

第 4 章 阻抗型传感器

4.1 电阻式传感器

电阻式传感器是将非电量变化转换为电阻变化的传感器。电阻式传感器的用途很广,种类很多,本节介绍七种电阻式传感器,光敏电阻将在 5.4 节中予以介绍。

4.1.1 电位器式传感器

电位器是一种常用的机电元件,广泛用于各种电气和电子设备中。主要是把机械位移转换为与其成一定函数关系的电阻或电压输出。它除了用于线位移和角位移测量外,还可用于测量一切能转换为位移的其他非电量如压力、加速度、液位等。

电位器的优点是:结构简单、尺寸小、质量轻、输出特性精度高(可达 0.1% 或更高)且稳定性好,可以实现线性及任意函数特性;受环境因素(如温度、湿度、电磁干扰等)影响较小;输出信号较大,一般不需放大。因此,它是最早获得工业应用的传感器之一,至今在某些场合下还在使用。

一、基本工作原理

电位器式传感器由电阻器和电刷两部分组成,如图 4-1-1(a)、(b)所示。当电刷触点 C 在电阻器 R_{AB} (阻值为 R) 上移动时,AC 间的电阻就会发生变化,而且阻值 R_{AC} 与触点的直线位移或角位移 x 成一定的函数关系。如果把 CB 短接如图 4-1-1(c)所示,则电位器便作为变阻器用,其电阻值为位移 x 的函数,即

$$R_x = R_{AB} = R_{AC} = f(x) \quad (4-1-1)$$

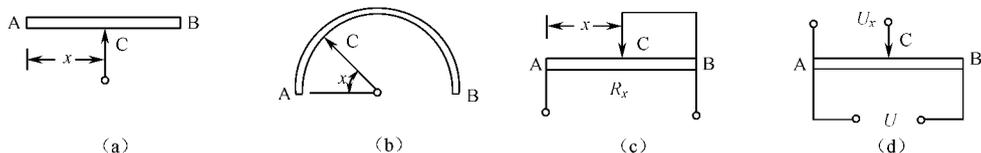


图 4-1-1 电位器式传感器工作原理

如果把电位器做分压器使用,如图 4-1-1(d)所示,则输出电压为位移 x 的函数,即

$$U_x = U_{AC} = \frac{U}{R_{AB}} R_{AC} = \frac{U}{R} f(x) \quad (4-1-2)$$

二、输出-输入特性

按输出-输入特性,电位器传感器可分为线性电位器和非线性电位器两类。

空载时其输出电压(电阻)与电刷位移之间具有线性关系的电位器称为线性电位器,其输出电压(电阻)与电刷位移成正比,即

$$R_x = \frac{R}{L} x, \quad U_x = \frac{U}{R} R_x = \frac{U}{L} x \quad (4-1-3)$$

式中, L 为电位器电刷触点行程; x 为电位器电刷触点位移; U 为输入电压; U_x 为输出电压; R_x 为输出电阻。

非线性电位器是指在空载时其输出电压(电阻)与电刷位移之间具有非线性函数关系的电位器,也称函数电位器。用非线性电位器可使传感器获得各种特殊要求的非线性函数(如指数函数、三角函数、对数函数及其他任意函数)输出;也可以通过它的非线性来修正仪表与传感器或带有负载的电位器的非线性,从而最终获得线性输出特性。

三、结构形式

按结构形式,电位器传感器可分为线绕电位器和非线绕电位器两类。

线绕电位器的电阻器是由电阻系数很高的极细的绝缘导线,按照一定规律整齐地绕在一个绝缘骨架上制成的。在它与电刷相接触的部分,将导线表面的绝缘层去掉,然后加以抛光,形成一个电刷可在其上滑动的光滑而平整的接触道。电刷通常由具有弹性的金属薄片或金属丝制成,其末端弯曲成弧形。利用电刷本身的弹性变形所产生的弹性力,使电刷与电阻元件之间有一定的接触压力,以使两者在相对滑动过程中保持可靠的接触和导电。

线绕电位器的优点是精度高、性能稳定,易于达到较高的线性度和实现各种非线性特性。但它也存在许多缺点,如阶梯误差、分辨力低、耐磨性差、寿命较短等。因此发展了在某些性能方面优于线绕式电位器的非线绕电位器。

非线绕电位器目前常见的有合成膜、金属膜、导电塑料、导电玻璃釉电位器等。它们在结构上的共同特点是在绝缘基座上制成各种电阻薄膜元件,因此比线绕电位器具有高得多的分辨力,且耐磨性好,寿命长,如导电塑料电位器使用寿命可达上千万次。它们的缺点是对温度和湿度变化比较敏感,且要求接触压力大,只能用于推动力大的敏感元件。

上述几种电位器都是接触式电位器。光电电位器是一种非接触式电位器,它以光束代替常规的电刷,克服了接触式电位器共有的耐磨性差、寿命短的缺点。

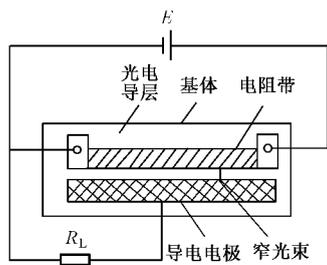


图 4-1-2 光电电位器原理图

光电电位器的结构原理如图 4-1-2 所示。图中基体(常用材料为氧化铝)上沉积一层硫化镉或硒化镉的光电导层,然后再在其上沉积一条金属(金或银)导电条作为导电电极和一条薄膜电阻(镍铝合金等)带,在电阻带和导电电极间留有窄的间隙,作为电刷的窄光束就照射在这个窄间隙上。由于处在间隙中的光电导材料(光电导层)的暗电阻(无光照射的电阻)和亮电阻(有光照射的电阻)之比可达 $10^5 \sim 10^8$,所以当一窄光束照射到间隙上时,就相当于把电阻带和导电电极

接通,在外施电源 E 的情况下,负载电阻 R_L 上便有输出电压,且输出电压值随光束位置而改变。

光电电位器阻值宽($500\Omega \sim 15M\Omega$)、无摩擦、无磨损、寿命长(可达亿万次循环),分辨力也高。缺点是由于光电导层虽经窄光束照射而导通,但照射处的电阻还是相当高(可达 $10k\Omega$ 或更高),因而光电电位器输出大电流困难,需配高输入阻抗放大器工作。另外,它的结构比较复杂,工作温度范围比较窄(目前最高达 150°C),线性度也不高。

4.1.2 应变式传感器与压阻式传感器

一、应变电阻效应和压阻效应

导体或半导体材料在受到外界力(拉力或压力)作用时,产生机械变形,机械变形导致其阻值变化,这种因形变而使其阻值发生变化的现象称为“应变电阻效应”。

对于横截面均匀的导体(或半导体),其电阻为

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4-1-4)$$

式中, l 为导体(或半导体)长度; A 为导体(或半导体)截面积; ρ 为导体(或半导体)电阻率。

当它受到轴向力 F 而被拉伸(或压缩)时,其 l, A, ρ 均发生变化,如图 4-1-3 所示,因而其电阻值随之变化。通过对(4-1-4)式两边取对数再做微分,即可求得其电阻相对变化

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (4-1-5)$$

在材料力学中,(4-1-5)式等号右边第一项称为轴向线应变(或纵向线应变) ϵ 。

$$\epsilon = dl/l \quad (4-1-6)$$

受拉(或受压)时,半径缩小(或扩大)产生径向线应变(或横向线应变) dr/r ,它与轴向(纵向)线应变符号相反,二者的比值称为泊松比,即

$$\mu = \frac{dr/r}{dl/l} = -\frac{dr/r}{\epsilon} \quad (\mu > 0) \quad (4-1-7)$$

(4-1-5)式中等号右边第二项称为面应变,因 $A = \pi r^2$,故有

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} = -2\mu\epsilon \quad (4-1-8)$$

因体积 $V = Al$,故相应的体应变为

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} = (1 - 2\mu)\epsilon \quad (4-1-9)$$

实验证明,金属导体材料的电阻率相对变化与其体应变成正比

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1 - 2\mu)\epsilon \quad (4-1-10)$$

式中, C 为由一定的材料和加工方式决定的常数。

半导体材料受到应力作用时,其电阻率会发生变化,这种现象称为“压阻效应”。由半导体理论可知,锗、硅等单晶半导体材料的电阻率相对变化与作用于材料的轴向应力 σ 成正比

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma \quad (4-1-11)$$

式中, π 为半导体材料在受力方向的压阻系数。

由材料力学可知,轴向应力 σ 与轴向力 F 及轴向线应变 ϵ 关系为

$$\sigma = \frac{F}{A} = \epsilon E \quad (4-1-12)$$

式中, E 为半导体材料的弹性模量。

将(4-1-6)式、(4-1-8)式和(4-1-10)式代入(4-1-5)式得金属材料的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + C(1 - 2\mu)\epsilon = K_m\epsilon \quad (4-1-13)$$

