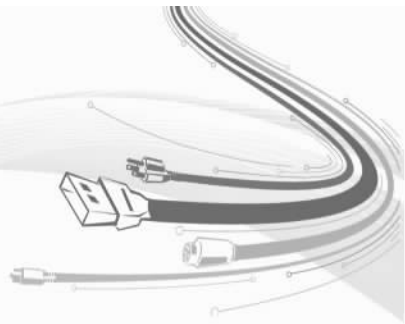


第 2 章

参量型传感器



参量型传感器的工作原理是将被测的物理量转化为电参量的一类传感器。其在感受外界被测量后，直接输出的不是电量，而是电参量，如电阻、电感、电容等。因此参量型传感器主要有电阻式传感器、电容式传感器和电感式传感器等。

由于这类传感器只能输出随被测量变化的参量信号，因此在使用时，必须将其接入电桥或谐振电路等线路中，以便将这些参量信号变成电信号。本章主要介绍几种常用的参量型传感器。

2.1 电阻应变式传感器

电阻传感器的基本原理是将各种被测非电量转换成电阻的变化量，然后通过对电阻变化量的测量，达到测量非电量的目的。本节主要介绍电阻应变式传感器的工作原理、测量电路及具体的应用。

2.1.1 电阻应变片的工作原理

电阻应变片是一种能够将被测试件上的应变量转换成电阻变化量的敏感元件，是电阻应变式传感器的重要组成部分。

在外力的作用下，导体或半导体材料会发生机械形变，其电阻值也要发生变化，这种现象称为应变效应。下面以金属电阻丝材料为例来分析应变效应。

金属丝的电阻值可以表示为：

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2} \quad (2.1)$$

式中， l ——电阻丝的长度；



S ——电阻丝的截面积；
 ρ ——电阻丝的电阻率；
 r ——电阻丝的半径。

当此电阻丝两端受到拉力或压力之后，其尺寸将要发生变化，从而导致阻值发生变化。对式（2.1）两边求导可以知道，电阻丝应变片的电阻相对变化量与材料力学中的轴向应变的关系在很大范围内是线性的，即：

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_x \quad (2.2)$$

式中， K 为应变片的灵敏度系数，对于不同的金属材料， K 是不同的，一般为 1.6 ~ 2.2 之间，它主要受两个因素的影响，即材料的几何尺寸与材料电阻率的变化； $\varepsilon_x = \Delta l / l$ 称为电阻丝的轴向应变，由材料力学可知， $\varepsilon_x = F / AE$ ，其中 F 应变片所受的力， A 为试件的横截面积， E 为材料的弹性模量。

2.1.2 电阻应变片的类型与结构

电阻应变片主要有金属电阻应变片和半导体应变片两大类。

1. 金属电阻应变片

金属电阻应变片常见的有金属丝式、金属箔式和金属薄膜式三种。

（1）金属丝式应变片。图 2-1 为电阻丝应变片结构示意图。从图中可以看出，金属丝式应变片主要由电阻丝、基底、覆盖层和引出线组成。

电阻丝也称敏感栅，是应变片的核心部分，为提高灵敏度，电阻丝排列成栅网状。

基底是将传感器弹性体表面的应变传递到电阻丝上的中间介质，并起到电阻丝和弹性体之间的绝缘作用。

覆盖层起着保护电阻丝的作用，电阻丝与基底、覆盖层是通过粘合剂粘在一起的。

引出线是用来与测量导线连接。

由于金属丝式应变片蠕变较大，应变片蠕变时金属丝容易脱胶，所以金属丝式应变片有逐渐被箔式应变片替代的趋势，但是它的价格便宜，所以目前多用于应变、应力的一次性试验。

（2）金属箔式应变片。金属箔式应变片的敏感栅是用金属箔制成的。箔式应变片具有表面积与截面积之比大、散热条件好、允许通过电流较大、灵敏度高的特点，同时还具有可以制成任意形状、易于加工、适合于大批量生产等优点。目前，广泛用于各种应变片传感器

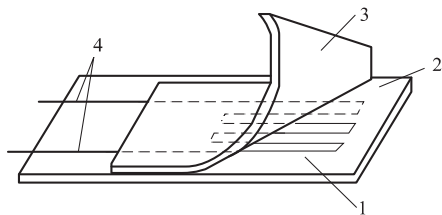


图 2-1 电阻丝应变片结构示意图

1—电阻丝；2—基底；3—覆盖层；4—引出线



的制造中。

(3) 金属薄膜式应变片。金属薄膜式应变片主要采用真空蒸镀技术, 在薄的绝缘基片上蒸镀上金属材料薄膜, 最后加上保护层而制成, 是近年来薄膜技术发展的产物。

2. 半导体应变片

半导体应变片是利用半导体材料作为敏感栅制成的。当在半导体晶体上施加作用力时, 其电阻率会发生变化。这种由外力引起半导体材料的电阻率变化的现象称为半导体的压阻效应。

半导体应变片是直接用单晶锗或单晶硅等半导体材料制成的, 主要优点是灵敏度高, 横向效应小。它的缺点是敏感系数受温度的影响较大, 电阻与应变片非线性严重。因此, 在使用中需采取温度补偿及非线性补偿措施。不过, 近年来相继出现了扩散型、外延型及薄膜型半导体应变片, 其缺陷得到了很大的改善。

3. 电阻应变片的粘贴

在使用电阻应变片时, 还要了解应变片粘贴的工艺流程。电阻应变片使用时需将它粘贴到各种弹性试件的不同部位, 粘贴质量的好坏直接影晌应变片的测量精度。应变片的粘贴工艺如下:

(1) 试件的表面处理。粘贴应变片之前应该将试件表面清理干净, 采用手持砂轮工具除去构件表面的油污、漆、锈斑等, 并用细纱布交叉打磨出细纹以增加粘贴力, 然后用浸有酒精或丙酮的纱布片或脱脂棉球擦洗。

(2) 粘贴。在应变片的表面和处理过的粘贴表面上, 各涂一层均匀的粘贴胶, 用镊子将应变片放上去, 并调好位置, 然后盖上塑料薄膜, 用手指揉和滚压, 排出下面的气泡。

(3) 固化处理。为了提高电阻应变片的稳定性, 一定要按照操作规程, 根据所用的粘合剂的固化工艺要求进行固化处理, 固化时要掌握好规定的压力、升温速率及保温时间。

(4) 粘贴质量检查。检查粘贴位置是否正确, 粘合层是否有气泡和漏贴, 并测量敏感栅是否有短路或断路现象。

(5) 引线的焊接及防护。将引线和端子用烙铁焊接起来, 注意不要把端子扯断, 再在应变片及其引线上涂保护层, 进行防潮、防水保护。

2.1.3 电阻应变式传感器的测量转换电路

应变片测量应变是通过敏感栅的电阻相对变化而得到的。通常金属电阻应变片灵敏度系数 k_0 很小, 机械应变一般在 $10 \times 10^{-6} \sim 3\,000 \times 10^{-6}$ 之间, 可见电阻相对变化是很小的。例如: 某传感器弹性元件在额定载荷下产生应变 $\varepsilon = 1\,000 \times 10^{-6}$, 应变片的电阻值为 $120\ \Omega$, 灵敏度系数 $k_0 = 2$, 求其电阻的变化量 ΔR 。

