

一、电容式传感器的原理及结构形式

(一) 基本原理

由电工技术知识可知，两平行金属板间的电容量可用下式表示：

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (2-25)$$

式中 ϵ ——极板间介质的介电常数，F/m；

S ——极板间相对有效面积， m^2 ；

d ——两极板间的距离，m。

由式(2-25)可知，平板电容器的电容量 C 是 ϵ 、 S 、 d 的函数。如果将其中一个极板固定，另一个极板与被测运动物体相连，当被测运动物体上下移动（即 d 变化）或左右移动（即 S 变化）时，将引起电容量 C 的变化，通过测量电路将这种电容变化转化为电压、电流、频率等电信号输出，根据输出信号大小，即可测定运动物体位移的大小。

如果两极板固定不动，极板间的介质参数发生变化，使介电常数产生变化，从而引起电容量变化，根据这一点，可用来测定介质的各种状态参数，如介质在极板中的位置，介质的温度、密度等。

综上所述，只要被测物理量的变化，能使电容器中任意参数产生相应的改变而引起电容量变化时，再通过测量电路，将其转化为电信号输出，人们就可根据这种输出信号的大小，来测定被测物理量。

(二) 结构形式

电容式传感器根据其工作原理不同，可分为变间隙式、变面积式、变介电常数式三种。

若按极板形状不同, 则有平板形和圆柱形两种。

变间隙式一般用来测量微小的位移 (小至 $10^{-8} \sim 10^2 \text{m}$); 变面积式则一般用来测角位移 (几度至几十度) 或较大的线位移; 变介电常数式常用于固体或液体的物位测量, 也用于测定各种介质的温度、密度等状态参数。

二、电容式传感器的主要特性

(1) 变间隙式 变间隙式电容式传感器的输出特性是非线性的。其非线性将随着相对位移增加而增加。因此, 为了保证一定的线性度, 应限制极板的相对位移量, 若增大起始间隙, 又将影响传感器的灵敏度。为了提高灵敏度和改善非线性, 可以采用差动式结构。

(2) 变面积式 变面积式电容式传感器的输出特性是线性的, 灵敏度 S 为常数。

(3) 变介电常数式 变介电常数式传感器的输出特性也是线性的。

三、电容式传感器的测量电路

电容传感器的电容值一般十分微小, 从几皮法至几十皮法, 这样微小的电容不便直接显示、记录, 更不便于传输。为此, 必须借助于测量电路检测出这一微小的电容变量, 并转换为与其成正比的电压、电流或频率信号。

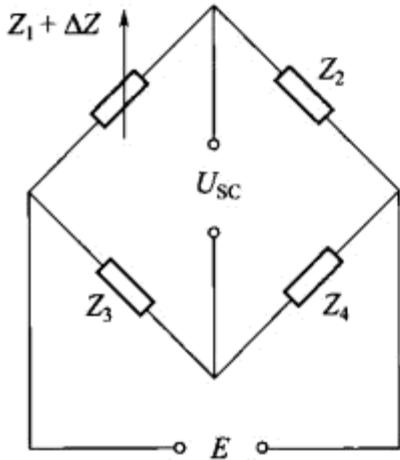


图 2-15 交流不平衡电桥原理图

(一) 交流不平衡电桥

交流不平衡电桥是电容传感器最基本的一种测量电路, 如图 2-15 所示。其中一个臂 Z_1 为电容传感器阻抗, 另三个臂 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 为固定阻抗, E 为电源电压, U_{sc} 为电桥输出电压。

在输出端开路的情况下, 设电桥初始平衡条件为 $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$, 则 $U_{sc} = 0$ 。当被测参数变化时引起传感器阻抗变化为 ΔZ , 于是电桥失去平衡, 其输出电压为

$$U_{sc} = \left(\frac{Z_1 + \Delta Z}{Z_1 + \Delta Z + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) E \quad (2-26)$$

