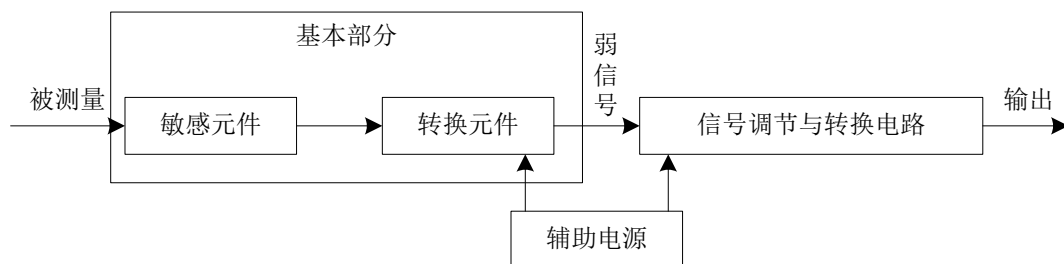


## 《传感器与检测技术》（传感器部分）知识点总结

### 第一章 概述

#### 1. 传感器的定义与组成

- (1) 定义：能感受被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。
- (2) 共性：利用物理定律或物质的物理、化学、生物等特性，将非电量转换成电量。
- (3) 功能：检测和转换。
- (4) 组成：



敏感元件	转换元件
传感器中能直接感受（或响应）被测信息（非电量）的元件	传感器中能将敏感元件的感受（或响应）信息转换为电信号的部分

#### 2. 传感器的分类

输入量（即被测参数）	位移、速度、温度、压力传感器等
输出量	模拟式和数字式
工作原理	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式传感器等
基本效应	物理型、化学型、生物型
构成	物性型和结构型
能量变换关系	有源（能量变换型）、无源（能量控制型）

#### 3. 传感器技术的发展

传感器性能的改善
开展基础理论研究
传感器的集成化
传感器的智能化
传感器的网络化
传感器的微型化

#### 4. 传感器性能的改善

差动技术
平均技术
补偿与修正技术
屏蔽、隔离与干扰抑制
稳定性处理

#### 5. 开展基础理论研究

寻找新原理
-------

开发新材料
采用新工艺
探索新功能

## 6. 传感器的集成化

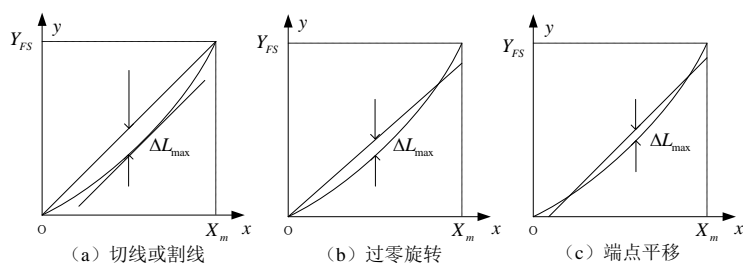
具有同样功能的传感器集成化，即将同一类型的单个传感元件用集成工艺在同一平面上排列起来，形成一维的线性传感器，从而使一个点的测量变成对一个面和空间的测量。
不同功能的传感器集成化，即将具有不同功能的传感器与放大、运算以及温度补偿等环节一体化，组装成一个器件，从而使一个传感器可以同时测量不同种类的多个参数。

## 第二章 传感器的基本特性

### 1. 线性度（传感器的静态特性之一）

(1) 定义：传感器的输入、输出间成线性关系的程度。

(2) 非线性特性的线性化处理：

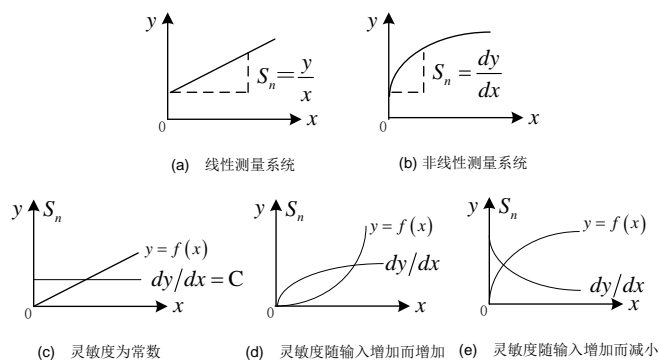


(3) 非线性误差： $\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{max}}{Y_{FS}}$

式中， $\gamma_L$ ——非线性误差（线性度）； $\Delta L_{max}$ ——输出平均值与拟合直线间的最大偏差绝对值； $Y_{FS}$ ——满量程输出。

### 2. 灵敏度（传感器的静态特性之二）

传感器在稳态信号作用下输出量变化对输入量变化的比值。

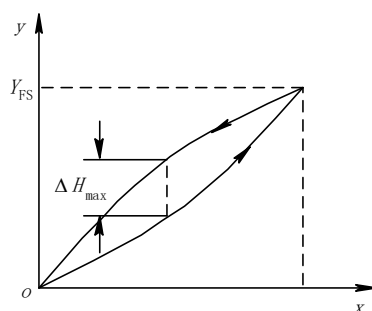


### 3. 分辨率/分辨力（传感器的静态特性之三）

分辨率是指传感器能够感知或检测到的最小输入信号增量。分辨率可以用增量的绝对值或增量与满量程的百分比来表示。

### 4. 迟滞/回程误差（传感器的静态特性之四）

(1) 定义：在相同测量条件下，对应于同一大小的输入信号，传感器正、反行程的输出信号大小不相等的现象。

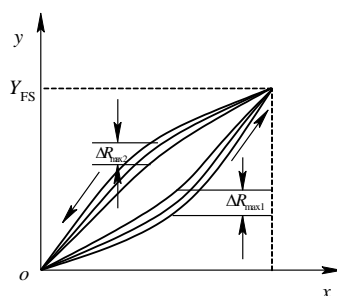


(2) 产生原因：传感器机械部分存在摩擦、间隙、松动、积尘等。

(3) 回程误差： $\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{max}}{Y_{FS}}$

#### 5. 重复性（传感器的静态特性之五）

传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时所得输入—输出特性曲线一致的程度。



$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{max}}{Y_{FS}}$$

#### 6. 漂移（传感器的静态特性之六）

(1) 定义：传感器在输入量不变的情况下，输出量随时间变化的现象。

(2) 产生原因:①传感器自身结构参数老化

②测试过程中环境发生变化

#### 7. 一阶传感器的频率响应（动态特性分析）

一阶传感器的微分方程为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

它可改写为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S_n x(t)$$

式中 $\tau$ ——传感器的时间常数（具有时间量纲）； $S_n$ ——传感器的灵敏度。 $S_n$ 只起使输出量增加 $S_n$ 倍的作用，方便起见，令 $S_n = 1$ 。

(1) 传递函数

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

(2) 频率响应特性

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1}$$

(3) 幅频特性

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

(4) 相频特性

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau)$$

【例 2-1】用一阶传感器测量100Hz的正弦信号，如果要求幅值误差限制在±5%以内，时间常数应取多少？如果用该传感器测量50Hz的正弦信号，其幅值误差和相位误差各为多少？

解：一阶传感器频率响应特性： $H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega)+1}$

$$\text{幅频特性：} A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$

$$\text{由题意有 } |A(\omega) - 1| \leq 5\%, \text{ 即 } \left| \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} - 1 \right| \leq 5\%$$

$$\text{又 } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 200\pi$$

所以： $0 < \tau < 0.523ms$

$$\text{取 } \tau = 0.523ms, \quad \omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 100\pi$$

$$\text{幅值误差：} \Delta A(\omega) = \frac{\frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} - 1}{1} \times 100\% = -1.32\%$$

$$\text{所以有 } -1.32\% \leq \Delta A(\omega) < 0$$

$$\text{相位误差：} \Delta \varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) = -9.3^\circ$$

$$\text{所以有 } -9.3^\circ \leq \Delta \varphi(\omega) < 0$$

【例 2-2】玻璃水银温度计通过玻璃温包将热量传给水银，可用一阶微分方程来表示。现已知某玻璃水银温度计特性的微分方程是

$$2 \frac{dy}{dt} + y = x$$

$y$ 代表水银柱高(mm)， $x$ 代表输入温度(℃)。求该温度计的时间常数及灵敏度。

解：一阶传感器的微分方程为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S_n x(t)$$

式中 $\tau$ ——传感器的时间常数； $S_n$ ——传感器的灵敏度。

∴对照玻璃水银温度计特性的微分方程和一阶传感器特性的通用微分方程，有该温度计的时间常数为2s，灵敏度为1。

8. 一阶传感器的动态标定（一阶传感器的时间常数）

一阶传感器的单位阶跃响应函数为

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

定义并整理后可得

$$z = \ln[1 - y(t)] = -\frac{t}{\tau}$$

或 $\tau = -\frac{t}{z}$ ，即 $z$ 和 $t$ 成线性关系，且有

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\Delta z}$$

因此，只要测量出一系列的 $t-y(t)$ 对应值，就可以根据 $\tau = -\frac{\Delta t}{\Delta z}$ 通过数据处理确定一阶传感器的时间常数。

【例 2-3】某温度传感器为时间常数 $\tau = 3s$ 的一阶系统，当传感器受突变温度作用后，试求传感器指示出温差的 $\frac{1}{3}$ 和 $\frac{1}{2}$ 所需的时间。

解：一阶传感器的单位阶跃响应函数为 $y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$

$$\therefore -\frac{t}{\tau} = \ln[1 - y(t)]$$

$$\therefore t = -\tau * \ln[1 - y(t)]$$

$$\therefore t_{\frac{1}{3}} = -\tau * \ln[1 - \frac{1}{3}] = -\tau * \ln[\frac{2}{3}] = -3 * (-0.405465) = 1.2164s, \quad t_{\frac{1}{2}} = -\tau * \ln[1 - \frac{1}{2}] =$$

$$-\tau * \ln[\frac{1}{2}] = -3 * (-0.693) = 2.08s$$

【例 2-4】某传感器为一阶系统，当受阶跃函数作用时，在 $t = 0$ 时，输出为 $10mv$ ；在 $t = 5s$ 时输出为 $50mv$ ；在 $t \rightarrow \infty$ 时，输出为 $100mv$ 。试求该传感器的时间常数。

解： $y(t) - y(t_0) = [y(t_\infty) - y(t_0)](1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ ,

$$\therefore -\frac{t}{\tau} = \ln[1 - \frac{y(t) - y(t_0)}{y(t_\infty) - y(t_0)}] = \ln[1 - \frac{50 - 10}{100 - 10}] = -0.587787,$$

$$\therefore \tau = 5/0.587787 = 8.5s$$

## 9. 二阶传感器的频率响应（动态特性分析）

典型的二阶传感器的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

因此有（1）传递函数

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

（2）频率响应特性

$$H(j\omega) = \frac{1}{[1 - (\omega/\omega_n)^2] + 2j\zeta(\omega/\omega_n)}$$

（3）幅频特性

$$A(\omega) = \{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_n)^2\}^{-\frac{1}{2}}$$

（4）相频特性

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2}$$

式中 $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ （传感器的固有角频率）； $\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ （传感器的阻尼系数）。

【例 2-5】设一力传感器可简化为典型的质量-弹簧-阻尼二阶系统，已知该传感器的固有频率 $f_0 = 1000Hz$ ，若其阻尼比为 $0.7$ ，试问用它测量频率为 $600Hz$ 、 $400Hz$ 的正弦交变力时，

其输出与输入幅值比 $A(\omega)$ 和相位差 $\varphi(\omega)$ 各为多少?

