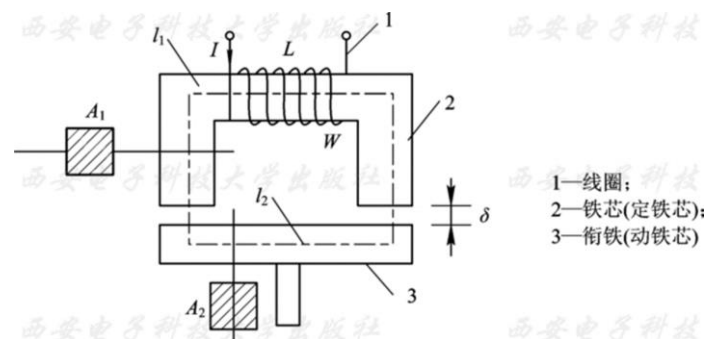


## 第4章 电感式传感器



测量原理：自感式电感传感器是利用线圈自感量的变化来实现测量的。

测量变化时，使衔铁产生位移，引起磁路中磁阻变化，导致电感线圈的电感量变化；

根据对电感的定义，线圈中的电感量可由下式确定：(4-1)

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{W\Phi}{I}$$

$\Psi$ ——线圈总磁链；

$I$ ——电流；

$W$ ——匝数；

$\Phi$ ——圈磁通量。

由磁路欧姆定律，得下式：(4-2)

$$\Phi = \frac{IW}{R_m}$$

$R_m$  为磁路总磁阻

对于**变隙式**传感器，默认气隙磁场均匀。

忽略损耗，考虑铁芯，衔铁磁阻，其磁路总磁阻为：(4-3)

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}$$

$\mu_1$ ——铁芯材料的导磁率；

$\mu_2$ ——衔铁材料的导磁率；

$l_1$ ——磁通通过铁芯的长度；

$l_2$ ——磁通通过衔铁的长度；

$A_1$ ——铁芯的截面积；

$A_2$ ——衔铁的截面积；

$\mu_0$ ——空气的导磁率；

$A_0$ ——气隙的截面积；

$\delta$ ——气隙的厚度。

忽略铁芯，衔铁磁阻，简化为 (4-5)

$$R_m = \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}$$

$\mu_0$ ——空气的导磁率；

$A_0$ ——气隙的截面积；

$\delta$ ——气隙的厚度。

联立式(4-1)、式(4-2)及式(4-5)，得： (4-6)

$$L = \frac{W^2}{R_m} = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta}$$