由式 (2.2) 可知:
$$\frac{\Delta R}{R} = k_0 \varepsilon = 2 \times 1\,000 \times 10^{-6} = 0.002$$



则 $\Delta R = R \times 0.002 = 0.002 \times 120 = 0.24 (\Omega)$

由此可见,电阻的变化率只有 0.2%。这样小的电阻变化用一般测量电阻的仪表很难直接测出来,必须用专门的电路来测量这种微弱的电阻变化。最常用的电路为电桥电路,如图 2-2 所示。常用的电桥电路有单臂电桥、双臂电桥和全桥三种。

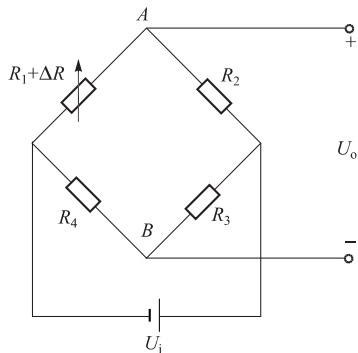


图 2-2 电桥结构

1. 单臂电桥

只有一个桥臂电阻是应变片,其余三个桥臂均为固定电阻。若 R_1 产生一个增量 ΔR_1 , 则:

$$U_o = U_A - U_B = \frac{R_1 + \Delta R_1}{\Delta R_1 + R_1 + R_2} U_i - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_i \quad (2.3)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时,电桥称为等臂电桥。若满足 $\Delta R = \Delta R_1$, 由式 (2.3) 可以得到:

$$U_o = \Delta R \frac{R}{4R^2} U_i = \frac{U_i}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2.4)$$

由式 (2.4) 可以看出,当桥臂应变片的电阻发生变化时,电桥的输出电压也随着变化。

2. 双臂电桥

为了减少和克服非线性误差,常采用差动电桥。在试件上安装两个应变片,如 R_1 受拉, R_2 受压,然后接入电桥相邻臂,组成双臂电桥。若满足初始条件: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R$, 由式 (2.3) 可以得到:

$$U_o = U_A - U_B = \frac{R_1 + \Delta R_1}{\Delta R_1 + R_1 + R_2 - \Delta R_2} U_i - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_i = \frac{U_i}{2} \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2.5)$$

这时,输出电压 U_o 与 $\Delta R/R$ 成线性关系,电桥灵敏度比单臂时提高一倍。由于采用差动对称结构,双臂电桥自身具有温度补偿功能。

3. 全桥

为了进一步提高电桥灵敏度,更好地进行温度补偿,可采用差动、对称的四臂电桥,即全桥。所谓差动、对称,也就是四个桥臂中 R_1 、 R_3 承受拉应变, R_2 、 R_4 承受压应变。

若满足初始条件: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$ 。由式 (2.3) 可以得到:

$$U_o = U_i \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2.6)$$

比较式子 (2.4), (2.5), (2.6) 可知,全桥的灵敏度最高,双臂电桥的灵敏度次之,单臂电桥的灵敏度最低。



2.1.4 应变式传感器的应用

电阻应变式传感器的应用十分广泛，除测量应变外，还可以测量力、压力、加速度、位移等。下面介绍电阻应变式传感器在实践中的具体应用。

1. 电阻应变式力传感器

电阻应变式力传感器是测量拉伸力、压缩力、弯曲和扭矩等负重的传感器。根据弹性敏感元件的不同形状，可制成柱形、环型和悬臂梁式力传感器。图 2-3 为柱式电阻应变式力传感器示意图。

在柱式电阻应变式力传感器中，弹性元件多为等截面轴，其特点是结构简单，加工方便，但灵敏度低，适用于载荷较大的场合，最大量程可达 10^7 N。等截面轴也常制成空心型，以提高轴的抗弯能力。

悬挂梁式力传感器中的弹性元件为等截面悬挂臂梁，其灵敏度高，但承载能力小，多用于较小力的测量，应变大小与应变片的粘贴位置有关，最大应变产生在梁的固定端。图 2-4 为悬挂梁式力传感器示意图。

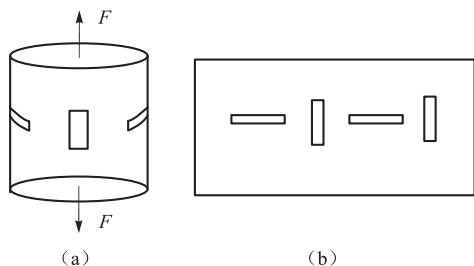


图 2-3 柱式电阻应变式力传感器结构示意图
(a) 承重等截面圆柱；(b) 侧面展开图

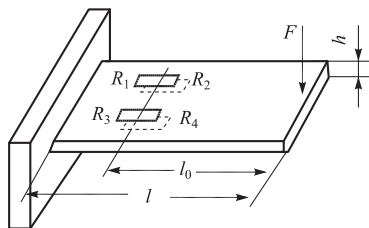


图 2-4 悬臂梁式力传感器示意图

2. 应变式加速度传感器

应变式加速度传感器实质上是一种力的检测装置，它通过质量块的惯性将加速度转换为力，然后再作用于弹性元件上，其结构原理如图 2-5 所示。测量时，将该装置固定在被测物体上，当被测物体以加速度 a 运动时，质量块受到一个与加速度方向相反的惯性力作用，即 $F = -ma$ ，使悬臂梁产生弯曲变形。根据梁上粘贴的应变片的变形便可测出力的大小，在已知 m 的情况下可以算出被测加速度的大小。

3. 压阻式压力传感器

固态压阻式传感器是利用在半导体材料的基片上，用集成电路的工艺制成扩散电阻，当该电阻受压时，力作用在硅晶体上并使电阻发生变化的原理做成的。由于其没有可动部分，所以也称它为固态压阻传感器。图 2-6 是固态压阻式压力传感器外形图。

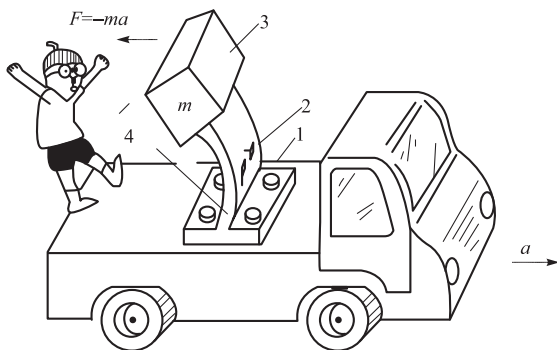


图 2-5 加速度传感器

1—基座；2—应变片；3—质量块；4—悬臂梁

由于固态压阻传感器采用集成电路工艺技术，它可以在一个硅片上做出四个等值的薄膜电阻，并组成电桥电路，如图 2-7 所示。当不受压力作用时，电桥处于平衡状态，无电压输出；当有压力作用时，电桥失去平衡，电桥有输出电压。电桥输出电压与压力成——对应关系。

