

第一章 传感与检测技术的理论基础

1. 什么是测量值的绝对误差、相对误差、引用误差？

答：某量值的测得值和真值之差称为绝对误差。

相对误差有实际相对误差和标称相对误差两种表示方法。实际相对误差是绝对误差与被测量的真值之比；标称相对误差是绝对误差与测得值之比。

引用误差是仪表中通用的一种误差表示方法，也用相对误差表示，它是相对于仪表满量程的一种误差。引用误差是绝对误差（在仪表中指的是某一刻度点的示值误差）与仪表的量程之比。

2. 什么是测量误差？测量误差有几种表示方法？

它们通常应用在什么场合？

答：测量误差是测得值与被测量的真值之差。

测量误差可用绝对误差和相对误差表示，引用误差也是相对误差的一种表示方法。

在实际测量中，有时要用到修正值，而修正值是与绝对误差大小相等符号相反的值。在计算相对误差时也必须知道绝对误差的大小才能计算。

采用绝对误差难以评定测量精度的高低，而采用相对误差比较客观地反映测量精度。

引用误差是仪表中应用的一种相对误差，仪表的精度是用引用误差表示的。

3. 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 $\Delta = 142 - 140 = 2 \text{ kPa}$

$$\text{实际相对误差 } \delta = \frac{142 - 140}{140} \times 100\% = 1.43\%$$

$$\text{标称相对误差 } \delta = \frac{142 - 140}{142} \times 100\% = 1.41\%$$

$$\text{引用误差 } \gamma = \frac{142 - 140}{150 - (-50)} \times 100\% = 1\%$$

4. 什么是随机误差？随机误差产生的原因是什么？如何减小随机误差对测量结果的影响？

答：在同一测量条件下，多次测量同一被测量时，其绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差。

随机误差是由很多不便掌握或暂时未能掌握的微小因素（测量装置方面的因素、环境方面的因素、人员方面的因素），如电磁场的微变，零件的摩擦、间隙，热起伏，空气扰动，气压及湿度的变化，测量人员感觉器官的生理变化等，对测量值的综合影响所造成的。

对于测量列中的某一个测得值来说，随机误差的出现具有随机性，即误差的大小和符号是不能预知的，但当测量次数增大，随机误差又具有统计的规律性，测量次数越多，这种规律性表现得越明显。所以一般可以通过增加测量次数估计随机误差可能出现的大小，从而减少随机误差对测量结果的影响。

5. 什么是系统误差？系统误差可分哪几类？系统误差有哪些检验方法？如何减小和消除系统误差？

答：在同一测量条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号保持不变，或在条件改变时，按一定规律变化的误差称为系统误差。

系统误差可分为恒值（定值）系统误差和变值系统

误差。误差的绝对值和符号已确定的系统误差称为恒值（定值）系统误差；绝对值和符号变化的系统误差称为变值系统误差，变值系统误差又可分为线性系统误差、周期性系统误差和复杂规律系统误差等。

在测量过程中形成系统误差的因素是复杂的，通常人们难于查明所有的系统误差，发现系统误差必须根据具体测量过程和测量仪器进行全面的仔细的分析，这是一件困难而又复杂的工作，目前还没有能够适用于发现各种系统误差的普遍方法，只是介绍一些发现系统误差的一般方法。如实验对比法、残余误差观察法，还有准则检查法如马利科夫判据和阿贝检验法等。

由于系统误差的复杂性，所以必须进行分析比较，尽可能的找出产生系统误差的因素，从而减小和消除系统误差。1. 从产生误差根源上消除系统误差；2. 用修正方法消除系统误差的影响；3. 在测量系统中采用补偿措施；4. 可用实时反馈修正的办法，来消除复杂的变化系统误差。

6. 什么是粗大误差？如何判断测量数据中存在粗大误差？

答：超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差，

粗大误差又称疏忽误差。此误差值较大，明显歪曲测量结果。

在判别某个测得值是否含有粗大误差时，要特别慎重，应作充分的分析和研究，并根据判别准则予以确定。通常用来判断粗大误差的准则有： 3σ 准则（莱以特准则）；肖维勒准则；格拉布斯准则。

7. 什么是直接测量、间接测量和组合测量？

答：在使用仪表或传感器进行测量时，测得值直接与标准量进行比较，不需要经过任何运算，直接得到被测量，这种测量方法称为直接测量。

在使用仪表或传感器进行测量时，首先对与测量有确定函数关系的几个量进行直接测量，将直接测得值代入函数关系式，经过计算得到所需要的结果，这种测量称为间接测量。

若被测量必须经过求解联立方程组求得，如：有若干个被测量 y_1, y_2, \dots, y_m ，直接测得值为 x_1, x_2, \dots, x_n ，把被测量与测得值之间的函数关系列成方程组，即

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = f_1(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ x_2 = f_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \dots \\ x_n = f_n(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{array} \right\}$$

(1-6)

方程组中方程的个数 n 要大于被测量 y 的个数 m ，用最小二乘法求出被测量的数值，这种测量方法称为组合测量。

8. 标准差有几种表示形式？如何计算？分别说明它们的含义。

答：标准偏差简称标准差，有标准差 σ 、标准差的估计值 σ_s 及算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 。

标准差的计算公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty)$$

式中 δ_i 为测得值与被测量的真值之差。

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

标准差的估计值 σ_s 的计算公式

式中 v_i 为残余误差，是测得值与算术平均值之差，该式又称为贝塞尔公式。

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}$$

算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 的计算公式

由于随机误差的存在，等精度测量列中各个测得值一般皆不相同，它们围绕着该测量列的算术平均值有

一定的分散，此分散度说明了测量列中单次测得值的不可靠性，标准差 σ 是表征同一被测量的n次测量的测得值分散性的参数，可作为测量列中单次测量不可靠性的评定标准。

而被测量的真值为未知，故不能求得标准差 σ ，在有限次测量情况下，可用残余误差代替真误差，从而得到标准差的估计值 σ_s ，标准差的估计值 σ_s 含义同标准差 σ ，也是作为测量列中单次测量不可靠性的评定标准。

若在相同条件下对被测量进行m组的“多次重复测量”，每一组测量都有一个算术平均值，由于随机误差的存在，各组所得的算术平均值也不相同，它们围绕着被测量的真值有一定分散，此分散说明了算术平均值的不可靠性，算术平均值的标准差 σ_x 则是表征同一被测量的各个独立测量列算术平均值分散性的参数，可作为算术平均值不可靠性的评定标准。

9. 什么是测量不确定度？有哪几种评定方法？

答：测量不确定度定义为表征合理赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数。测量不确定度意味着对测量结果的可靠性和有效性的怀疑程度或不能

肯定的程度。

测量不确定度按其评定方法可分为A类评定和B类评定。

10. 某节流元件（孔板）开孔直径 d_{20} 尺寸进行15次测量，测量数据如下（单位：mm）：

120. 42	120. 43	120. 40	120. 42	120.
43	120. 39	120. 30	120. 40	
	120. 43	120. 41	120. 43	120. 42
	39	120. 39	120. 40	120.

试检查其中有无粗大误差？并写出其测量结果。

解：按测量顺序，将所得结果列表。

测 量 序 顺	测得值 D_i/mm	按15个数据计 算		按14个数据 计算	
		$v_i = d_i - \bar{d}_{15}$	$v_i^2 \times 10^4$	$v'_i = d_i - \bar{d}_{14}$	$v'^2_i \times 10^4$
1	120.42	0.016	2.56	0.009	0.81
2	120.43	0.026	6.76	0.019	3.61
3	120.40	-0.004	0.16	-0.011	1.21
4	120.42	0.016	2.56	0.009	0.81
5	120.43	0.026	6.76	0.019	3.61
6	120.39	-0.014	1.96	-0.021	4.41

7	120.30	(-0.104	108.16	已 剔	已 剔
8	120.40) 0.16	除	除	
9	120.43	-0.004	6.76	-0.011	1.21
10	120.41	0.026	0.36	0.019	3.61
11	120.43	0.006	6.76	-0.001	0.01
12	120.42	0.026	2.56	0.019	3.61
13	120.39	0.016	1.96	0.009	0.81
14	120.39	-0.014	1.96	-0.021	4.41
15	120.40	-0.014	0.16	-0.021	4.41
		-0.004		-0.011	1.21
$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{15} d_i}{15} = 120.404$		$\sum_{i=1}^{15} v_i^2 = 0.01496$		$\sum_{i=1}^{14} v_i'^2 = 0.003374$	
$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{14} d_i}{14} = 120.411$		$\sigma = \sqrt{\frac{0.01496}{15-1}} = 0.033$		$\sigma' = \sqrt{\frac{0.003374}{14-1}} = 0.016$	

