

第一章习题答案

1. 什么是传感器？它由哪几个部分组成？分别起到什么作用？

解：传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置，能完成检测任务；传感器由敏感元件，转换元件，转换电路组成。敏感元件是直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的物理量；转换元件把敏感元件的输出作为它的输入，转换成电路参量；上述电路参数接入基本转换电路，便可转换成电量输出。

2. 传感器技术的发展动向表现在哪几个方面？

解：（1）开发新的敏感、传感材料：在发现力、热、光、磁、气体等物理量都会使半导体硅材料的性能改变，从而制成功敏、热敏、光敏、磁敏和气敏等敏感元件后，寻找发现具有新原理、新效应的敏感元件和传感元件。

（2）开发研制新型传感器及组成新型测试系统

① MEMS 技术要求研制微型传感器。如用于微型侦察机的 CCD 传感器、用于管道爬壁机器人的力敏、视觉传感器。

② 研制仿生传感器

③ 研制海洋探测用传感器

④ 研制成分分析用传感器

⑤ 研制微弱信号检测传感器

（3）研究新一代的智能化传感器及测试系统：如电子血压计，智能水、电、煤气、热量表。它们的特点是传感器与微型计算机有机结合，构成智能传感器。系统功能最大程度地用软件实现。

（4）传感器发展集成化：固体功能材料的进一步开发和集成技术的不断发展，为传感器集成化开辟了广阔的前景。

（5）多功能与多参数传感器的研究：如同时检测压力、温度和液位的传感器已逐步走向市场。

3. 传感器的性能参数反映了传感器的什么关系？静态参数有哪些？各种参数代表什么意义？动态参数有那些？应如何选择？

解：在生产过程和科学实验中，要对各种各样的参数进行检测和控制，就要求传感器能感受被测非电量的变化并将其不失真地变换成相应的电量，这取决于传感器的基本特性，即输出—输入特性。衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

1) 传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度；

2) 传感器的灵敏度 S 是指传感器的输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的输入量增量 Δx 的比值；

3) 传感器的迟滞是指传感器在正（输入量增大）反（输入量减小）行程期间其输出-输入特性曲线不重合的现象；

4) 传感器的重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时, 所得特性曲线不一致的程度。

5) 传感器的漂移是指在外界的干扰下, 输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等。

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性: 频率响应、时间常数、固有频率和阻尼比等。

1) 瞬态响应特性: 传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时, 有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析。这种分析方法是时域分析法, 传感器对所加激励信号的响应称瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。

2) 频率响应特性: 传感器对正弦输入信号的响应特性, 称为频率响应特性。频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。为了减小动态误差和扩大频率响应范围, 一般是提高传感器固有频率 ω_n 。

4. 某位移传感器, 在输入量变化 5 mm 时, 输出电压变化为 300 mV, 求其灵敏度。

解: 其灵敏度 $k = \frac{\Delta U}{\Delta X} = \frac{300 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-3}} = 60$

第二章习题答案

1. 什么是应变效应? 什么是压阻效应? 什么是横向效应?

解: 应变效应, 是指在导体产生机械变形时, 它的电阻值相应发生变化。

压阻效应, 是指半导体材料在某一轴向受外力作用时, 其电阻率 ρ 发生变化的现象。

横向效应, 是指将直的电阻丝绕成敏感栅后, 虽然长度不变, 应变状态相同, 但由于应变片敏感栅的电阻变化较小, 因而其灵敏系数 k 较电阻丝的灵敏系数 k_0 小的现象。

2、试说明金属应变片与半导体应变片的相同和不同之处。

解: 金属应变片由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成。金属电阻应变片的敏感栅有丝式、箔式和薄膜式三种。箔式应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属箔栅, 其优点是散热条件好, 允许通过的电流较大, 便于批量生产, 可制成各种所需的形状; 缺点是电阻分散性大。薄膜式应变片是采用真空蒸发或真空沉淀等方法在薄的绝缘基片上形成 $0.1\mu\text{m}$ 以下的金属电阻薄膜的敏感栅, 最后再加上保护层。它的优点是应变灵敏度系数大, 允许电流密度大, 工作范围广。

半导体应变片是用半导体材料制成的, 其工作原理是基于半导体材料的压阻效应。半导体应变片的突出优点是灵敏度高, 比金属丝式应变片高 50~80 倍, 尺寸小, 横向效应小, 动态响应好。但它有温度系数大, 应变时非线性比较严重等缺点。

3、应变片产生温度误差的原因及减小或补偿温度误差的方法是什么?

