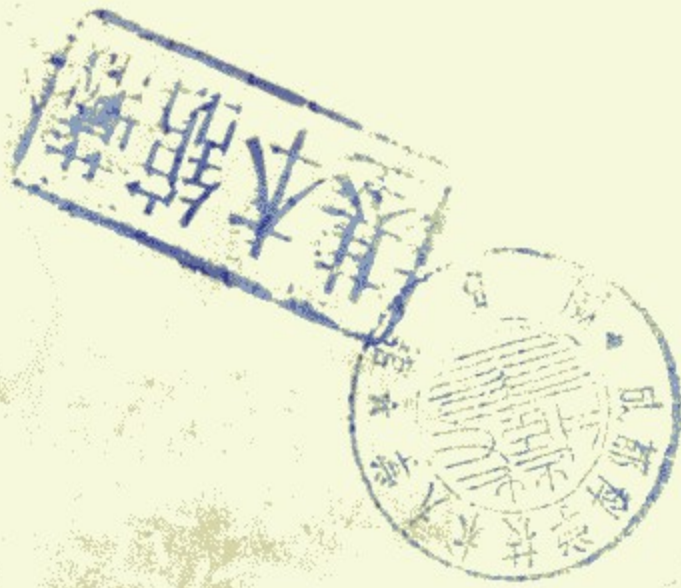


917920

《传感器原理》 习题与实验指导书

余瑞芬 主编



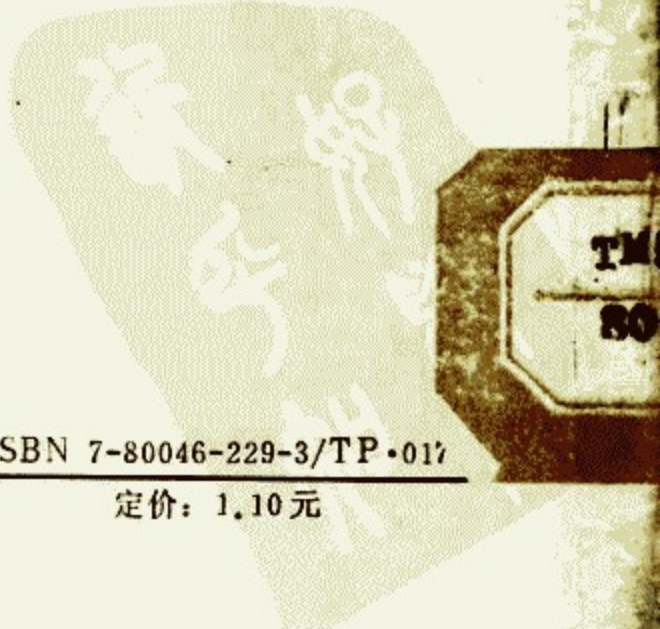
航空工业出版社

责任编辑：忠 诚



ISBN 7-80046-229-3/TP·017

定价：1.10元



《传感器原理》
习题与实验指导书

余瑞芬 主编

航空工业出版社

1990

内 容 简 介

本书是根据高等工科院校教材《传感器原理》的内容与系统编写的。

全书共分十三章，有20道例题，140道习题与思考题，1份示范实验报告，以及10篇实验指导书。内容丰富，有助于学生复习巩固教学内容和掌握实验技能。

本书与教材《传感器原理》配套，供仪表与测试专业学生使用，也可供精密仪器、自动控制、计量测试等专业学生和有关工程技术人员参考。

《传感器原理》习题与实验指导书

余瑞芬 主编

航空工业出版社出版发行
(北京市和平里小关东里14号)
— 邮政编码: 100013 —
全国各地新华书店经售
南京航空学院印刷厂印刷

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷
开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 4.25
印数: 1—2600册 字数: 102千字
ISBN 7-80046-229-3/TP·017
定价: 1.10元

前 言

本书是为与1987年航空工业出版社出版的《传感器原理》(修订版)一书配套而编写的。该书第一版1986年曾被原航空工业部评为优秀教材,1988年又被国家教委评为国家优秀教材。

传感器在科学研究、工业自动化、医用仪器、军事技术、生物工程及家用电器等各个领域都起着极为重要的作用。虽然近年来,有关传感器的教科书、参考书日益增多,但绝大多数书中均没有编进习题和实验指导书。

由于种类繁多的传感器在原理、结构、输出特性及误差分析等方面差异较大,造成了传感器课程的特殊性,其内容较庞杂,所涉及的学科知识既分散又密集,往往一种传感器就集中了许多知识领域的内容,这些给初学者带来一定困难。为使学生巩固课堂及书本知识,能运用教材中基本概念、基本理论解决实际问题,提高理论联系实际的能力,我们编写了这本习题、思考题与实验指导书。

在编写过程中,编者收到了来自全国各地高等院校的有关素材,特别得到了沈阳工业大学杨维明付教授、浙江大学赵阳付教授、吉林工业大学、西安交通大学、上海工业大学、合肥工业大学等兄弟院校的支持,在此谨表谢忱。

为同教材《传感器原理》相配合,本书共分为十三章,另有十一个实验。南京航空学院朱俊老师编写了实验二、三、四、六、七、八、十一共七篇实验说明书。其余均由余瑞芬编写。

东南大学黄维一教授在百忙中审阅了全书,谨致衷心的感谢。

编 者

EA003/01

目 录

第一部分 习题与思考题

第一章	传感器的一般特性	(1)
1.1	例题详解.....	(1)
1.2	习题与思考题.....	(11)
第二章	电位器式传感器	(13)
2.1	例题详解.....	(13)
2.2	习题与思考题.....	(16)
第三章	应变式传感器	(17)
3.1	例题详解.....	(17)
3.2	习题与思考题.....	(18)
第四章	电容式传感器	(22)
4.1	例题详解.....	(22)
4.2	习题与思考题.....	(24)
第五章	变磁阻式传感器	(26)
5.1	例题详解.....	(26)
5.2	习题与思考题.....	(27)
第六章	磁电式传感器	(29)
6.1	例题详解.....	(29)
6.2	习题与思考题.....	(30)
第七章	压电式传感器	(32)
7.1	例题详解.....	(32)
7.2	习题与思考题.....	(33)
第八章	谐振式传感器	(35)
8.1	思考题.....	(35)
第九章	压阻式传感器	(36)
9.1	例题详解.....	(36)
9.2	习题与思考题.....	(38)
第十章	热电式传感器	(39)
10.1	例题详解.....	(39)
10.2	习题与思考题.....	(39)
第十一章	智能传感器	(41)
11.1	思考题.....	(41)

第十二章	光纤传感器	(42)
12.1	思考题.....	(42)
第十三章	其他传感器	(43)
13.1	思考题.....	(43)

第二部分 实验指导书

实验一	压力传感器静态特性校准示范实验报告.....	(44)
实验二	电阻应变片传感器综合实验(I).....	(46)
实验三	电阻应变片传感器综合实验(II).....	(49)
实验四	电阻应变片传感器综合实验(III).....	(50)
实验五	螺管形差动电感传感器.....	(51)
实验六	差动变压器传感器原理与性能.....	(53)
实验七	差动变压器传感器测量系统.....	(54)
实验八	电涡流式传感器综合实验.....	(55)
实验九	振动筒压力传感器的静态特性.....	(57)
实验十	电容式位移传感器的结构分析和测量线路.....	(59)
实验十一	霍耳传感器特性研究.....	(60)

第一部分 习题与思考题

第一章 传感器的一般特性

1.1 例题详解

例一 有一只压力传感器的校准数据如表 1-1 所列, 试求 (1) 端点平移线性度, (2) 最小二乘线性度, (3) 重复性, (4) 迟滞误差, (5) 总精度。

表 1-1 已知的传感器校准数据

y_i (V)		$x_i \times 10^5$ (Pa)					
		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1	正行程	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995	1.0000
	反行程	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005	
2	正行程	0.0025	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9995
	反行程	0.0035	0.2030	0.4020	0.6015	0.8005	
3	正行程	0.0035	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9990
	反行程	0.0040	0.2030	0.4020	0.6010	0.8005	

解析

1. 先求出在计算中要用到的一些基本数据

(1) 按下列公式求出各个校准点上正、反行程校准数据的算术平均值和迟滞值, 列于表 1-2。

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

$$\text{迟滞值} \quad \Delta y_H = |y_{jI} - y_{jD}|$$

上二式中, $y_{jI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{jiI}$, $y_{jD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{jiD}$, I 代表正行程, D 代表反行程, n 为重复测量序数, 这里 $n=3$, $i=1, 2, 3$ 。

(2) 由子样方差公式可知

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

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

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

(3) 由子样标准偏差公式求出 S 值, 当 $m=6$ 时,

$$S = \sqrt{\frac{1}{2m} \left(\sum_{i=1}^m S_{iI}^2 + \sum_{i=1}^m S_{iD}^2 \right)}$$

计算结果 $S=0.0004$ 。

2. 按端点连线平移线法计算各性能指标

(1) 端点连线的截距, 斜率, 方程式, 理论值和系统误差

已知 $x_1=0 \text{ Pa}$ $y_1=0.0031 \text{ mV}$
 $x_m=2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ $y_m=0.9995 \text{ mV}$

