

第1章 概述

1.1 什么是传感器？

传感器定义为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？

传感器的共性就是利用物理规律或物质的物理、化学、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 传感器由哪几部分组成的？

由敏感元件和转换元件组成基本组成部分，另外还有信号调理电路和辅助电源电路。

1.4 传感器如何进行分类？

(1) 按传感器的输入量分类，分为位移传感器、速度传感器、温度传感器、湿度传感器、压力传感器等。(2) 按传感器的输出量进行分类，分为模拟式和数字式传感器两类。(3) 按传感器工作原理分类，可以分为电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、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。(4) 按传感器的基本效应分类，可分为物理传感器、化学传感器、生物传感器。(5) 按传感器的能量关系进行分类，分为能量变换型和能量控制型传感器。(6) 按传感器所蕴含的技术特征进行分类，可分为普通型和新型传感器。

1.5 传感器技术的发展趋势有哪些？

(1) 开展基础理论研究 (2) 传感器的集成化 (3) 传感器的智能化 (4) 传感器的网络化 (5) 传感器的微型化

1.6 改善传感器性能的技术途径有哪些？

(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：传感器的静态特性是指在被测量的各个值处于稳定状态时，输出量和输入量之间的关系。主要的性能指标主要有线性度、灵敏度、迟滞、重复性、精度、分辨率、零点漂移、温度漂移。

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：传感器的线性化有助于简化传感器的理论分析、数据处理、制作标定和测试。

常用的线性化方法是：切线或割线拟合，过零旋转拟合，端点平移来近似，多数情况下用最小二乘法来求出拟合直线。

2.3 利用压力传感器所得测试数据如下表所示，计算其非线性误差、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。

非线性误差略

$$\text{正反行程最大偏差 } \Delta H_{\max} = 0.1mV, \text{ 所以 } \gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} 100\% = \pm \frac{0.1}{16.50} \% = \pm 0.6\%$$

$$\text{重复性最大偏差为 } \Delta R_{\max} = 0.08, \text{ 所以 } \gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} 100\% = \pm \frac{0.08}{16.5} 100\% = \pm 0.48\%$$

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？

传感器的动态特性是指传感器对动态激励（输入）的响应（输出）特性，即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。瞬态响应常采用阶跃信号作为输入，频率响应常采用正弦函数作为输入。

2.5 描述传感器动态特性的主要指标有哪些？

零阶系统常采用灵敏度 K ，一阶系统常采用时间常数 τ 、灵敏度 K ，二阶系统常采用固有频率 ω_0 、阻尼比 ζ 、灵敏度 K 来描述。

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。

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简单信号的单独作用之和，从而简化问题。

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信号同频率的成分才可能是该输入信号引起的输出，其他频率成分都是噪声干扰，可以采用相应的滤波技术。

2.7 用某一阶传感器测量 100Hz 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 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 $|A(j\omega)| \leq 5\%$ ，即 $\left\langle \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \right\rangle \leq 5\%$

又 $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 200\pi$ ，所以 $0 < \tau < 0.523ms$ ，取 $\tau = 0.523ms$

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

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

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，试求传感器温差的三分之一和二分之一所需的时间。

温差为二分之一时， $t=2.08s$

温差为三分之一时， $t=1.22s$

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 $2\frac{dy}{dt} + 2y = 2 \times 10^{-3}x$ ， y 代表水银柱高 (m)， x 代表输入温度 ($^\circ C$)。求该温度计的时间常数及灵敏度。

$\tau = 1s$ ； $K = 1 \times 10^{-3}$

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

$\tau = 8.5s$

2.11 某一质量-弹簧-阻尼系统在阶跃输入激励下，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。

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。

解：二阶系统 $A(\omega) = \{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2] + 4\xi^2(\frac{\omega}{\omega_n})^2\}^{-\frac{1}{2}}$

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

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 600Hz、400Hz 的正弦交变力时，

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

第三章 思考题和习题

3.1 应变电阻式传感器的工作原理是什么？

电阻应变式传感器的工作原理是基于应变效应的。

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？

按组成材料有金属和半导体之分，金属应变片受力时，主要是基于应变效应，是引起应变片的外形变化进而引起电阻值变化，而半导体应变片时基于压阻效应工作的，当受力时，引起应变片的电阻率变化进而引起电阻值变化。

