

第 1 章 概述

1.1 什么是传感器？

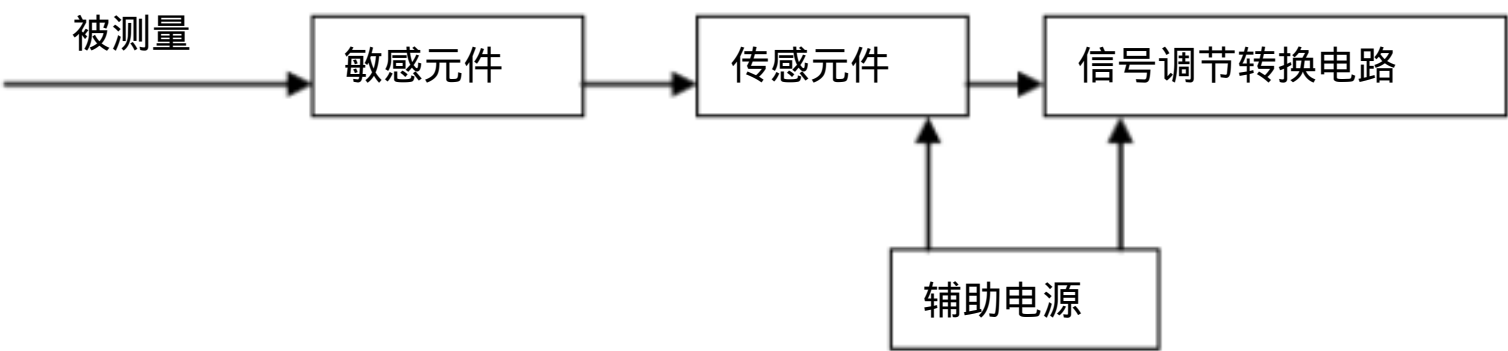
答：传感器是能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

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或物质的物理、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、频率、电荷、电容、电阻等）输出。

1.3 传感器一般由哪几部分组成？

答：传感器的基本组成分为敏感元件和转换元件两部分，分别完成检测和转换两个基本功能。另外还需要信号调理与转换电路，辅助电源。



1.4 传感器是如何分类的？

答：传感器可按输入量、输出量、工作原理、基本效应、能量变换关系以及所蕴含的技术特征等分类，其中按输入量和工作原理的分类方式应用较为普遍。

按传感器的输入量（即被测参数）进行分类

按输入量分类的传感器以被测物理量命名，如位移传感器、速度传感器、温度传感器、湿度传感器、压力传感器等。

按传感器的工作原理进行分类

根据传感器的工作原理（物理定律、物理效应、半导体理论、化学原理等），可以分为电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器等。

按传感器的基本效应进行分类

根据传感器敏感元件所蕴含的基本效应，可以将传感器分为物理传感器、化学传感器和生物传感器。

1.6 改善传感器性能的技术途径有哪些？

答：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。

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：传感器的静态特性是它在稳态信号作用下的输入、输出关系。静态特性所描述的传感器的输入-输出关系中不含时间变量。

衡量传感器静态特性的主要指标是线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性和漂移。

2.3 利用压力传感器所得测试数据如下表所示，计算非线性误差、迟滞和重复性误差。设压力为 0MPa 时输出为 0mV，压力为 0.12MPa 时输出最大且为 16.50mV。

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： 求非线性误差， 首先要求实际特性曲线与拟合直线之间的最大误差， 拟合直线在输入量变化不大的条件下， 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地代表实际曲线的一段（多数情况下是用最小二乘法来求出拟合直线） 。

（1）端点线性度：

设拟合直线为： $y=kx+b$,

根据两个端点（ 0， 0）和（ 0.12， 16.50），则拟合直线斜率：

$$k=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}=\frac{16.50-0}{0.12-0}=137.5$$

$$137.5 \times 0.12+b=16.50$$

$$b=0$$

端点拟合直线为 $y=137.5x$

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
0.022.75	0.56	0.66	0.61	0.68	0.64	0.69
0.045.50	3.96	4.06	3.99	4.09	4.03	4.11
0.068.25	7.40	7.49	7.43	7.53	7.45	7.52
0.0811.0	10.88	10.95	10.89	10.93	10.94	10.99
0.1013.75	14.42	14.42	14.47	14.47	14.46	14.46

在 0.02MPa 处非线性误差最大

（2）最小二乘线性度：

设拟合直线方程为 $y=a_0+a_1x$ ，

$$\text{误差方程 } y_i-\hat{y_i}=y_i-(a_0+a_1x_i)=v_i$$

$$\text{令 } x_1=a_0, \quad x_2=a_1$$

由已知输入输出数据，根据最小二乘法，有：

$$\text{直接测量值矩阵 } L=\begin{bmatrix} 0.64 \\ 4.04 \\ 7.47 \\ 10.93 \\ 14.45 \end{bmatrix}, \text{系数矩阵 } A=\begin{bmatrix} 1 & 0.02 \\ 1 & 0.04 \\ 1 & 0.06 \\ 1 & 0.08 \\ 1 & 0.10 \end{bmatrix}, \text{被测量估计值矩阵 } \hat{X}=\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix}$$

$$\text{由最小二乘法： } A'A\hat{X}=A'L, \text{有}$$

$$A' A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.02 & 0.04 & 0.06 & 0.08 & 0.10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.02 \\ 1 & 0.04 \\ 1 & 0.06 \\ 1 & 0.08 \\ 1 & 0.10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 0.30 \\ 0.30 & 0.022 \end{bmatrix}$$