解：电阻应变片产生温度误差的原因：当测量现场环境温度变化时，由于敏感栅温度系数及栅丝与试件膨胀系数之差异性而给测量带来了附加误差。

电阻应变片的温度补偿方法：通常有线路补偿法和应变片自补偿两大类。

1) 电桥补偿是最常用的且效果较好的线路补偿法。电桥补偿法简单易行，而且能在较大的温度范围内补偿，但上面的四个条件不一满足，尤其是两个应变片很难处于同一温度场。

2) 应变片的自补偿法是利用自身具有温度补偿作用的应变片。

4、钢材上粘贴的应变片的电阻变化率为 0.1%，钢材的应力为 10kg/mm^2 。试求

① 求钢材的应变。

② 钢材的应变为 300×10^{-6} 时，粘贴的应变片的电阻变化率为多少？

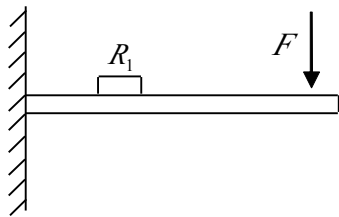
解：① $\frac{\Delta R}{R} \approx F \frac{\Delta l}{l}$ 是 $\Delta R/R = 2 (\Delta l/l)$ 。因为电阻变化率是 $\Delta R/R = 0.001$ ，所以 $\Delta l/l$ (应变) $= 0.0005 = 5 \times 10^{-4}$

② 因 $\frac{\Delta l}{l} = 300 \times 10^{-6}$ ，所以 $\Delta R/R = 2 \times 300 \times 10^{-6} = 6 \times 10^{-4}$

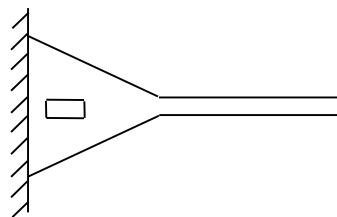
5、如系题图 1-1 所示为等强度梁测力系统， R_1 为电阻应变片，应变片灵敏度系数 $k = 2.05$ ，未受应变时 $R_1 = 120\Omega$ ，当试件受力 F 时，应变片承受平均应变 $\varepsilon = 8 \times 10^{-4}$ ，求

(1) 应变片电阻变化量 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 $3V$ ，求电桥输出电压是多少。



(a)



(b)

习题图 1-1 等强度梁测力系统

解：(1) $\frac{\Delta R_1}{R_1} = K\varepsilon = 2.05 \times 8 \times 10^{-4} = 1.64 \times 10^{-3}$, $\Delta R_1 = k\varepsilon \cdot R_1 = 1.64 \times 10^{-3} \times 120 = 0.1968\Omega$

解：(2)

$$\begin{aligned} U_o &= E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ &= E \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \\ &= E \frac{\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} \end{aligned}$$

设桥臂比 $n = \frac{R_2}{R_1}$, 分母中 $\Delta R_1 / R_1$ 可忽略, 并考虑到平衡条件 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$, 则上式可写为:

$$\begin{aligned} U_o &= E \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \\ &= 3 \times \frac{n}{(1+n)^2} \times 1.64 \times 10^{-3} \\ &= 4.92 \times 10^{-3} \times \frac{n}{(1+n)^2} \end{aligned}$$

6、单臂电桥存在非线性误差, 试说明解决方法。

解: 为了减小和克服非线性误差, 常采用差动电桥在试件上安装两个工作应变片, 一个受拉应变, 一个受压应变, 接入电桥相邻桥臂, 称为半桥差动电路, 由教材中的式 (2-42) 可知, U_o 与 $\Delta R/R$ 呈线性关系, 差动电桥无非线性误差, 而且电桥电压灵敏度 $K_U = E/2$, 比单臂工作时提高一倍, 同时还具有温度补偿作用。

第三章习题答案

1. 为什么电感式传感器一般都采用差动形式?

解: 差动式结构, 除了可以改善非线性, 提高灵敏度外, 对电源电压、频率的波动及温度变化等外界影响也有补偿作用; 作用在衔铁上的电磁力, 是两个线圈磁力之差, 所以对电磁力有一定的补偿作用, 从而提高了测量的准确性。

2. 交流电桥的平衡条件是什么?

解：由交流电路分析可得

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3)}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \quad \text{要满足电桥平衡条件, 即 } \dot{U}_0 = 0, \text{ 则有:}$$

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

3. 涡流的形成范围和渗透深度与哪些因素有关?被测体对涡流传感器的灵敏度有何影响?

解：电涡流的径向形成范围大约在传感器线圈外径的 1.8~2.5 倍范围内，且分布不均匀。涡流贯穿深度 $h = k\sqrt{\rho/(\mu f)}$ ，定义在涡流密度最大值的 jm/e 处。被测体的平面不应小于传感器线圈外 D 的 2 倍，厚度大于 2 倍贯穿度 h 时，传感器灵敏度几乎不受影响。

4. 涡流式传感器的主要优点是什么?

解：电涡流式传感器最大的特点是能对位移、厚度、表面温度、速度、应力、材料损伤等进行非接触式连续测量，另外还具有体积小，灵敏度高，频率响应宽等特点，应用极其广泛。

5. 电涡流传感器除了能测量位移外，还能测量哪些非电量?

解：还可以对厚度、表面温度、速度、应力、材料损伤等进行非接触式连续测量。

第四章习题答案

1. 某电容传感器（平行极板电容器）的圆形极板半径 $r = 4(mm)$ ，工作初始极板间距离 $\delta_0 = 0.3(mm)$ ，介质为空气。问：

(1) 如果极板间距离变化量 $\Delta\delta = \pm 1(\mu m)$ ，电容的变化量 ΔC 是多少?