按结构形式有丝式和箔式之分。丝式是应变金属丝弯曲成栅式结构，工艺简单，价钱便宜。箔式是采用光刻和腐蚀等工艺制成的，工艺复杂，精度高，价钱较贵。

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？

一是电阻温度系数，二是线膨胀系数不同。

单丝自补偿应变片，双丝组合式自补偿应变片，补偿电路

3.4 试分析差动测量电路在应变式传感器中的好处。

灵敏度提高一倍，非线性得到改善。

3.5 如果将 100Ω 应变片粘贴在弹性元件上，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 $5 \times 10^4 \text{ N}$ 的拉力引起应变计电阻变化为 1Ω ，求该应变片的灵敏度系数。

解： $K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon$ ，已知 $\Delta R = 1 \Omega$ ，所以 $\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{100}$

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

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

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

3.6 一个量程为 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 120Ω ，灵敏度为 2.0，泊松比为 0.3，材料弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} Pa$ ，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。

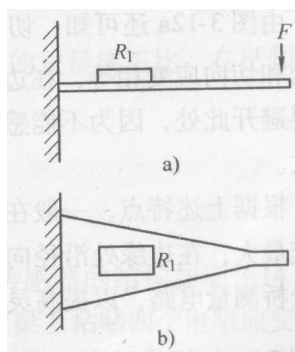
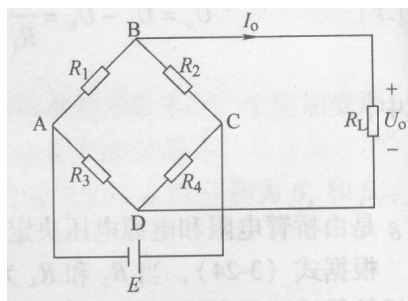
$$\text{解：(2) } A = \pi(R^2 - r^2) = 59.7 \times 10^{-6} m^2$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = k \frac{F}{AE} R = 0.191\Omega$$

$$\Delta R_5 = \Delta R_6 = \Delta R_7 = \Delta R_8 = -\mu \Delta R_1 = -0.0573\Omega$$

$$(3) U_0 = 1mV$$

3.7 图 3.5 中，设负载电阻为无穷大（开路），图中， $E=4V$ ，



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

$$(2) U_0 = E \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = 4 \times \left(\frac{101}{201} - \frac{1}{2} \right) V = 0V$$

(3) 当 R_1 受拉应变， R_2 受压应变时，

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

当 R_1 受压应变, R_2 受拉应变时,

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

3.8 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, $R_1 = 120\Omega$ 。当试件受力为 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) $\Delta R_1 / R_1 = K\varepsilon = 2.05 \times 800 \times 10^{-6} = 1.64 \times 10^{-3}$

$$\Delta R_1 = K\varepsilon \times R_1 = 1.64 \times 10^{-3} \times 120 = 0.197\Omega$$

$$(2) U_0 = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{3}{4} \times 1.64 \times 10^{-3} = 1.23mV$$

$$\gamma_L = \frac{\Delta R_1 / R_1}{2 + \Delta R_1 / R_1} = \frac{1.64 \times 10^{-3}}{2 + 1.64 \times 10^{-3}} = 0.08\%$$

(3) 若要减小非线性误差, 一是要提高桥臂比, 二是要采用差动电桥。

第 4 章

4.1 根据工作原理的不同, 电感式传感器可分为哪些种类?

可分为变磁阻式 (自感式)、变压器式和涡流式 (互感式)

4.2 试分析变气隙厚度变磁阻式电感式传感器的工作原理。

当被测位移变化时, 衔铁移动, 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衔铁位移量的大小和方向。

4.3 已知变气隙厚度电感式传感器的铁芯截面积 $S = 1.5cm^2$, 磁路长度 $L = 20cm$, 相对磁

导率 $\mu_r = 5000$, 气隙 $\delta_0 = 0.5cm$, $\Delta\delta = \pm 0.1mm$, 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$,

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, 灵敏度如何变化?