1、判断有无粗大误差

(1) 按 3σ 准则

从表中数据可知, 第 7 个测得值可疑。

$$|v_7| = 0.104; \quad 3\sigma = 3 \times 0.033 = 0.099$$

$$|v_7| > 3\sigma$$

故可判断 $d_7=120.30\text{mm}$ 含有粗大误差, 应予剔除。剔

除后按 14 个数据计算 (见表中右方)。

$$3\sigma' = 3 \times 0.016 = 0.048$$

所有 14 个 $|v_i|$ 值均小于 $3\sigma'$, 故已无需剔除的坏值。

(2) 按肖维勒准则

以 $n=15$ 查肖维勒准则中的 Z_c 值(见教材表 1-3), 得 $Z_c=2.13$ 。

$$Z_c \sigma = 2.13 \times 0.033 = 0.07 < |v_7|$$

故 d_7 应剔除, 再按 $n=14$ 查表 1-3 得 $Z_c=2.10$ 。

$$Z_c \sigma' = 2.10 \times 0.016 = 0.034$$

所有 $|v_i|$ 值均小于 $Z_c \sigma'$, 故已无坏值。

(3) 按格拉布斯准则

以 $n=15$ 取置信概率 $P_a=0.99$, 查格拉布斯准则中的 G 值 (见传感器原理及工程应用教材表 1-4), 得 $G=2.70$ 。

$$G \sigma = 2.7 \times 0.033 = 0.09 < |v_7|$$

故 d_7 应剔除, 再按 $n=14$ 取置信概率 $P_a=0.99$, 查表 1-4 得 $G=2.66$ 。

$$G \sigma' = 2.66 \times 0.016 = 0.04$$

所有 $|v_i|$ 值均小于 $G \sigma'$, 故已无坏值。

2、测量结果

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.016}{\sqrt{14}} = 0.0043$$

故最后测量结果可表示为

$$\bar{x} \pm 3\sigma' = 120.41 \pm 0.0043 = 120.41 \pm 0.013 \text{ mm}$$

$P_a = 99.73\%$

11. 对光速进行测量，得到四组测量结果如下：

第一组	$C_1 = 2.98000 \times 10^8 \text{ m/s}$
	$\sigma_{\bar{x}_1} = 0.01000 \times 10^8 \text{ m/s}$
第二组	$C_2 = 2.98500 \times 10^8 \text{ m/s}$
	$\sigma_{\bar{x}_2} = 0.01000 \times 10^8 \text{ m/s}$
第三组	$C_3 = 2.99990 \times 10^8 \text{ m/s}$
	$\sigma_{\bar{x}_3} = 0.00200 \times 10^8 \text{ m/s}$
第四组	$C_4 = 2.99930 \times 10^8 \text{ m/s}$
	$\sigma_{\bar{x}_4} = 0.00100 \times 10^8 \text{ m/s}$

求光速的加权算术平均值及其标准差。

解：其权为

$$p_1: p_2: p_3: p_4 = \frac{1}{\sigma_{\bar{x}_1}^2} : \frac{1}{\sigma_{\bar{x}_2}^2} : \frac{1}{\sigma_{\bar{x}_3}^2} : \frac{1}{\sigma_{\bar{x}_4}^2} = 1:1:25:100$$

故加权算术平均值为

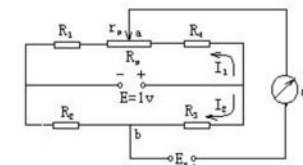
$$\bar{x}_{\bar{p}} = \frac{(2.98000 \times 1 + 2.98500 \times 1 + 2.99990 \times 25 + 2.99930 \times 100) \times 10^8}{1 + 1 + 25 + 100} = 2.99915 \times 10^8 \text{ m/s}$$

加权算术平均值的标准差

$$\sigma_{\bar{x}_{\bar{p}}} = \sqrt{\frac{1 \times (2.98000 - 2.99915)^2 + 1 \times (2.98500 - 2.99915)^2 + 25 \times (2.99990 - 2.99915)^2 + 100 \times (2.99930 - 2.99915)^2}{(4-1)(1+1+25+100)}} = 0.00127 \times 10^8 \text{ m/s}$$

12. 用位差计测量电势信号 E_x (如图所示)，已知：

$I_1 = 4 \text{ mA}$, $I_2 = 2 \text{ mA}$, $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, $R_p = 10 \Omega$, $r_p = 5 \Omega$, 电路中电阻 R_1 、 R_2 、 r_p 的定值系统误差分别为 $\Delta R_1 = +0.01 \Omega$, $\Delta R_2 = +0.01 \Omega$, $\Delta r_p = +0.005 \Omega$ 。设检流计 G 、上支路电流 I_1 和下支路电流 I_2 的误差忽略不计；求消除系统误差后的 E_x 的大小。



测量电势 E_x 的电位差计原理线路图

解：根据电位差计的测量原理，当电位差计的输出电势 U_{ab} 与被测电势 E_x 等时，系统平衡，检流计指零，此时有

$$I_1(R_1 + r_p) - I_2 R_2 = E_x$$

当 $r_p = 5 \Omega$ 系统平衡时，被测电势

$$E_x = I_1(R_1 + r_p) - I_2 R_2 = 4 \times (5 + 5) - 2 \times 10 = 20 \text{ mV}$$

由于 R_1 、 R_2 、 r_p (R_p 的一部分) 存在误差，所以在检测的过程中也将随之产生系统误差，根据题意系统误差是用绝对误差表示，因此测量 E_x 时引起的系统误差

为

$$\begin{aligned}\Delta E_x &= \frac{\partial E_x}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial E_x}{\partial r_p} \Delta r_p + \frac{\partial E_x}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial E_x}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial E_x}{\partial I_2} \Delta I_2 \\ &= I_1 \Delta R_1 + I_1 \Delta r_p + R_1 \Delta I_1 + r_p \Delta I_1 - I_2 \Delta R_2 - R_2 \Delta I_2 \\ &= 4 \times 0.01 + 4 \times 0.005 - 2 \times 0.01 = 0.04 \text{mv}\end{aligned}$$

计算结果说明, R_1 、 R_2 、 r_p 的系统误差对被测电势

E_x 的综合影响使得 E_x 值 20mv 大于实际值 E'_x , 故消除系统误差的影响后, 被测电势应为

$$E'_x = 20 - 0.04 = 19.96 \text{mv}$$

13. 测量某电路的电流 $I=22.5$, 电压 $U=12.6V$, 标准差分别为 $\sigma_I=0.5 \text{mA}$, $\sigma_U=0.1 \text{V}$, 求所耗功率及其标准差。

解. 功率 $P_0=UI=22.5 \times 12.6=283.5 \text{mw}$

$$\text{标准差 } \sigma = \sqrt{U^2 \sigma_I^2 + I^2 \sigma_U^2} = \sqrt{12.6^2 \times 0.5^2 + 22.5^2 \times 0.1^2} = 6.69 \text{mw}$$

14. 交流电路的电抗数值方程为 $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$,

当角频率 $\omega_1=5 \text{Hz}$, 测得电抗 x_1 为 0.8Ω ;

$\omega_2= \text{Hz}$, 测得电抗 x_2 为 0.2Ω ;

$\omega_3= \text{Hz}$, 测得电抗 x_3 为 -0.3Ω ,

试用最小二乘法求 L 、 C 的值。

解: 令 $C' = \frac{1}{C}$

误差方程:

$$\left. \begin{aligned} 0.8 - (5L - \frac{C'}{5}) &= v_1 \\ 0.2 - (2L - \frac{C'}{2}) &= v_2 \\ -0.3 - (L - C') &= v_3 \end{aligned} \right\}$$

正规方程:

$$\left. \begin{aligned} 30L - 3C' &= 4.1 \\ -3L + 1.29C' &= 0.04 \end{aligned} \right\}$$

解得 $L=0.182 \text{H}$

$$C'=0.455$$

由此 $L=0.182 \text{H}$

$$C=2.2 \text{F}$$

15. 用 x 光机检查镁合金铸件内部缺陷时, 为了获得最佳的灵敏度, 透视电压 y 应随透视线的厚度 x 而改变, 经实验获得下列一组数据 (如下表所示), 试求透视电压 y 随着厚度 x 变化的经验公式。

X/ mm	12	13	14	15	16	18	20	22	24	26
Y/k	52.	55.	58.	61.	65.	70.	75.	80.	85.	91.
v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

解: 作 x , y 散点图, 属一元线性回归。回归方程为:

$$\hat{y} = b_0 + bx$$

方法一:

用平均值法求取经验公式的 b_0 和 b 时, 将 n 对测量数据 (x_i, y_i) 分别代入 $\hat{y} = b_0 + bx$ 式, 并将此测量方程分成两组, 即

$$\begin{cases} 52.0 = (b_0 + 12b) \\ 55.0 = (b_0 + 13b) \\ 58.0 = (b_0 + 14b) \\ 61.0 = (b_0 + 15b) \\ 65.0 = (b_0 + 16b) \end{cases}$$

$$291.0 = 5b_0 + 70b$$

$$\begin{cases} 70.0 = (b_0 + 18b) \\ 75.0 = (b_0 + 20b) \\ 80.0 = (b_0 + 22b) \\ 85.0 = (b_0 + 24b) \\ 91.0 = (b_0 + 26b) \end{cases}$$

$$401.0 = 5b_0 + 110b$$

将两组方程各自相加，得两个方程式后，即可解出 b_0 和 b 。

$$\begin{cases} 291.0 = 5b_0 + 70b \\ 401.0 = 5b_0 + 110b \\ b_0 = 19.7 \\ b = 2.75 \end{cases}$$