因此, 截距 $b = \frac{y_1 x_m - y_m x_1}{x_m - x_1} = 0.0031$

斜率 $k = \frac{y_m - y_1}{x_m - x_1} = 0.39856$

端点连线方程 $y = 0.0031 + 0.39856x$

由该方程式可以计算出各校准点的理论值, 以及正、反行程的系统误差即正、反行程各点的算术平均值与理论值之差, 这些数值均列于表 1-2。

(2) 端点连线平移线的截距, 斜率, 方程, 理论值和非线性误差

先算出各标准点上相对于端点连线的最大正误差 $(\Delta y)'_{\max}$ 和最大负误差 $(\Delta y)''_{\max}$, 即

$$(\Delta y)'_{\max} = 0.0004$$

$$(\Delta y)''_{\max} = 0.0009$$

由此可求出端点连线平移线的截距与斜率,

$$b = y_1 + \frac{|(\Delta y)'_{\max}| - |(\Delta y)''_{\max}|}{2} = 0.00285$$

$$k = k_1 = 0.39856$$

于是, 得端点连线平移线的方程,

$$y = 0.00285 + 0.39856x$$

由该方程可求出各校准点的端点连线的理论值和非线性误差即正、反行程校准数据算术平均值与理论值之差, 这些数据也列于表 1-2。

(3) 各性能指标计算

a. 理论满量程输出

$$y_{F.S.} = |(x_m - x_1)k| = 0.9964 \text{ V}$$

b. 重复性 取置信系数 $\lambda=3$, $S=0.0004$,

$$\xi_R = \frac{\lambda S}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.12\%$$

c. 非线性度

$$\xi_L = \frac{(\Delta y_L)_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.03\%$$

d. 迟滞误差

$$\xi_H = \frac{(\Delta y_H)_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.12\%$$

e. 精度 由于最大系统误差 $(\Delta y)_{\max} = 0.0007$, 并取置信系数 $\lambda=3$, 则精度为

表 1-2 端点连线平移法和最小二乘直线法各项数据

压力 $\times 10^5 \text{ Pa}$ x	平均值 (V)		迟滞 值 Δy_H (V)	子样方差 平方根		子样 标准 偏差 S	端点连线 $y = 0.0031 + 0.39856x$			端点连线平移线 $y = 0.00285 + 0.39856x$			最小二乘直线 $y = 0.00298 + 0.39850x$			
	正行程	反行程		正行程 S_H	反行程 S_D		理论值 y (V)	正行程 $(\Delta y)'$ (V)	反行程 $(\Delta y)''$ (V)	平均值 \bar{y}_i (V)	理论值 y (V)	非线性 误差 Δy (V)	理论值 y (V)	正行程 $(\Delta y)'$ (V)	反行程 $(\Delta y)''$ (V)	非线性 误差 Δy (V)
0	0.0027	0.0035	0.0008	0.0008	0.0005		0.0031	-0.0004	+0.0001	0.0031	0.0028	0.0003	0.0030	-0.0003	+0.0005	+0.0001
0.5	0.2018	0.2027	0.0009	0.0003	0.0005		0.2024	-0.0006	+0.0003	0.2023	0.2021	0.0002	0.2023	-0.0005	+0.0004	+0.0000
1.0	0.4008	0.4020	0.0012	0.0003	0.0000	0.0004	0.4017	-0.0009	+0.0003	0.4014	0.4014	0.0000	0.4015	-0.0007	+0.0005	-0.0001
1.5	0.6000	0.6012	0.0012	0.0000	0.0003		0.6009	-0.0009	+0.0003	0.6006	0.6007	0.0001	0.6008	-0.0008	+0.0004	-0.0002
2.0	0.7995	0.8005	0.0010	0.0000	0.0000		0.8002	-0.0007	+0.0003	0.8000	0.8000	0.0000	0.8000	-0.0005	+0.0005	0
2.5	0.9995	0.9995	0	0.0005	0.0005		0.9995	0	0	0.9995	0.9992	0.0003	0.9993	+0.0002	+0.0002	+0.0002

$$\xi = \frac{|(\Delta y)_{\max}| + \lambda S}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.19\%$$

3. 按最小二乘法计算各性能指标

(1) 截距, 斜率, 方程式, 理论值和系统误差

由已知数据可以求出,

$$\sum_{i=1}^{33} x_i = 37.5$$

$$\sum_{i=1}^{33} y_i = 15.0425$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i y_i = 25.5618$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i^2 = 63.75$$

于是, 截距与斜率可算出如下

$$k = 0.39853$$

$$b = 0.002986$$

因此, 最小二乘法直线方程为

$$y = 0.002986 + 0.39853x$$

依此方程计算出的理论值, 系统误差和非线性误差一并列于表 1-2。

a. 理论满量程输出

$$y_{F.S.} = |(x_m - x_1)k| = 0.9964 \text{ V}$$

b. 重复性 取置信系数 $\lambda=3$, $S=0.0004$

$$\xi_R = \frac{\lambda S}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.12\%$$

c. 非线性度

$$\xi_L = \frac{(\Delta y_L)_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.03\%$$

d. 迟滞误差

$$\xi_H = \frac{(\Delta y_H)_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.12\%$$

e. 精度

$$\xi = \frac{|\Delta y|_{\max} + \lambda S}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.19\%$$

现将依端点连线平移线和最小二乘法分别算出的性能数据归纳于表 1-3, 以资比较。

表 1-3 性能数据归纳

指 标	端点连线平移线法	最小二乘直线法
重 复 性 ξ_R	0.12%	0.12%
迟滞误差 ξ_H	0.12%	0.12%
非线性度 ξ_L	0.03%	0.03%
精 度 ξ	0.19%	0.19%

例二 玻璃水银温度计通过玻璃温包把热量传给水银，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为，

$$4\frac{dy}{dt} + 2y = 2 \times 10^{-3}x$$

式中 y ——水银柱高，m；

x ——输入温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

试确定该温度计的时间常数及静态灵敏度。

解 析

一阶系统输入输出的动态特性表达式为

$$a\frac{dy}{dt} + by = cx$$

使上式中 y 的系数为 1 时，则有

$$\frac{a}{b}\frac{dy}{dt} + y = \frac{c}{b}x \quad (1)$$

再改变成标准形式，即

$$\tau\frac{dy}{dt} + y = kx \quad (2)$$

式中 τ ——以秒 (s) 为单位的时间常数；

k ——静态灵敏度，以 y/x 的比值为单位。

比较式 (1) 和 (2)，可得 $\tau = a/b$ 和 $k = c/b$ 。

还可用微分算子 D 的形式将式 (2) 改写一下，微分算子为 $D = d/dt$ ， $D^2 = d^2/dt^2$ ，等等。因此得

$$\tau Dy + y = kx$$

即

$$(\tau D + 1)y = kx$$

或

$$\frac{y}{x} = \frac{k}{1 + \tau D} \quad (3)$$

将已知水银温度计的特性方程改写成如式 (2) 的标准形式，得

$$2\frac{dy}{dt} + y = 10^{-3}x$$

于是可知，时间常数 $\tau = 2\text{ s}$ ，静态灵敏度 $k = 10^{-3}\text{ m}/^{\circ}\text{C} = 1\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 。

用式 (2) 与 (3) 式来确定一阶系统的阶跃响应和频率响应是较为方便的。

1. 阶跃响应

一阶系统的阶跃响应曲线示于图 1-1(a)，可见它是一根指数曲线，按指数规律上升至最终值，这是一阶系统的特征。对于阶跃输入，理想的响应应该是阶跃输出，而实际输出却是指数曲线，这种差异就造成了动态误差。比较一下一阶系统理想的和实际的两种阶跃响应，可以看出，阶跃响应的动态误差随时间增长而减小。图 1-1(b) 更详细地描述了阶跃响应，由图可得到一阶系统阶跃响应的的时间常数 τ 的定义：时间常数是指以初始速度等速上升至最终值所需的时间，或者说是按指数规律上升至最终值的 63.2% 所需的时间。

重要的是，要注意在时间 $t=0$ 时，响应曲线的初始斜率为 $1/\tau$ 。要使斜率大，输出与输

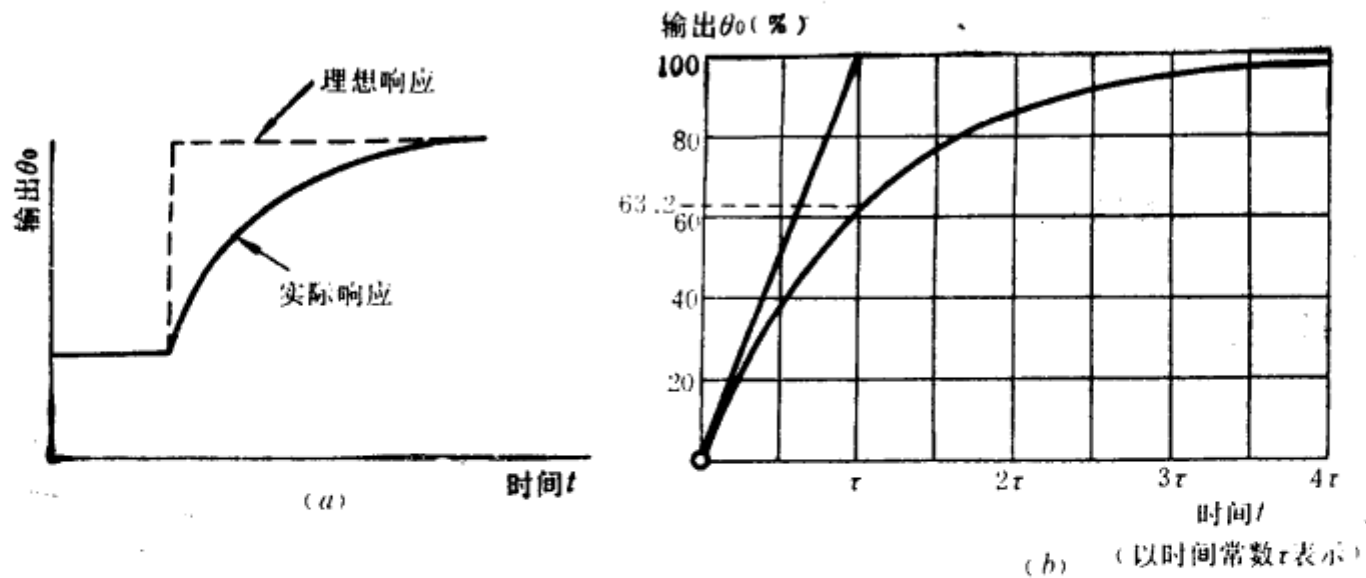


图 1-1 一阶系统的阶跃响应

入差异小, 就要求 τ 值小。所以, τ 有决定响应速度的重要作用。为减小动态误差, 应尽可能采用时间常数 τ 小的测量系统。

2. 频率响应

通常利用已知幅值的正弦波输入一阶系统, 从输出正弦波的变化情况获得系统的相频特性和幅频特性。图 1-2 表明一阶系统不能如实地响应输入, 输出滞后于输入。输出幅值与输入幅值之比称为幅值比 K , 理想情况下它应该是一个同输入频率无关的常数。图 1-3 是一阶系统标准的频率响应曲线, 说明了幅值比随频率变化的情况, 图中理想的频率响应适用于 $K=1$, 或者说这时的幅值比是实际输出幅值与理想输出幅值的比值。为了使不同的时间常数 τ 都能利用这频率响应曲线, 故横坐标一般由角频率 ω 标注改为 $\omega\tau$ 。而对某一特定的时间常数, 欲获得幅值与频率的关系, 则可将横