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

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

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

做成差动结构形式灵敏度将提高一倍。

4.4 差动变磁阻式传感器比单圈式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？

灵敏度提高一倍。

非线性得到改善。

4.5 试分析交流电桥测量电路的工作原理。

电感式传感器用交流电桥测量时，把传感器的两个线圈作为电桥的两个桥臂，另外两个相邻桥臂用纯电阻代替。当衔铁处于中间位置时，电桥无输出；

$$\text{当衔铁上移时, } \dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta_0}, \text{ 电桥输出电压与气隙厚度的变化量 } \Delta\delta \text{ 成正比;}$$

$$\text{当衔铁下移时, } \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

因输入是交流电压，所以可以根据输出电压判断衔铁位移大小，当可能辨别方向。

4.6 试分析变压器式交流电桥测量电路的工作原理。

变压器式交流电桥本质上与交流电桥的分析方法一样。电桥两臂 Z_1, Z_2 为传感器线圈阻抗，另外两个桥臂为交流变压器二次绕组阻抗的一半。

当传感器的衔铁位于中间位置时，输出电压为 0，电桥处于平衡状态。

$$\text{当传感器衔铁上移时, } \dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta Z}{Z_0} = -\frac{\dot{U}}{4} \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\text{当传感器衔铁下移时, } \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{2} \frac{\Delta Z}{Z_0} = \frac{\dot{U}}{4} \frac{\Delta L}{L_0}, \text{ 可得到与交流电桥完全一致的结果。}$$

4.7 试分析差动变压器式传感器工作原理。

在 A、B 两个铁芯上绕有两个一次绕组 $W_{1a}, W_{1b} = W_1$ ，和两个二次绕组 $W_{2a}, W_{2b} = W_2$ ，

两个一次绕组顺向串接，两个二次绕组反向串接。

衔铁处于初始位置时，差动变压器输出电压为零；

$$\text{衔铁上移时, } \dot{U}_0 = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \frac{W_2}{W_1} \dot{U}_i;$$

$$\text{衔铁下移时, } \dot{U}_0 = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \frac{W_2}{W_1} \dot{U}_i$$

变压器输出电压可以表示衔铁位移大小，但不能辨别方向。

4.8 引起零点残余电压的原因是什么？如何消除零点残余电压？

原因有三：（1）传感器的两个次级绕组的电气参数不同和几何尺寸不对称（2）磁性材料的磁化曲线的非线性（3）励磁电压本身含高次谐波。

消除方法：（1）尽可能保证传感器的几何尺寸、绕组线圈电气参数和磁路的对称；（2）采用适当的测量电路，如相敏整流电路。

4.9 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？

活动衔铁在中间时，输出电压=0；

活动衔铁位于中间位置以上时，输出电压与输入电压同频同相；

活动衔铁位于中间位置以下时，输出电压与输入电压同频反相。

需要采用专门的相敏检波电路辨别位移的方向

4.10 如何通过相敏检波电路实现对位移大小和方向的判定？

相敏检波电路的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。

4.11 电涡流式传感器的线圈机械品质因素会发生什么变化？为什么？

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，线圈的等效机械品质因素下降。

4.12 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？

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。通常总是利用其等效电感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 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，并分析工作原理。

5.1 根据电容式传感器的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？

变面积式、变极距式、变介电常数

5.2 一个以空气为介质的平板电容式传感器结构如图 5-3a 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_0 （已知空气的相对介电常数 $\varepsilon_r = 1$ ，真空时的

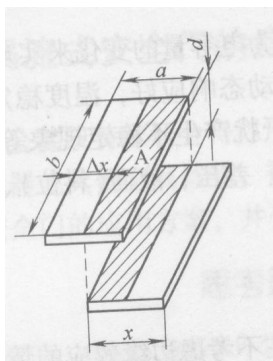
介电常数 $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ）。

解：（1）电容变化量

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta x b}{d_0} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2 \times 10^{-3} \times 16 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 2.83 \times 10^{-13}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta x}{a} = \frac{2\text{mm}}{10\text{mm}} = 0.2$$

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{2.83 \times 10^{-13}}{2 \times 10^{-3}} = 1.41 \times 10^{-10}$$



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。

差动结构
$$\delta_L = \frac{\Delta d}{d_0} \times 100\%$$

5.4 有一个直径为 2m、高 5m 的铁桶，往桶内连续注水，当注水数量达到桶容量的 80% 时停止，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。

采用应变式传感器时，把应变片贴在圆筒的外壁上，电阻分别受纵向和横向应变，并把应变电阻组成差动结构的测量电路。

变介电常数型电容传感器测液位（差分式），通过测量水内的重力，来控制注水数量。

5.5 试分析电容式厚度传感器的工作原理。

5.6 试推导图 5-19 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 。其他参数如图 5-19 所示。