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

$$\therefore |A' A| = 0.02 \neq 0$$

$$\therefore (A' A)^{-1} = \frac{1}{|A' A|} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{0.02} \begin{bmatrix} 0.022 & -0.30 \\ -0.30 & 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.1 & -15 \\ -15 & 250 \end{bmatrix}$$

$$\therefore \hat{X} = [A' A]^{-1} A' L = \begin{bmatrix} 1.1 & -15 \\ -15 & 250 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 37.53 \\ 2.942 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.847 \\ 172.55 \end{bmatrix}$$

$$\therefore a_0 = x_1 = -2.847$$

$$\therefore a_1 = x_2 = 172.55$$

拟合直线为 $y = -2.847 + 172.55x$

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	均值	理论 值	误差
0.02	0.56	0.66	0.61	0.68	0.64	0.69	0.64	0.604	0.036
0.04	3.96	4.06	3.99	4.09	4.03	4.11	4.04	4.055	0.015
0.06	7.40	7.49	7.43	7.53	7.45	7.52	7.47	7.506	0.106
0.08	10.88	10.95	10.89	10.93	10.94	10.99	10.93	10.957	0.027
0.10	14.42	14.42	14.47	14.47	14.46	14.46	14.45	14.408	0.042

答：非线性误差公式：
$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.106}{16.50} \times 100\% = 0.64\%$$

迟滞误差公式：
$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$
，

又 最大行程最大偏差 $\Delta H_{\max} = 0.1\text{mV}$ ，
$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.1}{16.50} \times 100\% = 0.6\%$$

重复性误差公式： $\gamma_L = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$ ，

又 重复性最大偏差为 $\Delta R_{\max} = 0.08$ ， $\gamma_L = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{0.08}{16.50} \times 100\% = \pm 0.48\%$

2.7 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 $\pm 5\%$ 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： $H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1}$

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

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

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

所以： $0 < \tau < 0.523\text{ms}$

取 $\tau = 0.523\text{ms}$ ， $\tau = 2 \times 50 = 100$

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

所以有 $-1.32\% < A(\omega) < 0$

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

所以有 $-9.3^\circ < \phi(\omega) < 0$

2.8 某温度传感器为时间常数 $\tau = 3\text{s}$ 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：一阶传感器的单位阶跃响应函数为

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

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

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

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

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

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 () 。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 τ ——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。

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 10mv；在 $t=5s$ 时输出为 50mv；在 t 时，输出为 100mv。试求该传感器的时间常数。

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

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

$$= 5/0.587787 = 8.5s$$

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 0.8s，试估算阻尼比和固有角频率的大小。

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

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.8 \times 2} = 3.427,$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{3.427}{\sqrt{1 - 0.28^2}} = 4.26 \text{ rad / s}$$

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 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。

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

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

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 600Hz、400Hz 的正弦交变力时，其

输出与输入幅值比 $A(\)$ 和相位差 $(\)$ 各为多少？

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

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

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

当 $f=600\text{Hz}$ 时，

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

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

当 $f=400\text{Hz}$ 时，

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

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

第 3 章 电阻式传感器

3.2 电阻应变片的种类有哪些？各有什么特点？

答：常用的电阻应变片有两种：金属电阻应变片和半导体电阻应变片。金属电阻应变片的工作原理是主要基于应变效应导致其材料几何尺寸的变化；半导体电阻应变片的工作原理是主要基于半导体材料的压阻效应。

3.4 试分析差动测量电路在应变电阻式传感器测量中的好处。

答：单臂电桥测量电路存在非线性误差，而半桥差动和全桥差动电路均无非线性误差。

半桥差动电路的电压输出灵敏度比单臂电桥提高了一倍。全桥差动电路的电压输出灵敏度是单臂电桥的 4 倍。

3.5 将 100 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，求电阻应变片的灵敏度系数。

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

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

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

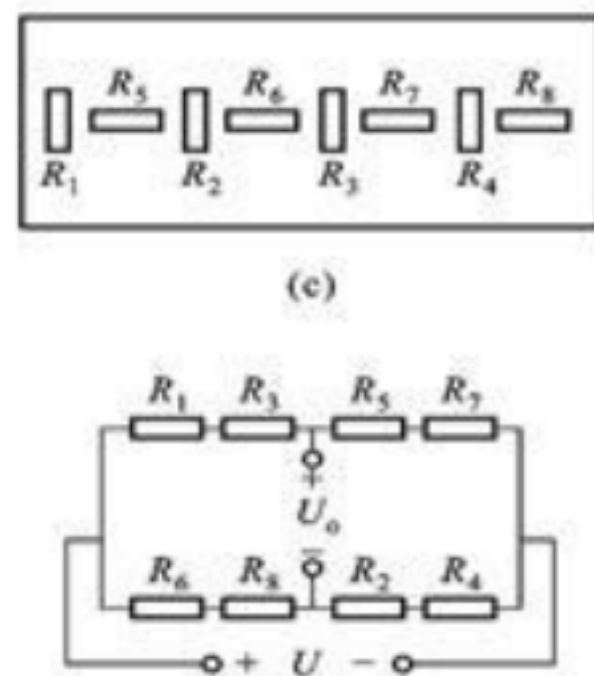
由 $\sigma = E \varepsilon$ 得
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1 \times 10^9}{2 \times 10^{11}} = 5 \times 10^{-3}$$

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

3.6 一个量程为 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,在其表面粘贴八各应变片，四个沿周向粘贴，应变片的电阻值均为 120 灵敏度为 2.0，波松比为 0.3，材料弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ 。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 10V 时，计算传感器的输出电压。

解：(1)



- (2) 圆桶截面积：

$$A = \pi (R^2 - r^2) = \pi (10^2 - 9^2) \times 10^{-6} = 59.69 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