式中, K_m 为金属材料的应变灵敏系数,且

$$K_m = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu) \quad (4-1-14)$$

将(4-1-6)式、(4-1-8)式、(4-1-11)式和(4-1-12)式代入(4-1-5)式得半导体材料的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + \pi E]\epsilon = K_s\epsilon \quad (4-1-15)$$

式中, K_s 为半导体材料的应变灵敏系数,且

$$K_s = 1 + 2\mu + \pi E \quad (4-1-16)$$

由(4-1-5)式可见,电阻相对变化由两部分引起:一部分是由于材料受力后几何尺寸变化(应变)即(4-1-5)式中前两项引起;另一部分是由于受力后电阻率发生变化而引起。对于金属材料,一般 $\mu \approx 0.3$, $1 + 2\mu \approx 1.6$,以康铜为例 $C \approx 1$, $(1 - 2\mu) \approx 0.4$,据(4-1-14)式 $K_m \approx 2.0$ 。显然,金属材料的应变电阻效应以结构尺寸变化为主。对于半导体材料 $\pi E \gg 1 + 2\mu$, $K_s \approx \pi E$,因此半导体材料

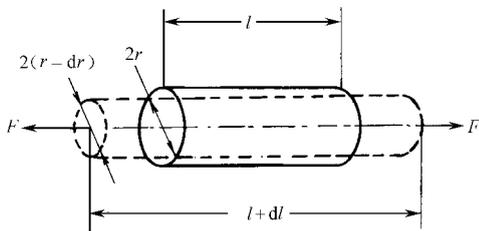


图 4-1-3 导体受拉伸后的参数变化

的电阻变化主要基于压阻效应。以硅材料为例, $\pi = (48 \sim 80) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $E = 1.67 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $K_s = 50 \sim 100$ 。可见半导体材料的应变灵敏系数要比金属材料的应变灵敏系数高出几十倍。

二、电阻式应变传感器

电阻式应变传感器是基于应变电阻效应的电阻式传感器。综合(4-1-13)式和(4-1-15)式可得应变电阻效应的表达式为

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \tag{4-1-17}$$

由金属或半导体制成的应变-电阻转换元件称为电阻应变片,简称应变片,它是电阻应变式传感器中的传感元件。应变式传感器的组成有两种,一种是直接将应变片粘贴在被测量的受力构件上,使应变片随受力构件一起变形,从而将受力构件的应变转换为应变片的电阻变化;另一种是将应变片粘贴到弹性敏感元件上,由弹性敏感元件将被测物理量(如力、压力、加速度等)转换为应变,再由应变片将应变转换为电阻变化。这两种情况都必须将应变片接入测量电路,以便将应变片的电阻变化转换为电压或电流信号。因此,应变式传感器的基本组成部件包括:应变片、测量电路、弹性敏感元件以及一些附件(如壳体、连接装置等),其中电阻应变片是电阻应变式传感器的核心。

1. 电阻应变片的组成结构和类型

电阻应变片的形式各异,但其基本结构大体相同,一般由敏感栅、引出线、基底、盖片、黏合层等组成,如图 4-1-4 所示。

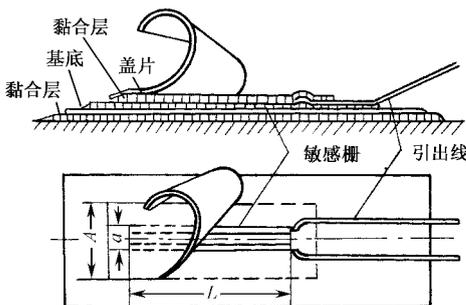


图 4-1-4 应变片的基本结构

敏感栅是应变片内实现应变-电阻转换的传感元件。为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置,通常用黏结剂将它固结在纸质或胶质的基底上,再在敏感栅上面粘贴一层纸质或胶质的覆盖层,起防潮、防蚀、防损等作用。敏感栅引出线用以与外接测量电路连接。应变片使用时用黏结剂将基底粘贴到试件表面的被测部位。基底及其黏合层起着把试件应变传递给敏感栅的作用。为此,基底必须很薄,而且还应有良好的绝缘、抗潮和耐热性能。

按制造敏感栅的材料,电阻应变片可分为电阻应变片和半导体应变片两大类。按敏感栅的形状和制造工艺不同,金属电阻应变片又可分为丝式、箔式和薄膜式三种。半导体应变片的敏感栅一般为单根状。

金属丝式应变片的敏感栅由直径 0.015~0.05mm 的金属丝绕成如图 4-1-5(a)所示的栅状,是应用最早的应变片。

金属箔式应变片的敏感栅由金属箔经光刻腐蚀成栅状,如图 4-1-5(b)所示。由于箔式应变片具有横向效应小、测量精度高、散热好、工作电流大、测量灵敏度高和易于成批生产等多方面优点,已经在许多场合下取代了丝式应变片。

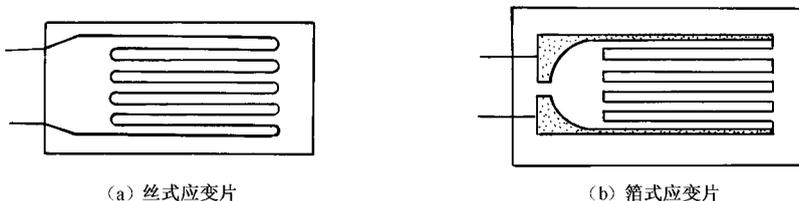


图 4-1-5 丝式应变片与箔式应变片

薄膜应变片是采用真空蒸发或真空沉积方法在薄的绝缘基底上形成金属电阻材料薄膜(厚度 $0.1\mu\text{m}$ 以下)作为敏感栅,其优点是应变灵敏系数高,允许电流密度大,易实现工业化生产,是一种很有前途的新型应变片,目前实际使用中的主要问题是尚难控制其电阻对温度和时间的变化关系。

半导体应变片的优点是尺寸、横向效应、机械滞后都很小,灵敏系数极大,因而输出也大,可以不需放大器直接与记录仪连接,使得测量系统简化。缺点是电阻值和灵敏系数的温度稳定性差,测量较大应变时非线性严重;灵敏系数随受拉或压而变,且分散度大,一般在 $3\%\sim 5\%$ 之间,因而使测量结果有 $\pm 3\%\sim 5\%$ 的误差。

2. 电阻应变片的灵敏系数

当应变片安装于试件表面,在其轴线方向的单向应力作用下,应变片的阻值相对变化与试件表面上安装应变片区域的轴向应变 ϵ_x 之比称为应变片的灵敏系数 k ,即

$$k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_x} \quad (4-1-18)$$

电阻应变片的灵敏系数 k 并不等于制作该应变片的应变电阻材料本身的灵敏系数 k_0 ,必须重新用实验测定。因应变片粘贴到试件上后不能取下再用,所以只能在每批产品中抽样测定,取平均 k 值作为该批产品的“标称灵敏系数”。实验表明: $k < k_0$,究其原因除了黏合层传递应变有失真外,另一重要原因是存在横向效应。

由图 4-1-5 可见,敏感栅通常由多条轴向纵栅和圆弧横栅组成。当试件承受单向应力时,其表面处于平面应变状态,即轴向拉伸 ϵ_x 和横向收缩 ϵ_y 。粘贴在试件表面的应变片,其纵栅和横栅各自主要地分别感受 ϵ_x 和 ϵ_y ,从而引起总的电阻变化为

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \epsilon_x + k_y \epsilon_y = k_x (1 + \alpha H) \epsilon_x \quad (4-1-19)$$

式中, k_x 为轴向灵敏系数; k_y 为横向灵敏系数; $\alpha = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$ 为双向应变比($\alpha < 0$); $H = \frac{k_y}{k_x}$ 为横向效应系数或横向灵敏度。

若令 $k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_x}$,则由(4-1-19)式可见,因 $\alpha < 0$,故有 $k < k_x$ 。

3. 应变片的选择和安装

应变片的种类很多,选择何种应变片是测试前应确定的问题。一般根据试验环境、应变性质、试件状况及测试精度选择合适的应变片。

应变片在试件上的安装质量是决定测试精度及可靠性的关键之一,必须予以高度重视。安装方法有三种:粘贴法是最常用的,焊接法适用于金属基底的应变片,喷涂法主要用于高温应变测量。

应变片在安装之前,应对其外观和电阻值进行检查。为了使应变片粘贴牢固,需事先对试件粘贴表面进行机械、化学处理,处理面积约为应变片面积的3倍。在贴片时,可按规范对黏结剂进行加温固化或者加压。固化后的应变片阻值会有变化,其变化量一般应为零点几欧姆。