解: 二阶传感器的频率响应特性:  $H(j\omega) = \frac{1}{[1-(\omega/\omega_n)^2] + 2j\zeta(\omega/\omega_n)}$

幅频特性:  $A(\omega) = \{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_n)^2\}^{-\frac{1}{2}}$

相频特性:  $\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1-(\omega/\omega_n)^2}$

$\therefore$  当  $f = 600\text{Hz}$  时,

$$A(\omega) = \{[1 - (600/1000)^2]^2 + 4 \times 0.7^2 \times (600/1000)^2\}^{-\frac{1}{2}} = 0.947,$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2 \times 0.7 \times (600/1000)}{1 - (600/1000)^2} = -\arctan \frac{0.84}{0.64} = 52.696^\circ,$$

当  $f = 400\text{Hz}$  时,

$$A(\omega) = \{[1 - (400/1000)^2]^2 + 4 \times 0.7^2 \times (400/1000)^2\}^{-\frac{1}{2}} = 0.99,$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2 \times 0.7 \times (400/1000)}{1 - (400/1000)^2} = -\arctan \frac{0.56}{0.84} = 33.69^\circ.$$

10. 二阶传感器的动态标定 (固有角频率和阻尼系数)

(1) 阻尼比:  $\zeta = \frac{1}{\sqrt{(\frac{\pi}{\ln \sigma})^2 + 1}}$ , 其中  $\sigma$  为超调量

(2) 阻尼振荡频率:  $\omega_d = \frac{2\pi}{T}$

(3) 无阻尼时的固有角频率:  $\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}}$

(4) 峰值时间:  $t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$

【例 2-6】某一质量-弹簧-阻尼系统在受到阶跃输入激励下, 出现的超调量大约是最终稳态值的 40%。如果从阶跃输入开始至超调量出现所需的时间为 0.8s, 试估算阻尼比和固有角频率的大小。

$$\text{解: } \zeta = \frac{1}{\sqrt{(\frac{\pi}{\ln \sigma})^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{(\frac{\pi}{\ln 0.4})^2 + 1}} = \frac{1}{3.5714568} = 0.28,$$

$$\text{再根据 } t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \text{ 可得 } \omega_d = \frac{\pi}{t_p} = \frac{\pi}{0.8} = 3.927,$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{3.927}{\sqrt{1-0.28^2}} = 4.09\text{rad/s}$$

11. 共振现象

在  $\omega = \omega_n$  附近, 系统发生共振, 幅频特性受阻尼系数影响极大, 此时有  $A(\omega)_{\max} = \frac{1}{2\zeta}$ 。实际测量时应避免此情况。为了使测试结果能精确地再现被测信号的波形, 在传感器

设计时, 必须使其阻尼系数  $\zeta < 1$ , 固有角频率  $\omega_n$  至少应大于被测信号频率  $\omega$  的 3~5 倍。

【例 2-7】在某二阶传感器的频率特性测试中发现, 谐振发生在频率 216Hz 处, 并得到最大的幅值比为 1.4, 试估算该传感器的阻尼比和固有角频率的大小。

$$\text{解: 当 } \omega = \omega_n \text{ 时共振, 则 } A(\omega)_{\max} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1.4}{1}, \text{ 可解得 } \zeta = 0.36$$

所以： $\omega_n = 2\pi f = 2\pi \times 216 = 1357 \text{ rad/s}$

### 第三章 电阻式传感器

#### 1. 应变式传感器的基本概念

(1) 定义：利用电阻应变片将应变转换为电阻变化的传感器。

(2) 工作原理：当被测物理量作用于弹性元件上，弹性元件在力、力矩或压力等的作用下发生变形，产生相应的应变或位移，然后传递给与之相连的应变片，引起应变片的电阻值变化，通过测量电路，以电量形式输出。输出的电量大小反映被测量的大小。

(3) 结构：应变式传感器由弹性元件上粘贴电阻应变片构成。

(4) 应用：广泛用于力、力矩、压力、加速度、重量等参数的测量。

#### 2. 轴向应变和径向应变的关系

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dL}{L} = -\mu \varepsilon$$

式中 $\mu$ 为电阻丝材料的泊松比，负号表示应变方向相反。

#### 3. 电阻丝的灵敏度系数

(1) 物理意义：单位应变所引起的电阻相对变化量。

(2) 公式表达：

$$K = \frac{\Delta R}{R} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho}{\rho \varepsilon}$$

(3) 分析：灵敏度系数 $K$ 受两个因素影响，一是应变片受力后材料几何尺寸的变化，即 $1 + 2\mu$ ，对于确定的材料， $1 + 2\mu$ 为常数，其值约为1~2之间；二是应变片受力后材料的电阻率发生的变化，即 $\frac{\Delta \rho}{\rho \varepsilon}$ 。大量实验证明，在电阻丝拉伸极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即 $K$ 为常数。

#### 4. 应力

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E}$$

式中 $\varepsilon$ ——电阻丝的轴向相对变化量（轴向应变）； $E$ ——被测试件的弹性模量； $\sigma$ ——被测试件的应力。

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

式中 $F$ ——受力； $A$ ——受力面积。

#### 5. 金属电阻应变片

$$K \approx 1 + 2\mu$$

【例 3-1】将  $100 \Omega$  电阻应变片贴在弹性试件上，如果试件截面积  $S = 0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，弹性模量  $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，若由  $5 \times 10^4 \text{ N}$  的拉力引起应变计电阻变化为  $1 \Omega$ ，求电阻应变片的灵敏度系数。

解：  $K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$

已知  $\Delta R = 1 \Omega$ ,  $\therefore \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{100}$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{50 \times 10^3}{0.5 \times 10^{-4}} \text{ N/m}^2 = 1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1 \times 10^9}{2 \times 10^{11}} = 5 \times 10^{-3}$$

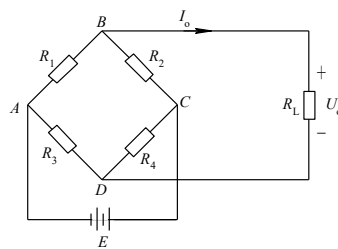
$$\text{所以 } K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \frac{1/100}{5 \times 10^{-3}} = 2$$

## 6. 半导体电阻应变片

$$K \approx \frac{\Delta \rho}{\rho \varepsilon} = \pi \cdot E$$

式中  $\pi$ ——半导体材料的压阻系数；  $E$ ——半导体材料的弹性模量；  $\varepsilon$ ——半导体材料的应变。

## 7. 测量电路——直流电桥



(1) 平衡条件：当  $R_L \rightarrow \infty$  时，电桥输出电压为：  $U_o = E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$

当电桥平衡时，  $U_o = 0$ ，则有：  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 。

(2) 电压灵敏度

$$K_U = \frac{E}{4}$$

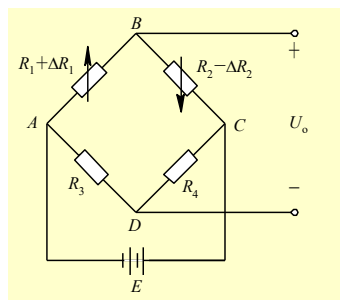
式中  $E$  为电源的电压。

(3) 非线性误差

$$\gamma_L = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}}$$

(4) 减小和消除非线性误差的方法

### ① 半桥差动



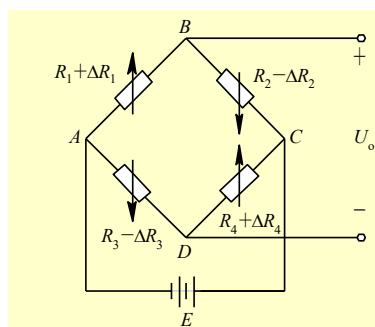
$$U_o = E \left( \frac{\Delta R_1 + R_1}{\Delta R_1 + R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

若  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ，  $R_1 = R_2$ ，  $R_3 = R_4$ ， 则得：  $U_o = \frac{E \Delta R_1}{2 R_1}$ 。



可知： $U_o$ 与 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 成线性关系，无非线性误差，而且电桥电压灵敏度 $K_U = \frac{E}{2}$ ，是单臂工作时的两倍。

## ②全桥差动



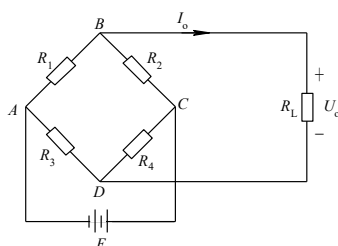
电桥四臂接入四片应变片，即两个受拉应变，两个受压应变，将两个应变符号相同的接入相对桥臂上。若 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ ，且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则：

$$U_o = E \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$K_U = E$$

可知：全桥差动电路不仅没有非线性误差，而且电压灵敏度为单片工作时的4倍。

【例3-2】如题图所示，设负载电阻为无穷大（开路），图中 $E = 4V$ ， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100\Omega$ ，试求：



(1)  $R_1$ 为金属电阻应变片，其余为外接电阻，当 $R_1$ 的增量为 $\Delta R_1 = 1.0\Omega$ 时，电桥的输出电压 $U_o = ?$

(2)  $R_1, R_2$ 都是电阻应变片，且批号相同，感应应变的极性和大小都相同，其余为外接电阻，电桥的输出电压 $U_o = ?$

(3)  $R_1, R_2$ 都是电阻应变片，且批号相同，感应应变的大小为 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = 1.0\Omega$ ，但极性相反，其余为外接电阻，电桥的输出电压 $U_o = ?$

解：(1) 单臂电桥中， $U_o = E \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left( \frac{101}{101 + 100} - \frac{1}{2} \right) \approx 0.00995V$

(2) 若极性相同， $U_o = E \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left( \frac{101}{101 + 101} - \frac{1}{2} \right) = 0V$

(3) 若极性相反，即为半桥差动

$$U_o = E \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 - \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left( \frac{101}{101 + 99} - \frac{1}{2} \right) = 0.02V$$

【例3-3】设电阻应变片的灵敏度系数 $K = 2.05$ ，未受应变时， $R_1 = 120\Omega$ 。当试件受力 $F$ 时，电阻应变片承受平均应变值 $\varepsilon = 800\mu m/m$ 。试求：