故所求的经验公式为

$$\hat{y} = 19.7 + 2.75x$$

方法二：

应用最小二乘法求取经验公式的 b_0 和 b 时，应使各测量数据点与回归直线的偏差平方和为最小，见教材图 1-10。

误差方程组为

$$\left. \begin{array}{l} y_1 - \hat{y}_1 = 52.0 - (b_0 + 12b) = v_1 \\ y_2 - \hat{y}_2 = 55.0 - (b_0 + 13b) = v_2 \\ y_3 - \hat{y}_3 = 58.0 - (b_0 + 14b) = v_2 \\ y_4 - \hat{y}_4 = 61.0 - (b_0 + 15b) = v_2 \\ y_5 - \hat{y}_5 = 65.0 - (b_0 + 16b) = v_2 \\ y_6 - \hat{y}_6 = 70.0 - (b_0 + 18b) = v_2 \\ y_7 - \hat{y}_7 = 75.0 - (b_0 + 20b) = v_2 \\ y_8 - \hat{y}_8 = 80.0 - (b_0 + 22b) = v_2 \\ y_9 - \hat{y}_9 = 85.0 - (b_0 + 24b) = v_2 \\ y_{10} - \hat{y}_{10} = 91.0 - (b_0 + 26b) = v_n \end{array} \right\}$$

(1-46)

正规方程：

$$\begin{cases} 3450b + 180b_0 = 13032 \\ 180 + 10b_0 = 692 \end{cases}$$

$$\begin{cases} b = 2.74 \\ b_0 = 19.8 \end{cases}$$

得 所求的经验公式为 $\hat{y} = 19.8 + 2.74x$

第二章 传感器概述

2-1 什么叫传感器？它由哪几部分组成？它们的作用及相互关系如何？

答：传感器是能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。

通常传感器有敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部份；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部份。由于传感器输出信号一般都很微弱，需要有信号调理与转换电路，进行放大、运算调制等，此外信号调理转换电路以及传感器的工作必须要有辅助的电源，因此信号调理转换电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部份。

2-2 什么是传感器的静态特性？它有哪些性能指标？分别说明这些性能指标的含义。

答：传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态(被测量是一个不随时间变化,或随时间变化缓慢的量)时的输出输入关系。

传感器的静态特性可以用一组性能指标来描述,有灵敏度、迟滞、线性度、重复性和漂移等。

①灵敏度是指传感器输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的相应输入量增量 Δx 之比。用 S 表示灵敏度,即 $S=\Delta y/\Delta x$

②传感器的线性度是指在全量程范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值 ΔL_{max} 与满量程输出值 y_{fs} 之比。线性度也称为非线性误差,用 r_L 表示,

$$r_L = \pm \frac{\Delta L_{max}}{Y_{fs}} \times 100\% \quad \text{。}$$

③迟滞是指传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)变化期间其输入输出特性曲线不重合的现象。即传感器在全量程范围内最大的迟滞差值 ΔH_{max} 与满量程输出值 y_{fs} 之比称为迟滞误差,用 r_H 表示,即:

$$r_H = \frac{\Delta H_{max}}{Y_{fs}} \times 100\%$$

④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。重

复性误差属于随机误差,常用均方根误差计算,也可用正反行程中最大重复差值 ΔR_{max} 计算,即:

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{fs}} \times 100\%$$

2-3 什么是传感器的动态特性?有哪几种分析方法?它们各有哪些性能指标?

答:传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。

主要的分析方法有:瞬态响应法(又称时域分析法),相应的性能指标有时间常数 τ 、延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、超调量 σ 和衰减比 d 等;频率响应法,相应的性能指标有通频带 $\omega_{0.707}$ 、工作频带 $\omega_{0.95}$ 、时间常数 τ 、固有频率 ω_n 、跟随角 $\varphi_{0.70}$ 等。

2-4 某压力传感器测试数据如下表所示,计算非线性误差、迟滞和重复性误差。

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	-2.73	-2.71	-2.71	-2.68	-2.68	-2.69
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

答：

表 2-1 最小二乘法各项数据

压 力 ($\times 10^5$ Pa) x	平均值 (V)		迟 滞 值 ΔH (V)	正反 行程 平均 值 \bar{y}_i (V)	子样方差 平方根		最小二乘直 线 $y = -2.77 + 171.$ $5x$	
	正 行 程	反 行 程			正 行 程 S_{jI}	反 行 程 S_{jD}	理论 值 y (V)	非线 性 误 差 ΔL (V)
0	-2.70 6	-2.69 3	-0.013 3	-2.7	0.024 9	0.0153	-2.77	0.07
0.0 2	0.603	0.677	-0.073 3	0.64	0.040 4	0.0151	0.66	-0.02
0.0 4	3.993	4.087	-0.093 3	4.04	0.035 1	0.0252	4.09	-0.05
0.0 6	7.426	7.513	-0.0086 7	7.47	0.025 2	0.0208	7.52	-0.05
0.0 8	10.90 3	10.95 7	-0.053 3	10.9 3	0.032 1	0.0305 5	10.95	-0.02
0.1 0	14.45	14.45	0	14.4 5	0.026 4	0.0264	14.38	0.07

1. 先求出一些基本数值

1)求出各个校准点正, 反行程校准数据的算术平均值和迟滞值, 列于表 2-1 中。

$$\text{算术平均值} \quad \bar{y}_j = \frac{1}{2}(\bar{y}_{jI} + \bar{y}_{jD})$$

$$\text{迟滞值} \quad \Delta H = |\bar{y}_{jI} - \bar{y}_{jD}|$$

$$\text{上两式中, } \bar{y}_{jI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{jiI}, \quad \bar{y}_{jD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{jiD}, \quad I \text{ 表示正行程,}$$

D 表示反行程, n 为重复测量序数, 这里 n=3, i=1、2、3。

2)由子样方差公式知

$$S_{ji}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiI} - \bar{y}_j)^2$$

$$S_{jD}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiD} - \bar{y}_j)^2$$

上式中的 n=3, j 分别为 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5($\times 10^5$ Pa) 压力。计算结果列于表 2-1 中。

2. 按最小二乘法计算各性能指标: 截距、斜率、方程式、理论值和非线性误差, 由已知数据可以求出:

$$\sum_{i=1}^6 x_i = 0.3, \quad \bar{x} = 0.05, \quad \sum_{i=1}^6 y_i = 34.83, \quad \bar{y} = 5.805,$$

$$\sum_{i=1}^6 x_i y_i = 2.942, \quad \sum_{i=1}^6 x_i^2 = 2.2 \times 10^{-2}, \quad \sum_{i=1}^6 y_i^2 = 408.0895,$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^6 x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^6 x_i)^2, \quad l_{xy} = \sum_{i=1}^6 x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^6 x_i \sum_{i=1}^6 y_i$$

则 $b_0 = \frac{I_{xy}}{I_{xx}} = 171.5$, $b = \bar{y} - b_0 \bar{x} = -2.77$

方程式为

$$y = -2.77 + 171.5x$$

依此方程计算出的理论值，系统误差和非线性误差都列于表 2-1 中。

①理论满量程输出

$$y_{FS} = |(x_m - x_i)k| = 17.15(V)$$

②重复性取置信系数 $\lambda = 3$, $S_{max} = 0.0404$

$$\nu_R = \frac{\lambda \cdot s}{y_{FS}} \times 100\% = 0.707\%$$

③线性度

$$\nu_L = \frac{\Delta L_{max}}{y_{FS}} \times 100\% = 0.408\%$$

④迟滞误差

$$\nu_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm 0.272\%$$

2-5 当被测介质温度为 t_1 , 测温传感器示值温度为 t_2 时, 有下列方程式成立:

$$t_1 = t_2 + \tau_0 \frac{dt_2}{d\tau}$$

当被测介质温度从 25°C 突然变化到 300°C , 测温传感器的时间常数 $\tau_0=120\text{s}$, 试确定经过 350s 后的动态

误差。

答: 由题可知该测温传感器为典型的一阶系统,

则传感器的输出 $y(t)$ 与时间满足如下关系: $y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ 。

把 $\tau_0=120\text{s}$ 及 $t=350\text{s}$ 代入上式得 :

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - e^{-\frac{350}{120}} = 0.945$$

可知经过 350s 后, 输出 $y(t)$ 达到稳态值的 94.5% 。则该传感器测量温度经过 350s 后的动态误差为:

$$\Delta = (300 - 25) \times (1 - 0.945) = 14.88^{\circ}\text{C}$$

2-6 已知某传感器属于一阶环节, 现用于测量 100Hz 的正弦信号。如幅值误差限制在 5% 以内, 则时间常数 τ 应取多少? 若用该传感器测量 50Hz 的正弦信号, 问此时的幅值误差和相位差为多少?

答: ①若系统响应的幅值百分误差在 5% 范围内, 即相当于幅值比 $A(\omega)$ 应大于 0.95 , 根据一阶系统的幅频特性, 可计算的到 τ 的大小。

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} = 0.95$$

$$\therefore \tau = 0.000523$$

②在上面的时间常数及 50Hz 的正弦信号输入代入幅频特性方程可知振幅误差:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(50\times 0.0005)^2}} \approx 0.986$$

振幅误差为 $1 - 0.986 = 1.4\%$ 。

相位差为: $\Phi(\omega) = -\arctg(\omega\tau) = -9.33^\circ$

2-7 有一个二阶系统的力传感器。已知传感器的固有频率为 800Hz, 阻尼比 $\xi=0.14$, 问使用该传感器测试 400Hz 的正弦力时, 其幅值比 $A(\omega)$ 和相位角 $\varphi(\omega)$ 各为多少? 若该传感器的阻尼比改为 $\xi=0.7$, 问 $A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 又将如何变化?

