

《传感器与检测技术(第2版)》(胡向东等编著,机械工业出版社)

习题参考答案(完全版)



第1章 概述

1.1 什么是传感器?

答: 传感器是能够感受规定的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, 通常由敏感元件和转换元件组成。

1.2 传感器的共性是什么?

答: 传感器的共性就是利用物理定律和物质的物理、化学或生物特性, 将非电量(如位移、速度、加速度、力等)输入转换成电量(电压、电流、电容、电阻等)输出。

1.3 传感器一般由哪几部分组成?

答:传感器的基本组成为敏感元件和转换元件。此外,一般还包括信号调理电路、辅助电源等。

1.4 传感器是如何进行分类的?

答:①按输入量分,包括位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等;②按输出量分,有模拟式传感器和数字式传感器;③按工作原理分,有应变式、电容式、电感式、压电式、热电式传感器等;④按基本效应分,可分为物理型、化学型和生物型三种传感器;⑤按构成分,分为物性型和结构型;⑥按能量变换关系分,可分为能量变换型和能量控制型传感器。⑦按技术特征分,分为普通传感器和新型传感器。

1.5 传感器技术的发展趋势有哪些?

答:总体上说,传感器技术的发展趋势表现为六个方面:一是提高与改善传感器的技术性能;二是开展基础研究,寻找新原理、新材料、新工艺或新功能等;三是传感器的集成化;四是传感器的智能化;五是传感器的网络化;六是传感器的微型化。

1.6 改善传感器性能的技术途径有哪些?

答:①差动技术;②平均技术;③补偿与修正技术;④屏蔽、隔离与干扰抑制;⑤稳定性处理。

第2章 传感器的基本特性

2.1 什么是传感器的静态特性?描述传感器静态特性的主要指标有哪些?

答:传感器的静特性是它在稳态信号作用下的输入—输出关系。静态特征所描述的传感器的输入、输出关系中不含时间变量。其主要指标有线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性和漂移。

2.2 传感器输入输出特性的线性化有什么意义?如何实现其线性化?

答:传感器的理想输入—输出特性应是线性化的,有助于简化传感器的理论分析、数据处理、制作标定和测试。若传感器的非线性项的次方不高,在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似的代表实际曲线的一段,但多数情况下是用最小二乘法求出拟合直线。

2.3 利用压力传感器所得测试数据下表所示,计算其非线性误差、迟滞和重复性误差。设

压力为 0 MPa 时输出为 0 mV，压力为 0.12 MPa 时输出最大且为 16.50 mV。

压力/MPa	输出值/mV					
	第一循环		第二循环		第三循环	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0.02	0.56	0.66	0.61	0.68	0.64	0.69
0.04	3.96	4.06	3.99	4.09	4.03	4.11
0.06	7.40	7.49	7.43	7.53	7.45	7.52
0.08	10.88	10.95	10.89	10.93	10.94	10.99
0.10	14.42	14.42	14.47	14.47	14.46	14.46

解：①非线性误差：

取六次测量结果的平均值作为输出测量值，即

$$x: 0.02 \quad 0.04 \quad 0.06 \quad 0.08 \quad 0.10$$

$$y: 0.64 \quad 4.04 \quad 7.47 \quad 10.93 \quad 14.45$$

设拟合直线方程为： $y = a_0 + a_1 x$

$$L = \begin{bmatrix} 0.64 \\ 4.04 \\ 7.47 \\ 10.93 \\ 14.45 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0.02 \\ 1 & 0.04 \\ 1 & 0.06 \\ 1 & 0.08 \\ 1 & 0.10 \end{bmatrix}$$

则

$$\therefore A'A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.02 & 0.04 & 0.06 & 0.08 & 0.10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.02 \\ 1 & 0.04 \\ 1 & 0.06 \\ 1 & 0.08 \\ 1 & 0.10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.022 \end{bmatrix}$$

$$|A'A| = \begin{vmatrix} 5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.022 \end{vmatrix} = 0.02 \neq 0$$

$$(A'A)^{-1} = \frac{1}{|A'A|} \begin{bmatrix} 0.022 & -0.3 \\ -0.3 & 5 \end{bmatrix} = \frac{1}{0.02} \begin{bmatrix} 0.022 & -0.3 \\ -0.3 & 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.1 & -15 \\ -15 & 250 \end{bmatrix}$$

$$A'L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.02 & 0.04 & 0.06 & 0.08 & 0.10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.64 \\ 4.04 \\ 7.47 \\ 10.93 \\ 14.45 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 37.53 \\ 2.942 \end{bmatrix}$$

$$x = (A'A)^{-1} A'L = \begin{bmatrix} 1.1 & -15 \\ -15 & 250 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 37.53 \\ 2.942 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.847 \\ 172.55 \end{bmatrix}$$

$$y = -2.847 + 172.55x$$

$$x: 0.02 \quad 0.04 \quad 0.06 \quad 0.08 \quad 0.10$$

$$y: 0.64 \quad 4.04 \quad 7.47 \quad 10.93 \quad 14.45$$

$$\hat{y}: 0.604 \quad 4.055 \quad 7.506 \quad 10.957 \quad 14.408$$

$$|\Delta|: 0.036 \quad 0.015 \quad 0.036 \quad 0.027 \quad 0.042$$

$$\therefore \Delta L_{\max} = 0.042$$

$$\therefore \text{非线性误差为: } \gamma_L = \pm \frac{0.042}{14.5 - 0.5} \times 100\% = \pm 0.3\%$$

②迟滞误差:

$$\text{第一循环: } \Delta H_{\max 1} = 0.1$$

$$\text{第二循环: } \Delta H_{\max 2} = 0.1$$

$$\text{第三循环: } \Delta H_{\max 3} = 0.08$$

$$\therefore \Delta H_{\max} = 0.1$$

$$\nu_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.1}{14.5 - 0.5} \times 100\% = 0.714\%$$

③重复性误差:

由所给数据可得,

$$\text{正行程: } \Delta R_{1\max} = 0.08, \text{ 反行程: } \Delta R_{2\max} = 0.06$$

$$\therefore \Delta R_{\max} = \max(\Delta R_{1\max}, \Delta R_{2\max}) = 0.08$$

$$\therefore \text{重复性误差 } \gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{0.08}{14} \times 100\% = 0.5714\%$$

2.4 什么是传感器的动态特性？如何分析传感器的动态特性？

答：传感器的动态特征是指传感器对动态激励（输入）的响应（输出）特征，即其输出对随时间变化的输入量的响应特性。传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面分别采用瞬态响应法和频率响应法来分析。

2.5 描述传感器动态特性的主要指标有哪些？

答：传感器动态特征的主要指标有时间常数、延迟时间、上升时间、峰值时间、响应时间、超调量。

2.6 试解释线性时不变系统的叠加性和频率保持特性的含义及其意义。

答：①叠加性

含义：当一个系统有 N 个激励同时作用时，它的响应等于 N 个激励单独左右的响应之和。即各个输入所引起的输出互不影响。

意义：当检测系统的输入信号是由多个信号叠加而成的复杂信号时，根据叠加性可以把复杂信号的作用看成若干型号的单独作用之和，从而简化问题。

②频率保持特性

含义：当线性定常系统的输入为某一频率的简谐（正弦或余弦）信号 $x(t) = X_0 \cos(\omega t)$ 时，系统的稳态输出必定是与输入同频率的简谐信号，即 $y(t) = Y_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ 。但幅值和初始相位可能发生变化。

意义：如果已知线性系统的输入频率，根据频率保持特性，可确定该系统输出信号中只有与输入同频率的成分可能是该信号引起的输出，其他频率成分的输出都是噪声干扰，可以采用滤波技术，在很强的噪声干扰下，也能把有用信息提取出来。

2.7 用某一阶传感器测量 100 Hz 的正弦信号，如要求幅值误差限制在 $\pm 5\%$ 以内，时间常数应取多少？如果用该传感器测量 50 Hz 的正弦信号，其幅值误差和相位误差各为多少？

解：由于一阶传感器的幅频特性为： $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$

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

所以有： $1 - 5\% \leq \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \leq 1$

$0 \leq \omega\tau \leq 0.33$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 200\pi, \text{ 所以: } 0 \leq \tau \leq 0.523ms$$

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

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

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

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

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

- 2.8 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三分之一和二分之一所需的时间。

解: 对传感器施加突变信号属于阶跃输入:

$$\text{单位阶跃信号: } x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{进行拉氏变换: } X(s) = L[x(t)] = \int_0^\infty x(t)e^{-st} \cdot dt = \frac{1}{s}$$

$$\text{一阶系统传递函数: } H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

$$\text{所以: } Y(s) = H(s) \cdot X(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1}$$

$$\text{对上式进行拉氏逆变换: } y(t) = 1 - e^{-t/\tau}$$

设温差为 R , 则此温度传感器的阶跃响应为:

$$y(t) = R(1 - e^{-t/\tau}) = R(1 - e^{-t/3})$$

$$\text{当 } y(t) = \frac{R}{3} \text{ 时, 则 } t = -3 \ln \frac{2}{3} = 1.22s;$$

$$\text{当 } y(t) = \frac{R}{2} \text{ 时, 则 } t = -3 \ln \frac{1}{2} = 2.08s。$$

- 2.9 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 (°C)。求该温度计的时间常数及灵敏度。

解：由 $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S_n x(t)$ ，其中 τ 是传感器的时间常数， S_n 传感器的灵敏度，所

以 $\tau=2$ ， $S_n=1$

2.10 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 10 mV；在 $t=5$ s

时输出为 50 mV；在 $t \rightarrow \infty$ 时，输出为 100 mV。试求该传感器的时间常数。

解：对于输入阶跃信号的一阶传感器系统，其阶跃响应函数可表示为：

$$\therefore y(t) = S_n(1 - e^{-t/\tau}) + C$$

当 $t=0$ 时， $y=10$ mV

$$\therefore C = 10$$

当 $t = \infty$ 时， $y=100$ mV

$$\therefore S_n = 90$$

当 $t=5$ s 时， $y=50$ mV

$$\tau = 8.5 \text{ s}$$

2.11 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 0.8 s，试估算阻尼比和固有角频率的大小。

解： $\therefore \sigma = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% = 40\%$

$$\therefore \zeta = 0.28$$

$$\therefore t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = 0.8$$

$$\therefore \omega_d = 3.93$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} = 4.1 \text{ Hz}$$

2.12 在某二阶传感器的频率特性测试中发现，谐振发生在频率 216 Hz 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。

$$A(\omega) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

解：二阶系统

$$\text{当 } \omega = \omega_n \text{ 时共振, 则 } A(\omega)_{\max} = \frac{1}{2\xi} = \frac{1.4}{1}, \quad \xi = 0.36$$

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

- 2.13 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 $f_0 = 1000\text{Hz}$ ，若其阻尼比为 0.7，试问用它测量频率为 600 Hz、400 Hz 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：

$$|A(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{600}{1000} \right)^2 \right]^2 + 4 \times 0.7^2 \times \left(\frac{600}{1000} \right)^2}} = 0.95$$

$$\varphi(\omega) = -\tan^{-1} \frac{2 \times 0.7 \times \left(\frac{600}{1000} \right)}{1 - \left(\frac{600}{1000} \right)^2} = -52.7^\circ$$

$$|A(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{400}{1000} \right)^2 \right]^2 + 4 \times 0.7^2 \times \left(\frac{400}{1000} \right)^2}} = 0.99$$

$$\varphi(\omega) = -\tan^{-1} \frac{2 \times 0.7 \times \left(\frac{400}{1000} \right)}{1 - \left(\frac{400}{1000} \right)^2} = -33.7^\circ$$

第3章 电阻式传感器

3.1 应变电阻式传感器的工作原理是什么？

答：应变式传感器的基本工作原理：当被测物理量作用在弹性元件上，弹性元件在力、力矩或压力等的作用下发生形变，变换成相应的应变或位移，然后传递给与之相连的应变片，将引起应变敏感元件的电阻值发生变化，通过转换电路变成电量输出。输出的电量大小反映

了被测物理量的大小。

3.2 电阻应变片的种类有哪些？各有何特点？

答：①金属电阻应变片（应变效应为主），它的特点是表面积和截面积之比大，散热条件好，允许通过较大的电流，并可做任何形状，便于大量生产。

②半导体应变片（压阻效应为主），与金属电阻应变片相反，半导体应变片的灵敏度系数 $\frac{\Delta\rho}{\rho\varepsilon}$ 的值比 $(1+2\mu)$ 小得多，它的工作原理基于半导体材料的压阻效应，即单晶半导体材料沿某一轴向受到外力作用时，电阻率发生变化。

3.3 引起电阻应变片温度误差的原因是什么？电阻应变片的温度补偿方法是什么？

答：温度误差产生原因包括两方面：

一是由于电阻温度系数的影响；

二是试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数的影响。

常采用的温度补偿法有电桥补偿法和应变片自补偿法。

3.4 试分析差动测量电路在应变式传感器测量中的好处。

答：采用直流半桥或全桥差动测量电路可消除非线性误差，且电压灵敏度比单臂应变片工作分别提高了一倍和4倍时。交流差动电桥的输出电压与 ΔR 成线性关系

3.5 如果将 $100\ \Omega$ 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 $1\ \Omega$ ，求该应变片的灵敏度系数。

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

$$\sigma=\frac{F}{A}=\frac{5\times 10^4}{0.5\times 10^{-4}}=1\times 10^9\text{ N/m}^2$$

$$\text{由 } \sigma=E\cdot\varepsilon \text{ 得, } \varepsilon=\frac{\sigma}{E}=\frac{1\times 10^9}{2\times 10^{11}}=5\times 10^{-3},$$

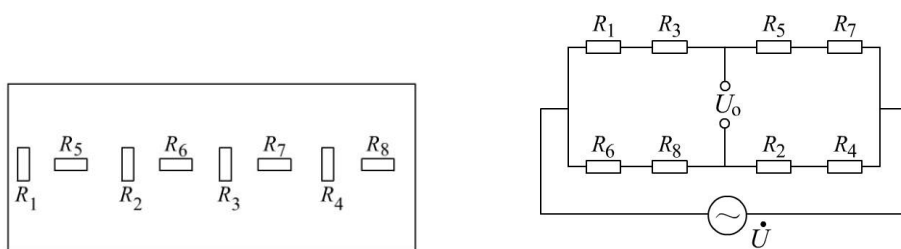
$$\text{所以 } K=\frac{\Delta R/R}{\varepsilon}=\frac{1/100}{5\times 10^{-3}}=2$$

3.6 一个量程为 10 kN 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 20 mm ，内径 18 mm ，在其表面粘贴八个应变片，四个沿轴向粘贴，四个沿周向粘贴，应变片的电阻值均为 $120\ \Omega$ 、灵敏度为 2.0 ，泊松比为 0.3 ，材料弹性模量为 2.1

$\times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，要求：

- (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 10 V 时，计算传感器的输出电压。

解：(1) 绘图如下：



(2) 圆桶截面积 $A = \pi (R^2 - r^2) = 59.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

应变片 1、2、3、4 感受轴向（切向）应变； $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_x$

应变片 5、6、7、8 感受周向（径向）应变； $\varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8 = \varepsilon_y$

满量程时：

$$\begin{aligned} \Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 &= K \varepsilon_x R = K \frac{F}{AE} R \\ &= 2.0 \times \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} \times 120 = 0.191 \Omega \end{aligned}$$

$$\Delta R_5 = \Delta R_6 = \Delta R_7 = \Delta R_8 = K \varepsilon_y R = -\mu K \varepsilon_x R = -\mu \Delta R_1 = -0.3 \times 0.191 = -0.0573 \Omega$$

(3) 全受拉力作用：

$$\begin{aligned} U_o &= U_i \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} - \frac{R_3 + \Delta R_3}{(R_3 + \Delta R_3) + (R_4 + \Delta R_4)} \right] = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ U_o &= \frac{U_i}{4} k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4), \therefore \varepsilon_{\text{总}} = \varepsilon - (-\mu\varepsilon) - (-\mu\varepsilon) + \varepsilon = 2(1 + \mu)\varepsilon \end{aligned}$$

所以

$$U_o = \frac{U_i}{4} K \varepsilon_{\text{总}} = \frac{U_i}{2} K(1 + \mu) \frac{F}{AE} = \frac{10}{2} \times 2 \times (1 + 0.3) \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} = 10.37 \text{ mV}$$

3.7 图 3.5 中，设负载电阻为无穷大（开路），图中 $E = 4\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100\Omega$ ，

试求：

(1) R_1 为金属应变片, 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 $U_0 = ?$

(2) R_1, R_2 都是应变片, 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, 电桥输出电压 $U_0 = ?$

(3) R_1, R_2 都是应变片, 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, 电桥输出电压 $U_0 = ?$

解: (1) $U_0 = E \cdot \left[\frac{(R_1 + \Delta R_1)}{(R_1 + \Delta R_1) + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left[\frac{101}{201} - \frac{1}{2} \right] = \frac{2}{201} = 0.0099V \approx 0.01V$

(2) $U_0 = E \cdot \left[\frac{R_1 \pm \Delta R_1}{(R_1 \pm \Delta R_1) + (R_2 \pm \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 0$

(3) 当 R_1 受拉应变, R_2 受压应变时:

$$U_0 = E \cdot \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 - \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left[\frac{101}{200} - \frac{1}{2} \right] = 0.02V = 20mV$$

当 R_1 受压应变, R_2 受拉应变时:

$$U_0 = E \cdot \left[\frac{R_1 - \Delta R_1}{(R_1 - \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left[\frac{99}{200} - \frac{1}{2} \right] = -0.02V = -20mV$$

3.8 的图 3.11 中, 设电阻应变片 R_1 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, 应变片承受平均应变 $\varepsilon = 800\mu m/m$ 。试求:

(1) 应变片的电阻变化量 ΔR_1 和电阻相对变化量 $\Delta R_1 / R_1$ 。

(2) 将电阻应变片 R_1 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) $K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}$

所以: $\frac{\Delta R_1}{R_1} = k\varepsilon = 2.05 \times 800 \times 10^{-6} = 1.64 \times 10^{-3}$

$$\Delta R_1 = 1.63 \times 10^{-3} \times 120 = 0.1968 \Omega$$

$$(2) U_o = E \cdot \frac{\frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_2}) \cdot (1 + \frac{R_4}{R_3})} = E \cdot \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$\text{令 } n=1, U_o = 3 \times 1.64 \times 10^{-3} \times \frac{1}{4} = 1.23 \times 10^{-3} \text{V}$$

$$U_o = E \cdot \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}, U_o' = E \cdot \frac{n \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + n) \cdot (1+n)}$$

$$\text{所以非线性误差为: } \gamma_L = \frac{U_o - U_o'}{U_o} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1}} = 0.08\%$$

(3) 减小非线性误差的方法:

① 提高桥臂比: 非线性误差减小, 由 $K = E \cdot \frac{n}{(1+n)^2}$ 知, 电桥的电压灵敏度将降低,

要使灵敏度不降低, 必须相应地提高供电电压, 电压的提高受到应变片允许功耗的限制。

② 采用差动电桥。

3.9 电阻应变片阻值为 120Ω , 灵敏系数 $K = 2$, 沿纵向粘贴于直径为 $0.05m$ 的圆形钢柱表面, 钢材的弹性模量 $E = 2 \times 10^{11} N/m^2$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。求:

(1) 钢柱受 $9.8 \times 10^4 N$ 拉力作用时应变片电阻的变化量 ΔR 和相对变化量 $\frac{\Delta R}{R}$;

(2) 若应变片沿钢柱圆周方向粘贴, 受同样拉力作用时应变片电阻的相对变化量。

解: (1)

$$\because \frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_x \text{ 且 } \varepsilon_x = \frac{F}{SE}$$

$$\therefore \frac{\Delta R_x}{R_x} = K \frac{F}{\pi r^2 E} = \frac{2 \times 9.8 \times 10^4}{3.14 \times (\frac{0.05}{2})^2 \times 2 \times 10^{11}} = 0.05\%$$

$$\Delta R = 0.05\% R_x = 120 \times 0.05\% = 0.06(\Omega)$$

$$(2) \frac{\Delta R_y}{R_y} = \varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x = -0.3 \times 0.05\% = -0.015\%$$

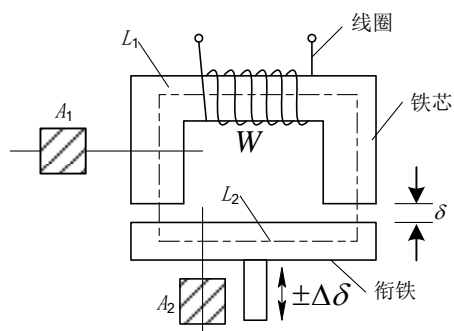
第4章 电感式传感器

4.1 根据工作原理的不同，电感式传感器可分为哪些种类？

答：根据工作原理的不同，电感式传感器可分为变磁阻式（自感式）、变压器式和涡流式（互感式）等种类。

4.2 试分析变气隙厚度变磁阻式电感传感器的工作原理。

答：



变磁阻式传感器结构

变磁阻式传感由线圈、铁心和衔铁三部分组成。在铁心和衔铁间有气隙，当衔铁移动时气隙厚度发生变化，引起磁路中磁阻变化，从而导致线圈的电感值变化。通过测量电感量的变化就能确定位移量的大小和方向。

4.3 已知变气隙厚度电感传感器的铁芯截面积 $A_0 = 1.5\text{cm}^2$ ，磁路长度 $L = 20\text{cm}$ ，相对

磁导率 $\mu_r = 5000$ ，气隙 $\delta_0 = 0.5\text{cm}$ ， $\Delta\delta = \pm 0.1\text{mm}$ ，真空磁导率

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，线圈匝数 $W = 3000$ ，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：（1）当衔铁移动 $\Delta\delta$ 时，有

$$\frac{\Delta L}{\Delta\delta} = \frac{L_0}{\delta_0} \quad \text{其中} \quad L_0 = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta} = \frac{3000^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 1.5 \times 10^{-4}}{2 \times 0.5 \times 10^{-2}} = 54\pi \times 10^{-3}$$

$$\therefore \frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{L_0}{\delta_0} = \frac{0.054\pi}{0.5 \times 10^{-2}} = 33.912$$

(2) 根据差动的变隙式的灵敏度公式 $\frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{2L_0}{\delta_0}$, 故将其做成差动结构后, 灵敏度将提高一倍。

4.4 差动式比单线圈式结构的变磁阻式传感器在灵敏度和线性度方面有什么优势? 为什么?

