

# 智能传感技术与传感器提纲

---

大概搓了8个小时。

我觉得这门课已经穿了。

计算题可能在1(最小二乘法).3(应变片测量电路或作业题).6(应该不在).7(误差及补偿或课后题).8(8.1,8.2都有可能)。

哪些是烟雾弹自己看。

最后祝您身体健康

by萌毛玉

---

透：

- 前三章均重点
- 计算透了光纤计算和最小二乘法
- 简答：
  - 前三章都重点
  - 第四章：
    1. 自感互感了解原理
    2. 零点残余电压
    3. p60的等效电路
    4. 电涡流的形成
    5. p53自感计算非线性误差
  - 第五章：
    1. p65计算非线性误差
  - 第六章：
    1. 压电效应
    2. 压电材料
  - 第七章：
    1. 霍尔推导公式 7-8 7-9理解几个参数变化会影响霍尔元件变化就行了
    2. 霍尔温度补偿
  - 第八章：
    1. 热电偶的基本定律 会推
    2. 例8-1
  - 第九章：
    1. 内外光电考选择
    2. 光敏考选择
    3. 然后就是光纤了
    4. 光纤的数值孔径，概念

by—不知名的小朋友

透2：

- 误差 p27 2
  - 什么是横向效应 p51 2
  - 零点残余电压 p63 2
  - 压电效应、压电陶瓷/石英 特性?
  - 为什么电荷放大器比电压放大器好 (压电) ?
  - 热电偶三大定律? p109 2
  - 霍尔效应 p98 1
- 

## 智能传感技术与传感器提纲

### 第一章 测量概论

- 1.1测量的概念
- 1.2测量方法及分类简单了解
- 1.3测量误差分类掌握
- 1.4误差的分析与处理掌握 (去粗大后统计分析)
- 1.5误差合成权值掌握
- 1.6最小二乘法与线性回归的矩阵法, 方程法等选一种 (建议使用矩阵法)
- 1.7作业题

### 第二章 传感器理论基础

- 2.1传感器的组成分类简单了解
- 2.2传感器静态特性和动态特性
- 2.3作业题

### 第三章 应变式传感器

- 3.1应变式传感器的工作原理, 引起变化的因素
- 3.2电阻应变片的横向效应
- 3.3应变片的温度误差与补偿可以了解一下
- 3.4应变片的测量电路重要
- 3.5作业题

### 第四章 电感式传感器

- 4.1自感式传感器的工作原理
- 4.2变隙式自感传感器
- 4.3差动变隙式自感传感器
- 4.4互感式传感器的工作原理 (零点残余电压)
- 4.5作业题
- 4.6电涡流式传感器

### 第五章 电容式传感器

- 5.1电容式传感器的工作原理
- 5.2电容式传感器测量电路了解一下
- 5.3作业题
- 5.4变极距型电容式传感器非线性误差

### 第六章 压电式传感器

- 6.1压电式传感器工作原理, 正逆压电效应
- 6.2人工, 天然压电材料与指标
- 6.3测量电路简单了解
- 6.4作业题

### 第七章 磁电式传感器

- 7.1霍尔效应
- 7.2误差及补偿

### 第八章 热电式传感器

- 8.1热电效应, 接触电势, 温差电势
- 8.2热电偶的基本定律 (三大定律)

### 第九章 光电式传感器和超声波传感器

- 9.1外光电效应, 内光电效应
- 9.2工作原理
- 9.3光纤的结构及传光原理

# 第一章 测量概论

## 1.1 测量的概念

- 以确定量值为目的而进行的实验过程叫做测量。测量是人类认识客观世界、获取定量信息不可或缺的手段。而测量的最基本形式是将待测量和同种性质的标准量进行比较，确定待测量对标准量的倍数，即 $x=nu$ 或 $n=x/u$ 。其中 $x$ 为被测量值， $u$ 为标准量即测量单位， $n$ 为比值含有测量误差
- 测量结果不是真值而是被测量的最佳估计值，所以测量结果中还应包括可信程度，以评价测量结果的质量，这个可信程度用测量不确定度即测量误差表示。因此测量结果由三部分组成，即
- 测量结果=测量数据+测量单位+测量误差
- 习题1.1：测量的结果由哪几部分组成？测量的可信度是用什么表示的？

## 1.2 测量方法及分类简单了解

- 获取被测量与标准量的比值的方法，称为测量方法。
- 按获得测量值的方法分为直接测量、间接测量
- 按测量的精度分为等精度测量、不等精度测量
- 按测量过程中被测量是否变化分为动态测量、静态测量
- 根据测量过程中敏感元件是否与被测介质接触分为接触测量、非接触测量等