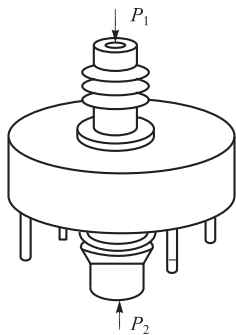


图 2-6 固态压阻传感器外形

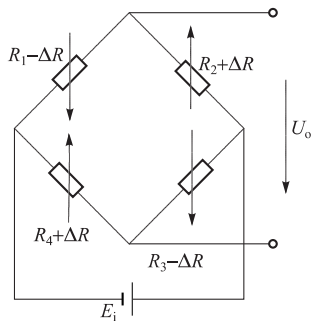


图 2-7 固态压阻传感器电桥电路

利用固态压阻式压力传感器还可以测量液位，如图 2-8 所示。将压阻式压力传感器安装在不锈钢壳体内，并由支架固定放置于液体底部，传感器的高压端进气孔与液体接触，传感器安装高度 h_0 处的液体压力为：

$$P_1 = \rho g h_1 \quad (2.7)$$

式中， ρ ——液体密度；
 g ——重力加速度。

传感器的低压端通过管道与大气相通，传感器的信号线也可以由管道一并引出，被测液位 H 可由下式得到：



$$H = h_0 + h_1 = h_0 + \frac{P_1}{\rho g} \tag{2.8}$$

压阻式压力传感器测量液位十分方便，它使用于几米至几十米液位的测量，且适用于混合大量污物杂质的水或其他液体液位的测量。

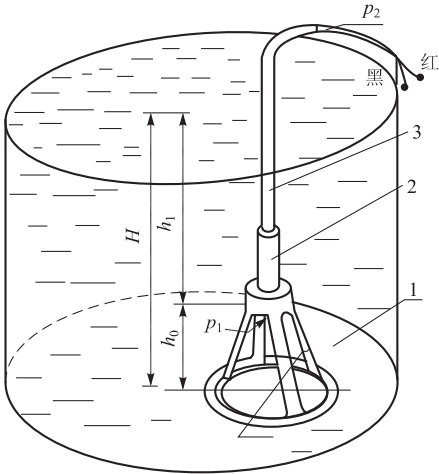


图 2-8 投入式液位传感器

1—支架；2—压阻式压力传感器；3—背压管

2.2 电感式传感器

电感式传感器种类很多，常见的有自感式、互感式和涡流式三种。本节主要介绍自感式传感器和互感式（差动变压器式）传感器，它们能对位移以及位移有关的工件尺寸、压力、振动等参数进行测量，在自动检测技术中得到广泛的应用。

2.2.1 自感式传感器

1. 自感式传感器工作原理

自感式传感器的线圈是绕在铁心上的，在铁心与衔铁之间有一个空气隙，空气隙厚度为 δ 。传感器的运动部分与衔铁相连，运动部分产生位移时空气隙厚度 δ 产生变化，从而使电感量发生变化。如图 2-9 所示为自感式传感器的原理图。

由电工学可知，线圈的电感值可由下式计算：

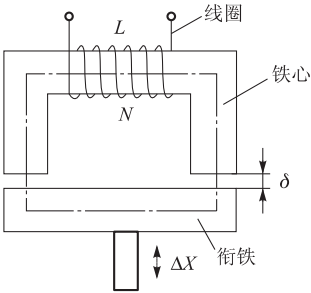


图 2-9 自感传感器的原理图



$$L = \frac{N^2}{R_m} \approx \frac{N^2 \mu_0 S}{2\delta} \quad (2.9)$$

式中, N ——线圈的匝数;

S ——空气隙的导磁横截面积 (m^2);

δ ——气隙长度 (m);

μ_0 ——真空气隙的磁导率 (H/m), 与空气的磁导率相近。

由式 (2.9) 可知, 当铁心材料和线圈匝数确定后, 电感 L 与气隙长度 δ 成反比, 与导磁路的有效横截面 S 成正比。因此, 可以将自感式传感器分成变间隙式和变截面式两类。

对于变间隙式电感传感器, 电感 L 与气隙厚度 δ 成反比, 输入输出是非线性关系。 δ 越小, 灵敏度越高。但为了保证一定的线性度, 变隙式电感传感器只能工作在一段很小的区域, 因此只能用于微小位移的测量。

而对于变截面式电感传感器, 理论上电感量 L 与气隙截面积 S 成正比, 输入输出呈线性关系。但是由于漏磁等原因的存在, 变截面式电感传感器在 $S=0$ 时, 仍有较大的电感, 所以其线性较小, 而且灵敏度较低。

2. 螺管式电感传感器

螺管式电感传感器主要由一只螺管和一根柱形衔铁组成。传感器工作时, 衔铁在线圈中伸入长度的变化将引起螺线管电感量的变化。这种传感器结构简单, 易于制作, 但灵敏度稍低, 且衔铁在螺线管中间部分工作时, 才有希望获得较好的线性关系。螺管式电感传感器适用于测量稍大一点的位移。

3. 差动螺管式传感器原理

上述三种类型的自感传感器, 虽然结构简单, 但存在着缺点, 在实际应用中常采用差动式自感传感器。差动式自感传感器是由两个相同自感式传感器及一个共用衔铁组成。当衔铁偏离中间位置时, 两个线圈的自感量一个增加, 一个减小, 形成差动形式。图 2-10 为螺管式差动传感器的结构, 图 2-11 为螺管式差动传感器的输出特性。

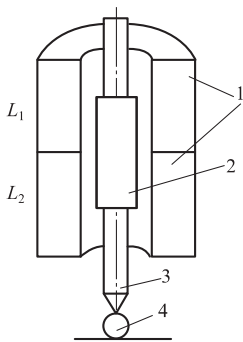


图 2-10 螺线管式差动传感器

1—测杆; 2—衔铁; 3—线圈; 4—工件

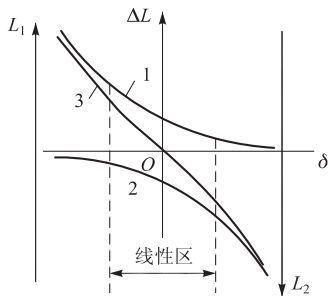


图 2-11 螺线管式差动传感器输出特性

1— L_1 的特性; 2— L_2 的特性; 3—差动特性



采用差动式结构可以改善线性，提高灵敏度，减小外界的影响。如温度的变化基本上可以抵消，衔铁受到的电磁吸力较小，减小了测量误差。

4. 自感式传感器测量转换电路

1) 变压器式电桥电路

如图 2-12 为变压器式电桥电路，差动式传感器中的两个线圈作为相邻桥臂，电源变压器的二次线圈经中心抽头后作为电桥的另两个桥臂。电桥的输出电压为：

$$\dot{U}_o = \pm \frac{1}{2} \dot{U}_i \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.10)$$