4. 应变电桥

应变片粘贴好后,通常要接入图 3-1-1 所示惠斯顿电桥,称为应变电桥,以便把应变片电阻值的变化转换为电压进行测量。我们先讨论四应变片工作的一般情况。

实际工作中,通常采用同型号的应变片,即四个应变片的阻值 R 和灵敏系数 k 都相同,分别接入惠斯顿电桥四臂。在应变为0的初始状态下,电桥平衡,没有输出电压;在应变片承受应变时,电桥失去平衡,产生输出电压。

将 $(\Delta R_i/R_i = k\epsilon_i)$ 代入(3-1-15)式得

$$U_o = \frac{kU}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (4-1-20)$$

由上式可见,为了尽可能提高应变电桥的灵敏度,应将承受同向应变的应变片接在电桥的相对两臂,而将承受反向应变的应变片接在电桥横跨电源的相邻两臂,如图 3-1-15 所示。实际工作中,应变片的粘贴和连接,常见有以下几种情况。

(1) 单应变片工作:把一个工作应变片接入电桥的一臂,另三臂接固定电阻 $R_2=R_3=R_4=R$,如图 3-1-5(a)所示。将 $\Delta R_1/R_1=k\varepsilon, \Delta R_2=\Delta R_3=\Delta R_4=0$ 代入(3-1-15)式得

$$U_o = \frac{kU}{4}\varepsilon \quad (4-1-21)$$

(2) 双应变片工作:把两工作应变片接入电桥相邻两臂,另两臂接固定电阻 $R_3=R_4=R$,将 $\Delta R_1/R_1=k\varepsilon_1, \Delta R_2/R_2=k\varepsilon_2, \Delta R_3=\Delta R_4=0$ 代入(3-1-15)式得

$$U_o = \frac{kU}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (4-1-22)$$

如果粘贴应变片时,使一片受拉,另一片受压,即 $\varepsilon_1=\varepsilon_x, \varepsilon_2=-\varepsilon_x$,代入(4-1-22)式得,应变电桥输出电压为

$$U_o = \frac{kU}{2}\varepsilon_x \quad (4-1-23)$$

如果粘贴应变片时,使一片承受纵向应变 ε_x ,即 $\varepsilon_1=\varepsilon_x$,另一片承受横向应变 ε_y ,即 $\varepsilon_2=\varepsilon_y$ 。因 $\varepsilon_y=-\mu\varepsilon_x$ (μ 为泊松比),代入(4-1-22)式得,应变电桥输出电压为

$$U_o = \frac{kU}{4}(1+\mu)\varepsilon_x \quad (4-1-24)$$

(3) 四应变片工作:把 4 个应变片接入电桥四臂,如果粘贴应变片时,使 R_1 和 R_3 受拉, R_2 和 R_4 受压,即 $\varepsilon_1=\varepsilon_3=\varepsilon_x, \varepsilon_2=\varepsilon_4=-\varepsilon_x$,代入(4-1-20)式得,应变电桥输出电压为

$$U_o = kU\varepsilon_x \quad (4-1-25)$$

如果粘贴应变片时,使 R_1 和 R_3 承受纵向应变, R_2 和 R_4 承受横向应变,即 $\varepsilon_1=\varepsilon_3=\varepsilon_x, \varepsilon_2=\varepsilon_4=\varepsilon_y, \varepsilon_y=-\mu\varepsilon_x$ (μ 为泊松比),代入(4-1-20)式得,应变电桥输出电压为

$$U_o = \frac{kU}{2}(1+\mu)\varepsilon_x \quad (4-1-26)$$

由(4-1-21)~(4-1-26)式可见,在电桥电源电压稳定不变的情况下,只要测出应变电桥输出电压,就可求得相应的应变。此外,应变片的灵敏系数 k 越大,应变电桥输出电压就越高。半导体应变片的灵敏系数比金属应变片的灵敏系数大几十倍,应变电桥输出电压不必再放大,因此多采用直流电桥。相反,金属应变片多采用交流电桥。

5. 温度误差及其补偿

温度变化时,电阻应变片的电阻也会变化,而且,由温度所引起的电阻变化与试件应变所造成的电阻变化几乎具有相同数量级,这就是说,只要温度发生变化,即使没有应变,应变电桥也会有输出电压。如果把由温度变化所引起的应变电桥输出电压误认为是试件应变所造成的,那就会产生误差,这个误差称为温度误差。

(1) 造成温度误差的原因:温度变化引起应变片电阻变化而造成温度误差的原因有两个。

① 应变片电阻本身随温度的变化

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta t), \quad \Delta R_{\text{th}} = R_t - R_0 = R_0\alpha\Delta t \quad (4-1-27)$$

式中, R_t, R_0 为应变片在温度为 t 和 t_0 时的电阻值; α 为应变片电阻的温度系数; Δt 为温度的变化值。

② 试件材料与应变片材料的线膨胀系数不同,使应变片产生附加变形,从而造成电阻变化。若设应变片材料和试件材料的线膨胀系数分别为 β_s 和 β_g , 温度 t_0 时长度为 l_0 的应变片材料和试件材料,如果不黏结一起的话,在温度改变到 t 时,其长度将分别膨胀为

$$l_{\text{st}} = l_0(1 + \beta_s\Delta t), \quad l_{\text{gt}} = l_0(1 + \beta_g\Delta t) \quad (4-1-28)$$

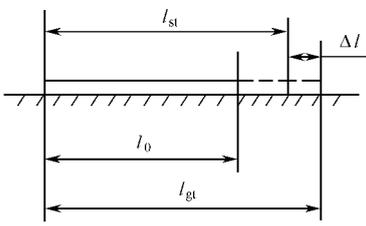


图 4-1-6 应变片的温度误差

但应变片粘贴到试件表面上后,应变片被迫从 l_{st} 拉长到 l_{gt} ,由图 4-1-6 可见产生的附加变形为

$$\Delta l = l_{gt} - l_{st} = (\beta_g - \beta_s) l_0 \Delta t$$

即附加应变为 $\epsilon_\beta = \frac{\Delta l}{l_0} = (\beta_g - \beta_s) \Delta t$

从而产生电阻变化为 $\frac{\Delta R_{\beta}}{R_0} = k\epsilon_\beta = k(\beta_g - \beta_s) \Delta t$

$$(4-1-29)$$

由(4-1-27)式、(4-1-29)式可得温度变化引起的总的电阻变化为

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{\Delta R_{\alpha} + \Delta R_{\beta}}{R_0} = \alpha \Delta t + k(\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (4-1-30)$$

折算成虚假视应变为

$$\epsilon_t = \frac{\Delta R_t / R_0}{k} = \left[\frac{\alpha}{k} + (\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t \quad (4-1-31)$$

这就是说,不仅因受力引起的真实应变 ϵ 会使应变片电阻发生变化,温度变化也会使应变片电阻发生变化,而温度变化引起的应变片电阻变化可等效为是一个应变 ϵ_t 引起的。由于应变 ϵ_t 并不真正存在,故称为“虚假视应变”。应变片所粘贴的试件受力引起的真实应变 ϵ 和温度变化引起的虚假视应变 ϵ_t 使应变片电阻总的变化为

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta R_\epsilon + \Delta R_t}{R_0} = k(\epsilon + \epsilon_t) \quad (4-1-32)$$

如果采用单应变片工作,将(4-1-32)式代入(4-1-21)式得

$$U_o = \frac{kU}{4} (\epsilon + \epsilon_t) \quad (4-1-33)$$

如果不考虑温度的影响,而误以为电桥电压都是受力应变引起的,此时,从电桥电压 U_o 求出的应变值 $\frac{4U_o}{kU} = \epsilon + \epsilon_t$,与真实应变 ϵ 是有差别的,两者之差 ϵ_t 就是因温度变化引起的测量误差。虽然采取恒温措施,理论上可避免温度误差,但实际上这往往是成本很高或根本办不到的。因此实际工作中,一般都是从电路上采取措施,不让温度变化影响电路输出电压。这种减小或消除温度误差的办法叫温度补偿。

(2) 补偿温度误差的办法:补偿温度误差的办法有多种,其中最常用和最好的补偿方法是电桥补偿法。

① 补偿块法:用两个参数相同的应变片 R_1 、 R_2 , R_1 贴在试件上,接入电桥作工作臂, R_2 贴在材料与试件相同的补偿块上,环境温度与试件相同但不承受机械应变,接入电桥相邻臂作补偿臂,如图 4-1-7 所示。 R_1 承受机械应变,由(4-1-32)式可知,温度变化时,其电阻变化为

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_{1\epsilon} + \Delta R_{1t}}{R_1} = k(\epsilon + \epsilon_t) \quad (4-1-34)$$