## 1.3 测量误差分类掌握

- 测量误差是指测量值与真实值之间的差值，反映测量质量的好坏，任何测量过程都存在误差
- 造成测量误差的主要原因在于，传感器本身性能不良，测量方法不完善，环境干扰等。
- 按误差表示方法分类主要有绝对误差和相对误差
  1. 绝对误差：是显值与被测量真值之间的差值。可以表示为 $\Delta=x-L$ ， $x$ 为测量值， $L$ 为被测量真值。绝对误差只能反映测量值的偏差，并不能真实的反映测量结果的优劣
  2. 相对误差：是指绝对误差与被测量值的约定值之比，主要表示形式有实际相对误差、示值相对误差和引用误差。
    - 实际相对误差：绝对误差与被测量真值的百分比，表示为 $\delta=\Delta/L*100\%$
    - 示值（标称）相对误差：绝对误差与器具示值的百分比，表示为 $\delta=\Delta/x*100\%$
    - 引用误差：绝对误差和器具满度值（量程）的百分比，表示为 $\gamma=\Delta/X_m*100\%$ 。 $X_m$ 为满度值。引用误差是仪表中通用的一种误差表示方式，常用来确定仪表的精度等级。0.5级引用误差为 $\pm 0.5\%$
- 按误差性质分类主要有随机误差、系统误差和粗大误差
  1. 随机误差：对同一被测量进行多次重复测量时，绝对值和符号不可预知的随机变化，但总体上服从一定的统计规律的误差。随机误差的表达式：随机误差= $X_i-X_{inf\_mean}$ 。 $X_i$ 为被测量的某一个测量值， $X_{inf\_mean}$ 为无限次测量的均值
  2. 系统误差：在同一测量条件下，对同一被测量进行多次重复测量时，按照一定的规律出现的误差。
    - 系统误差的大小是在重复条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量真值之差，表达式为：系统误差= $X_{inf\_mean}-L$ 。 $L$ 为被测量的真值。
    - 系统误差的主要特点是只要测量条件不变，误差即为确定的值，原因包括标准量值不准、仪表刻度不准、测量方法不当、零点未调、采用近似公式或测量经验不足。可用修正值来修正但只能有限的补偿
    - 判断方法：理论分析法、实验对比法、残差观察法

■ 系统误差消除方法：

1. 消除系统误差产生的根源
2. 在测量结果中进行修正
3. 在测量系统中采用补偿措施

3. 粗大误差：明显偏离测量结果的误差，又称疏忽误差。在做误差分析时，应首先剔除粗大误差

- 习题1.2：什么是相对误差？实际相对误差、标称相对误差和引用误差有何相同点和区别
- 习题1.3：随机误差具有什么特征？如何减小随机误差对测量结果的影响？
- 习题1.4：什么是系统误差？判断系统误差主要有哪些经验方法？如何减小和消除系统误差？
- 习题1.5：用均值和均值的标准差表示一组测量数据的结果时，为什么要注明置信概率？表达了什么意思？

## 1.4误差的分析与处理掌握（去粗大后统计分析）

- 常用的准则有 $3\sigma$ 准则，肖维勒准则格拉布斯准则
- 分析步骤：
  1. 求算术平均值和标准差估计值（标准差估计值 $n-1$ ，标准差为 $n$ ）
  2. 判断有无粗大误差
  3. 剔除粗大误差后的算术平均值和标准差估计值
  4. 重新判断粗大误差
  5. 计算算术平均值的标准差
  6. 得出测量结果

## 1.5误差合成权值掌握

- 一被测量的 $m$ 组测量结果及其误差不能同等看待，各组具有不同的可靠性，即可信赖程度，这种可信赖程度的大小称为权
- 权有如下几种计算方法：
  1. 根据经验直接赋予权值
  2. 有 $m$ 组测量，权值比由各组测量列的测量次数 $n_i$ 的比表示

$$p_1 : p_2 : \cdots : p_m = n_1 : n_2 : \cdots : n_m$$

3. 权值比由各组测量列标准差的平方的倒数的比表示

$$p_1 : p_2 : \cdots : p_m = \frac{1}{\sigma_1^2} : \frac{1}{\sigma_2^2} : \cdots : \frac{1}{\sigma_m^2}$$

- 权只表示相对可靠度，无量纲
- 加权算数平均值与标准误差
- 习题即作业题

## 1.6最小二乘法与线性回归的矩阵法，方程法等选一种（建议使用矩阵法）

- 矩阵法 $X = ((A'A)^{-1}) * A'Y$
- 习题即作业题

## 1.7作业题

- 1.6
- 1.7
- 1.8
- 1.9

## 第二章 传感器理论基础

### 2.1传感器的组成分类简单了解

- 组成：**敏感元件、转换元件、转换电路和辅助电源**。由于输出可能是电参量，也可能是电信号，通常需要辅助电源以及信号调理与转换电路对信号进行放大，运算调制等
- 按工作原理分类：电参量式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、半导体式传感器以及其他形式的传感器
- 按被测量类型分类：位移传感器、速度传感器、加速度传感器、温度传感器、力/力矩传感器、流量传感器以及其他形式的传感器
- 按传感器的能源分类：有源传感器（直接产生电信号）、无源传感器（仅发生电参数的变化，没有能量交换）
- 习题2.1：传感器通常由哪几部分组成？为什么说传感器组成的概念还在不断地扩展和延伸