式 (2.10) 表明，通过变压器电桥电路的转换，实现了传感器线圈自感量与输出电压信号之间的转换。同时还说明，输出电压的相位与铁芯移动的方向有关。但当使用普通指示仪表测量时，其转换特征曲线如图 2-13 所示，无法判别输出相位和位移方向。

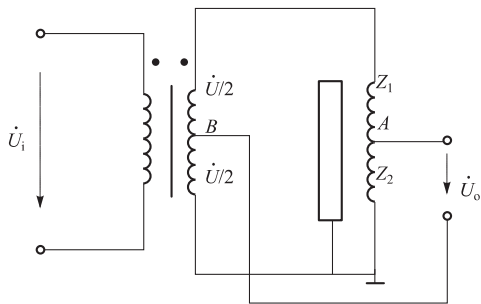


图 2-12 变压器电桥电路

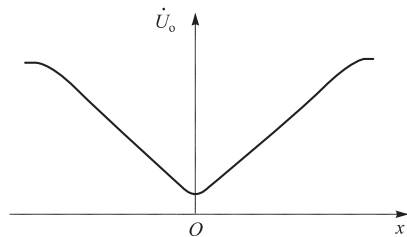


图 2-13 电桥电路转换特性曲线

2) 差动相敏检波电路

以二极管环形（全波）差动相敏检波电路为例说明其工作原理。如图 2-14 所示，4 个

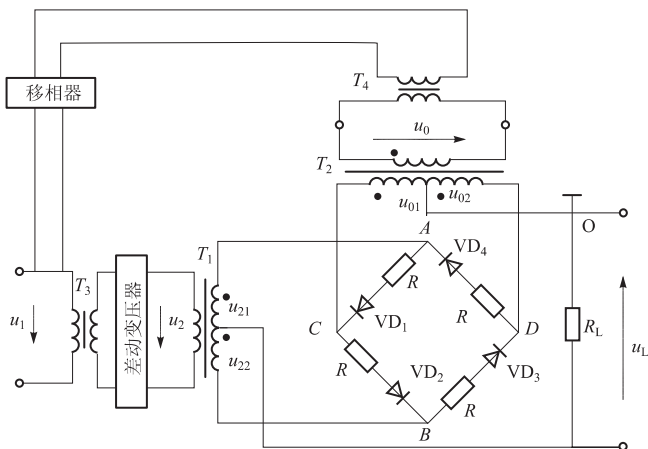


图 2-14 差动相敏检波电路



特性相同的二极管以同一方向串接成一个闭合回路，组成环形电桥。

图 2-15 给出了差动相敏检波电路的输入输出电压波形，图中 (a)、(b) 变化规律完全相同。因此 u_L 的幅值反映了被测位移量 Δx 的大小， u_L 的极性反映了被测位移量 Δx 的方向。

2.2.2 差动变压器式传感器

差动变压器式传感器是把被测位移量转换为一次绕组与二次绕组间的互感量的装置，由于两个二次绕组采用差动接法，固称差动变压器。它能实现被测非电量与线圈互感量之间的转换。

1. 差动变压器式传感器的结构与工作原理

如图 2-16 所示，螺线管型差动变压器的线圈由一次线圈和二次线圈组成，并且二次线圈是由两个结构、参数完全相同的线圈反极性串联而成，即采用差动接法。

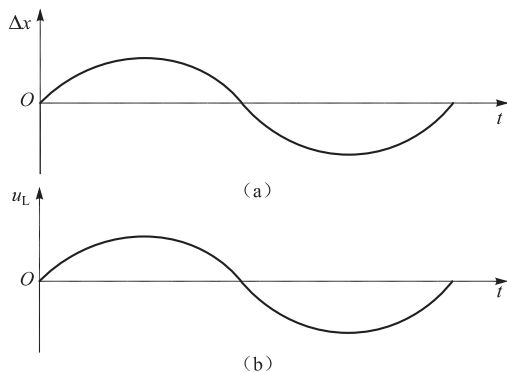


图 2-15 相敏检波电路波形图

(a) 位移与时间的关系曲线；(b) 输出电压与时间的关系曲线

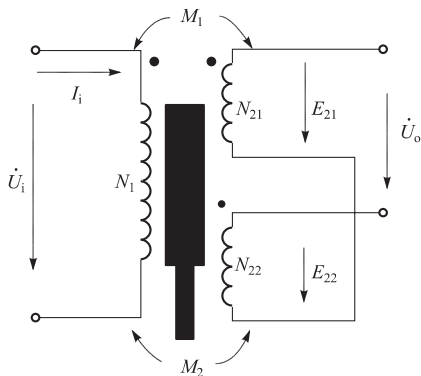


图 2-16 螺线管式差动变压器原理图

差动变压器的工作原理与普通变压器的工作原理相似，当一次线圈加上交流励磁电压后，由于互感的作用，二次线圈中会产生感应电动势。

显然，当铁芯处在中间初始位置时，则有： $M_1 = M_2 = M_0$ ， $\dot{U}_0 = 0$ 。

当铁芯上下移动位置时， $M_1 \neq M_2$ ，其输出电压为： $\dot{U}_0 = E_{21} - E_{22}$ ，则输出电压 $\dot{U}_0$ 反映了铁芯移动位移的大小与方向。

2. 差动变压器式传感器的整流电路

差动变压器输出的是交流量，大小与衔铁的位移成正比，其输出如用交流电压表来测量时，无法判别衔铁移动的方向。为了达到能辨别移动方向并消除零点残余电压的目的，常采用差动整流电路或相敏检波电路，其中以差动整流电路最为常用。如图 2-17 为全波差动整



流电路。

电压输出型全波差动整流电路有两组整流二极管，分别将二次线圈中的电压转换为直流电压 U_{o1} 、 U_{o2} ，而整流电路的输出电压 $U_o = U_{o1} - U_{o2}$ ，所以称为差动整流电路。

2.2.3 电感式传感器的应用

电感式传感器主要用于测量位移，凡是能转换成位移变化的参数，如力、加速度、振动等都可以用电感式传感器来进行测量。

1. 差动位移计

图2-18为差分变压器位移计内部结构图。测量物体时，测头1接触被测物，被测物尺寸的微小变化使铁心4在差动线圈中也产生位移，进而引起差动线圈电感量变化，此电感量的变化通过导线6与测量电路相连接输出为电压变化，因此，电压变化值反映了被测体尺寸的变化。