(1) 电阻应变片的电阻变化量和电阻相对变化量；

(2) 将电阻应变片置于单臂测量电桥，电桥电源电压为直流3V，求电桥输出电压及其非线性

误差；

(3) 如果要减小非线性误差，应采取何种措施？分析其电桥输出电压及非线性误差的大小。

解：(1) 由  $K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$  得  $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$ ,

$$\Delta R_1/R_1 = K\varepsilon = 2.05 \times 800 \times 10^{-6} = 1.64 \times 10^{-3},$$

$$\Delta R_1 = R_1 \times (\Delta R_1/R_1) = 120 \times 1.64 \times 10^{-3} = 0.1968 \Omega$$

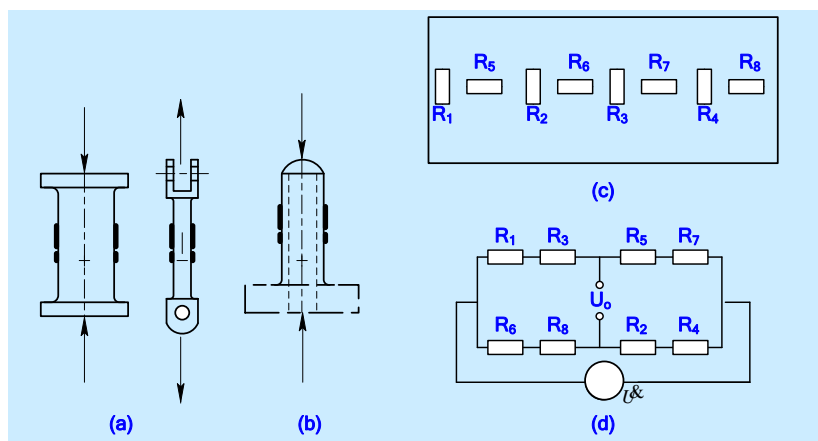
$$(2) \quad U_o = E \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 3 \times \left( \frac{120.1968}{120.1968 + 120} - \frac{1}{2} \right) \approx 0.00123V$$

$$\gamma_L = \frac{\Delta R_1/R_1}{2 + \Delta R_1/R_1} \times 100\% = \frac{0.00164}{2 + 0.00164} \times 100\% \approx 0.082\%$$

(3) 可以采用差动电桥技术。若采用半桥差动， $U_o = \frac{E \Delta R_1}{2 R_1}$ ，此时没有非线性误差；若采用

半桥差动， $U_o = E \frac{\Delta R_1}{R_1}$ ，此时也没有非线性误差。

#### 8. 电阻式力传感器——柱（筒）式力传感器



电阻应变片粘贴在弹性体外壁应力分布均匀的中间部分，对称地粘贴多片，弹性元件上电阻应变片的粘贴和桥路的连接应尽可能消除载荷偏心和弯矩的影响， $R_1$ 和 $R_3$ 串接， $R_2$ 和 $R_4$ 串接，并置于桥路相对桥臂上以减小弯矩影响，横向贴片（ $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 和 $R_8$ ）主要作温度补偿用。

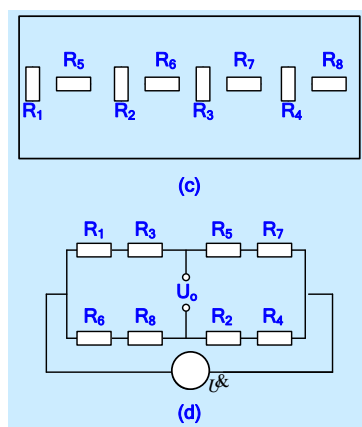
【例 3-4】一个量程为  $10kN$  的应变式测力传感器，其弹性元件为薄壁圆筒轴向受力，外径  $20mm$ ，内径  $18mm$ ，在其表面粘贴 8 个应变片，4 个沿周向粘贴，4 个沿轴向粘贴，应变片的电阻值均为  $120\Omega$ ，灵敏度为 2.0，波松比为 0.3，材料弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11} N/m^2$ 。

(1) 绘出弹性元件贴片位置及全桥电路；

(2) 计算传感器在满量程时，各应变片电阻变化；

(3) 当桥路的供电电压为 10V 时，计算传感器的输出电压。

解：(1) 绘出弹性元件贴片位置及全桥电路如下图所示：



(2) 圆桶截面积:  $A = \pi(R^2 - r^2) = \pi(10^2 - 9^2) \times 10^{-6} = 59.69 \times 10^{-6} m^2$   
应变片 1、2、3、4 感受轴向应变, 即:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_x$$

应变片 5、6、7、8 感受径向应变, 即:

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8 = \varepsilon_y$$

满量程时: 由电阻应变片灵敏度公式  $K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$  得  $\Delta R = K\varepsilon R$ ,

由应力与应变的关系  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ , 及应力与受力面积的关系  $\sigma = \frac{F}{A}$ , 得  $\varepsilon = \frac{F}{AE}$ ,

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = K \frac{F}{AE} R = 2.0 \times \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} \times 120 = 0.19143 \Omega$$

再根据  $\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dL}{L} = -\mu \varepsilon$ , 可得

$$\Delta R_5 = \Delta R_6 = \Delta R_7 = \Delta R_8 = -\mu \Delta R_1 = -0.3 \times 0.19143 = -0.05743 \Omega$$

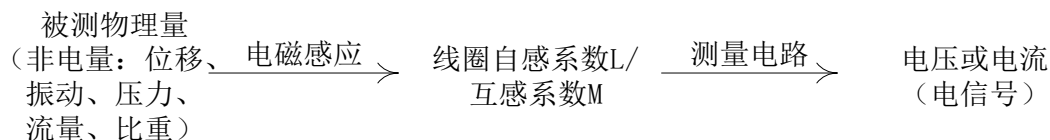
$$\begin{aligned} (3) \Delta U &= \dot{U} \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1 + R_3 + \Delta R_3}{R_1 + \Delta R_1 + R_3 + \Delta R_3 + R_5 + \Delta R_5 + R_7 + \Delta R_7} - \frac{R_6 + \Delta R_6 + R_8 + \Delta R_8}{R_6 + \Delta R_6 + R_8 + \Delta R_8 + R_2 + \Delta R_2 + R_4 + \Delta R_4} \right] \\ &= \dot{U} \left[ \frac{2\Delta R_1 + 2\mu\Delta R_1}{4R_1 + 2\Delta R_1 - 2\mu\Delta R_1} \right] \approx \dot{U} \frac{\Delta R_1 + \mu\Delta R_1}{2R_1} = \frac{\dot{U}}{2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} + \mu \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) \\ &= \frac{\dot{U}}{2} K(1 + \mu) \frac{F}{AE} = \frac{10}{2} \times 2.0 \times (1 + 0.3) \times \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} = 0.01037V \end{aligned}$$

## 第四章 电感式传感器

### 1. 电感式传感器概述

(1) 工作基础: 电磁感应, 即利用线圈自感或互感的改变来实现非电量测量。

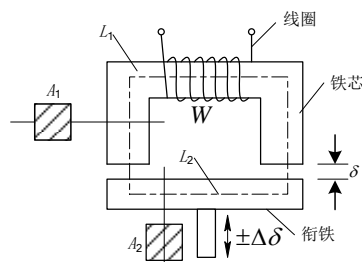
(2) 工作原理:



(3) 分类: 变磁阻式、变压器式、涡流式

## 2. 变磁阻式传感器 (自感式)

(1) 工作原理: 变磁阻式传感器由线圈、铁芯和衔铁三部分组成。铁芯和衔铁由导磁材料制成。



在铁芯和衔铁之间的气隙, 传感器的运动部分与衔铁相连。当衔铁移动时, 气隙厚度 $\delta$ 发生改变, 引起磁路中磁阻变化, 从而导致电感线圈的电感值变化, 因此只要能测出这种电感量的变化, 就能确定衔铁位移量的大小和方向。

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

上式表明: 当线圈匝数为常数时, 电感 $L$ 仅仅是磁路中磁阻 $R_m$ 的函数, 改变 $\delta$ 或 $A_0$ 均可导致电感变化, 因此变磁阻式传感器又可分为变气隙厚度 $\delta$ 的传感器和变气隙面积 $A_0$ 的传感器。

目前使用最广泛的是变气隙厚度式电感传感器。

### (2) 变隙式电压传感器的 $L-\delta$ 特性

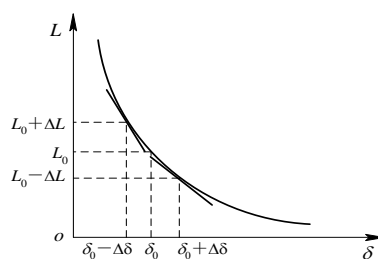


图5.2 变磁阻式传感器的 $L-\delta$ 特性

当衔铁处于初始位置时, 初始电感量为

$$L_0 = \frac{\mu_0 A_0 W^2}{2\delta_0}$$

经线性处理后, 有

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

### (3) 灵敏度

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

## (4) 差动变隙式电感传感器

## ①线性处理结果

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

## ②灵敏度

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

## ③比较单线圈式和差动式

差动式变间隙电感传感器的灵敏度是单线圈式的两倍，差动式的线性度得到明显改善。

【例4-1】已知变气隙厚度电感式传感器的铁芯截面积  $S = 1.5\text{cm}^2$ ，磁路长度  $L = 20\text{cm}$ ，相对磁导率  $\mu_r = 5000$ ，气隙初始厚度  $\delta_0 = 0.5\text{cm}$ ， $\Delta\delta = \pm 0.1\text{mm}$ ，真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ ，线圈匝数  $N = 3000$ ，求单线圈式传感器的灵敏度  $\Delta L/\Delta\delta$ 。若将其做成差动结构，灵敏度将如何变化？

解：根据线性处理结果  $\Delta L = L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$ ，

可得单线圈式传感器的灵敏度  $K = \frac{\Delta L}{\Delta\delta} = \frac{L_0}{\delta_0}$

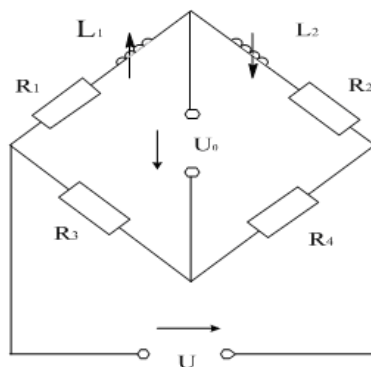
根据初始电感公式  $L_0 = \frac{\mu_0 A_0 W^2}{2\delta_0}$ ，

可得  $L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A_0}{2\delta_0} = \frac{3000^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 1.5 \times 10^{-4}}{2 \times 0.5 \times 10^{-2}} \text{H} = 54\pi \times 10^{-3} \text{H}$ ，

所以， $K = \frac{54\pi \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-2}} = 10.8\pi = 34$ 。

做成差动结构形式，灵敏度将提高一倍。

## 3. 电感式传感器的测量电路——交流电桥式



把传感器的两个线圈作为电桥的两个桥臂  $Z_1$  和  $Z_2$ ，另外两个相邻的桥臂选用纯电阻。当衔铁上移时，设有

$$Z_1 = Z_0 + \Delta Z_1$$

$$Z_2 = Z_0 - \Delta Z_2$$

$$Z_0 = R + j\omega L_0$$

式中  $Z_0$ ——衔铁位于中心位置时单个线圈的复阻抗； $\Delta Z_1$ ， $\Delta Z_2$ ——衔铁偏离中心位置时两线圈的复阻抗变化量。