### 2.2传感器静态特性和动态特性

- 静态特性：被测量的值处于稳定状态时，输出与输入之间的关系
  1. 外部因素对其造成的影响为外界影响，形成了传感器的扰动，包括振动，电磁干扰，供电电源不稳定，非正常的温度变化等
  2. 内部因素主要取决于传感器的性能，主要包括线性度、灵敏度、迟滞、重复性、温漂、零漂等静态性能指标和反应输出对输入动态变化跟随能力的动态响应特性，其中大部分指标体现了传感器的误差因素
  3. 静态性能指标
    - **线性度**：传感器的输入、输出关系对于理想线性关系的偏离程度，曲线经线性化处理后将带来误差，即非线性误差 $\gamma_L = \pm \Delta L_{\max} / Y_{fs} * 100\%$ ， $\Delta L_{\max}$ 为最大非线性绝对误差， $Y_{fs}$ 为满量程输出
    - **灵敏度**：被测量的单位变化引起的输出量变化，用 $S$ 表示： $S = dy/dx$ 。当输入输出完全呈线性关系时为常数，曲线关系时， $S$ 为变数。灵敏度系数越大，表示传感器对被测量的敏感程度越高
    - **迟滞**：传感器在正行程和反行程之间，输入与输出曲线的不重合程度 $\gamma_H = \pm \Delta H_{\max} / Y_{fs} * 100\%$ 。 $\Delta H_{\max}$ 为最大迟滞误差，每次测量都可能存在迟滞误差，最大迟滞误差是多次测量时的最大者
    - **重复性**：传感器的输入按同一方向连续多次变动时所得的特性曲线不一致的程度。正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$ ，反行程为 $\Delta R_{\max 2}$ 。令 $\Delta R_{\max} = \max[\Delta R_{\max 1}, \Delta R_{\max 2}]$ ，则重复性误差 $\gamma_R = \pm \Delta R_{\max} / Y_{fs} * 100\%$
    - **温漂，零漂**：输出相对于某一基准温度的输入随时间的漂移(不重要)
  4. 动态响应特性，动态指标
    - 时间常数 $\tau$ ： $\tau$ 越小，响应速度越快
    - 延时时间 $t_d$ ：输出从0到稳态值50%所需时间
    - 上升时间 $t_r$ ：输出从0到稳态值90%所需时间
    - 超调量 $\sigma$ ：传感器输出超过稳态值的最大值
    - 超调时间 $t_p$ ：传感器输出从0到超过稳态值达到最大值的时间
- 习题2.2：传感器的静态特性指标主要有哪些？写出说明及相关表达式

## 2.3作业题

- 2.4

## 第三章 应变式传感器

---

### 3.1应变式传感器的工作原理，引起变化的因素

- 工作原理：机械弹性结构体受力变形时产生应变效应，这种应变效应由粘贴在机械弹性结构体上的电阻应变片完成检测，应变片的电阻变化再由电桥完成信号的转换，并最终输出弹性体受力成对应关系的电信号
- 习题3.1看着好像关系不大

### 3.2电阻应变片的横向效应

- 横向效应：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端部的结构导致电阻变化减小，因而敏感度系数 $K$ 较较长电阻丝的敏感度系数 $k$ 小
- 转弯段会降低敏感度，带来测量误差，解决方法：使转弯段短路或尽量使转弯段本身的阻值降低，一般采用箔式应变片的结构，转弯段与直线段相比要宽大许多
- 习题3.2：什么是横向效应？为什么应变片的灵敏度系数比电阻丝的灵敏度系数小

### 3.3应变片的温度误差与补偿可以了解一下

- 电阻温度系数引起的阻值变化
  1. 敏感栅的电阻丝阻值变化随温度变化的关系 $R_t = R_0(1 + \alpha_0 \Delta t)$
  2. 温度变化 $\Delta t$ 时，电阻变化为 $\Delta R_\alpha = R_t - R_0 = R_0 \alpha_0 \Delta t$
- 电阻丝和应变试件线膨胀系数不同引起的阻值变化
  1. 电阻丝 $L_s = L_0(1 + \beta_s \Delta t)$
  2. 试件 $L_g = L_0(1 + \beta_g \Delta t)$
  3. 附加应变 $\epsilon_\beta = \Delta L / L_0 = (\beta_g - \beta_s) \Delta t$
  4. 附加的电阻变化 $\Delta R_\beta = K \cdot R_0 \cdot \epsilon_\beta$
- 温度系数和线膨胀系数引起的虚变化(这种东西真的会考吗)
- 自补偿法：如果应变片电阻丝的电阻温度系数 $\alpha_0$ 满足 $\alpha_0 = -K(\beta_g - \beta_s)$ ，则温度引起的金属丝虚应变为0，可实现自补偿
- 线路补偿方法：单臂电桥、半桥、全桥转换转换电路

### 3.4应变片的测量电路重要

- 电桥平衡条件
- 电压敏感度
- 非线性误差
- 内容太多建议看书

### 3.5作业题

- 3.2
- 3.3
- 3.4

## 第四章 电感式传感器

---

第四章：

1. 自感互感了解原理
2. 零点残余电压
3. p60的等效电路
4. 电涡流的形成
5. p53自感计算非线性误差

## 4.1自感式传感器的工作原理

- 结构：线圈、铁芯和衔铁
- 工作原理：在铁芯和衔铁之间的气隙，气隙宽度为 $\delta$ ，传感器的运动部分和衔铁相连，当衔铁移动时，气隙宽度 $\delta$ 发生变化，从而使磁路中磁阻变化，导致电感线圈的电感值变化，测出这种电感量的变化就能确定衔铁位移量的大小和方向
- 习题4.1：何为电感式传感器？电感式传感器分为哪几类？各有何特点？