答: 讨论传感器动态特性时, 常用无量纲幅值比 $A(\omega)$ 。当用 $f_0=800\text{Hz}$ 、 $\xi=0.14$ 的传感器来测量 $f=400\text{Hz}$ 的信号时, $A(\omega)$ 为

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2]^2 + [2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2]^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{[1-\left(\frac{400}{800}\right)^2]^2 + 4\times 0.14^2 \times \left(\frac{400}{800}\right)^2}} = 1.31 \\ \varphi(\omega) &= -\tg^{-1} \frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = -\tg^{-1} \frac{2\times 0.14 \times \left(\frac{400}{800}\right)}{1-\left(\frac{400}{800}\right)^2} = -10.57^\circ \end{aligned}$$

同理, 若该传感器的阻尼比改为 $\xi=0.7$, 为

$$A(\omega) = 0.97$$

$$\varphi(\omega) = -43^\circ$$

*2-8 已知某二阶系统传感器的固有频率为 10kHz, 阻尼比 $\xi=0.5$, 若要求传感器输出幅值误差小于 3%, 则传感器的工作范围应为多少?

已知 $\omega_n = 2\pi \cdot 10\text{kHz}$, $\xi=0.5$, $|1-A(\omega)| < 3\%$ 。

求: 传感器的工作频率范围。

解:

$$\text{二阶传感器的幅频特性为: } A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}.$$

当 $\omega=0$ 时, $A(\omega)=1$, 无幅值误差。当 $\omega>0$ 时, $A(\omega)$ 一般不等于 1, 即出现幅值误差。

若要求传感器的幅值误差不大于 3%, 应满足

$$0.97 \leq A(\omega) \leq 1.03$$

$$\text{解方程 } A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} = 0.97, \text{ 得 } \omega_1 = 1.03\omega_n;$$

$$\text{解方程 } A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} = 1.03, \text{ 得 } \omega_2 = 0.25\omega_n,$$

$$\omega_3 = 0.97\omega_n$$

由于 $\xi=0.5$, 根据二阶传感器的特性曲线可知, 上面三个解确定了两个频段, 即 $0 \sim \omega_2$ 和 $\omega_3 \sim \omega_1$ 。前者在特征

曲线的谐振峰左侧，后者在特征曲线的谐振峰右侧。对于后者，尽管在该频段内也有幅值误差不大于3%，但是该频段的相频特性很差而通常不被采用。所以，只有 $0 \sim \omega_2$ 频段为有用频段。由 $\omega_2 = 0.25\omega_n = 0.25 \times 2\pi \cdot 10\text{kHz}$ 可得 $f = 2.5\text{kHz}$ ，即工作频率范围为 $0 \sim 2.5\text{kHz}$ 。

第三章 应变式传感器

1. 什么叫应变效应？利用应变效应解释金属电阻应变片的工作原理。

答：在外力作用下，导体或半导体材料产生机械变形，从而引起材料电阻值发生相应变化的现象，称

为应变效应。其表达式为 $\frac{dR}{R} = K \cdot \varepsilon$ ，式中K为材料的应变灵敏系数，当应变材料为金属或合金时，在弹性极限内K为常数。金属电阻应变片的电阻相对变

化量 $\frac{dR}{R}$ 与金属材料的轴向应变 ε 成正比，因此，利用电阻应变片，可以将被测物体的应变 ε 转换成与之成正比关系的电阻相对变化量，这就是金属电阻应变片的工作原理。

2. 试述应变片温度误差的概念，产生原因和补偿办法。

答：由于测量现场环境温度偏离应变片标定温度而

给测量带来的附加误差，称为应变片温度误差。

产生应变片温度误差的主要原因有：(1)由于电阻丝温度系数的存在，当温度改变时，应变片的标称电阻值发生变化。(2)当试件与与电阻丝材料的线膨胀系数不同时，由于温度的变化而引起的附加变形，使应变片产生附加电阻。

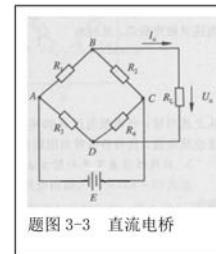
电阻应变片的温度补偿方法有线路补偿法和应变片自补偿法两大类。电桥补偿法是最常用且效果较好的线路补偿法，应变片自补偿法是采用温度自补偿应变片或双金属线栅应变片来代替一般应变片，使之兼顾温度补偿作用。

3. 什么是直流电桥？若按桥臂工作方式不同，可分为哪几种？各自的输出电压如何计算？

答：如题图3-3所示电路为电桥电路。若电桥电路的工作电源E为直流电源，则该电桥称为直流电桥。

按应变所在电桥不同的工作桥臂，电桥可分为：

(1)单臂电桥， R_1 为电阻应变片， R_2 、



题图3-3 直流电桥

R_3 、 R_4 为电桥固定电阻。其输出压为 $U_o = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$

(2) 差动半桥电路, R_1 、 R_2 为两个所受应变方向相反的应变片, R_3 、 R_4 为电桥固定电阻。其输出电压为:

$$U_o = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

(3) 差动全桥电路, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均为电阻应变片, 且相邻两桥臂应变片所受应变方向相反。其输出电压为:

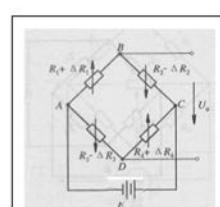
$$U_o = E \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

4. 拟在等截面的悬臂梁上粘贴四个完全相同的电阻应变片组成差动全桥电路, 试问:

(1) 四个应变片应怎样粘贴在悬臂梁上?

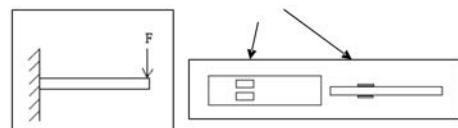
(2) 画出相应的电桥电路图。

答: ①如题图 3-4 (a) 所示等截面悬梁臂, 在外力 F



作用下, 悬梁臂产生变形, 梁的上表面受到拉应变, 而梁的下表面受压应变。当选用四个完全相同的电阻应变片组成差动全桥电路, 则应

变片如题图 3-4 (b) 所示粘贴。



题图 3-4 (a) 等截面悬臂梁 (b) 应变片粘贴方式

(c) 测量电路

②电阻应变片所构成的差动全桥电路接线如图 3-4 (c) 所示, R_1 、 R_4 所受应变方向相同, R_2 、 R_3 所受应变方向相同, 但与 R_1 、 R_4 所受应变方向相反。

5. 图示为一直流应变电桥。图中 $E=4V$,

$$R_1=R_2=R_3=R_4=120\Omega$$

, 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 $\Delta R_1 = 1.2\Omega$ 时, 电桥输出电压 $U_o = ?$

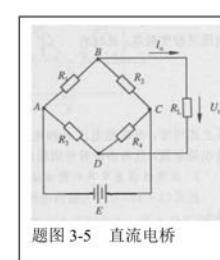
(2) R_1 、 R_2 都是应变片, 且批号相同, 感应应变的极性和大小都相同, 其余为外接电阻, 电桥输出电压 $U_o = ?$

(3) 题 (2) 中, 如果 R_2 与 R_1 感受应变的极性相反, 且 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = 1.2\Omega$, 电桥输出电压 $U_o = ?$

答: ①如题 3-5 图所示

$$U_o = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{4}{4} \times \frac{1.2\Omega}{120\Omega} = 0.01$$

②由于 R_1 、 R_2 均为应变片, 且批号相同, 所受应变大小和方向均相同, 则 $R_1 = R_2 = R$ $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R$



题图 3-5 直流电桥

$$U_0 = \left(\frac{R_2 + \Delta R_2}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E$$

$$= \left(\frac{R + \Delta R}{2(R + \Delta R)} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E = \left(\frac{1}{2} - \frac{120}{240} \right) E = 0$$

③根据题意，设

$$R_1 = R + \Delta R_1 \quad R_2 = R - \Delta R_2$$

$$U_0 = \left(\frac{R_2 - \Delta R_2}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 - \Delta R_2)} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E$$

$$= \frac{R_2 - \Delta R_2}{R_1 - R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\text{则 } = -\frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_2}{R} = -\frac{4}{2} \times \frac{1.2}{120} = 0.02$$

6. 图示为等强度梁测力系统， R_1 为电阻应变片，应变片灵敏系数 $K=2.05$ ，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 $\varepsilon=800\mu\text{m}/\text{m}$ ，求：