对于高  $Q$  值的差动电感式传感器，有

$$\Delta Z_1 = j\omega \Delta L_1$$

$$\Delta Z_2 = j\omega \Delta L_2$$

$$Z_0 \approx j\omega L_0$$

所以, 此时电桥的输出电压为

$$\dot{U}_o = \dot{U}_i \left[ \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{R}{R + R} \right] = \dot{U}_i \frac{Z_2 - Z_1}{2(Z_1 + Z_2)} = -\dot{U}_i \frac{\Delta Z_1 + \Delta Z_2}{2(Z_1 + Z_2)}$$

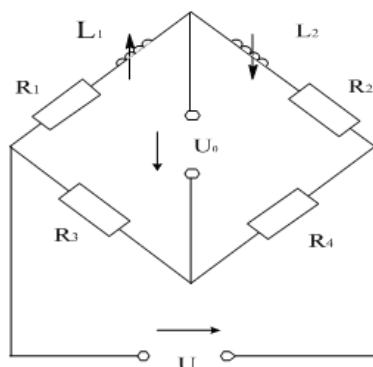
对于差动式结构,  $\Delta L_1 = \Delta L_2$ ,  $\Delta Z_1 = \Delta Z_2$ , 则有

$$\dot{U}_o = -\frac{\dot{U}_i \Delta \delta}{2 \delta_0}$$

由此可见, 电桥输出电压与气隙厚度的变化量  $\Delta \delta$  成正比。

当衔铁下移时,  $Z_1$ 、 $Z_2$  的变化方向相反, 类似地, 可推得  $\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i \Delta \delta}{2 \delta_0}$

【例4-2】有一只差动电感位移传感器, 已知电源电压  $\dot{U} = 4V$ ,  $f = 400Hz$ , 传感器线圈电阻与电感分别为  $R = 40\Omega$ ,  $L = 30mH$ , 用两只匹配电阻设计成四臂等阻抗电桥, 如题图所示, 试求:



(1) 匹配电阻  $R_3$  和  $R_4$  的值为多少时才能使电压灵敏度达到最大。

(2) 当  $\Delta Z = 10\Omega$  时, 分别接成单臂和差动电桥后的输出电压值。

解: (1) 根据  $\dot{U}_o = \dot{U} \left[ \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{R}{R + R} \right] = \dot{U} \frac{Z_2 - Z_1}{2(Z_1 + Z_2)}$ , 可知电桥的输出电压、灵敏度与匹配电阻

$R_3$ 、 $R_4$  的大小无关, 但是题目要求用两只匹配电阻设计成四臂等阻抗电桥, 即有

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$$

$$Z_1 = Z_2 = R + j\omega L = R + j2\pi fL$$

所以,

$$R_3 = R_4 = |R + j2\pi fL| = \sqrt{R^2 + (j2\pi fL)^2} = \sqrt{40^2 + (2\pi \times 400 \times 30 \times 10^{-3})^2} = 85.34\Omega$$

(2) 若采用单臂电桥:

根据  $\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i \Delta Z}{4 Z_1}$  可得

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i \Delta Z}{4 Z_1} = \frac{4}{4} \frac{10}{\sqrt{40^2 + (2\pi \times 400 \times 30 \times 10^{-3})^2}} = 0.117V$$

若采用差动电桥:

根据  $\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i \Delta Z}{2 Z_1}$ , 可得

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_i \Delta Z}{2 Z_1} = \frac{4}{2} \frac{10}{\sqrt{40^2 + (2\pi \times 400 \times 30 \times 10^{-3})^2}} = 0.234V$$

## 第五章 电容式传感器

### 1. 电容式传感器概述

电容式传感器利用了将非电量的变化转换为电容量的变化来实现对物理量的测量。电容式传感器广泛用于位移、振动、角度、加速度，以及压力、差压、液面（料位或物位）、成份含量等的测量。

### 2. 电容式传感器的结构

电容式传感器的常见结构包括平板状和圆筒状，简称平板电容器或圆筒电容器。

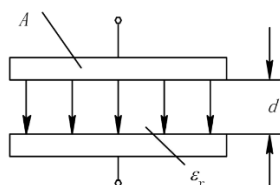


图 5.1 平板电容式传感器的结构

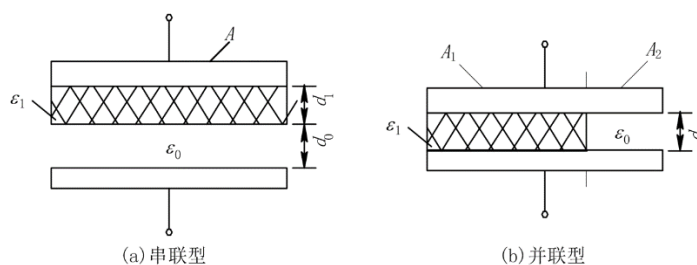
$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$$

式中 $A$ ， $d$ ——两平行板所覆盖的面积及之间的距离； $\varepsilon$ ， $\varepsilon_r$ ——电容极板间介质的介电常数和相对介电常数； $\varepsilon_0$ ——自由空间（真空）介电常数， $\varepsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$

由上式可见，当被测参数变化引起 $A$ 、 $\varepsilon_r$ 或 $d$ 变化时，将导致平板电容式传感器的电容量 $C$ 随之发生变化。在实际使用中，通常保持其中两个参数不变，而只变其中一个参数，把该参数的变化转换成电容量的变化，通过测量电路转换为电量输出。因此，平板电容式传感器可分为三种：变极板覆盖面积的变面积型、变介质介电常数的变介质型和变极板间距离的变极距型。

### 3. 变介质型电容式传感器（平板结构）

平板结构变介质型电容式传感器的原理如下图所示。由于在两极板间所加介质（其介电常数为 $\varepsilon_1$ ）的分布位置不同，可分为串联型和并联型两种情况。



对于串联型，可认为是上下两个不同介质（ $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_0$ ）电容式传感器的串联，此时

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A}{d_1}$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0}$$

故总的电容值为

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A}{\varepsilon_1 d_0 + d_1}$$

当未加入介质 $\varepsilon_1$ 时的初始电容为

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0 + d_1}$$

介质改变后的电容改变量为

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 \frac{d_0}{d_1} + 1}$$

可见，介质改变后的电容改变量与所加介质的介电常数 $\varepsilon_1$ 成非线性关系。

对于并联型，可认为是左右两个不同介质（ $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_0$ ）电容式传感器的并联，此时

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A_1}{d}$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 A_2}{d}$$

故总的电容值为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A_1 + \varepsilon_0 A_2}{d}$$

当未加入介质 $\varepsilon_1$ 时的初始电容为

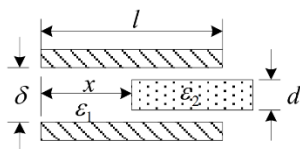
$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 (A_1 + A_2)}{d}$$

介质改变后的电容改变量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 A_1 (\varepsilon_1 - 1)}{d}$$

可见，介质改变后的电容改变量与所加介质的介电常数 $\varepsilon_1$ 成线性关系。

【例 5-1】试推导题图所示变介质型电容式位移传感器的特性方程 $C = f(x)$ 。设真空的介电常数为 $\varepsilon_0$ ，图中 $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ，极板宽度为 $W$ 。其它参数如题图所示。



解：总体来看，该电容相当于左侧只有一种介质（ $\varepsilon_1$ ）的电容器 $C_1$ 和右侧有两种介质的电容器 $C_2$ 的并联；局部来看，电容器 $C_2$ 相当于一个介电常数为 $\varepsilon_1$ 的电容器 $C_2'$ 和一个介电常数为 $\varepsilon_2$ 的电容器 $C_2''$ 的串联。

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 x W}{\delta}, \quad C_2' = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 (l-x) W}{(\delta-d)}, \quad C_2'' = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 (l-x) W}{d}, \quad C_2 = \frac{C_2' C_2''}{C_2' + C_2''} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 (l-x) W}{\varepsilon_1 d + \varepsilon_2 (\delta-d)}$$

总的电容量为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 x W}{\delta} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 (l-x) W}{\varepsilon_1 d + \varepsilon_2 (\delta-d)}$$

【例 5-2】在上题中，设 $\delta = d = 1\text{mm}$ ，极板为正方形（边长 $50\text{mm}$ ）。 $\varepsilon_1 = 1$ ， $\varepsilon_2 = 4$ 。试针对 $x = 0 \sim 50\text{mm}$ 范围内，绘出此位移传感器的特性曲线，并给以适当说明。

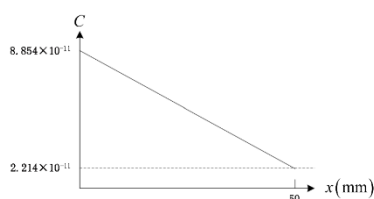
解：特征方程

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 x l}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 (l-x) l}{d}$$

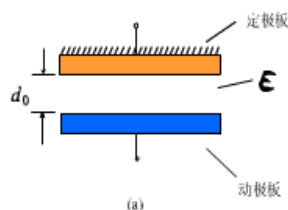


$$= \frac{\varepsilon_0}{d} [\varepsilon_1 x l + \varepsilon_2 (l - x) l]$$

$$= 8.854 \times 10^{-11} - 1.3281 \times 10^{-12} x$$



#### 4. 变极距型电容式传感器（平板结构）



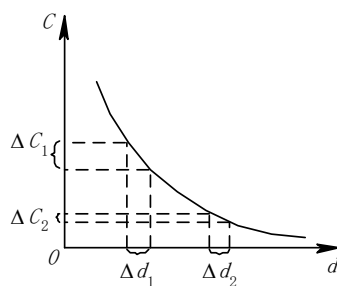
当平板电容式传感器的介电常数和面积为常数，初始极板间距为 $d_0$ 时，其初始电容值为

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0}$$

测量时，一般将平板电容器的一个极板固定（称为定极板），另一个极板与被测物体相连（称为动极板）。如果动极板因为被测参数改变而位移，导致平板电容器极板间距缩小 $\Delta d$ ，电容量增大 $\Delta C$ ，则有

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$

由上式可知，传感器的输出特性 $C = f(d)$ 是非线性关系，则可得到平板电容器极板间距的变化引起电容量的相应变化关系如下图所示：



经线性化处理后，可得

$$\Delta C = \frac{C_0}{d_0} \Delta d$$

【例 5-3】某一电容测微仪，其传感器的圆形极板半径 $r = 4\text{mm}$ ，工作初始间隙 $d = 0.3\text{mm}$ ，问：（1）工作时，如果传感器与工件的间隙变化量 $\Delta d = 2\mu\text{m}$  时，电容变化量为多少？

（2）如果测量电路的灵敏度 $S_1 = 100\text{mV/pF}$ ，读数仪表的灵敏度 $S_2 = 5 \text{ 格/mV}$ ，在 $\Delta d = 2\mu\text{m}$  时，读数仪表的示值变化多少格？

