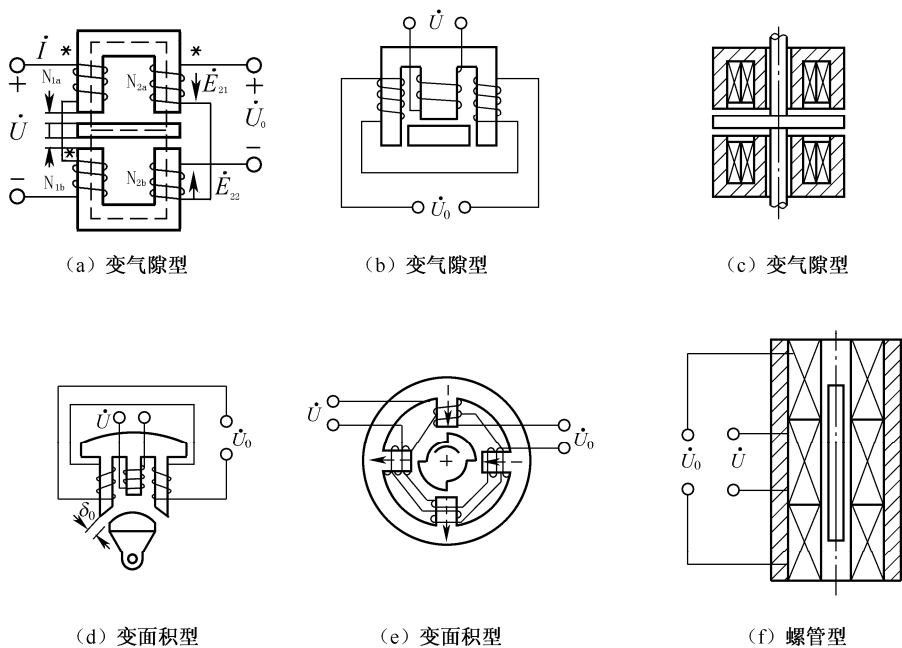


图 5-13 差动变压器的结构

## 5.2.2 基本特性

### 1. 等效电路

对图 5-12 所示的差动变压器，可以作出如图 5-14 所示的等效电路。图中  $\dot{U}_1$  为一次线圈励磁电压； $\dot{U}_{21}$  和  $\dot{U}_{22}$  为二次线圈的输出电压； $L_1$ 、 $R_1$  分别为一次线圈的自感和有效电阻； $M_1$ 、 $M_2$  分别为一次线圈和二次线圈右边、左边的互感； $L_{21}$ 、 $L_{22}$  分别为两个二次线圈的自感； $R_{21}$ 、 $R_{22}$  分别为两个二次线圈的有效电阻； $N_1$ 、 $N_2$  为一、二次绕组匝数。

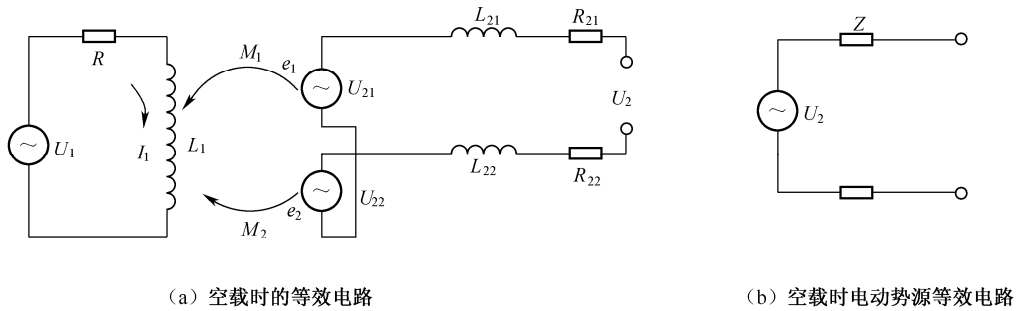


图 5-14 差动变压器的等效电路

由图 5-14 可见，当二次侧开路时，一次线圈的交流电流复数值为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{(R_1 + j\omega L_1)} \quad (5-21)$$