答: ①差动式比单线圈的灵敏度高一倍;

②差动式的非线性项近似于单线圈非线性项乘以因子 $\frac{\Delta \delta}{\delta_0}$, 对于单线圈, $\frac{\Delta \delta}{\delta_0}$ 的第一个非线性项为 $\left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2$; 对差动式, $\frac{\Delta \delta}{\delta_0}$ 的第一个非线性项为 $2\left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^3$, 但 $\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \ll 1$, 所以差动结构线性度明显改善。

4.5 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, 如图 4.26 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。

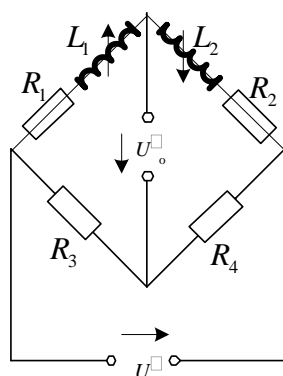


图 4.26 题 4.5 图

答: (1) 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用纯电阻代替。在 $R_3 = R_4 = R$ 的情况下, 电桥的输出电压为:

$$\dot{U}_0 = \dot{U} \left[\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{R}{R + R} \right] = \frac{\dot{U}}{2} \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_1 + Z_2)}$$

由此可见, 电桥的输出电压与匹配电阻 R_3 和 R_4 无关, 相应的电压灵敏度也与其无关。

但题目要求设计成四臂等阻抗电桥, 因此有: $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$ 。

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

$$\text{因此有 } Z_3 = Z_4 = R + j2\pi fL$$

所以有:

$$\begin{aligned} R_3 = R_4 &= |Z_3| = |Z_4| = |R + j2\pi fL| \\ &= \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} \\ &= \sqrt{40^2 + (2\pi \times 400 \times 30 \times 10^{-3})^2} \\ &= 85.34(\Omega) \end{aligned}$$

(2) 接成单臂电桥的输出电压为:

$$\dot{U}_0 = \frac{U}{2} \frac{\Delta Z}{Z_0}$$

因此有:

$$\left| \dot{U}_0 \right| = \left| \frac{U}{2} \frac{\Delta Z}{Z_0} \right| = \frac{U}{2} \frac{\Delta Z}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{4}{2} \frac{10}{\sqrt{40^2 + (2\pi \times 400 \times 30 \times 10^{-3})^2}} = 0.234(\text{V})$$

4.6 试分析交流电桥测量电路的工作原理。

答: 变压器式交流电桥本质上与交流电桥的分析方法完全一致。电桥两臂 Z_1 、 Z_2 为传感器线圈阻抗, 另外两臂为交流变压器二次绕组阻抗的一半。当负载阻抗为无穷大时, 桥路

$$\text{输出电压: } \dot{U}_0 = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \frac{Z_2 \dot{U}}{Z_1 + Z_2} - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \frac{\dot{U}}{2}$$

当传感器的衔铁位于中间位置时, 即 $Z_1 = Z_2 = Z_0$, 此时, 输出电压为 0, 电桥处于平衡状态。

当衔铁上移时, 设 $Z_1 = Z_0 + \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$, 在高 Q 情况下有

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta Z}{Z_0} = -\frac{\dot{U}}{4} \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\text{当衔铁下移时, 则 } Z_1 = Z_0 - \Delta Z, \quad Z_2 = Z_0 + \Delta Z, \quad \text{此时 } \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta Z}{Z_0} = \frac{\dot{U}}{4} \frac{\Delta L}{L_0}$$

由此可见: 衔铁上、下移动时, 输出电压相位相反, 大小随衔铁的位移变化。

4.7 试分析变压器式交流电桥测量电路的工作原理。

答: 把被测的非电量变化转换为线圈的互感量变化的传感器称为互感式传感器, 它是根据变压器的基本原理制成的, 且二次绕组都用差动形式连接, 故称为差动变压器式传感器。差动变压器结构形式有变隙式、变面积式和螺线管式, 但工作原理都是基于线圈互感量的变化来测量的。

4.8 试分析差动变压器式传感器的工作原理。

答: 零点残余电压的产生原因: 传感器的两次极绕组的电气参数与几何尺寸不对称, 导致它们产生的感应电势幅值不等、相位不同, 构成了零点残余电压的基波; 由于磁性材料磁化曲线的非线性(磁饱和, 磁滞), 产生了零点残余电压的高次谐波(主要是三次谐波)。

为了减小和消除零点残余电压, 可采用差动整流电路。

4.9 引起零点残余电压的原因是什么? 如何消除零点残余电压?

答: 该差动整流电路是把差动变压器的两个次级输出电压分别整流, 然后再将整流后的电压的差值作为输出, 具体整流原理如下:

A 当 U_i 上正下负时, 上线圈 a 正 b 负, 下线圈 c 正 d 负。

上线圈: 电流从 a—1—2—4—3—b, 流过电容 C_1 的电流是由 2 到 4, 电容 C_1 上的电压为 U_{24} ;

下线圈: 电流从 c—5—6—8—7—d, 流过电容 C_2 的电流是由 6 到 8, 电容 C_2 上的电压为 U_{68} 。

B 当 U_i 上负下正时, 上线圈 a 负 b 正, 下线圈 c 负 d 正。

上线圈: 电流从 b—3—2—4—1—a, 流过电容 C_1 的电流是由 2 到 4, 电容 C_1 上的电压为 U_{24} ;

下线圈: 电流从 d—7—6—8—5—c, 流过电容 C_2 的电流是由 6 到 8, 电容 C_2 上的电压为 U_{68} 。

由此可知, 不论两个次级线圈的输出电压极性如何, 流经电容 C_1 的电流方向总是从 2 到 4, 流经电容 C_2 的电流方向总是从 6 到 8, 故整流电路的输出电压为:

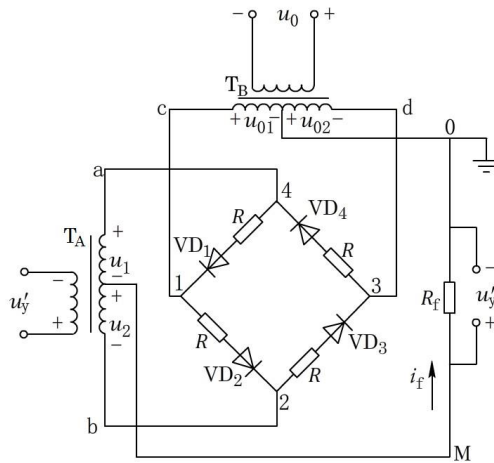
$$U_0 = U_{26} = U_{24} + U_{86} = U_{24} - U_{68}$$

- ① 当衔铁位于中间位置时, $U_{24} = U_{68}$, $\therefore U_0 = 0$
- ② 当衔铁位于中间位置以上时, $U_{24} > U_{68}$, $\therefore U_0 > 0$
- ③ 当衔铁位于中间位置以下时, $U_{24} < U_{68}$, $\therefore U_0 < 0$

如此, 输出电压 U_0 的极性反映了衔铁的位置, 实现了整流的目的是。

4.10 在使用螺线管式传感器时, 如何根据输出电压来判断衔铁的位置?

解:



当衔铁在零点以上移动, 即位移 $x_{(t)} > 0$ 时, u_y' 与 u_0 同频同相, 差动变压器式传感器的输出电压 u_y' 与其输入电压 (即激励电压) u_y 之间是同频反向的, 而 u_y 与 u_0 可通过移相电压使其同频反相, 这样 u_y' 与 u_0 就是一个同频同相的关系。输出电压

$$u_y'' = i_f R_f = \frac{R_f u_y'}{n_1 (R + 2R_f)}$$

当位移 $x_{(t)} < 0$ 时, u_y' 与 u_0 同频反相, 不论载波是正半周还是负半周, 负载的输出电

$$\text{压始终是 } u_y'' = i_f R_f = \frac{R_f u_y'}{n_1 (R + 2R_f)}$$

综上所述, 相敏检波电路的输出电压的变化规律反映了位移的变化规律, 即 u_y'' 的大小反映了位移 $x_{(t)}$ 的大小, u_y'' 的极性反映了位移 $x_{(t)}$ 的方向 (正位移输出正电压, 负位移输出负电压)。相敏体现在输入电压 u_y' 与参考电压 u_0 同相或反相, 导致输出电压的极性不同, 从而反映位移的方向。

u_y'' 的一个周期可分为四个阶段:

- 1) 正半周的上升阶段: u_y'' 大于 0, 且逐渐增大, 说明向上移动, 且在 0 位以上。
- 2) 正半周的下降阶段: u_y'' 大于 0, 且逐渐减小, 说明向下移动, 且在 0 位以上。
- 3) 负半周的上升阶段: u_y'' 小于 0, 且幅值在逐渐增大, 说明向下移动, 且在 0 位以下。
- 4) 负半周的下降阶段: u_y'' 小于 0, 且幅值在逐渐减小, 说明向上移动, 且在 0 位以下。

4.11 如何通过相敏检波电路实现对位移大小和方向的判定?

答: 产生电涡流效应后, 由于电涡流的影响, 线圈复阻抗的实部(等效电阻)增大, 虚部(等效电感)减小, 因此, 线圈等效机械品质因素下降。

4.12 电涡流式传感器的线圈机械品质因数会发生什么变化? 为什么?

答: 电涡流式传感器是根据电涡流效应制成的传感器。电涡流效应指的是这样一种现象: 根据法拉第电磁感应定律, 块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时, 通过导体的磁通将发生变化, 产生感应电动势, 该电动势在导体内产生电流, 并形成闭合曲线, 状似水中的涡流, 通常称为电涡流。电涡流式传感器的等效电气参数都是互感系数 M^2 的函数。通常是利用其等效电路的变化组成测量电路, 因此, 电涡流式传感器属于互感式电感式传感器。

4.13 为什么电涡流式传感器被归类为电感式传感器? 它属于自感式, 还是互感式?

答: ①变隙式电感压力传感器由线圈、铁心、衔铁、膜盒组成, 衔铁与膜盒上部粘贴在一起。当压力进入膜盒时, 膜盒的顶端在压力的作用下产生与压力 P 大小成正比的位移。于是衔铁也发生移动, 使气隙发生变化, 流过线圈的电流也发生相应变化, 电流表指示值将反应被测压力大小。

②微压传感器, 在无压力时, 固接在膜盒中心的衔铁位与差动变压器中部, 因而输出为零, 当被测压力由接头输出到膜盒中时, 膜盒的自由端产生一正比于被测压力的位移, 并带动衔铁在差动变压器中移动, 其产生的输出电压能反映被测压力的大小。

③CPC 型差压计是一种差动变压器, 当所测的 p_1 和 p_2 之间的差压变化时, 差压计内的膜片产生位移, 从而带动固定在膜片上的差动变压器的衔铁移位, 使差动变压器二次输出电压发生变化, 输出电压的大小与衔铁的位移成正比, 从而与侧差压成正比。

④电涡流式传感器与被测金属导体的距离变化将影响其等效阻抗, 根据该原理可用电涡流式

传感器实现对位移的测量,如汽轮主轴的轴向位移、金属试样的热膨胀系数、钢水的液位、液体压力等。测量位移的量程范围 $0\sim 30\text{mm}$,国外甚至可测 80mm ,分辨力为满量程的 0.1% 。

4.14 举例说明变磁阻式传感器、变压器式传感器、螺线管式传感器和电涡流式传感器的应用,并分析其工作原理。

答:(略)

第五章 电容式传感器

5.1 根据电容式传感器工作时变换参数的不同,可以将电容式传感器分为哪几种类型?各有何特点?

答:根据电容式传感器的工作原理,可将其分为3种:变极板间距的变极距型、变极板覆盖面积的变面积型和变介质介电常数的变介质型。

变极板间距型电容式传感器的特点是电容量与极板间距成反比,适合测量位移量。

变极板覆盖面积型电容传感器的特点是电容量与面积改变量成正比,适合测量线位移和角位移。

变介质型电容传感器的特点是利用不同介质的介电常数各不相同,通过介质的改变来实现对被测量的检测,并通过电容式传感器的电容量的变化反映出来。适合于介质的介电常数发生改变的场合。

5.2 一个以空气为介质的平板电容式传感器结构如图 5.3(a)所示,其中 $a=10\text{mm}$ 、 $b=16\text{mm}$,两极板间距 $d_0=1\text{mm}$ 。测量时,一块极板在原始位置上向左平移了 2mm ,求该传感器的电容变化量、电容相对变化量和位移灵敏度 K 。(已知空气的相对介电常数 $\varepsilon_r=1$,真空时的介电常数 $\varepsilon_0=8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$)。

$$\text{解: 电容变化量 } \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta x b}{d_0} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2 \times 10^{-3} \times 16 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 2.83 \times 10^{-13} \text{ F}$$

$$\text{原电容 } C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r a b}{d_0} \quad \text{故} \quad \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta x}{a} = \frac{2}{10} = 0.2$$

$$\text{变面积式电容灵敏度 } K = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta A} = \frac{0.2}{2 \times 10^{-3} \times 16 \times 10^{-3}} = 6.25 \times 10^3$$

5.3 试讨论变极距型电容式传感器的非线性及其补偿方法。

答：单极式变极距电容传感器的灵敏度和非线性对极板初始间隙的要求是相反的，要改善其非线性，要求应增大初始间隙，但这样会造成灵敏度的下降，因此通常采用差动结构来改善非线性。

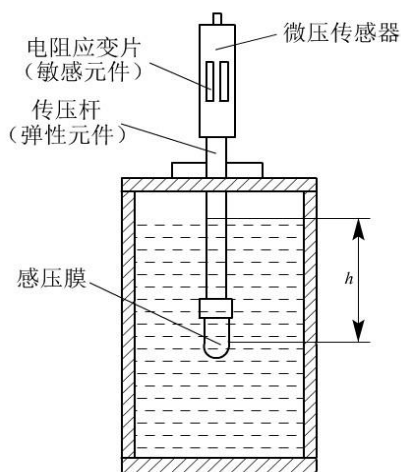
5.4 有一个直径为 2 m、高 5 m 的铁桶，往桶内连续注水，当注水数量达到桶容量的 80% 时就应当停止，试分析用应变片式传感器或电容式传感器来解决该问题的途径和方法。

解： 应变片式传感器：

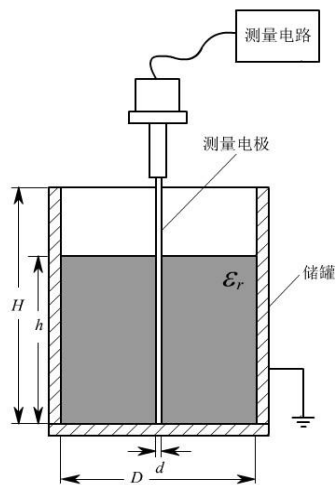
a 图是测量液体重量的插入式传感器示意图。该传感器有一根传压杆，上端安装微压传感器，下端安装感压膜，它用于感受水的压力。当桶中的水增多时，感压膜感受的压力就增大。从而测出水位的高度 h ，由题可知，当 $h = 4\text{m}$ 时，储水量就达到了 80%，传感器给出信号就可以停止注水。

电容式传感器：

b 图是电容式液位传感器的测量原理图。测量电极安装在桶的顶部，这样桶壁和电极之间形成一个电容器。往桶内注水时，实际上是改变介电常数，导致传感器的电容量变化，变化的大小与桶内的水位高度成比例变化。当 $h = 4\text{m}$ 时，储水量就达到了 80%，传感器给出信号就可以停止注水。



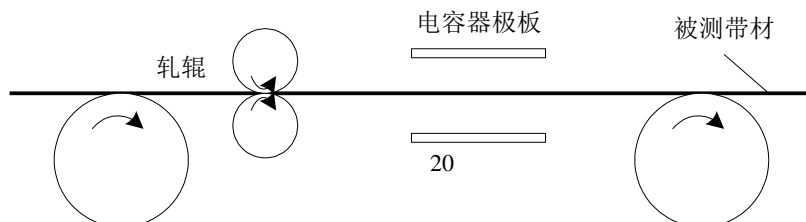
(a)



(b)

5.5 试分析电容式厚度传感器的工作原理。

答：



电容式传感器测量厚度原理图

电容式厚度传感器用于测量金属带材在轧制过程中的厚度，原理如图所示。在被测带材的上下两边各放一块面积相等、与带材中心等距离的极板，这样，极板与带材就构成两个电容器（带材也作为一个极板）。用导线将两个极板连接起来作为一个极板，带材作为电容器的另一极，此时，相当于两个电容并联，其总电容 $C=C_1+C_2$ 。

金属带材在轧制过程中不断前行，如果带材厚度有变化，将导致它与上下两个极板间的距离发生变化，从而引起电容量的变化。将总电容量作为交流电桥的一个臂，电容的变化将使得电桥产生不平衡输出，从而实现带材厚度的检测。

5.6 试推导图 5.20 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 ε_0 ，图中 $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ，极板宽度为 W 。其他参数如图所示。

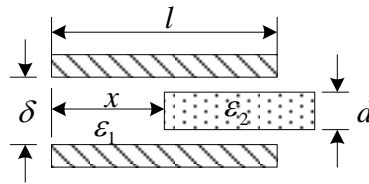


图 5.20 题 5.6 图

解：该电容相当于左侧只有一种介质的电容器 C_1 和右侧有两种介质的电容器 C_2 的并联。 C_2 相当于一个介电常数为 ε_1 的电容器 C_2' 和一个介电常数为 ε_2 的电容器 C_2'' 的串联。其中