解：（1）变极距型电容式传感器经线性化处理后，有

$$\Delta C = \frac{C_0}{d_0} \Delta d$$

即有

$$\begin{aligned} \Delta C &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A \Delta d}{d_0^2} \\ &= \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.14 \times (4 \times 10^{-3})^2}{0.3 \times 10^{-3}} \times \frac{2 \times 10^{-6}}{0.3 \times 10^{-3}} \\ &= 9.88 \times 10^{-3} pF \end{aligned}$$

$$(2) \Delta U = \Delta C \times S_1 = 1mV, \text{格数变化} = \Delta U \times S_2 = 5 \text{ 格}$$

## 第六章 压电式传感器

### 1. 压电效应

(1) 正压电效应：是对某些电介质沿一定方向施以外力使其变形时，其内部将产生极化现象而使其表面出现电荷集聚的现象。在外力去除后又重新恢复到不带电状态，是机械能转变为电能。

(2) 逆压电效应：当在片状压电材料的两个电极面上加交流电压，那么压电片将产生机械振动，即压电片在电极方向上产生伸缩形变，即电致伸缩效应。

### 2. 压电式传感器

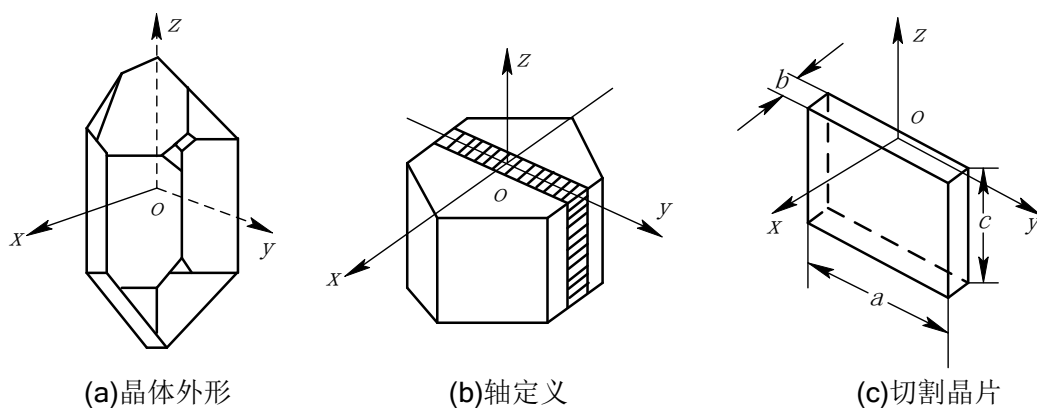
(1) 定义：基于正压电效应可制成机械能的敏感器（检测器），即压电式传感器。当有力作用于压电材料上时，传感器就有电荷（电压）输出。压电式传感器是典型的有源传感器。

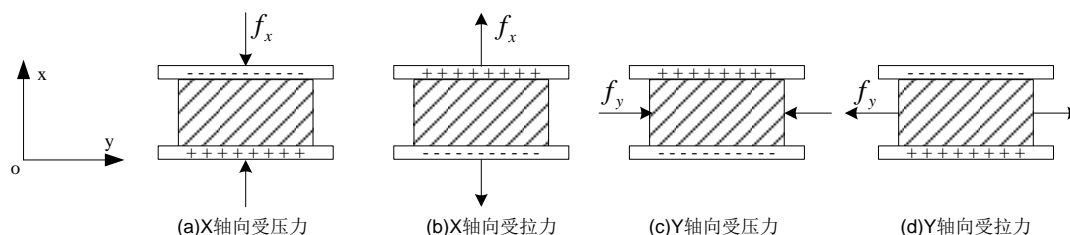
(2) 特点：结构简单、体积小、重量轻、工作频带宽、灵敏度高、信噪比高、工作可靠、测量范围广。

(3) 用途：主要用于与力相关的动态参数测试，若动态力、机械冲击、振动等，可以把加速度、压力、位移、温度等许多非电量转换为电量。

### 3. 常见的压电材料

#### (1) 石英晶体（单晶体）





沿 $x$ 轴方向施加作用力。将在 $yz$ 平面上产生电荷，其大小为

$$q_x = d_{11}f_x$$

式中 $d_{11}$ —— $x$ 方向受力的压电系数； $f_x$ —— $x$ 轴方向作用力。

沿 $y$ 轴方向施加作用力。仍然在 $yz$ 平面上产生电荷，但极性方向相反，其大小为

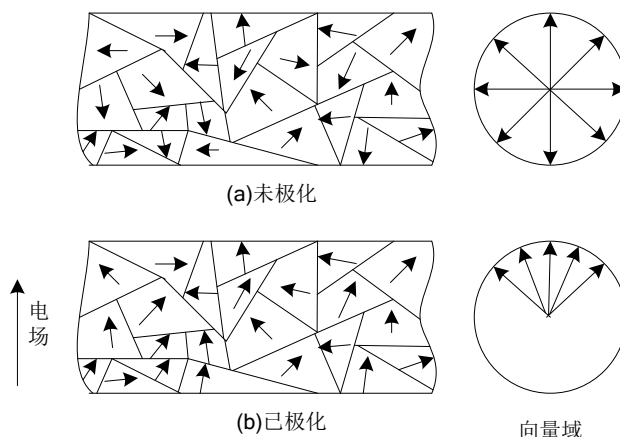
$$q_y = d_{12} \frac{a}{b} f_y = -d_{11} \frac{a}{b} f_y$$

式中 $d_{12}$ —— $y$ 方向受力的压电系数（石英轴对称， $d_{12} = -d_{11}$ ）； $a, b$ ——切片的长度和厚度； $f_y$ —— $y$ 轴方向作用力。

## (2) 压电陶瓷（多晶体）

压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料。材料内部的晶粒有许多自发极化的电畴，它有一定的极化方向，从而存在电场。在无外电场作用时，电畴在晶体中杂乱分布，它们各自的极化效应被相互抵消，压电陶瓷内极化强度为零。因此原始的压电陶瓷呈中性，不具有压电性质。

在陶瓷上施加外电场时，电畴的极化方向发生转动，趋向于按外电场方向的排列，从而使材料得到极化。外电场愈强，就有更多的电畴更完全地转向外电场方向。让外电场强度大到使材料的极化达到饱和的程度，即所有电畴极化方向都整齐地与外电场方向一致时，当外电场去掉后，电畴的极化方向基本不变，即剩余极化强度很大，这时的材料才具有压电特性。



极化后陶瓷材料整体的极化方向不变，即有很强的剩余极化，这时候材料具有压电特性，当陶瓷材料受到外力作用时，电畴的界限发生移动，电畴发生偏转，从而引起剩余极化强度的变化，因而在垂直于极化方向的平面上将出现极化电荷的变化。

电荷量的大小与外力成如下的正比关系：

$$q = d_{33}F$$

式中 $d_{33}$ ——压电陶瓷的压电系数； $F$ ——作用力。

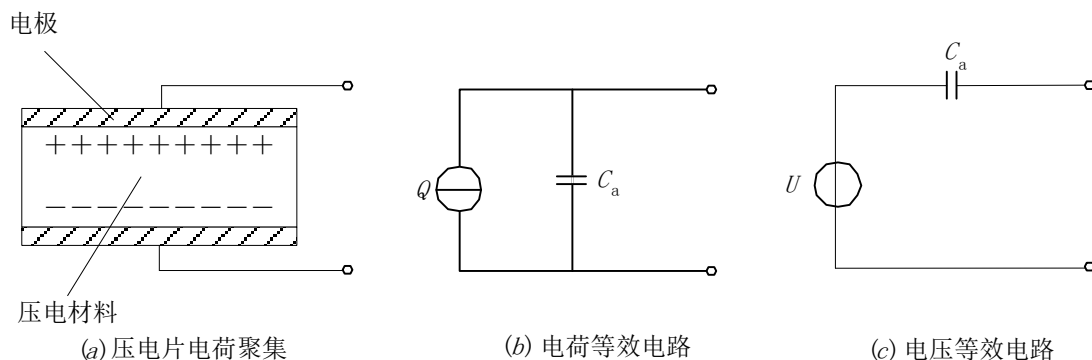
最早使用的压电陶瓷材料是钛酸钡（ $BaTiO_3$ ）；目前使用较多的压电陶瓷材料是锆钛酸铅（PZT）系列。

### (3) 压电高分子材料

高分子材料属于有机分子半结晶或结晶聚合物，其压电效应较复杂，不仅要考虑晶格中均匀的内应变对压电效应的贡献，还要考虑高分子材料中作非均匀内应变所产生的各种高次效应以及同整个体系平均变形无关的电荷位移而表现出来的压电特性。

压电高分子材料可以降低材料的密度和介电常数，增加材料的柔性，其压电性能较压电陶瓷有所改善。

### 4. 压电式传感器的等效电路



压电式传感器可以等效为一个电容器，正负电荷聚集的两个表面相当于电容的两个极板，极板间物质相当于一种介质，其电容量为

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

式中  $A, d$ ——压电片的面积和厚度； $\epsilon_r$ ——压电材料的相对介电常数。

当压电元件受外力作用时，其两表面产生等量的正负电荷，电量为  $Q$ 。此时，压电元件的开路电压为

$$U = \frac{Q}{C_a}$$

因此，压电式传感器可以等效为一个电荷源  $Q$  和一个电容器  $C_a$  并联；也可以等效为一个与电容相串联的电压源。

【例 6-1】有一压电晶体，其面积为  $20\text{mm}^2$ ，厚度为  $10\text{mm}$ ，当受到压力  $p = 10\text{MPa}$  作用时，求产生的电荷量及输出电压：

(1) 零度 X 切的纵向石英晶体 ( $\epsilon_r = 4.5$ ,  $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12}\text{C/N}$ )；

(2) 利用纵向效应的  $\text{BaTiO}_3$  ( $\epsilon_r = 1900$ ,  $d_{33} = 191 \times 10^{-12}\text{C/N}$ )。

解：由题意知，压电晶体受力为  $F = pS = 10 \times 10^6 \times 20 \times 10^{-6} = 200\text{N}$

(1) 根据等效电容公式有

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 4.5 \times 20 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-3}} = 7.97 \times 10^{-14}\text{F}$$

根据单晶体沿  $x$  轴方向施加作用力，在  $yz$  平面上产生电荷公式有

$$Q = d_{11}F = 2.31 \times 10^{-12} \times 200 = 462 \times 10^{-12}\text{C}$$

最后根据压电元件的开路电压公式有

$$U = \frac{Q}{C_a} = \frac{462 \times 10^{-12}}{7.97 \times 10^{-14}} = 5.796 \times 10^3\text{V}$$

(2) 根据等效电容公式有

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1900 \times 20 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-3}} = 33.6 \times 10^{-12}\text{F}$$