2. 圆度测量

图2-19为测量工件圆度的示意图。工件固定不动，电感测头围绕着工件缓慢旋转。通过杠杆，将工件不圆度引起的位移传递给电感测头中的铁芯，导致差动变压器中的铁芯产生位移，从而差动电感有相应的输出。再经计算机软件处理后，可以得到按一定比例放大的工件圆度。

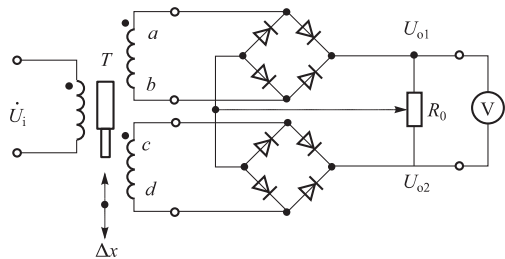


图 2-17 差动整流电路

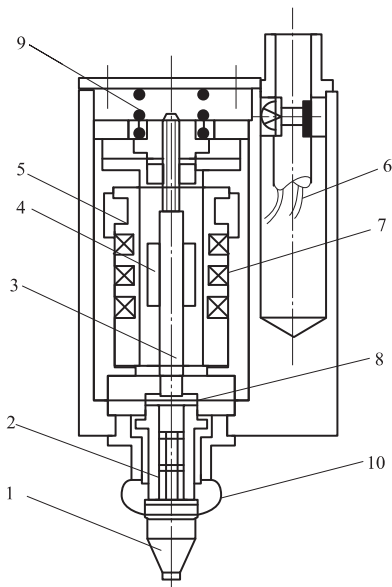


图 2-18 差分变压器位移计结构图

1—测头；2—轴套；3—测杆；4—铁心；5—线圈架；
6—导线；7—屏蔽筒；8—圆片弹簧；9—弹簧；10—防尘罩

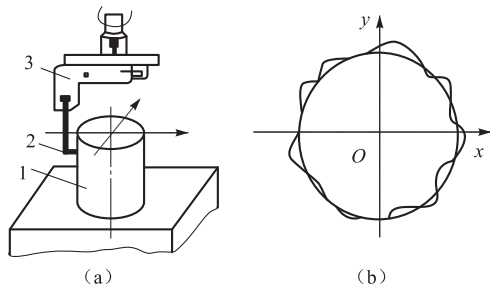


图 2-19 圆度的测量

(a) 测量装置；(b) 计算机处理结果
1—被测物；2—测端；3—电感测端



2.3 电容式传感器

电容式传感器是以不同类型的电容器作为传感元件,并通过电容传感元件把被测物理量的变化转换成电容量的变化,然后再经转换电路转换为电压、电流或频率等信号输出的测量装置。电容传感器的结构简单,分辨率高,工作可靠,非接触测量,并能在高温、辐射、强烈振动等恶劣条件下工作,易于获得被测量与电容量变化的线性关系。可用于压力、压差、振动、位移、加速度、液位、料位、成分含量等物理量的测量。

2.3.1 电容式传感器的工作原理及结构

平板式电容器是由两块金属板,中间夹一层电介质构成,如图2-20所示。

如果不考虑其边缘效应,其电容为:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (2.11)$$

式中, S ——两极板相对有效面积;

d ——两极板间的距离;

ε_0 ——真空介电常数 ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$);

ε ——极板间介质的介电常数;

ε_r ——介质的相对介电常数。

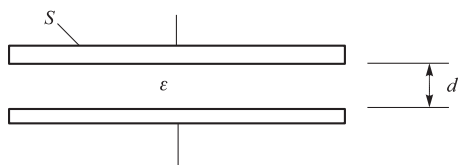


图2-20 平板式电容器

由式(2.11)可知,在 S 、 d 、 ε 三个参量中,改变其中任意一个量,均可使电容量 C 随之改变。也就是说,电容 C 是 S 、 d 、 ε 三个参量的函数,这就是电容传感器的基本工作原理。根据这个原理,固定三个参量中的任意两个,电容传感器可以分为变极距式、变面积式和变介电常数式三类。

1. 变极距式电容传感器

图2-21是变极距式电容传感器的结构原理图。图中,1为固定极板,2为可动极板,其位移是由被测量变化而引起。当可动极板向上移动 Δd ,图2-21的电容增量为:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon S}{d_0 - \Delta d} - \frac{\varepsilon S}{d_0} = \frac{\varepsilon S}{d_0} \times \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} = C_0 \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (2.12)$$

式中, C_0 为初始电容值, d_0 为初始极距。

初始极距 d_0 越小,同样的位移 Δd 所引起的电容变化量越大,即灵敏度高。所以实际使用时,总是使初始极距 d_0 尽量小些,以提高灵敏度。当 $\Delta d \ll d_0$,即量程远小于极板间初始距离时, ΔC 与 Δd 近似为线性关系。因此变极距式电容传感器具有行程小的缺点,一般用来测量微小变化的量,如 $0.01 \mu\text{m}$ 至零点几毫米的线位移等。

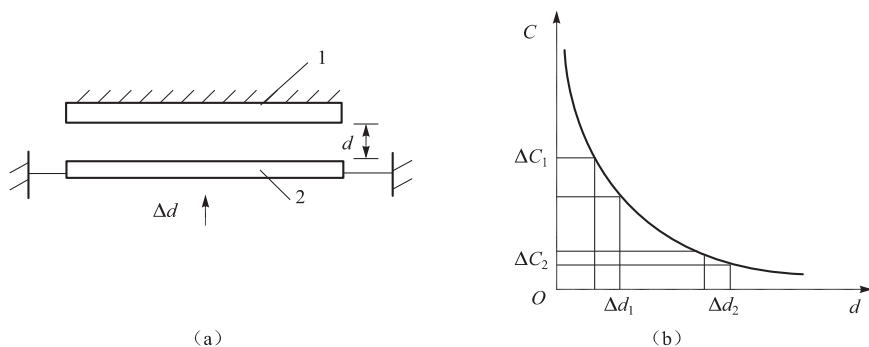


图 2-21 变极距式电容传感器

(a) 结构示意图; (b) 电容量与极距关系

1—定极板; 2—动极板

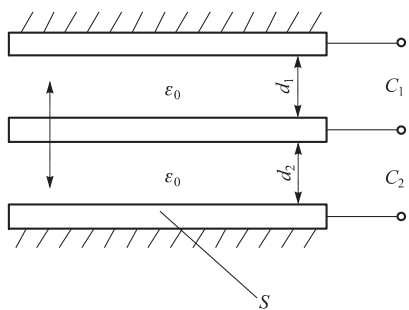


图 2-22 差动平板电容器结构

在实际应用中, 为了改善非线性、提高灵敏度、减少外界因素 (如电源电压、环境温度等) 的影响, 电容传感器也和电感传感器一样常做成差动结构, 如图 2-22 所示。