## 4.2变隙式自感传感器

- 当自感传感器线圈匝数和气隙面积一定时，电感量 $L$ 与气隙厚度 $\delta$ 成反比。
- 设传感器的初始气隙厚度为 $\delta_0$ ，初始电感量为 $L_0$ ，衔铁位移引起的气隙厚度变化量为 $\Delta\delta$ 。当衔铁处于初始位置是，初始电感量为 $L_0 = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta_0}$
- 当衔铁上移 $\Delta\delta$ ，气隙减小 $\Delta\delta$ ， $L = L_0 + \Delta L = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{L_0}{1 - \Delta\delta/\delta_0}$
- 展开级数形式，做线性处理，忽略高次项，可得 $\Delta L/L_0 = \Delta\delta/\delta_0$ ，灵敏度为 $K_0 = (\Delta L/L_0)/\Delta\delta = 1/\delta_0$
- 忽略高次项后非线性项为 $(\Delta\delta/\delta_0)^2$ ，灵敏度和线性度之间存在矛盾，一般只能用于测量微小位移的场合，为了减小非线性误差，实际测量中广泛采用差动变隙式自感传感器。

### • 习题4.1

#### • 推导：

1. 初始， $W$ 为线圈匝数， $\mu_0$ 为空气的磁导率， $A_0$ 为气隙的截面积， $\delta_0$ 为初始气隙厚度

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

2. 当衔铁上移 $\Delta\delta$ ，气隙减小 $\Delta\delta$

$$L = L_0 + \Delta L = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

3. 当 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时，可展开为级数形式，做线性处理，忽略高次项，可得

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

4. 灵敏度为

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

## 4.3差动变隙式自感传感器

- 结构：为了减小非线性和提高灵敏度，让两只完全对称的单个自感传感器合用一个活动衔铁便构成差动变隙式自感传感器，特点是上下两个磁体的构成完全一致，传感器的两只电感线圈接成交流电桥的相邻桥臂，另外两只桥臂由电阻构成。
- 工作原理：当衔铁偏离中心位置，造成两边气隙宽度不一样，使两只电感线圈的电感量一增一减，电桥不平衡，电桥输出电压的大小与衔铁移动的大小成比例，其相位则与衔铁移动量的方向有关。因此，只要能测量出输出电压的大小和相位，就可以确定衔铁位移大小和方向，测量多种非电量
- $\Delta L/L_0 = 2\Delta\delta/\delta_0$ ，灵敏度为 $K_0 = (\Delta L/L_0)/\Delta\delta = 2/\delta_0$ ，灵敏度提高一倍

### • 习题4.1

## 4.4互感式传感器的工作原理（零点残余电压）

- 差动变压器输出电压的特性曲线以及工作原理(建议看书，特别是图)
  - 差动变压器输出电压的大小反映铁芯位移的大小，输出电压的极性反映了铁芯运动的方向
- 零点残余电压：当衔铁位于中心位置时，差动变压器实际输出电压并不等于0，因此将零位移的输出电压称为零点残余电压。它的存在使传感器的输出特性不经过零点，造成实际特性和理论特性不完全一致，主要是由传感器的两次级绕组的电气参数和几何尺寸不对称，以及磁性材料的非线性等引起的
- 零点残余电压一般在几十毫伏以下，实际使用中应设法减小它，否则将会影响测量结果
- 习题4.2：差动变压器式传感器的零点残余电压产生的原因是什么？怎样减小和消除它的影响？

## 4.5作业题

- 4.4
- 4.5

## 4.6电涡流式传感器

- 电涡流形成原理：电感线圈产生的磁力线经过金属导体时，金属导体就会产生感应电流，且呈闭合回路，类似于水涡流形状，故称之为电涡流
- 电涡流的径向形成范围：在线圈中心的轴线附近，电涡流密度很小，可看做一个孔，在线圈外半径 $r_{as}$ 处，电涡流密度最大，而在1.8倍 $r_{as}$ 处，约为最大值的5%。形成范围大约在传感器线圈外径的2倍左右范围内，且分布不均匀，被测的平面尺寸不应小于传感器线圈外径的2倍，否则灵敏度将下降
- 电涡流强度与距离的关系：随着距离 $x$ 的增大而迅速减小
- 电涡流的轴向贯穿深度：有趋肤效应，贯穿金属导体的深度有限，沿深度方向按指数规律下降