根据陶瓷材料产生电荷公式有

$$Q = d_{33}F = 191 \times 10^{-12} \times 200 = 3.82 \times 10^{-8} C$$

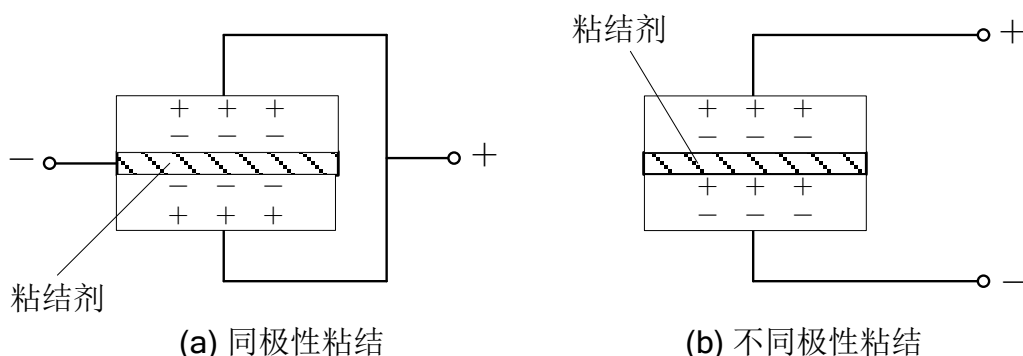
最后根据压电元件的开路电压公式有

$$U = \frac{Q}{C_a} = \frac{3.82 \times 10^{-8}}{33.6 \times 10^{-12}} = 1.137 \times 10^3 V$$

### 5. 压电式传感器的测量电路

由于压电式传感器本身的内阻抗很高，输出能量较小，因此它的测量电路通常需要接入一个高输入阻抗的前置放大器。其作用是：①把它的高输入阻抗变换为低输出阻抗；②对传感器输出的微弱信号进行放大。根据压电式传感器的两种等效方式可知，压电式传感器可以输出电压信号或电荷信号，因此前置放大器也有两种形式：电荷放大器和电压放大器。

### 6. 压电元件的连接



单片压电元件产生的电荷量甚微，为了提高压电传感器的输出灵敏度，在实际应用中常采用两片（或两片以上）同型号的压电元件粘结在一起。

(a) 从电路上看，这是并联接法，类似两个电容的并联。所以，外力作用下正负电极上的电荷量增加了 1 倍，电容量也增加了 1 倍，输出电压与单片时相同。适宜测量慢变信号且以电荷作为输出量的场合。

(b) 从电路上看是串联的，两压电片中间粘接处正负电荷中和，上、下极板的电荷量与单片时相同，总电容量为单片的一半，输出电压增大了 1 倍。适宜以电压作输出信号且测量电路输入阻抗很高的场合。

【例 6-2】某压电式压力传感器为两片石英晶片并联，每片厚度  $h = 0.2mm$ ，圆片半径  $r = 1cm$ ， $\epsilon_r = 4.5$ ， $x$  切型  $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12} C/N$ 。当  $0.1MPa$  压力垂直作用于  $P_x$  平面时，求传感器输出电荷  $Q$  和电极间电压  $U_a$  的值。

解：当两片石英晶体并联时，所产生电荷

$$Q_{\text{并}} = 2Q = 2d_{11}F = 2 \times 2.31 \times 10^{-12} \times 0.1 \times 10^6 \times \pi \times (1 \times 10^{-2})^2 = 145 \times 10^{-12} C$$

总电容为

$$C_{\text{并}} = 2C = 2 \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = 2 \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 4.5 \times \pi \times (1 \times 10^{-2})^2}{0.2 \times 10^{-3}} = 125.1 \times 10^{-12} F$$

电极间电压为

$$U_{\text{并}} = \frac{Q_{\text{并}}}{C_{\text{并}}} = \frac{145 \times 10^{-12}}{125.1 \times 10^{-12}} = 1.16 V$$

## 第八章 热电式传感器

### 1. 热电效应

把两种不同的导体或半导体（A 和 B）串接成一个闭合回路，如果两导体接点处温度不

同,则两点之间便产生电动势,从而在回路中便形成了电流的现象。由此效应产生的电动势,通常称为热电动势。

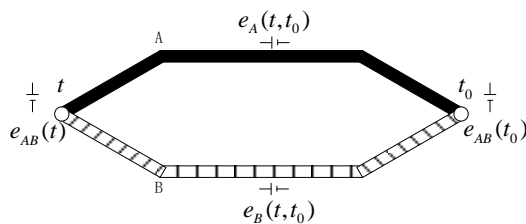
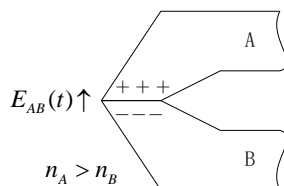


图9.1 热电偶结构原理图

两种导体组成的回路称为热电偶,这两种导体称为热电极,热电偶的两个接点,一个称为工作端或热端,另一个称为自由端或冷端。热电动势来源于两部分,一部分是两种导体的接触电动势,另一部分是单一导体的温差电动势。

## 2. 两种导体的接触电动势

(1) 定义: 由于两种不同导体的自由电子密度不同而在接触处形成的电动势。



接触电动势的数值取决于两种不同导体的材料特性和接触点的温度。

(2) 两接点的接触电动势

$$E_{AB}(t) = \frac{kt}{e} \ln \frac{n_A(t)}{n_B(t)}$$

$$E_{AB}(t_0) = \frac{kt_0}{e} \ln \frac{n_A(t_0)}{n_B(t_0)}$$

式中 $E_{AB}(t)$ 和 $E_{AB}(t_0)$ ——A、B两种材料在温度 $t$ 、 $t_0$ 时的接触电动势; $k$ ——玻尔兹曼常数( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ); $t$ 、 $t_0$ ——两接触处的绝对温度; $n_A(t)$ 、 $n_B(t)$ 、 $n_A(t_0)$ 、 $n_B(t_0)$ ——材料A、B分别在温度 $t$ 、 $t_0$ 下的自由电子密度; $e$ ——单个电子的电荷量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

## 3. 单一导体的温差电动势

(1) 定义: 同一导体的两端因其温度不同而产生的一种电动势。

(2) 机理: 高温端的电子能量要比低温端的电子能量大,从高温端跑到低温端的电子数比从低温端跑到高温端的要多,结果高温端因失去电子而带正电,低温端因获得多余的电子而带负电,在导体两端便形成温差电动势。

(3) 大小表示:  $E_A(t, t_0)$ 、 $E_B(t, t_0)$

## 4. 回路的总电动势

$$E_{AB}(t, t_0) = [E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0)] - [E_A(t, t_0) - E_B(t, t_0)]$$

由于 $[E_A(t, t_0) - E_B(t, t_0)]$ 很小,则有

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) = f(t) - C$$

## 5. 热电偶的分度表

(1) 定义: 不同金属组成的热电偶,温度与热电动势之间有不同的函数关系,一般通过实验的方法来确定,并将不同温度下测得的结果列成表格,编制出热电动势与温度的对照表,即分度表。

(2) 中间值的计算方法: 供查阅使用,每 $10^\circ\text{C}$ 分档,中间值按内插法计算。

$$t_M = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L} \cdot (t_H - t_L)$$

### (3) S型(铂铑<sub>10</sub>—铂)热电偶分度表

分度号: S

(参考端温度为 0℃)

测量端 温度/℃	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
热电动势/mV										
0	0.000	0.055	0.113	0.173	0.235	0.299	0.365	0.432	0.502	0.573
100	0.645	0.719	0.795	0.872	0.950	1.029	1.109	1.190	1.273	1.356
200	1.440	1.525	1.611	1.698	1.785	1.873	1.962	2.051	2.141	2.232
300	2.323	2.414	2.506	2.599	2.692	2.786	2.880	2.974	3.069	3.164
400	3.260	3.356	3.452	3.549	3.645	3.743	3.840	3.938	4.036	4.135
500	4.234	4.333	4.432	4.532	4.632	4.732	4.832	4.933	5.034	5.136
600	5.237	5.339	5.442	5.544	5.648	5.751	5.855	5.960	6.064	6.169
700	6.274	6.380	6.486	6.592	6.699	6.805	6.913	7.020	7.128	7.236
800	7.345	7.454	7.563	7.672	7.782	7.892	8.003	8.114	8.225	8.336
900	8.448	8.560	8.673	8.786	8.899	9.012	9.126	9.240	9.355	9.470
1000	9.585	9.700	9.816	9.932	10.048	10.165	10.282	10.400	10.517	10.635
1100	10.754	10.872	10.991	11.110	11.229	11.348	11.467	11.587	11.707	11.827
1200	11.947	12.067	12.188	12.308	12.429	12.550	12.671	12.792	12.913	13.034
1300	13.155	13.276	13.397	13.519	13.640	13.761	13.883	14.004	14.125	14.247
1400	14.368	14.489	14.610	14.731	14.852	14.973	15.094	15.215	15.336	15.456
1500	15.576	15.697	15.817	15.937	16.057	16.176	16.296	16.415	16.534	16.653
1600	16.771	16.890	17.008	17.125	17.245	17.360	17.477	17.594	17.711	17.826

### 6. 中间导体定律 (热电偶基本定律之一)

(1) 定义: 在热电偶测温回路内, 接入第三种导体时, 只要第三种导体的两端温度相同, 则对回路的总热电势没有影响。

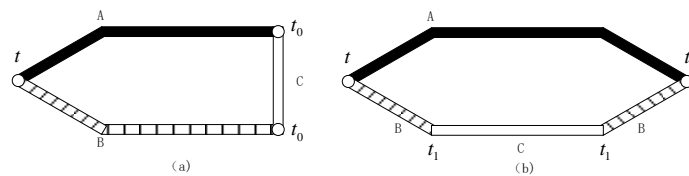
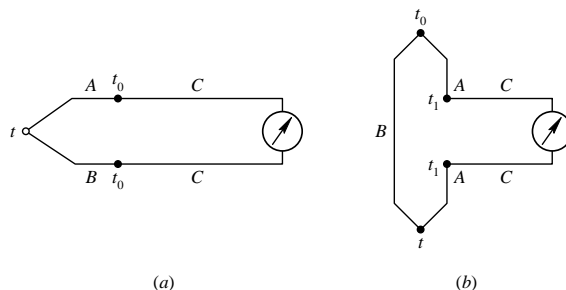