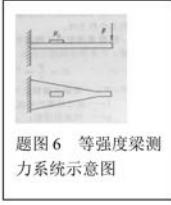
(1) 应变片电阻变化量 ΔR_1 和电阻

相对变化量 $\Delta R_1 / R_1$ 。

(2) 将电阻应变片 R_1 置于单臂测量电桥，电桥电源电压为直流 3V，求电桥输出电压及电桥非线性误差。

(3) 若要减小非线性误差，应采取何种措施？并分析其电桥输出电压及非线性误差大小。

解：①根据应变效应，有



题图 6 等强度梁测力系统示意图

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = K \cdot \varepsilon$$

$$\text{已知 } K = 2.05, \quad \varepsilon = 800 \mu\text{m}/\text{m}, \quad R_1 = 120\Omega$$

代入公式则

$$\Delta R_1 = K \cdot E \cdot R_1$$

$$= 2.05 \times 800 \times 10^{-6} \times 120 = 0.20\Omega$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{0.20}{120} = 0.17\%$$

②若将电阻应变片置于单臂测量桥路中

$$\text{则 } U_0 = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{3}{4} \times 0.0017 = 1.25mV$$

$$\gamma_f = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + \frac{\Delta R_1}{2R_1}} = 0.085$$

非线性误差 %

③若要减小非线性误差，可采用半桥差动电路，且选择

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\Omega \quad \Delta R_1 = \Delta R_2 = 0.20\Omega$$

R_1 和 R_2 所受应变大小相等，应变方向相反。

此时

$$U_0 = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = 2.50mV$$

$$\gamma_f = 0$$

7. 在题 6 条件下，如果试件材质为合金钢，线膨胀系数 $\beta_g = 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，电阻应变片敏感栅材质为康铜，其电阻温度系数 $\alpha = 15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，线膨胀系数 $\beta_s = 14.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。当传

感器的环境温度从 10°C 变化到 50°C 时，引起附加电阻相对变化量 $(\Delta R/R)$ 为多少？折合成附加应变 ε 为多少？

解：在题 3-6 的条件下，合金钢线膨胀系数为 $g=11\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。则 $\ell_g = \ell_0(1+\beta_g\Delta t) = \ell_0[1+11\times10^{-6}\times(50-10)]$ 应变片敏感栅材质为康铜。电阻温度系数为 $\beta_s=14.9\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。则 $\ell_s = \ell_0(1+\beta_s\Delta t) = \ell_0[1+14.9\times10^{-6}\times(50-10)]$ ，当两者粘贴在一起时，

电阻丝产生附加电阻变化 ΔR_β 为：

$$\begin{aligned}\Delta R_\beta &= K_0 R_0 (\beta_g - \beta_s) \cdot \Delta t \\ &= 2.05 \times 120 \times [(11 \times 10^{-6} - 14.9 \times 10^{-6}) \times (50 - 10)] \\ &= -0.03838 \Omega\end{aligned}$$

当测量的环境温度从 10°C 变化到 50°C 时，金属电阻丝自身温度系数 $\alpha=15\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。则：

$$\Delta R_\alpha = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t = 120 \times 15 \times 10^{-6} \times (50 - 10) = 0.07200 \Omega$$

总附加电阻相对变化量为：

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{\Delta R_\alpha + \Delta R_\beta}{R_0} = \frac{0.07200 - 0.03838}{120} = 0.02802 \%$$

折合附加应变为：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_t}{K} = \frac{0.0002802}{2.05} = 0.0001367 \text{ m/m} = 136.7 \mu\text{m/m}$$

3-8 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，外径为 20mm，内径为 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 $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。要求：

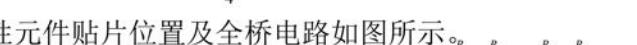
- ①绘出弹性元件贴片位置及全桥电路；
- ②计算传感器在满量程时各应变片的电阻；
- ③当桥路的供电电压为 10V 时，计算电桥负载开路时的输出。

解：

已知：F=10kN，外径 D=20mm，内径 d=18mm，R=120Ω，

$$K=2.0, \mu=0.3, E=2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}, U_i=10V$$

$$\text{圆筒的横截面积为 } S = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = 59.7 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$$



弹性元件贴片位置及全桥电路如图所示。

应变片 1、2、3、4 感受轴向应变： $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_x$

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，

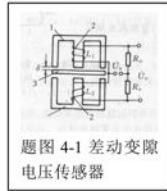
$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = K\varepsilon_x R = K \frac{F}{SE} R = 2.0 \times \frac{10 \text{ kN}}{59.7 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \times 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}} \times 120 \Omega = 0.191 \Omega$$

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

电桥的输出为：

$$\begin{aligned}U_o &= U_i \left[\frac{(R_1 + \Delta R_1) + (R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_3 + \Delta R_3) + (R_5 + \Delta R_5) + (R_7 + \Delta R_7)} - \frac{(R_6 + \Delta R_6) + (R_8 + \Delta R_8)}{(R_6 + \Delta R_6) + (R_8 + \Delta R_8) + (R_2 + \Delta R_2) + (R_4 + \Delta R_4)} \right] \\ &= 10V \left(\frac{120.191 + 120.191}{120.191 + 120.191 + 119.943 + 119.943} - \frac{119.943 + 119.943}{119.943 + 119.943 + 120.191 + 120.191} \right) = 10mV\end{aligned}$$

1. 说明差动变隙电压传感器的主要组成，工作原理和基本特性。



题图 4-1 差动变隙电压传感器

答：差动变隙电压传感器结构如下图所示。主要由铁芯，衔铁，线圈三部分组成。传感器由两个完全相同的电压线圈合用一个衔铁和相应磁路。工作时，衔铁与被测件相连，当被测体上下移动时，带动衔铁也以相同的位移上下移动，使两个磁回路中磁阻发生大小相等方向相反的变化。导致一个线圈的电感量增加，另一个线圈的电感量减小，形成差动形式。其输出特性为：

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 2L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$

若忽略上式中的高次项，可得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

为了使输出特性能得到有效改善，构成差动的两个变隙式电感传感器在结构尺寸、材料、电气参数等方面均应完全一致。

2. 变隙式电感传感器的输入特性与哪些因素有关?

怎样改善其非线性？怎样提高其灵敏度？

答：变隙式电压传感器的输出特性为：

$$\Delta L = L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right]$$

其输出特性与初始电压量 L_0 ，气隙厚度 δ_0 ，气隙变化量 $\Delta\delta$ 有关。当选定铁芯，衔铁材料及尺寸，确定线圈的匝数及电气特性，则 $\Delta L = f(\Delta\delta)$ 。

从传感器的输出特性可以看出, ΔL 与 $\Delta \delta$ 成非线性关系, 为改善其非线性, 通常采用差动变隙式电感传感器, 如题图 4—1 所示, 输出特性表达式为:

$$\Delta L = 2L_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$

将上式与单线圈变隙式传感器相比,若忽略非线性项,其灵敏度提高一倍,若保留一项非线性项,则单线圈

式 $\frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2$, 而差动式 $\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^3$ 由于 $\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \ll 1$, 因此, 差动式的线性度得到明显改善。

3. 差动变压器式传感器有几种结构形式？各有什么特点？

答：差动变压器式传感器有变隙式差动变压器式和螺线管式差动变压器式传感器二种结构形式。变隙式差

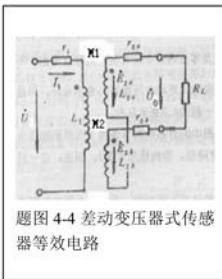
动变压器传感器的输出特性为 $U_0 = -\frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{U_i}{\delta_0} \cdot \Delta\delta$ ，输出电压与 $\frac{W_2}{W_1}$ 比值成正比，然而 $\frac{W_2}{W_1}$ 比值与变压器的体积与

零点残余电压有关。应综合考虑： U_0 与 δ_0 成反比关系，因此要求 δ_0 越小越好，但较小的 δ_0 使测量范围受到约束，通常在0.5mm左右。

螺线管式差动变压器式传感器的输出特性是激励电压 U 和激磁频率 f 的函数，理论上，灵敏度 κ 与 U 、 f 成正比关系，而实际上由于传感器结构的不对称、铁损、磁漏等因素影响， κ 与 f 不成正比关系，一般在400Hz~10KHz范围内 κ 有较大的稳定值， κ 与 U 不论在理论上和实际上都保持较好的线性关系。一般差动变压器的功率控制在1瓦左右，因此 U 取值在3~8伏范围之内。为保证传感器有较好的线性度，其测量范围为线圈骨架长度的 $\frac{1}{10}$ 到 $\frac{1}{4}$ 。因此可以测量大位移范围。

4. 差动变压器式传感器的等效电路包括哪些元件和参数？各自的含义是什么？

答：差动变压器式传感器在忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容的理想条件下，其等效电路如题图4—4所示。其中 U_1 为初级线圈 L_{1a} 的



题图 4-4 差动变压器式传感器等效电路

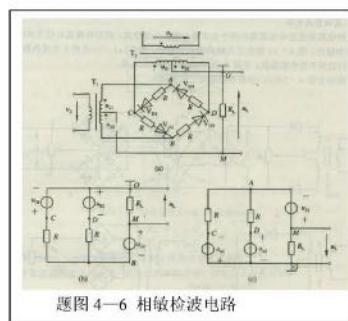
激励电压， r_1 为初级线圈直流电阻， L_1 为初级线圈交流电感， r_{2a} ， r_{2b} 为两次级线圈直流电阻， L_{2a} ， L_{2b} 为两次级线圈的交流电感。初级线圈与两次级线圈的互感系数为 M_1 ， M_2 ，线圈 W_{2a} 的感应电势为 E_{2a} ，线圈 W_{2b} 的感应电势为 E_{2b} 。