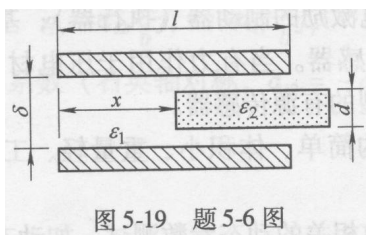


图 5-19 题 5-6 图

5.7 在题 5-6 中，设 $\delta = d = 1mm$ ，极板为正方形（边长 50mm）。 $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 4$ 。试针对 $x = 0 \sim 50mm$ 的范围内，绘出此位移传感器的特性曲线，并给以适当说明。

5.8 某电容测微仪，其传感器的圆形极板半径 $r = 4mm$ ，工作初始间隙 $d = 0.3mm$ ，问：

（1）工作时，如果传感器与工件的间隙变化量 $\Delta d = 2\mu m$ 时，电容变化量是多少？

（2）如果测量电路的灵敏度 $S_1 = 100mV / pF$ ，读数仪表的灵敏度 $S_2 = 5$ 格/mV, 在

$\Delta d = 2\mu m$ 时，读数仪表的示值变化多少格？

解：（1） $\Delta C = 0.987 \times 10^{-14} F$

（2）5 格

6.1 什么是压电效应？什么是逆压电效应？

某些电介质，沿一定方向施加外力使其变形时，其内部会产生极化现象而在表面出现正负电荷，外力去掉后，又恢复成不带电的状态，这种现象称为压电效应。

当在压电材料上施加交流电压时，会使压电材料产生机械振动而变形，这种由电能转换成机械能的现象称为逆压电效应。

6.2 什么是压电式传感器？它有何特点？其主要用途是什么？

利用压电效应制成的传感器称为压电式传感器，其特点是：结构简单、体积小、重量轻、工作频带宽、灵敏度高、信噪比高、工作可靠、测量范围广等。

压力式传感器的用途：与力相关的动态参数测量，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。

石英晶体内部为正立方体结构，从晶体上切下一块晶片，分析其压电效应：

当沿 x 轴方向施加作用力，将在 yz 平面上产生电荷，其大小为 $q_x = d_{11} f_x$

当沿着 y 轴方向施加作用力，仍然在 yz 平面上产生电荷，但极性相反，其大小为

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

当沿着 z 轴方向施加作用力，不会产生压电效应，没有电荷产生。

6.4 试分析压电陶瓷的压电效应机理。

压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料。其内部晶粒有一定的极化方向，在无外电场作用下时，压电陶瓷呈电中性。

当在陶瓷上施加外电场时，晶粒的极化方向发生转动，内部极化，此时去掉外电场，材料的整体极化方向不变，压电陶瓷具有压电特性。

极化后当受到外力作用时，将导致在垂直于极化方向的平面上出现极化电荷，电荷量的大小与外力成正比关系。

6.5 压电材料的主要指标有哪些？其各自含义是什么？

压电系数

弹性系数

介电常数

机械耦合系数

电阻

居里点

6.6 在进行压电式材料的选取时，一般考虑的因素是什么？

转换性能

机械性能

电性能

温度、湿度稳定性好

时间稳定性

6.7 试分析压电式传感器的等效电路。

压电式传感器等效为一个电容器，正负电荷聚集的两个表面相当于电容的两个极板。

当压电元件受力作用时在其表面产生正负电荷，所以可以等效为一个电荷源和一个电容器并联，也可以等效为一个电压源和一个电容器串联。

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。

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，但容易受到电缆电容的影响。

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，电路电容的影响小。

6.9 压电元件在使用时常采用串联或并联的结构形式，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。

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，总电容量为单片时的一半，输出电压增大了 1 倍。适宜以电压作为输出信号且测量电路输入阻抗很高的场合。

6.10 压电元件的变形方式主要有哪些？

厚度变形、长度变形、体积变形、厚度剪切变形。

6.11 何谓电压灵敏度、电荷灵敏度，两者有何关系？

6.12 试分析图 6-11 所示压电式力传感器工作原理。

6.13 试分析图 6-12 所示压电式加速度传感器工作原理。

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。

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。

变磁通式磁电传感器主要是靠改变磁路的磁通大小来进行测量的，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很高时，将随频率增加而下降。