应变片 1、2、3、4 感受纵向应变；

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

应变片 5、6、7、8 感受周向应变；

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

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 $\sigma = E \varepsilon$ ，及

应力与受力面积的关系 $\sigma = \frac{F}{A}$ ，得

$$\varepsilon = \frac{F}{AE}$$

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

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

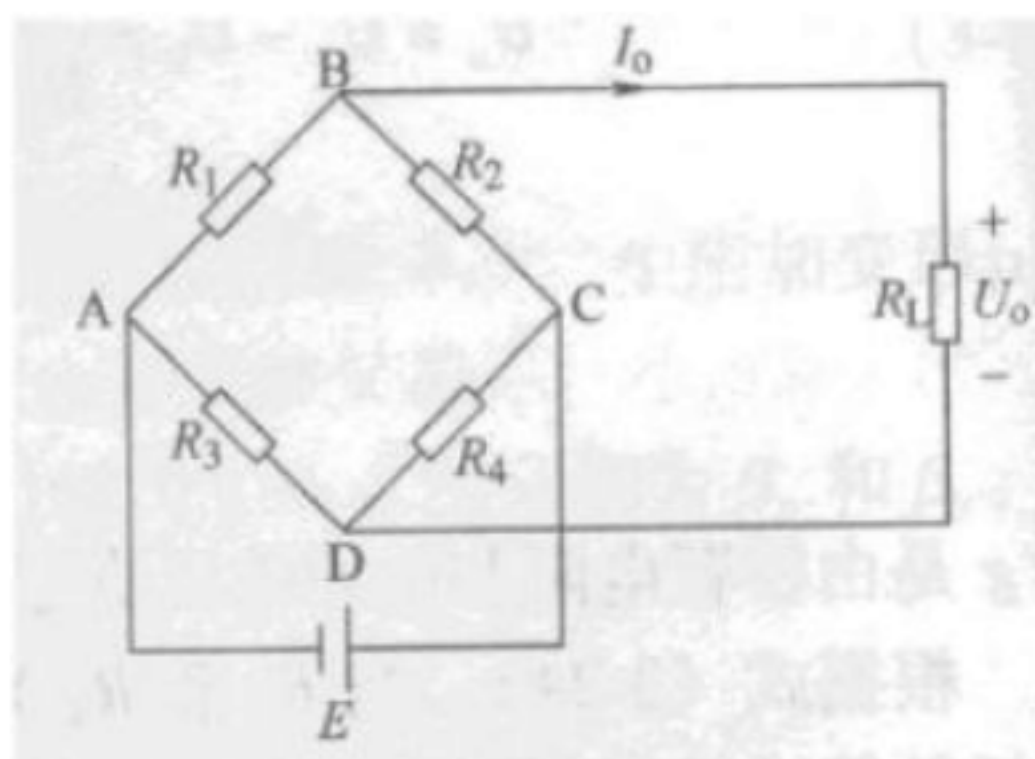
$$(3) \Delta U = \frac{U}{2} K (1 + \mu) \frac{F}{AE} = \frac{10}{2} \times 2.0 \times (1 + 0.3) \times \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} = 0.01037V$$

3.7 图 3-5 中，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 $U_o = ?$



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

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

$$(3) \text{ 半桥 } U_o = E \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 - \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left(\frac{101}{101 + 99} - \frac{1}{2} \right) = 0.02V$$

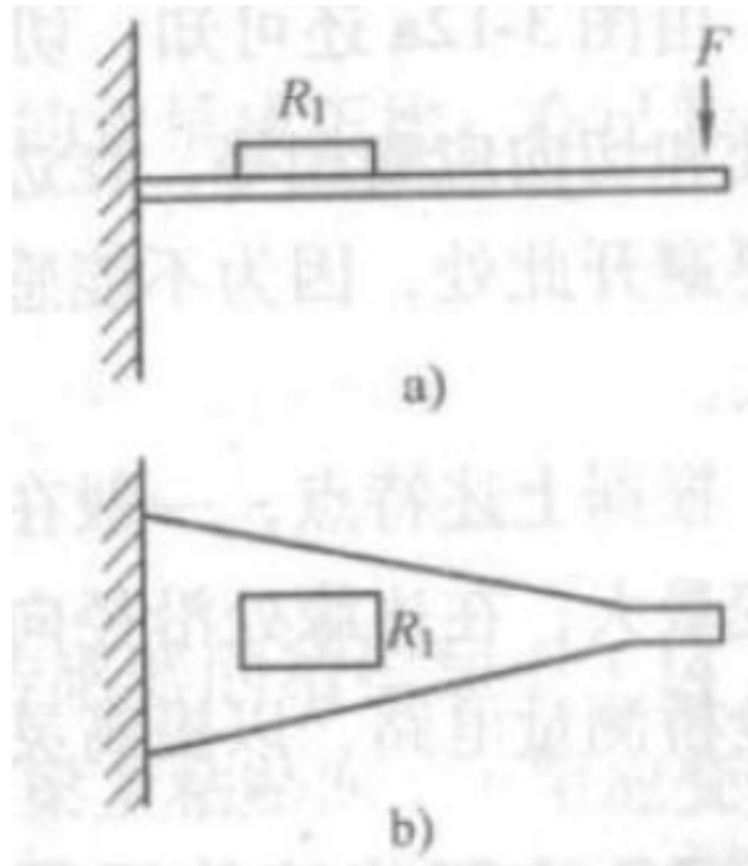
3.8 在图 3-11 中，设电阻应变片 R_1 的灵敏度系数 $K=2.05$ ，未受应变时， $R_1=120$ 。当试件