# 第五章 自感式传感器

---

第五章：

1. p65计算非线性误差

## 5.1电容式传感器的工作原理

- 电容式传感器实际上是一个具有可变参数的电容器。由两个平行极板组成的电容器若忽略边缘效应，其电容量为 $C=\epsilon_0\epsilon_r A/d=\epsilon A/d$ ，当被测量 $d$ 、 $A$ 或 $\epsilon$ 发生变化时都会引起 $C$ 的变化，如果保持其中两个参数不变，仅改变一个参数，就可以把该参数的变化变换为电容量的变化
- 根据电容器变化的参数，可分为：变极距型，变面积型，变介质型三类。
- 习题5.1：简述电容式传感器的工作原理及其类型

## 5.2电容式传感器测量电路了解一下

- 调频电路
- 运算放大器式电路
- 脉冲宽度调制电路

## 5.3作业题

- 5.4
- 5.5



## 5.4变极距型电容式传感器非线性误差

- 计算步骤:

1. 假设电容器的初始极距为 $d_0$ ，则初始电容 $C_0$ 为 $C_0 = \epsilon A / d_0$
2. 当将动极板上移使极板间距减小 $\Delta d$ 时，电容量增大为 $C + \Delta C$ ，则有

$$\Delta C = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon A}{d_0} = \frac{\epsilon A}{d_0} \left( \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} - 1 \right)$$

3. 得到电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$

4. 由上式可知，当 $\Delta d / d_0 \ll 1$ 时，变极距型电容式传感器的电容量与极距间有近似线性关系，所以变极距型电容式传感器往往设计成 $\Delta d$ 在极小的范围内变化
5. 将上式按级数展开，略去高次项得

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

6. 则灵敏度

$$K = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\Delta d} = \frac{1}{d_0}$$

7. 考虑线性项和二次项，则

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left( 1 + \frac{\Delta d}{d_0} \right)$$

8. 由此得出传感器的非线性误差 $\delta$ 为

$$\delta = \frac{\left| \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right) \right|^2}{\left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|} \times 100$$

9. 因此，只有在测量范围很小时，才有近似的线性输出

## 第六章 压电式传感器

### 第六章:

1. 压电效应
2. 压电材料

### 6.1压电式传感器工作原理，正逆压电效应

- 压电式传感器是一种利用压电效应工作的传感器，压电效应有正压电效应和逆压电效应
- 正压电效应是指压电材料受力变形，在表面产生电荷。逆压电效应是指压电材料通电压后，压电材料发生变形。压电传感器是一种典型的有源传感器，且具有可逆性，因此是一种典型的双向传感器
- $Q = d * F$ ， $d$ 为压电常数，单位为 $pC/N$
- 习题6.1: 什么是正压电效应和逆压电效应?简述压电陶瓷的压电原理

### 6.2人工，天然压电材料与指标

- 天然材料: 石英
  1. x轴: 两平行柱面内夹角等分线，垂直此轴压电效应最强，又称电轴
  2. y轴: 垂直于平行柱面，该轴方向在电场作用下变形最大，又称机械轴
  3. z轴: 无压电效应，又称中心轴

- 人工材料：压电陶瓷、新型压电材料、高分子压电材料
- 压电陶瓷和石英相比：与石英相比，压电陶瓷具有压电常数大、制造工艺成熟、能方便地制成不同形状、成本低等特点，但居里点温度比石英晶体低，压电常数的稳定性也没有石英晶体好。石英晶体的突出优点就是性能非常稳定，机械强度高，绝缘性能也相当好。但是石英材料价格昂贵，因此一般仅用于标准仪器或要求较高的传感器中
- 为什么电荷放大器比电压放大器好：电荷放大器更适合放大低频的压电信号，由于压电信号一般采用同轴低噪声电缆传输，因此如果采用电压放大器放大，其输出电压与电缆电容有关，所以当使用不同的电缆时，压电测试系统需要重新标定，而电荷放大器的输入与电缆电容无关，这为使用带来了很大的方便。
- 指标：
  1. 压电电压常数 $g=d/\epsilon$ ， $\epsilon$ 为压电材料的介电常数
  2. 压电应变常数 $h=g * E$ ， $E$ 为压电材料的弹性模量
  3. 机电耦合系数 $K=\sqrt{h * d}=d * \sqrt{E/\epsilon}$

## 6.3测量电路简单了解

- 电压放大器测量电路
- 电荷放大器测量电路

## 6.4作业题

- 选做6.2
- 6.4
- 6.5

# 第七章 磁电式传感器

第七章：

1. 霍尔推导公式 7-8 7-9理解几个参数变化会影响霍尔元件变化就行了
2. 霍尔温度补偿

## 7.1霍尔效应

- 霍尔效应：导电板被置于磁感应强度为 $B$ ( $z$ 方向)的磁场中时，如果在它相对的两边通以控制电流 $I$ ( $y$ 方向)，磁场方向与电流方向正交，则在导电板的另外两边( $x$ )方向将产生一个电势 $U_H$

$$U_H = R_H \cdot \frac{IB}{d}$$

- $U_H=R_H * IB/d$ ，其中 $R_H$ 为霍尔传感器的霍尔系数，它由霍尔元件的材料性质决定。设 $K_H=R_H/d$ ，则 $U_H=K_H * I * B$ ，其中 $K_H$ 为霍尔元件的灵敏度

$$K_H = \frac{R_H}{d}$$

$$U_H = K_H IB$$

- 由上分析可见，霍尔电势正比于激励电流及磁感应强度，其灵敏度与霍尔系数 $R_H$ 成正比，而与霍尔片厚度 $d$ 成反比。为了提高敏感度，霍尔元件常制成薄片形状
- 习题7.1：什么是霍尔效应？为什么霍尔效应都做成薄片