(2) 如果测量电路的灵敏度 $k_1 = 100(mV/pF)$ ，读数仪表的灵敏度 $k_2 = 5$ （格 / mV）在 $\Delta\delta = \pm 1(\mu m)$ 时，读数仪表的变化量为多少?

解：(1) 根据公式 $\Delta C = \frac{\epsilon S}{d - \Delta d} - \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon S}{d} \cdot \frac{\Delta d}{d - \Delta d}$ ，其中 $S = \pi r^2$

$$(2) \text{ 根据公式 } \frac{k_1}{k_2} = \frac{\Delta\delta_1}{\Delta\delta}, \text{ 可得到 } \Delta\delta_1 = \frac{k_1 \cdot \Delta\delta}{k_2} = \frac{100 \times 1 \times 10^{-3}}{5} = 0.02$$

2. 寄生电容与电容传感器相关联影响传感器的灵敏度，它的变化为虚假信号影响传感器的精度。试阐述消除和减小寄生电容影响的几种方法和原理。

解：电容式传感器内极板与其周围导体构成的“寄生电容”却较大，不仅降低了传感器的灵

敏度，而且这些电容（如电缆电容）常常是随机变化的，将使仪器工作很不稳定，影响测量精度。因此对电缆的选择、安装、接法都有要求。若考虑电容传感器在高温、高湿及高频激励的条件下工作而不可忽视其附加损耗和电效应影响时，其等效电路如图 4-8 所示。图中 L 包括引线电缆电感和电容式传感器本身的电感； C_0 为传感器本身的电容； C_p 为引线电缆、所接测量电路及极板与外界所形成的总寄生电容，克服其影响，是提高电容传感器实用性能的关键之一； R_g 为低频损耗并联电阻，它包含极板间漏电和介质损耗； R_s 为高湿、高温、高频激励工作时的串联损耗电阻，它包含导线、极板间和金属支座等损耗电阻。

此时电容传感器的等效灵敏度为

$$k_e = \frac{\Delta C_e}{\Delta d} = \frac{\Delta C_0 / (1 - \omega^2 LC_0)^2}{\Delta d} = \frac{k_g}{(1 - \omega^2 LC_0)^2} \quad (4-28)$$

当电容式传感器的供电电源频率较高时，传感器的灵敏度由 k_g 变为 k_e ， k_e 与传感器的固有电感（包括电缆电感）有关，且随 ω 变化而变化。在这种情况下，每当改变激励频率或者更换传输电缆时都必须对测量系统重新进行标定。

3. 简述电容式传感器的优缺点。

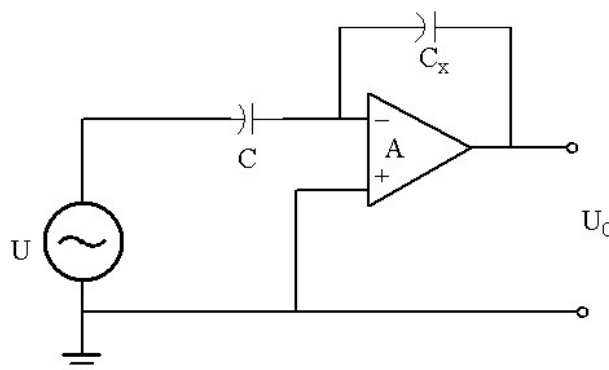
解：优点：(1) 温度稳定性好 (2) 结构简单 (3) 动态响应好 (4) 可以实现非接触测量，具有平均效应

缺点：(1) 输出阻抗高，负载能力差 (2) 寄生电容影响大

4. 电容式传感器测量电路的作用是什么？

解：电容式传感器中电容值以及电容变化值都十分微小，这样微小的电容量还不能直接被目前的显示仪表显示，也很难被记录仪接受，不便于传输。这就必须借助于测量电路检出这一微小电容增量，并将其转换成与其成单值函数关系的电压、电流或者频率。电容转换电路有调频电路、运算放大器式电路、二极管双 T 型交流电桥、脉冲宽度调制电路等

5. 下图为变极距型平板电容传感器的一种测量电路，其中 C_x 为传感器电容， C 为固定电容，假设运放增益 $A=\infty$ ，输入阻抗 $Z=\infty$ ；试推导输出电压 U_0 与极板间距的关系，并分析其工作特点。



题图 4-1

$$I_1 = I_2$$

$$c \frac{dU_I}{dt} = -c_X \frac{dU_O}{dt}$$

两边积分得到：

$$cU_I = -c_X U_O$$

$$U_O = -\frac{cU_I}{c_X} = -\frac{cdU_I}{\varepsilon S}$$

式中负号表示输出电压 U_O 的相位与电源电压反相。上式说明运算放大器的输出电压与极板间距离 d 线性关系。运算放大器电路解决了单个变极板间距离式电容传感器的非线性问题。

但要求 Z_i 及放大倍数 K 足够大。为保证仪器精度，还要求电源电压 U_i 的幅值和固定电容 C 值稳定。

第五章习题答案

1. 简述正、逆压电效应。

解：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。

2. 压电材料的主要特性参数有哪些？

解：压电材料的主要特性参数有：（1）压电常数：压电常数是衡量材料压电效应强弱的参数，它直接关系到压电输出的灵敏度。（2）弹性常数：压电材料的弹性常数、刚度决定着压电器件的固有频率和动态特性。（3）介电常数：对于一定形状、尺寸的压电元件，其固有电容与介电常数有关；而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。（4）机械耦合系数：在压电效应中，其值等于转换输出能量（如电能）与输入的能量（如机械能）之比的平方根；它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数。（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：压电材料开始丧失压电特性的温度称为居里点。