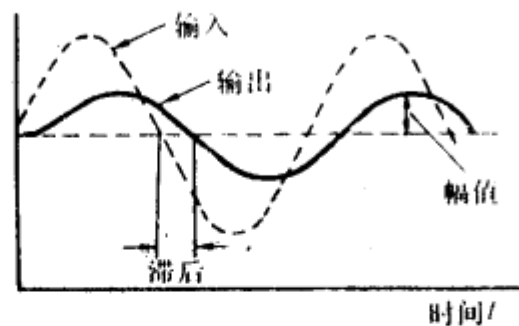


图 1-2 正弦波输入的响应

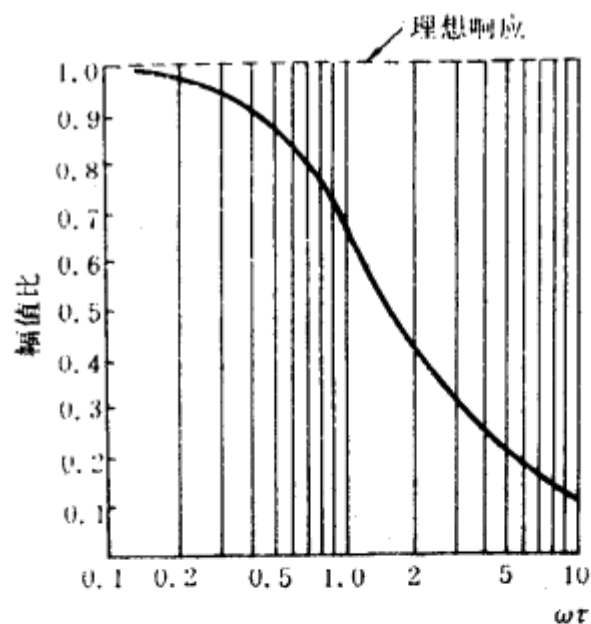


图 1-3 一阶系统的频率响应

坐标 $\omega\tau$ 的刻度乘以系数 $1/\tau$ 后再作分析。由图可见, 在 $\omega\tau=0.3$ 范围内, 幅值失真很小。如果 $\tau=0.3\text{ s}$, 这时对应的频率上限 $\omega=1\text{ rad/s}$, 可见, 时间常数 τ 越小, 失真小的工作频率范围越宽, 反之, 则此工作频率范围越窄。

由此可见, 欲使频率响应的动态误差减小, 应尽可能采用时间常数 τ 小的测量系统, 这与阶跃响应所要求的情况相同。

例三 若一阶传感器的时间常数为 0.01 s ，传感器响应的幅值百分误差在 10% 范围内，此时 $\omega\tau$ 最高值达 0.5 ，试求此时输入信号的工作频率范围。

解析

传感器响应的幅值百分误差在 10% 范围内即相当于幅值比应大于 0.7 。可用 $\omega\tau=0.5$ 来确定输入信号工作频率范围的上限。因而得出上限频率为

$$\omega = \frac{0.5}{\tau} = \frac{0.5}{0.01} \text{ rad/s} = 50 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{50}{2\pi} \text{ Hz} = 8 \text{ Hz}$$

可知，所求工作频率范围为 $0-8\text{ Hz}$ 。

例四 某一质量、弹簧、阻尼系统在受到阶跃输入激励下，出现的第一个超调量大约是最初值的 40% 。如果从阶跃输入开始至第一个超调量出现所需时间为 0.8 s ，试估算阻尼比 ξ 和固有角频率 ω_0 的大小。

解析

在计算前先把二阶系统的数学模型、阶跃和频率响应理论作一分析。

1. 数学模型

二阶系统的输出输入关系可用下列微分方程表达，

$$a \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + cy = dx \quad (4)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 都是常数。为使 d^2y/dt^2 项的系数为 1 ，可将上式变换为

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{b}{a} \frac{dy}{dt} + \frac{c}{a} y = \frac{d}{a} x$$

上式可再改写成标准形式：

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = k'x \quad (5)$$

式中 ω_0 ——无阻尼固有角频率， rad/s ；

ξ ——阻尼比；

k' ——常量，若在静态条件下，则有 $\omega_0^2 y = k'x$ ，于是静态灵敏度 $k = \frac{y}{x} = \frac{k'}{\omega_0^2}$ 。

用微分算子形式来表示，式(5)可变换为

$$(D^2 + 2\xi\omega_0 D + \omega_0^2)y = k'x$$

因而可得出传递因子为

$$\frac{y}{x} = \frac{k'}{D^2 + 2\xi\omega_0 D + \omega_0^2}$$

再变换一下，上式右边分子分母同除以 ω_0^2 ，可得

$$\frac{y}{x} = \frac{k}{\left(\frac{1}{\omega_0^2}\right)D^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)D + 1}$$

式中 k 就是静态灵敏度。

需要指出的是，固有角频率 ω_0 是衡量二阶系统响应速度的一种尺度， ω_0 值越大，意味着系统对瞬态变化的响应越快。

阻尼比 ξ 则是系统存在阻尼的一种量度，它等于实际阻尼系数与临界阻尼系数之比， ξ 值的大小决定了阶跃响应和频率响应的形式，现说明于下。

(1) 当 $\xi < 1$ 时，系统呈欠阻尼状态，这导致阶跃响应中发生振荡，在频率响应中出现谐振（对 $\xi < 0.707$ 而言）。这里所说的“谐振”是指输出信号的幅值比理想的输出信号的幅值大得多。

(2) 当 $\xi = 1$ 时，这是临界阻尼状态，也就是在阶跃响应中无超调（超调是指在响应过程中超出最终值的最大偏离量与最终值之比，用百分数表示），也无振荡，在频率响应中没有谐振。这是从欠阻尼状态到过阻尼状态的转折点。

(3) 当 $\xi > 1$ 时，这时系统呈过阻尼状态，系统响应迟缓，在阶跃响应中仍无超调，在频率响应中也无谐振。

二阶系统最常见的实例是质量-弹簧-阻尼系统。

2. 阶跃响应

我们已经知道，二阶系统的阶跃响应并不只有一种形式，根据系统阻尼比 ξ 的大小不同，可以有无数种形式。图 1-4 示出对应于几种 ξ 值的二阶系统阶跃响应曲线，它说明了超调和振荡随着系统阻尼比的减小而增加。为了使固有频率 ω_0 高的或低的系统都能应用图上同样的响应曲线，可以将图中横坐标 $\omega_0 t$ 改为 t 标注，这时横坐标的刻度都要除以 ω_0 。若 $\omega_0 = 1 \text{ rad/s}$ ，则横坐标原刻度不变，若 $\omega_0 = 0.5 \text{ rad/s}$ ，则横坐标原刻度 $\omega_0 t = 1$ 处要改为 $t = 2 \text{ s}$ ，以此类推。这样变换后，图上响应曲线依然可用。很明显，对应于图上同一响应曲线（即 ξ 值一定），达到同一高度时， $\omega_0 = 1 \text{ rad/s}$ 的系统所用时间比 $\omega_0 = 0.5 \text{ rad/s}$ 的系统用的少。即 ω_0 值越高，响应速度越快。

图 1-5 所示是描述第一个超调量与阻尼比之间关系的实用曲线。可以利用该关系曲线来估算某一欠阻尼二阶系统阶跃响应的 ξ 值。

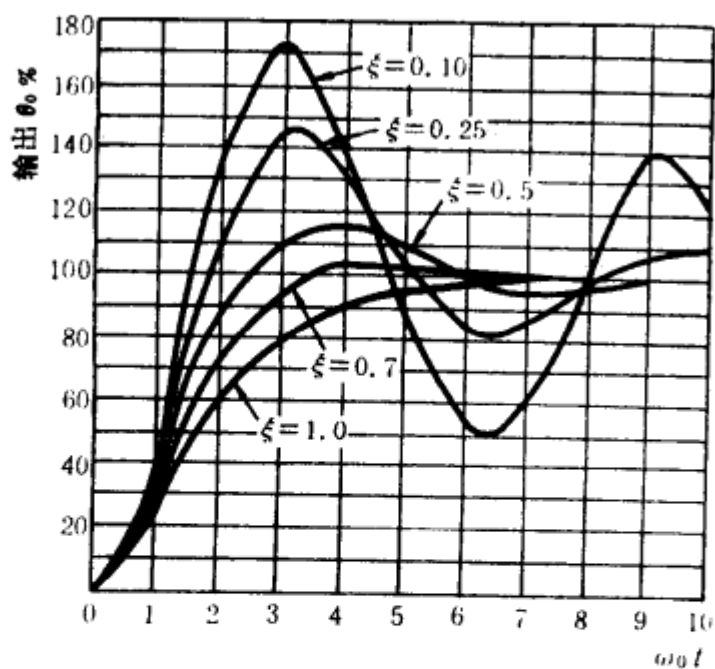


图 1-4 二阶系统的阶跃响应

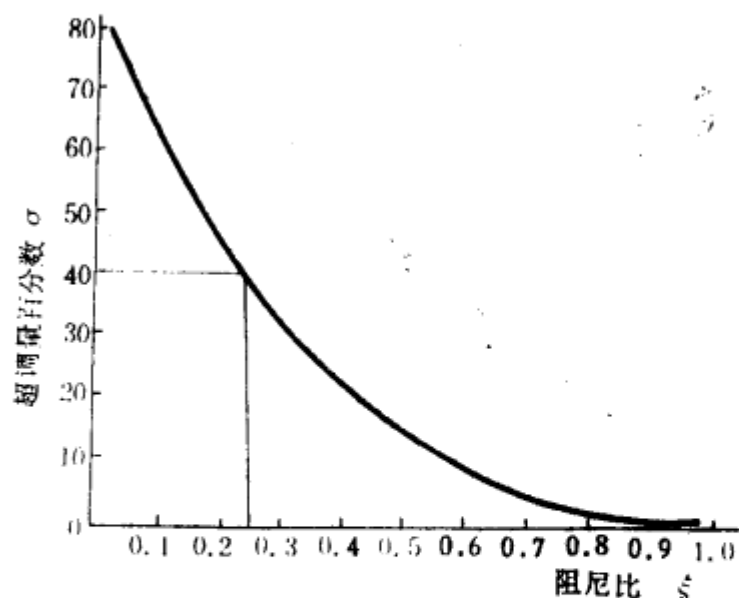


图 1-5 百分数超调量与阻尼比的关系曲线

3. 频率响应

图 1-6 所示为典型的二阶系统的频率响应曲线族，为分析方便起见，纵坐标“幅值比”的刻度是假设 $k=1$ 时描绘的，横坐标则用“频率比” ω/ω_0 标注。如果要用角频率标注，则原刻度都要乘以固有角频率 ω_0 。如在 $\omega/\omega_0=0.6$ 处。当 $\omega_0=1000 \text{ rad/s}$ 时，对应的角频率 $\omega=600 \text{ rad/s}$ ，可见，固有角频率 ω_0 越高，误差小的工作频率范围越宽，反之则越窄。由图 1-6 还可以看出，对于阻尼很小的系统，如果输入信号的频率接近系统的固有频率，这时会有谐振作用，又如果输入频率增高到远远超过固有频率时，则此时的幅值比将大大减小，说明该系统响应不了这么高的频率。理想的频率响应应该对所有输入频率都具有同一的幅值比。就阻尼比 ξ 而言，最接近理想状态的响应是在 $\xi=0.6\sim 0.7$ 范围。