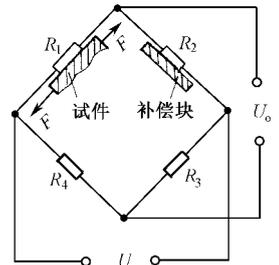


图 4-1-7 补偿块法原理

R_2 不承受机械应变,但由于 R_1 与 R_2 所处环境温度及所粘贴材料相同,故因温度引起的电阻变化相同,由(4-1-31)式可知,其电阻变化为

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_{2t}}{R_2} = k\epsilon_t \quad (4-1-35)$$

将(4-1-34)式、(4-1-35)式代入(4-1-22)式得

$$U_o = \frac{kU}{4}\epsilon \quad (4-1-36)$$

对比(4-1-33)式和(4-1-36)式可见,补偿块法能消除单应变片工作时的温度误差。

② 差动电桥补偿法:在测量梁的弯曲应变或应用悬臂梁测力时,还可以不用补偿块,直接将两个参数相同的应变片分贴于梁的上下两面对称位置,再将两应变片接入电桥横跨电源的相邻两臂。此时,两应变片承受的应变大小相同符号相反,只要梁的上下表面温度一致,就会使两应变电阻随温度的变化大小相同,符号也相同,因此 $\epsilon_1 = \epsilon_x + \epsilon_t$, $\epsilon_2 = -\epsilon_x + \epsilon_t$,代入(4-1-22)式得

$$U_o = \frac{kU}{2}\epsilon_x \quad (4-1-37)$$

在采用双应变片工作(一个承受纵向应变,一个承受横向应变)时,只要将两应变片接入电桥横跨电源的相邻两臂,也可消除应变片工作时的温度误差。因为

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + \epsilon_t, \epsilon_2 = \epsilon_y + \epsilon_t, \epsilon_y = -\epsilon_x \mu$$

代入(4-1-22)式得

$$U_o = \frac{kU}{4}(1+\mu)\epsilon_x \quad (4-1-38)$$

由(4-1-37)式和(4-1-38)式可见,双应变片工作时,如果两应变片型号参数、所处环境温度及所粘贴材料均相同,只要将两应变片接入电桥的相邻两臂,就可消除温度变化引起的测量误差。但是,如果不将两应变片接入电桥的相邻两臂,而将两应变片接入电桥的相对两臂,则不仅不能消除温度变化引起的测量误差,反而会增大温度误差。如果两应变片所处环境温度及所粘贴材料不同,即使将两应变片接入电桥的相邻两臂,也不能完全消除温度变化引起的测量误差。这两点留给读者自己去证明。

还有其他一些温度补偿方法,有兴趣的读者可参阅有关文献。

三、固态压阻式传感器

如前所述,半导体材料当受到应力作用时,其电阻率会发生变化,这种现象称为压阻效应。依据半导体的压阻效应,现已制成两类传感器:一类是利用半导体材料的体电阻制成粘贴式应变片,作成半导体应变式传感器,如(4-1-16)式所示;另一类是在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成扩散电阻,作为测量传感元件,亦称扩散型压阻式传感器。这类传感器的应变电阻与基底是同一块材料,通常是半导体硅,因此又称扩散硅压阻式传感器。由于取消了胶接,它的滞后、蠕变及老化现象大为减少,而且不存在胶层热阻的妨碍,使导热性能大为改善。此外,由于这类传感器是用半导体硅作芯片,利用集成电路工艺制成,如果在制备传感器的芯片时,同时设计制造一些温度补偿、信号处理与放大电路,就能构成集成传感器。如果进一步与微处理器相结合,就有可能做成智能传感器。因此,这类传感器一出现就受到人们的极大重视,得到迅猛的发展。目前,扩散硅压阻式传感器已在力学量传感器中取得重要地位。扩散硅压阻式传感器主要用来测量压力和加速度等物理量。

压阻式传感器的优点是:

- ① 灵敏度非常高,有时传感器的输出不需放大可直接用于测量;
- ② 分辨率高,例如测量压力时可测出 10~20Pa 的微压;

③ 测量元件的有效面积可做得很小,故频率响应高;

④ 可测量低频加速度与直线加速度。

压阻式传感器的最大缺点是温度误差较大,故需温度补偿或在恒温条件下使用。压阻式传感器受到温度影响后,要产生零位漂移和灵敏度漂移,因而会产生温度误差。压阻式传感器中,扩散电阻的温度系数较大,各电阻值随温度变化量很难做得相等,故引起传感器的零位漂移。传感器灵敏度的温漂是由于压阻系数随温度变化而引起的。当温度升高时,压阻系数变小,传感器的灵敏度要降低,反之灵敏度升高。

零位温漂一般可用串、并联电阻的方法进行补偿,如图 4-1-8 所示。图中 $R_1 \sim R_4$ 是在硅基片上用集成电路工艺制成的 4 个接成惠斯顿电桥的扩散电阻,串联电阻 R_s 主要起调零作用,而并联电阻 R_p 则主要起补偿作用。例如温度升高, R_2 的增量较大,则 B 点电位高于 D 点电位,两点电位差就是零位漂移。为了消除此电位差,在 R_2 上并联一负温度系数的阻值较大的电阻 R_p ,用其约束 R_2 的变化,而实现补偿。当然如果在 R_4 上并联一个正温度系数的阻值较大的电阻也可以。 R_s 和 R_p 要根据 4 个桥臂在低温和高温下的实测电阻值计算出来,才能取得较好的补偿效果。

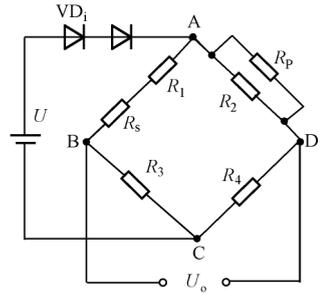


图 4-1-8 温漂补偿电路

电桥的电源回路中串联的二极管 VD_i 是补偿灵敏度温漂的。二极管的 PN 结为负温度特性,温度每升高 1°C ,正向压降减少 $1.9 \sim 2.4\text{mV}$ 。这样,当温度升高时,二极管正向压降减少,因电源采用恒压源,则电桥电压必然提高,使输出变大,以补偿灵敏度的下降。所串联的二极管个数,要依实际情况进行计算。

4.1.3 热电阻与热敏电阻

利用电阻率随温度变化的特性制成的传感器叫做电阻式温度传感器,按采用的电阻材料可分为金属热电阻(简称热电阻)和半导体热敏电阻(简称热敏电阻)两大类。

一、金属热电阻

虽然各种金属材料的电阻率均随温度变化,但适于制作温度测量敏感元件的电阻材料要具备以下要求:

- ① 要有尽可能大而且稳定的电阻温度系数;
- ② 电阻率要大,以便在同样灵敏度下减小元件的尺寸;
- ③ 电阻温度系数要保持单值,并且最好是常数,以保证电阻随温度变化的线性关系;
- ④ 性能要稳定,在电阻的使用环境和温度范围内,其物理、化学性能基本保持不变。

根据以上要求,纯金属是制造热电阻的主要材料。目前,广泛应用的热电阻材料有铂、铜、镍、铁等。

1. 铂电阻

铂金属的主要优点是物理化学性能极为稳定,并且有良好的工艺性,易于提纯,可以制成极细的铂丝(直径可达 0.02mm 或更细)或极薄的铂箔,它的缺点是电阻温度系数较小。

用铂丝双绕在云母、石英或陶瓷支架上,或采用溅射工艺在石英或陶瓷基座上生成铂薄膜,构成电阻体,电阻体端线与银丝焊接引出连线,外面再套上玻璃或陶瓷或涂釉加以绝缘和保护,这样就构成了铂电阻传感器。

铂电阻除用做一般的工业测温外,在国际实用温标中,还作为在 $-259.34^{\circ}\text{C} \sim 630.74^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的温度基准。

铂电阻与温度之间的关系近似直线,可用下式表示:

$$\text{在 } -200^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C} \text{ 范围内 } R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100^{\circ}\text{C})t^3] \quad (4-1-39)$$

$$\text{在 } 0^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C} \text{ 范围内 } R_t = R_0 [1 + At + Bt^2] \quad (4-1-40)$$

式中, R_0 、 R_t 分别为 0°C 和 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值。

对于常用工业铂电阻

$$A = 3.96847 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}, \quad B = -5.847 \times 10^{-7} / ^{\circ}\text{C}^2, \quad C = -4.22 \times 10^{-12} / ^{\circ}\text{C}^4$$