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

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

$$\therefore \text{特征方程 } C = f(x) = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 x W}{\delta} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 (l-x) W}{\varepsilon_1 d + \varepsilon_2 (\delta-d)}$$

5.7 在题 5.6 中，设 $\delta = d = 1\text{mm}$ ，极板为正方形（边长 50mm ）。 $\varepsilon_1 = 1$ ， $\varepsilon_2 = 4$ 。试

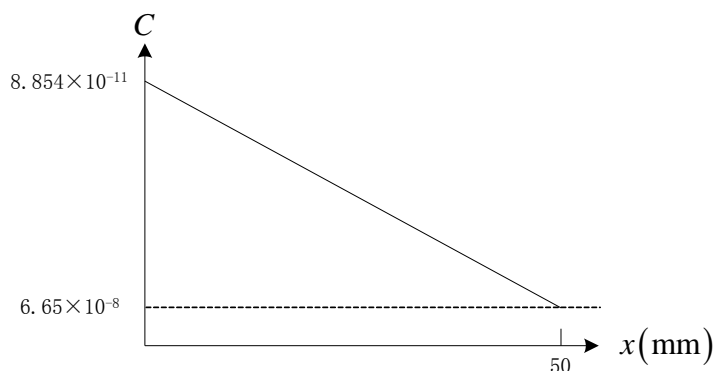
针对 $x = 0 \sim 50\text{mm}$ 范围内，绘出此位移传感器的特性曲线，并给以适当说明。

解：特征方程： $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 x l}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 (l-x) l}{d}$

$$= 10^{-12} \times \left[\frac{8.854 \cdot 1 \cdot x \cdot 50 \times 10^{-3} + 8.854 \cdot 4 \cdot (50 \times 10^{-3} - x) \cdot 50 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \right]$$

$$= 8.854 \times 10^{-11} - 1.33 \times 10^{-9} \cdot x$$

作图如下：



5.8 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，电容变化量是多少？

(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做线性化处理后，得 $\Delta C = \frac{C_0}{d_0} \Delta d$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta C &= \frac{C_0}{d_0} \Delta d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0^2} \cdot \Delta d \\ &= \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.14 \times (4 \times 10^{-3})^2}{(0.3 \times 10^{-3})^2} \times 2 \times 10^{-6} \\ &= 9.88 \times 10^{-3} \text{PF} \end{aligned}$$

$$(2) \Delta C \cdot S_1 \cdot S_2 = 9.88 \times 10^{-3} \times 100 \times 5 = 5 \text{格}$$

第六章 压电式传感器

6.1 什么是压电效应？什么是逆压电效应？

答：某些电介质在沿一定的方向受到外力的作用变形时，由于内部电极化现象同时在两个表面上产生符号相反的电荷，当外力去掉后，恢复到不带电的状态；而当作用力方向改变时，电荷的极性随着改变。晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。这种现象称为正压电效应。反之，如对晶体施加一定变电场，晶体本身将产生机械变形，外电场撤离，变形也随之消失，称为逆压电效应。

6.2 什么是压电式传感器？它有何特点？其主要用途是什么？

答：利用逆压电效应可以制成电激励的制动器（执行器）；基于正压电效应可以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。

压电式传感器的特点：结构简单、体积小、重量轻、工作频段宽、灵敏度高、信噪比高、工作可靠、测量范围广等。

压电式传感器的用途：与力相关的动态参数测试，如动态力、机械冲击、振动等，它可以把加速度、压力、位移、温度等许多非电量转换为电量。

6.3 试分析石英晶体的压电效应机理。

答：石英晶体的化学成分是 SiO_2 ，是单晶结构，理想形状六角椎体，石英晶体是各向异性材料，不同的晶向具有各异的物理特性。用 x ， y ， z 轴来描述。

石英晶体的 z 轴：是纵向轴，称为光轴，沿该方向受力不会产生压电效应。

石英晶体的 x 轴：称为电轴，压电效应只在该轴的两个表面产生电荷集聚。沿电轴方向的力作用于晶体时所产生的电荷量的大小与切片的几何尺寸无关。

石英晶体的 y 轴：是机械轴，沿机械轴方向的力作用于晶体时产生的电荷量大小 q ，与晶体切片的几何尺寸有关。

6.4 试分析压电陶瓷的压电效应机理。

答：压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料。其内部的晶体有一定的极化方向，在无电场作用下，晶粒杂乱分布，它们的极化效应相互抵消，因此压电陶瓷此时呈中性，即原始的压电陶瓷不具有压电性质。当在陶瓷上施加外电场时，晶粒的极化方向发生转动，趋向于按外电场方向排列，从而使材料整体得到极化。外电场愈强，极化程度越高，让外电场强度大到使材料的极化达到饱和程度，即所有晶粒的极化方向都于外电场的方向一致，此时，去掉外电场，材料的整体极化方向基本不变，即出现剩余极化，这时的材料就具有了压电特性，

由此可见,压电陶瓷具有压电效应,需要外电场和压力的共同作用。

6.5 压电材料的主要指标有哪些?其各自含义是什么?

答:具有压电效应的材料称为压电材料。压电材料的主要指标有:

- 1) 压电系数:衡量材料压电效应强弱的参数,影响压电输出的灵敏度。
- 2) 弹性系数:决定压电器件的固有频率和动态特性。
- 3) 介电常数:影响压电元件的固有电容,随之影响压电式传感器的频率下线。
- 4) 机电耦合系数:指压电效应中,转换后的输出能量与转换前的输入能量之比的二次方根,

即对于正压电效应,机电耦合系数= $\sqrt{\frac{\text{电能}}{\text{机械能}}}$;对于负压电效应,机电耦合系数= $\sqrt{\frac{\text{机械能}}{\text{电能}}}$ 。

机电耦合系数用于衡量压电材料在压电效应中的能量转换效率。

- 5) 电阻:压电材料的绝缘电阻将减少电荷泄漏,从而改善压电传感器的低频特性。
- 6) 居里点:当温度升高到一定温度后,材料的压电效应将消失。压电材料开始失去压电特性的温度称为居里温度或居里点。

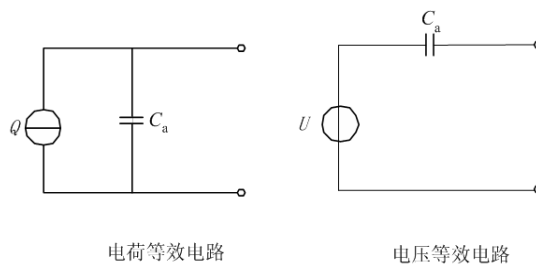
6.6 在进行压电材料选取时,一般考虑的因素是什么?

答:选用合适的压电材料是设计、制造高性能传感器的关键。一般应考虑:

- 1) 转换性能:具有较高的耦合系数或具有较大的压电系数。
- 2) 机械性能:压电元件作为受力元件,希望它的机械强度高、机械刚度大,以获得宽的线性范围和高的固有振动频率。
- 3) 电性能:希望具有高的电阻率和大的介电常数,以减弱外部分布电容的影响并获得良好的低频特性。
- 4) 温度、湿度稳定性好:要求具有较高的居里点,以获得宽的工作温度范围。
- 5) 时间稳定性:压电特性不随时间退化。

6.7 试分析压电式传感器的等效电路。

答:压电式传感器的等效电路图:



6.8 试分析电荷放大器和电压放大器两种压电式传感器测量电路的输出特性。

答: 传感器与电荷放大器连接的电路, 其输出电压与压电元件的输出电荷成正比, 电缆电容的影响小。

传感器与电压放大器连接的电路, 其输出电压与压电元件的输出电压成正比, 但容易受电缆电容的影响。

6.9 压电元件在使用时常采用串接或并接的结构形式, 试述在不同接法下输出电压、输出电荷、输出电容的关系, 以及每种接法的适用场合。

答: 并联接法在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。

串联接法上、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。

6.10 试分析图 6.11 所示压电式力传感器的工作原理。

答: 该图是压电式单向测力传感器的结构图, 她主要由石英晶片、绝缘套、电极、上盖和基座等组成。上盖为传力元件, 当受外力作用时, 它将产生弹性形变, 将力传递到石英晶片上, 利用石英晶片的压电效应实现力-电转换。绝缘套用于绝缘和定位。基座内外底面对其中心线的垂直度、上盖以及晶片、电极的上下底面的平行度与表面的光洁度都有及严格的要求。它的测力范围是 $0 \sim 50\text{N}$, 最小分辨率为 0.01N , 绝缘阻抗为 $2 \times 10^{14} \Omega$, 固有频率为 $50 \sim 60\text{kHz}$, 非线性误差小于 $\pm 1\%$ 。

6.11 试分析图 6.12 所示压电式加速度传感器的工作原理。

答: 该图压电式加速度传感器的结构图。测量时, 将传感器基座与试件刚性固定在一起。当传感器与被测物体一起收到冲击振动时, 由于弹簧的刚性相当大, 而质量块的质量相对较小, 可以认为质量块的惯性很小, 因此, 质量块与传感器基座感受到相同的振动, 并受到与加速度方向相反的惯性力的作用, 这样, 质量块就有一个正比于加速度的交变力作用于压电片上: $f = m \cdot a$ 。由于压电片的压电效应, 因此, 在它的两个表面上产生交变电荷 Q , 当振动频率远低于传感器的固有频率时, 传感器的输出电荷与作用力成正比, 即与试件的加速度成正比: $Q = d_{11} \cdot f = d_{11} \cdot m \cdot a$ 。式中 d_{11} 为压电系数, m 为质量块的质量, a 为加速度。

6.12 将一压电式力传感器与一只灵敏度 S_V 可调的电荷放大器联接, 然后接到灵敏度为

$S_x = 20\text{mm/V}$ 的光线示波器上记录, 已知压电式压力传感器的灵敏度为 $S_p = 5\text{pc/Pa}$,

该测试系统的总灵敏度为 $S = 0.5\text{mm/Pa}$, 试问:

(1) 电荷放大器的灵敏度 S_V 应调为何值 (V/pc)?

(2) 用该测试系统测 40Pa 的压力变化时, 光线示波器上光点的移动距离是多少?

解: (1) $S = S_P \cdot S_V \cdot S_X$

$$S_V = \frac{S}{S_P \cdot S_X} = \frac{0.5}{5 \times 20} = 5 (\text{mV/pc}) = 0.005 (\text{V/pc})$$

$$(2) x = S \times 40 = 0.5 \times 40 = 20 (\text{mm})$$

第七章 磁电式传感器

7.1 简述变磁通式和恒磁通式磁电感应式传感器的工作原理。

答: 恒磁通式传感器是指在测量过程中使导体(线圈)位置相对于恒定磁通变化而实现测量的一类磁电感应式传感器。

变磁通式传感器主要是靠改变磁路的磁通大小来进行测量, 即通过改变测量磁路中气隙的大小, 从而改变磁路的磁阻来实现测量的。

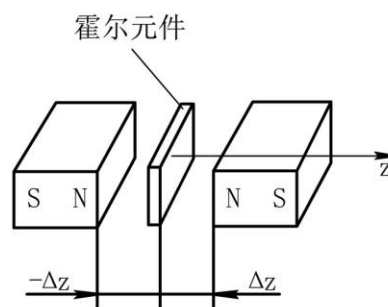
7.2 为什么磁电感应式传感器的灵敏度在工作频率较高时, 将随频率增加而下降?

答: 由磁电式传感器的传递函数及其幅频特性可知, 当被测物振动频率低于传感器的固有频率时, 传感器的灵敏度 (I_0/v 或 U_0/v) 是随振动频率的升高而明显增加的。当振动频率远大于传感器固有频率时, 传感器的灵敏度近似为一个常数, 它基本上不随频率变化, 即在这一频率范围内, 传感器的输出电压与振动速度成正比关系, 这一频段就是传感器的理想工作频段。在振动频率更高(过大)的情况下, 线圈阻抗增加, 传感器的灵敏度会随着振动频率的增加下降。

7.3 试解释霍尔式位移传感器的输出电压与位移成正比关系。

答: 如右图所示: 在极性相反, 磁场强度相同的两个磁钢气隙中放入一片霍尔片, 当霍尔片处于中间位置时, 霍尔片同时收到大小相等, 方向相反的磁通作用, 则有 $B=0$, 此时霍尔电动势发生变化为

$U_H = K_H IB = k \cdot \Delta z$, 式中, k 为霍尔式位移传感器



的输出灵敏度。可见，霍尔电动势与位移量 Δz 成线性关系，并且霍尔电动势的极性还会反映霍尔片的移动方向。

7.4 影响霍尔元件输出零点的因素有哪些？如何补偿？

答：由于制造工艺不完善，元件安装不合理及其环境温度变化等因素都会影响霍尔元件的输出零点，从而带来测量误差。不等位电动势误差是零位误差中最主要的一种，它是很难消除的，常采用两种补偿方法。第一，在电桥阻值较大的桥臂上并联电阻，这种补偿方式相对简单，被称为不对称补偿。第二，在两个桥臂上，同时并联电阻，这种补偿方式被称为对称补偿，其补偿的温度稳定性较好。

7.5 什么是霍尔效应？霍尔电势与哪些因素有关？

答：当载流导体或半导体处于与电流相垂直的磁场中时，在其两端将产生电位差，这一现象被称为霍尔效应。

$$\text{霍尔电势 } U_H = E_H b = v B b = -\frac{IB}{ned} = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

霍尔电势与霍尔电场 E_H 、载流导体或半导体的宽度 b 、载流导体或半导体的厚度 d 、电子平均运动速度 v 、磁场感应强度 B 、电流 I 有关。

7.6 某霍尔元件 l, b, d 尺寸分别为 $1.0\text{mm} \times 3.5\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ ，沿 l 方向通以电流 $I = 1.0\text{mA}$ ，在垂直 lb 面方向加有均匀磁场 $B = 0.3\text{T}$ ，传感器的灵敏度系数为 $22\text{V/A} \cdot \text{T}$ ，求其输出霍尔电动势和载流子浓度。

解：由 $K_H = \frac{1}{ned}$ （其中 n 为电子浓度）得：

$$n = \frac{1}{K_H ed} = \frac{1}{22 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.1 \times 10^{-3}} = 2.84 \times 10^{21} \text{C/m}^3$$

$$U_H = K_H IB = 22 \times 1 \times 10^{-3} \times 0.3 = 6.6 \times 10^{-3} \text{V}$$

第8章 热电式传感器

8.1 什么是热电效应、接触电动势、温差电动势？

答：两种不同的导体两端相互紧密地连接在一起，组成一个回路。当两点温度不同时，回路中就会产生大小和方向与导体材料及两接点的温度有关的电动势，从而形成电流，这种现象称为热电效应。

由于两种导体自由电子密度不同，而在接触处形成的电动势称为接触电动势。

将导体分别置于不同的温度场，导体两端就会产生一个热端指向冷端的静电场，该电场阻止电子从热端继续向冷端转移，并使电子反方向移动，最终达到动态平衡状态。这样在导体两端产生的电位差称为温差电动势。

8.2 热电偶的工作原理是什么？

答：热电偶测温原理：热电偶的测温原理基于热电效应。所谓热电效应，就是当不同材料的导体组成一个闭合回路时，若两个结点的温度不同，那么在回路中将会产生电动势的现象。两点间的温差越大，产生的电动势就越大。引入适当的测量电路测量电动势的大小，就可测得温度的大小。

8.3 什么是中间导体定律、中间温度定律、标准导体定律、均质导体定律？

答：中间导体定律：热电偶测温时，若在回路中接入第三种导体，只要其两端的温度相同，则对热电偶回路总的热电势不产生影响

中间温度定律：热电偶 AB 在接点温度为 t 、 t_0 时的热电动势 $E_{AB}(t, t_0)$ 等于它在接点温度 t 、 t_c 和 t_c 、 t_0 时的热电动势 $E_{AB}(t, t_c)$ 和 $E_{AB}(t_c, t_0)$ 的代数和，即

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

标准电极定律：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：

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

均质导体定律：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为 0。

8.4 试说明热电偶的类型与特点。

热电偶的种类：铂铑₃₀-铂铑₆，铂铑₁₀-铂，镍铬-镍硅，镍铬-康铜，铁-康铜，铜-康铜

铂铑₃₀-铂铑₆：适用于氧化性气氛中测温，稳定性好。

铂铑₁₀-铂：适用于氧化性、惰性气氛中测温。热电性能稳定，抗氧化性强，精度高，但价格昂贵、热电动势小。

镍铬-镍硅：适用于氧化性、中性气氛中测温。测温范围很宽、热电动势与温度关系近似线性、热电动势大、价格低。

镍铬-康铜：适用于还原性或惰性气氛中测温。热电动势较其他热电偶大，稳定性好，灵敏度高，价格低。

铁-康铜：适用于还原性气氛中测温。价格低，热电动势较大。缺点是铁极易氧化。

铜-康铜：适用于还原性气氛中测温。精度高，价格低。缺点是铜极易氧化。

8.5 热电偶的冷端温度补偿有哪些方法？各自的原理是什么？

答：为消除冷端温度影响，常用的措施有：

① 补偿导线法：将热电偶配接与其具有相同热电特性的补偿导线，使自由端远离工作端，放置到恒温或温度波动较小的地方。

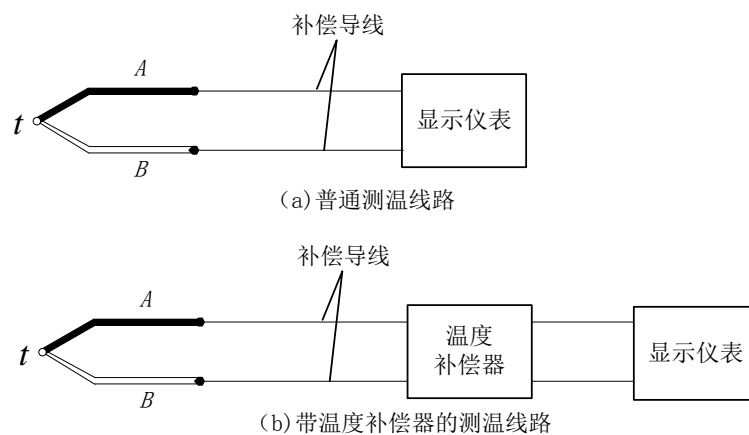
② 冷端恒温法：把热电偶的冷端置于某些温度不变的装置中，以保证冷端温度不受热端测量温度的影响。

③ 冷端温度校正法。如果热电偶的冷端温度偏离 0°C ，但稳定在 $t_0^{\circ}\text{C}$ ，则按中间温度定律对仪表指示值进行修正。

④ 自动补偿法。也称为电桥补偿法，它是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，两者互相补偿。

8.6 试设计测温电路，实现对某一点的温度、某两点的温度差、某三点的平均温度进行测量。

解：（1）测量单点的温度

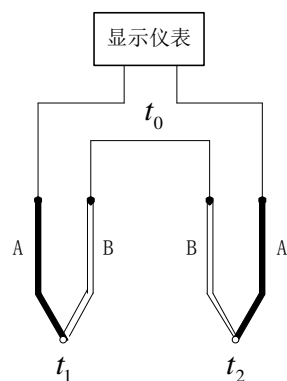


热电偶单点温度测量线路图

上图是一个热电偶直接和仪表配用的测量单点温度的测量线路，图中 A、B 组成热电偶。

热电偶在测温时，也可以与温度补偿器连接，转换成标准电流信号输出。

（2）测量两点间温度差（反极性串联）



热电偶测量两点温度差线路图

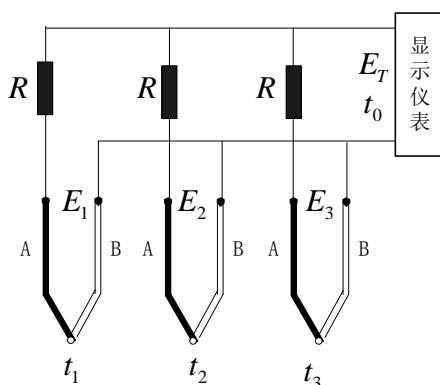
上图是测量两点间温度差 ($t_1 - t_2$) 的一种方法。将两个同型号的热电偶配用相同的补偿导线，其接线应使两热电偶反向串联 (A 接 A、B 接 B)，使得两热电动势方向相反，故输入仪表的是其差值，这一差值反映了两热电偶热端的温度差，从而仪表便可测得 t_1 和 t_2 间的温度差值。设回路总电动势为 E_T ，则：

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

即以 t_2 为参考端温度，测量工作端 t_1 的值，实为 $t_1 - t_2$ 的温度差。

(3) 测量三点的平均温度 (同极性并联或串联)

1) 热电偶的并联



热电偶的并联测温线路图

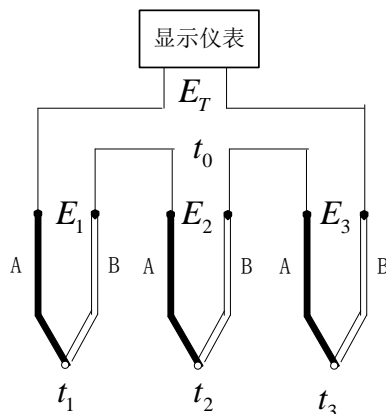
上图是测量三点的平均温度的热电偶并联连接线路，用三只同型号的热电偶并联在一起，在每一只热电偶线路中分别串联均衡电阻 R 。根据电路理论，当仪表的输入电阻很大时，并联测量线路的总热电动势等于三支热电偶热电动势的平均值，回路中总的电动势为：

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

式中:

E_1, E_2, E_3 分别为单只热电偶的热电动势。

2) 热电偶的串联



热电偶的串联测温线路图

上图是将三支同型号的热电偶依次将正、负极相连串接起来,此时,回路总的热电动势等于三支热电偶的热电动势之和,即回路的总电动势为:

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

得到的是三点的温度之和,如果再除以 3,就得到三点的平均温度。

8.7 用两只 K 型热电偶测量两点温度差,其连接线路如图 8.30 所示。已知 $t_1 = 420^\circ\text{C}$, t_0

$= 30^\circ\text{C}$, 测得两点的温差电势为 15.24 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,其它都正确,则两点的实际温度差是多少?