受力 F 时，电阻应变片承受平均应变值 $\varepsilon = 800 \mu\text{m}/\text{m}$ 。试求：

(1) 电阻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：图 3-11 是一种等强度梁式力传感器，

(1) 由 $K = (\Delta R / R) / \varepsilon$ 得 $\Delta R / R = K \varepsilon$ ，

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

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

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

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

3.9 电阻应变片阻值为 120 ，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 $E = 2 \times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ 。求：

(1) 钢柱受 $9.8 \times 10^4 \text{N}$ 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) 由应力与应变的关系 $\sigma = E \varepsilon$ ，及

应力与受力面积的关系 $\sigma = \frac{F}{A}$ ，得 $\varepsilon = \frac{F}{AE}$ ，

$$\varepsilon = \frac{F}{AE} = \frac{9.8 \times 10^4}{\pi \times \left(\frac{0.05}{2}\right)^2 \times 2 \times 10^{11}} \approx 0.25 \times 10^{-3},$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon = 2 \times 0.25 \times 10^{-3} = 0.5 \times 10^{-3},$$

$$\Delta R = R \times \frac{\Delta R}{R} = 120 \times 0.5 \times 10^{-3} = 0.06 \Omega;$$

$$(2) \text{ 由 } \mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \text{ 得 } \frac{\Delta R_y}{R_y} = -\mu \times \frac{\Delta R_x}{R_x} = -0.3 \times 0.5 \times 10^{-3} = -0.15 \times 10^{-3}.$$

第 4 章 电感式传感器

4.3 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？

$$\text{解： } \Delta L = L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0}, \quad K = \frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{L_0}{\delta_0}$$

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

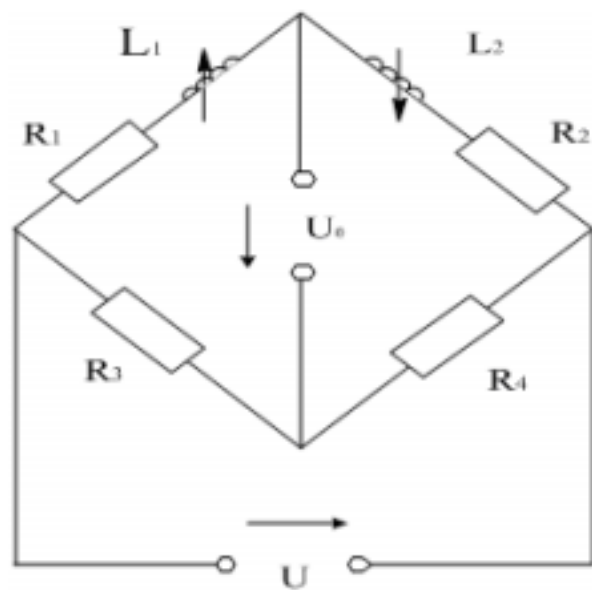
$$\text{所以， } K = \frac{54\pi \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-2}} = 10.8\pi = 34。$$

做成差动结构形式，灵敏度将提高一倍。

4.5 有一只差动电感位移传感器，已知电源电压 $\overset{L}{U} = 4 \text{ V}$ ， $f = 400 \text{ Hz}$ ，传感器线圈电阻与电感分别为 $R = 40$ ， $L = 30 \text{ mH}$ ，用两只匹配电阻设计成四臂等阻抗电桥，如图所示，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 $Z = 10$ 时，分别接成单臂和差动电桥后的输出电压值。



解：(1) $R_3=R_4=R=40$

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

单臂电桥

$$U_o = U \left[\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{R}{R + R} \right] = U \frac{Z_2 - Z_1}{2(Z_1 + Z_2)} = -U \frac{\Delta Z_2}{2(Z_1 + Z_2)} = -4 \times \frac{10}{2 \times (40 + 40)} = -0.25V$$

差动电桥几何

$$U_o = U \left[\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{R}{R + R} \right] = U \frac{Z_2 - Z_1}{2(Z_1 + Z_2)} = -U \frac{\Delta Z_1 + \Delta Z_2}{2(Z_1 + Z_2)} = -4 \times \frac{20}{2 \times (40 + 40)} = -0.5V$$

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：零点残余电压的产生原因：（线圈）传感器的两个二次绕组的电气参数和几何尺寸不对称，导致它们产生的感生电动势幅值不等、相位不同，构成了零点残余电压的基波；（铁心）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）；（电源）励磁电压本身含高次谐波。

零点残余电压的消除方法：尽可能保证传感器的几何尺寸、线圈电气参数和磁路的对称；采用适当的测量电路，如差动整流电路。

4.10 在使用螺线管电感式传感器时，如何根据输出电压来判断衔铁的位置？

答：常见的差动整流电路如图 4-15 所示。以图 4-15b 为例分析差动整流的工作原理。由图可知：无论两个二次绕组的输出瞬时电压极性如何，流经电容 C_1 的电流方向总是从 2 端到 4 端，