## 7.2误差及补偿

- 不等位电势补偿：不等位电势与霍尔电势具有相同的数量级，有时甚至超过霍尔电势。需要采用补偿，由于不等位电势与不等位电阻是一致的，因此可以采用分析电阻的方法来找到不等位电势的补偿方法。因为不等位电阻存在，可以用使用电桥电路，为了使电桥达到平衡，可在组织较大的桥臂上并联电阻，或在两个桥臂上同时并联电阻(可看书本图，这个补偿图一乐)
- 温度补偿：因为霍尔元件是由半导体材料制成，许多参数都具有较大的温度系数，产生温度误差，除了选用温度系数较小的元件或采用恒温措施外，还有恒流源供电是个有效措施，可以使霍尔电势稳定。但也只能减小由于输入电阻随温度变化而引起的激励电流I所带来的变化

1. 霍尔元件的灵敏度系数与温度的关系可写成 $K_h = K_{h0}(1 + \alpha \Delta T)$ ， $K_{h0}$ 为温度 $T_0$ 时的 $K_h$ 值， $\Delta T$ 为温度变化量， $\alpha$ 为霍尔电势温度系数
2. 如果在 $K_h$ 增加的同时让激励电流I相应的减小，并能保持 $K_h I$ 乘积不变，也就抵消了灵敏度系数 $K_h$ 增加带来的影响。方案为电路中用一个分流电阻 $R_p$ 与霍尔元件的激励电极相并联，当霍尔元件的输入电阻随温度升高而增加时，旁路分流电阻 $R_p$ 自动加强分流，减小了霍尔元件的激励电流I，从而达到补偿的目的

### 3. 恒流温度补偿电路p94

- $U_{H0} = U_H$
- $K_{h0} \cdot I_{H0} \cdot B = K_h \cdot I_H \cdot B$
- $R_{p0} = (\delta - \beta - \alpha) / \alpha \cdot R_{i0}$
- $R_{i0}$ 为输入电阻， $\delta$ 为温度系数， $\alpha$ 为霍尔电势温度系数，均为确定值。为了满足 $R_{p0}$ 和 $\beta$ 两个条件，分流电阻可取温度系数不同的两种电阻进行串并联组合，这样虽然麻烦但是效果好

### 4. 推导：

- 设初始温度为 $T_0$ ，霍尔元件的输入电阻为 $R_{i0}$ ，灵敏度系数为 $K_{h0}$ ，分流低阻为 $R_{p0}$ ，根据分流概念得

$$I_{H0} = \frac{R_{p0} I}{R_{i0} R_{p0}}$$

- 当温度升至 $T$ 时，电路中各参数变为

$$R_i = R_{i0} [1 + \delta \Delta T]$$

$$R_i = R_{p0} [1 + \beta \Delta T]$$

式中： $\delta$ 为霍尔元件输入电阻温度系数； $\beta$ 为分流电阻温度系数。则

$$I_H = \frac{R_p I}{R_i + R_p} = \frac{R_{p0} [1 + \beta \Delta T] I}{R_{i0} [1 + \delta \Delta T] + R_{p0} [1 + \beta \Delta T]}$$

补偿温度必须满足温升前、后的霍尔电势不变，即

$$\begin{aligned} U_{H0} &= U_H \\ K_{H0} I_{H0} B &= K_H I_H B \end{aligned}$$

则

$$K_{H0} I_{H0} = K_H I_H$$

经整理并省略去 $\alpha \beta (\Delta T)^2$ 高次项后得

$$R_{p0} = \frac{\delta - \beta - \alpha}{\alpha} \cdot R_{i0}$$

当霍尔元件选定后，它的 $R_{i0}$ 为输入电阻， $\delta$ 为温度系数， $\alpha$ 为霍尔电势温度系数，均为确定值。由上式即可计算出分流电阻 $R_{p0}$ 及所需的温度系数 $\beta$ 值。为了满足 $R_{p0}$ 和 $\beta$ 两个条件，分流电阻可取温度系数不同的两种电阻进行串并联组合，这样虽然麻烦但是效果好

- 习题7.2：霍尔元件能够测量哪些物理参数？霍尔元件的不等位电势的概念是什么？温度补偿的方法有哪几种？

## 第八章 热电式传感器

第八章：

1. 热电偶的基本定律 会推
2. 例8-1(就是中间温度定律)

### 8.1 热电效应，接触电势，温差电势

- 热电效应：以两种不同性质的导体或半导体材料A、B串接成一个闭合回路，如果两导体或半导体的结合处温度不同，则在两导体或半导体间产生热电势，也称热电动势，常用 $E_{AB}(T, T_0)$ 。同时在回路中有一定大小的电流