5. 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？

答：差动电压器在零位移时的输出电压称为零点残余电压。对零点残余电压进行频谱分析，发现其频谱主要由基波和三次谐波组成，基波产生的主要原因是传感器两个次级绕组的电气参数与几何尺寸不对称，三次谐波产生的原因主要是磁性材料磁化曲线的非线性（磁饱和，磁滞）所造成的。消除或减小零点残余电压的主要方法有：①尽可能保证传感器几何尺寸，线圈电气参数和磁路的相互对称。②传感器设置良好的磁屏蔽，必要时再设置静电屏蔽。③将传感器磁回路工作区域设计在铁芯曲线的线性段。④采用外电路补偿。⑤配用相敏检波测量电路。

6. 简述相敏检波电路的工作原理，保证其可靠工作的条件是什么？

答：相敏检波电路如题图4—6（a）所示。图中 V_{D1} ， V_{D2} ， V_{D3} ， V_{D4} 为四个性能相同的二极管。以同



题图 4—6 相敏检波电路

一方向串联接成一个闭合回路，组成环形电桥。输入信号 U_2 （差动变压器式传感器输出的调谐波电压）通过变压器 T_1 加入环形电桥的一个对角线上，参考信号 U_s 通过变压器 T_2 加到环形电桥的另一个对角线上，为保证相敏检波电路可靠工作，要求 U_s 的幅值要远大于输入信号 U_2 的幅值，以便有效控制四个二极管的导通状态，且 U_s 和差动变压器式传感器激励电压 U_1 由同一振荡器供电。保证二者同频同相（或反相）。当 $\Delta x > 0$ 时， U_2 与 U_s 同频同相。 V_{D1} ， V_{D4} 截止， V_{D2} ， V_{D3} 导通，则可得题图4—6（b）所示等效电路。其输出电压表达

式为 $u_o = \frac{R_L \cdot u_1}{n_1(R+2R_L)}$ ，在 U_2 与 U_s 均为负半周时， V_{D2} 、 V_{D3} 截止， V_{D1} 、 V_{D4} 导通，则题图4—6（c）所示为等效电路，

其输出电压表达式亦为 $u_o = \frac{R_L \cdot u_1}{n_1(R+2R_L)}$ ，这说明只要位移 $\Delta x > 0$ ，不论 U_2 与 U_s 是正半周还是负半周，负载电阻 R_L 两端得到的电压始终为正。当 $\Delta x < 0$ 时，采用上述相同方

法可以得到输出电压 u_o 的表达式为 $u_o = -\frac{R_L \cdot u_2}{n_1(R+2R_L)}$ 。（ n_1 为变压器 T_1 的变比）。故题图4—6（a）所示相敏检波电路输出电压 u_o 的变化规律充分反映了被测位移量的变化规律，即电压数值反映了 Δx 大小，而 u_o 极性则反映了位移 Δx 的方向。

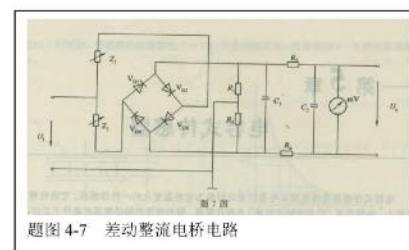
7. 已知一差动整流

电桥电路如题图

4—7 所示。电路由

差动电感传感器

Z_1 、 Z_2 及平衡电阻



题图 4—7 差动整流电桥电路

R_1 、 R_2 ($R_1=R_2$) 组成。桥路的一个对角接有交流电源 U_1 ，另一个对角线为输出端 U_o ，试分析该电路的工作原理。

解：题图4—7为差动整流电桥电路， Z_1 ， Z_2 为差动电感传感器， $R_1=R_2$ 为平衡电阻， \dot{U}_1 为交流电源， C_1 、 C_2 、 R_3 、 R_4 构成一 π 型滤波电路，输出电压为 \dot{U}_o 。

- ① 当被测输入量为零时，传感器 Z_1 与传感器 Z_2 相等，此时若 \dot{U}_i 为正半周，则 V_{D1} 、 V_{D3} 导通， V_{D2} 、 V_{D4} 截止，电流 I_1 流经 Z_1 ， V_{D3} 、 R_2 ，电流 I_2 流经 Z_2 ， V_{D1} ， R_1 ，如果四只二极管具有理想特性（导通时内阻为零，截止时内阻为无穷大），则 $\dot{U}_{R_1} = I_2 \cdot R_1$ ， $\dot{U}_{R_2} = I_1 \cdot R_2$ 。且如题图4—7所示 \dot{U}_{R_1} 与 \dot{U}_{R_2} 方向相反， $\dot{U}_0 = \dot{U}_{R_1} - \dot{U}_{R_2} = 0$ 。若 \dot{U}_i 为负半周，则 V_{D2} 、 V_{D4} 导通， V_{D1} 、 V_{D3} 截止，电流 I'_1 流经 R_1 ， V_{D2} ， Z_1 ，而电流 I'_2 流经 R_2 ， V_{D4} ， Z_2 ，此时 $\dot{U}_{R_1} = I'_1 R_1$ ， $\dot{U}_{R_2} = I'_2 R_2$ ，且如图所示 \dot{U}_{R_1} 与 \dot{U}_{R_2} 方向相反， $\dot{U}_0 = \dot{U}_{R_1} - \dot{U}_{R_2} = 0$ 。
- ② 当被测输入量不等于零，且 $Z_1 > Z_2$ ，若 \dot{U}_i 为正半周，此时有 $I_1 < I_2$ ， $\dot{U}_{R_1} = I_2 R_1 > \dot{U}_{R_2} = I_1 R_2$ ， $\dot{U}_0 = \dot{U}_{R_1} - \dot{U}_{R_2} > 0$ 。若 \dot{U}_i 为负半周，此时 $\dot{U}_{R_1} = -I_1 R_1$ ， $\dot{U}_{R_2} = -I_2 R_2$ ， $I_1 < I_2$ ，则 $\dot{U}_0 = \dot{U}_{R_1} - \dot{U}_{R_2} > 0$ ，即不论 \dot{U}_i 为正半周还是负半周， \dot{U}_0 输出电压始终为正。
- ③ 当被测输入量不等于零，且 $Z_1 < Z_2$ 时，采用相同的分析方法同理可得： $\dot{U}_0 = \dot{U}_{R_1} - \dot{U}_{R_2} < 0$ ，即不论 \dot{U}_i 为正半周还是负半周， \dot{U}_0 输出电压始终为负。
- 所以该测量电路输出电压幅值反映了被测量的大

小，而 \dot{U}_0 的符号则反映了该被测量的变化方向。

8. 已知变气隙电感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 $\delta_0 = 0.5 \text{ cm}$ ， $\Delta\delta = \pm 0.1 \text{ mm}$ ，真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，线圈匝数 $w = 3000$ ，求单端式传感器的灵敏度 $\Delta L / \Delta\delta$ 。若做成差动结构形式，其灵敏度将如何变化？

解：

$$L_0 = \frac{\mu_0 S_0 W^2}{2\delta_0} = \frac{1.5 \times 10^{-4} \times 4\pi \times 10^{-7} \times 3000^2}{2 \times 0.5 \times 10^{-2}} = 169.6 \text{ mH}$$

$$L = \frac{\mu_0 S_0 W^2}{2\delta} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1.5 \times 10^{-4} \times 3000^2}{2 \times (0.5 \pm 0.01) \times 10^{-2}} = 169.6 \pm 3.5 \text{ mH}$$

$$\text{灵敏度: } K = \frac{\Delta L}{\Delta\delta} = \frac{3.5 \times 10^{-3}}{0.1 \times 10^{-3}} = 35 \text{ H/m}$$

接成差动结构形式，则

$$K = 2 \cdot \frac{\Delta L}{\Delta\delta} = 70 \text{ H/m}$$

灵敏度提高一倍。

9. 何谓涡流效应？怎样利用涡流效应进行位移测量？

答：块状金属导体置于变化着的磁场中，或在磁场中作切割磁力线运动时，导体内将产生呈旋涡状的感应电流，此电流叫电涡流，所产生电涡流的现象称为电涡流效应。

电涡流式传感器的测试系统由电涡流式传感器和被测金属两部分组成。当线圈中通以交变电流 i_1 时，其周围产生交变磁物 H_1 ，置于此磁物中的导体将感应出交变电涡流 i_2 ， i_2 又产生新的交变磁物 H_2 ， H_2 的作用将反抗原磁物 H_1 ，导致线圈阻抗 Z 发生变化， Z 的变化完全取决于导体中的电涡流效应，而电涡流效应既与导体的电阻率 ρ ，磁导率 μ ，几何尺寸有关，又与线圈的几何参数、线圈中的激磁电流频率 f 有关，还与线圈和导体间的距离 x 有关，因此，可得等效阻抗 Z 的函数差系式为

$$Z = F(\rho, \mu, r, f, x)$$

式中 r 为线圈与被测体的尺寸因子。

以上分析可知，若保持 ρ, μ, r, f 参数不变，而只改变 x 参数，则 Z 就仅仅是关于 x 单值函数。测量出等效阻抗 Z ，就可实现对位移量 x 的测量。