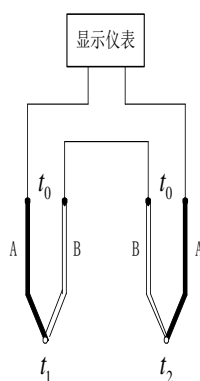


图 8.30 题 8.7 图

解: 由图示知:

$$E(t_2, t_1) = E(t_1, t_0) + E(t_2, t_0)$$

$$= E(t_1, 0) + E(t_0, 0) - (E(t_2, 0) - E(t_0, 0))$$

$$= E(t_1, 0) - E(t_2, 0)$$

$$= E(420, 0) - E(t_2, 0)$$

查表得: $E(420, 0) = 17.241\text{mV}$ 又知: $E(t_2, t_1) = 15.24\text{mV}$

所以 $E(t_2, 0) = 2.001\text{mV}$

差标知: t_2 在 45°C 与 50°C 之间

利用插入法:

$$t_M = 49.49t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L}(t_H - t_L)$$

所以 $t_M = 49.49^\circ\text{C}$ 。

故 $\Delta t = 420 - 49.49 = 370.51^\circ\text{C}$

8.8 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: 由题意得: $E(t, 0) = E(t, 50) + E(50, 0)$

查表得: $E(50, 0) = 2.022\text{mV}$

则: $E(t, 0) = 2.022 + 6.0 = 8.022\text{mV}$

查表得: t 位于 190°C 与 200°C 之间

$$t_M = t_L + \frac{E_M - E_L}{E_H - E_L}(t_H - t_L) = 190 + \frac{8.022 - 7.737}{8.137 - 7.737} \times 10 = 197.13^\circ\text{C}$$

故热电偶端温度为 197.13°C 。

8.9 铂电阻温度计在 100°C 时的电阻值为 139Ω , 当它与热的气体接触时, 电阻值增至 281Ω , 试确定该气体的温度(设 0°C 时电阻值为 100Ω)。

解: 根据题意, 所选用铂电阻为分度号: Pt100。

查表知: 温度 500°C 时的电阻值为 280.90Ω , 温度 510°C 时的电阻值为 284.22Ω 。因此, 采用内插法计算可得:

$$t_M = t_L + \frac{R_M - R_L}{R_H - R_L} (t_H - t_L) = 500 + \frac{281 - 280.90}{284.22 - 280.90} \times 10 = 500.30^\circ\text{C}。$$

8.10 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°C 处，若以指示表作为冷端，此处温度为 50°C ，试求热电势的大小。

解：由灵敏度定义 $K = \frac{E}{\Delta C}$ ，可知 $E = K \times \Delta C = 0.04 \times (1200 - 50) = 46\text{mV}$

故热电势为 46mV 。

8.11 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°C ，若电位计上读数是 60mV ，求热电偶的热端温度。

解： $E(t_2, t_1) = 60\text{mV}$ ，其中 $t_1 = 50^\circ\text{C}$

$$E = K \times \Delta t = (t_2 - t_1) \times 0.08$$

得： $t_2 = \frac{E}{K} + t_1 = \frac{60}{0.08} + 50 = 800^\circ\text{C}$

故热端温度为 800°C 。

8.12 使用 K 型热电偶，参考端温度为 0°C ，测量热端温度为 30°C 和 900°C 时，温差电动势分别为 1.203mV 和 37.326mV 。当参考端温度为 30°C ，测量点温度为 900°C 时的温差电动势为多少？

解：

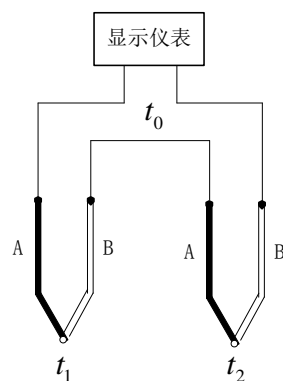
$$E(t_2, t_1) = 15.24\text{mV} \quad E(420, 0) = 17.241\text{mV} - E(t_2, 0) + E(t_0, 0) - (E(t_2, 0) = 2.001\text{mV} - E(t_0, 0))$$

$$E(900^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}) = E(900^\circ\text{C}, 0) + E(30^\circ\text{C}, 0) = 36.123\text{mV}$$

故温差电势为 36.123mV 。

8.13 如果将图 8.12 中的两支相同类型的热电偶顺向串联，是否可以测量两点间的平均温度，为什么？

答：



热电偶测量两点平均温度线路图

若是将图 8.12 中的两个相同的热电偶顺向串接，得到上图，其回路总电动势 E_T 为：

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

如果将测得的温度值再除以 2，就可得到两点的平均温度。

8.14 热电阻有什么特点？

答：电阻值与温度变化具有良好的线性关系；电阻温度系数大，以便对温度变化敏感，便于精确测量；电阻率高，热容量小，从而具有较快的响应速度；在测量范围内具有稳定的物理和化学性质；容易加工，价格尽量便宜。

8.15 试分析三线制和四线制接法在热电阻测量中的原理及其不同特点。

答：三线制的特点是可较好地减小引线电阻的影响。主要适用于大多数工业测量场合。四线制的特点是精度高，能完全消除引线电阻对测量的影响。主要适用于实验室等高精度测量场合。

8.16 对热敏电阻进行分类，并叙述其各自不同的特点。

答：分为三类：负温度系数热敏电阻（NTC）、正温度系数热敏电阻（PTC）和临界温度系数热敏电阻（CTR）。

NTC 温度越高，阻值越小，具有明显的非线性。

PTC 阻值随温度升高而增大，当温度超过某一数值时。其电阻值朝正的方向迅速变化。

CTR 在某个温度范围内电阻值急剧下降，灵敏度极高。

8.17 某热敏电阻，其 B 值为 2900K，若冰点电阻为 500 kΩ，求该热敏电阻在 100℃时的阻抗。

解：根据热敏电阻的阻值与温度的关系式：

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

由于其冰点(即 0℃)电阻为 500 kΩ, 因此, $R_0=500 \text{ k}\Omega$ 。那么, 100℃时的阻抗的阻抗为:

$$R_{100} = 100 \exp\left(\frac{2900}{273+100} - \frac{2900}{273}\right) = 5.8 \text{ k}\Omega$$

第九章 光电式传感器

9.1 什么是光电式传感器? 光电式传感器的基本工作原理是什么?

答: 光电式传感器(或称光敏传感器): 利用光电器件把光信号转换成电信号(电压、电流、电阻等)的装置。

光电式传感器的基本工作原理是基于光电效应的, 即因光照引起物体的电学特性而改变的现象。

9.2 光电式传感器按照工作原理可分为哪四大类?

答: 光电效应传感器; 红外热释电探测器; 固体图像传感器; 光纤传感器。

9.3 光电式传感器的基本形式有哪些?

答: 光电式传感器按测量光路组成来看, 可分为 4 种基本形式:

透射式光电传感器

反射式光电传感器

辐射式光电传感器

开关式光电传感器

9.4 什么是光电效应? 内光电效应? 外光电效应?

答: 当用光照射物体时, 物体受到一连串具有能量的光子的轰击, 于是物体材料中的电子吸收光子能量而发生相应的电效应(如电阻率变化、发射电子或产生电动势等)。这种现象称为光电效应。

内光电效应是光电效应的一种, 主要由于光量子作用, 引发物质电化学性质变化。

外光电效应是指在光线作用下, 能使电子逸出物体表面的现象, 如光电管(光电二极管、光电晶体管)、倍增管。

9.5 典型的光电器件有哪些?

答：典型的光电器件有基于外光电效应的光电管和光电倍增管，基于内光电效应的光电池、光敏电阻、光敏二极管以及光敏三极管。

9.6 光电管是如何工作的？其主要特性是什么？

答：光电管是根据外光电效应原理制成的。即当光照射到金属或金属氧化物的光电材料上时，光子的能量传给光电材料表面的电子，如果入射到表面的光能使电子获得足够的能量，电子会克服正离子对它的吸引力，脱离材料表面进入外界空间。

主要特性：伏安特性、光照特性、光谱特性、响应时间、峰值探测率和温度特性等。

9.7 简述光电倍增管的工作原理。光电倍增管的主要参数有哪些？

答：光电倍增管：使用时在各个倍增电极上均加电压。阴极电位最低，从阴极开始，各个倍增电极的点位依次升高，阳极点位最低。由于相邻两个倍增电极之间有电位差，因此，存在加速电场，对电子加速。从阴极发出的光电子，在电场的加速下，打到第一个倍增电极上引起二次电子发射。每个电子能从这个倍增电极上打出次级电子，次级电子经电场加速打到第二个倍增电极上，如此不断倍增，阳极最后收到的电子数将是阴极的 $10^5 \sim 10^8$ 倍。

主要参数：倍增系数、光电阴极灵敏度和光电倍增管总灵敏度、暗电流、光电倍增管的光谱特性。

9.8 试画出光敏电阻的结构；光敏电阻的主要参数有哪些？各有何含义？

答：光敏电阻的主要参数：暗电阻、亮电阻和光电流；伏安特性、光照特性、光谱特性、响应时间和频率特性、温度特性。

暗电阻：光敏电阻未受到光照时的阻值。

亮电阻：受到光照时的电阻。

光电流：光敏电阻未受到光照时流过的电流。

伏安特性：在一定照度下，光敏电阻两端电压和光电流之间的关系。

光照特性：光电流和光照强度之间的关系。

光谱特性：不同的光敏电阻对不同波长的入射光有不同的响应特性。

响应时间和频率特性：光敏电阻产生的光电流有一定的惰性，即响应时间；频率特性即入射信号的强弱。

温度特性：不同材料的光敏电阻有不同的温度特性。

9.9 试区分硅光电池和硒光电池的结构与工作原理。

答：硅光电池是在一块N型硅片上，用扩散的方法渗入一下P型杂质形成PN结。当入

射光照射在 PN 结上时。若光子能量大于半导体材料的禁带宽度，则在 PN 结附近激发出电子空穴对，在 PN 结内电场的作用下，N 型区的光生空穴被拉向 P 型区，P 型区的光生电子被拉向 N 型区，结果使 P 区带正电，N 区带负电，这样 PN 结就产生了电位差，若将 PN 结两端用导线连接起来，电路中就有电流流过，电流方向有 P 型区流经外电路至 N 型区。若将外电路断开，就可以测出光生电动势。

硒光电池是在铝片上涂硒（P 型），再用溅射的工艺，在硒层上形成一层半透明的氧化镉（N 型）。在正、反两面喷上低阻合金作为电极，在光线照射下，镉材料带负电，硒材料带正电，形成电流或者电动势。

9.10 试解释光敏管的工作原理。介绍光敏二极管和光敏三极管的主要特性。

答：光敏管的工作原理：在无光照射时，处于反偏的光敏二极管，工作在截至状态，这是只有少量的载流子在反向偏压下，越过阻拦层，形成微小的反向电流即。当光敏二极管受到光照射后，光子在半导体内被吸收，使 P 型区的电子数增多，也使 N 型区得空穴增多，即产生新的自由载流子。这些载流子在结电场的作用下。空穴向 P 型区移动，电子向 N 型区移动，从而使通过 PN 结的方向电流大为增加，这样就形成了光电流，处于导通状态。当入射光的强度发生变化时，光生载流子的多少响应发生变化，通过光敏二极管的电流也随之变化，这样把光信号变成了电信号。

光敏晶体管主要特性：光谱特性、伏安特性、光照特性、频率特性。

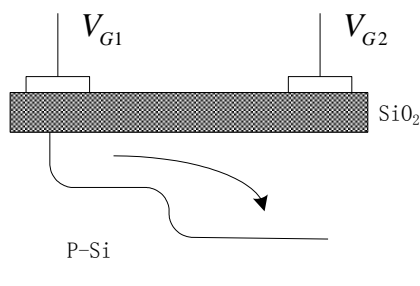
光敏二极管主要特性：光电流，响应时间，输出特性。

9.11 试介绍 MOS 光敏单元的工作原理。

答：对于光敏单元，当受到光线照射时，在光子的作用下，半导体内产生电子空穴对，空穴被排斥，电子被电子势阱俘获。这种光生电子作为反映光强的载体——电荷包被收集，成为光电荷注入，实现光信号向电荷信号的转变。

9.12 CCD 的电荷转移原理是什么？

答：CCD 器件基本结构是一系列彼此非常靠近的 MOS 光敏元，这些光敏元使用同一半导体衬底；氧化层均匀、连续；相邻金属电极间隔极小。任何可移动的电荷都将力图向表面势大的位置移动。为了保证信号电荷按确定的方向和路线转移，在 MOS 光敏元阵列上所加的各路电压脉冲要求严格满足相位要求。



9.13 试对面阵型 CCD 图像传感器进行分类,并介绍它们各自有何特点?

答:面阵型 CCD 可分为行传输、帧传输和行间传输三种。

行传输特点:有效光敏面积大、转移速度快、转移效率高。

帧传输特点:单元密度高、电极简单。

行间传输特点:感光单元面积小,密度高,图像清晰。

9.14 为什么要求 CCD 器件的电荷转移效率要很高?

答:由于信号电荷在传输过程中持续的光照会产生电荷,使信号电荷发生重叠,在显示器中出现模糊现象。因此在 CCD 摄像器件中有必要把摄像区和传输区分开,并且在时间上保证信号电荷从摄像区转移到传输区得时间小于摄像时间。

9.15 举例说明 CCD 图像传感器的应用。

答:计量检测仪器,光学信息处理,生产过程自动化,军事应用。

9.16 什么是全反射?光纤的数字孔径有何意义?

答:当入射角大于临界角时,光线就不会透过其界面而全部反射到光密介质内部,即发生全反射。

光纤的数值孔径是光纤的一个重要参数,它能反映光纤的集光能力,光纤的 NA 越大,表面它可以在较大入射角范围内输入全反射光,集光能力就越强,光纤与光源的耦合越容易,且保证实现全反射向前传播。但 NA 越大,光信号的畸变也越大,所以要适当选择 NA 的大小。

9.17 试区分功能型和非功能型光纤传感器。

答:型光纤传感器:利用光纤本身的特性把光纤作为敏感元件

非功能型光纤传感器:利用其他敏感元件感受被测量的变化,与其他敏感元件组合而成的传感器,光纤只作为光的传输介质

9.18 试解释波长调制型光纤传感器的工作原理。

答:波长调制型光纤传感器:单色光照射到运动物体上以后,反射回来,由于多普勒效应,其频率发生变化,用此频率的光与参考光共同作用于光探测器上,并产生差拍,经频谱分析仪处理求出频率变化,即可推知物体的运动速度。

9.19 举例说明利用光纤传感器实现温度测量的方法。

答：光强调制型光纤传感器。敏感元件是一个半导体光吸收器，光纤用于传输信号。当光源发出的光以恒定的强度经输入光纤到达半导体光吸收器时，透过吸收器的光强受薄片温度调制，然后透射光再由输出光纤传到光探测器。它将光强的变化转化为电压或电流的变化，达到传感温度的目的。

9.20 试分析二进制码盘和循环码盘的特点。

答：二进制码盘优点：只要根据码盘的起始和终止位置，就可以确定角位移。

二进制码盘缺点：任何微小的制作误差，都可能造成读书的粗误差。

循环码盘优点：是一种无权码任何相邻的两个数码之间只有一位是变化的，能有效克服由于制作和安装不准带来的误差。循环码盘缺点：它是一种无权码，译码相对困难。

9.21 试解释光电式编码器的工作原理。

答：光电式编码器：是将机械转动的位移（模拟量）转换成数字式电信号的传感器。

光电式编码器从结构上可分为码盘式和脉冲盘式两种。

码盘式编码器由光源、与旋转轴相连的码盘、窄缝、光敏元件等组成。当来自光源（多采用发光二极管）的光束经聚光透镜投射到码盘上时，转动码盘，光束经过码盘进行角度编码，再经窄缝射入光敏元件（多为硅光电池或光敏晶体管）组。光敏元件的排列与码道一一对应，即保证每个码道有一个光敏元件负责接收透过的光信号。光码盘转至不同的位置时，光敏元件组输出的信号反映了码盘的角位移大小。

脉冲盘式编码器是在圆盘上开有两圈相等角距的缝隙，外圈 A 为增量码道、内圈 B 为辨向码道，内、外圈的相邻两缝隙之间的距离错开半条缝宽，另外，在内外圈之外的某一径向位置，也开有一缝隙，表示码盘的零位，码盘每转一圈，零位对应的光敏元件就产生一个脉冲，称为“零位脉冲”。在开缝圆盘的两边分别安装光源及光敏元件，光栏板上两个狭缝，其距离是码盘上两个相邻狭缝距离的四分之一倍，并设置了两组对应的光敏元件（称为 \cos 、 \sin 元件），对应两个信号（四分之一间距差保证了两路信号的相位差为 90° ，便于辨向）。当码盘随被测工作轴转动时，每转过一个缝隙就发生一次光线明暗的变化，通过光敏元件产生一次电信号的变化，所以每圈码道上的缝隙数将等于其光敏元件每一转输出的脉冲数。利用计数器记录脉冲数，就能反映码盘转过的角度。

9.22 一个 8 位光电码盘的最小分辨率是多少？如果要求每个最小分辨率对应的码盘圆弧长度至少为 0.01 mm，则码盘半径应有多大？

解：8 位光码盘最小分辨率为 $\frac{360}{2^8} = 1.40625$

$$\frac{360}{2^8} = \frac{2 \times \pi}{x} \quad \text{解得: } x = \frac{2 \times \pi}{2^8}$$

$$\text{则由弧长公式 } L = x \times R \text{ 得: } R = \frac{L}{x} = \frac{0.01 \times 2^8}{2 \times \pi} = 0.41 \text{ mm}$$