图9.3 接入第三种导体的热电偶回路结构图

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

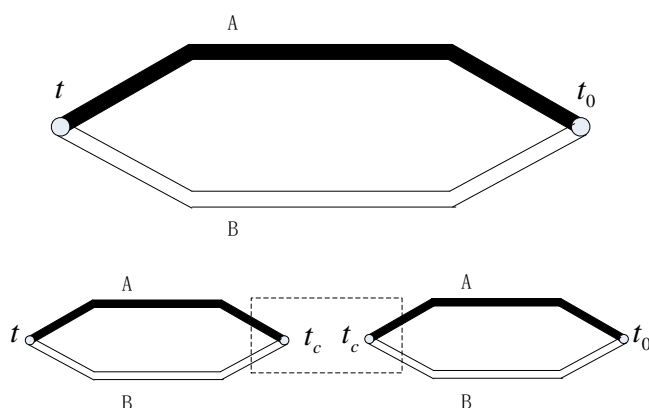
(2) 意义: 在实际的热电偶测温应用中, 测量仪表及引线作为第三种导体对待。



### 7. 中间温度定律 (热电偶基本定律之二)

(1) 定义: 在热电偶测温回路中,  $t_c$  为热电极上某一点的温度, 热电偶 A、B 在接点温度为  $t$ 、 $t_0$  时的热电势  $E_{AB}(t, t_0)$  等于热电偶 A、B 在接点温度  $t$ 、 $t_c$  和  $t_c$ 、 $t_0$  时的热电势  $E_{AB}(t, t_c)$  和  $E_{AB}(t_c, t_0)$  的代数和, 即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_c) + E_{AB}(t_c, t_0)$$



(2) 应用：①根据这个定律，可以连接与热电偶热电特性相近的导体 A 和 B，将热电偶冷端延伸到温度恒定的地方，这就为热电偶回路中应用补偿导线提供了理论依据。

②该定律是参考端温度计算修正法的理论依据。在实际热电偶测温回路中，利用热电偶这一性质，可对参考端温度不为  $0^{\circ}\text{C}$  的热电势进行修正。

【例 8-1】使用 K 型热电偶，参考端温度为  $0^{\circ}\text{C}$ ，测量热端温度为  $30^{\circ}\text{C}$  和  $900^{\circ}\text{C}$  时，温差电动势分别为  $1.203\text{mV}$  和  $37.326\text{mV}$ 。当参考端温度为  $30^{\circ}\text{C}$ 、测量点温度为  $900^{\circ}\text{C}$  时的温差电动势为多少？

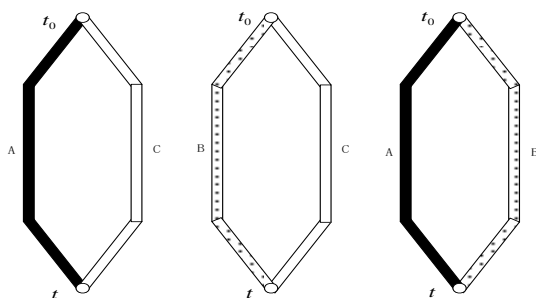
解：根据中间温度定律  $E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_c) + E_{AB}(t_c, t_0)$ ，可得

$$E_{AB}(900, 30) = E_{AB}(900, 0) - E_{AB}(30, 0) = 37.326 - 1.203 = 36.123 \text{ mV}$$

#### 8. 标准导体（电极）定律（热电偶基本定律之三）

(1) 定义：如果两种导体 A、B 分别与第三种导体 C 组成的热电偶所产生的热电动势已知，则由这两个导体 A、B 组成的热电偶产生的热电动势可由下式确定，即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0)$$



(2) 意义：通常选用高纯铂丝作标准电极，只要测得它与各种金属组成的热电偶的热电动势，则各种金属间相互组合成热电偶的热电动势就可根据标准电极定律计算出来。

【例 8-2】热端为  $100^{\circ}\text{C}$ ，冷端为  $0^{\circ}\text{C}$  时，镍铬合金与纯铂组成的热电偶的热电动势为  $2.95\text{mV}$ ，而考铜与纯铂组成的热电偶的热电动势为  $-4.0\text{mV}$ ，则镍铬和考铜组成的热电偶所产生的热电动势应为多少？

解： $2.95 - (-4.0) = 6.95(\text{mV})$

#### 9. 均质导体定律（热电偶基本定律之四）

(1) 定义：如果组成热电偶的两个热电极的材料相同，无论两接点的温度是否相同，热电



偶回路中的总热电动势均为 0。

(2) 意义：有助于检验两个热电极材料成分是否相同及材料的均匀性。

#### 10. 热电偶的冷端温度补偿

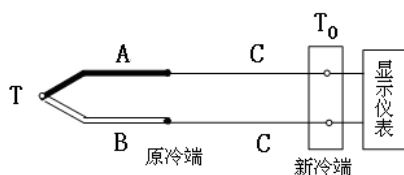
当热端温度为  $t$  时，分度表所对应的热电势  $E_{AB}(t, 0)$  与热电偶实际产生的热电势  $E_{AB}(t, t_0)$  之间的关系可根据中间温度定律得到下式：

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$$

由此可见， $E_{AB}(t_0, 0)$  是冷端温度  $t_0$  的函数，因此需要对热电偶冷端温度进行处理。

#### 11. 补偿导线法（热电偶传感器温度补偿方法之一）

热电偶一般做得较短，一般为 350 ~ 2000mm。在实际测温时，需要把热电偶输出的电势信号传输到远离现场数十米远的控制室里的显示仪表或控制仪表，这样，冷端温度  $t_0$  比较稳定。



工程中采用一种补偿导线。在 0 ~ 100°C 温度范围内，要求补偿导线和所配热电偶具有相同的热电特性。

#### 12. 冷端 0°C 恒温法（热电偶传感器温度补偿方法之二）

在实验室及精密测量中，通常把冷端放入 0°C 恒温器或装满冰水混合物的容器中，以便冷端温度保持 0°C。这是一种理想的补偿方法，但工业中使用极为不便。

#### 13. 冷端温度修正法（热电偶传感器温度补偿方法之三）

当冷端温度  $t_0$  不等于 0°C，需要对热电偶回路的测量电势值  $E(t, t_0)$  加以修正。当工作端温度为  $t$  时，分度表可查  $E(t, 0)$  与  $E(t_0, 0)$ 。

根据中间温度定律得到：

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$$

【例 8-3】用将一支镍铬-镍硅热电偶与电压表相连，电压表接线端是 50°C，若电位计上读数是 6.0mV，问热电偶热端温度是多少？

解：查表，知 K 型热电偶 50°C 对应的电动势为 2.022mV，

根据中间温度定律  $E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_c) + E_{AB}(t_c, t_0)$ ，可得

$$E(t) = 6 + 2.022 = 8.022mV$$

根据内插值公式  $t_M = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L}(t_H - t_L)$  可得热端温度为

$$t = 190 + \frac{8.022 - 7.737}{8.137 - 7.737}(200 - 190) = 197.125^\circ\text{C}$$

【例 8-4】用镍铬-镍硅热电偶测量加热炉温度。已知冷端温度  $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ，测得热电势  $E(t, t_0)$  为 39.17mV，求加热炉温度。

解：查镍铬-镍硅热电偶分度表得  $E(30, 0) = 1.203mV$ 。

则  $E(t, 0) = E(t, 30) + E(30, 0) = (39.17 + 1.203)mV = 40.373mV$ 。

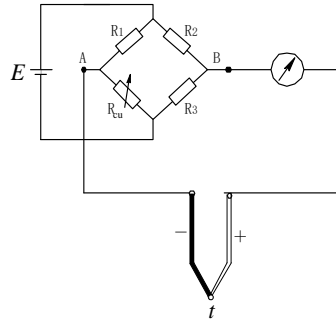
再从表中查得最相邻的两个热电动势  $E(970, 0) = 40.096mV$ ,  $E(980, 0) = 40.488mV$ 。

因此，利用内插值公式  $t_M = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L} \cdot (t_H - t_L)$ ，可得

$$t = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L} \cdot (t_H - t_L) = 970 + \frac{40.373 - 40.096}{40.488 - 40.096} \cdot (980 - 970) \approx 977^\circ\text{C}$$

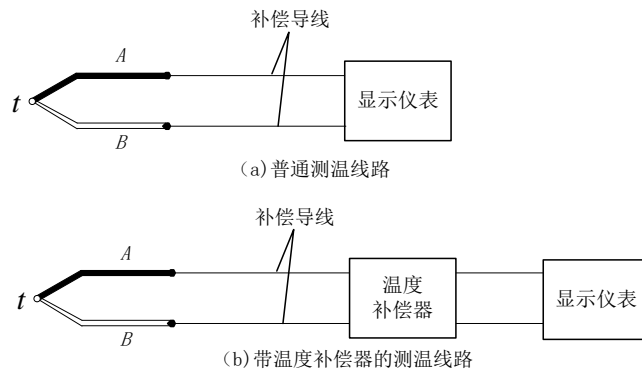
#### 14. 自动/电桥补偿法（热电偶传感器温度补偿方法之四）

在热电偶与仪表间加上一个补偿电桥，当热电偶冷端温度升高，导致回路总电动势降低时，这个电桥感受自由端温度的变化，产生一个电位差，其数值刚好与热电偶降低的电动势相同，两者相互补偿。这样，测量仪表上所测得的电动势将不随自由端温度而变化。



#### 15. 热电偶测温电路

##### (1) 测量单点的温度



##### (2) 测量两点间温度差（反极性串联）

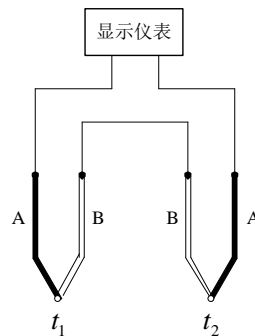
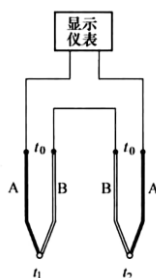


图9.12 热电偶测量两点温度差线路图

$$E_T = E_{AB}(t_1, t_0) - E_{AB}(t_2, t_0) = E_{AB}(t_1, t_2)$$

【例 8-5】用两只K型热电偶测量两点温度，其连接线路如题图所示，已知 $t_1 = 420^\circ\text{C}$ ， $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ，测得两点的温差电动势为 $15.24\text{mV}$ ，问两点的温度差是多少？如果测量 $t_1$ 温度的那只热电偶错用的是E型热电偶，其他都正确，试求两点实际温度差是多少？



解：(1) 根据反极性串联公式  $E_T = E_{AB}(t_1, t_0) - E_{AB}(t_2, t_0) = E_{AB}(t_1, t_2)$ ，可得

$$E_T = E_{AB}(t_1, t_0) - E_{AB}(t_2, t_0) = E_{AB}(420, 30) - E_{AB}(t_2, 30)$$

再根据中间温度定律  $E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_c) + E_{AB}(t_c, t_0)$ ，可得

$$E_{AB}(420, 30) = E_{AB}(420, 0) - E_{AB}(30, 0)$$

同理可得

$$E_{AB}(t_2, 30) = E_{AB}(t_2, 0) - E_{AB}(30, 0)$$

故有

$$E_T = [E_{AB}(420, 0) - E_{AB}(30, 0)] - [E_{AB}(t_2, 0) - E_{AB}(30, 0)] = E_{AB}(420, 0) - E_{AB}(t_2, 0)$$

题中已知  $E_T = 15.24\text{mV}$ ，查表可知  $E_{AB}(420, 0) = 17.24\text{mV}$ ，则有

$$E_{AB}(t_2, 0) = 17.24 - 15.24 = 2\text{mV}$$

查表并利用内插值公式  $t_M = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L} \cdot (t_H - t_L)$ ，可得

$$t_2 = 40 + \frac{2 - 1.611}{2.022 - 1.611} \cdot (50 - 40) = 49.46^\circ\text{C}$$