铂电阻的精度与铂的提纯程度有关,通常用百度电阻比 $W(100)$ 表示铂的纯度,即

$$W(100) = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (4-1-41)$$

式中, R_{100} 为 100°C 时的电阻阻值; R_0 为 0°C 时的电阻阻值。

国内统一设计的工业用标准铂电阻其百度电阻比 $W(100) \geq 1.391$ 。其 R_0 分为 10Ω 和 100Ω 两种,它们的分度号(即型号)分别为 Pt10 和 Pt100,其中 Pt100 更为常用。选定 R_0 值根据(4-1-39)式和(4-1-40)式即可列出铂电阻的分度表——温度与电阻值的对照数据表,只要测出热电阻 R_t ,通过查分度表就可确定被测温度。

2. 铜电阻

铂是贵重金属,在一些测量精度要求不高而温度又较低场合,用铜电阻更为普遍,这是因为在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内其阻值与温度关系接近线性,并且铜的温度系数比铂高,也容易提纯加工,价格便宜。但是铜易于氧化,不适于在腐蚀性介质或高温下工作,铜的电阻率低,所以铜电阻的体积较大。

铜电阻传感器是用漆包铜线双绕在圆柱形陶瓷或塑料支架上(由于铜的电阻率较小,需要多层绕制)引出连线,然后整体用环氧树脂封固,以提高其导热性和机械强度。

在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,铜电阻与温度之间的关系为

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (4-1-42)$$

式中, R_t 、 R_0 为温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 和 0°C 时的铜电阻值。

$$A = 4.28899 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}, \quad B = -2.133 \times 10^{-7} / ^{\circ}\text{C}^2, \quad C = 1.233 \times 10^{-9} / ^{\circ}\text{C}^3$$

按国内统一设计,工业用铜电阻 R_0 取 100Ω 和 50Ω 两种,它们的分度号分别为 Cu50 和 Cu100。铜电阻的百度电阻比 $W(100) \geq 1.425$ 。

3. 其他热电阻

镍和铁电阻的温度系数都较大,电阻率也较高,因此也适合作热电阻,但由于存在易氧化或非线性严重等缺点,所以这两种热电阻目前应用较少。铂、铜热电阻不宜作低温和超低温测量。近年来,一些新颖的测量低温领域的热电阻材料相继出现,如钢电阻、锰电阻、碳电阻等。

二、热敏电阻

1. 热敏电阻的类型和特点

热敏电阻是用半导体材料制成的热敏器件。按电阻-温度特性,可分为三类:① 负温度系数热敏电阻(NTC);② 正温度系数热敏电阻(PTC);③ 临界温度系数热敏电阻(CTC),如图 4-1-9 所示。由图可见,PTC 型和 CTC 型在一定温度范围内,阻值将随温度而剧烈变化,因此可用做开关元件。在温度测量中使用最多的是 NTC 型热敏电阻,本书只介绍这种热敏电阻。

负温度系数热敏电阻是一种氧化物的复合烧结体,通常用它测量 $-100^{\circ}\text{C} \sim +300^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度,

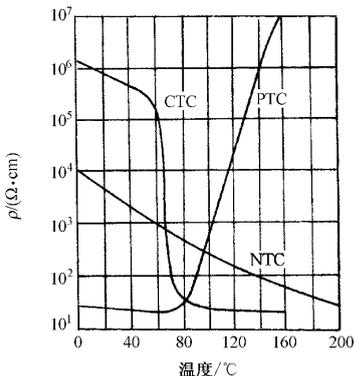


图 4-1-9 热敏电阻典型特性

与热电阻相比,其特点是:

- ① 电阻温度系数大,灵敏度高,约为热电阻的 10 倍;
- ② 结构简单,体积小,可以测量点温度;
- ③ 电阻率高,热惯性小,适宜动态测量。

2. 热敏电阻的结构

热敏电阻主要由热敏探头、引线、壳体构成,其结构及符号如图 4-1-10 所示。根据不同的使用要求,热敏电阻可做成不同的形状结构。其典型结构如图 4-1-11 所示,其中图(a)圆片型;(b)薄膜型;(c)柱型;(d)管型;(e)平板型;(f)珠型;(g)扁型;(h)垫圈型;(i)杆型。

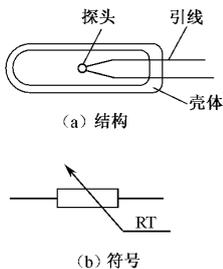


图 4-1-10 热敏电阻的结构及符号

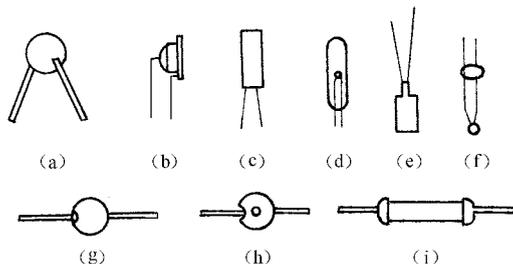


图 4-1-11 热敏电阻的结构形式

3. NTC 型热敏电阻的特性

NTC 型热敏电阻的电阻-温度特性,在不太宽的温度范围内(小于 450°C)可以用如下公式描述

$$R = R_0 \exp B \left[\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4-1-43)$$

式中, R 、 R_0 为温度为 $T(\text{K})$ 和 $T_0(\text{K})$ 时的电阻值; B 为热敏电阻的材料常数,一般情况下, $B = 2000 \sim 6000\text{K}$ 。

若定义 $\frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ 为热敏电阻的温度系数 α (即温度变化 1°C 时电阻值的相对变化量),则由上式得

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (4-1-44)$$

例如, B 值为 4000K , 当 $T = 293.15\text{K}$ (20°C) 时,热敏电阻的 $\alpha = 4.7\%/^{\circ}\text{C}$, 约为铂电阻的 12 倍。由于温度变化引起的阻值变化大,因此测量时引线电阻影响小,并且体积小,非常适合测量微弱温度变化。由(4-1-44)式可见, α 随温度降低而迅速增大,由于热敏电阻非线性严重,所以在实际使用时要对其进行线性化处理。

对热敏电阻进行线性化处理的简单方法是给热敏电阻并联一个温度系数很小的固定电阻,使等效电阻与温度的关系在一定的温度范围内是线性的。所需的这个固定电阻的阻值 R 可按下式计算

$$R = \frac{R_{T_2}(R_{T_1} + R_{T_3}) - 2R_{T_1}R_{T_3}}{R_{T_1} + R_{T_3} - 2R_{T_2}} \quad (4-1-45)$$

式中, R_{T_1} 为测量范围的最低温度处 T_1 的热敏电阻阻值; R_{T_3} 为测量范围的最高温度处 T_3 的热敏电阻阻值; R_{T_2} 为测量范围中点处 $T_2 = (T_1 + T_3)/2$ 的热敏电阻阻值。

热敏电阻的伏安特性也是十分重要的,如图 4-1-12 所示。由图可见,开始时电流与电压成较好的比例关系,这时在电阻上消耗的功率小,以

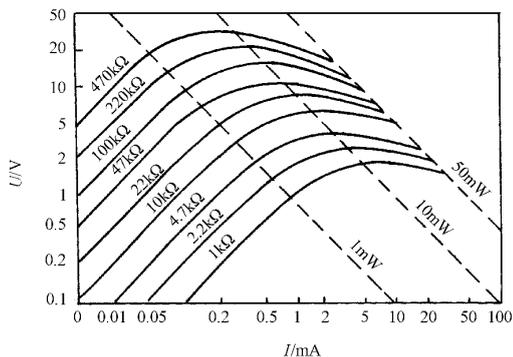


图 4-1-12 热敏电阻伏安特性

致不会发生自身发热现象,热敏电阻这个冷态电阻完全由外界温度决定。随着电流的增加,电阻释放热量并自身发热,阻值下降,其两端电压也就不再按比例随电流增大而增大。在一小范围内,电流的增大和电阻的减小相互补偿。这时电压基本保持不变,直至电阻的下降幅度超过相应电流的增大幅度时,电压才开始减小。因此要根据热敏电阻的允许功耗来确定电流。

4.1.4 气敏电阻

气敏电阻是利用半导体与气体接触而电阻发生变化的效应制成的气敏元件。

一、材料与结构

早在 20 世纪 30 年代就发现许多金属氧化物具有气敏效应。这些金属氧化物都是利用陶瓷工艺制成的具有半导体特性的材料,因此称之为半导体陶瓷,简称半导瓷。由于半导瓷与半导体单晶相比具有工艺简单价格低廉等优点,因此已经用它制作了多种具有实用价值的敏感元件。在诸多的半导体气敏元件中,氧化锡(SnO_2)制成的气敏元件应用最为广泛。