$W$ ——匝数；

$\mu_0$ ——空气的导磁率；

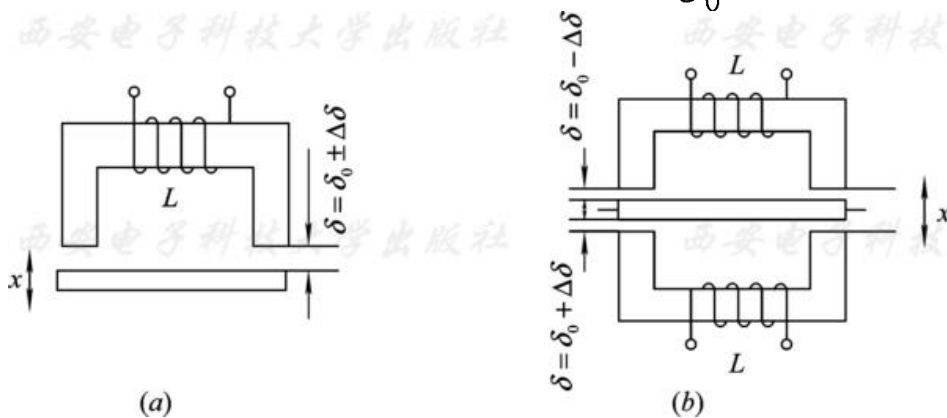
$A_0$ ——气隙的截面积；

$\delta$ ——气隙的厚度。

$A_0$ 不变，改变  $\delta$ ，则  $L$  是  $\delta$  的单值函数，构成**变气隙式**电感传感器；

$\delta$ 不变，改变  $A_0$ ，则  $L$  是  $A_0$  的单值函数，构成**变面积式**电感传感器。

1.变气隙式电感传感器：
$$L_0 = \frac{\mu_0 A_0 W^2}{2\delta_0}$$



对 (a) 中的衔铁上下移动：

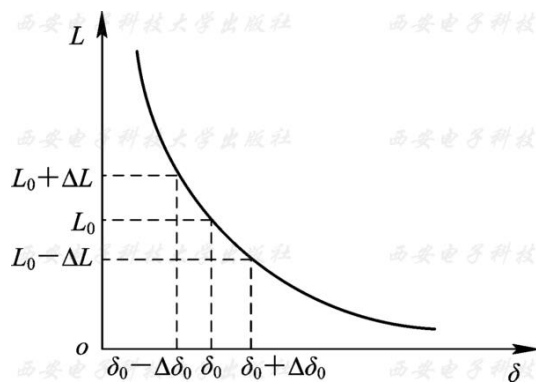
有：

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

灵敏度为：

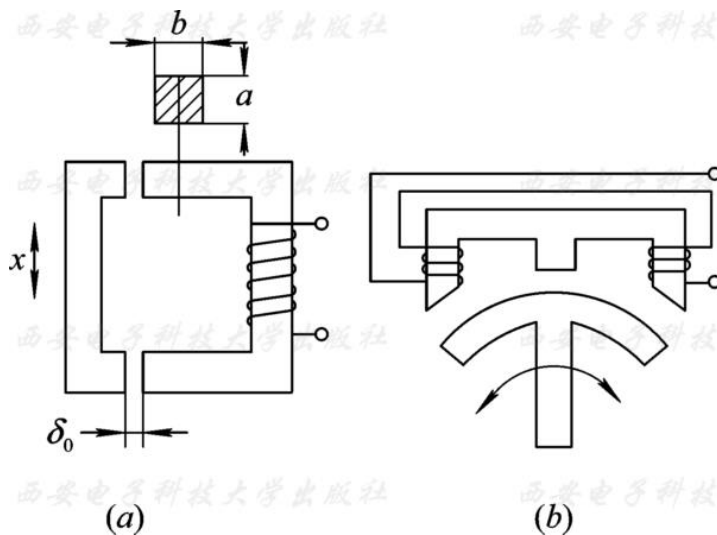
$$K_0 = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0}$$

(b) 差动式差动变气隙式电感传感器：



(非线性大大减小，灵敏度也提高了。)

2.变面积式电感传感器：



(a) 起始状态时，铁芯与衔铁在气隙处正对着，其截面积为  $A_0 = ab$

$$L = \frac{W^2 \mu_0 b}{2\delta} (a - x)$$

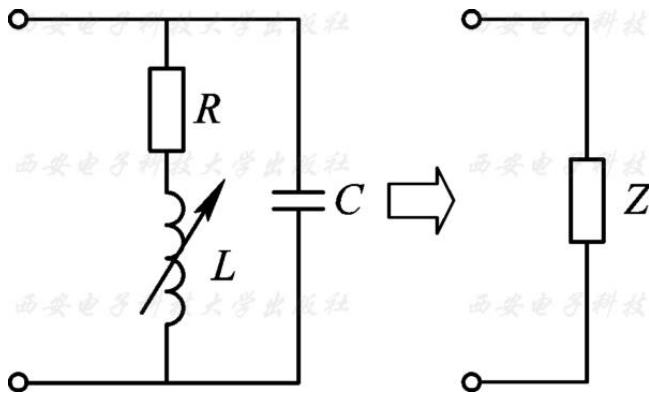
选择线圈匝数、铁芯尺寸，可有效提高灵敏度；

差动式结构 (b) 更优。

测量电路

## 1. 自感式电感传感器的等效电路

自感式电感传感器的等效电路如图：



$L$ ——为线圈的自感，  
 $R$ ——为折合有功电阻的总电阻，  
 $C$ ——为并联寄生电容

其等效线圈阻抗为：

有理化加近似，得到：

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \left( \frac{-j}{\omega C} \right)}{R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}}$$

$$Z = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2} + j\omega \frac{L}{(1 - \omega^2 LC)^2}$$