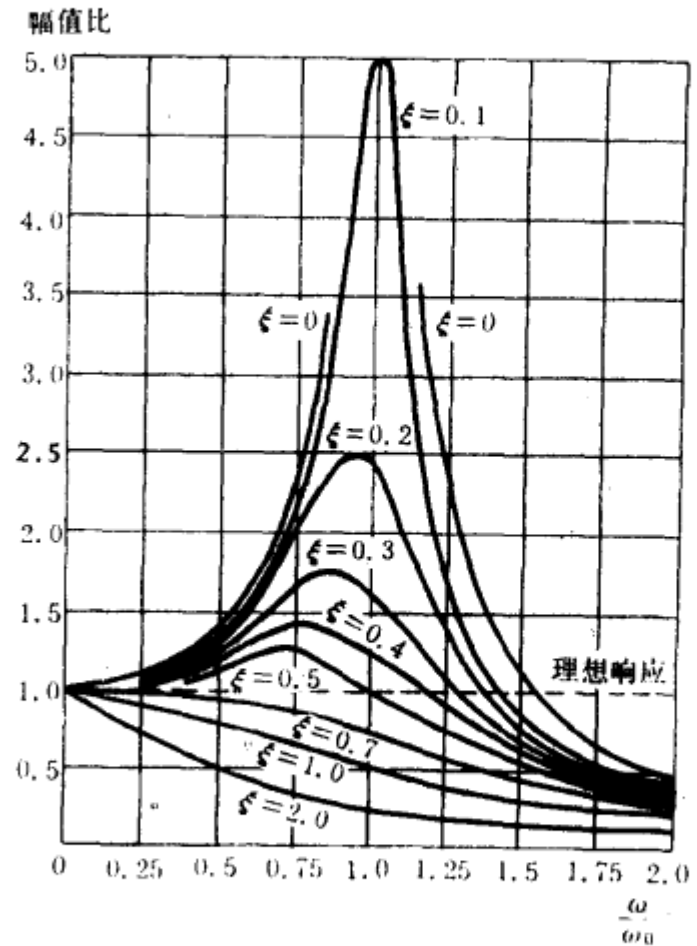


图 1-6 二阶系统的频率响应

由上述分析可知，对于二阶系统，无论是阶跃响应还是频率响应，都要求系统的固有角频率 ω_0 应尽可能地高，而阻尼比 ξ 的最佳值则要求在 $0.6\sim 0.7$ 之间，常用 0.64 。必须指出， ξ 的“最佳值”是为获得阶跃信号和正弦信号的最佳响应而提出的。然而，有些二阶传感器专门设计在过阻尼状态下工作，并不要求迅速响应变化的信号，而仅需给出平均值，这时， ξ 的最佳值应该是最大的。

在了解了以上的数学模型，阶跃响应和频率响应后，就可对本例题作出解答。

从图 1-5 可以估计，40%超调量所对应的 ξ 值约为 0.25 ，就可利用图 1-4 来确定 ω_0 值。在 $\xi=0.25$ 曲线的第一个超调量处，有

$$\omega_0 t = 3.2 \text{ 坐标单位}$$

因此，固有频率
$$\omega_0 = \frac{3.2}{t} = \frac{3.2}{0.8} \text{ rad/s} = 4 \text{ rad/s}$$

由本例可见，用图解方式提供了一种由阶跃响应的超调量百分数估算 ξ 值的迅速而简便的方法。

最好的阶跃响应应该是怎样的呢？

可以这样来分析： ξ 值较小，响应就较快，但超调量却增加； ξ 值较大，则响应迟缓，但无超调。所以，二阶系统阶跃响应的最佳状态应该在满意的响应速度和最小的超调量之间综合权衡，通常采用 $\xi=0.7$ 。

由上可得到结论，二阶系统的响应速度取决于系统的固有角频率 ω_0 和阻尼比 ξ 。为减少阶跃响应的动态误差，系统的阻尼比应在 0.7 左右，系统的固有频率应尽可能的高。

例五 在某一二阶传感器的频率特性测试中发现，谐振发生在频率 216 Hz 处，并得到最大的幅值比为 1.4 ，试估算该传感器的阻尼比 ξ 和固有角频率 ω_0 的大小。

解析

对照图 1-6, 与 $\xi=0.4$ 对应的最大幅值比为 1.4, 所以, 传感器的阻尼比为 $\xi=0.4$ 。

又由该图可见, $\xi=0.4$ 的谐振发生在 $\omega/\omega_0=0.8$ 处, 而 $\omega=2\pi f=2\pi\times 216=1357 \text{ rad/s}$, 因此, 这只传感器的固有频率为

$$\omega_0 = \frac{\omega}{0.8} = \frac{1357}{0.8} = 1696 \text{ rad/s}$$

应当指出, 对于欠阻尼情况, $\omega_0 < \omega_n$, 只有 $\xi=0$ 时, $\omega_0 = \omega_n$ 。这里, ω_n 为无阻尼时系统的固有频率。

例六 设一力传感器可以简化成典型的质量-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 $\xi=0.7$, 试问用它测量频率分别为 600、400 Hz 的正弦交变力时, 其输出与输入幅值比 $A(j\omega)$ 和相位差 $\varphi(\omega)$ 各为多少。

解析

讨论传感器动态特性时, 常用无量纲幅值比 $A(j\omega)$, 当 $f_0=1000 \text{ Hz}$, $\xi=0.7$ 的传感器用来测量 $f=600 \text{ Hz}$ 的信号时,

$$|A(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{600}{1000}\right)^2\right]^2 + 4 \times 0.7^2 \times \left(\frac{600}{1000}\right)^2}} = 0.95$$

$$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1} \frac{2 \times 0.7 \times \left(\frac{600}{1000}\right)}{1 - \left(\frac{600}{1000}\right)^2} = -52.7^\circ$$

同理, 若用来测量 $f=400 \text{ Hz}$ 的信号, 则

$$|A(j\omega)| = 0.99$$

$$\varphi(\omega) = -33.7^\circ$$

由上可见, 在 $\xi=0.7$ 的情况下, 该传感器对于 $\omega/\omega_0 \leq 0.6$ 这一频率段的信号, 其幅值比的变化量不大于 5%, 而对于 $\omega/\omega_0 \leq 4$ 时, 其幅值比变化量不大于 1%。该传感器的输出相对于输入的滞后时间为

$$\tau = \frac{\varphi(\omega)}{\omega} = \frac{-52.7^\circ}{2\pi \times 600} = -13.4 \text{ ms}$$

$$\tau = \frac{\varphi(\omega)}{\omega} = \frac{-33.7^\circ}{2\pi \times 400} = -14.0 \text{ ms}$$

两者相差很小, 说明相位差 $\varphi(\omega)$ 与被测信号圆频率 ω 近似成直线关系。如果被测信号中有多种频率成分时, 由于各个频率成分通过传感器后输出的滞后时间近似为常数, 因而不致引起失真。

需要强调指出的是, 同样是二阶测量系统, 即使其结构也都是由质量-弹簧-阻尼系统组成, 当激励位置不同, 是作用在质量块上, 还是作用在基础上, 或者激励(被测量)与响应(即输出信号)有着不同的组合方式时, 其传递函数形式可能会有很大的差别, 从而有着完全不同的频率响应特性。

1.2 习题与思考题

- 1-1 试述传感器的定义及组成，传感器有哪几种分类方法？各有什么特点？
- 1-2 衡量传感器静态特性的重要指标有哪些？它们是如何定义的？
- 1-3 设某压力传感器的校准数据如表 1-4 中“输出值”栏所示，试分别计算以端点连线平移线和最小二乘直线为工作特性时的非线性度、迟滞和重复性误差。

表 1-4 校准数据列表

压力 (MPa)	输出值 (mV)					
	第一次循环		第二次循环		第三次循环	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0	-2.74	-2.72	-2.71	-2.68	-2.68	-2.67
0.02	0.56	0.66	0.61	0.68	0.64	0.69
0.04	3.95	4.05	3.99	4.09	4.02	4.11
0.06	7.39	7.49	7.42	7.52	7.45	7.52
0.08	10.88	10.94	10.92	10.88	10.94	10.99
0.10	14.42	14.42	14.47	14.47	14.46	14.46

1-4 某一阶传感器的时间常数为 6 ms，幅值比 0.7，试求相当于 $\omega\tau=1$ 时的频率和在此频率处幅值的百分误差。

1-5 有两个测量系统，它们的动态特性可分别用下面两个微分方程描述，试求这两个系统的时间常数 τ 和静态灵敏度 k 。

$$a. \quad 30 \frac{dy}{dt} + 3y = 1.5 \times 10^{-5} \theta_1$$

式中 y ——输出电压，V；

θ_1 ——输入温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

$$b. \quad 1.4 \frac{dy}{dt} + 4.2y = 9.6x$$

式中 y ——输出电压；V；

x ——输入压力，Pa。

1-6 已知一热电偶的时间常数 $\tau=10\text{ s}$ ，如果用它来测量一台炉子的温度，炉内温度在 540°C 和 500°C 之间近似正弦曲线波动，周期为 80 s，静态灵敏度 $k=1$ ，试求该热电偶输出的最大值和最小值，以及输入与输出信号之间的相位差和滞后时间。

1-7 一只具有单位稳态增益的一阶传感器，其时间常数为 1 s，试求 (1) 输入 1V 阶跃电压时，在 1 s、2 s、3 s 和 4 s 后的输出电压值；(2) 阶跃响应的初始频率。