3. 简述电压放大器和电荷放大器的优缺点。

解：电压放大器的应用具有一定的应用限制，压电式传感器在与电压放大器配合使用时，连接电缆不能太长。优点：微型电压放大电路可以和传感器做成一体，这样这一问题就可以得到克服，使它具有广泛的应用前景。缺点：电缆长，电缆电容 C_c 就大，电缆电容增大必然使传感器的电压灵敏度降低。不过由于固态电子器件和集成电路的迅速发展，

电荷放大器的优点：输出电压 U_o 与电缆电容 C_c 无关，且与 Q 成正比，这是电荷放大器的最大特点。但电荷放大器的缺点：价格比电压放大器高，电路较复杂，调整也较困难。

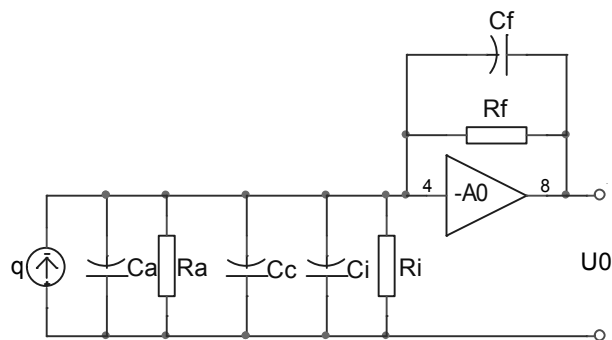
要注意的是，在实际应用中，电压放大器和电荷放大器都应加过载放大保护电路，否则在传

感器过载时，会产生过高的输出电压。

4. 能否用压电传感器测量静态压力？为什么？

解：不可以，压电传感器本身的内阻抗很高，而输出能量较小，为了保证压电传感器的测量误差较小，它的测量电路通常需要接入一个高输入阻抗的前置放大器，所以不能用来测量静态压力。

5. 题图 5-1 所示电荷放大器中 $C_a=100\text{ PF}$ ， $R_a=\infty$ ， $R_f=\infty$ ， $R_i=\infty$ ， $C_f=10\text{ PF}$ 。若考虑引线电容 C_c 影响，当 $A_0=10^4$ 时，要求输出信号衰减小于 1%，求使用 90 PF/m 的电缆，其最大允许长度为多少？



题图 5-1

解： $U_0 = -\frac{KQ}{C_a + C_c + C_i + (1+K)C_f}$ 因此若满足 $(1+K)C_f \gg C_a + C_c + C_i$ 时，式 (6-4)

可表示为

$$U_o \approx -\frac{Q}{C_f}$$

第六章习题答案

1. 说明霍尔效应的原理？

解：置于磁场中的静止载流导体，当它的电流方向与磁场方向不一致时，载流导体上平行于电流和磁场方向上的两个面之间产生电动势，这种现象称霍尔效应。

2. 某霍尔元件 $l \times b \times d$ 为 $1.0 \times 0.35 \times 0.1\text{ cm}^3$ 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 $B = 0.3T$ ，传感器的灵敏度系数为 $22V/A \cdot T$ ，试求其输出霍尔电势及载流子浓度。

$$(q = 1.602 \times 10^{-19} C)$$

解： $U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$ ，式中 $K_H = R_H/d$ 称为霍尔片的灵敏度

所以输出的霍尔电势为 $U_H = 22 \times 1 \times 10^{-3} \times 0.3 = 6.6 \times 10^{-3}$ ，因为 $U_H = -\frac{IB}{ned}$ ，式中令 $R_H = -1/(ne)$ ，称之为霍尔常数，其大小取决于导体载流子密度，所以浓度

$$-\frac{IB}{U_H dq} = -\frac{1 \times 10^{-3} \times 0.3}{6.6 \times 10^{-3} \times 0.1 \times 1.602 \times 10^{-19}}$$

3. 磁电式传感器与电感式传感器有何不同？

解：磁敏式传感器是通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换成电信号的一种传感器。磁电感应式传感器也称为电动式传感器或感应式传感器。磁电感应式传感器是利用导体和磁场发生相对运动产生电动式的，它不需要辅助电源就能把被测对象的机械量转换成易于测量的电信号，是有源传感器。

电感式传感器是利用电磁感应原理将被测非电量如位移、压力、流量、重量、振动等转换成线圈自感量 L 或互感量 M 的变化，再由测量电路转换为电压或电流的变化量输出的装置。

4. 霍尔元件在一定电流的控制下，其霍尔电势与哪些因素有关？

解：根据下面这个公式可以得到

$U_H = K_H IB f(\frac{L}{b})$ ，霍尔电势还与磁感应强度 B ， K_H 为霍尔片的灵敏度，霍尔元件的长度 L 和宽度 b 有关。

第七章习题答案

1. 什么是热电势、接触电势和温差电势？

解：两种不同的金属 A 和 B 构成的闭合回路，如果将它们的两个接点中的一个进行加热，使其温度为 T ，而另一点置于室温 T_0 中，则在回路中会产生的电势就叫做热电势。由于两种不同导体的自由电子密度不同而在接触处形成的电动势叫做接触电势。温差电势（又称汤姆森电势）是同一导体的两端因其温度不同而产生的一种热电势。