令

$$R' = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2}; \quad L' = \frac{L}{(1 - \omega^2 LC)^2}$$

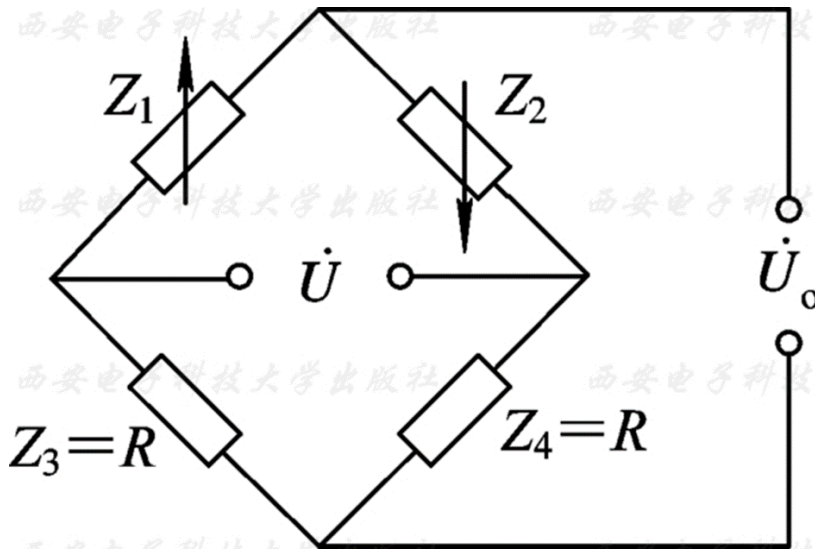
则  $Z = R' + j\omega L'$ 。

**并联电容**的存在，使有效串联损耗电阻及有效电感增加，而有效  $Q$  值减小，在有效阻抗不大的情况下，它会**使灵敏度有所提高**。

## 2. 交流电桥式测量电路

**交流电桥式测量电路**常和**差动式电感传感器**配合使用，

常用形式：交流电桥，变压器式交流电桥



$\Delta Z_1$ 、 $\Delta Z_2$  分别是衔铁偏离中心位置时两线圈阻抗的变化量，则

$$Z_1 = Z + \Delta Z, \quad Z_2 = Z - \Delta Z。$$

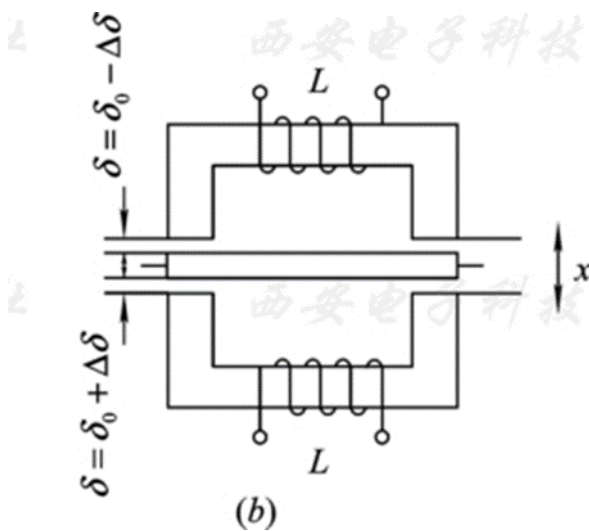
线圈电感远大于线圈的有功电阻，即  $\omega L \gg R$ ,

则 
$$\Delta Z_1 + \Delta Z_2 \approx j\omega(\Delta L_1 + \Delta L_2)$$

电桥输出电压为：

$$\dot{U}_o = \frac{Z_1 - Z_2}{2(Z_1 + Z_2)} \dot{U} = \frac{\Delta Z_1 + \Delta Z_2}{2(Z_1 + Z_2)} \dot{U} \propto (\Delta L_1 + \Delta L_2)$$