流经电容 C_2 的电流方向总是从 6 端到 8 端，所以整流电路的输出电压为

$$U_o = U_{24} - U_{68}$$

当衔铁位于中间位置时， $U_{24} = U_{68}$ ，故输出电压 $U_o = 0$ ；当衔铁位于零位以上时， $U_{24} > U_{68}$ ，

则 $U_o > 0$ ；当衔铁位于零位以下时，则有 $U_{24} < U_{68}$ ， $U_o < 0$ 。只能根据 U_o 的符号判断衔

铁的位置在零位处、零位以上或以下，但不能判断运动的方向。

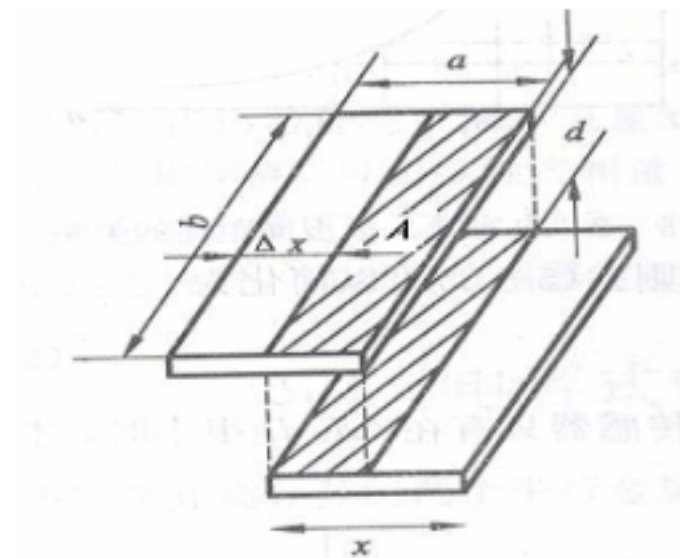
4.11 如何通过相敏检波电路实现对位移大小和方向的判定？

答：相敏检测电路原理是通过鉴别相位来辨别位移的方向，即差分变压器输出的调幅波经相敏检波后，便能输出既反映位移大小，又反映位移极性的测量信号。经过相敏检波电路，正位移输出正电压，负位移输出负电压，电压值的大小表明位移的大小，电压的正负表明位移

的方向。

第 5 章 电容式传感器

5.2 有一个以空气为介质的变面积型平板电容传感器如下图所示，其中 $a=10\text{mm}$ ， $b=16\text{mm}$ ，两极板间距为 $d_0=1\text{mm}$ 。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 （已知空气相对介电常数 $\varepsilon=1$ ，真空的介电常数 $\varepsilon_0=8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$ ）。



解：电容变化量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot (a - \Delta x) \cdot b}{d} - \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot a \cdot b}{d} = -\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \Delta x \cdot b}{d}$$

$$= -\frac{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2 \times 10^{-3} \times 16 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = -2.83 \times 10^{-13} \text{F}$$

即电容减小了 $-2.83 \times 10^{-13} \text{F}$ 。

$$\text{电容相对变化量 } \frac{\Delta C}{C} = \frac{\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \Delta x \cdot b}{d}}{\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot a \cdot b}{d}} = \frac{\Delta x}{a} = 0.2,$$

电容式传感器的位移灵敏度（单位距离改变引起的电容量相对变化）为

$$K = \frac{\Delta C / C}{\Delta x} = \frac{\Delta x / a}{\Delta x} = \frac{1}{a} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} = 100 (\text{m}^{-1}),$$

或

电容式传感器的位移灵敏度（单位距离改变引起的电容量变化）为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C}{a} = 1.41 \times 10^{-10} (\text{F/m})$$

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

解：电阻应变片式传感器解决此问题的方法参见 P48 图 3-18 所示的电阻式液体重量传感器，

$$U_0 = Sh\rho g,$$

当注水达到桶容量的 80% 时，也就是位于感压膜上的液体高度达到桶高 4m 的对应位置时，输出一个对应的电压，通过一个电压比较器就可以在液位达到 4m 时输出一个触发信号，关

闭阀门，停止注水。

电容式传感器解决此问题的方法参见 P80 图 5-6 所示的圆筒结构变介质型电容式传感器，总的电容值为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 h}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi h\epsilon_0(\epsilon_1-1)}{\ln(D/d)} = C_0 + \frac{2\pi h\epsilon_0(\epsilon_1-1)}{\ln(D/d)}$$

在圆筒结构变介质式电容传感器中的液位达到桶高 4m 的对应位置时，电容值达到一个特定值，接入测量电路，就可以在液位达到 4m 时输出一个触发信号，关闭阀门，停止注水。

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 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ，极板宽度为 W 。其它参数如图所示。

解：以 x 为界，可以看作两个电容器并联，右边的电容器又可以看作两个电容器串联。参见 P79 图 5-5。故

$$C_1 = \frac{\epsilon_0\epsilon_1 l x}{\delta}, C_{21} = \frac{\epsilon_0\epsilon_1 l(l-x)}{(\delta-d)}, C_{22} = \frac{\epsilon_0\epsilon_2 l(l-x)}{d}, C_2 = \frac{C_{21}C_{22}}{C_{21}+C_{22}} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 l(l-x)}{\epsilon_1 d + \epsilon_2(\delta-d)},$$

总的电容量为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_1 l x}{\delta} + \frac{\epsilon_1\epsilon_2 l(l-x)}{\epsilon_1 d + \epsilon_2(\delta-d)}.$$

5.7 在题 5.6 中，设 $\delta=d=1\text{mm}$ ，极板为正方形（边长 50mm）。 $\epsilon_1=1$ ， $\epsilon_2=4$ 。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。

$$\text{解： } C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_1 l x}{\delta} + \frac{\epsilon_0\epsilon_2 l(l-x)}{\delta} = \frac{\epsilon_0\epsilon_2 l^2}{\delta} + \frac{\epsilon_0(\epsilon_1-\epsilon_2)lx}{\delta} = C_0 + \Delta C$$