当可动极板向上移动 Δd 时, 电容器 C_1 的间隙 d_1 变为 $d_0 - \Delta d$, C_1 电容量增加; 电容器 C_2 的间隙 d_2 变为 $d_0 + \Delta d$, C_2 电容量减小。则有:

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \Delta d/d_0} = C_0 + \Delta C \quad (2.13)$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d/d_0} = C_0 - \Delta C \quad (2.14)$$

由于 C_1 和 C_2 形成差动变化, 经过信号测量转换电路后, 灵敏度提高近一倍, 线性也得到改善。

2. 变面积式电容传感器

图 2-23 是变面积式电容传感器结构示意图。如图所示, 将动极板左右偏离一个位移量 ΔX , 则电容传感器两极板间的相对有效面积将改变, 由 S 变为 S' , 电容量 C 也随之发生变化, 其变化量为:

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{d} - \frac{\epsilon S'}{d} = \frac{\epsilon(S - S')}{d} = \frac{\epsilon \Delta S}{d} \quad (2.15)$$

由式 (2.15) 可见, 电容的变化量与面积的变化量成线性关系, 为线性传感器。

变面积式传感器有平板形直线位移式、圆筒形直线位移式、半圆形角位移式等不同结构



形式,多用于检测直线位移、角位移、尺寸等参数的变化。

3. 变介电常数式电容传感器

由于各种介质的相对介电常数不同,所以在电容传感器两极板间插入不同介质时,电容传感器的电容量会发生变化,根据这种工作原理制作的电容传感器称为变介电常数式电容传感器。图2-24是一种常用的变介电常数式电容传感器结构示意图。

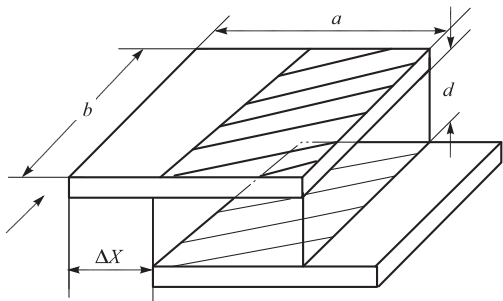


图 2-23 变面积式电容传感器

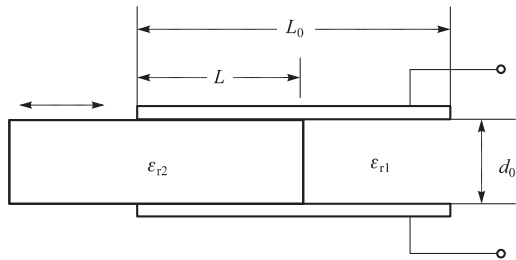


图 2-24 变介质型电容式传感器结构示意图

图中两平行电极固定不动,极距为 d_0 ,相对介电常数为 ε_{r2} 的电介质插入电容器中,从而改变两种介质的极板覆盖面积和电容器式传感器的容量,则插入介质后的电容传感器的总电容量 C 为:

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 b_0 \frac{\varepsilon_{r1}(L_0 - L) + \varepsilon_{r2}L}{d_0} \quad (2.16)$$

式中, L_0 ——极板的长度;

b_0 ——极板的宽度;

L ——第二种介质进入极板间的长度。

若电介质 $\varepsilon_{r1} = 1$,当 $L = 0$ 时,传感器初始电容 $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} L_0 b_0 / d_0$ 。当被测介质 ε_{r2} 进入极板间 L 深度后,引起电容量的相对变化量为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\varepsilon_{r2} - 1)L}{L_0} \quad (2.17)$$

可见,电容传感器的电容量变化量与电介质 ε_{r2} 的移动量 L 成线性关系。

变介电常数式电容传感器有多种结构形式,常用来检测片状材料的厚度、性质、颗粒状物体的含水量以及测量液体的液位等。

2.3.2 电容式传感器的测量电路

电容式传感器可以将被测的非电量转换为电容的变化量。但由于电容值非常小,不能直接用现有的显示仪表来显示、记录,更难以传输,因此还需要用测量电路把电容量的变化转



换成与其成正比的电压、电流或频率等电信号，以便进行显示、记录或传输。

电容式传感器的测量电路很多，常用的有桥式电路、调频振荡电路、运算放大器式电路和脉冲宽度调制电路等。

1. 桥式电路

图 2-25 所示为桥式测量转换电路。其中图 2-25 (a) 为单臂电桥测量电路，图中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_X 为电桥四个桥臂， C_X 为电容式传感器输出的电容值，高频电源 $\dot{U}_i$ 经变压器接到电桥的对角线上， $\dot{U}_o$ 为输出电压。

当电桥平衡时， $\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_X}{C_4}$ ， $\dot{U}_o = 0$ 。

当输入 C_X 改变时， $\frac{C_1}{C_2} \neq \frac{C_X}{C_4}$ ，电桥失去平衡，电桥有输出电压， $\dot{U}_o \neq 0$ 。

图 2-25 (b) 为差动接法的电桥测量电路，高频电源 $\dot{U}_i$ 接到变压器的一次侧，从二次侧中间引出抽头，二次侧作为电桥的两个臂，其余两臂为 C_{x1} 、 C_{x2} ，采用差动接法，输出电压 $\dot{U}_o = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ 。

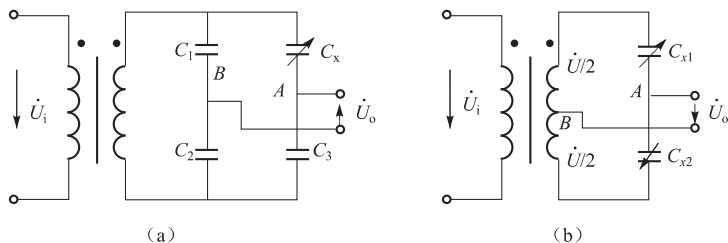


图 2-25 电容传感器的桥式测量电路

(a) 单臂接法；(b) 差动接法

2. 调频电路

调频电路是将电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分。当被测量导致电容器式传感器的电容量发生变化时，振荡器的振荡频率就会随之发生变化。调频振荡器的振荡频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2.18)$$

式中， L ——振荡回路的电感；

C ——振荡回路的总电容。

C 包括传感器的电容 C_X 、振荡回路固有电容 C_1 和传感器引线分布电容 C_2 ，即 $C = C_1 + C_2 + C_X$ 。其中 $C_X = C_0 + \Delta C$ ， C_0 为传感器的初始电容， ΔC 为传感器的电容的变化量。

虽然可将频率作为测量系统的输出量，用以判断被测非电量的大小，但此时系统是非线



性的, 不易校正, 因此必须加入鉴频器, 将频率的变化转换为电压振幅的变化, 经过放大可以用仪器进行显示或记录。如图 2-26 所示为调频式测量电路原理框图。



图 2-26 调频式测量电路原理框图

当被测信号为零时, $\Delta C = 0$, 则 $C = C_1 + C_2 + C_0$, 所以振荡器有一个固有频率 f_0 , 其表示式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(C_1 + C_2 + C_0)L}} \quad (2.19)$$