对差动变气隙式电感传感器



衔铁往上移动  $\Delta\delta$  时，两个线圈的电感变化；

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 2L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$

忽略高次项：

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

灵敏度  $K_0$  为

$$K_0 = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\Delta\delta} = \frac{2}{\delta_0}$$

结论：

①差动变气隙式电感传感器的灵敏度是单边式的两倍

②差动变气隙式电感传感器的非线性项：

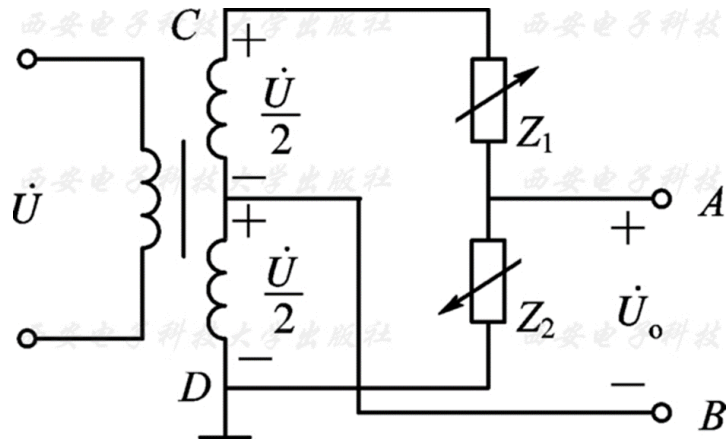
$$\left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3$$

单边式电感传感器的非线性项：。

$$\left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2$$

由于  $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ ，因此，差动式的线性度得到明显改善。

变压器式交流电桥



$$\dot{U}_o \propto 2L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

电桥输出电压与  $\Delta\delta$  成正比关系。

变压器式交流电桥测量电路，电桥两臂  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为传感器两线圈的阻抗，另外两桥臂分别为电源变压器的两次级线圈，其阻抗为次级线圈总阻抗的一半。当负载阻抗为无穷大时，桥路输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U} - \frac{1}{2} \dot{U} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{\dot{U}}{2}$$

测量时被测件与传感器衔铁相连，当传感器的衔铁处于中间位置，即  $Z_1 = Z_2 = Z$  时，有  $\dot{U}_o = 0$ ，电桥平衡。

$$\text{衔铁上移: } \dot{U}_o = -\frac{\Delta Z}{Z} \cdot \frac{\dot{U}}{2} = -\frac{\Delta L}{L} \frac{\dot{U}}{2}$$

$$\text{衔铁下移: } \dot{U}_o = -\frac{\Delta Z}{Z} \cdot \frac{\dot{U}}{2} = \frac{\Delta L}{L} \frac{\dot{U}}{2}$$