故半径为 0.41 mm。

9.23 设某循环码盘的电刷初始位置为“0000”，利用该循环码盘测得结果为“0110”，其实际转过的角度是多少？

解：由循环码转换为二进制码：0110 与 (0)010 取异或得二进制码为：0100, 所以实际转过的角度 $\theta = \frac{360}{2^4} \times 4 = 90^\circ$ 。

9.24 试分析脉冲盘式编码器的辨向原理。

答：脉冲盘式编码器的辨向原理：脉冲盘式编码器两个码道产生的光电脉冲被两个光电元件接收，产生 A、B 两个输出信号，这两个输出信号经过放大整形后，产生 P_1 和 P_2 脉冲，将它分别接到 D 接触器的 D 端和 CP 端。

9.25 计量光栅是如何实现测量位移的？

答：两块具有相同栅距的长光栅叠合在一起，中间留有很小的间隙，并使两者的栅线之间形成一个很小的夹角 θ ，则在大致垂直于栅线的方向上出现明暗相间的莫尔条纹。

莫尔条纹测位移具有以下特点：

①对位移的放大作用

光栅每移动一个栅距 W ，莫尔条纹移动一个间距 B_H 。莫尔条纹的间距 B_H 与两光栅夹角 θ 的关系为：

$$B_H \approx \frac{W}{\theta}$$

式中：

W — 光栅的栅距

θ — 刻线夹角。

θ 越小， B_H 越大， B_H 相当于把 W 放大了 $1/\theta$ 倍。即光栅具有位移放大作用，从而可提高测量的灵敏度。

②莫尔条纹移动方向

光栅每移动一个光栅间距 W ，条纹跟着移动一个条纹宽度 B_H 。当固定一个光栅时，另一个光栅向右移动时，则莫尔条纹将向上移动；反之，如果另一个光栅向左移动，则莫尔条纹将向下移动。因此，莫尔条纹的移动方向有助于判别光栅的运动方向。

利用光栅具有莫尔条纹的特性，通过测量莫尔条纹的移动数和移动方向，可以测量两光栅的相对位移量。

9.26 计量光栅中为何要引入细分技术？细分的基本原理是什么？

答：计量光栅的测量是以移过的莫尔条纹的数量来确定位移量的，其分辨率为光栅栅距。为了进一步提高测量精度，需要提高分辨率，测量比光栅栅距更小的位移量，因此要引入细分技术。

细分的基本原理：就是为了得到比栅距更小的分度值，即在莫尔条纹信号变化一个周期内，发出若干个计数脉冲，以减小每个脉冲相当的位移，相应地提高测量精度，如一个周期内发出 N 个脉冲，计数脉冲频率提高到原来的 N 倍，每个脉冲相当于原来栅距的 $1/N$ ，则测量精度将提高到原来的 N 倍。具体的细分方法可以采用机械或电子方式实现，常用的有倍频细分法和电桥细分法。

9.27 已知某计量光栅的栅线密度为 100 线/mm，栅线夹角 $\theta = 0.1^\circ$ 。试求：

- (1) 该光栅形成的莫尔条纹间距为多少？
- (2) 若采用该光栅测量线位移，已知指示光栅上的莫尔条纹移动了 15 条，则被测线位移为多少？
- (3) 若采用四只光敏二极管接收莫尔条纹信号，并且光敏二极管响应时间为 $10^{-6} s$ ，问此时光栅允许最快的运动速度 v 是多少？

解：(1) 由已知栅线密度为 100 线/mm，可知光栅栅距为：

$$W = 1/100 = 0.01 \text{ mm}$$

又栅线夹角 $\theta = 0.1^\circ = 0.00175 \text{ rad}$ 。

$$\therefore \text{莫尔条纹间距 } B_H = \frac{W}{\theta} = \frac{0.01}{0.00175} = 5.714 \text{ mm}$$

$$(2) \text{ 被测线位移为 } \Delta x = 15W = 15 \times 0.01 = 0.15 \text{ mm}$$

(3) 光栅运动速度与光敏二极管响应时间成反比，即

$$v = \frac{W}{t} = \frac{0.01 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 10 (\text{m/s})$$

第10章 辐射与波式传感器

10.1 红外探测器有哪些类型？并说明它们的工作原理。

答：红外探测器按探测机理的不同，通常可分为两大类：热探测器和光子探测器。

1) 热探测器

热探测器利用了红外线被物体吸收后将转变为热能的这一热效应。当热探测器的敏感元件吸收红外辐射后将引起温度升高，使敏感元件的相关物理参数发生变化，通过对这些物理参数及其变化的测量就可确定探测器所吸收的红外辐射。

2) 光子探测器

光子探测器型红外传感器是利用光子效应进行工作的传感器。光子效应就是当有红外线入射到某些半导体材料上，红外辐射中的光子流与半导体材料中的电子相互作用，改变了电子的能量状态，引起各种电学现象。通过测量半导体材料中电子性质的变化，可以知道红外辐射的强弱。光子探测器主要有内光电探测器和外光电探测器两种，内光电探测器又分为光电导、光生伏特和光磁电探测器三种类型。

10.2 什么是热释电效应？热释电效应与哪些因素有关？

答：当红外光照射到已经极化了的铁电薄片上时，引起薄片温度的升高，使其极化强度（单位面积上的电荷）降低，表面的电荷减少，这相当于释放一部分电荷，这样现象称为热释电效应。

热释电型传感器输出信号的强弱取决于薄片温度变化的快慢，从而反映入射的红外辐射的强弱，所以热释电型传感器的电压响应率正比于入射光辐射率变化的速率，不取决于晶体与辐射是否达到热平衡。

10.3 什么被称为“大气窗口”，它对红外线的传播有什么影响？

答：电磁波通过大气层较少被反射、吸收和散射的那些透射率高的波段称为大气窗口。对红外线的传播的影响主要表现为吸收和反射。

10.4 红外敏感元件大致分为哪两类？它们的主要区别是什么？

答：红外探测器按探测机理的不同，通常可分为两大类：热探测器和光子探测器。

红外线被物体吸收后将转变为热能。热探测器正是利用了红外辐射的这一热效应。当热探测器的敏感元件吸收红外辐射后将引起温度升高，使敏感元件的相关物理参数发生变化，通过对这些物理参数及其变化的测量就可确定探测器所吸收的红外辐射。

光子探测器型红外传感器是利用光子效应进行工作的传感器。光子效应是当有红外线入射到某些半导体材料上，红外辐射中的光子流与半导体材料中的电子相互作用，改变了电子

的能量状态,引起各种电学现象。通过测量半导体材料中电子性质的变化,可以知道红外辐射的强弱。光子探测器主要有内光电探测器和外光电探测器两种。

光子探测器和热释电探测器的区别是:光子探测器在吸收红外能量后,直接产生电效应;热释电探测器在吸收红外能量后,产生温度变化,从而产生电效应,温度变化引起的电效应与材料特性有关。

10.5 请根据气体对红外线有选择性吸收的特性,设计一个红外线气体分析仪器。使其能对气体的成分进行分析。(提示:不同气体对红外线能量的吸收是不同的)

答: (略)

10.6 微波的特点是什么?

答: 需要定向辐射装置;遇到障碍物容易反射;绕射能力差;传输特性好,传输过程中受烟雾、灰尘等的影响较小;介质对微波的吸收大小与介质介电常数成正比,如水对微波的吸收作用最强。

10.7 试分析反射式和遮断式微波传感器的工作原理。

答: 反射式微波传感器是通过检测被测物反射回来的微波功率或经过的时间间隔来测量被测量的。通常它可以测量物体的位置、位移、厚度等参数。

遮断式微波传感器是通过检测接收天线收到的微波功率大小来判断发射天线与接收天线之间有无被测物体或被测物体的厚度、含水量等参数的。

10.8 试分析微波传感器的主要组成及其各自的功能。

答: 微波传感器包括三个部分:微波发生器、微波天线、微波检测器

微波发生器:产生微波。

微波天线:将振荡器产生的微波信号发射出去。

微波检测器:探测微波信号。

10.9 微波传感器有何优、缺点?

答: 优点:微波传感器是一种非接触式传感器;有极宽的频谱;可在恶劣环境下工作;频率高;无须进行非电量转换;传输距离远;不会带来显著辐射 ‘

缺点:存在零点漂移,给标定带来困难;测量环境对测量结果影响大。

10.10 举例说明微波传感器的应用。

答:微波液位计;微波湿度传感器;微波辐射计;微波无损检测仪;微波物位计;微波定位传感器;微波多普勒传感器。

10.11 超声波在介质中传播具有哪些特性?

答：超声波的特性是频率高、波长短、绕射现象小。它最显著的特性是方向性好，且在液体、固体中衰减很小，穿透本领大，碰到介质分界面会产生明显的反射和折射，因而广泛应用于工业检测中

10.12 超声波传感器主要有哪几种类型？试述其工作原理。

答：主要有压电式超声波传感器和磁致伸缩式超声波传感器。

压电式超声波传感器是利用压电材料的压电效应原理来工作的。

磁致伸缩式超声波传感器是利用铁磁材料的磁致伸缩效应来工作的。

10.13 在用脉冲回波法测量厚度时，利用何种方法测量时间间隔 Δt 有利于自动测量？若已知超声波在被测试件中的传播速度为 5480 m/s，测得时间间隔为 25 μs ，试求被测试件的厚度。

解：可用稳频晶振产生的时间标准信号来测量时间间隔 Δt

$$d = \frac{V \times \Delta t}{2} = \frac{5480 \times 25 \times 10^{-6}}{2} = 0.0685 \text{ m}$$

10.14 超声波测物位有哪几种测量方式？各有什么特点？

答：超声波测物位方法：当换能器在液体中，双换能器在液体中，当换能器在空中，双换能器在空中。

单换能器在液体中特点：超声波在液体中衰减小，超声波幅度较小也可传播。发射和接受超声波使用一个换能器。

双换能器在液体中特点：超声波在液体中衰减小，超声波幅度较小也可传播。有两个换能器。

单换能器在空中特点：便于安装和维修。发射和接受超声波使用一个换能器。

双换能器在空中特点：便于安装和维修。有两个换能器。

10.15 试述时差法测流量的基本原理，存在的主要问题及改进方法。

答：时差法测流量：超声波顺流时间为 $t_1 = \frac{L}{c + v \times \cos \theta}$
 逆流时间为 $t_2 = \frac{L}{c - v \times \cos \theta}$ ，所以时间差为 $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2 \times L \times v \times \cos \theta}{c^2 - v^2 \times \cos^2 \theta}$
 一般来说， $c \gg v$ ，所以上式简化为： $\Delta t \approx \frac{2 \times L \times v \times \cos \theta}{c^2}$

因此被测流体的平均速度为 $v \approx \frac{c^2}{2 \times L \times \cos \theta} \times \Delta t$

测得流体流速后, 再根据管道流体的截面积, 即可求得被测流体的流量。

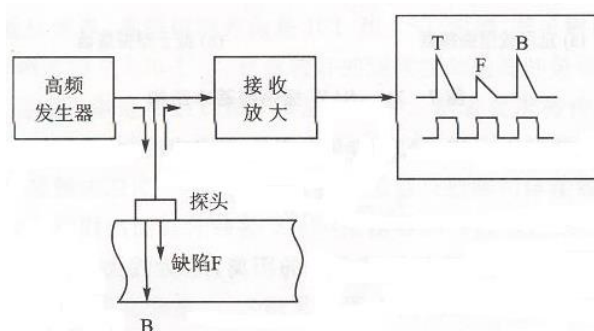
由于被测流量与超声波传播速度 c 有关, 而声速 c 一般随介质的温度变化而变化, 因此存在温漂的问题。

10.16 超声波用于探伤有哪几种方法? 试述反射法探伤的基本原理。

答: 超声波探伤方法: 穿透法探伤和反射法探伤。

反射法探伤是根据超声波在工件中反射情况的不同来探测工件内部是否有缺陷。它可分为一次脉冲反射法和多次脉冲反射法两种。

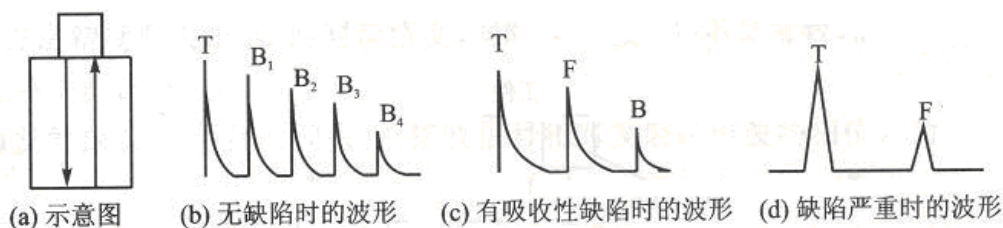
①一次脉冲反射法



一次脉冲反射法探伤原理

如上图所示, 测试时, 将超声波探头放于被测工件上, 并在工件上来回移动进行检测。由高频脉冲发生器发出脉冲 (发射脉冲 T) 加在超声波探头上, 激励其产生超声波。探头发出的超声波以一定速度向工件内部传播。其中, 一部分超声波遇到缺陷时反射回来, 产生缺陷脉冲 F , 另一部分超声波继续传至工件底面后也反射回来, 产生底脉冲 B 。缺陷脉冲 F 和底脉冲 B 被探头接收后变为电脉冲, 并与发射脉冲 T 一起经放大后, 最终在显示器荧光屏上显示出来。通过荧光屏即可探知工件内是否存在缺陷、缺陷大小及位置。若工件内没有缺陷, 则荧光屏上只出现发射脉冲 T 和底脉冲 B , 而没有缺陷脉冲 F ; 若工件中有缺陷, 则荧光屏上除出现发射脉冲 T 和底脉冲 B 之外, 还会出现缺陷脉冲 F 。荧光屏上的水平亮线为扫描线 (时间基准), 其长度与时间成正比。由发射脉冲、缺陷脉冲及底脉冲在扫描线上的位置, 可求出缺陷位置。由缺陷脉冲的幅度, 可判断缺陷大小。当缺陷面积大于超声波声束截面时, 超声波全部由缺陷处反射回来, 荧光屏上只出现发射脉冲 T 和缺陷脉冲 F , 而没有底脉冲 B 。

②多次脉冲反射法



多次脉冲反射法探伤原理

如上图所示,多次脉冲反射法是以多次底波为依据而进行探伤的方法。如图(a)所示,超声波探头发出的超声波由被测工件底部反射回超声波探头时,其中一部分超声波被探头接收,而剩下部分又折回工件底部,如此往复反射,直至声能全部衰减完为止。因此,若工件内无缺陷,则荧光屏上会出现呈指数函数曲线形式递减的多次反射底波(如图(b)所示);若工件内有吸收性缺陷时,声波在缺陷处的衰减很大,底波反射的次数减少(如图(c)所示);若缺陷严重时,底波甚至完全消失(如图(d)所示)。据此可判断出工件内部有无缺陷及缺陷严重程度。

第11章 化学传感器

11.1 气敏传感器有哪几种类型?简述电阻式气敏传感器的工作原理。

答:根据工作原理的不同,气敏传感器可分为半导体式、接触燃烧式、化学反应式、光干涉式、热传导式、红外线吸收散射式等。

电阻式气敏传感器是用氧化锡、氧化锌等金属氧化物材料制作成敏感元件,利用敏感材料接触气体时其电阻值的变化来检测气体的成份或浓度。金属氧化物半导体分为N型半导体(如氧化锡、氧化铁、氧化锌等)和P型半导体(如氧化钴、氧化铅、氧化铜、氧化镍等)。当氧化型气体吸附到N型半导体(如 SnO_2 , ZnO)上,或还原型气体吸附到P型半导体(如 MoO_2 , CrO_3)上时,将使多数载流子(价带空穴)减少,电阻增大。相反,当还原型气体吸附到N型半导体上,或氧化型气体吸附到P型半导体上时,将使多数载流子(导带电子)增多,电阻下降。

11.2 为什么大多数气敏器件都装有加热器?

答:大多数气敏器件装加热器是保证电阻式气敏元件工作在高温状态,一般温度范围在 $200\sim 450^\circ\text{C}$,其目的是为了使附着在测控部分的油雾、尘埃等有害物质去掉,并加速气体与金属氧化物的氧化还原反应,提高器件的灵敏度和响应速度。

11.3 气敏传感器一般应用于哪些方面?试举例说明,并阐述其基本原理。

答:各种易燃、易爆、有毒、有害气体对人们的生产、生活以及人身安全造成极大的危害,人们可以应用相应的气敏传感器来实现对这些气体的检测和报警,从而减少有害气体的危害。

举例(略)。

11.4 试述电阻式湿敏传感器的基本原理、主要类型及各自的特点。

答：电阻式湿敏传感器是利用器件电阻值随湿度变化的基本原理来进行工作的，其感湿特征量为电阻值。

根据使用感湿材料的不同，电阻式湿敏传感器可分为电解质式、陶瓷式和高分子式三类。

特点：

(1) 电解质式(氯化锂)

优点：滞后小；不受测试环境（如风速）影响；检测精度高达 $\pm 5\%$ 。

缺点：耐热性差；不能用于露点以下测量；器件重复性差，使用寿命短。电流必须用交流，以免出现极化。

(2) 陶瓷式的特点

a) 传感器表面与水蒸气的接触面积大，易于水蒸气的吸收与脱却；

b) 陶瓷烧结体能耐高温，物理、化学性质稳定，适合采用加热去污的方法恢复材料的湿敏特性；

c) 可以通过调整烧结体表面晶粒、晶粒界和细微气孔的构造，改善传感器湿敏特性。

(3) 高分子式的特点

测量湿度范围大，工作温度在 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，响应时间短（ $< 30\text{s}$ ），测量范围为 $0\sim 100\text{RH}$ ，误差在 $\pm 5\text{RH}$ 左右。

11.5 陶瓷式电阻湿敏传感器的导电机理是什么？有何特点？

答：陶瓷式电阻湿敏传感器的导电机理分为负特性和正特性两种情形：

A. 负特性湿敏半导体陶瓷的导电机理

水分子中的氢原子具有很强的正电场，当水在半导体陶瓷表面吸附时，就可能从半导体陶瓷表面俘获电子。若该半导体陶瓷是P型半导体，则由于水分子的附着使表面电势下降，电阻值下降。若该半导体陶瓷为N型，则由于水分子的附着同样会使表面电势下降，如果表面电势下降很多，不仅使表面层的电子耗尽，同时将更多的空穴吸引到表面层，并有可能使到达表面层的空穴浓度大于电子浓度，出现所谓表面反型层（即空穴浓度大于电子浓度），这些空穴称为反型载流子，它们同样可以在半导体陶瓷表面迁移而使电阻率下降。由此可见，不论是P型还是N型半导体陶瓷，其电阻率都随湿度的增加而下降，显示出负湿敏特性。

B. 正特性湿敏半导体陶瓷的导电机理

正特性湿敏半导体陶瓷的导电机理认为这类材料的结构、电子能量状态与负特性材料有所不同。当水分子吸附在半导体陶瓷的表面使其表面电势下降，造成表面层电子浓度下降，但还不足以使表面层的空穴浓度增加到出现反型层的程度，此时仍以电子导电为主。于是表

面电阻将随着电子浓度的下降而增大。由于通常湿敏半导体陶瓷材料都是多孔型的,表面电阻占的比例很大,故表面层电阻的升高,必将引起总电阻值的明显升高。因此这类半导体陶瓷材料的电阻值将随环境湿度的增加而加大。

陶瓷式电阻湿敏传感器的特点:

(1) 传感器表面与水蒸气的接触面积大,易于水蒸气的吸收与脱却;