2. 说明热电偶测温的原理及热电偶的基本定律。

解：热电偶是一种将温度变化转换为电量变化的装置，它利用传感元件的电磁参数随温度变化的特征来达到测量的目的。通常将被测温度转换为敏感元件的电阻、磁导或电势等的变化，通过适当的测量电路，就可由电压电流这些电参数的变化来表达所测温度的变化。

热电偶的基本定律包括以下三种定律：

1) 中间导体定律：在热电偶回路中，只要中间导体两端的温度相同，那么接入中间导体后，对热电偶的回路的总电势无影响。

2) 参考电极定律：如果导体 C 热电极作为参考电极，并已知标准电极与任意导体配对时的热电势，那么在相同结点温度 (T, T_0) 下，任意两导体 A、B 组成的热电偶，其电势可由下式求得 $E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0)$

3) 中间温度定律：在热电偶回路中，两接点温度为 T, T_0 时的热电势，等于该热电偶在接点 T, T_a 和 T_a, T_0 时的热电势之和，即 $E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_a) + E_{AB}(T_a, T_0)$

3. 已知在其特定条件下材料 A 与铂配对的热电势 $E_{A-Pt}(T, T_0) = 13.967mV$ ，材料 B 与铂配对的热电势 $E_{B-Pt}(T, T_0) = 8.345mV$ ，试求出此条件下材料 A 与材料 B 配对后的热电势。

解：根据热电偶基本定律中的参考电极定律可知，当结点温度为 T, T_0 时，用导体 A、B 组成的热电偶的热电动势等于 AC 热电偶和 CB 热电偶的热电动势的代数和，即：

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0) \\ &= E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) = 13.976 - 8.345 = 5.631mV \end{aligned}$$

4. Pt100 和 Cu50 分别代表什么传感器？分析热电阻传感器测量电桥之三线、四线连接法的主要作用。

解：Pt100 代表铂热电阻传感器，Cu50 代表铜热电阻传感器。三线制可以减小热电阻与测量仪表之间连接导线的电阻因环境温度变化所引起的测量误差。四线制可以完全消除引线电阻对测量的影响，用于高精度温度检测。工业用铂电阻测温常采用三线制和四线制连接法。

5. 将一只灵敏度为 $0.08mV/^\circ C$ 的热电偶与毫伏表相连，已知接线端温度为 $50^\circ C$ ，毫伏表的输出为 $60mV$ ，求热电偶热端的温度为多少？

$$\text{解： } T = \frac{60}{0.08} = 750^\circ C$$

6. 试比较热电阻与热敏电阻的异同。

解：热电阻将温度转换为电阻值大小的热电阻式传感器，热电阻传感器是利用导体的电阻值随温度变化而变化的原理进行测温的。热电阻传感器的测量精度高；有较大的测量范围，它可测量 $-200 \sim 500^\circ C$ 的温度；易于使用在自动测量和远距离测量中。热电阻由电阻体、保护套

和接线盒等部件组成。其结构形式可根据实际使用制作成各种形状。

热敏电阻是由一些金属氧化物，如钴、锰、镍等的氧化物，采用不同比例的配方，经高温烧结而成，然后采用不同的封装形式制成珠状、片状、杆状、垫圈状等各种形状。热敏电阻具有以下优点：①电阻温度系数大，灵敏度高；②结构简单；③电阻率高，热惯性小；但它阻值与温度变化呈非线性，且稳定性和互换性较差。

第八章习题答案

1. 什么是光电效应，依其表现形式如何分类，并予以解释。

解：光电效应首先把被测量的变化转换成光信号的变化，然后通过光电转换元件变换成电信号，光电效应分为外光电效应和内光电效应两大类：

a) 在光线作用下，能使电子逸出物体表面的现象称为外光电效应；

b) 受光照的物体导电率 $\frac{1}{R}$ 发生变化，或产生光生电动势的效应叫内光电效应。

2. 分别列举属于内光电效应和外光电效应的光电器件。

解：外光电效应，如光电管、光电倍增管等。

内光电效应，如光敏电阻、光电池和光敏晶体管等。

3. 简述 CCD 的工作原理。

解：CCD 的工作原理如下：首先构成 CCD 的基本单元是 MOS 电容器，如果 MOS 电容器中的半导体是 P 型硅，当在金属电极上施加一个正电压时，在其电极下形成所谓耗尽层，由于电子在那里势能较低，形成了电子的势阱，成为蓄积电荷的场所。CCD 的最基本结构是一系列彼此非常靠近的 MOS 电容器，这些电容器用同一半导体衬底制成，衬底上面覆盖一层氧化层，并在其上制作许多金属电极，各电极按三相（也有二相和四相）配线方式连接。CCD 的基本功能是存储与转移信息电荷，为了实现信号电荷的转移：必须使 MOS 电容阵列的排列足够紧密，以致相邻 MOS 电容的势阱相互沟通，即相互耦合；控制相邻 MOS 电容栅极电压高低来调节势阱深浅，使信号电荷由势阱浅的地方流向势阱深处；在 CCD 中电荷的转移必须按照确定的方向。