将电桥平衡条件 $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ 代入式(2-26), 忽略分母中的 $\frac{\Delta Z}{Z_1}$ 项, 经整理后得

$$U_{sc} = \frac{\frac{\Delta Z}{Z_1} \times \frac{Z_1}{Z_2}}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \left(1 + \frac{Z_3}{Z_4}\right)} E = \frac{\frac{\Delta Z}{Z_1} \times \frac{Z_1}{Z_2}}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2} E$$

令 $\beta = \frac{\Delta Z}{Z_1}$ 为传感器阻抗相对变化值; $A = \frac{Z_1}{Z_2}$ 为桥臂比; $K = \frac{Z_1/Z_2}{(1 + Z_1/Z_2)^2} = \frac{A}{(1 + A)^2}$ 为

桥臂系数。则上式可写为

$$U_{sc} = \frac{\beta A}{(1 + A)^2} E = \beta K E \quad (2-27)$$

为使电桥电压灵敏度最高, 应满足两桥臂初始阻抗的模相等, 即 $|Z_1| = |Z_2|$, 并使两桥臂阻抗幅角差 θ 尽量增大。

(二) 差动脉冲宽度调制电路

如图 2-16 所示, 差动脉冲宽度调制电路由比较器 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 为传感器的差动电容, 双稳态触发器的两个输出端 A 、 B 用作整个电路输出。

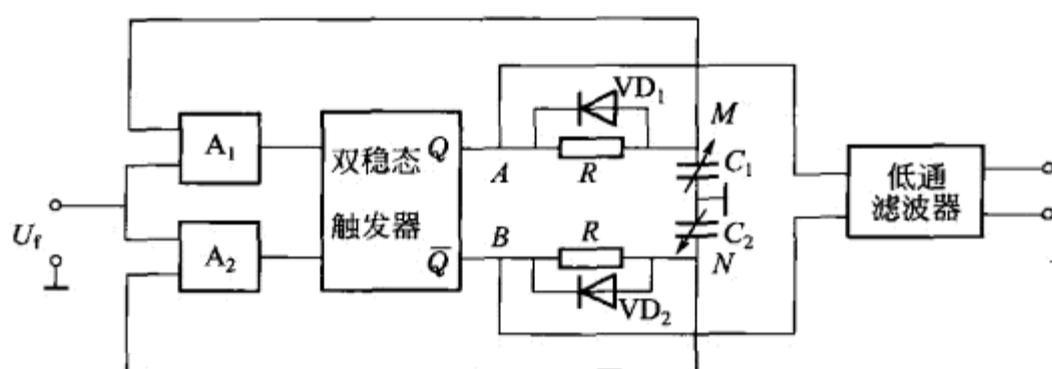


图 2-16 差动脉冲宽度调制电路

设接通电源时，双稳态触发器的 A 端（输出端 Q）为高电位，B（输出端 \bar{Q} ）为低电位，则 A 点通过 R 对 C_1 充电，直至 M 点上的电位等于参考电压 U_f 时，比较器 A_1 输出极性改变，产生一脉冲，触发双稳态触发器翻转，A 点成低电位，B 点成高电位。此时，二极管 VD_1 导通， C_1 放电至零，同时，B 点的高电位经过 R 对 C_2 充电，当 N 点电位充电至 U_f 时，比较器 A_2 产生一脉冲，使触发器又翻转一次，A 点又成高电位，B 点又成低电位，于是重复上述过程。如此周而复始，使双稳态触发器的两输出端各自输出一宽度受 C_1 、 C_2 调制的脉冲方波。

当 $C_1 = C_2$ 时， C_1 、 C_2 的充放电时间相同， U_{AB} 是对称方波，因此输出平均电压 $\bar{U}_{SC} = 0$ 。

当 $C_1 \neq C_2$ 时， C_1 、 C_2 的充放电时间不同，因此 U_{AB} 不再是对称方波， $\bar{U}_{SC} \neq 0$ ，可以算得

$$\bar{U}_{SC} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad (2-28)$$

式中 U_1 ——触发器高电位电压值。

（三）运算放大器式电路

图 2-17 是运算放大器式电路的原理图。图中 U_s 为信号源电压， U_o 为输出电压， C_0 为固定电容， C_x 为传感器电容，运算放大器（简称运放）的开环放大倍数为 $-K$ ，负号表示输出与输入反相。