(2) 陶瓷烧结体耐高温,物理、化学性质稳定,适合采用加热去污的方法恢复材料的湿敏特性;

(3) 可以通过调整烧结体表面晶粒、晶粒界和细微气孔的构造,改善传感器湿敏特性。

11.6 当对房间内湿度进行控制时,可采用哪些方法?试举例说明,并解释其原理。

答:(略)

第12章 生物传感器

12.1 简述生物传感器的概念和特点。

答:生物传感器是指利用固定化的生物分子作为敏感元件,用来侦测生物体内或生物体外的环境化学物质或与之起特异性交互作用后产生响应的一种装置。

生物传感器也定义为:一种含有固定化生物物质(如酶、抗体、全细胞、细胞器或其联合体)并与一种合适的换能器紧密结合的分析工具或系统,它可以将生化信号转化为数量化的电信号。

与传统的传感器技术相比,生物传感器具有如下特点:

(1) 测定范围广泛。根据生物反应的特异性和多样性,理论上可制成测定所有生物物质的传感器。

(2) 生物传感器是由选择性好的生物材料构成的分子识别元件,因此一般不需要对样品进行预处理,样品中的被测组分的分离和检测同时完成,且测定时一般不需加入其它试剂。

(3) 采用固定化生物活性物质作敏感基元(催化剂),价值昂贵的试剂可以重复多次使用,克服了过去酶法分析试剂费用高和化学分析繁琐复杂的缺点。

(4) 测定过程简单迅速。这类传感器主要是在无试剂条件下操作(缓冲液除外),因此,较传统的生物学或化学分析法操作简单、迅速、准确,响应快,样品用量少。

(5) 准确度和灵敏度高。一般相对误差不超过1%。由于生物敏感膜分子的高度特异性

和灵敏性,对一些含量极低的检测对象也能检测出来。

(6)生物传感器体积小,检测方法简便、准确、快速,可以实现连续在线监测,容易实现自动分析。

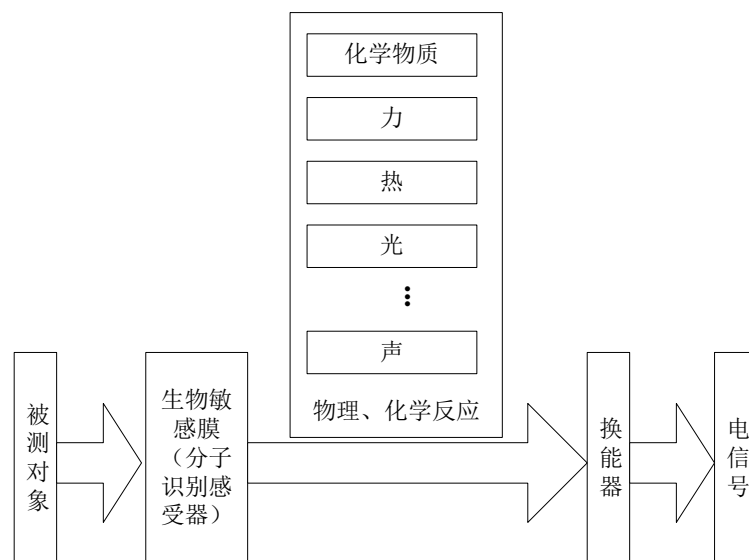
(7)专一性强,只对特定的底物起反应,而且不受颜色、浊度的影响。

(8)可进入生物体内。如安放于静脉或动脉中的葡萄糖传感器,能持续不断地监测血糖含量,并将指令传给植入人体的胰岛素泵,控制胰岛素释放量,从而使糖尿病人得到解放。

(9)生物传感器成本低,便于推广普及。

12.2 简述生物传感器的工作原理。

答:生物传感器是通过被测定分子与固定在生物接受器上的敏感材料(即生物敏感膜)发生特异性结合,并发生生物化学反应,产生热焓变化、离子强度变化、pH变化、颜色变化或质量变化等信号,产生信号的强弱在一定条件下与特异性结合的被测定分子的量存在一定的数学关系,这些信号经换能器转变成电信号后被放大测定,从而间接测定被测定分子的量,如下图所示。



生物传感器原理图

12.3 简述生物传感器的分类方法。

答:(1)根据传感器输出信号的产生方式,可分为亲和型生物传感器、代谢型生物传感器、催化型生物传感器。

(2)根据生物传感器中信号检测器(分子识别元件)上的敏感物质分类。生物传感器与其它传感器的最大区别在于生物传感器的信号检测中含有敏感的生命物质。根据敏感物质的不同,生物传感器可分酶传感器、微生物传感器、组织传感器、细胞及细胞器传感器、基因

传感器、免疫传感器等。生物学工作者习惯于采用这种分类方法。

(3) 根据生物传感器的信号转换器分类。生物传感器中可以利用电化学电极、场效应晶体管、热敏电阻、光电器件、声学装置等作为生物传感器中的信号转换器。因此,可将传感器分为电化学生物传感器、半导体生物传感器、热学型生物传感器、光学型生物传感器、声学型生物传感器等。电子工程学工作者习惯于采用这种分类方法。

(4) 根据检测对象的多少,分为以单一化学物质为检测对象的单功能型生物传感器和同时检测微量多种化学物质的多功能型生物传感器。

(5) 根据生物传感器的用途可分为免疫传感器、药物传感器等。

12.4 简述生物芯片的种类。

答:生物芯片的种类很多,几种主要的生物芯片是:①基因芯片。②蛋白质芯片。③细胞芯片。④组织芯片。

12.5 简述生物传感器的发展。

答:生物传感器是一个多学科交叉的高技术领域,微电子技术、微制造技术、生物材料学和信息技术的高速发展为生物传感器的发展打下了坚实基础,伴随着生物科学、信息科学和材料科学等相关学科的高速发展,生物传感器在食品、医药、环境和过程监控等方面应用范围不断扩大,人们对生物传感器也提出了更高的要求,生物传感器将与微处理器和数据交流系统结合,向大规模数据获取和实时处理、多功能化、智能化、小型化方向发展。

为了获得高灵敏度、高稳定性、低成本的生物量检测,生物传感器正在向以下几个方向发展。

- (1) 开发新材料,采用新工艺
- (2) 研究仿生传感器
- (3) 研究多功能集成的智能式传感器
- (4) 成本低、高灵敏度、高稳定性、高寿命和微型化生物传感器

第13章 新型传感器

13.1 什么是智能传感器?

答:智能传感器是基于人工智能、信息处理技术实现的具有分析、判断,量程自动转换,漂移、非线性和频率响应等自动补偿,对环境影响量的自适应,自学习以及超限报警、故障

诊断等功能的传感器。

13.2 智能传感器有何特点？

答：与传统传感器相比，智能传感器有以下特点：

- (1) 精度高
- (2) 高可靠性与高稳定性
- (3) 高信噪比与高分辨率
- (4) 自适应性强
- (5) 性能价格比高

13.3 智能传感器如何实现？

答：智能传感器的实现有三种途径：

(1) 集成化实现

即采用微机械加工技术和大规模集成电路工艺，利用半导体材料硅作为基本材料来制作敏感元件，将信号调理电路、微处理器单元等集成在一块芯片上构成的。

(2) 非集成化实现

是将传统传感器(采用非集成化工艺制作的传感器，仅具有获取信号的功能)、信号调理电路、带数字总线接口的微处理器合为一体而构成的一个智能传感器系统。

(3) 混合实现

混合实现是指根据需要与可能，将系统各个集成化环节，如敏感单元、信号调理电路、微处理器单元、数字总线接口等，以不同的组合方式集成在几块芯片上，并装在一个外壳里。

13.4 如何设计智能传感器？

答：智能传感器的设计一般要涉及以下几个方面的内容及相应的流程：

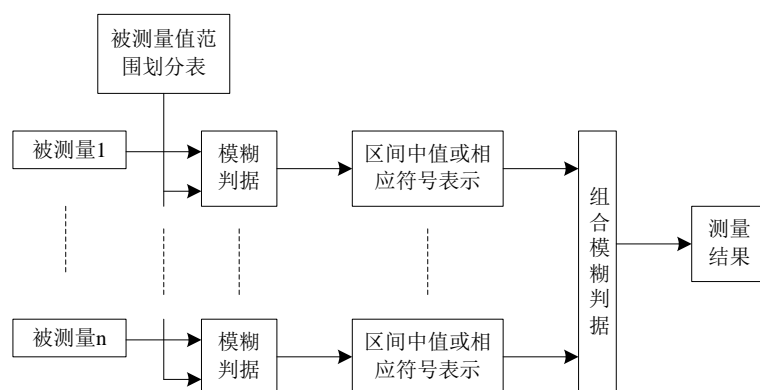
- (1) 智能压力传感器的结构设计
- (2) 敏感元件设计
- (3) 传感器工艺设计
- (4) 软件设计

13.5 什么是模糊传感器？

答：模糊传感器是以数值测量为基础，并能产生和处理与其相关的测量符号信息的装置，即模糊传感器是在经典传感器数值测量的基础上经过模糊推理与知识集成，以自然语言符号的描述形式输出的传感器。

13.6 模糊传感器的一般结构是什么？

答：模糊传感器的一般结构如下图所示。



13.7 模糊传感器的基本功能有哪些？

答：模糊传感器作为一种智能传感器，具有智能传感器的基本功能，即学习、推理、联想、感知和通信功能。

13.8 什么是微机电系统？

答：微机电系统就是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、通讯接口和电源等部件组成的一体化的微型器件系统。其目标是把信息的获取、处理和执行集成在一起，组成具有多功能的微型系统，集成于大尺寸系统中，从而大幅度地提高系统的自动化、智能化和可靠性水平。

13.9 微机电系统的基本结构是什么？

答：微机电系统的基本结构一般由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、通讯接口和电源等部件组成。

13.10 简要介绍主要的 MEMS 制造技术。

答：（1）超精密加工及特种加工

利用传统的超精密加工以及特种加工技术实现微机械加工。微机电系统中采用的超精密加工技术多是由加工工具本身的形状或运动轨迹来决定微型器件的形状。这类方法可用于加工三维的微型器件和形状复杂、精度高的微构件。其主要缺点是装配困难、与电子元器件和电路加工的兼容性不好。

（2）表面微加工

以硅片作基片，通过淀积与光刻形成多层薄膜图形，把下面的牺牲层经刻蚀去除，保留上面的结构图形的加工方法。在基片上有淀积的薄膜，薄膜生成通常采用物理气相淀积和化学气相淀积工艺在衬底材料上制作而成。表面牺牲层制作是先在衬底上淀积牺牲层材料，利用光刻形成一定的图形，然后淀积作为机械结构的材料并光刻出所需的图形，再将支撑结构

层的牺牲层材料腐蚀掉，从而形成悬浮的、可动的微机械结构部件。

(3) 体微加工

体微加工技术是为制造微三维结构而发展起来的，是按照设计图在硅片（或其他材料）上有选择地去除一部分硅材料，形成微机械结构。体微加工技术的关键技术是蚀刻，通过腐蚀对材料的某些部分有选择地去除，使被加工对象显露出一定的几何结构特征。腐蚀方法分为化学腐蚀和离子腐蚀。

(4) LIGA 技术

LIGA 技术先利用同步辐射 X 射线光刻技术光刻出所需要的图形，然后利用电铸成型方法制作出与光刻图形相反的金属模具，再利用微塑铸形成深层微结构。LIGA 技术的优点是能制造三维微结构器件，获得的微结构具有较大的深宽比和精细的结构，侧壁陡峭、表面平整，微结构的厚度可达几百乃至上千 μm 。

13.11 什么是微传感器？微传感器有何特点？

答：微传感器是利用集成电路工艺和微组装工艺，基于各种物理效应的机械、电子元器件集成在一个基片上的传感器。

与一般传感器（即宏传感器）比较，微传感器具有以下特点：

（1）空间占有率小。对被测对象的影响少，能在不扰乱周围环境，接近自然的状态下获取信息。

（2）灵敏度高，响应速度快。由于惯性、热容量极小，仅用极少的能量即可产生动作或温度变化。分辨率高，响应快，灵敏度高，能实时地把握局部的运动状态。

（3）便于集成化和多功能化。能提高系统的集成密度，可以用多种传感器的集合体把握微小部位的综合状态量；也可以把信号处理电路和驱动电路与传感元件集成于一体，提高系统的性能，并实现智能化和多功能化。

（4）可靠性提高。可通过集成构成伺服系统，用零位法检测；还能实现自诊断、自校正功能。把半导体微加工技术应用于微传感器的制作，能避免因组装引起的特性偏差。与集成电路集成在一起可以解决寄生电容和导线过多的问题。

（5）消耗电力小，节省资源和能量。

（6）价格低廉。能多个传感器集成在一起且无须组装，可以在一块晶片上同时集成几个传感器，从而大幅度降低材料和制造成本。

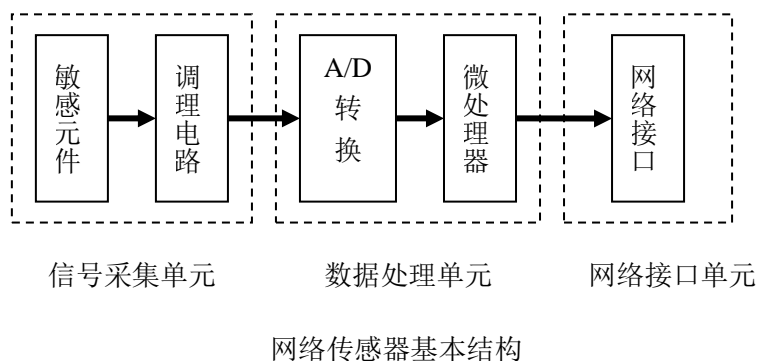
13.12 什么是网络传感器？

答：网络传感器是指传感器在现场级实现网络协议，使现场测控数据能够就近进入网络

传输,在网络覆盖范围内实时发布和共享。简单地说,网络传感器就是能与网络连接或通过网络使其与微处理器、计算机或仪器系统连接的传感器。

13.13 网络传感器的基本结构是什么?

答:网络传感器基本结构如下图所示。网络传感器主要是由信号采集单元、数据处理单元及网络接口单元组成。



13.14 网络传感器是如何分类的?

答:目前,主要有基于现场总线的网络传感器和基于以太网(Ethernet)协议的网络传感器两大类。

13.15 简要介绍 IEEE1451 网络传感器。

答:IEEE1451 网络传感器就是配备了 IEEE1451 标准接口系统的网络传感器。IEEE1451 的智能变送器接口标准的主要目标是定义一整套通用的通信接口,使变送器能够独立于网络与现有基于微处理器的系统,仪器仪表和现场总线网络相连,并最终实现变送器到网络的互换性与互操作性。

13.16 网络传感器的主要发展方向是什么?

答:目前,网络传感器的应用主要面向两个大的方向。

(1) 分布式测控

将网络传感器布置在测控现场,处于控制网络中的最低级,其采集到的信息传输到控制网络中的分布智能节点,由它处理,然后传感器数据散发到网络中。网络中其他节点利用信息做出适当的决策,如操作执行器、执行算法。

(2) 嵌入式网络

现有的嵌入式系统虽然已得到广泛的应用,但大多数还处在单独应用的阶段,独立于因特网之外。如果能够将嵌入式系统连接到因特网上,则可方便、低廉地将信息传送到任何需要的地方。嵌入式网络的主要优点:不需要专用的通信线路;速度快;协议是公开的,适用

于任何一种 WEB 浏览器；信息反映的形式是多样化的等。

第 14 章 参数检测

14.1 试分析检测技术有何重要意义。

答：(略)

14.2 什么是测量？

答：测量就是以确定被检测值为目的的一系列操作，即利用物质的物理的、化学的或生物的特性，对被测对象的信息进行提取、转换以及处理，获得定性或定量结果的过程。

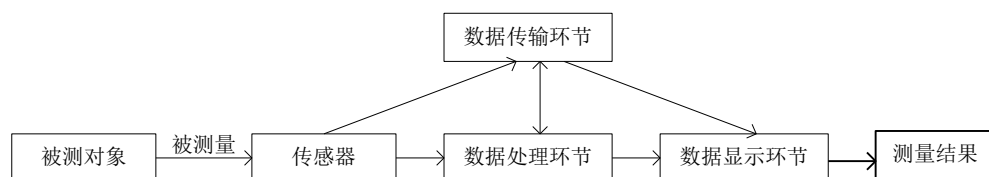
14.3 测量方法是如何进行分类的？

答：

- 1) 根据测量方式的不同可分为：直接测量、间接测量和组合测量
- 2) 根据测量方法的不同可分为：偏差式测量、零位式测量和微差式测量
- 3) 根据测量精度要求的不同可分为：等精度测量和非等精度测量
- 4) 根据被测量变化的快慢可分为：静态测量和动态测量
- 5) 根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为：接触式测量和非接触式测量

14.4 测量系统的结构是什么？

答：测量系统的结构如下图所示。



14.5 测量系统是如何分类的，各有何特点？

答：根据测量系统是否存在反馈通道，或信号在测量系统中的传递情况，可以将测量系统分为开环测量系统与闭环测量系统两种基本类型。

开环测量系统没有反馈通道，全部信息的变换只沿着一个方向进行。除非提高各环节的抗干扰能力，否则，开环测量系统很难获得高的测量精度。

闭环测量系统有两个通道：一个正向通道，一个反馈通道。对于闭环结构的测量系统，如果正向通道的传递系数足够大，则整个系统的输入、输出关系由反馈环节的特性决定，而正向通道的放大器等环节特性的变化不会影响测量结果。

14.6 实现参数检测的一般方法主要有哪些？

答：实现参数测量的方法主要包括：力学法、热学法、电学法、声学法、光学法、磁学法、射线法、生物法。

14.7 针对常见的过程量，简述其主要的检测方法。

答：(1) 温度检测

温度测量方法及其使用的传感器

测量方法	测温原理		温度传感器
接触式测量	体积变化	固体热膨胀	双金属温度计
		液体热膨胀	玻璃管液体温度计
		气体热膨胀	气体温度计、充气式压力温度计
	电阻变化		金属热电阻、半导体热敏电阻
	热电效应		热电偶
	频率变化		石英晶体温度传感器
	光学特性		光纤温度传感器、液晶温度传感器
	声学特性		超声波温度传感器
非接触式	热辐射	亮度法	光学温度计、光电亮度温度计
		全辐射法	全辐射温度计
		比色法	比色温度计
		红外法	红外温度传感器
	气流变化		射流温度传感器

(2) 压力检测

压力测量方法及其使用的传感器

测量方法	测量原理	压力计形式	测压范围/kPa	输出信号	性能特点
液压法	液体静力平衡原理，使被测压力与一定高度的工作液体产生的重力相平	U型管	-10~10	水柱高度	实验室低、微压测量
		补偿式	-2.5 ~ 2.5	旋转刻度	用作微压基准仪器
		自动液	-10 ² ~10 ²	自动计数	用光、电信号自动跟踪液

	衡, 利用液柱的高位差来测量压力	柱式			面, 用作压力基准仪器
弹性 变形 法	弹性元件受力产生变形原理, 使受压后产生的位移与被测压力成一定函数关系	弹簧管	$-10^2 \sim 10^6$	位移、转角 或力	直接安装, 就地测量或校验
		膜片	$-10^2 \sim 10^3$		用于腐蚀性、高粘度介质测量
		膜盒	$-10^2 \sim 10^2$		用于微压的测量与控制
		波纹管	$0 \sim 10^2$		用于生产过程低压的测控
负荷 法	静力平衡原理	活塞式	$0 \sim 10^6$	砝码负荷	结构简单, 坚实, 精确度极高。广泛用作压力基准器
		浮球式	$0 \sim 10^4$		
压电 法	将被测压力转换成电阻量、电感量、电容量、频率量等电学量	电阻式	$-10^2 \sim 10^4$	电压、电流	结构简单, 耐振动性差
		电感式	$0 \sim 10^5$	毫伏、毫安	环境要求低, 信号处理灵活
		电容式	$0 \sim 10^4$	伏、毫安	动态响应快, 灵敏度高, 易受干扰
		压阻式	$0 \sim 10^5$	毫伏、毫安	性能稳定可靠, 结构简单
		压电式	$0 \sim 10^4$	伏	响应速度极快, 限于动态测量
		应变式	$-10^2 \sim 10^4$	毫伏	冲击、温湿度影响小, 电路复杂
		振频式	$0 \sim 10^4$	频率	性能稳定, 精度高
		霍尔式	$0 \sim 10^4$	毫伏	灵敏度高, 易受外界干扰