特性曲线是一条斜率为 -1 的直线。

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 $d=2\mu\text{m}$ 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 $d=2\mu\text{m}$ 时，读数仪表的示值变化多少格？

$$\text{解： (1) } C_0 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A}{d} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.1415926 \times (4 \times 10^{-3})^2}{0.3 \times 10^{-3}} = 1.4835 \times 10^{-12} \text{ F},$$

$$\text{间隙增大 } C_1 = \frac{\epsilon A}{d + \Delta d} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.1415926 \times (4 \times 10^{-3})^2}{(0.3 + 0.002) \times 10^{-3}} = 1.4735 \times 10^{-12} \text{ F},$$

$$\Delta C_1 = C_1 - C_0 = (1.4735 - 1.4835) \times 10^{-12} = -0.01 \times 10^{-12} \text{ F},$$

$$\text{间隙缩小 } C_2 = \frac{\epsilon A}{d - \Delta d} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.1415926 \times (4 \times 10^{-3})^2}{(0.3 - 0.002) \times 10^{-3}} = 1.4933 \times 10^{-12} \text{ F},$$

$$\Delta C_2 = C_2 - C_0 = (1.4933 - 1.4735) \times 10^{-12} = 0.00979 \times 10^{-12} \text{ F},$$

$$\Delta C \approx 0.01 \text{ pF}$$

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

第 6 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：正压电效应就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出现电荷集聚的现象。

当在片状压电材料的两个电极面上加上交流电压，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变形，压电材料的这种现象称为电致伸缩效应，也称为逆压电效应。

6.3 试分析石英晶体的压电效应原理。

答：石英晶体的化学成分是 SiO_2 ，是单晶结构，理想形状六角锥体，如图 6-1a 所示。石英

晶体是各向异性材料，不同晶向具有各异的物理特性，用 x 、 y 、 z 轴来描述。

z 轴：是通过锥顶端的轴线，是纵向轴，称为光轴，沿该方向受力不会产生压电效应。

x 轴：经过六面体的棱线并垂直于 z 轴的轴为 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），沿该方向受力产生的压电效应称为“纵向压电效应”。

y 轴：与 x 、 z 轴同时垂直的轴为 y 轴，称为机械轴（该方向只产生机械变形，不会出现电荷集聚）。沿该方向受力产生的压电效应称为“横向压电效应”。

石英晶体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，如对石英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。

6.12 将一压电式力传感器与一只灵敏度 S_V 可调的电荷放大器连接，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 40 Pa 的压力变化时，光线示波器上光点的移动距离是多少？

解：(1) $S = S_P S_V S_X$

$$S_V = \frac{S}{S_P S_X} = \frac{0.5 \text{ mm/Pa}}{5 \text{ pc/Pa} \times 20 \text{ mm/V}} = 0.005 \text{ V/pc}$$

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

第 7 章 磁敏式传感器

7.5 什么是霍尔效应？霍尔电动势与哪些因素有关？

答：一块长为 l 、宽为 d 的半导体薄片置于磁感应强度为 B 的磁场（磁场方向垂直于薄片）中，当有电流 I 流过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势 U_H 。这种现象称为霍尔效应。霍尔组件多用 N 型半导体材料，且比较薄。

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

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。

$$\text{霍尔传感器的灵敏度 } K_H = \frac{R_H}{d} = - \frac{1}{ned}。$$

为了提高霍尔传感器的灵敏度，霍尔元件常制成薄片形状。又霍尔元件的灵敏度与载流子浓度成反比，所以可采用自由电子浓度较低的材料作霍尔元件。

7.6 某霍尔元件尺寸（ l 、 b 、 d ）为 $1.0\text{cm} \times 0.35\text{cm} \times 0.1\text{cm}$ ，沿 l 方向通以电流 $I=1.0\text{mA}$ ，在垂直 lb 面加有均匀磁场 $B=0.3\text{T}$ ，传感器的灵敏度系数为 22V/A.T ，求其输出的霍尔电动势和载流子浓度。

$$\text{解： } U_H = K_H IB = 22 \times 1.0 \times 10^{-3} \times 0.3 = 0.0066\text{V}$$

$$\text{由 } K_H = \frac{1}{ned}，\text{得}$$

$$n = \frac{1}{K_H ed} = \frac{1}{22 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.1 \times 10^{-2}} = 2.84 \times 10^{20} / \text{m}^3$$

第 8 章 热电式传感器

8.2 热电偶的工作原理是什么？

答：热电偶测温基本原理：热电偶测温是基于热电效应的基本原理。根据热电效应，任何两种不同的导体或半导体组成的闭合回路，如果将它们的两个接点分别置于温度不同的热源中，则在该回路中会产生热电动势，在一定条件下，产生的热电动势与被测温度成单值函数关系。因此，我们只需测得热电动势值，就可间接获得被测温度。

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，若在回路中插入中间导体，只要中间导体两端的温度相同，则对热电偶回路总的热电势不产生影响。在用热电偶测温时，连接导线及显示仪表等均可看成中间导体。

中间温度定律

任何两种均匀材料组成的热电偶，热端为 t ，冷端为 t_0 时的热电势等于该热电偶热端为 t 冷

端为 t_c 时的热电势与同一热电偶热端为 t_c ，冷端为 t_0 时热电势的代数和。

应用：对热电偶冷端不为 0 时，可用中间温度定律加以修正。

热电偶的长度不够时，可根据中间温度定律选用适当的补偿线路。

标准电极定律

如果 A 、 B 两种导体（热电极）分别与第三种导体 C （参考电极）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势为