10. 电涡流的形成范围包括哪些内容？它们的主要特点是什么？

答：电涡流的形成范围包括电涡流的径向形成范围、电涡流强度与距离的关系和电涡流的轴向贯穿深度。

电涡流的径向形成范围的特点为：①金属导体上的

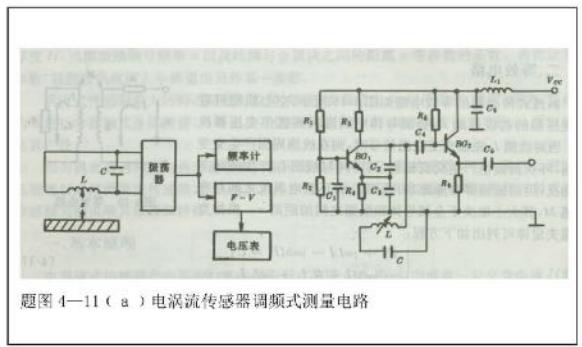
电涡流分布在以线圈轴线为同心，以 $(1.8 \sim 2.5)r_{\text{ax}}$ 为半径的范围之内（ r_{ax} 为线圈半径），且分布不均匀。②在线圈轴线（即短路环的圆心处）内涡流密度为零。③电涡流密度的最大值在 $r=r_{\text{ax}}$ 附近的一个狭窄区域内。

电涡流强度与距离 x 呈非线性关系。且随着 x 的增加，电涡流强度迅速减小。当利用电涡流式传感器测量位移时，只有在 $\frac{x}{r_{\text{ax}}} = 0.05 \sim 0.15$ 的范围内才具有较好的线性度和较高的灵敏度。

电涡流的轴向贯穿深度按指数规律分布，即电涡流密度在被测体表面最大，随着深度的增加，按指数规律衰减。

11. 电涡流传感器常用测量电路有几种？其测量原理如何？各有什么特点？

答：电涡流传感器常用的测量电路有：调频式测量电路和调幅式测量电路二种。



题图 4—11 (a) 电涡流传感器调频式测量电路

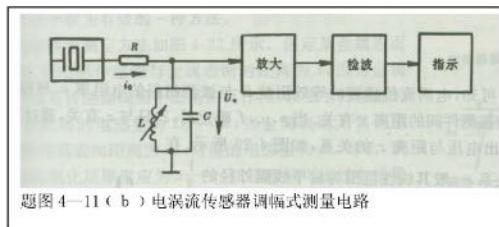
调频
式测量
电
路如
题
图
4—11
(a)

所示，

传感器线圈接入LC振荡回路，当传感器与被测导体距离x改变时，在涡流影响下，传感器的电感变化，将导致振荡频率变化，该变化的频率是距离x的函数，即

$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(x)\cdot C}}$ ，该电路输出是频率量，固抗干扰性能较好，但f的表达式中有电容C参数存在，为避免传感器引线的分布电容影响。通常将LC封装在传感器内，此时电缆分布电容并联在大电容上，因而对振荡频率f的影响大大减小。

调幅式测
量电
路如题
图 4—11 (b)
所示，石英



题图 4—11 (b) 电涡流传感器调幅式测量电路

晶体振荡器起恒流源作用，给谐振回路提供了一个激励频率(f_0)稳定的激励电流 i_0 ，由传感器线圈L、电容器c构成一个LC振荡电路，其输出电压 $U_0 = i_0 \cdot f(z)$ ，当金属导体远离电涡流传感器或去掉时，LC并联谐振回路的谐振频率即为石英振荡频率 f_0 ，回路呈现的阻抗最大，谐振回路上的输出电压也最大；当金属导体靠近传感器线圈时，线圈的等效电感L发生变化，导致回路失谐而偏离了激励频率，从而使输出电压降低，L的数值随距离x的变化而变化，因此，输出电压也随x而变化。

第五章

1.根据工作原理可将电容式传感器分为那几种类型？每种类型各有什么特点？各适用于什么场合？

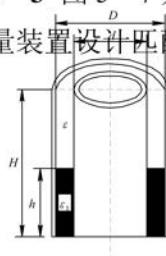
答：根据电容式传感器的工作原理，电容式传感器有三种基本类型，即变极距(d)型（又称变间隙型）、变面积(A)型和变介电常数(ε)型。变间隙型可测量位移，变面积型可测量直线位移、角位移、尺寸，变介电常数型可测量液体液位、材料厚度。电容式传感器具有以下特点：功率小，阻抗高，由于电容式传感器中带电极板之间的静电引力很小，因此，在信号检测过程中，只需要施加较小的作用力，就可以获得较大的电容变化量及高阻抗的输出；动态特性良好，具有较高

的固有频率和良好的动态响应特性；本身的发热对传感器的影响实际上可以不加考虑；可获取比较大的相对变化量；能在比较恶劣的环境条件下工作；可进行非接触测量；结构简单、易于制造；输出阻抗较高，负载能力较差；寄生电容影响较大；输出为非线性。

2. 如何改善单极式变极距型传感器的非线性？

答：采用差动式结构，可以使非线性误差减小一个数量级。

5—3 图 5—7 为电容式液位计测量原理图。请为该测量装置设计匹配的测量电路，要求输出电压 U_0 与液位 h 之间呈线性关系。



$$C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0 H (\epsilon_r - \epsilon_s)}{\ln \frac{D}{d}}$$

图 5-7 电容式液位变换器结构原理图

解：电容式液位计的电容值为： $C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0 H (\epsilon_r - \epsilon_s)}{\ln \frac{D}{d}}$ ，其中

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}}$$

可见 C 与液面高度 h 呈线性关系。

可以看出，该结构不宜做成差动形式，所以不宜采用二极管双 T 形交流电桥，也不宜采用脉冲宽度调制电路。另外要求输出电压 U_0 与液位 h 之间呈线性关系，所以不宜采用调频电路和运算放大器式电路。

可以采用环形二极管充放电法，具体电路如图所示。

可将直流电流表改为直流电压表与负载电阻 R 的并联， R 上的电压为 U_0 ，则有：

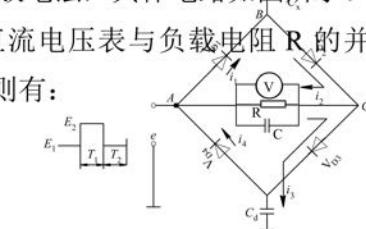
$$U_0 = RI = Rf\Delta E(C_x - C_d)$$

其中， C_x 为电容式液位计的电容值， f 为方波的频率， $\Delta E = E_2 - E_1$

为方波的幅值， C_d 为平衡电容传感器初始电容的调零电容。当

$h=0$ 时 调 节

$$C_d = C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}}$$

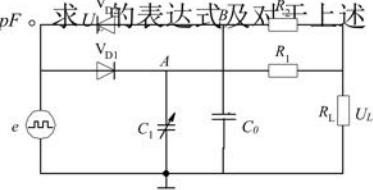


环形二极管电容测量电路原理图

压 U_L 与液位 h 之间呈
线性关系。

5—5 题 5—5 图为电容式传感器的双 T 电桥测量电
路, 已知 $R_1 = R_2 = R = 40k\Omega$, $R_L = 20k\Omega$, $e = 10V$, $f = 1MHz$,

$C_0 = 10pF$, $C_1 = 10pF$, $\Delta C_1 = 1pF$ 。求 U_L 的表达式及对上述已知参数的 U_L 值。

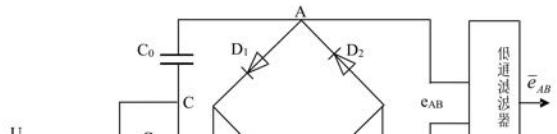


解:

$$\begin{aligned} U_L &= \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \cdot R_L U f (C_1 - C_0) \\ &= \frac{40 \times (40 + 2 \times 20)}{(40 + 20)^2} \times 20 \times 10 \times 1 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-12} \\ &= 0.18(V) \end{aligned}$$

5—8 题 5—8 图为二极管环形电桥检波测量电路, U_p 为恒压信号源, C_1 和 C_2 是差动式电容传感器, C_0 是固定电容, 其值 $C_0 \gg C_1$, $C_0 \gg C_2$, 设二极管 $V_{D1} \sim V_{D4}$ 正向电阻为零, 反向电阻为无穷大, 信号输出经低通滤波器取出直流信号 \bar{e}_{AB} 。要求:

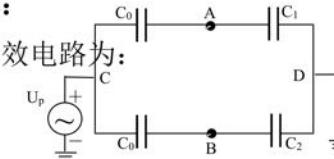
- ① 分析检波电路测量原理;
- ② 求桥路输出信号 $e_{AB} = f(C_1, C_2)$ 的表达式;
- ③ 画出桥路中 U_A 、 U_B 、 e_{AB} 在 $C_1 = C_2$ 、 $C_1 > C_2$ 、 $C_1 < C_2$ 三种情况下的波形图 (提示: 画出 U_p 正负半周的等效电