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。

7.4 影响霍尔元件输出零点的因素有哪些？如何补偿？

不等位电势、温度误差

7.5 什么是霍尔效应？霍尔电动势与哪些因素有关？

当载流导体中通电流方向与磁场方向垂直时，在导体的两个端面上就有电势产生，这种现象叫做霍尔效应。

与载流子浓度、激励电流大小、磁场强度、电子迁移率、载流导体的厚度有关。

7.6 某霍尔元件尺寸（ l 、 b 、 d ）为 $1.0\text{cm} \times 0.35\text{cm} \times 0.1\text{cm}$ ，沿着 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 $22\text{V} / \text{A} \cdot \text{T}$ ，求其输出霍尔电动势和载流子浓度。

解： $U_H = K_H IB = 22 \times 1.0 \times 10^{-3} \times 0.3\text{mV} = 6.6\text{mV}$

$$U_H = vBb, vb = \frac{U_H}{B} = \frac{6.6\text{mV}}{0.3\text{T}} = 2.2 \times 10^{-4} \text{V} / \text{T}$$

$$I = nevbd, n = \frac{I}{evbd} = 2.84 \times 10^{20} / \text{m}^3$$

8.1 什么是热电效应、接触电动势、温差电动势？

两种不同导体组成闭合回路，如果两接点温度不同，则在闭合回路中就有热电势产生，这种现象称为热电效应。

在热电效应中因为导体电子密度不同，因接触而产生的热电势称为接触电动势

单一导体内部，因为两端的温度不同产生的热电势称为温差电势。

8.2 热电偶的工作原理是什么？

热电偶是基于热电效应工作的温度传感器。

8.3 什么是中间导体定律、中间温度定律、标准电极定律、均质导体定律？

中间导体定律：在热电偶测温回路内接入第三种导体，只要其两端温度相同，则回路的

总热电动势不变。

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

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。

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 组成的热电偶所产生的热电动势可由下式来确定：

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

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均为 0。

8.4 试说明热电偶的类型与特点。

结构上分为普通热电偶和特殊热电偶。

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？
补偿导线法、冷端温度恒温法、冷端温度计算校正法、电桥法。

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。

8.7 用两只 K 型热电偶测量两点温度差，其连接电路如图 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 15.24mV，问两点的温差是多少？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，则两点的实际温度是多少？

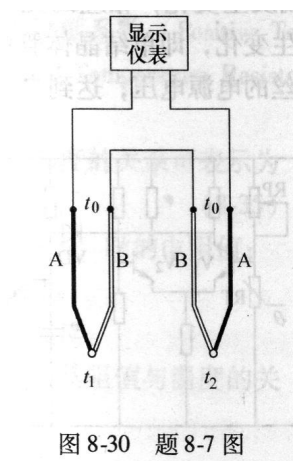


图 8-30 题 8-7 图

$$R = C_1 t + C_2 t^2$$

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？
 $t_0 = 100^\circ\text{C}$

8.9 铂电阻温度计在 100°C 时的电阻值是 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 时的电阻值为 100Ω ）。

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 ，试求热电动势的大小。46mV

8.11 将一灵敏度为 $0.08\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的热电偶与电压表连接，电压表接线端是 50°C ，若电位计上读数 60mV，求热电偶的热端温度。800

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，温差电势分别为 1.203 mV 和 37.326mV。当参考端温度为 30°C ，测量点温度为 900°C 时的温差电势为多少？
36.123 mV

8.13 如果将图 8-12 中得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，

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

为什么？可以测量总温度

8.14 热电阻有什么特点？

(1) 热电阻测量电路优点：精度高，性能稳定，适于测低温。

(2) 热惯性大，需辅助电源。

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。

三线制：热电阻引出 3 根导线，其中两根分别与电桥的相邻两臂串联，另外一根与电桥电源相串联，它对电桥的平衡没有影响。广泛用于工业测温。

四线制：热电阻引出 4 根导线，分别接在电流和电压的回路，4 根导线的电阻对测量都没有影响。

8.16 对热敏电阻进行分类，并叙述其各自不同的特点。

正温度系数、负温度系数、临界温度系数热敏电阻。

8.17 某热敏电阻，其 B 值为 2900K，若冰点电阻为 $500\text{k}\Omega$ ，求该热敏电阻在 100°C 时的阻抗。
 $29\text{ k}\Omega$