当被测信号不为零时, $\Delta C \neq 0$, 振荡器频率有相应变化, 此时频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(C_1 + C_2 + C_0 \mp \Delta C)L}} = f_0 \pm \Delta f \quad (2.20)$$

调频电容传感器测量电路具有较高的灵敏度, 信号的输出频率易于用数字仪器测量, 并且可以与微机相连, 抗干扰能力强, 可以发送和接收, 便于遥测、遥控。

3. 运算放大器式电路

运算放大器的放大倍数大, 输入阻抗高, 利用运算放大器的这一特点可以将它作为电容式传感器的测量电路。如图 2-27 所示为运算放大器式测量电路原理图。

图中, C_X 为电容式传感器电容, C 为输入固定电容, $\dot{U}_i$ 是交流激励电源电压, $\dot{U}_o$ 是输出信号电压, Σ 是虚地点。由运算放大器工作原理可得:

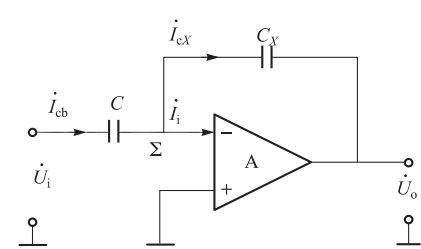


图 2-27 运算放大器式测量电路原理图

$$\dot{U}_o = -\frac{C}{C_X} \dot{U}_i \quad (2.21)$$

公式中“-”号表示输出电压 $\dot{U}_o$ 的相位与电源电压反相。如果传感器是一只平板电容, 则 $C_X = \epsilon S/d$, 代入式 (2.21) 可得:

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C}{\epsilon S} d \quad (2.22)$$

公式 (2.22) 说明运算放大器的输出电压与极板间距离 d 成线性关系。运算放大器式电路虽然解决了单个变极距式电容传感器的非线性问题, 但要求运算放大器的输入阻抗及放大倍数要足够大。同时, 为保证测量精度, 还要求激励电源电压的幅值和固定输入电容值稳定。



2.3.3 电容式传感器的应用

电容传感器的用途有许多,可以利用极距变化的原理测量振动、压力,利用相对面积变化的原理精确地测量角位移和直线位移,利用介电常数变化的原理测量空气相对湿度、液位、物位等。

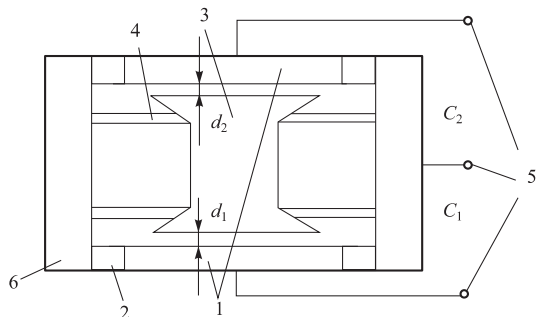


图 2-28 差动式电容加速度传感器结构示意图

1—固定电极；2—绝缘垫；3—质量块；

4—弹簧；5—输出端；6—壳体

1. 电容器式加速度传感器

如图 2-28 为差动式电容加速度传感器结构示意图。它有两个固定极板,中间是一个由弹簧支撑可以上下微动的质量块,它的两个端面经过磨平抛光后作为可动极板。当传感器壳体随被测对象沿垂直方向作直线加速运动时,质量块在惯性空间中相对静止,两个固定电极将相对于质量块在垂直方向产生大小正比于被测加速度的位移。此位移使两电容的间隙发生变化,一个增加,一个减小,从而使 C_1 、 C_2 产生大小相等、符号相反的增量,此增量正比于被测加速度。该传

感器可做得很小,并与测量电路一起封装在一个厚膜集成电路的壳体中。

电容器式加速度传感器的主要特点是频率响应快和量程范围大,大多采用空气或其他气体作阻尼物质。将这种电容器式加速度传感器安装在炸弹上,可以控制炸弹爆炸的时间;安装在轿车上,可以作为碰撞传感器来用,当正常刹车和小事故碰擦时,传感器输出信号较小。当其测得的负加速度值超过设定值时,CPU 据此判断轿车发生碰撞,于是就启动轿车前部的折叠式安全气囊迅速充气而膨胀,托住驾驶员及前排乘员的胸部和头部,起到安全保护的作用。

2. 电容式压力传感器

如图 2-29 所示为差动电容器式压力传感器的结构示意图。图中所示,膜片为动电极,两个在凹形玻璃上的金属镀层为固定电极,构成差动电容器。

当被测压力或压差作用于膜片并产生位移时,所形成的两个电容器的电容量,一个增大,一个减小。该电容值的变化经测量电路转换成相对应的电流或电压的变化。

3. 电容器式油量表

如图 2-30 所示为用于测量液位高低的电容器式传感器结构原理图。设被测介质的介电常数为 ε_1 ,液面高度为 h ,变换器总高度为 H ,内筒外径为 d ,外筒内径为 D ,此时变换器电容值为:

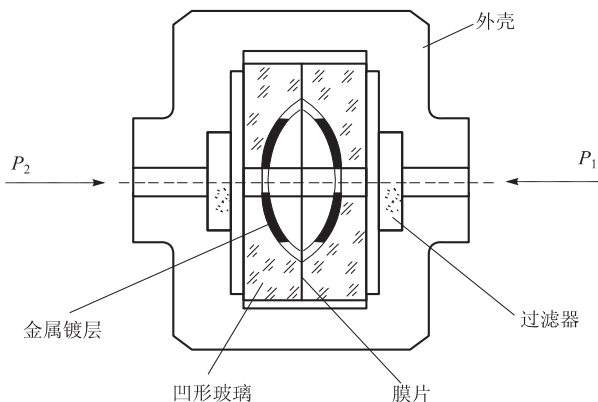


图 2-29 差动式电容压力传感器结构示意图

$$C = \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon(H-h)}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} \quad (2.23)$$

式中， ϵ ——空气介电常数；

C_0 ——由变换器的基本尺寸决定的初始电容值，大小为 $C_0 = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}}$ 。

由式(2.23)可见，此变换器的电容增量正比于被测液位高度 h 。所以，可以通过测量电容的变化量来测量液位。

如图 2-31 所示为电容器式油量表结构示意图。是电容式传感器在测量油箱液位中的具体应用。

当油箱中无油时，电容传感器的电容量为 C_{X0} ，调节匹配电容使 $C_0 = C_{X0}$ ，并使电位器 R_p 的滑动臂位于零点，即 R_p 的电阻值为零。此时，电桥满足 $\frac{C_X}{C_0} = \frac{R_4}{R_3}$ 的平衡条件，电桥输出为零。伺服电动机不转动，油量表指针偏转角 $\theta = 0$ 。