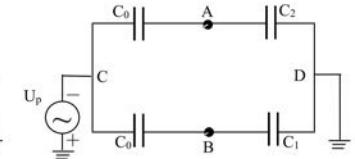
路图, 并标出工作电流即可求出 e_{AB} 的表达式)。

解:

等效电路为:



(a) U_p 为正半周时



(b) U_p 为负半周时

当 U_p 为正半周时, D_1 、 D_3 导通, 等效电路如图 (a) 所示。

当 U_p 为负半周时, D_2 、 D_4 导通, 等效电路如图 (b) 所示。

电容 C_0 、 C_1 和 C_2 的阻抗分别为: $Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0}$, $Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$,

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2} \text{ } \circ$$

$$\text{则 } U_A = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_0} U_p, \quad U_B = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} U_p \text{ } \circ$$

$$e_{AB} = U_B - U_A = U_p \frac{Z_0(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_0)(Z_2 + Z_0)} = U_p \frac{C_0(C_1 - C_2)}{(C_0 + C_1)(C_0 + C_2)}$$

$$\because C_0 \gg C_1, \quad C_0 \gg C_2$$

$$\therefore e_{AB} \approx \frac{C_1 - C_2}{2C_0} U_p = \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C_0} U_p$$

当 $C_1 = C_2$ 时, $Z_1 = Z_2$, $U_A = U_B$, $e_{AB} = 0$;

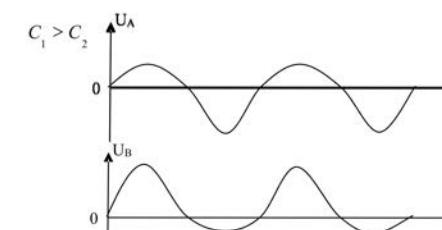
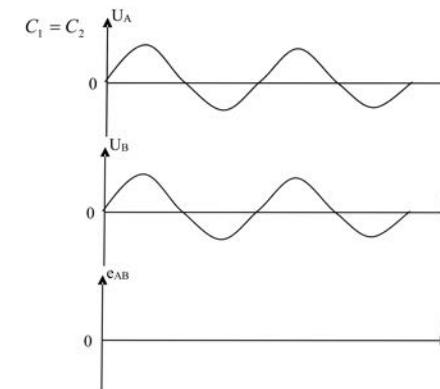
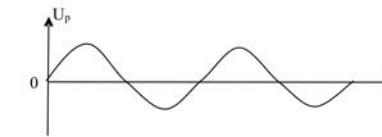
当 $C_1 > C_2$ 时, $Z_1 < Z_2$, U_p 正半周时, $|U_A| < |U_B|$, 即 $0 < U_A < U_B$, 所以 U_p 负半周时, $|U_A| > |U_B|$, 即 $U_A < U_B < 0$, 所以

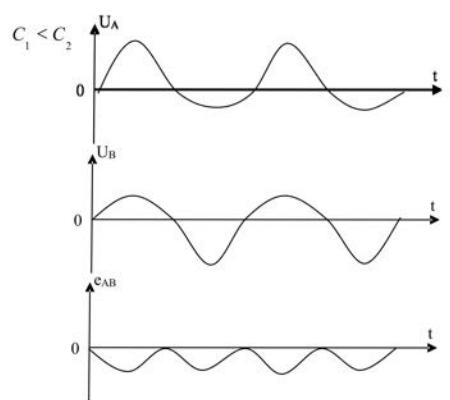
$$e_{AB} > 0 \text{ ;}$$

当 $C_1 < C_2$ 时, $Z_1 > Z_2$, U_p 正半周时, $|U_A| > |U_B|$, 即 $U_A > U_B > 0$, 所以 U_p 负半周时, $|U_A| < |U_B|$, 即 $0 > U_A > U_B$, 所以

$$e_{AB} < 0 \text{ } \circ$$

波形如图所示。





第六章 压电式传感器

1.什么叫正压电效应和逆压电效应？什么叫纵向压电效应和横向压电效应？

答：某些电介质在沿一定的方向上受到外力的作用而变形时，内部会产生极化现象，同时在其表面上产生电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电的状态，这种现象称为压电效应。这种机械能转化成电能的现象，称为“顺压电效应”。反之，在电介质的极化方向上施加交变电场或电压，它会产生机械变形，当去掉外加电场时，电介质变形随之消失，这种现象称为“逆压电效应”。在石英晶体中，通常把沿电轴 x 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“纵向压电效应”，而把沿机械轴 y 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“横向压电效应”。

2.压电式加速度传感器的工作原理？

第十四章 智能式传感器

答：其原理利用压电晶体的电荷输出与所受的力成正比，而所受的力在敏感质量一定的情况下与加速度值成正比。在一定条件下，压电晶体受力后产生的电荷量与所感受到的加速度值成正比。

第七章 磁电式传感器

1.什么是霍尔效应？霍尔电势与哪些因素有关？

答：金属或半导体薄片置于磁场中，当有电流通过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势，这种物理现象称为霍尔效应。霍尔电动势的大小正比于激励电流 I 与磁感应强度 B ，且当 I 或 B 的方向改变时，霍尔电动势的方向也随着改变，但当 I 和 B 的方向同时改变时霍尔电动势极性不变。

14-1 什么是智能传感器？它包含哪几种主要形式？应从哪些方面研究开发智能传感器？

智能式传感器，就是一种带有微处理机的，兼有信息检测、信号处理、信息记忆、逻辑思维与判断功能的传感器。

形式：

研究方面：

1.物理转化机理：由于智能传感器可以很容易对非线性的传递函数进行校正，得到一个线性度非常好的输出结果，从而消除了非线性传递函数对传感器应用的制约，因此一些科研工作者正在对这些稳定性好、精确度高、灵敏度高的转换机理或材料重新进行研究。

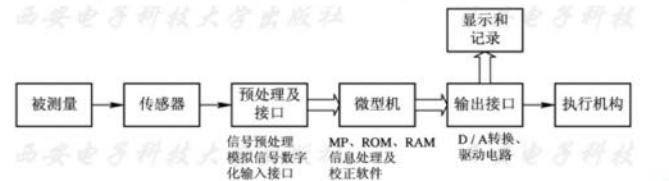
2. 数据融合理论

数据融合通过分析各个传感器的信息，来获得更可靠、更有效、更完整的信息，并依据一定的原则进行判断，作出正确的结论。

3. CMOS 工艺兼容的传感器制造与集成封装技术

14-2 智能传感器一般由哪些部分构成？它有哪些显著特点？

智能式传感器系统一般构成框图如图所示。其中作为系统“大脑”的微型计算机，可以是单片机、单板机，也可以是微型计算机系统。



显著特点：

1.提高了传感器的精度

智能式传感器具有信息处理功能，通过软件不仅可修正各种确定性系统误差(如传感器输入输出的非线性误差、温度误差、零点误差、正反行程误差等)而且还可适当地补偿随机误差、降低噪声，大大提高了传感器精度。

2.提高了传感器的可靠性

集成传感器系统小型化，消除了传统结构的某些不可靠因素，改善整个系统的抗干扰性能；同时它还有诊断、校准和数据存储功能(对于智能结构系统还有自适应功能)，具有良好的稳定性。

3.提高了传感器的性能价格比

在相同精度的需求下，多功能智能式传感器与单一功能的普通传感器相比，性能价格比明显提高，尤其是在采用较便宜的单片机后更为明显。

4.促成了传感器多功能化

智能式传感器可以实现多传感器多参数综合测量，通过编程扩大测量与使用范围；有一定的自适应能力，根据检测对象或条件的改变，相应地改变量程反输出数据的形式；具有数字通信接口功能，直接送入远地计算机进行处理；具有多种数据输出形式(如 RS232 串行输出，PIO 并行输出，IEEE-488 总线输出以及经 D/A 转换后的模拟量输出等)，适配各种应用系统。

14-3 传感器的智能化与集成智能传感器有何区别？^④

传感器智能化指传感器与微处理器机可分为两个独立部分，传感器的输出信号经处理和转化后由接口送入微处理器部分进行运算处理。^④

集成智能传感器指利用集成电路工艺微机械技术将传感器敏感元件与功能呢恶搞强大的电子线路集成在同一芯片上，通常具有信号提取、信号处理、逻辑判断、双向通信、决策、量程切换、自检、自校准、自补偿、自诊、计算等功能。^④

14-4 举例说明集成智能传感器的结构和特点。^④

(1) 混合集成压力智能传感器^④

结构：图 14-4。在同一管壳内封装了微控制器、检测环境参数的各种传感器元件、连接传感元件和控制器的各种接口/读出电路、电源管理器、晶振、电池、无限发送器等电路及器件。^④

功能：具有数据处理功能，并且可以根据环境参数的变化情况，自主地开始

测量或者改变测试频率，具有了智能化的特点。^④

(2) 多路光谱分析传感器^④

结构：图 14-5。由光学系统和微型计算机的 CPU 构成^④

功能：二维自适应图像传感；多路光谱分析。^④

(3) 三维多功能单片智能传感器^④

结构：图 14-6。把传感器、数据传送、存储及运算模块集成为以硅片为基础的超大规模集成电路的智能传感器。^④

功能：传感器功能；逻辑功能；记忆功能。^④