4. 说明光纤传输的原理。

解：光在空间是直线传播的。在光纤中，光的传输限制在光纤中，并随光纤能传送到很远的距离，光纤的传输是基于光的全内反射。当光纤的直径比光的波长大很多时，可以用几何光学的方法来说明光在光纤内的传播。设有一段圆柱形光纤，它的两个端面均为光滑的平面。当光线射入一个端面并与圆柱的轴线成 θ_i 角时，根据斯涅耳（Snell）光的折射定律，在光纤内折射成 θ_r ，然后以 θ_k 角入射至纤芯与包层的界面。若要在界面上发生全反射，则纤芯与界面的光线入射角 θ_k 应大于临界角 φ_c （处于临界状态时， $\theta_k=90^\circ$ ），即：

$$\theta_k \geq \varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

且在光纤内部以同样的角度反复逐次反射，直至传播到另一端面。

5. 光纤传感器常用的调制原理有哪些？

解：1) 强度调制原理 2) 相位调制原理 3) 频率调制原理 4) 偏振调制原理

6. 红外线的最大特点是什么？什么是红外传感器？

解：红外线的最大特点是具有光热效应，可以辐射热量，它是光谱中的最大光热效应区。能将红外辐射量的变化转换为电量变化的装置称为红外探测器或红外传感器。红外传感器一般由光学系统、探测器、信号调理电路及显示系统等组成。

7. 光敏电阻、光电池、光敏二极管和光敏三极管在性能上有什么差异，它们分别在什么情况下选用最合适？

解：光敏电阻

(1) 伏安特性：在一定照度下，流过光敏电阻的电流与光敏电阻两端的电压的关系称为光敏电阻的伏安特性。光敏电阻在一定的电压范围内，其 $I-U$ 曲线为直线，说明其阻值与入射光量有关，而与电压、电流无关。在给定的偏压情况下，光照度越大，光电流也就越大；在一定光照度下，加的电压越大，光电流越大，没有饱和现象。光敏电阻的最高工作电压是由耗散功率决定的，耗散功率又和面积以及散热条件等因素有关。

(2) 光谱特性：光敏电阻的相对光敏灵敏度与入射波长的关系称为光谱特性，亦称为光谱响应。光敏电阻的灵敏度是不同的。从图中可见硫化镉光敏电阻的光谱响应的峰值在可见光区域，常被用作光度量测量（照度计）的探头。而硫化铅光敏电阻响应于近红外和中红外区，常用做火焰探测器的探头。

(3) 光照特性：由于光敏电阻的光照特性呈非线性，因此不宜作为测量元件，一般在自动控制系统中常用作开关式光电信号传感元件。

(4) 温度特性：光敏电阻受温度的影响较大。当温度升高时，它的暗电阻和灵敏度都下降。

温度变化影响光敏电阻的光谱响应，尤其是响应于红外区的硫化铅光敏电阻受温度影响更大。

光敏二极管

(1) 光谱特性：一般来讲，锗管的暗电流较大，因此性能较差，故在可见光或探测赤热状态物体时，一般都选用硅管。但对红外光进行探测时，锗管较为适宜。

(2) 伏安特性：光敏晶体管的光电流比相同管型的二极管大上百倍。

(3) 温度特性：从特性曲线可以看出，温度变化对光电流影响很小，而对暗电流影响很大，所以在电子线路中应该对暗电流进行温度补偿，否则将会导致输出误差。

光电池

(1) 光谱特性：光电池对不同波长的光的灵敏度是不同的。光谱响应峰值所对应的入射光波长是不同的，硅光电池在 $0.8\mu\text{m}$ 附近，硒光电池在 $0.5\mu\text{m}$ 附近。可见硅光电池可以在很宽的波长范围内得到应用。

(2) 光照特性：光电池在不同光照度下，光电流和光生电动势是不同的，它们之间的关系就是光照特性。短路电流在很大范围内与光照强度成线性关系，开路电压（负载电阻 R_L 无限大时）与光照度的关系是非线性的，并且当照度在 2000 lx 时就趋于饱和了。因此光电池

池作为测量元件时，应把它当作电流源的形式来使用，不能用作电压源。

(3) 温度特性：光电池的温度特性是描述光电池的开路电压和短路电流随温度变化的情况。由于它关系到应用光电池的仪器或设备的温度漂移，影响到测量精度或控制精度等重要指标，因此温度特性是光电池的重要特性之一。开路电压随温度升高而下降的速度较快，而短路电流随温度升高而缓慢增加。由于温度对光电池的工作有很大影响，因此把它作为测量器件应用时，最好能保证温度恒定或采取温度补偿措施。

第九章习题答案

1. 超声波在介质中有哪些传播特性？

解：超声波在各种介质中的波速不同，超声波会被传播介质吸收及散射，从而造成波动能量的损失。一般称为吸收损失，也称衰减，频率愈低的超声波衰减愈小。当超声波经过性质不同的介质交界面时，一部分会反射，其余的会穿透过去。这种反射或穿透的强度，由这两个交界介质的特性阻抗 Z 决定。介质的特性阻抗差越大，反射率也就越大。超声波射入交界面除了部分反射外，其余的全部穿透过去，