式中， $\omega$ ——励磁电压的角频率；

$\dot{U}_1$ ——励磁电压的复数值。

由于  $\dot{I}_1$  的存在，在铁心和线圈中产生磁通  $\dot{\phi}_{21} = N_1 \dot{I}_1 / R_{M1}$  和  $\dot{\phi}_{22} = N_1 \dot{I}_1 / R_{M2}$ ，在二次线圈中感应出电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$ ，其值分别为

$$E_1 = -j\omega M_1 I_1, \quad E_2 = -j\omega M_2 I_1 \quad (5-22)$$

式中， $M_1 = N_2 \dot{\phi}_{21} / I_1 = N_2 N_1 / R_{M1}$ ； $M_2 = N_2 \dot{\phi}_{22} / I_1 = N_2 N_1 / R_{M1}$ 。

$R_{M1}$  和  $R_{M2}$  分别为通过一次和两个二次线圈的磁阻。因此得到空载输出电压  $U_2$  为

$$U_2 = E_1 - E_2 = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)U_1}{R_1 + j\omega L_2} \quad (5-23)$$

其有效值为

$$U_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad (5-24)$$

只与  $M_1$ 、 $M_2$  有关。

输出阻抗为

$$Z = R_{21} + R_{22} + j\omega L_{21} + j\omega L_{22}$$

或写成

$$Z = \sqrt{(R_{21} + R_{22})^2 + (\omega L_{21} + \omega L_{22})^2} \quad (5-25)$$

这样差动变压器又可等效为电压  $U_2$ 、输出阻抗  $Z$  的电动势源，如图 5-14 (b) 所示。

### 2. 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  $V/mm/V$  表示。一般差动变压器的灵敏度大于  $50mV/mm/V$ 。

可采用下列方法提高差动变压器的灵敏度：

(1) 提高线圈的品质因数  $Q$  值，为此需增大差动变压器的尺寸，一般长度为直径的  $1.2\sim 2.0$  倍较恰当。

(2) 选择较高的励磁频率。

(3) 增大铁心直径，使其接近于线圈框架内径，铁心采用磁导率高、铁损小、涡流损失小的材料。

(4) 减少涡流损耗，为此线圈框架采用非导电且膨胀系数小的材料。

(5) 在不使一次线圈过热的情况下，尽量提高励磁电压。

由于坡莫合金涡流损耗较大，所以对于励磁频率为  $500Hz$  以上的差动变压器，一般使用铁氧体铁心较多；低频励磁时，经常采用纯铁为铁心材料。在要求电流输出的场合，用二次阻抗低的差动变压器，能够得到  $1mA/mm/V$  的灵敏度。

### 3. 频率特性

差动变压器的励磁频率一般以  $10\sim 50kHz$  为适当。频率太低时差动变压器的灵敏度会显著降低，温度误差和频率误差增加，要进行高精度和高灵敏度的测量比较困难。频率太高，铁损和耦合电容等的影响会增加，具体应用时频率可在  $5\sim 400kHz$  的范围内。

励磁频率与输出电压有很大关系，频率增加引起与二次绕组相联系的磁通量变化率增加，它将使差动变压器的输出电压增加。另外，增加频率使一次线圈的电抗增加，这使输出电压又有减小的趋势。因此只有在某频率下才能达到最大输出，在此频率附近由励磁频率的变化而引起灵敏度的变化为最小。

### 4. 线性范围

理想的差动变压器二次侧输出电压应与铁心位移成线性关系，还希望二次侧的相角为一 定值，这一点比较难满足。考虑到这种因素，铁心的线性范围应约为全长的  $1/10$  左右。