由上可知，两种交流电桥输出的空载电压相同，且当衔铁上、下移动相同距离时，**输出电压大小相等，相位相反。**

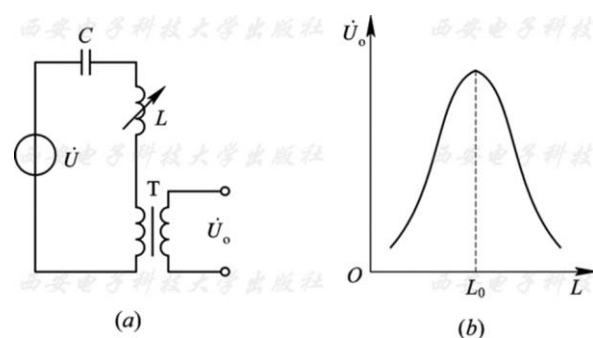
交流电压输出指示无法判断位移方向，须配合相敏检波电路来解决。

### 3. 谐振式测量电路

谐振式调幅电路：

输出电压的频率与电源频率相同，  
而幅值随着电感  $L$  而变化

(b) 中  $L_0$  为谐振点的电感值

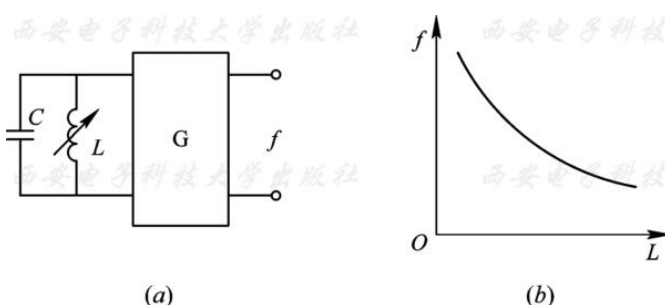


电路灵敏度高，线性差，适用于线性度要求不高的场合。

谐振式调频电路：

电感  $L$  和电容接入一个振荡回路中，

其振荡频率  $f = 1/(2\pi(\sqrt{LC}))$

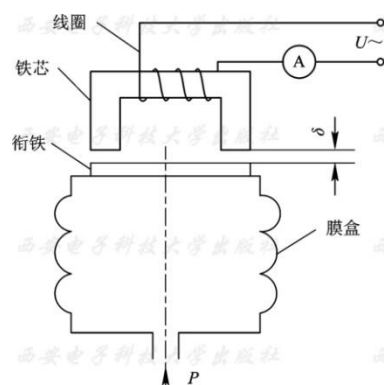


当  $L$  变化时，振荡频率随之变化，根据  $f$  的大小即可测出被测量的值。

(b)表示  $f$  与  $L$  的关系曲线，它具有显著的非线性关系。

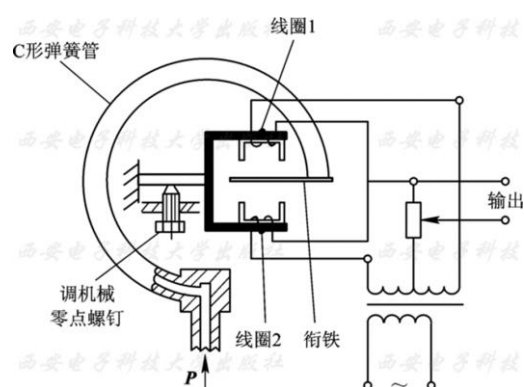
自感式电感传感器的应用：（压力传感器）

衔铁也发生移动，从而使气隙发生变化，流过线圈的电流也发生相应的变化，电流表  $A$  的指示值就反映了被测压力的大小。





压力进入 C 形弹簧管时，C 形弹簧管产生变形，其自由端发生位移，带动与自由端连接成一体的衔铁运动，使线圈 1 和线圈 2 中的电感发生大小相等、符号相反的变化。即一个电感量增大，一个电感量减小。电感的这种变化通过电桥电路转换成电压输出，所以只要用检测仪表测量出输出电压，即可得知被测压力的大小