(3) 流量检测

一般分为三种: 速度式流量检测方法、容积式流量检测方法和质量式流量检测方法。

(4) 物位检测

物位测量方法根据可利用的物位传感器分为以下几种: 直读式、浮力式、差压式、电学式、核辐射式、声学式或其它形式。

(5) 气体成分检测

常用气体传感器

大类	子类	工作原理
干式(构成气)	半导体气敏传感器	利用金属氧化物半导体敏感元件表面吸附有被测

体传感器的敏感材料为固体)		气体时,其接触面的导电电子比例会发生改变,使气敏元件的电阻值随被测气体的成分含量的变化而变化
	接触燃烧式气体成分传感器	可燃气体燃烧导致铂丝线圈的电阻值发生变化,电阻变化与气体浓度成正比
	热导率变化式气体传感器	每种气体都有固定的热导率,混合气体的热导率利用空气作为基准中被测气体进行比较而得到。热导率变化式气体传感器的测量电路与接触燃烧式气体成分传感器相同
	红外线气体成分分析仪	利用许多化合物的分子在红外波段都有吸收带,气体种类不同,吸收带所在的波长和吸收的强弱也各不相同
湿式(敏感材料为电解质溶液)	原电池式	当被测气体通过隔膜扩散到电解液中后,不同气体会在不同固定电压(由原电池提供)作用下发生电解,通过测量电流的大小,即可测得被测气体参数
	极谱式	当被测气体通过隔膜扩散到电解液中后,不同气体会在不同固定电压(由外部提供)作用下发生电解,通过测量电流的大小,即可测得被测气体参数

(6) 液体浓度检测

一般采用电导法。

(7) 湿度检测

湿敏传感器分类

类别	常见类型	特点
水分子亲和型	电解质湿度传感器	响应速度低、可靠性差,不能很好地满足工业生产和日常生活的使用要求。
	MOS 陶瓷湿度传感器	
	MOS 膜式湿度传感器	
	高分子湿度传感器	

非水分子亲和型	热敏电阻式湿度传感器	响应速度快、灵敏度高,正在得到迅猛发展和越来越广泛的应用。
	红外吸收式湿度传感器	
	微波式湿度传感器	
	超声波湿度传感器	

14.8 简述常见的机械量检测方法。

答: (1) 位移检测

位移测量分为模拟式测量和数字式测量两大类。

模拟式测量常用的传感器有电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、电涡流式传感器、光电式传感器及光导纤维传感器、超声波传感器、激光及辐射式传感器、薄膜传感器等。

数字式测量主要是指在精密数控装置如数控机床和三坐标测量仪等设备中,将直线位移或角位移转换为数字脉冲信号输出的测量方法。常用的转换装置有感应同步器、旋转变压器、磁尺、光栅和各种脉冲编码器等。

(2) 转速检测

转速检测方法及其特点

测量方法		转速仪	测量原理	应用范围 (r/min)	特点
模拟法	机械式	离心式	利用质量块的离心力与转速的平方成正比;利用容器中液体的离心力产生的压力或液面变化	30~24000 中、低速	简单、价格低廉、应用广泛,但准确度较低
		粘液式	利用旋转体在粘液中旋转时传递的扭矩变化测速	中、低速	简单,但易受温度的影响
	电气式	发电机式	利用直流或交流发电机的电压与转速成正比关系	~1000 中、低速	可远距离指示,应用广,易受温度影响
		电容式	利用电容充放电回路产生与转速成正比例的电流	中、高速	简单、可远距离指示
		电涡流式	利用旋转盘在磁场内使电涡流产生变化测转速	中、高速	简单、价格低廉,多用于机动车
计数	机械式	齿轮式 钟表式	通过齿轮转动数字轮 通过齿轮转动加入计时器	中、低速 ~10000	简单、价格低廉,与秒表并用

法	光电式	光电式	利用来自旋转体上的光线,使光电管产生电脉冲	中、高速 30~48000	简单、没有扭矩损失
	电气式	电磁式	利用磁、电等转换器将转速变化转换成电脉冲	中、高速	简单、数字传输
同步法	机械式	目测式	转动带槽圆盘,目测与旋转体同步的转速	中、高速	简单、价格低廉
	频闪式	闪光式	利用频闪光测旋转体频率	中、高速	简单、可远距离指示、数字测量

(3) 速度检测

- 1) 定义法
- 2) 加速度积分法或位移微分法
- 3) 利用物理参数测量速度
- 4) 多普勒效应测速度

(4) 振动检测

常用的振动检测方法为:

- 1) 差动变压器法
- 2) 电涡流法
- 3) 应变片法
- 4) 压电效应法

(5) 厚度检测

厚度检测属于长度测量,很多情况下可以用测长度或测位移的方法或技术来实现,如直接利用厚度参数来调制传感器的输出信号,这是测绝对厚度,如低频透射式电涡流测厚法、超声波测厚法、微波测厚法、核辐射测厚法等。另一类测厚方法是相对测厚,采用如极距变化型电容传感器,或利用高频反射式涡流传感器测量金属板厚度的方法。

14.9 检测技术的发展趋势是什么?

答:目前,检测技术的发展主要表现为以下四个方向:(1)测量质量不断提高。(2)新型测量技术不断涌现。(3)测量系统的智能化、自动化水平不断提高。(4)测量系统的网络化。

第15章 微弱信号检测

15.1 什么是微弱信号检测？微弱信号检测的目的是什么？

答：微弱信号检测就是采用电子学、信息论、计算机及物理学、数学的方法，分析噪声产生的原因和规律，研究被测信号的特点与相关性，对被噪声淹没的微弱有用信号进行提取和测量。

微弱信号检测的目的是从噪声中提取出有用信号，或用一些新技术和新方法来提高检测系统输入输出信号的信噪比。

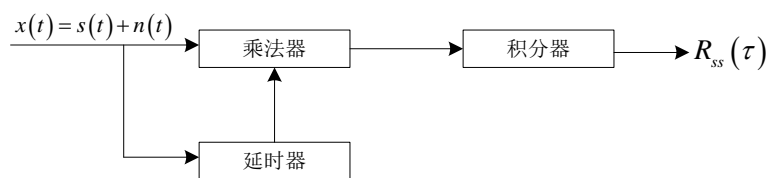
15.2 什么是噪声？

答：噪声是对有用信号的某种不期望的扰动，包括非被测信号或非测量系统所引起的噪声和来自于被测对象、传感器、测量系统内部的噪声两种情况。

15.3 简述微弱信号的自相关与互相关检测原理。

答：（1）自相关检测

实现自相关检测的原理如下图所示。



自相关检测原理框图

设输入信号 $x(t)$ 由被测信号 $s(t)$ 和噪声 $n(t)$ 组成，即： $x(t) = s(t) + n(t)$ 。

$x(t)$ 同时输入到相关接收机的两个通道，其中一个通过延时器使其延迟一段时间 τ 。

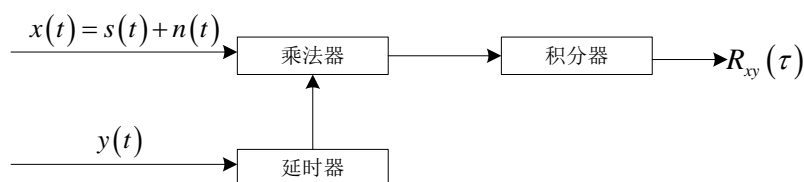
经过延迟的 $x(t-\tau)$ 和没有经过延迟的 $x(t)$ 均送入乘法器中，乘法器输出的乘积经积分器积分后输出平均值，从而得到相关函数曲线上一点的相关值。如果改变延迟时间 τ ，重复前述计算就能得到相关函数 $R(\tau)$ 与 τ 的关系曲线，即得到自相关输出为：

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t-\tau)dt = R_{ss}(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) + R_{nn}(\tau)$$

根据互相关函数的性质，信号 $s(t)$ 与噪声 $n(t)$ 不相关，且噪声的平均值应为 0，于是有： $R_{sn}(\tau) = 0$ ， $R_{ns}(\tau) = 0$ 。且随着 τ 的增大， $R_{nn}(\tau) \rightarrow 0$ ，即对于足够大的 τ ，可得 $R_{xx}(\tau) = R_{ss}(\tau)$ 。这样，就得到了信号 $s(t)$ 的自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ ，它包含着 $s(t)$ 的信息，从而可检测出有用信号。

（2）互相关检测

实现互相关检测的原理如下图所示。



互相关检测原理框图

输入信号为两路： $x(t) = s(t) + n(t)$ 为被检测信号 $s(t)$ 中混入了观察噪声 $n(t)$ ， $y(t)$ 为已知参考信号，要求与被测信号相关（如同频），而与噪声无相关性。输入经延时、相乘、积分及平均运算后，得到互相关输出为：

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) y(t-\tau) dt = R_{sy}(\tau) + R_{ny}(\tau)$$

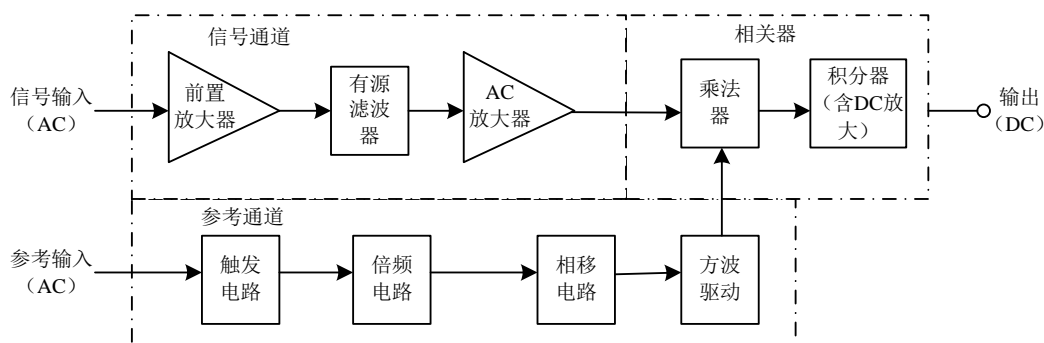
由于参考信号 $y(t)$ 与信号 $s(t)$ 有某种相关性，而 $y(t)$ 与噪声 $n(t)$ 没有相关性，且噪声的平均值为 0，理论上只要 T 足够长，一定有 $R_{ny}(\tau) = 0$ ，则：

$$R_{xy}(\tau) = R_{sy}(\tau)$$

$R_{xy}(\tau)$ 中包含了信号 $s(t)$ 的信息，这样，就可实现对待测信号 $s(t)$ 的检测。

15.4 简述锁相放大器的组成与工作原理。

答：锁相放大器利用参考信号与被测信号具有相关性，而与噪声信号互不相关的特性，通过互相关运算来削弱噪声的影响。锁相放大器工作原理如下图所示，它一般由信号通道、参考通道和相关器（包括直流放大器）组成。



锁相放大器原理框图

①信号通道

信号通道的作用是将伴有噪声的输入信号加以放大（足以驱动后面的相关器工作），并经滤波或选频放大对噪声做初步预处理，以滤除信号通带以外的噪声。信号通道由低噪声前置放大器、有源滤波器和主放大器等组成。

②参考通道

参考通道的作用是提供一个与输入信号同相的方波或正弦波。因为锁相放大器常用来检测正弦信号或方波信号，如果被测的是直流信号，则可用斩波器先将它转换成交流方波信号。

再进行检测。参考通道主要由触发电路、倍频电路、相移电路、方波形成和驱动电路组成。

③相关器

相关器的作用是比较两路信号,输出直流信号,其幅度与两路输入信号的幅度和它们的相位差成比例;包含的直流放大器则作低通滤波和进一步放大。相关器是一种完成被测信号与参考信号互相关函数运算的电子线路;根据前面的相关函数分析可知,用一个模拟乘法器(相敏检波器)和一个积分时间为无穷大的积分器(低通滤波器)组成的相关器,可以将淹没在任意噪声中的微弱信号检测出来。

15.5 同步积分器、取样积分器、数字多点平均器各自适用的条件是什么?

答:同步积分器特别适用于对方波信号的提取。

取样积分器适用于测量淹没在噪声中的周期脉冲信号。

数字多点平均器的适用条件是:(1)信号必须是周期性重复信号,但其周期重复次数不一定要求是无限的;(2)同步信号必须准确可靠地与测试信号同频、同相,由同步信号倍频后得到的取样时钟信号能可靠地、等间隔地启动各周期内的 i 次取样,而且能够保证 m 次扫描中取样间隔均相同,各取样点在信号周期内的相对位置不变;(3)各个周期内的取样点数 i 及扫描次数 m 必须足够大;(4)硬件检测电路必须有足够的取样速率,且取样时钟产生及控制电路应有较大的灵活性,以便在测试过程中不断调整取样间隔和扫描次数。

第 16 章 软测量

16.1 什么是软测量?

答:软测量就是选择与被估计变量相关的一组可测变量,构造某种以可测变量为输入、被估计变量为输出的数学模型,通过计算机软件实现对无法直接测量的重要过程变量的估计。

16.2 实现软测量的一般方法是什么?

答:实现软测量的一般方法主要包括辅助变量选择、输入数据处理、软测量模型建立和在线校正等步骤。

16.3 对软测量模型进行在线校正的处理方法有哪些?

答:对软测量模型进行在线校正一般采用两种方法:

1) 定时校正。指软测量模型在线运行一段时间后,用积累的新样本采用某一算法对软测量模型进行校正,以得到更适合于新情况的软测量模型。

2) 满足一定条件的校正。指以现有的软测量模型来实现被估计量的在线软测量,并将这些软测量值和相应的取样分析数据进行比较,若误差小于某一阈值,则仍采用该软测量模型,否则,用累积的新样本对软测量模型进行在线校正。

16.4 软测量有何意义?

答:(1) 能够测量目前由于技术或经济的原因无法或难以用传感器直接检测的重要的过程参数。(2) 打破了传统单输入、单输出的仪表格局。(3) 能够在线获取被测对象微观的二维/三维时空分布信息,以满足许多复杂工业过程参数测量的需要。(4) 可在同一仪表中实现软测量技术与控制技术的结合。(5) 便于修改。(6) 有助于提高控制性能。

16.5 简述软测量的适用条件。

答:(1) 无法用仪器仪表直接检测被估计变量,或用于直接检测被估计变量的仪器仪表较贵或维护困难;

(2) 通过软测量技术所得到的过程变量的估计值必须在工艺过程所允许的精确度范围内;

(3) 能通过其他检测手段根据过程变量估计值对系统数学模型进行校验,并根据两者偏差确定数学模型是否需要校正;

(4) 被估计过程变量应具有灵敏性、精确性、鲁棒性等特点。

16.6 举例说明软测量的应用。

答:(略)

第 17 章 多传感器数据融合

17.1 什么是数据融合?它的意义是什么?

答:数据融合就是充分利用不同时间与空间的多传感器信息资源,采用计算机技术对按时序获得的多传感器观测信息在一定准则下加以自动分析、综合、支配和使用,获得对被测对象的一致性解释与描述,以完成所需的决策和估计任务,使系统获得比它的各组成部分更优越的性能。即“融合”是将来自多传感器或多源的信息和数据模仿专家的综合信息处理能力进行智能化处理,从而得出更为准确可信的结论。

数据融合的意义:利用多个传感器共同或联合操作的优势,提高传感器系统的有效性,消除单个或少量传感器的局限性。数据融合的最终目的是构造高性能智能化系统。它是解决飞机、导弹之类飞行器航迹预测与跟踪的一种行之有效的方法,而且也是智能信息处理领域

最有前途的一个研究方向,随着智能检测系统的发展,数据融合成为构建智能检测系统的一项重要技术。

17.2 试比较数据融合的三个层次:原始层,特征层,决策层。

答:下表给出了各融合层次的性能比较。

融合层次性能比较

比较的项目	原始层	特征层	决策层
信息量	最大	中等	最小
信息损失	最小	中等	最大
容错性	最差	中等	最好
抗干扰性	最差	中等	最好
对传感器依赖性	最大	中等	最小
融合方法	最难	中等	最易
预处理	最小	中等	最大
分类性质	最好	中等	最差
系统开放性	最差	中等	最好

17.3 数据融合的方法有哪些?

答:目前,数据融合的常用方法基本上可概括为随机和人工智能两大类。

(一)随机类方法

- (1) 加权平均法
- (2) Bayes 概率推理法
- (3) Dempster-Shafer 证据推理
- (4) 卡尔曼滤波
- (5) 产生式规则

(二)人工智能类方法

- (1) 模糊逻辑推理
- (2) 神经网络方法
- (3) 智能融合方法

17.4 简述 Bayes 概率推理法。

答:Bayes 概率推理法是通过把被测对象的观测值与被选假设进行比较,以确定哪个假

设能最佳地描述观测值。Bayes 理论用测量值的概率描述和先验知识计算每个假设的一个概率值。当系统获得一个新的检测值时,依据 Bayes 方法可以由先验知识与这一新的检测值对所有假设的可信度进行更新。

Bayes 概率推理法的具体处理过程: 设定被观测对象的假设矢量为 H , 并利用关于 H 的先验知识得到其先验概率 $P(H)$, 而 X_i 表示多传感器系统中某一传感器对被观测对象的观测值, 并且由该传感器的特性得到相应的条件概率 $P(X_i | H)$, 然后使用 Bayes 条件概率公式和先验概率, 求后验概率 $P(X | H)$, 其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, n 为传感器个数, 即表示在观测值为 X 的情况下对假设矢量 H 的相信度。再利用某一决策规则, 如最大后验概率规则来选择对被测对象的最佳假设估计。

17.5 举例说明数据融合系统的应用。

(略)

第 18 章 测量不确定度与回归分析

18.1 测得某三角块的三个角度之和为 $179^{\circ}58'40''$, 试求测量的绝对误差和相对误差。

解: 绝对误差 $\Delta = x - L = 179^{\circ}58'40'' - 180^{\circ} = 1'20''$

$$\text{相对误差 } \delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% = \frac{1'20''}{180^{\circ}} \times 100\% = 0.012\%$$

18.2 什么是随机误差? 随机误差有何特征? 随机误差的产生原因是什么?

答: 对同一被测量进行多次重复测量时, 绝对误差的绝对值和符号不可预知地随机变化, 但就误差的总体而言, 具有一定的统计规律性, 这类误差称之为随机误差。

随机误差有如下三个特征: 单峰性、有界性和对称性。

随机误差是测量过程中许多独立的、微小的, 偶然的因素引起的综合结果。引起随机误差的原因很多, 也很难把握, 一般无法控制。

18.3 精度的含义是什么? 简述精度的划分及其意义。

答: 精度是反映测量结果与真值接近程度的量。

精度可分为:

- **准确度** 反映测量结果中系统误差的影响(大小)程度。即测量结果偏离真值的程度。

- **精密度** 反映测量结果中随机误差的影响(大小)程度。即测量结果的分散程度。
- **精确度** 反映测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度,其定量特征可用测量的不确定度(或极限误差)来表示。

18.4 某压力表精度等级为 2.5, 量程为 0~1.5MPa, 求:

- 1) 可能出现的最大满度相对误差;
- 2) 可能出现的最大绝对误差;
- 3) 测量结果显示为 0.7MPa 时, 可能出现的最大示值相对误差。

解: 1) 由于 压力表的精度等级为 2.5, 因此, 可能出现的最大满度相对误差: $\pm 2.5\%$ 。

2) 可能出现的最大绝对误差:

$$\Delta_m = \pm \gamma \cdot x_m = \pm 2.5\% \times 1.5 = \pm 0.0375 \text{ MPa}$$

3) 测量结果显示为 0.7MPa 时, 可能出现的最大示值相对误差为:

$$\gamma_m = \pm \frac{\gamma \cdot x_m}{x} \times 100\% = \pm \frac{2.5 \times 1.5}{0.7} \% \approx \pm 5.4\%$$

18.5 现有精度等级为 0.5 的 0~300℃ 的和精度等级为 1.0 的 0~100℃ 的两支温度计, 要测量 80℃ 的温度, 采用哪一支更好?