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？

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？

反射式、透射式、

9.3 光电式传感器的基本形式有哪些？

9.4 什么是光电效应？内光电效应？外光电效应？

内光电效应、外光电效应

9.5 典型的光电器件有哪些？

光电管、光敏电阻、光敏晶体管、光敏二极管、光电耦合器

9.6 光电管是如何工作的？其主要特性是什么？

光照在光电管的阴极上，阴极电子吸收光子，克服表面功，向外逸出电子，电子在外加电场的作用下，被光电管的阳极收集并形成光电流。

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？

倍增系数；光电阴极灵敏度和光电管总灵敏度；暗电流；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？

暗电阻，亮电阻，暗电流，亮电流，光电流。

9.9 试区分硅光电池和硒光电池的结构与工作原理。

9.10 试解释光敏管的工作原理。介绍光敏二极管和光敏晶体管的主要特性。

光谱特性、伏安特性、光照特性、频率特性。

9.11 试介绍 MOS 光敏单元的工作原理。

一个 MOS 电容器是一个光敏元，可以感受一个像素点，CCD 的基本功能是信号电荷的产生、存储、传输和输出。

9.12 CCD 的电荷转移原理是什么？

CCD 器件基本结构式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移动，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？

9.14 为什么要求 CCD 器件的电荷转移效率要很高？

9.15 举例说明 CCD 图像传感器的应用。

9.16 什么是全反射？光纤的数值孔径有何意义？

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，光纤的数值孔径越大，集光能力就越强。

9.17 试区分功能型和非功能型光纤传感器。

功能型是传感型，非功能型是传光型。

9.18 试解释波长调制型光纤传感器的工作原理。

9.19 举例说明利用光纤传感器实现温度的测量方法。

9.20 试分析二进制码盘和循环码盘的特点。

二进制码盘最大的问题是任何微小的制作误差，都可能造成读数的粗误差。

循环码是无权码，任何相邻的两个数码间只有一位是变化的。

9.21 试区别接触式码盘和非接触式码盘的优缺点。

9.22 试解释光电编码器的工作原理。

9.23 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？

1. 40625 度，0.0245 弧度，0.0408mm

9.24 利用某循环码盘测得结果为“0110”，其实际转过的角度是多少？

二进制码为 0100，90 度

9.25 试分析脉冲盘式编码器的辨向原理。

9.26 计量光栅是如何实现测量位移的？

主光栅与运动部件连在一起，当被测物体运动时，在主光栅、指示光栅后面形成黑白相间的莫尔条纹，条纹宽度和运动部件的位移成正比。

9.27 计量光栅中为何要引入细分技术？细分的基本原理是什么？

光栅测量原理是以移过的莫尔条纹数量来确定位移量，其分辨率为光栅栅距。现代测量不断提出高精度的要求，为了提高分辨率，测量比光栅栅距更小的位移量，可以采用细分技术。细分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的一个周期内，发出若干个计数脉冲，以减少每个脉冲相当的位移，相应地提高测量精度。

10.1 红外探测器有哪些类型？并说明它们的工作原理。

(1) 热探测器：有热敏电阻型、热电阻型、高莱气动型和热释电型

(2) 光子探测器

10.2 什么是热释电效应？热释电效应与哪些因素有关？

在居里点以下时，由于温度的变化引起铁电体的极化强度改变的现象称为热释电效应。

热释电效应与铁电体材料、敏感面、厚度均有关（等效电容）

10.3 什么被称为“大气窗口”，它对红外线的传播有什么影响？

通常把太阳光通过大气层时透过率较高的光谱段称为大气窗口。

红外线传播过程中通过大气窗口时，会使红外辐射逐渐减弱。

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？

热探测器：响应波段宽，响应范围为整个红外区域，室温下工作，使用方便。

光子探测器：灵敏度高、响应速度快，具有较高的响应频率，但探测器波段较窄，一般工作于低温

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。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）

10.6 微波的特点是什么？

(1) 需要定向辐射装置

- (2) 遇到障碍物容易反射
- (3) 绕射能力差
- (4) 传输特性好，传输过程中受烟雾、灰尘等的影响较小
- (5) 介质对微波的吸收大小与介质介电常数成正比。