则两点间的温度差为  $t_1 - t_2 = 420 - 49.46 = 370.54^\circ\text{C}$ 。

(2) 如果测量  $t_1$  错用了 E 型热电偶，则

$$\begin{aligned} E_T &= E_E(t_1, t_0) - E_K(t_2, t_0) = E_E(420, 30) - E_K(t_2, 30) \\ &= [E_E(420, 0) - E_E(30, 0)] - [E_K(t_2, 0) - E_K(30, 0)] \\ &= (30.546 - 1.801) - [E_K(t_2, 0) - 1.203], \end{aligned}$$

所以

$$E_K(t_2, 0) = 30.546 - 1.801 + 1.203 - 15.24 = 14.708\text{mV}$$

查表得  $t_2$  点的温度为  $360^\circ\text{C}$ （直接读表，这时候非常接近，故不需使用内插值公式计算），  
两点间的温度差实际为  $t_1 - t_2 = 420 - 360 = 60^\circ\text{C}$ 。

(3) 测量平均温度（并联或正向串联）

① 并联

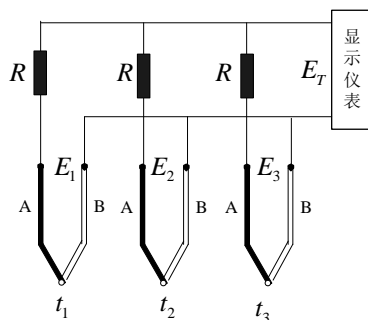


图9.13 热电偶的并联测温线路图

$$E_T = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3} = \frac{E_{AB}(t_1, t_0) + E_{AB}(t_2, t_0) + E_{AB}(t_3, t_0)}{3}$$

$$= \frac{E_{AB}(t_1 + t_2 + t_3, 3t_0)}{3} = E_{AB}\left(\frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}, t_0\right)$$

特点：当有一只热电偶烧断时，难以觉察出来。当然它也不会中断整个测温系统的工作。

## ②串联

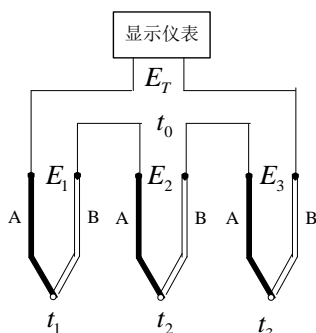


图9.14 热电偶的串联测温线路图

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 = E_{AB}(t_1, t_0) + E_{AB}(t_2, t_0) + E_{AB}(t_3, t_0)$$

$$= E_{AB}(t_1 + t_2 + t_3, 3t_0) \stackrel{t_0=0}{=} E_{AB}(t_1 + t_2 + t_3, t_0)$$

优点：热电动势大，仪表的灵敏度大大增加，且避免了热电偶并联线路存在的缺点，可立即可以发现断路。

缺点：只要有一支热电偶断路，整个测温系统将停止工作。

【例 8-6】镍铬-镍硅热电偶的灵敏度为  $0.04\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，把它放在温度为  $1200^\circ\text{C}$  处，若以指示表作为冷端，此处温度为  $50^\circ\text{C}$ ，试求热电动势的大小。

解：由灵敏度定义  $K = \frac{E}{\Delta t}$ ，可得

$$E = K \cdot \Delta t = 0.04 \times (1200 - 50) = 46\text{mV}$$

【例 8-7】将一灵敏度为  $0.08\text{mV}/^\circ\text{C}$  的热电偶与电压表相连接，电压表接线端是  $50^\circ\text{C}$ ，若电位计上读数是  $60\text{mV}$ ，求热电偶的热端温度。

解：由灵敏度定义  $K = \frac{E}{\Delta t}$ ，可得

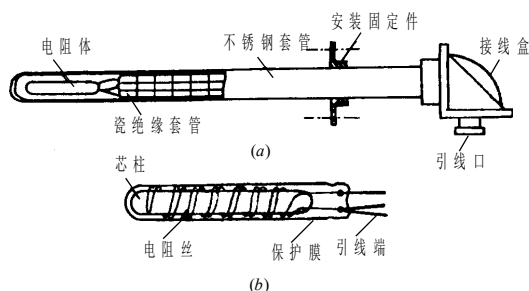
$$\Delta t = \frac{E}{K} = \frac{60}{0.08} = 750^\circ\text{C}$$

而又已知电压表接线端是  $50^\circ\text{C}$ ，故有热端温度

$$t = 750 + 50 = 800^\circ\text{C}$$

## 16. 热电阻传感器的基本概念

热电阻传感器是利用导体的电阻值随温度变化而变化的原理进行测温的。热电阻广泛用来测量  $-200 \sim 850^\circ\text{C}$  范围内的温度，少数情况下，低温可测量至  $1\text{K}$ ，高温达  $1000^\circ\text{C}$ 。标准铂电阻温度计的精确度高，作为复现国际温标的标准仪器。



电阻丝采用双线并绕法绕制在具有一定形状的云母、石英或陶瓷塑料支架上，支架起支撑和绝缘作用。

### 17. 铂热电阻

铂热电阻的特点是精度高、稳定性好、性能可靠，所以在温度传感器中得到了广泛应用。按 IEC 标准，铂热电阻的使用温度范围为  $-200 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 。铂热电阻的特性方程为：在  $-200 \sim 0^{\circ}\text{C}$  的温度范围内

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$$

在  $0 \sim 850^{\circ}\text{C}$  的温度范围内

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

可见：热电阻在温度  $t$  时的电阻值与  $0^{\circ}\text{C}$  时的电阻值  $R_0$  有关。目前我国规定工业用铂热电阻有  $R_0 = 10\Omega$  和  $R_0 = 100\Omega$  两种，它们的分度号分别为  $Pt_{10}$  和  $Pt_{100}$ ，其中以  $Pt_{100}$  为常用。铂热电阻不同分度号亦有相应分度表，这样在实际测量中，只要测得热电阻的阻值  $R_t$ ，便可从分度表上查出对应的温度值。

【例 8-8】用一支铂电阻温度计去测量某气体的温度得到其电阻值为  $281.50\Omega$ ，试确定该气体的温度（已知  $0^{\circ}\text{C}$  时电阻值为  $100\Omega$ ）。

解：由已知  $0^{\circ}\text{C}$  时电阻值为  $100\Omega$ ，可知该铂电阻温度计为分度号为  $Pt_{100}$  的铂热电阻。

查表可知  $500^{\circ}\text{C}$  时电阻值为  $280.90\Omega$ ， $510^{\circ}\text{C}$  时电阻值为  $284.22\Omega$

查表并利用内插值公式  $t_M = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L} \cdot (t_H - t_L)$ ，可得

$$t = 500 + \frac{281.50 - 280.90}{284.22 - 280.90} \cdot (510 - 500) = 501.81^{\circ}\text{C}$$

### 18. 铜热电阻

在一些测量精度要求不高且温度较低场合，可采用铜热电阻进行测温，它的测量范围为  $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。铜热电阻在测量范围内其电阻值与温度的关系几乎是线性的，可近似地表示为

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

两种分度号： $Cu_{50}$  和  $Cu_{100}$ 。

### 19. 热电阻的测量电路

用热电阻传感器进行测温时，测量电路经常采用电桥电路。热电阻与检测仪表相隔一段距离，因此热电阻的引线对测量结果有较大的影响。热电阻内部引线方式有二线制、三线制和四线制三种

#### (1) 二线制

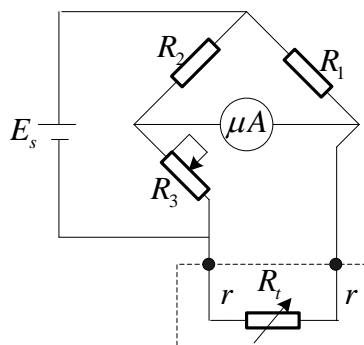


图9.17 二线制

设每根导线的电阻值为 $r$ ，则电桥平衡条件为

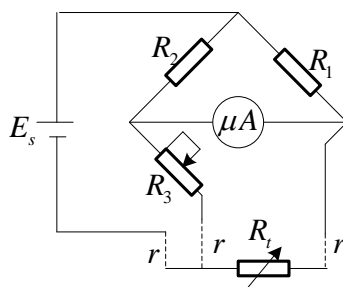
$$R_1 R_3 = R_2 (R_t + 2r)$$

因此有

$$R_t = \frac{R_1 R_3}{R_2} - 2r$$

这种引线方式简单、费用低，但是引线电阻以及引线电阻的变化会带来附加误差。两线制适于引线不长、测温精度要求较低的场合。

## (2) 三线制



其中一根与电桥电源相串联，它对电桥的平衡没有影响；另外两根分别与电桥的相邻两臂串联，当电桥平衡时，有

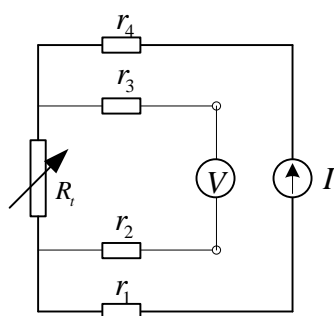
$$(R_t + r)R_2 = (R_3 + r)R_1$$

因此有

$$R_t = \frac{(R_3 + r)R_1 - rR_2}{R_2}$$

用于工业测量，一般精度

## (3) 四线制



$$R_t = \frac{U}{I}$$

实验室用，高精度测量

## 20. 热敏电阻的基本概念

热敏电阻是利用半导体的电阻值随温度显著变化这一特性制成的一种热敏元件，其特点是电阻率随温度而显著变化。金属导体的电阻值随温度的升高而增大，但半导体却相反，它的电阻值随温度的升高而急剧减小，在温度变化相同时，热敏电阻的阻值变化约为铂热电阻的 10 倍，因此可以用它来测量  $0.01^\circ\text{C}$  或更小的温度。

## 22. 热敏电阻的特性

大多数热敏电阻具有负温度系数，其阻值与温度的关系可表示为

$$R_t = R_0 \exp\left(\frac{B}{t} - \frac{B}{t_0}\right)$$

式中 $t_0 = 273.15K$

【例 8-9】某热敏电阻，其 $B$ 值为 $2900K$ ，若冰点电阻为 $500k\Omega$ ，求该热敏电阻在 $100^\circ C$ 时的阻抗。

解：根据阻值与温度的关系为 $R_t = R_0 \exp\left(\frac{B}{t} - \frac{B}{t_0}\right)$ ，可得

$$R_{100} = R_0 \exp\left(\frac{B}{t} - \frac{B}{t_0}\right) = 500 \times 10^3 \times \exp\left(\frac{2900}{100+273.15} - \frac{2900}{273.15}\right) = 500 \times 10^3 \times \exp(-2.8452) = 500 \times 10^3 \times 0.05812 = 29k\Omega$$