1-8 用一只时间常数为 0.355 s 的一阶传感器去测量周期分别为 1 s、2 s 和 3 s 的正弦信号，问幅值误差为多少？

1-9 若用一阶传感器作 100 Hz 正弦信号的测试，如幅值误差要求限制在 5% 以内，则时间常数应取多少？若在该时间常数下，同一传感器作 50 Hz 正弦信号的测试，这时的幅值误差和相角差有多大？

1-10 试区别阻尼系数 c 和阻尼比 ξ ，为什么在讨论传感器的动态响应时一般采用阻尼比 ξ ？

1-11 一只二阶线性传感器的质量为 6 g，刚度为 1 N/mm²，试计算该传感器的固有频率 f_0 ；若 F 为阶跃输入力，试求该传感器的响应刚好不产生超调所必需的阻尼系数 c 。

1-12 把一只力传感器作为二阶振荡系统处理，已知其固有频率为 800 Hz，阻尼比 $\xi=0.14$ ，现用它作工作频率为 400 Hz 的正弦变化的外力测试时，其幅值比 $A(j\omega)$ 和相位角 $\varphi(\omega)$ 各为多少；又若该传感器的阻尼比 ξ 为 0.7 时， $A(j\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 又将如何变化？

1-13 作为二阶系统来处理的两只加速度传感器，其固有频率分别为 25 kHz 和 45 kHz，阻尼比均为 0.3，若用以测量频率为 10 kHz 的正弦输入振动加速度，试问，应选用哪一种固有频率的传感器，为什么？并计算在测量时将产生多大的振幅误差和相位误差？

1-14 某加速度传感器的动态特性可以用如下的微分方程来描述，

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 3.0 \times 10^3 \frac{dy}{dt} + 2.25 \times 10^{10}y = 11.0 \times 10^{10}x$$

式中 y ——输出电荷量，pC；

x ——输入加速度值，m/s²。

试确定该传感器的 ω_n ， ξ 和静态灵敏度 k 的大小。如果测量的频率可高达无阻尼固有频率的五分之一，其允许误差为 $\pm 5\%$ ，试确定该加速度传感器的最高工作频率 (Hz)。

1-15 已知某二阶系统传感器的固有频率 $f_0=10$ kHz，阻尼比 $\xi=0.1$ ，若要求传感器的输出幅值误差小于 3%，试确定该传感器的工作频率范围。

1-16 设某传感器是典型的质量-弹簧-阻尼系统，已知质量 $m=1$ kg，弹簧刚度 $k=1000$ N/m，阻尼比 $\xi=0.5$ ，试分析该传感器对圆频率分别为 $\omega=10$ 、30、50 rad/s 的响应特性曲线。

第二章 电位器式传感器

2.1 例题详解

例一 设计一只具有分流电阻的环形线绕电位器。已知线性电位器的总电阻 $R_0=4.8$ k Ω ，环形电位器的骨架半径 $R_{内}=20$ mm，电源电压 $U=27$ V (d.c.)，采用康铜丝作电阻丝 ($\rho=0.5$ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)，电阻丝中最大电流密度 $j=5$ A/mm²，现要求该电位器能实现表 2-1 所列的函数特性 $U=f(\alpha)$ ，试求线性电位器的结构参数和分流电阻值。

表 2-1 电位器的函数特性

转角 α (度)	0	34	68	102	136	170	204	238	272	306	340
输出电压 (V)	27	20.3	15.2	10.8	8.1	5.8	4.3	2.8	1.7	0.8	0
两端电位差 (V)	6.7	5.1	4.4	2.7	2.3	1.5	1.5	1.1	0.9	0.8	

解析

设计具有分流电阻的环形线绕电位器包括两部分内容：线性线绕电位器的设计和分流电阻的阻值计算。

1. 电位器结构设计

(1) 结构参数 环形骨架内外直径 $D_{外}$ ， $D_{内}$ ；环形骨架矩形截面厚度 b 与高度 h ；环形电位器的工作总行程 l_0 和最大工作角度 α_M 。

(2) 电气参数 电阻丝材料的电阻率 ρ ，导线直径 d ， d_1 ，节距 t ，匝数 W ，总电阻 R_0 ，电流密度 j ，导线总长度 $l_{总}$ ，一匝导线的平均长度 l_0 。

(3) 主要计算公式

a. 电刷工作总行程 $l_0=Wt=W(d_1+0.01)$ 。

b. 一匝导线平均长度 $l_0=2(h+b)$ ，由于

$$R_0 = \rho \frac{l_{总}}{S} = \rho \frac{4l_0W}{\pi d^2}$$

因此

$$l_0 = \frac{R\pi d^2}{4\rho W}$$

对于环形骨架，

$$l_0 = \pi D_{内} \times \frac{\alpha_M}{360}$$

c. 由允许电流密度求导线直径 d

$$d \geq \sqrt{\frac{4I_{max}}{\pi[j]}}$$

式中 $[j]$ 为导线允许电流密度，一般取 5—10 A/mm²，视长期或短期工作情况而定。

线性电位器的结构尺寸与电气参数设计完后即可计算分流电阻的大小。

2. 分流电阻的计算公式

首先找到给定非线性特性中曲线斜率最大的一段，该段不接分流电阻，且通过的电流最大，依该电流来设计线性电位器的参数。由于最大斜率一般在首段或未段，并且是均匀分段的。为此可推导出计算分流电阻的公式

$$r_i = \frac{\Delta R'_i \times \Delta R'_i}{\frac{\Delta U_1}{\Delta U_i} \Delta R'_i - \Delta R'_i}$$

式中 r_i ——第 i 段分流电阻值；

$\Delta R'_1$ ——第一段线性电位器的电阻值；

$\Delta R'_i$ ——第 i 段线性电位器的电阻值；

ΔU_1 ——第一段并联分流电阻后电位差值，若第一段不并联 r_1 电阻，则 ΔU_1 即为线性电位器的第一段电位差值；

ΔU_i ——第 i 段并联分流电阻后电位差值。

3. 具体计算数据

由于第一段斜率为最大，通过线性电位器电流为最大，依据题意， $\Delta U_1 = 6.7 \text{ V}$ ， $\Delta R'_1 = 480 \Omega$ ，因此，

$$I_{\max} = \frac{\Delta U_1}{\Delta R'_1} = \frac{6.7}{480} = 14 \text{ mA}$$

$$d \geq \sqrt{\frac{4I_{\max}}{\pi[5]}} = \sqrt{\frac{4 \times 14 \times 10^{-3}}{\pi \times 5}} = 0.06 \text{ mm}$$

规格化后取电阻丝直径 $d = 0.06 \text{ mm}$ 。带绝缘层的电阻丝直径 $d_1 = 0.06 + 0.015 = 0.075 \text{ mm}$ 。

$$t = d_1 + 0.01 = 0.085 \text{ mm}$$

$$l_0 = \pi D_{\text{内}} \frac{\alpha_M}{360} = 3.14 \times 40 \times \frac{340}{360} = 118.6 \text{ mm}$$

$$W = \frac{l_0}{t} = \frac{118.6}{0.085} = 1395 \text{ 匝}$$

$$l_a = \frac{R \pi d^2}{4W\rho} = \frac{4.8 \times 10^3 \times 3.14 \times (0.06)^2}{4 \times 1395 \times 5 \times 10^{-4}} = 19.5 \text{ mm}$$

(为加工方便，取 $l_a = 20 \text{ mm}$)

$$l_a = 2(h+b), \text{ 取 } b = 2 \text{ mm}$$

$$h = 8 \text{ mm}$$

$$l_{\text{总}} = l_a W = 20 \times 1395 = 27900 \text{ mm} = 27.9 \text{ m}$$

再求各段分流电阻值，由于均匀分段，所以 $\Delta R'_1 = \Delta R'_2 = \dots = \Delta R'_i$ ，于是

$$r_2 = \frac{\Delta R'_2 \times \Delta R'_1}{\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \Delta R'_2 - \Delta R'_1} = \frac{480 \times 480}{\frac{6.7}{5.1} \times 480 - 480} = 1.53 \text{ k}\Omega$$

$$r_3 = \frac{\Delta R'_3 \times \Delta R'_1}{\frac{\Delta U_1}{\Delta U_3} \Delta R'_3 - \Delta R'_1} = \frac{480 \times 480}{\frac{6.7}{4.4} \times 480 - 480} = 918.3 \Omega$$

依此类推，分别求出

$$r_4=324 \Omega \quad r_5=250.9 \Omega \quad r_6=138.5 \Omega$$

$$r_7=138.5 \Omega \quad r_8=94.3 \Omega \quad r_9=74.5 \Omega$$

$$r_{10}=65.1 \Omega$$

例二 有一电位器式位移传感器，其线圈总电阻是 $10 \text{ k}\Omega$ ，电刷最大行程 4 mm 。若最大消耗功率不允许超过 40 mW ，传感器所用激励电压为允许的最大激励电压，试确定输入位移量为 1.2 mm 时的输出电压值。

解 析

该位移传感器工作在空载状态，输出电压 U_{sc} 可确定如下，令

$$R = \frac{R_0}{l_0} l$$

$$U_{sc} = U_{sr} \frac{l}{l_0}$$

式中 l ——输入位移量；

l_0 ——电刷最大行程；

U_{sc} ——输出电压；

U_{sr} ——输入激励电压。

对于空载电位器，其输出电压与输入位移间呈线性关系，并可分析得到，传感器灵敏度的提高几乎可完全依靠增加激励电压来达到。然而激励电压不可能任意增加，它是由电位器线圈的细电阻丝允许的最大消耗功率 P 决定的。所以，允许的最大激励电压为

$$U_{sr} = \sqrt{PR_0}$$

把已知数代入上式，得

$$U_{sr} = \sqrt{0.04 \times 10000} = 20 \text{ V}$$

因此

$$U_{sc} = U_{sr} \frac{l}{l_0} = 20 \times \frac{1.2}{4} = 6 \text{ V}$$

例三 在上题位移传感器后接一电压表，表的内阻为电位器电阻的两倍，试计算电刷位移量为电刷最大行程 50% 时电位器的负载误差。

解 析

该位移传感器在空载时电刷位移量为电刷最大行程 50% 时的输出电压为

$$U_{sc} = \frac{U_{sr}}{2} = 0.5U_{sr}$$

有负载时的输出电压为

$$U_{sc} = U_{sr} \left[\frac{x_m}{x} + \frac{R_0}{R_x} \left(1 - \frac{x}{x_m} \right) \right]^{-1}$$