2. 什么是超声波的干涉现象？

解：如果在一种介质中传播几个声波，于是会产生波的干涉现象。由不同波源发出的频率相同、振动方向相同、相位相同或相位差恒定的两个波在空间相遇时，某些点振动始终加强，某些点振动始终减弱或消失，这种现象称为超声波的干涉现象。

第十章习题答案

1. 什么是绝对湿度和相对湿度？

解：绝对湿度是指单位空间中所含水蒸汽的绝对含量或者浓度或者密度，一般用符号 AH 表示。相对湿度是指被测气体中蒸汽压和该气体在相同温度下饱和水蒸汽压的百分比，一般用符号 RH 表示。

2. 说明半导体色敏传感器的基本原理。

解：半导体色敏传感器是由结深不同的两个 $P-N$ 结二极管，浅结的二极管是 P^+-N 结组成的；深结的二极管是 $P-N$ 结。当有入射光照射时， P^+ 、 N 、 P 三个区域及其间的势垒区中都有光子吸收，但效果不同。紫外光部分吸收系数大，经过很短距离已基本吸收完毕。在此，浅结的即是光电二极管对紫外光的灵敏度高，而红外部分吸收系数较小，这类波长的光子则主要在深结区被吸收。因此，深结的那只光电二极管对红外光的灵敏度较高。

3. 什么是水分子亲和力型湿敏传感器？

解：根据水分子易于吸附在固体表面并渗透到固体内部的这种特性（即水分子亲和力）所制成的传感器叫做水分子亲和力型湿敏传感器。

第十一章习题答案

1. 用测量范围为-50~150KPa的压力传感器测量140KPa压力时,传感器测得示值为142KPa,求该示值的绝对误差、实际相对误差、标称相对误差和引用误差。

解: 绝对误差: $\Delta = X - L = 142 - 140 = 2$

相对误差 $\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% = \frac{2}{140} \times 100\% = 1.4285\%$

标称相对误差即 $\xi = \frac{\Delta}{x} \times 100\% = \frac{2}{142} \times 100\% = 1.4084\%$

引用误差 $\gamma = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限}-\text{测量范围下限}} \times 100\% = \frac{2}{150 - (-50)} = \frac{2}{200} \times 100\% = 1\%$

2. 试问下列测量数据中,哪些表示不正确: $100^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, $100^{\circ}\text{C} \pm 1\%$, $100^{\circ}\text{C} \pm 0.1\%$?

解: 不正确的是 $100^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $100^{\circ}\text{C} \pm 1\%$

3. 压力传感器测量砝码数据如题表 11-1, 试解释这是一种什么误差, 产生这种误差的原因是什么。

题表 11-1

$M(g)$	0	1	2	3	4	5
正向测量值 (mv)	0	1.5	2	2.5	3	3.5
反向测量值 (mv)	0	0.5	1	2	2.5	3.5

解: 这是系统误差, 标准量值的不准确及仪表刻度的不准确而引起的误差。对于系统误差应通过理论分析和实验验证找到误差产生的原因和规律以减少和消除误差。

4. 什么是粗大误差? 如何判断测量系统中含有粗大误差?

解: 明显偏离测量结果的误差称为粗大误差, 又称疏忽误差。这类误差是由于测量者疏忽大意或环境条件的突然变化而引起的。对于粗大误差, 首先应设法判断是否存在, 然后将其剔除。

5. 在对量程为 10MPa 的压力传感器进行标定时, 传感器输出电压值与压力值之间的关系如题表 11-2 所示, 简述最小二乘法准则的几何意义, 并讨论下列电压-压力直线中哪一条最符合最小二乘法准则? (10 分)

题表 11-2

测量次数 I	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

压力 x_i (MPa)	2	4	5	8	10
电压 y_i (V)	10.043	20.093	30.153	40.128	50.072

(1) $y=5.00x-1.05$

(2) $y=7.00x+0.09$

(3) $y=50.00x-10.50$

(4) $y=-5.00x-1.05$

(5) $y=5.00x+0.07$

解：最小二乘法准则的几何意义在于拟和直线精密度高即误差小。

将几组 x 分别带入以上五式，与 y 值相差最小的就是所求，很明显（5）为所求。

6. 测得某检测装置的一组输入输出数据如题表 11-3，试用最小二乘法拟合直线，求其线性和灵敏度；

题表 11-3

x	0.9	2.5	3.3	4.5	5.7	6.7
y	1.1	1.6	2.6	3.2	4.0	5.0

解： $Y=kx+b$

$$\Delta i = y_i - (kx_i + b)$$

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{(\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

代入数据得到： $k=0.68, b=0.25$

所以， $y=0.68x+0.25$

$$\Delta 1 = 0.238, \Delta 2 = -0.35, \Delta 3 = -0.16, \Delta 4 = -0.11$$

$$\Delta 5 = -0.126, \Delta 6 = -0.194$$

$$\mathcal{Y}_L = \pm \frac{\Delta Z_{\max}}{\mathcal{Y}_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{0.35}{5} = \pm 7\%$$