当油箱中注满油时，液位上升至 h 处， $C_X = C_{X0} + \Delta C_X$ ，而 ΔC_X 与 h 成正比，此时，电桥失去平衡，电桥的输出电压 U_o 放大后驱动伺服电动机，经减速后带动指针偏转，同时带动 R_p 的滑动臂移动，从而使 R_p 阻值增大。

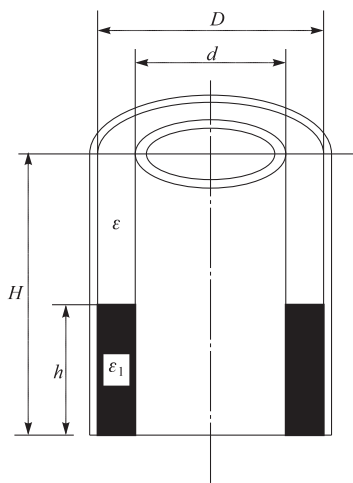


图 2-30 电容式液位变换器结构原理图

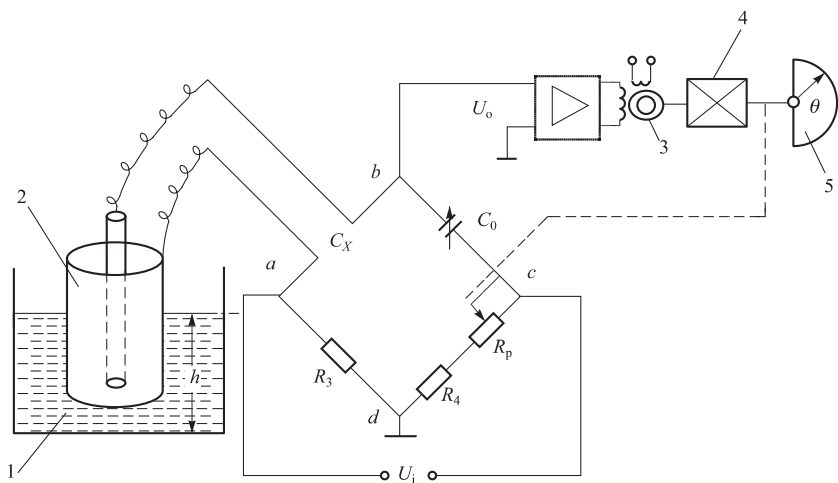


图 2-31 电容器式油量表结构示意图

1—油箱；2—圆柱形电容器；3—伺服电动机；4—减速箱；5—油量表

当 R_p 阻值大到一定值时，电桥又达到新的平衡状态， $U_o = 0$ ，于是，伺服电动机停转，指针停留在转角 θ 处。

由于指针和 R_p 的滑动臂均被伺服电动机所带动，因此， R_p 的阻值与 θ 之间存在着确定的对应关系，即 θ 正比于 R_p 的阻值，而 R_p 的阻值又正比于液位的高度 h 。因此，可直接从刻度盘上读得液位高度 h 。该装置采用了零位式测量方法，因此，放大器的非线性误差及温度的变化对测量精度影响不大。

习题与思考题

1. 单项选择题

(1) 电子秤中所使用的应变片应选择_____应变片；为了提高集成度，测量气体压力应选择_____；一次性、几百个应力试验测点应选择_____应变片。

A. 金属丝式应变传感器

B. 金属箔式应变传感器

C. 固态压阻式传感器

(2) 为了使螺线管式差动变压器式传感器具有较好的线性度，通常是_____。

A. 取测量范围为线圈骨架的 $1/10 \sim 1/4$

B. 取测量范围为线圈骨架的 $1/2 \sim 2/3$

C. 激励电流频率采用中频

D. 激励电流频率采用高频

(3) 欲测量极微小的位移，应选择_____电感传感器。希望线性好、灵敏度高、量



程为 1 mm 左右,分辨率为 1 μm 左右,应选择_____电感传感器。

- A. 变面积式 B. 变间隙式 C. 螺线管式

(4) 当变间隙式电容传感器两极板间的初始距离 d 增加时,将引起传感器的()。

- A. 灵敏度增加 B. 灵敏度减小 C. 非线性误差增加 D. 非线性误差减小

(5) 用电容式传感器测量液体物位时,应该选用()。

- A. 变间隙式 B. 变介电常数式 C. 变面积式

2. 什么叫应变效应? 利用应变效应解释金属电阻应变片工作原理。

3. 何谓零点残余电压? 说明该电压的产生原因及消除方法。

4. 为什么说变极距型电容传感器是非线性的? 采取什么措施可以改善其非线性特性?

5. 电容式传感器主要有哪几种类型的测量电路? 各有何特点?

6. 一应变片的电阻 $R=120\ \Omega$, $K=2.05$, 用作应变为 $800\ \mu\text{m}/\text{m}$ 的传感元件。

(1) 求 ΔR 和 $\Delta R/R$;

(2) 若电源电压 $U=2\ \text{V}$, 求初始平衡时电桥的输出电压(设为单臂电桥)。

7. 采用阻值 $R=120\ \Omega$, 灵敏度系数 $K=0.2$ 的金属电阻应变片与阻值 $R=120\ \Omega$ 的固定电阻组成电桥, 供电电压为 $10\ \text{V}$ 。当应变片应变为 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 时, 若要使输出电压大于 $10\ \text{mV}$, 则可采用何种桥接方式(设输出阻抗无穷大)?

8. 如图 2-32 所示为差动电感式传感器的桥式测量电路, L_1 、 L_2 为传感器的两个差动电感线圈的电感, 其初始值均为 L_0 。 R_1 、 R_2 为标准电阻, u 为电源电压。试写出输出电压 u_o 与传感器电感变化量 ΔL 间的关系。

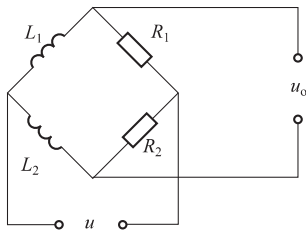


图 2-32

9. 一个用于位移测量的电容式传感器, 两个极板是边长为 6 cm 的正方形, 间距为 1 mm, 气隙中恰好放置一个边长 6 cm、厚度 1 mm、相对介电常数为 4 的正方形介质板, 该介质板可以在气隙中自由滑动。试计算当输入位移(即介质板向某一方向移出极板相互覆盖部分的距离)分别为 0 cm、3 cm、6 cm 时, 该传感器的输出电压值各为多少?

10. 试用双螺管线圈差动型电感传感器做成一个测力传感器, 并完成以下问题:

(1) 用简图说明该传感器的结构并简要说明其作用原理;

(2) 两个线圈通常应该接在什么电路中? 用图说明如何接法。