式中 x_m ——电刷最大位移量；

x ——输入位移量；

R_0 ——电位器的总电阻；

R_x ——电压表内阻。

将已知数代入上式，得

$$U_{sc} = U_{sr} \left[2 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \right) \right]^{-1} = 0.44 U_{sr}$$

从而可算出负载误差为

$$e = \frac{(0.44 - 0.5) U_{sr}}{0.5 U_{sr}} \times 100\% = -12\%$$

求得的负载误差带负号，表明读数值比空载的要小。

2.2 习题与思考题

- 2-1 线绕电位器有哪几个主要部分组成？各有什么要求？
- 2-2 线绕电位器的阶梯误差和负载误差是怎样产生的？如何减小这两种误差？
- 2-3 如何提高电位器的分辨力？
- 2-4 设计一只测量线位移的精密线绕电位器，要求如下：
 测量范围 0—10 mm
 分辨力 50 μm
 灵敏度 2.7 V/mm

电阻丝材料选用铂铱合金丝，其电阻率 $\rho = 3.15 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{mm}$ ，当电位器的负载电阻 $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ ，求电位器的最大负载误差。

2-5 要求设计一只电位器式液位传感器，液面上限比下限高 100 mm，当达到液位上限，一只继电器吸合，发出电流控制信号，而在其余液面高度均要有对应电压输出。继电器的线圈电阻为 1250 Ω，吸合电流 5 mA，若要求该液位传感器的非线性误差 $e_{f \max} < 0.8\%$ ，输出电压灵敏度 $U_{sc}/l > 60 \text{ mV/mm}$ ，试求该电位器的总电阻 R_0 ，总长度 l_0 和电源激励电压 U_{sr} 。

2-6 设计一只具有分流电阻的环形电位器，已知线性电位器的总电阻 $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ ，环形电位器的骨架半径 $R_{\text{内}} = 20 \text{ mm}$ ，电源电压 $U_{sr} = 27 \text{ V (d.c.)}$ ，采用康铜丝作电阻丝，最大电流密度 $j = 5 \text{ A/mm}^2$ ，要求电位器能实现表 2-2 所列的函数特性 $U_{sc} = f(\alpha)$ ，试求线性电位器的结构参数及分流电阻值。

表 2-2 函数特性数据

转角 α (度)	34	68	102	136	170	204	238	272	306	340
输出电压 U_{sc} (V)	21.3	17.2	13.4	9.9	7.5	5.4	3.92	2.84	2.06	1.50

2-7 利用电位器作为传感元件，可以做成哪些传感器？试画出电位器式压力传感器的结构示意图，并说明其工作原理。

2-8 试用限制电位器工作段的方法，设计一只工作在最大行程为 30 mm 时输出电压为 3 V 的线性电位器，取负载系数 $K_f = 10$ ，试求该线电位器的电刷总行程与电位器激励电压的大小。

2-9 现欲利用输入电阻为 20 kΩ 的记录仪来测量电位器式传感器的输出电压，如果在满量程的 50% 时测量误差不超过 2%，试确定该电位器的电阻值。

2-10 电位器式传感器的主要优缺点是什么？在选用时如何考虑这些优缺点。

第三章 应变式传感器

3.1 例题详解

例一 将 $100\ \Omega$ 的一个应变计粘贴在低碳钢制的拉伸试件上，若试件的等截面积为 $0.5 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$ ，低碳钢的弹性模量 $E = 200 \times 10^9\ \text{N/m}^2$ ，由 $50\ \text{kN}$ 的拉力所引起的应变计电阻变化为 $1\ \Omega$ ，试求该应变计的灵敏系数。

解析

电阻应变计的灵敏系数 k_0 定义为：放置在被测试件上的应变计在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化，与由此单向应力引起试件表面轴向应变之比，即 $k_0 = (\Delta R/R) / (\Delta l/l)$ 。

由材料力学知识可知，

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

式中 ε ——应变， $\frac{\Delta l}{l}$ ；

σ ——应力， $\frac{F}{S}$ 。

由此可得，

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{ES} = \frac{50000}{0.5 \times 10^{-4} \times 200 \times 10^9} = 0.005$$

因此

$$k_0 = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{1/100}{0.005} = 2$$

例二 灵敏系数为 1.9 的 $100\ \Omega$ 电阻应变计被粘贴在钢制试件上并接入等臂电桥中，当钢试件承受一张力时，电桥的空载输出电压为 $5\ \text{mV}$ ，若应变计允许工作电流是 $15\ \text{mA}$ ，试求这时输出电压的大小。

解析

电阻应变计的测量线路一般都用惠斯登电桥使电阻变化转换成电压变化，为此，先对不平衡四臂电桥作一简单分析。

由电阻应变计与匹配电阻构成惠斯登电桥如图 3-1 所示。

当电桥工作时，设只有一个桥臂电阻变化（单臂电桥），即 R_1 变成 $(R_1 + \Delta R_1)$ ，这时，

$$U_{AB} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} U_{sr}$$

由于 $R_1 = R_2 = R$ ，得

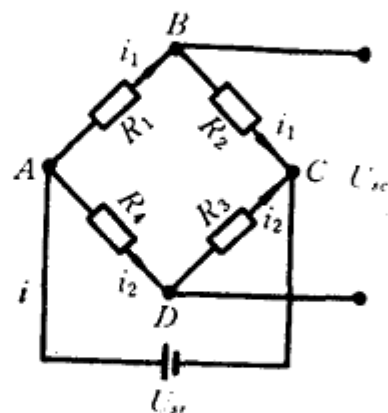


图 3-1 用于应变测量的电阻桥路

$$U_{AB} = \frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} U_{sr}$$

于是，输出电压为

$$U_{sc} = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} U_{sr}$$

如果 $\Delta R \ll R$ ，则有

$$U_{sc} = \frac{U_{sr}}{4} \times \frac{\Delta R}{R}$$

用同样方法分析两个桥臂电阻 R_1 、 R_2 变化（双臂电桥或半桥），这时输出电压为

$$U_{sr} = \frac{1}{4} U_{sr} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} \right)$$

假设两个电阻变化值 ΔR_1 、 ΔR_2 的大小和符号相同，它们对电桥的作用会相互抵消，输出电压仍为零，这种效果在应变计的温度补偿中得到应用。又若 ΔR_1 、 ΔR_2 大小相等而符号相反，则输出电压为

$$U_{sc} = \frac{1}{2} U_{sr} \frac{\Delta R}{R}$$

推而广之，如果四个桥臂电阻都有变化（全桥式桥路），分别为 $(R_1 + \Delta R_1)$ 、 $(R_2 - \Delta R_2)$ 、 $(R_3 - \Delta R_3)$ 和 $(R_4 + \Delta R_4)$ ，则相应的输出电压可用下式表示

$$U_{sc} = U_{sr} \frac{\Delta R}{R}$$

式中 $\Delta R = \Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ 。

由题意可知，

$$U_{sc} = \frac{1}{4} U_{sr} k_0 \frac{\Delta l}{l}$$

激励电压（桥压）为

$$U_{sr} = 2iR = 2 \times 15 \times 10^{-3} \times 100 = 3 \text{ V}$$

电桥的空载输出电压为

$$U_0 = \frac{1}{4} U_{sr} k_0 \frac{\Delta l}{l}$$

所以

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{4U_0}{U_{sr} k_0} = \frac{4 \times 5 \times 10^{-3}}{3 \times 1.9} = 3509 \mu\epsilon$$

电桥输出电压为

$$U_{sc} = \frac{1}{4} U_{sr} k_0 \frac{\Delta l}{l} = \frac{3}{4} \times 1.9 \times 3509 = 5 \text{ V}$$

3.2 习题与思考题

3-1 一试件的轴向应变 $\epsilon_x = 0.0015$ ，表示多大微应变？若已知试件的轴向微应变为 $2000 \mu\epsilon$ ，表示试件的轴向相对伸长率为百分之几？

3-2 某 100Ω 电阻应变计的额定功耗为 40 mW ，如接入等臂电桥中，试确定所用的激励电压。

3-3 假设某电阻应变计在输入应变为 $5000 \mu\epsilon$ 时电阻变化为 1% ，试确定该应变计的灵敏系数。又若在使用该应变计的过程中，采用的灵敏系数为 1.9 ，试确定由此而产生的测量误差的正负和大小。

3-4 某典型应变计的技术指标如下：

- 应变计电阻 标称值 $150 \Omega (\pm 5\%)$ ，
- 灵敏系数 2 (公差 0.2%)，
- 疲劳寿命 10^7 次，
- 横向灵敏系数 0.3% ，
- 零漂 在最高工作温度的 0.7 倍时为 $10 \mu\epsilon/h$ ，

试解释上述各技术指标的含义。

3-5 某等臂电桥接有一个 200Ω 电阻的工作应变计，假定电桥的输出电阻为 200Ω ，电桥电源为 $6V$ ，灵敏系数 $k_0=2$ ，工作应变计承受的应变为 $350 \mu\epsilon$ ，试求用内阻分别为 $20 k\Omega$ 、 $1 k\Omega$ 和 250Ω 的电压表测量时各表指示的输出电压。

3-6 有一专用应变计，要求它在测试时所耗散的功率不超过 $100 mW$ ，应变计电阻为 150Ω ，试问电桥的最大激励电压为多少。

3-7 一应变片贴在标准试件上，其泊松比 $\mu=0.3$ ，试件受轴向拉伸，如图 3-2 所示。已知 $\epsilon_x=1000 \mu\epsilon$ ，电阻丝轴向应变的灵敏系数 $k_x=2$ ，横向灵敏度 $C=4\%$ ，试求 $\Delta R/R$ 和 $R=120 \Omega$ 时的 ΔR 。

3-8 一材料为钢的实心圆柱形试件，直径 $d=10 mm$ ，材料的弹性模量 $E=2 \times 10^{11} N/m^2$ ，泊松比 $\mu=0.285$ ，试件上贴有一片金属电阻应变片，其主轴线与试件加工方向垂直，如图 3-3 所示，若已知应变片的轴向灵敏度 $k_x=2$ ，横向灵敏度 $C=4\%$ ，当试件受到压缩力 $F=3 \times 10^4 N$ 作用时，应变片的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 为多少。