采用相敏整流电路对输出电压进行处理，可以改善差动变压器的线性。

### 5. 激励源波动和温度的影响

差动变压器由于机械结构的膨胀、收缩、测量电路的温度特性等的影响，会造成测量精度下降。由于机械部分热胀冷缩，影响测量精度达到  $10\mu m$  左右，如果要把机械部分的温度影响限制在  $1\mu m$  的范围内，则需把差动变压器在使用环境中放置  $24h$  后方可进行测量。在造成温度误差的各项中，影响最大的一次线圈的电阻温度系数，在温度变化时，引起一次电流发生增减，造成二次测量电压随温度而变化。对于一次线圈  $Q$  值高的差动变压器，由于温度变化使二次线圈的电阻变化引起的  $U_2$  的变化程度较小，可忽略不计。铁心的磁特性、磁导率、铁损、涡流损耗等也随温度变化而变化，但数值较小，也可略去不计。

激励源幅值的变化使输出变化，而环境温度的变化不仅使差动变压器电感线圈参数和导磁体特性发生变化，同样也使激励源产生变化而进一步影响输出。

### 6. 零点残余电压及其消除方法

差动变压器的两组二次线圈由于反向串联，因此当铁心处在中央位置时，输出信号电压应 为零。但是，在实际情况中研究零点附近的特性时，可发现在所谓“零点”时，输出信号电压并不是零，而有一个很小的电压值，这个电压值一般称为“零点残余电压”。

零点残余电压产生的原因有以下几个方面:

(1) 由于两个二次线圈结构上的不对称, 引起两个二次电压的幅值平衡点与相位平衡点两者不重合。

(2) 由铁心材料  $B-H$  曲线的弯曲部分导致输出电压中含高次谐波。

(3) 励磁电压波形中有高次谐波。

零点残余电压的存在使得传感器输出特性在零点附近的范围内不灵敏, 限制了分辨力的提高。零点残余电压太大, 将使线性度变坏, 灵敏度下降, 甚至会使放大器饱和, 堵塞有用信号, 使仪器不再反映被测量的变化。因此零点残余电压是评定传感器性能的主要指标之一, 同时说明对零点残余电压进行认真分析、找出减小的办法是很重要的。

消除零点残余电压一般可用下列方法:

(1) 从设计和工艺上尽量保证线路和磁路对称, 结构上采用磁路可调形式; 选用高  $\mu$ 、低  $H_c$ 、低  $B_r$  的导磁材料, 使用经过热处理的导磁体, 以消除残余应力, 提高磁性能的均匀性和稳定性; 磁路工作点应在线性区。

(2) 采用相敏检波电路, 相敏检波电路不仅可以鉴别衔铁移动方向, 也可消除零残电压中的高次谐波成分。

(3) 选用补偿线路消除零点残余电压可以采用各种形式, 如图 5-15 所示。归纳起来, 即加串联电阻消除基波同相成分; 加并联电容改变相移, 消除高次谐波分量; 加并联电阻消除基波中正交成分; 加反馈绕组和反馈电容补偿基波及高次谐波分量。