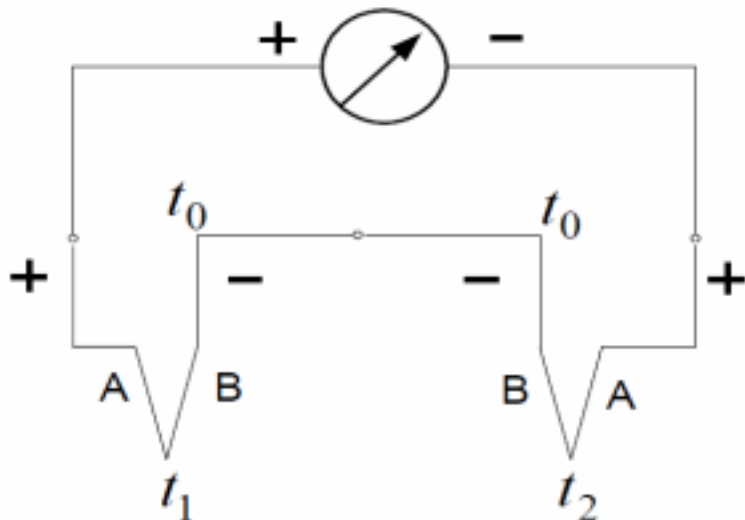
$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0)$$

实用价值：可大大简化热电偶的选配工作。在实际工作中，只要获得有关热电极与标准铂电极配对的热电势，那么由这两种热电极配对组成热电偶的热电势便可由上式求得，而不需逐个进行测定。

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均为 0。
均质导体定律有助于检验两个热电极材料成分是否相同及热电极材料的均匀性。

8.7 用两只 K 型热电偶测量两点温度，其连接线路如下图所示，已知 $t_1=420$, $t_0=30$,
测得两点的温差电动势为 15.24mv，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？
(可能用到的热电偶分度表数据见表一和表二，最后结果可只保留到整数位)



表一 K 型热电偶分度表（部分）

工作端 温度 /	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势 /mV									
0	0	0.397	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.85	3.266	3.681
100	4.095	4.508	4.919	5.327	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.341	9.745	10.151	10.56	10.97	11.381	11.793
300	12.21	12.62	13.04	13.46	13.874	14.292	14.71	15.13	15.552	15.974
400	16.4	16.82	17.24	17.66	18.088	18.513	18.94	19.36	19.788	20.214

表二 E 型热电偶分度表（部分）

测量端 温度/℃	20	30	40
	热电动势/mv		
+0	1.192	1.801	2.419
400	30.546	31.350	32.155

解：

$$\begin{aligned} e(t_1, t_2) &= e(t_1, t_0) - e(t_2, t_0) = e(420, 30) - e(t_2, 30) \\ &= [e(420, 0) - e(30, 0)] - [e(t_2, 0) - e(30, 0)] \\ &= e(420, 0) - e(t_2, 0), \end{aligned}$$

所以 $e(t_2, 0) = e(420, 0) - e(t_1, t_2) = 17.24 - 15.24 = 2.0\text{mv}$,

查表得 t_2 点的温度为 49.5 , 两点间的温度差为 $t_1 - t_2 = 420 - 49.5 = 370.5$ 。

如果测量 t_2 错用了 E 型热电偶，则

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

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

查表得 t_2 点的温度为 360，两点间的温度差实际为 $t_1 - t_2 = 420 - 360 = 60$ 。

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，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 对应的电动势为 2.022mV，
依据中间温度定律

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

得

$$e(t) = 6 + 2.022 = 8.022 \text{ mV}$$

按内插值计算

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

$$\text{得热端温度为 } t = 190 + \frac{8.022 - 7.737}{8.137 - 7.737} (200 - 190) = 197.125$$

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

解：由 0 时电阻值为 100，可知该铂电阻温度计为分度号为 Pt_{100} 的铂热电阻，根据 100

时的电阻值为 139，进一步确定为分度号为 Pt_{100} 的铂热电阻。对应于 281 的阻值，查 Pt_{100}

分度表，对应的温度约为 500。

8.10 镍铬-镍硅热电偶的灵敏度为 0.04mV/，把它放在温度为 1200 处，若以指示表作为冷端，此处温度为 50，试求热电动势的大小。

$$\text{解： } e(t_{1200}, t_{50}) = K \times (1200 - 50) = 0.04 \times 10^{-3} \times 1150 = 0.046 \text{ V}$$

8.11 将一灵敏度为 0.08mV/ 的热电偶与电压表相连接，电压表接线端是 50，若电位计上读数是 60mV，求热电偶的热端温度。

$$\text{解： } t = \frac{e(t, t_{50})}{K} + 50 = \frac{60}{0.08} + 50 = 800$$

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

解：根据中间温度定律

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

有

$$E_{AB}(t_{900}, t_{30}) = E_{AB}(t_{900}, t_0) + E_{AB}(t_0, t_{30}) = E_{AB}(t_{900}, t_0) - E_{AB}(t_{30}, t_0) = 37.326 - 1.203 = 36.123$$

mV

8.14 热电阻有什么特点？

答：热电阻测温基本原理：热电阻测温是基于热效应的基本原理。所谓热效应，就是金属导体的阻值会随温度的升高而增加或减小的现象。因此，我们只需测得金属导体电阻的变化就可间接获得被测温度。

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：热电阻常用引线方式主要有：两线制、三线制和四线制。

两线制的特点是结构简单、费用低，但是引线电阻及其变化会带来附加误差。主要适用于引线不长、测温精度要求较低の場合。

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。

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

解：具有负温度系数的热敏电阻，其阻值与温度的关系可表示为

$$R_{RT} = R_0 \exp\left(\frac{B}{t} - \frac{B}{t_0}\right) - 2.8452, 7.7717, 10.6169$$

$$R_{100} = R_0 \exp\left(\frac{B}{t} - \frac{B}{t_0}\right) = 500 \times 10^3 \times \exp\left(\frac{2900}{373.15} - \frac{2900}{273.15}\right)$$

$$= 500 \times 10^3 \times \exp(-2.8452) = 500 \times 10^3 \times 0.05812 = 29k$$