7. 设 5 次测量某物体的长度，其测量的结果分别为：9.8，10.0，10.1，9.9，10.2 厘米，若忽略粗大误差和系统误差，试求在 99.73% 的置信概率下，对被测物体的最小估计区间。

$$\text{解: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{(9.8+10.0+10.1+9.9+10.2)}{5} = 10$$

$$v_i = x_i - \bar{x} \text{ 分别为 } -0.2, -0.2, 0, 0.1, -0.1, 0.2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} = 0.16$$

$$\mu \in [\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma] = [9.52, 10.48]$$

5. 假设采样频率 f_s 是 150Hz, 信号中含有 50、70、160、和 510 Hz 的成分, 将产生畸变的频率成分有哪些? 新产生的畸变频率为多少?

解: 产生畸变的频率成分 F_3, F_4 , 新产生的畸变频率为 10 和 60Hz。

第十三章习题答案

1、单臂电桥存在非线性误差, 试说明解决方法。

解: ①提高桥臂比: 提高了桥臂比, 非线性误差可以减小, 但从电压灵敏度 $S_v \approx \frac{1}{n} U_i$ 考虑, 灵敏度将降低, 这是一种矛盾, 因此, 采用这种方法的时候应该适当的提高供桥电压 U_i 。

②采用差动电桥: 根据被测试件的受力情况, 若使一个应变片受拉, 另一个受压, 则应变符号相反; 测试时, 将两个应变片接入电桥的相邻臂上, 成为半桥差动电路, 则电桥输出电压 U_o 为

$$U_o = U_i \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (13-15)$$

若 $\Delta R_1 = \Delta R_2, R_1 = R_2, R_3 = R_4$, 则有

$$U_o = \frac{1}{2} U_i \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (13-16)$$

由此可知, U_o 和 $\Delta R_1/R_1$ 成线性关系, 差动电桥无非线性误差。而起电压灵敏度为 $S_v = \frac{1}{2} U_i$, 比使用一只应变片提高了一倍, 同时可以起到温度补偿的作用。

因为采用的是金属应变片测量, 所以本设计采用全桥电路, 能够有比较好的灵敏度并且不存在非线性误差。

2、根据应变传感器的原理说明本设计中应变模型的建立过程。

解: 1) 传感器模型的建立: 电阻应变片的工作原理是基于电阻应变效应, 即在导体产生机械变形时, 它的电阻值相应发生变化。应变片是由金属导体或半导体制成的电阻体, 其阻值将随着压力所产生的变化而变化。在外力作用下, 应变片产生变化, 同时应变片电阻也发生相应

变化。当测得阻值变化为 ΔR 时，可得到应变值 ε ，根据应力与应变关系，得到应力值为

$$\sigma = E\varepsilon$$

由此便得出了应变片电阻变化与重物质量的关系，即

$$\Delta R = \frac{k_0}{ES} g R^* m$$

2)桥路部分电路原理：电阻应变计把机械应变转换成 $\Delta R/R$ 后，应变电阻变化一般都很微小，这样小的电阻变化既难以直接精确测量，又不便直接处理。因此，必须采用转换电路，把应变计的 $\Delta R/R$ 变化转换成电压或电流变化。通常采用惠斯登电桥电路实现这种转换。

3)放大电路原理：该放大电路具有很强的共模抑制比。它由两级放大器组成，第一级由集成运放 A_1 、 A_2 ，由于他们采用同一型号的运放，所以可进一步降低漂移。电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 组成同相输入式并联差分放大器，具有非常高的输入阻抗。第二级式由 A_3 和 4 个电阻 R_4 、 R_5 、 R_6 和 R_7 组成的反向比例放大器，它将双端输入变成单端输出，并使阻值 $R_1=R_3, R_4=R_5, R_6=R_7$ 。

4) 综合电路设计：至此，基于金属电阻应变片的压力测量电路设计完成，可以参考书中图 13-5 所示。图中 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 指代的是同一电压 V （因考虑电路绘制的方便及电路元件的符号不能重复，所以分开标号），它用来模拟物体重量 m 。由以上分析可知采用全桥电路能够有比较好的灵敏度，并且不存在非线性误差，所以由四个应变片两个受拉两个受压可组成全桥电路。

3、试分析最终显示的重量值误差产生的原因。

解：每个设计过程中的失误和疏忽都可能导致电路仿真的失误，可是一些人为因素方面的失误在设计仿真制作时都应该要尽量避免。但是可能由于现实器件与理想器件之间有一定的误差，所以导致实际的电路分析的结果与仿真电路的结果存在一定的误差。

图 1 RW1 大小的确定

1、分析最终测量误差的产生有哪些原因。

解：1) 铂电阻在实际使用时都会有电流流过，电流流过会使电阻发热，使电阻阻值增大，这可能会引起的一定得误差。

2) 传感器本身性能不十分优良，测量方法不十分完善，外界干扰的影响等，都会造成被测参数的测量值与真实值不一致，

3) 在进行测量时环境的温度，湿度，电源电压的稳定性都会影响测量电路存在一定得误差。