气敏电阻元件按其结构可分为烧结型、薄膜型和厚膜型,如图 4-1-13 所示。

1. 烧结型元件

如图 4-1-13(a)所示,元件的电极与加热器均埋入气敏材料中,而金属氧化物气敏材料是加压成型后低温烧结制成的。由于制作简单,它是一种最普通的结构形式。

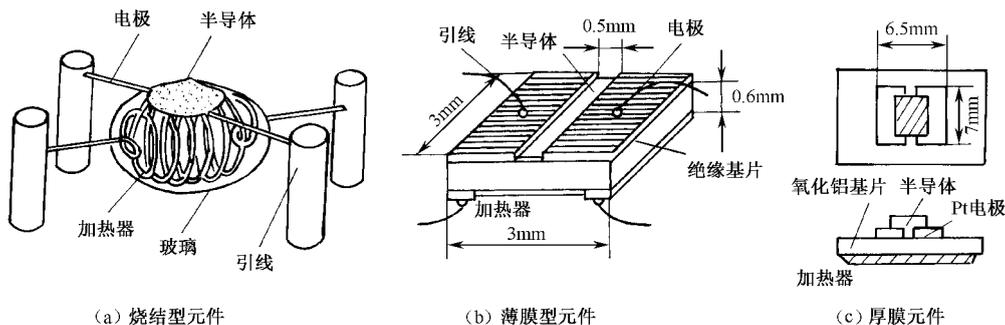


图 4-1-13 半导体气敏电阻元件的结构

2. 薄膜型元件

如图 4-1-13(b)所示,是采用蒸发或溅射方法,在石英基片上形成氧化物薄膜(厚度在 $0.1\mu\text{m}$ 以下),这种方法也很简单,但元件性能差异较大。

3. 厚膜型元件

如图 4-1-13(c)所示,是采用丝网印刷的方法,在绝缘衬底上,印刷一层氧化物浆料形成厚膜(膜厚 μm 级)。它的工艺性和元件强度均好,特性也相当一致,可降低成本和提高批量生产能力。

以上三类气敏元件都附有加热器,以便烧掉附着在探测部位处的油雾、尘埃,同时加速气体的吸附,从而提高元件的灵敏度和响应速度,一般将元件加热到 $200^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$ 。

二、工作原理

气敏电阻按其电阻变化的机理可分为表面控制型和体控制型,前者是使半导体载流子增多或减少来引起半导体电阻率变化,后者是使半导体体内晶格发生变化而引起电阻变化。目前常见的气敏电阻大都属于表面控制型。

这里我们以半导瓷材料 SnO_2 为例说明表面控制型气敏电阻的工作原理,如图 4-1-14 所示。

半导瓷材料 SnO_2 属于 N 型半导体,这类半导瓷气敏电阻元件工作时通常都需要加热。元件在加热开始时阻值急剧地下降,然后上升,一般经 $2\sim 10\text{min}$ 才达到稳定,称之为初始稳定状态,元

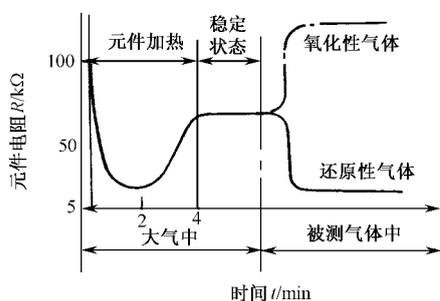


图 4-1-14 N 型半导体气敏电阻的阻值变化

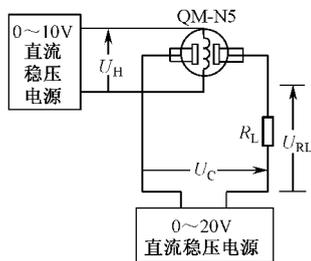
元件只有在达到初始稳定状态后才可用于气体检测。元件在“清洁大气”中因吸附的氧气量固定不变(空气中氧分压几乎固定不变),所以阻值保持一定。一旦某种浓度的被测气体流过元件,则在元件表面产生吸附,元件阻值将随气体浓度变化而变化。如果被测气体是氧化性气体(如 O_2 和 NO_x),被吸附气体分子从气敏元件夺取电子,使 N 型半导体元件中载流子电子减少,因而电阻值增大。如果被测气体为还原性气体(如 H_2 、 CO 、酒精等),气体分子向气敏元件释放电子,使元件中载流子电子增多,因而电阻值下降。N 型半导体气敏元件在气体检测过程中元件阻值的变化情况如图 4-1-14 所示,气敏电阻对不同气体的检测灵敏度(阻值对气体浓度的变化率)差别很大,对乙醚、乙醇、氢气、正己烷等有较高的灵敏度,而对 CO 和甲烷的灵敏度则较低。如在材料中掺入某些金属氯化物(如 $NiCl_2$ 、 $InCl_3$)或贵金属(如 Pt 、 Pd),可提高元件的吸附活性,显著提高元件的灵敏度和扩大测量范围。

三、测量电路

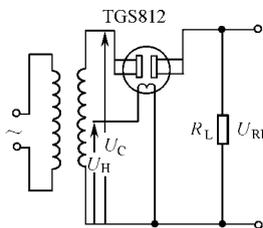
SnO_2 气敏电阻元件的基本测量电路如图 4-1-15 所示。图中 4-1-15(a)为直流电源供电,图 4-1-15(b)和 1-15(c)为交流电源供电。图 4-1-15(a)和图 4-1-15(b)为旁热式气敏电阻电路,图 4-1-15(c)为直热式气敏电阻电路。图中 U_H 为加热回路供电电压, U_C 为测试回路供电电压。负载电阻 R_L 上电压为

$$U_{RL} = \frac{U_C R_L}{R_S + R_L} \quad (4-1-46)$$

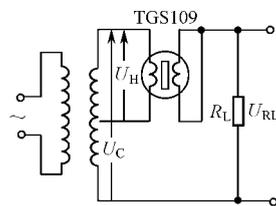
式中, R_S 为气敏电阻元件的电阻。



(a) QM-N5 测试电路



(b) TGS812 测试电路



(c) TGS109 测试电路

图 4-1-15 SnO_2 气敏电阻测量电路

气敏电阻元件也可接入电阻电桥的一臂,如图 4-1-16 所示。图中电池 E 既作为电桥的工作电源,又作为气敏元件的加热电源, RP_4 用来调整加热电流, RP_2 和 RP_3 分别为电桥零点的微调 and 粗调电阻, RP_1 是指示表头 M 的灵敏度调整电阻。

4.1.5 湿敏电阻

人们早就发现了人的头发随大气湿度变化而伸长或缩短的现象,因而制成了毛发湿度计。

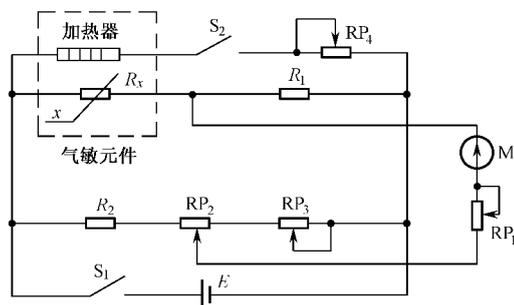


图 4-1-16 气敏电阻测量电路

这类早期的湿度计的响应速度、灵敏度、准确性等指标都不高。20 世纪 50 年代以后,人们研制出了氯化锂湿敏电阻,后来又制出了半导瓷湿敏电阻和高分子膜湿敏电阻。

一、氯化锂湿敏电阻

氯化锂湿敏电阻是利用吸湿性盐类潮解,离子导电率发生变化而制成的测湿元件。典型的氯化锂湿度传感器有登莫(Dunmore)式和浸渍式两种。登莫式传感器是在聚苯乙烯圆管上涂覆一层经过碱化处理的聚乙烯醋酸盐和氯化锂水溶液的混合液,以形成均匀薄膜。浸渍式传感器是在基片材料上直接浸渍氯化锂溶液构成的。这类传感器的浸渍基片材料为天然树皮。这种方式与登莫式不同,它部分地避免了高温下所产生的湿敏膜的误差。由于采用了表面积大的基片材料,并直接在基片上浸渍氯化锂溶液,因此这种传感器具有小型化的特点。它适用于微小空间的湿度检测。

氯化锂是典型的离子晶体。其湿敏机理可如下解释:高浓度的氯化锂溶液中,Li 和 Cl 仍以正、负离子形式存在;而溶液中的离子导电能力与溶液的浓度有关。实践证明,溶液的当量电导随着溶液的浓度增加而下降。当溶液置于一定温度的环境中时,若环境的相对湿度高,溶液将因吸收水分而浓度降低;反之,环境的相对湿度低,则溶液的浓度就高。因此,氯化锂湿敏电阻的阻值将随环境相对湿度的改变而变化,从而实现了湿度的电测量。

二、半导瓷湿敏电阻

制造半导瓷湿敏电阻的材料,主要是不同类型的金属氧化物。有些半导瓷材料的电阻率随湿度的增加而下降,称为负特性湿敏半导瓷,还有一类半导瓷材料的电阻率随湿度的增加而增大,称为正特性湿敏半导瓷。用这些材料制成的湿敏电阻的阻值随着表面所吸附水分的多少而变化,是目前使用较为广泛的湿度传感器。