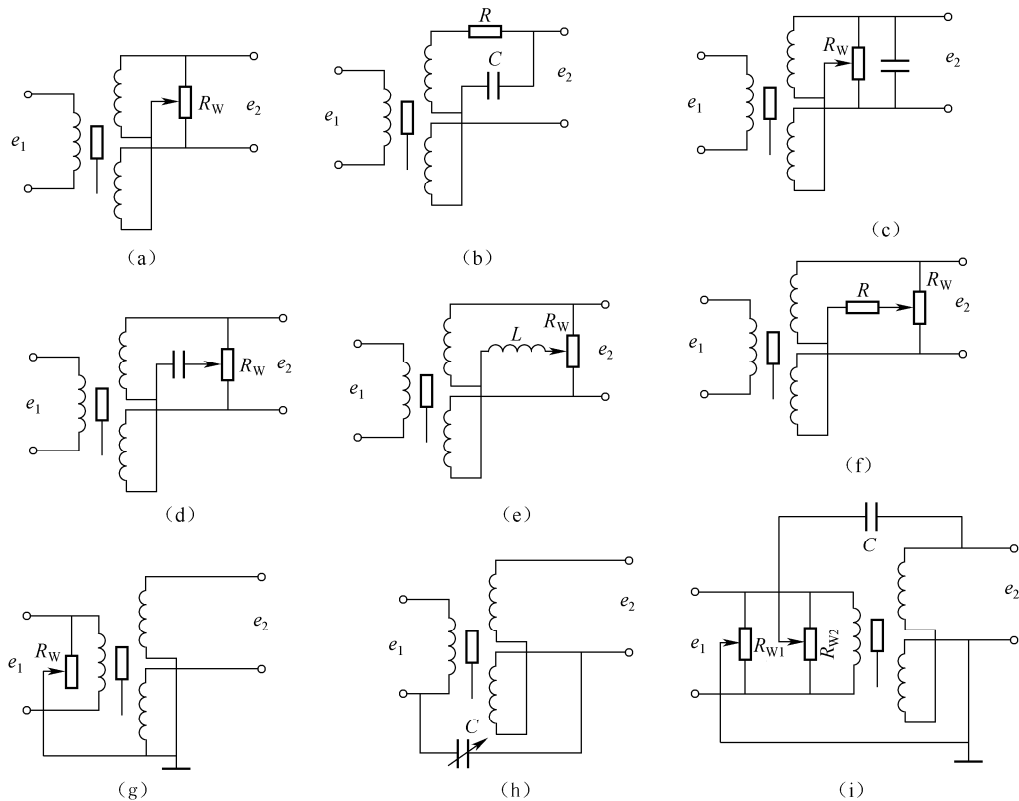


图 5-15 差动变压器零点残余电压补偿线路

消除零点残余电压的最有效的方法是采用在放大电路前加相敏整流器的方法，这样不仅使输出电压能反映铁心移动的方向，而且使零点残余电压可以小到忽略不计的程度。

### 5.2.3 测量电路

为反映铁心移动的方向，在差动测量电路中常采用相敏整流器。

对于差动变压器最常应用的测量电路是差动整流电路，如图 5-16 所示。把两个二次电压分别整流后，以它们的差为输出(ab 端)，这样二次电压的相位和零点残余电压都不必考虑。

图 5-16 中 (a) 和 (b) 分别为全波电流输出型电路和半波电流输出型电路，用在连接低阻抗负载的场合，其线性基本上与负载大小无关；(c) 和 (d) 分别为全波电压输出型电路和半波电压输出型电路，用在连接高阻抗负载的场合。图中的可调电阻用于调整零点输出电压。