第 9 章 光电式传感器

9.4 什么是光电效应、内光电效应、外光电效应？这些光电效应的典型光电器件各自有哪些？

答：光照射到物体上使物体发射电子，或电导率发生变化，或产生光生电动势等，这些因光照引起物体电学特性改变的现象称为光电效应。

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，这种现象称为外光电效应。根据外光电效应制作的光电器件有光电管和光电倍增管。

内光电效应是指物体受到光照后所产生的光电子只在物体内部运动，而不会逸出物体的现象。内光电效应多发生在半导体内，可分为因光照引起半导体电阻率变化的光电导效应和因光照产生电动势的光生伏特效应两种。

光电导效应是指物体在入射光能量的激发下，其内部产生光生载流子（电子-空穴对），使物体中载流子数量显著增加而电阻减小的现象。基于光电导效应的光电器件有光敏电阻。

光生伏特效应是指光照在半导体中激发出的光电子和空穴在空间分开而产生电位差的现象，

是将光能变为电能的一种效应。 基于光生伏特效应的光电器件典型的有光电池； 此外，光敏二极管、光敏晶体管也是基于光生伏特效应的光电器件。

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 0.01mm，则码盘半径应有多大？

解：一个 n 位二进制码盘的最小分辨率是 $360^\circ / 2^n$ 。 8 位光电码盘的最小分辨率是 $360^\circ / 2^8 = 1.4^\circ$ 。

码盘周长为 $0.01\text{mm} \times 2^8 = 0.01\text{mm} \times 256 = 2.56\text{mm}$ ，码盘半径为 $2.56\text{mm} / 2 = 0.4074\text{mm}$

9.23 设某循环码盘的初始位置为“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：基于二进制码得到循环码的转换关系为

$$\left. \begin{aligned} C_n &= B_n \\ C_i &= B_i \oplus B_{i+1} (i=1, 2, \dots, n-1) \end{aligned} \right\}$$

相应地，循环码转换为二进制码的方法为

$$\left. \begin{aligned} B_n &= C_n \\ B_i &= C_i \oplus B_{i+1} (i=1, 2, \dots, n-1) \end{aligned} \right\}$$

循环码： 0 1 1 0
 \oplus
 二进制码： 0 1 0 0

循环码“0110”对应的二进制码为“0100”，对应的十进制数为 4，又 初始位置为“0000”，对应的二进制码为“0000”，对应的十进制数为 0，

$$\text{实际转过的角度 } \theta = \frac{\theta_1 - \theta_0}{2^4} \times 360^\circ = \frac{4 - 0}{16} \times 360^\circ = 90^\circ$$

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

(1) 该光栅形成的莫尔条纹间距是多少？

(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) 由光栅密度为 100 线/mm，可知其光栅栅距 $W = \frac{1}{100} \text{mm} = 0.01\text{mm}$

根据公式可求莫尔条纹间距 $B_H = \frac{W}{\theta}$

式中 θ 为主光栅与指示光栅夹角。

$$\theta = 0.1^\circ = 0.001745\text{rad}$$

$$B_H = \frac{W}{\theta} = \frac{0.01}{0.001745} \text{mm} = 5.73\text{mm}$$

(2) 计量光栅对位移起放大作用，光栅每移动一个栅距，莫尔条纹移动一个间距 B_H 。

指示光栅上莫尔条纹移动了 15 条，对应的光栅也就移动了 15 个栅距，

即被测线位移为 $x = 15 \times 0.01\text{mm} = 0.15\text{mm}$

(3) 光栅运动速度与光敏二极管的响应时间成反比，即

$$v = \frac{W}{t} = \frac{0.01}{10^{-6}} \text{ mm/s} = 10 \text{ m/s}$$

所以最大允许速度为 10m/s

第 10 章 辐射与波式传感器

10.8 试分析微波传感器的主要组成及其各自的功能。

答：微波传感器的组成主要包括三个部分：微波发生器（或称微波振荡器）、微波天线及微波检测器。

（1）微波发生器

微波发生器是产生微波的装置。由于微波波长很短、频率很高（300MHz~300GHz），要求振荡回路有非常小的电感与电容，故不能采用普通的晶体管构成微波振荡器，而是采用速调管、磁控管或某些固态元件构成。小型微波振荡器也可采用体效应管。

微波发生器产生的振荡信号需要用波导管（管长为 10cm 以上，可用同轴电缆）传输。

（2）微波天线

微波天线是用于将经振荡器产生的微波信号发射出去的装置。为了保证发射出去的微波信号具有最大的能量输出和一致的方向性，要求微波天线有特殊的结构和形状，常用的天线如图 10-17 所示，包括喇叭形、抛物面形等。前者在波导管与敞开的空间之间起匹配作用，有利于获得最大能量输出；后者类似凹面镜产生平行光，有利于改善微波发射的方向性。

（3）微波检测器

微波检测器是用于探测微波信号的装置。微波在传播过程中表现为空间电场的微小变化，因此使用电流-电压呈非线性特性的电子元件，根据工作频率的不同，有多种电子元件可供选择（如较低频率下的半导体 PN 结元件、较高频率下的隧道结元件等），但都要求它们在工作频率范围内有足够快的响应速度。

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 5480m/s，测得时间间隔为 25 μs ，试求被测试件的厚度。

解：用稳频晶振产生的时间标准信号来测量时间间隔 Δt 的计数脉冲个数，有利于自动测量。用插值法对两个脉冲之间的时间进行扩展再计数，有利于提高测量精度。

$$\text{被测试件的厚度 } d = \frac{v \Delta t}{2} = \frac{5480 \times 25 \times 10^{-6}}{2} = 0.0685 \text{ m}$$