3-9 在材料为钢的实心圆柱形试件上，沿轴线和圆周方向各粘贴一片电阻 120Ω 的金属电阻应变片，如图 3-4 所示，把这两片应变片接入差动电桥，已知钢的泊松比 $\mu=0.285$ ，应变片的灵敏系数 $k_0=2$ ，电桥电源电压 $U_{sr}=6 V(d.c.)$ ，当试件受轴向拉伸时，测得应变片 R_1 的电阻变化值 $\Delta R_1=0.48 \Omega$ ，试求电桥的输出电压。



图 3-2 题 3-7 图



图 3-3 题 3-8 图

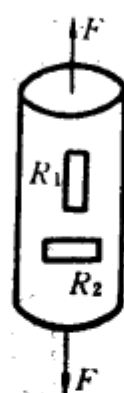


图 3-4 题 3-9 图

3-10 已知一测力传感器的电阻应变片的阻值 $R=120 \Omega$ ，灵敏度系数 $k_0=2$ ，若将它接入第一类对称电桥，电桥的供电电压 $U_{sr}=10V(d.c.)$ ，要求电桥的非线性误差 $e_f < 0.5\%$ ，试求应变片的最大应变 ϵ_{max} 应小于多少，并求最大应变时电桥的输出电压。

3-11 钢轴与电机连接驱动一个恒定负载力矩，用电阻应变计测量该力矩大小。将电阻值 $120\ \Omega$ 、灵敏系数 $k_0=2$ 的应变片贴在轴上，且使应变计的轴线与驱动轴的轴线成 45° 角，如图 3-5 所示，钢轴的剪切模量是 $8 \times 10^6\ \text{kg/cm}^2$ ，轴的半径为 $15\ \text{mm}$ ，当加载时应变计的电阻变化为 $0.24\ \Omega$ ，求负载力矩。

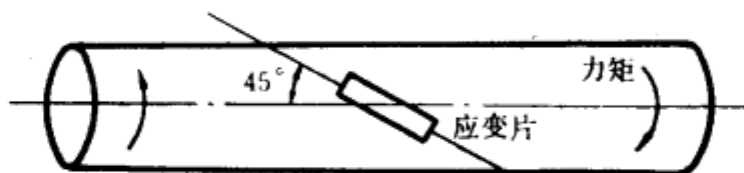


图 3-5 题 3-11 图

3-12 膜片式弹性元件当其周边固定时在压强作用下的应变分布如图 3-6 所示，经分析，其径向应变为

$$\epsilon_r = \frac{3p}{8h^2E}(1-\mu^2)(a^2-3r^2)$$

轴向应变为

$$\epsilon_t = \frac{3p}{8h^2E}(1-\mu^2)(a^2-r^2)$$

式中 p ——压强， kg/cm^2 ；
 h ——膜片的厚度；
 a ——膜片的半径；
 r ——任意一点半径；
 E ——膜片材料的弹性模量；
 μ ——膜片材料的泊松比。

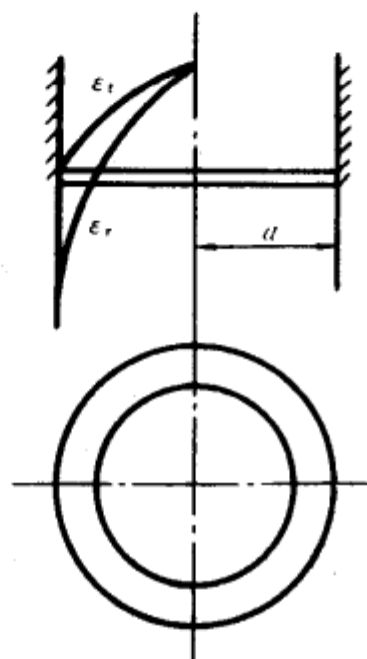


图 3-6 题 3-12 图

试求 (1) 当半径为何值时径向应变为零；(2) 如利用四片应变片来组成全桥电路，应变片在全桥中的布置位置如何；(3) 假设应变片阻值 $R_0=120\ \Omega$ ，桥压为 $10\ \text{V}$ ，当 $\Delta R=0.24\ \Omega$ 时，全桥输出电压的大小。

3-13 一台采用等强度梁的电子秤，在梁的上下两面各贴有二片电阻应变片，做成称重传感器，如图 3-7 所示。已知 $l=100\ \text{mm}$ ， $b=11\ \text{mm}$ ， $t=3\ \text{mm}$ ， $E=2.1 \times 10^4\ \text{N/mm}^2$ ， $k_0=2$ ，接入直流四臂差动电桥，供桥电压 $6\ \text{V}$ ，当秤重 $0.5\ \text{kg}$ 时，电桥的输出电压 U_{sc} 为多大。

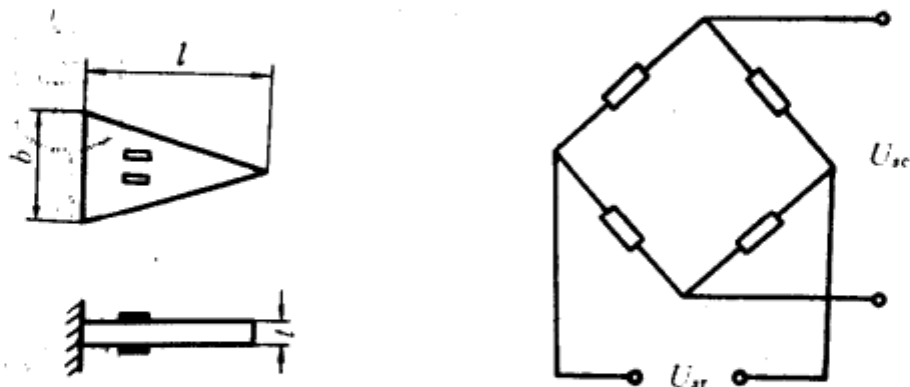


图 3-7 题 3-13 图

3-14 应变片测力传感器的弹性元件为钢质圆柱体，直径 $d=40\text{ mm}$ ，在圆柱体表面粘贴四片阻值均为 $120\ \Omega$ ，灵敏系数 $k_0=2$ 的金属箔式应变片，不考虑应变片的横向灵敏度，钢的弹性模量 $E=2\times 10^{11}\text{ N/m}^2$ ， $\mu=0.3$ ，试求 (1) 正确标出四片应变片在圆柱形弹性元件上的位置，并说明理由；(2) 绘出相应的电桥测量电路，注明应变片符号，当供桥电压 $U_{sr}=6\text{ V(d.c.)}$ ，所受力 $F=1\text{ N}$ 时，传感器接电桥电路后电压灵敏度的大小。

3-15 现有基长为 10 mm 与 20 mm 的两种丝式应变片，欲测钢构件频率为 10 kHz 的动态应力，若要求应变波幅测量的相对误差小于 0.5% ，试问应选用哪一种？为什么？

3-16 证明差动电桥线路能实现温度补偿。

3-17 举例说明应变式传感器种类及工作原理。

第四章 电容式传感器

4.1 例题详解

例一 现有一只 0—20 mm 的电容式位移传感器，其结构如图 4-1 (a) 所示。已知 $L=25$ mm, $R_1=6$ mm, $R_2=5.7$ mm, $r=4.5$ mm, C_{BC} 构成固定电容 C_F , C_{DC} 随活动导杆的伸入而变化，拟采用理想运放电路，试回答：

- (1) 要求运放输出电压与输入位移 x 成正比，在运放线路中 C_F 与 C_x 应如何连接？
- (2) 活动导杆每伸入 1 mm 所引起的电容变化量为多大？
- (3) 输入电压 $U_{sr}=6$ V 时，输出电压 U_{sc} 为多少？
- (4) 固定电容 C_F 的作用何在？
- (5) 传感器与运放线路的连接线对传感器的输出有无影响。

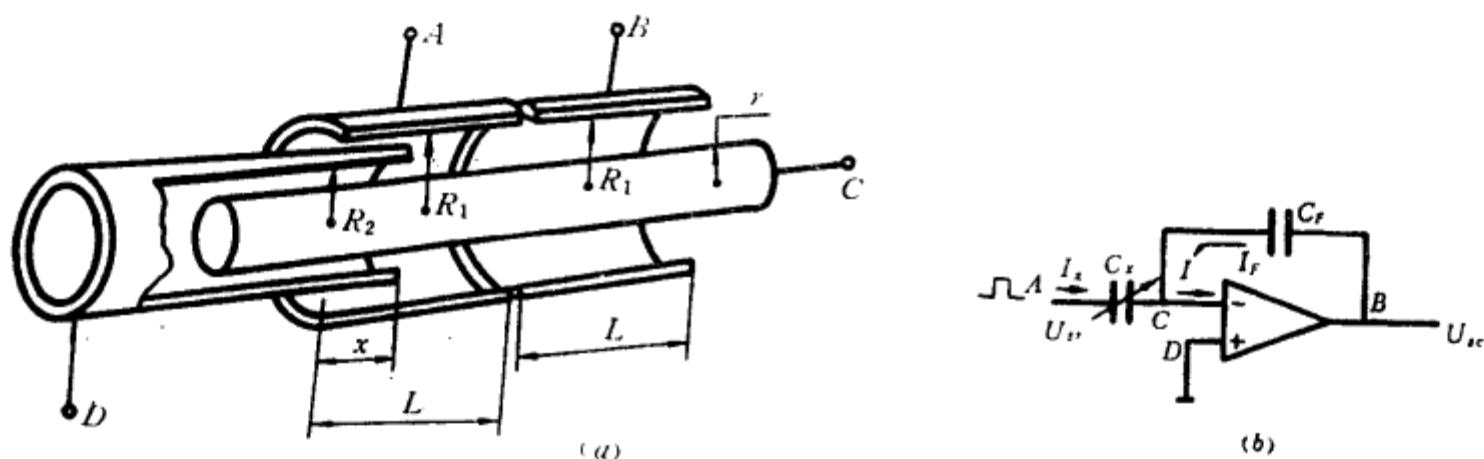


图 4-1 电容式位移传感器的结构示意图 (a) 及其测量线路 (b)

解 析

电容式传感器是将被测物理量转换为电容量变化，然后再通过测量线路把电容量变有有用电信号 (I, U, f) 输出。基本的电容计算公式有两个。

对于平板电容电极，

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{\delta} \quad (\text{F}) \quad (1)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数, $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{4\pi \times 9} = 8.85 \times 10^{-12} (\text{F/m})$;

ϵ_r ——两极板间介质的相对介电常数, 对真空, $\epsilon_r = 1$;

S ——两极板重叠的有效面积, m^2 ;

δ ——两极板间的距离, m 。

对于两同心圆筒状电极，

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{\epsilon_r L}{1.8 \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (\text{pF}) \quad (2)$$

式中 L ——电极长度, cm;
 R_1 ——外电极的内径, mm;
 R_2 ——内电极的外径, mm.