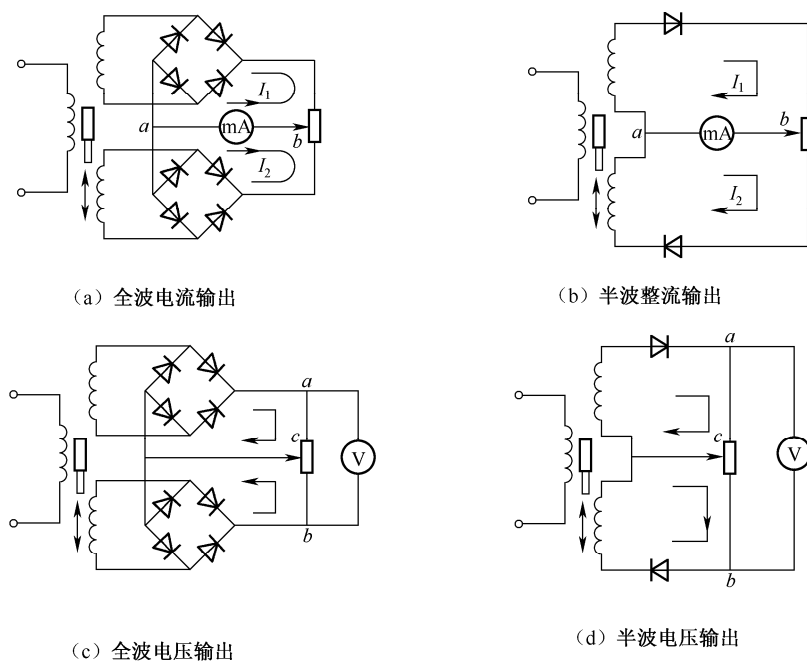


图 5-16 差动整流电路

图 5-16(a), (b) 中的输出电流为  $I_{ab} = I_1 - I_2$ , 图(c), (d) 中的输出电压为  $U_{ab} = U_{ac} - U_{bc}$ , 当衔铁位于零位时,  $I_1 = I_2$ ,  $U_{ac} = U_{bc}$ , 故  $I_{ab} = 0$ ,  $U_{ab} = 0$ ; 当衔铁位于零位以上时,  $I_1 > I_2$ ,  $U_{ac} > U_{bc}$ , 故  $I_{ab} > 0$ ,  $U_{ab} > 0$ ; 当衔铁位于零位以下时,  $I_1 < I_2$ ,  $U_{ac} < U_{bc}$ , 故  $I_{ab} < 0$ ,  $U_{ab} < 0$ 。

差动变压器有以下特点:

- (1) 结构简单, 工作可靠, 寿命长。
- (2) 稳定性、重复性和线性度都比较好。
- (3) 测量范围宽。
- (4) 灵敏度高。
- (5) 分辨力高。
- (6) 存在零位输出电压 (即零点残余电压), 给测量造成误差。

- (7) 对激励电源的频率和幅值稳定性要求较高。  
 (8) 不宜用于高频动态测量。

#### 5.2.4 电感式压力传感器

电感式压力传感器将位移传感器的可动部分与压力敏感型弹性元件的自由端连在一起，将压力转换为位移，再由位移传感器将位移转换为电量。

图 5-17 所示为三种电感式压力传感器的例子。

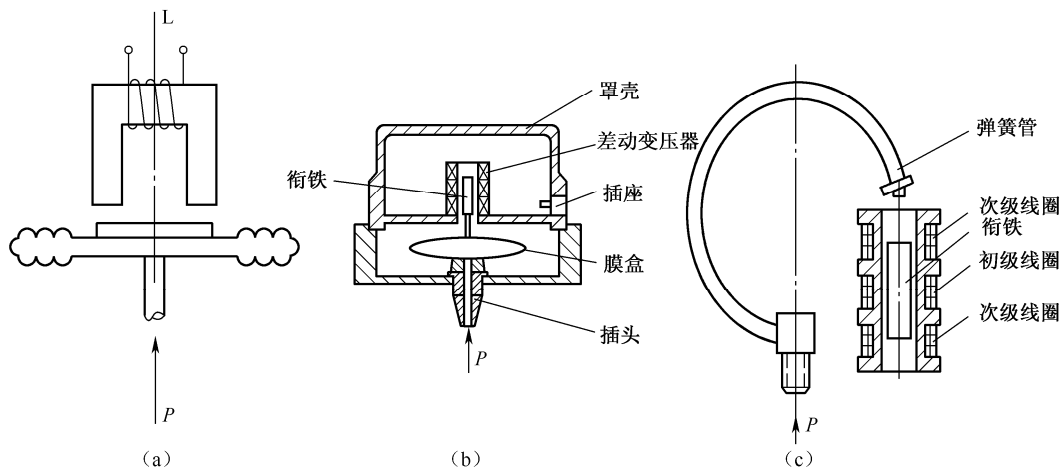


图 5-17 电感式压力传感器

图 5-17 (a) 为膜盒与变气隙型自感传感器构成的气体压力传感器，活动衔铁固定在膜盒的自由端，气体压力使膜盒变形，推动衔铁上移引起电感变化，这种传感器适用于测量精度要求不高的场合或报警系统中。

图 5-17 (b) 为差动变压器与膜盒构成的微压力传感器。无压力作用时，连于膜盒中心的衔铁位于差动变压器线圈的中部，输出电压为零。当被测压力输入膜盒后，推动衔铁移动，从而使差动变压器输出正比于被测压力的电压。

图 5-17 (c) 为 YDC 型压力计的原理。弹簧管 1 的自由端和差动变压器的活动衔铁 2 相连，当压力使弹簧管产生位移时，衔铁在变压器中运动，因而差动变压器的两个二次线圈的感应电动势发生变化。当它们差接时，就有一个与弹簧管自由端位移成正比的电压输出。测出这个电压输出，通过标定换算出压力。