这种电路最大特点是能够克服变间隙式电容器特性的非线性关系，使输出信号能与输入机械位移有线性关系。可以算得

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_s \frac{C_0}{C_x} \quad (2-29)$$

将 $C_x = \frac{\epsilon S}{d}$ 代入上式，得

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_s \frac{C_0}{\epsilon S} d \quad (2-30)$$

可见，输出电压 \dot{U}_o 与电容器动极板的机械位移 d 为线性关系。

（四）调频电路

图 2-18 是调频电路的原理框图。在这种电路中，电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分，当被测量使电容量发生变化时，就使谐振频率发生变化。

图中调频振荡器的振荡频率由下式决定：

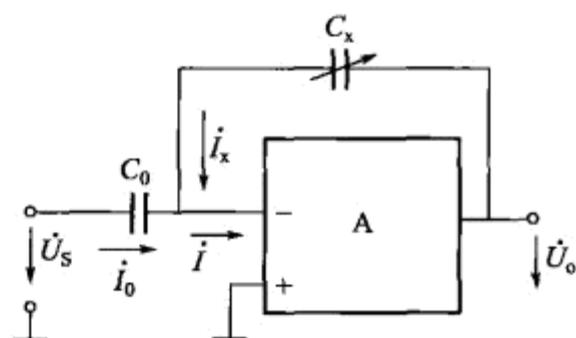


图 2-17 运算放大器式电路原理

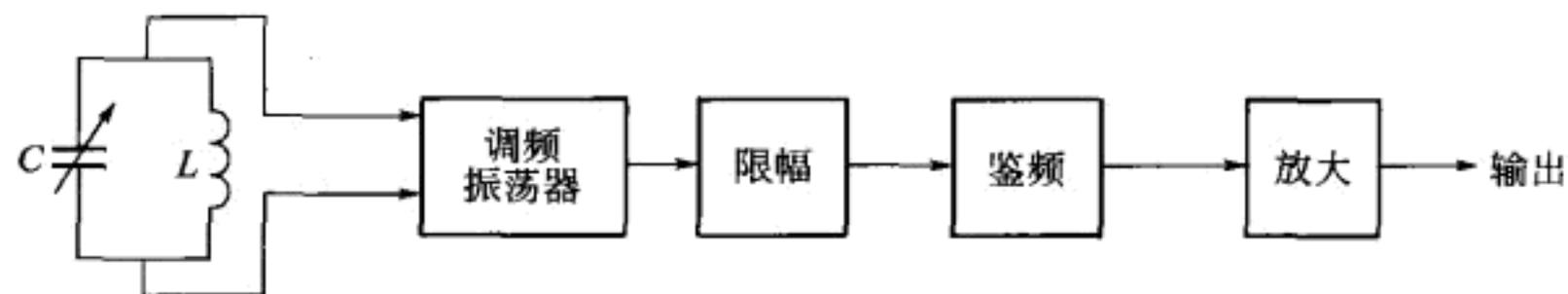


图 2-18 调频电路原理框图

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2-31)$$

式中 L ——振荡回路电感；

C ——总电容， $C = C_1 + C_2 + (C_0 + \Delta C)$ ；

C_1 ——振荡器回路的固有电容；

C_2 ——传感器电线的分布电容；

$C_0 + \Delta C$ ——传感器电容。

当被测信号为零时， $\Delta C = 0$ ，则 $C = C_1 + C_2 + C_0$ 为一常数，所以振荡器的频率是一固定频率 f_0 ：

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

当被测信号不为零时， $\Delta C \neq 0$ ，振荡频率也就有一个相应的改变量 Δf ，因此

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_1 + C_2 + C_0 \mp \Delta C)}} = f_0 \pm \Delta f \quad (2-32)$$