1. 热电极：闭合回路中的导体或半导体A，B
2. 热电偶：闭合回路中的导体或半导体A，B的组合
3. 工作端：两个结点中温度高的一段
4. 参比端：两个结点中温度低的一段
5. 热电势：两导体或半导体的接触电势和单一导体或半导体的温差电势之和

- 接触电势：主要原因是不同材料具有不同的自由电子密度；两种不同材料的导体接触时，接触面会发生电子扩散

1. 当扩散达到动态平衡时，在接触区形成一个稳定的点位，称为接触电势，表示为

$e_{AB}(T) = kT/e \cdot \ln(N_A/N_B)$ ， $k$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 为节点所处温度， $e$ 为电子电荷， $N_A$ ， $N_B$ 为导体A、B的电子浓度，若 $N_A > N_B$ ， $e_{AB}(T) > 0$ ，反之亦然，因此电子浓度高的材料电位也高

- 温差电势：主要原因是导体中自由电子在高温端具有较大的动能；电子从高温端向低温端扩散，因而高温端带正电，低温端带负电，形成静电场，并阻碍电子扩散

1. 当扩散达到动态平衡时，两端产生一个相应的电位差，称为温差电势，表示为 $e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$ ， $\sigma_A$ 为汤姆逊系数，表示单一导体两段单位温度差为 $1^\circ\text{C}$ 时所产生的的温差电势，若 $T > T_0$ ， $e_A(T, T_0) > 0$ ，反之亦然

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

- 接触电势和温差电势的性质

1.  $e_{AB}(T) = -e_{BA}(T)$
2.  $e_{AB}(T) + e_{BC}(T) = e_{AC}(T)$
3.  $e_A(T, T_0) = -e_A(T_0, T)$

- 习题8.1：什么是热电效应？什么是接触电势和温差电势？接触电势和温差电势有哪些性质

### 8.2 热电偶的基本定律（三大定律）

- 中间导体定律：热电偶回路中接入第三种材料的导体(如传感器的引出导线等)，只要其两端温度相等，则回路总电势不变

1. 表明了接入仪表测量线的方法

2. 推导：

- 有

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_B(T, T_0) + e_{BC}(T_0) + e_C(T_0, T_0) + e_{CA}(T_0) + e_A(T_0, T)$$

- 因为

$$e_C(T_0, T_0) = 0$$

$$e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = e_{BA}(T_0)$$

- 所以

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_B(T, T_0) + e_A(T_0, T) + e_{BA}(T_0) = E_{AB}(T, T_0)$$

- **参考电极定律(标准电极定律)**: 设节点温度为 $T$ 、 $T_0$ , 则用导体A、B组成的热电偶产生的热电势等于由导体A、C组成的热电偶和导体C、B组成的热电偶产生的热电势的代数和, 此即为参考电极定律

$$1. E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0)$$

2. 意义: 由于铂丝的理化性能稳定, 如果能实验测得各种材料的热电极对铂丝的热电特性, 就不难推得任意材料间的热电特性

3. 推导:

$$\begin{aligned} & E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0) \\ &= e_{AC}(T) + e_C(T, T_0) - e_{AC}(T_0) - e_A(T, T_0) + \\ & \quad e_{CB}(T) + e_B(T, T_0) - e_{CB}(T_0) - e_C(T, T_0) \\ &= E_{AB}(T) + E_B(T, T_0) - E_{AB}(T_0) - E_A(T, T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$

- **中间温度定律**: 热电偶在节点温度为 $(T, T_0)$ 时的热电势等于该热电偶在阶段温度为 $(T, T_n)$ 和 $(T_n, T_0)$ 时相应热电势的代数和, 其中 $T_n$ 被称为中间温度

1. 为制定热电偶的分度表奠定了理论基础, 从分度表查出参考端为 $0^\circ\text{C}$ 时的热电势, 即可求得参考端不为 $0^\circ\text{C}$ 时的热电势
2. 以导体A'、B'分别替代导体A和B时, 有 $E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{A'B'}(T_n, T_0)$ , 为补偿导线的应用提供了理论依据

3. 推导:

- 因为

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_n) + \int_{T_n}^T (\sigma_B - \sigma_A) dT \\ E_{AB}(T_n, T_0) &= e_{AB}(T_n) - e_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^{T_n} (\sigma_B - \sigma_A) dT \end{aligned}$$

- 所以

$$E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^T (\sigma_B - \sigma_A) dT$$

- 即得

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0)$$

当 $T_0=0$ 时有

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, 0)$$

- **习题8.2: 试论述热电偶的三个基本定律**

## 第九章 光电式传感器和超声波传感器

第九章:

1. 内外光电考选择
2. 光敏考选择
3. 然后就是光纤了
4. 光纤的数值孔径, 概念

## 9.1外光电效应，内光电效应

- **外光电效应：**在光的作用下，物体内的电子(光电子)逸出物体表面向外发射的现象
- **内光电效应：**在光线作用下，受光照的物体的导电率发生变化，或产生光生电动势的现象，又分为光电导效应和光生伏特效应
  1. **光电导效应：**在光照时，半导体材料吸收了入射光子能量。当光子能量大于或等于半导体材料的禁带宽度时，就激发电子-空穴对，增加了载流子浓度，半导体电导率增大的现象
  2. **光生伏特效应：**物体受光照而产生的一定方向的电动势的效应。如光电池等
- **习题9.1：**什么是光电效应？光电效应可分为哪几种？试论述每种光电效应的含义，并各举一例说明？