半导瓷湿敏电阻按其结构可分为烧结型和涂覆膜型两大类。

1. 烧结型湿敏电阻

烧结型半导瓷湿敏电阻的结构如图 4-1-17 所示。其感湿体为 $MgCr_2O_4-TiO_2$ 多孔陶瓷,气孔率达 30%~40%。 $MgCr_2O_4$ 属于 P 型半导体,其特点是感湿灵敏度适中,电阻率低,阻值温度特性好。为改善烧结特性和提高元件的机械强度及抗热骤变特性,在原料中加入 30% mol 的 TiO_2 。这样在 1300℃ 的空气中可烧结成相当理想的陶瓷体。材料烧成型后,切割成所需薄片。在薄片的两面,再印制并烧结叉指型氧化钨电极,就制成了感湿体。由于 500℃ 左右的高温短期加热,可去除油污、有机物和尘埃等污染,所以在这种湿敏元件的感湿体外往往罩上一层加热丝,以便对器件经常进行加热清洗,排除恶劣气氛对器件的污染。器件安装在一种高致密、疏水性的陶瓷片底座上,为避免底座上测量电极 2、3 之间因吸湿和玷污而引起漏电,在测量电极 2、3 的周围设置了隔漏环。图中 1、4 是加热器引出线。

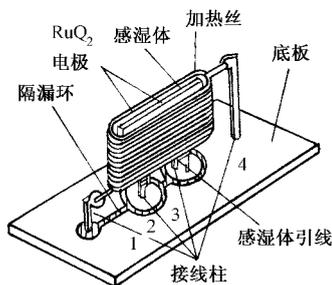


图 4-1-17 烧结型半导瓷湿敏电阻结构

除上述烧结型陶瓷外,还有一种由金属氧化物微粒经过堆积、粘结而成的材料,它也具有较好的感湿特性。用这种材料制作的湿敏器件,一般称为涂覆膜型或瓷粉膜型湿敏器件。涂覆膜型湿敏器件有多种品种,其中比较典型且性能较好的是 Fe_3O_4 湿敏器件。 Fe_3O_4 湿敏器件采用滑石瓷作基片,在基片上用丝网印刷工艺印制成梳状金电极。将纯净的 Fe_3O_4 胶粒,用水调制成适当黏度的浆料,然后将其涂覆在已有金电极的基片上,经低温烘干后,引出电极即可使用。

2. 涂覆膜型 Fe_3O_4 湿敏器件

涂覆膜型 Fe_3O_4 湿敏器件的感湿膜,是结构松散的 Fe_3O_4 微粒的集合体。它与烧结陶瓷相比,缺少足够的机械强度。 Fe_3O_4 微粒之间,依靠分子力和磁力的作用,构成接触型结合。虽然

Fe_3O_4 微粒本身的体电阻较小,但微粒间的接触电阻却很大,这就导致 Fe_3O_4 感湿膜的整体电阻很高。当水分子透过松散结构的感湿膜而吸附在微粒表面上时,将扩大微粒间的面接触,导致接触面电阻的减小;因而这种器件具有负感湿特性。

Fe_3O_4 湿敏器件的主要优点是,在常温、常湿下性能比较稳定,有较强的抗结露能力。在全湿范围内有相当一致的湿敏特性,而且其工艺简单,价格便宜。在精度要求不高(小于 $\pm 2\% \sim \pm 4\% \text{RH}$),测湿范围广,工作在室温附近,无油气及其他污染的情况下还是适用的。

由器件的工作机理可知,这是一种体效应器件。当环境湿度发生变化时,水分子要在数十微米厚的感湿膜体内充分扩散,才能与环境湿度达到新的平衡。这一扩散和平衡过程需时较长,使器件响应缓慢。并且由于吸湿和脱湿过程中响应速度的差别,使器件具有较明显的湿滞效应。这是此类器件的缺点。

三、高分子膜湿敏电阻

高分子膜湿敏电阻是采用人工合成的有机高分子膜作为湿敏材料的电阻式湿度传感器,可分为两种类型。

1. 碳湿敏电阻

在一个憎水性的聚苯乙烯塑料基片的两边印刷和形成一对金电极,再在电极之间的基片表面上浸涂一层由高分子羧乙基纤维素、碳粉和润湿性分散剂组成的混合液,干燥后,即成为一层有胀缩特性、碳粉悬浮其中的高分子感湿膜。通过一对金电极可测量膜的电阻值。

羧乙基纤维素是非导体,而碳粉是导体。由于悬浮状的碳粉相互接触,在两电极间呈现出一定的电阻值,该电阻值的大小与膜中碳粉的数量、碳粒的大小、碳粒之间接触情况以及纤维素的性质有关。羧乙基纤维素具有良好的吸水性能和胀缩特性,当环境湿度增加时,纤维素膨胀,碳粒间接触变得松散,感湿膜的电阻值随之增大。反之,当环境湿度减少时,纤维素收缩,碳粒间接触密切,使感湿膜的电阻值减小。

2. 聚苯乙烯磺酸锂湿敏电阻

作为基片的聚苯乙烯是一种机械强度和绝缘性能都很好的、憎水性高分子聚合物,经化学磺化处理,其表面形成一层由高分子电解质——聚苯乙烯磺酸锂组成的感湿膜。此层感湿膜与基片是有机连成一体,结合非常牢固,不会在高湿时发生流失现象。在此感湿膜上用丝网印刷技术形成一对叉指状电极(该电极材料是由石墨、碳黑和黏结剂调制而成)。这种高分子电解质感湿膜,随吸湿量的多少,离解出能自由移动的离子数也发生变化,于是高分子膜的电阻值明显改变——环境湿度增加时,电阻值减小。

四、测湿电路

1. 不平衡电桥

此法适用于离子导电型测湿元件(如瓷粉膜型湿敏电阻),其电路方框图如图 4-1-18 所示。图中,振荡器对电路提供交流电源,标准频率为 1000Hz 。测量时在电阻电桥的其中一臂插入湿敏电阻作为该桥臂电阻的一个组成部分。湿度变化导致湿敏电阻的阻值变化,由此在电桥中所产生的不平衡信号经放大器放大,再经整流器转换为直流信号,最后由直流微安表读出湿度值。

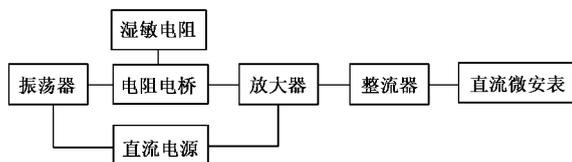


图 4-1-18 不平衡测湿电桥方框图

2. 欧姆定律回路

此法适用于允许流经较大电流、以电子导电为主的烧结型湿敏元件。由于测湿回路本身可以获得较强的信号,故在其电路中可省去电桥和放大器两部分,若直接以 50Hz 市电作为交流电源,

则可以用一降压变压器代替振荡器,获得最简单的电路,如图 4-1-19 所示。图中, R_d 为校满电阻,其阻值与所用的湿敏电阻在电表满量程湿度下所具有的阻值相同,在测湿探头尚未接入之前, R_d 接在回路中,电表指示满量程;插上测湿探头后,电表示值即为探头所在处的 %RH 值。

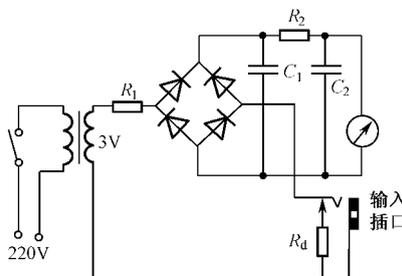


图 4-1-19 欧姆定律回路测湿电路

3. 对供电电源的要求

所有湿敏电阻的供电电源都必须为交流或换向直流(注意:不是脉动直流),以免在工作过程中出现离子的定向迁移和积累,致使元件失效或性能降低。交流或换向直流的频率要求在不产生正负离子定向积聚的情况下尽可能地低一些,如电源频率太高时,将会由于测量回路的附加阻抗而影响测湿的灵敏度和准确度。此外,水分本身是一种介电常数较高的介质,频率太高也会由于其电容效应而影响准确度。然而,从振荡电源的产生、稳定和耦合角度来考虑,若频率偏高一些,则便于设计

处理。所以,对于离子导电型测湿元件,采用电桥法测试电路,电源频率应大于 50Hz,一般以 1000Hz 为宜;而对于电子导电型测湿元件,采用欧姆定律回路法测试时,其频率可低于 50Hz。