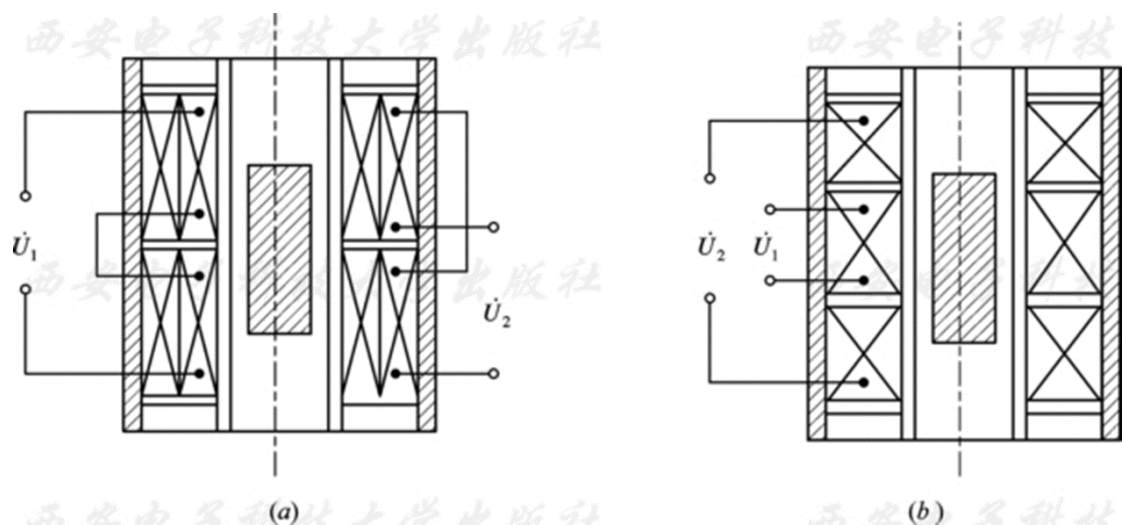


### 差动变压器式传感器

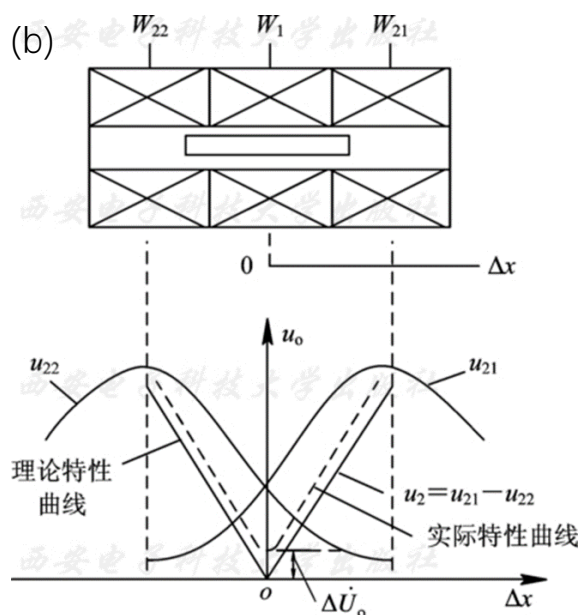
差动变压器本身是一个变压器，初级线圈输入交流电压，在次级线圈中产生感应电压，两个次级线圈接成差动的形式，就成为差动变压器。

差动变压器结构形式较多，但其工作原理基本一样。

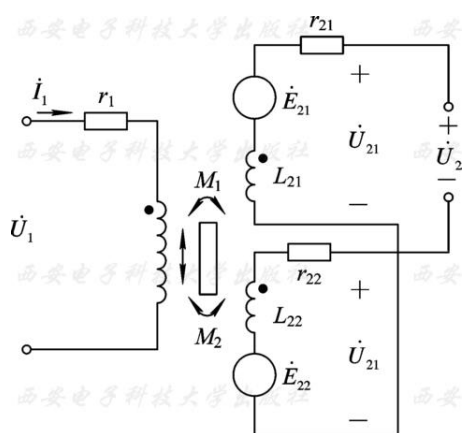
仅介绍螺线管式差动变压器。



(a) 两段式；(b) 三段式



由图,与自感式传感器相似, 差动变压器式传感器也存在零点残余电压, 使得传感器的特性曲线不通过原点, 实际特性曲线不同于理想特性。



差动变压器等效电路 ↑

当次级开路时有:

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1}$$

$U_1$ ——初级线圈激励电压;