解: 先求最大相对误差。

使用 300℃、0.5 级表时:

$$\gamma_{m1} = \pm \frac{\gamma \cdot x_m}{x} \times 100\% = \pm \frac{0.5 \times 300}{80} \times 100\% \approx \pm 1.88\%$$

使用 100℃、1.0 级表时:

$$\gamma_{m2} = \pm \frac{\gamma \cdot x_m}{x} \times 100\% = \pm \frac{1.0 \times 100}{80} \times 100\% \approx \pm 1.25\%$$

由于 $|\gamma_{m1}| > |\gamma_{m2}|$, 可见, 选用 100℃、1.0 级表测量该电压时具有更小的相对误差, 精度更高; 而且使用该表可保证测量示值落在仪表满刻度的三分之二以上。

18.6 用一台 5V 数字电压表的 4V 量程分别测量 4V 和 0.1V 电压, 已知该表的基本误差为 $\pm 0.01\% U_x \pm 2$ 个字, 求由该表基本误差引起的测量误差。

解: (1) 当测量 4V 时:

$$\pm 0.01\% U_x = \pm 0.01\% \times 4 = \pm 0.0004 \text{ V}, \text{ 可判断该表为 5 位数字电压表。}$$

那么, 对应的 2 个字应为 0.0002V。即测量误差为 0.0002V。

(2) 当测量 0.1V 时:

$\pm 0.01\% U_x = \pm 0.01\% \times 0.1 = \pm 0.00001\text{V}$ ，可判断该表为6位数字电压表。

那么，对应的2个字应为0.00002V。即测量误差为0.00002V。

18.7 测量某物体质量共8次，测得数据（单位：克）为136.45、136.37、136.51、136.34、136.39、136.48、136.47、136.40。试求算术平均值及其标准差。

解：算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 136.43$ (克)

$$\text{标准差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = 0.056。$$

18.8 由测量方程： $3x + y = 2.9$ 、 $x - 2y = 0.9$ 、 $2x - 3y = 1.9$ ，试用最小二乘法求 x, y 的值及其相应精度。

解：根据题意可列矩阵方程为：

$$L - AX = V$$

式中：

$$\text{实际测量值矩阵 } L = \begin{bmatrix} 2.9 \\ 0.9 \\ 1.9 \end{bmatrix}$$

$$\text{系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & -2 \\ 2 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\text{估计值矩阵 } X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法可得出：

$$X = (A'A)^{-1} A'L = \begin{bmatrix} 0.963 \\ 0.015 \end{bmatrix}$$

所以， $x = 0.963$ ， $y = 0.015$ 。

相应的误差矩阵为：

$$V = L - AX = \begin{bmatrix} 2.9 - (3 \times 0.963 + 0.015) \\ 0.9 - (1 \times 0.963 - 2 \times 0.015) \\ 1.9 - (2 \times 0.963 - 3 \times 0.015) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.004 \\ -0.033 \\ 0.019 \end{bmatrix}$$

那么, 标准差的估计值为:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = 0.027。$$

18.9 某电路的电压数值方程为 $U = I_1 R_1 + I_2 R_2$, 当电流 $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = 1\text{A}$ 时, 测得电压 $U = 50\text{V}$; 当电流 $I_1 = 3\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$ 时, 测得电压 $U = 80\text{V}$; 当电流 $I_1 = 4\text{A}$, $I_2 = 3\text{A}$ 时, 测得电压 U 为 120V ; 试用最小二乘法求两只电阻 R_1 、 R_2 的测量值。

解: 根据题意可列矩阵方程为:

$$L - AX = V$$

式中:

$$\text{实际测量值矩阵 } L = \begin{bmatrix} 50 \\ 80 \\ 120 \end{bmatrix}$$

$$\text{系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 2 \\ 4 & 3 \end{bmatrix}$$

$$\text{估计值矩阵 } X = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法可得出:

$$X = (A'A)^{-1} A'L = \begin{bmatrix} 13.33 \\ 21.67 \end{bmatrix}$$

所以, $R_1 = 13.33\ \Omega$, $R_2 = 21.67\ \Omega$ 。

18.10 通过某检测装置测得的一组输入输出数据如下表所示。试用最小二乘法拟合直线, 并求其线性度和灵敏度。

输入 x	0.8	2.5	3.3	4.5	5.7	6.8
输出 y	1.1	1.5	2.6	3.2	4.0	5.0

解: 设拟合的直线形如: $y = b_0 + b_1 x$ 。

根据题意可列矩阵方程为:

$$L - AX = V$$

式中:

$$\text{实际测量值矩阵 } L = \begin{bmatrix} 1.1 \\ 1.5 \\ 2.6 \\ 3.2 \\ 4.0 \\ 5.0 \end{bmatrix}$$

$$\text{系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 \\ 1 & 2.5 \\ 1 & 3.3 \\ 1 & 4.5 \\ 1 & 5.7 \\ 1 & 6.8 \end{bmatrix}$$

$$\text{估计值矩阵 } X = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法可得出:

$$X = (A'A)^{-1} A'L = \begin{bmatrix} 0.275 \\ 0.667 \end{bmatrix}$$

所以, $b_0 = 0.275$, $b_1 = 0.667$ 。相应的拟合直线为: $y = 0.275 + 0.667x$ 。

线性度: 相应的残余误差矩阵为:

$$V = L - AX = \begin{bmatrix} 1.1 - (0.275 + 0.667 \times 0.8) \\ 1.5 - (0.275 + 0.667 \times 2.5) \\ 2.6 - (0.275 + 0.667 \times 3.3) \\ 3.2 - (0.275 + 0.667 \times 4.5) \\ 4.0 - (0.275 + 0.667 \times 5.7) \\ 5.0 - (0.275 + 0.667 \times 6.8) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2914 \\ -0.4425 \\ 0.1239 \\ -0.0765 \\ -0.0769 \\ 0.1894 \end{bmatrix}$$

因此, 对其中的最大误差值 0.4425, 相应的满量程为 5V。故线性度可计算为

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\text{F.S.}}} \times 100\% = \pm \frac{0.4425}{5} \times 100\% = 8.85\%。$$

灵敏度: 根据拟合直线 $y = 0.275 + 0.667x$ 可得出平均灵敏度为:

$$S_n = \frac{dy}{dx} = 0.667。$$

18.11 有一只压力传感器的标定数据如下表所示, 试用最小二乘法求其线性度和灵敏度。

$x_i / 10^5 \text{Pa}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0
正行程 y_i / V	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995
反行程 y_i / V	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005

解：先设该压力传感器的拟合直线形如： $y = b_0 + b_1 x$ 。

根据题意可列矩阵方程为：

$$L - AX = V$$

式中：

$$\text{实际测量值矩阵 } L = \begin{bmatrix} 0.0020 \\ 0.2015 \\ 0.4005 \\ 0.6000 \\ 0.7995 \\ 0.0030 \\ 0.2020 \\ 0.4020 \\ 0.6010 \\ 0.8005 \end{bmatrix}$$

$$\text{系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0.5 \\ 1 & 1.0 \\ 1 & 1.5 \\ 1 & 2.0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0.5 \\ 1 & 1.0 \\ 1 & 1.5 \\ 1 & 2.0 \end{bmatrix}$$

$$\text{估计值矩阵 } X = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法可得出：

$$X = (A'A)^{-1} A'L = \begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.3988 \end{bmatrix}$$

所以, $b_0=0.0025$, $b_1=0.3988$ 。相应的拟合直线为: $y=0.0025+0.3988x$ 。

线性度: 相应的残余误差矩阵为:

$$V = L - AX = \begin{bmatrix} 0.0020 - (0.0025 + 0.3988 \times 0) \\ 0.2015 - (0.0025 + 0.3988 \times 0.5) \\ 0.4005 - (0.0025 + 0.3988 \times 1.0) \\ 0.6000 - (0.0025 + 0.3988 \times 1.5) \\ 0.7995 - (0.0025 + 0.3988 \times 2.0) \\ 0.0030 - (0.0025 + 0.3988 \times 0) \\ 0.2020 - (0.0025 + 0.3988 \times 0.5) \\ 0.4020 - (0.0025 + 0.3988 \times 1.0) \\ 0.6010 - (0.0025 + 0.3988 \times 1.5) \\ 0.8005 - (0.0025 + 0.3988 \times 2.0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0005 \\ -0.0004 \\ -0.0008 \\ -0.0007 \\ -0.0006 \\ 0.0005 \\ 0.0001 \\ 0.0007 \\ 0.0003 \\ 0.0004 \end{bmatrix}$$

因此, 对其中的最大误差值 0.0008, 相应的满量程为 0.8005V。故线性度可计算为

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{F.S.}} \times 100\% = \pm \frac{0.0008}{0.8005} \times 100\% = 0.1\%。$$

灵敏度: 根据拟合直线 $y=0.0025+0.3988x$ 可得出平均灵敏度为:

$$S_n = \frac{dy}{dx} = 0.3988。$$

18.12 对于线性系统 $y = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n$, 随机误差的传递表达式是什么? 如果线

性系统中各项的系数均为 1, 则随机误差的传递表达式又是什么?

解: 设该线性测量系统的 n 个环节的标准差分别为: $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \cdots, \sigma_{x_n}$, 则随机误差的

传递表达式为:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} \\ &= \sqrt{(a_1)^2 \sigma_{x_1}^2 + \cdots + (a_n)^2 \sigma_{x_n}^2} \end{aligned}$$

如果线性系统中各项的系数均为 1, 即 $a_1 = \cdots = a_n = 1$, 则随机误差的传递表达式为:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \cdots + (a_n)^2}。$$

18.13 测量不确定度和测量误差有何关系?

答: 相同点: 都是评价测量结果质量高低的重要指标, 都可作为测量结果的精度评定参数。

区别:

1) 从定义上讲,误差是测量结果与真值之差,它以真值或约定真值为中心;测量不确定度是以被测量的估计值为中心。因此误差是一个理想的概念,一般不能准确知道,难以定量;而测量不确定度是反映人们对测量认识不足的程度,是可以定量评定的。

2) 在分类上,误差按自身特征和性质分为系统误差、随机误差和粗大误差,并可采取不同的措施来减小或消除各类误差对测量结果的影响。但由于各类误差之间并不存在绝对界限,故在分类判别和误差计算时不易准确掌握。

第19章 虚拟仪器

19.1 什么是虚拟仪器?

答:虚拟仪器就是在以计算机为核心的硬件平台上,由用户设计定义具有虚拟面板,其测试功能由测试软件实现的一种计算机仪器系统。

19.2 简述虚拟仪器的构成与特点。

答:(1) 虚拟仪器的构成

虚拟仪器由通用仪器硬件平台(简称硬件平台)和应用软件两个部分构成。虚拟仪器的硬件平台一般分为计算机硬件平台和测控功能硬件(I/O 接口设备)。虚拟仪器软件主要由两部分组成,即应用程序和 I/O 接口仪器驱动程序。

(2) 虚拟仪器的特点

1) 虚拟仪器可以通过在几个分面板上的操作来实现比较复杂的功能。虚拟仪器凭借计算机强大的硬件资源,突破了传统仪器在数据处理、显示、存储等方面的限制,增强了传统仪器的功能。

2) 虚拟仪器可以由软件取代传统仪器中的硬件来完成仪器的功能。

3) 虚拟仪器的功能可以由用户根据需要通过软件自行定义,增加了系统灵活性。

4) 仪器性能的改进和功能扩展只需要更新相关软件设计,而不需购买新的仪器,节省了资源。

5) 研制周期较传统仪器大为缩短。

6) 虚拟仪器是基于计算机的开放式标准体系结构,可随计算机同步发展。

19.3 虚拟仪器的应用方向是什么?

答：(1) 工业自动化

(2) 仪器产业改造

(3) 实验室应用

19.4 虚拟仪器的主要设计步骤是什么？

答：(1) 确定所用仪器或设备的接口形式

(2) 确定所选择的接口卡是否具有设备驱动程序

(3) 确定应用管理程序的编程语言

(4) 编写用户的应用程序

(5) 调试运行应用程序

19.5 目前流行的虚拟仪器开发平台有哪两类？各有何特点？

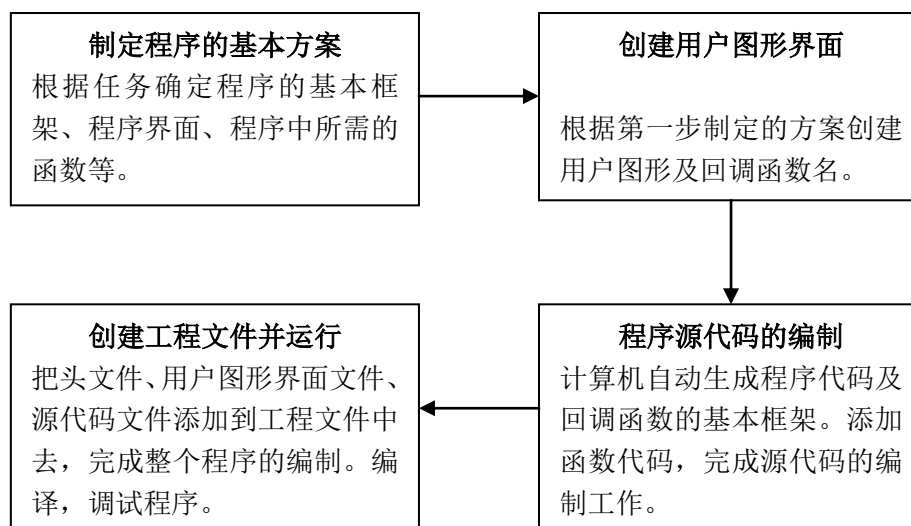
答：LabWindows/CVI 和 LabVIEW。

虚拟仪器编程语言 LabWindows/CVI 是美国 NI 公司开发的 32 位面向计算机测控领域的软件开发平台，可以在多种操作系统（如 Windows98/NT/2000/XP，Mac OS 和 UNIX）下运行。它以 ANSI 为核心，将功能强大、使用灵活的 C 语言平台与数据采集、分析和表达等测控专业工具有机地结合起来。为熟悉 C 语言人员提供了一个理想的开发检测、数据采集、过程监控等系统的软件开发环境。LabWindows/CVI 编程中所用到的概念有对象、面板、控件、回调函数等。LabWindows/CVI 建立在开放式软件体系机构之上，以工程文件 (*.prj) 为主体框架，将 C 和 C++ 源文件 (*.c)、头文件 (*.h)、库文件 (*.lib)、目标模块 (*.obj)、用户界面文件 (*.uir)、动态链接库 (*.dll) 和仪器驱动程序 (*.fp) 等多功能组合在一起，并支持动态数据交换 (DDE) 和 TCP/IP 网络协议。

编译型图形化编程语言 LabVIEW 提供了一种程序开发环境，类似于 C 和 BASIC 开发环境，使用图形化编程语言 (G 语言) 编写程序，产生的程序是框图形式，有一个可完成多种编程任务的庞大函数库。LabVIEW 的函数库包括数据采集、GPIB、串口控制、数据分析、数据显示及数据存储等等。LabVIEW 也有传统的程序调试工具，如设置断点、以动画方式显示数据及其程序 (子 VI) 的结果、单步执行等等，便于程序的调试。

19.6 LabWindows/CVI 编程基本步骤是什么？

答：



19.7 简述 LabVIEW 的基本构成及程序设计的一般方法。

答：LabVIEW 主要由前面板（Front Panel）、框图程序（Block Diagram）以及图标和连接器窗格（Icon and Connector）三部分组成。

一个完整的VI程序由3部分组成：前面板、框图程序和图标/连接口，因此一个VI程序设计主要包括前面板的设计、框图程序的设计以及程序的调试。

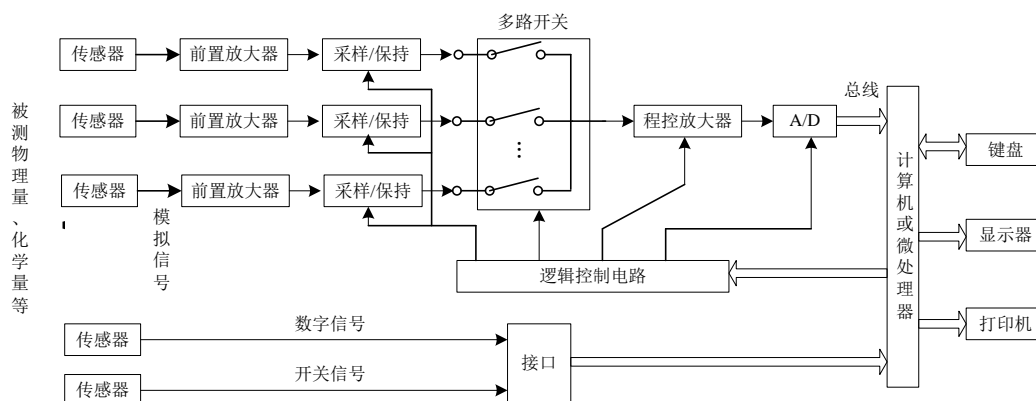
19.8 简述基于虚拟仪器的数据采集实现方法。

答：(1) 基于 LabWindows/CVI 的数据采集

(2) 基于 LabVIEW 的数据采集

第 20 章 自动检测系统

20.1 试画出数据采集系统模型框图。



答：

20.2 采样/保持器的主要作用是什么？

答：在通道切换前，使其处于采样状态，在切换后的 A/D 转换周期内使其处于保持状态，以保证在 A/D 转换期间输入到 A/D 的信号不变。

20.3 自动检测系统的软件主要由哪几部分构成，它们分别起什么作用？

答：从实现方式和功能层次来划分，自动检测系统的软件一般可分为主程序、中断服务程序和应用功能程序。

1) 主程序

主程序主要完成系统的初始化工作、自诊断工作、时钟定时工作和调用应用程序模块的工作。

2) 中断服务程序

中断服务程序包括 A/D 转换中断服务程序、定时器中断服务程序和掉电保护中断服务程序，分别完成相应的中断处理。

3) 应用功能程序

自动检测系统的功能实现主要通过应用程序来体现。应用程序主要包括数据的输入输出模块、数据处理模块、数据显示模块等。

20.4 举例说明自动检测系统的设计步骤和方法。

答：自动检测系统的设计一般要经历这样几个主要步骤：系统需求分析、系统总体设计、采样速率的确定、标度变换、硬件设计、软件设计、系统集成和系统维护等。（举例略）

20.5 试说明无线传感器网络信息获取的关键技术。

答：无线传感器网络信息获取的关键技术主要包括：

1) 信息获取体系结构

2) 信息获取的计算模式

3) 网络通信的关键问题

20.6 试说明自动检测系统的发展。

答：随着传感器技术、微电子技术、计算机技术、信息处理技术和通信技术等的不断发展，自动检测系统正朝着通用化与标准化、集成化与模块化、综合化与系统化、网络化、高可靠性、高精度化、高智能化等方向发展。

20.7 以某一检测量为例（如压力、速度等），设计一个自动检测系统，给出其系统组成并说明其工作原理。

答：（略）

20.8 以转速测量为例，用至少三种不同类别的传感器来实现测量，分别给出相应的测量方案和测量系统框图。

答：(略)