## 9.2工作原理

- **光敏电阻：**又称光导管，由半导体材料制成，是纯电阻器件
  1. **不受光照时，电阻值很大，电路中电流很小；收到一定波长的光照射时，阻值急剧减小。**
  2. 光敏电阻在不受光照射时的电阻称为暗电阻，此时流过的电流称为暗电流；在受光照射时的电阻称为亮电阻，此时流过的电流称为亮电流。亮电流与暗电流之差称为光电流
  3. 通常，暗电阻越大越好，两电阻越小越好，即光敏电阻的灵敏度高。实际光敏电阻的暗电阻一般在兆欧级别，亮电阻在几千欧以下。
- **光敏二极管：**装在透明玻璃外壳中，PN结装在管的顶部，可以直接受到光照射
  1. **光敏二极管在电路中一般是处于反向工作状态，无光照射时，反向电阻很大，反向电流很小；光照射在PN结上时，PN结附近，产生光电子和光生空穴对，在PN结处内电场的作用下做定向运动，形成光电流。**
  2. 光的照度越大，光电流越大
  3. 光敏二极管在不受光照射时，处于截止状态；受光照射时，处于导通状态
- **光敏晶体管(光敏三极管)：**有2个PN结，发射极做的很大，以扩大光的照射面积，大多数光敏晶体管的基极无引出线
  1. **当集电极加上相对于发射极为正的电压而不接基极时，集电结就是反向偏压；当光照射在集电结上时，产生电子-空穴对，从而形成光电流，相当于三极管的基极电流。**
  2. 由于基极电流的增加，集电极形成输出电流，是光生电流的 $\beta$ 倍。可见，光敏晶体管也具有放大作用
- **光电池：**可直接将光能转换成电能，是光线作用下的电源
  1. **工作原理：光生伏特效应**
  2. 当入射光照射PN结时，若光子的能量大于半导体材料的禁带宽度，则可以在PN结内产生电子-空穴对，并从表面向内迅速扩散，在结电场的作用下，空穴移向P型区，电子移向N型区，最后建立一个与光照强度有关的电动势
- **习题9.2：**简述光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管和光电池的工作原理

## 9.3光纤的结构及传光原理

- **结构：**
  1. **纤芯：**指中心的圆柱体，由掺杂的石英玻璃制成，折射率为 $n_1$
  2. **包层：**指围绕着纤芯的圆形外层，由不同掺杂的石英玻璃制成，折射率为 $n_2(n_1 > n_2)$
  3. **保护层：**指包层外面的一层，由尼龙材料制成，目的是增强光纤的机械强度
- **传光原理：**
  1. 光纤传输基于光的全内反射，两个端面均为光滑的平面。当光线射入一个端面并与圆柱体的轴线成 $\theta_i$ 角时，在光纤内折射成 $\theta'$ 角，然后以 $\varphi_i$ 角入射至纤芯与包层的界面，光线一部分投射到包层，一部分反射回纤芯。
  2. 若想要在界面上发生全反射，则纤芯包层与界面的光线入射角 $\varphi_i$ 应大于临界角 $\varphi_c$ ，以锯齿波形状在纤芯内向前传播，最后从光纤的另一端面射出，此即光纤的传光原理

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_i &= n_1 \sin \theta' \\ n_1 \sin \varphi_i &= n_2 \sin \varphi' \end{aligned}$$

$$\varphi' \geq \varphi_c = 90^\circ \text{ (临界折射角)}$$

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta' &= n_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \varphi_i \right) = n_1 \cos \varphi_i \\ &= n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_i} = n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_2}{n_1} \sin \varphi' \right)^2} \end{aligned}$$

■ 当  $\varphi' = \varphi_c = 90^\circ$  时, 有

$$n_1 \sin \theta' = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

■ 由

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_i &= n_1 \sin \theta' \\ n_1 \sin \varphi_i &= n_2 \sin \varphi' \end{aligned}$$

可得, 光纤端面的入射角  $\theta_i$  应满足如下式:

$$\theta_i \leq \theta_c = \arcsin \left( \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)$$

■ 光纤处于空气中时,  $n_0=1$ , 有

$$\theta_i \leq \theta_c = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

因此, 当入射角  $\theta_i$  小于临界入射角  $\theta_c$  时, 光在纤芯和包层的界面上反复逐次全反射, 以锯齿波形状在纤芯内向前传播, 最后从光纤的另一端面射出

• 光纤的基本特性:

1. 数值孔径:

光纤数值孔径定义为

$$NA = \sin \theta_c = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

数值孔径 NA 表征了光纤的集光能力, NA 越大, 集光能力越强, 耦合效率越高。但 NA 过大时, 会造成光信号畸变。通常石英的 NA 取 0.2~0.4。

• 习题9.4: 依据光纤的基本结构, 论述光纤的工作原理, 并说明数值孔径 NA 的作用