$\omega$ ——激励电压  $U_1$  的角频率;

$I_1$ ——初级线圈激励电流;

$r_1$ 、 $L_1$ ——初级线圈直流电阻和电感。

$$\dot{E}_{21} = -j\omega M_1 \dot{I}_1$$

次级绕组感应电势

$$\dot{E}_{22} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$$

$M_1$ 、 $M_2$  为初级绕组与两次级绕组的互感。

由于次级两绕组反相串联，且考虑到次级开路，则由以上关系可得

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1} \quad (4-30)$$

输出电压的有效值为

$$U_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)U_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

上式说明，当激磁电压的幅值  $U_1$  和角频率  $\omega$ 、初级绕组的直流电阻  $r_1$  及电感  $L_1$  为定值时，差动变压器输出电压仅仅是初级绕组与两个次级绕组之间互感之差的函数。因此，只要求出互感  $M_1$  和  $M_2$  对活动衔铁位移  $x$  的关系式，再代入式(4-30)即可得到螺线管式差动变压器的基本特性表达式。对此，下面分三种情况进行分析：

### ①活动衔铁处于中间位置时

$$M_1 = M_2 = M$$

故  $U_2 = 0$

### ②活动衔铁向上移动时

$$M_1 = M + \Delta M, \quad M_2 = M - \Delta M$$

故  $U_2 = \frac{2\omega\Delta MU_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$  与  $U_{21}$  同极性

### ③活动衔铁向下移动时

$$M_1 = M - \Delta M, \quad M_2 = M + \Delta M$$

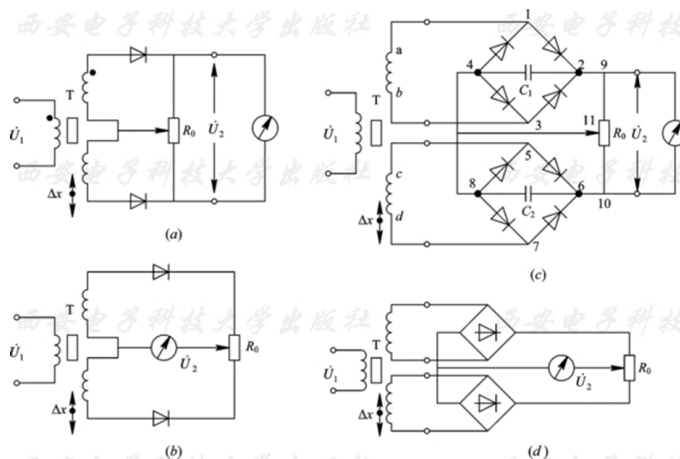
故  $U_2 = -\frac{2\omega\Delta MU_1}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}$  与  $U_{22}$  同极性

差动变压器式传感器的测量电路

为了达到能辨别移动方向和消除零点残余电压的目的，实际测量时，常常采用差动整流电路和相敏检波电路。

### 差动整流电路

这种电路是把差动变压器的两个次级输出电压分别整流，然后将整流的电压或电流的差值作为输出，图 4-17 给出了几种典型电路形式，其中图(a)、(c)适用于交流阻抗负载，图(b)、(d)适用于低阻抗负载，电阻  $R_0$  用于调整零点残余电压。



流经电容  $C_1$  的电流方向总从 2 到 4，流经电容  $C_2$  的电流方向总从 6 到 8，故整流电路的输出电压为：

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{24} - \dot{U}_{68}$$

衔铁在零位时  $U_2=0$ ;

衔铁在零位以上时  $U_2>0$ ;

衔铁在零位以下时  $U_2<0$ .

差动整流电路结构简单、不需要考虑相位调整零点残余电压的影响、分布电容影响小,便于远距离传输,获得了广泛应用。

差动变压器式传感器可以直接用于位移测量，也可以测量

与位移有关的一些机械量，如压力、力、加速度、振动、构件变形及液位等。