4.2 电容式传感器

4.2.1 基本原理与结构类型

一、基本原理

电容式传感器是以各种类型的电容器作为传感元件,将被测量的变化转换为电容量变化的一种传感器。典型的电容式传感器中的电容通常做成平行平面形或平行曲面形。

当极板的几何尺寸(长和宽)远大于极间距离和介质均匀条件下(此时电场的边缘效应可忽略),平行平面形电容器电容为

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (4-2-1)$$

式中, S 为两个极板相互覆盖的面积; d 为两个极板间的距离; ϵ 为极板间介质的介电常数(空气或真空的介电常数为 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)。

当极板间有三层绝缘介质(介电常数分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$, 厚度分别为 d_1, d_2, d_3)时

$$C = \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3}} \quad (4-2-2)$$

平行曲面形电容的典型结构是同轴圆筒形,两个覆盖长度为 L ,半径分别为 R 和 r 的同轴圆筒,在 $L \gg (R-r)$ 条件下(其电场的边缘效应可忽略),其电容可表示为

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln(R/r)} \quad (4-2-3)$$

当 $(R-r) \ll r$ 时,近似有

$$C = \frac{\pi\epsilon L(R+r)}{R-r} \approx \frac{2\pi\epsilon rL}{R-r} \quad (4-2-4)$$

由(4-2-1)式可见,电容量取决于 ϵ, S, d 三个参数,如果让其中一个参数随被测量变化而变化,保持其余两个参数不变,这样就能使电容量与被测量有单值的函数关系,从而把被测量变化转换为电容器电容的变化。这就是电容式传感器的基本工作原理。

二、结构类型

电容式传感器按被测量所改变的电容器的参数分,可分为变极距型、变面积型和变介质型三种类型;按被测位移分,可分为角位移型和线位移型;按组成方式分,可分为单一式和差动式;按电容

极板形状分,可分为平板电容和圆筒电容或平行平面型与平行曲面型。下面分别介绍这些类型的电容式传感器的输出特性。

4.2.2 输出特性

一、变极距型电容传感器

变极距型电容传感器如图 4-2-1(a)所示,设初始时,动极板与定极板间距(极距)为 d_0 ,电容值为

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{d_0} \quad (4-2-5)$$

当被测量变化使动极板上移 Δd 时,电容值为

$$C = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d} = \frac{\epsilon S}{d_0 \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right)} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} \quad (4-2-6)$$

差动式电容由两个定极板和一个共用的动极板构成,如图 4-2-1(b)所示。当动极板位移 Δd 时, $d_1 = d_0 - \Delta d$, $d_2 = d_0 + \Delta d$,据(4-2-6)式,两电容分别为

$$C_1 = C_0 \left/ \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right)\right., \quad C_2 = C_0 \left/ \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0}\right)\right. \quad (4-2-7)$$

由上两式可得差动式变极距型电容传感器的差动电容公式,即

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (4-2-8)$$

二、变面积型电容传感器

1. 线位移式变面积型

原理结构如图 4-2-2(a)所示,被测量使动极板左右移动,引起两极板有效覆盖面积 S 改变,从而使电容相应改变。设极板长 l_0 ,宽 b ,极板间距 d ,介电常数 ϵ ,则初始电容为

$$C_0 = \frac{\epsilon b l_0}{d} \quad (4-2-9)$$

在保持 d 不变的前提下,动极板沿长度方向平移 Δl ,则电容值变为

$$C = \frac{\epsilon b (l_0 - \Delta l)}{d} = C_0 \left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right) \quad (4-2-10)$$

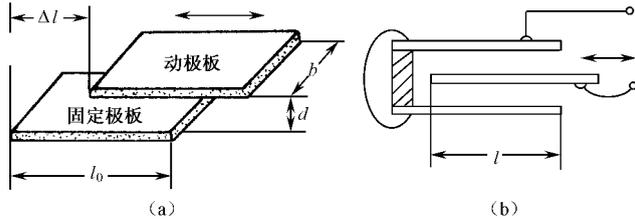


图 4-2-2 线位移式变面积型结构

上述结论是在保持 d 不变的前提下得出的,在极板移动过程中若 d 不能精确保持不变,就会导致测量误差。为了减少这种影响,可以采用图 4-2-2(b)所示中间极移动的结构。

2. 角位移式变面积型

角位移测量用变面积型差动结构,如图 4-2-3 所示。对图(a),初始时据(4-2-1)式有

$$C_{AC_0} = C_{BC_0} = C_0 = \frac{\epsilon \pi (R^2 - r^2)}{2\pi d} \alpha_0 = \frac{\epsilon (R^2 - r^2)}{2d} \alpha_0 \quad (4-2-11)$$

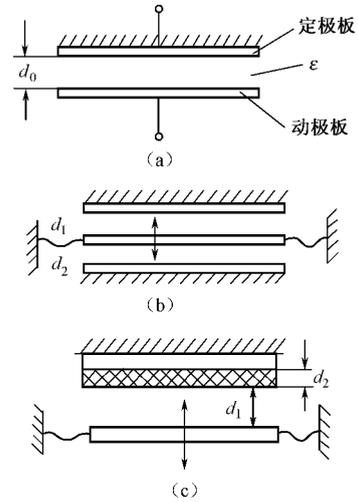


图 4-2-1 变极距型电容传感器

动极板转动 $\Delta\alpha$ 后,差动电容分别为

$$C_1 = C_0 \left(1 - \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0}\right), \quad C_2 = C_0 \left(1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0}\right)$$

由上两式得,图 4-2-3(a)所示差动式变面积型电容传感器的差动电容公式为

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} \quad (4-2-12)$$

对图(b),初始时据(4-2-4)式有

$$C_{AC_0} = C_{BC_0} = C_0 = \frac{\epsilon l r}{R - r} \alpha_0 \quad (4-2-13)$$

动极板转动 $\Delta\alpha$ 后,电容变化同(4-2-12)式。

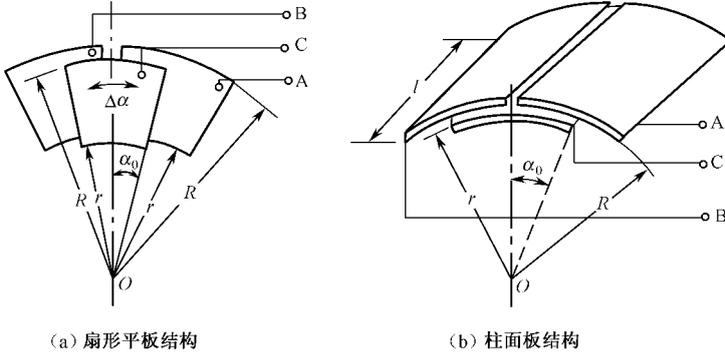


图 4-2-3 变面积型差动式结构

三、变介质型电容传感器

两电容极板之间的介质变化引起电容变化,常见有两种情况:一是两电容极板之间只有一种介质,介质的介电常数随被测非电量例如温度、湿度而变化,电容式温度传感器和电容式湿度传感器就属于这种情况;二是两电容极板之间有两种介质,两介质的位置或厚度变化,电容式位移传感器、电容式厚度传感器、电容式物(液)位传感器就属于这种情况。下面仅以电容式位移传感器为例来说明。其他变介质型电容传感器将在后面的有关章节介绍。

测位移用差动式变介质型电容传感器结构,如图 4-2-4 所示,设极板长为 l ,宽为 b ,间距为 d ,固体介质相对介电常数为 ϵ_r ,长、宽分别为 l, b ,厚为 d ,空气介电常数为 ϵ_0 ,初始时固体介质居中,有

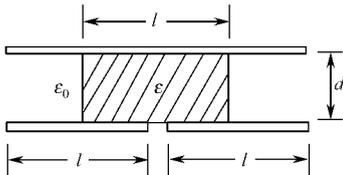


图 4-2-4 线位移式变介质型差动结构

$$C_1 = C_2 = C_0 = \frac{lb}{2d} (\epsilon_0 + \epsilon_0 \epsilon_r) \quad (4-2-14)$$

当固体介质偏离中间位置 Δl 时,差动电容公式为

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1 - \epsilon_r}{1 + \epsilon_r} \frac{2\Delta l}{l} \quad (4-2-15)$$

4.2.3 等效电路分析

前面的所有讨论都是在将电容式传感器视为纯电容的条件下进行的。这在大多数实用情况下是允许的。因为对于大多数电容器,除了在高温、高湿条件下工作,它的损耗通常可以忽略。在低频工作时,它的电感效应也是可以忽略的。

在电容器的损耗和电感效应不可忽略时,电容式传感器的等效电路如图 4-2-5 所示。图中 R_p 为并联损耗电阻,它代表极板间的泄漏电阻和极板间的介质损耗。这部分损耗的影响通常在低频时较大,随着频率增高,容抗减小,它的影响也就减弱了。串联电阻 R_s 代表引线电阻,电容器支架和极板的电阻在几兆赫以下频率工作时,这个值通常是极小的,随着频率的增高而产生的趋肤效