10.7 试分析反射式和遮断式微波传感器的工作原理。

(1) 反射式：发射天线和接收天线位于检测物体的同一侧，根据检测物体反射回来的微波信号的功率或微波信号从发出到接收到的时间间隔来实现测量位置和位移等参数。

(2) 遮断式：发射天线和接收天线位于检测物体的两边，根据接收天线收到的微波功率的大小来判断发送天线和接收天线之间有无被测物体或位置等。

10.8 试分析微波传感器的主要组成及其各自的功能。

微波发生器、微波天线、微波检测器。

10.9 微波传感器有何优缺点？

(1) 优点：非接触式传感器；波长范围为 $1\text{m} \sim 1\text{mm}$ ，有极宽的频谱；频率高、时间常数小、反应速度快；无须进行非电量转换；适合遥测、遥控；不会带来显著的辐射。

(2) 缺点：存在零点漂移；测量环境对测量结果影响较大。

10.10 举例说明微波传感器的应用。

- (1) 微波液位计
- (2) 微波湿度传感器
- (3) 微波辐射计
- (4) 微波无损检测仪
- (5) 微波物位计
- (6) 微波定位传感器
- (7) 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？

- (1) 超声波有纵波、横波、表面波三种
- (2) 超声波的传播速度与波长和频率的乘积成正比
- (3) 满足光的反射和折射定律

10.12 超声波传感器主要有哪几种类型？试述其工作原理。

(1) 压电式超声波传感器

(2) 磁致伸缩式超声波传感器：当超声波作用在磁致伸缩材料上时，引起材料伸缩，从而导致它的内部磁场发生改变。根据电磁感应，磁致伸缩材料上所绕的线圈便获得感应电动势。

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 $25\mu\text{s}$ ，试求被测试件的厚度。

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

10.14 超声波测物位有哪几种测量方式？各有什么特点？

- (1) 单换能器在液体中 (2) 双换能器在液体中
- (3) 单换能器在空中 (4) 双换能器在空中

当换能器位于液体中时，衰减比较小

当换能器位于空气中时，便于安装和维护，当衰减比较大。

10.15 试述时差法测流量的基本原理，存在的问题及改进方法。

通过测量超声波在顺流和逆流中传播的时间差求得流体流速的一种方法。

$$v \approx \frac{c^2}{2L \cos \theta} \Delta t, \text{ 测量精度主要取决于时间差的测量精度。同时, 超声波声速一般随介质的}$$

温度变化而变化, 因此将造成温漂。

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。

穿透法探伤和反射法探伤。

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。

11.2 为什么大多数气敏器件都装有加热器?

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。

11.4 试述电阻式湿敏传感器的基本原理、主要类型及各自特点。

11.5 陶瓷式电阻湿敏传感器的导电机理是什么? 有何特点?

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。

12.1 简述生物传感器的概念和特点。

12.2 简述生物传感器的工作原理。

12.3 简述生物传感器的分类方法。

12.4 简述生物芯片的种类。

12.5 简述生物传感器的发展。

13.1 什么是智能传感器?

13.2 智能传感器有何特点?

13.3 智能传感器如何实现?

13.4 如何设计智能传感器?

13.5 什么是模糊传感器?

13.6 模糊传感器的一般结构是什么?

13.7 模糊传感器的基本功能有哪些?

13.8 什么是微机电系统?

13.9 微机电系统的基本结构是什么?

13.10 简要介绍主要的 MEMS 制造技术。

13.11 什么是微传感器? 微传感器有何特点?

13.12 什么是网络传感器?

13.13 网络传感器的基本结构是什么?

13.14 网络传感器是如何分类的?

13.15 简要介绍 IEEE1451 网络传感器。

13.16 网络传感器的主要发展方向是什么?

14.1 试分析检测技术有何重要意义。

14.2 什么是测量?

14.3 测量方法是如何进行分类的?

14.4 简述测量系统的结构。

14.5 测量系统是如何分类的, 各有何特点?

14.6 实现参数检测的一般方法主要有哪些?

14.7 针对常见的过程量, 简述其主要的检测方法。

14.8 简述常见的机械量检测方法。

14.9 检测技术的发展趋势是什么?

20.1 试画出数据采集系统模型框图。

20.2 采样/保持器的主要作用是什么？

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？

20.4 举例说明自动检测系统的设计步骤和方法。

20.5 试说明无线传感器网络信息获取的关键技术。

20.6 试说明自动检测系统的发展。

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。