(1)、(2) 两式表明, 当被测量使 δ , S , ϵ_r 发生变化时, 电容量 C 将随之变化, 如果保持其中的两个参数不变, 仅改变另一个参数, 则可分别构成变极距型、变面积型、变介质型三类电容式传感器。几种电容式传感器及其输出特性曲线如图 4-2 所示。

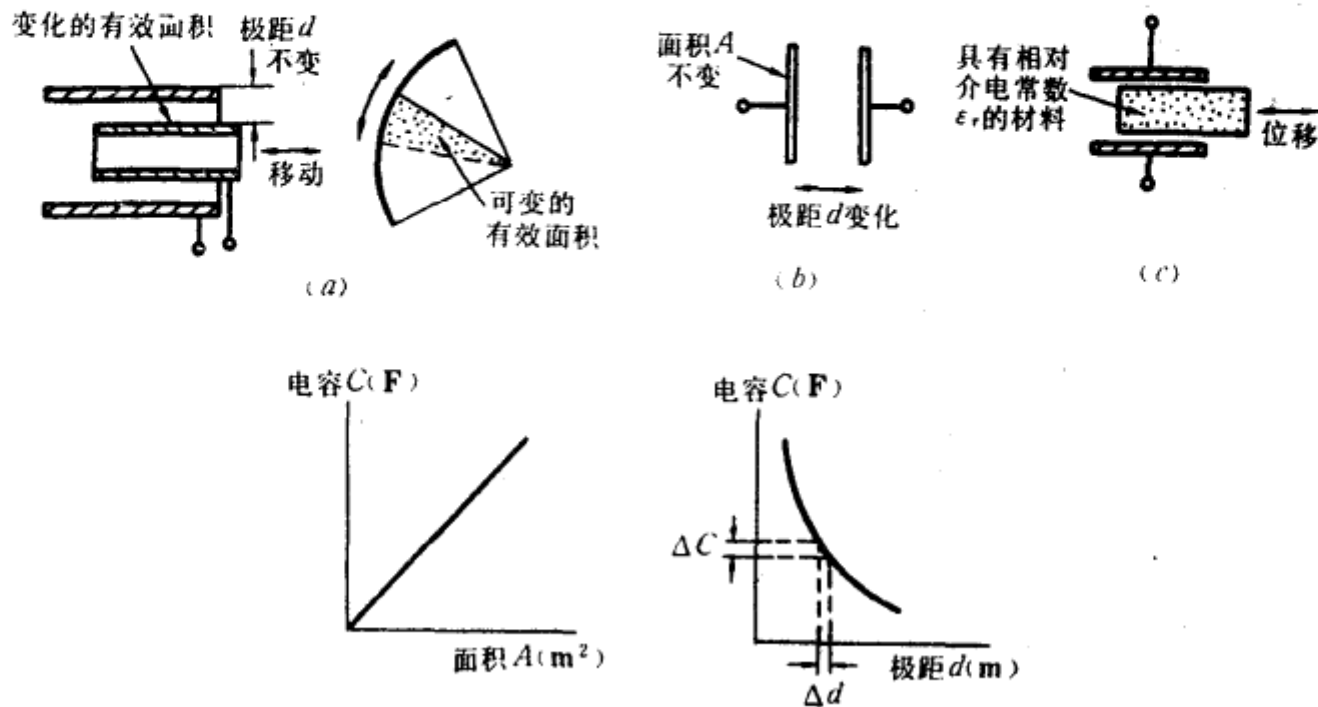


图 4-2 几种电容式传感器及特性曲线

因此, 根据题意可作出具体计算如下:

(1) 为了使 $U_{sc} = f(x)$ 呈线性关系, C_F 与 C_x 要分别接在理想运放线路的反馈端和输入端, 见图 4-1(b)。按理想运算放大器的条件, 可得特性式为

$$\frac{U_{sc}}{U_{sr}} = -\frac{Z_F}{Z_x} = -\frac{C_x}{C_F}$$

式中

$$C_F = \frac{\epsilon_r L}{1.8 \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{1 \times 2.5}{1.8 \ln \frac{6}{4.5}} = 4.828 \text{ pF}$$

$$C_x = \frac{\epsilon_r (1-x)}{1.8 \ln \frac{R_1}{r}}, \quad C_x \text{ 与 } x \text{ 成正比}$$

因此

$$U_{sc} = -U_{sr} \frac{C_x}{C_F}$$

即 U_{sc} 与 x 成正比。

(2) 当 $x = 1 \text{ mm}$,

$$\Delta C_x = \frac{2.5 - 2.4}{1.8 \ln \frac{6}{4.5}} = 0.193 \text{ pF}$$

(3) 当 $U_{sr} = 6 \text{ V}$,

$$U_{sc} = -6 \times \frac{4.635}{4.828} = -5.76 \text{ V}$$

(4) 由于 C_{AC} 与 C_{BC} (即 C_F) 的结构尺寸及材料相同, 它们又处于同样环境条件中, 在特性式中又处于分子分母地位, 因此 C_F 可起到温度与湿度补偿作用。

(5) 电容传感元件的三个引出头 A 、 B 、 C 与理想运放之间可以有一定长度的连接线, 用单股屏蔽导线的屏蔽线与地线相连, 这样, 由电缆线所构成的分布电容 C_{AD} 、 C_{CD} 、 C_{BD} 对主电容 C_x 与 C_F 基本没有影响, 运算放大器不可能完全符合理想条件, 因此电缆连接线不宜太长, 一般在 $5 \sim 10$ m 内工作还是正常的。

例二 有一只变极距电容传感元件, 二极板重叠有效面积为 $8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 两极板间的距离为 1 mm , 已知空气的相对介电常数是 1.0006 , 试计算该传感器的位移灵敏度。

解析

求变极距型电容传感元件的位移灵敏度时只要把计算式 $C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{\delta}$ 对 δ 求导, 即

$$\frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta^2}$$

由此可见, 极距 δ 越小, 灵敏度就越高。

把已知数代入上式, 得位移灵敏度为

$$\begin{aligned} \frac{dC}{d\delta} &= \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1.0006 \times 8 \times 10^{-4}}{(1 \times 10^{-3})^2} \\ &= -70 \times 10^{-10} \text{ F/m} = -7 \text{ nF/m} \end{aligned}$$

式中负号表示当极距 δ 增大时电容值减小。

4.2 习题与思考题

4-1 试计算图 4-3 所示各电容传感元件的总电容表达式。

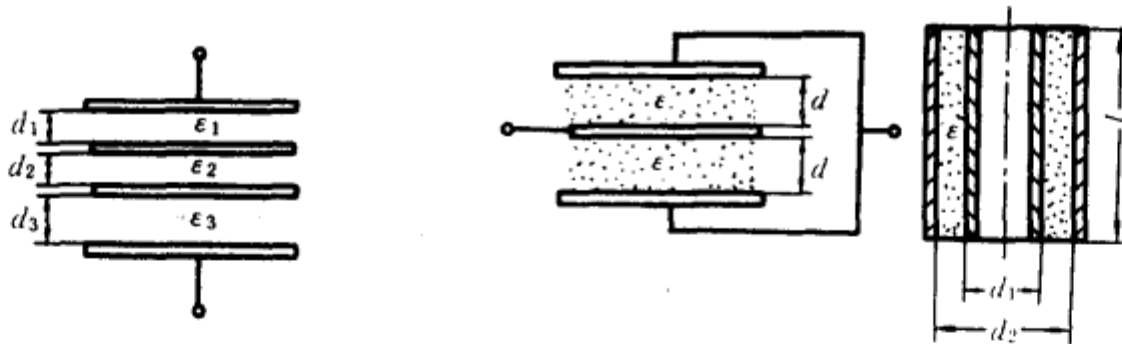


图 4-3 题 4-1 图

4-2 在压力比指示系统中采用的电容传感元件及其电桥测量线路如图 4-4 所示。

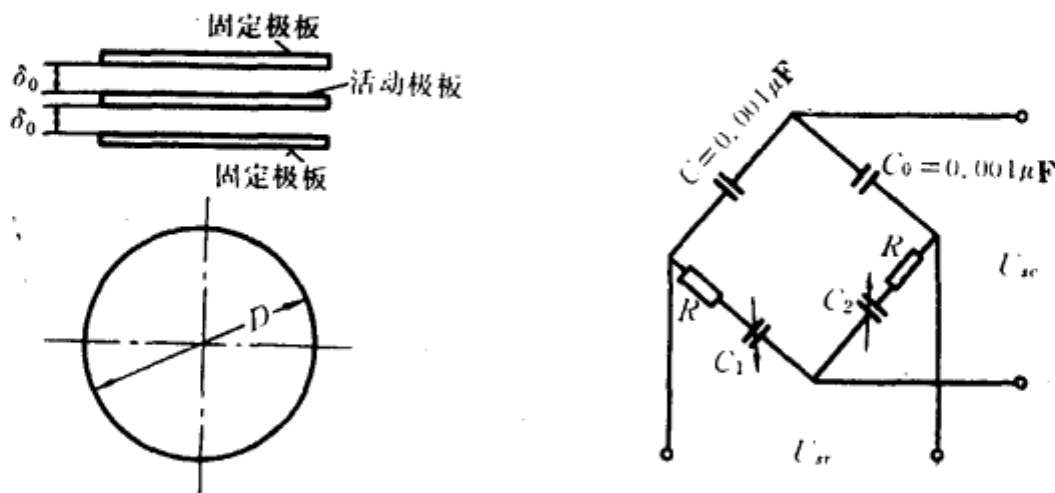


图 4-4 题 4-2 图

已知: $\delta_0=0.25\text{ mm}$; $D=38.2\text{ mm}$; $R=5.1\text{ k}\Omega$; $U_s=60\text{ V(a.c.)}$; $f=400\text{ Hz}$
 试求: (1) 该电容传感器的电压灵敏度 $k_u\text{ V/m}$;

(2) 当电容传感器的活动极板位移 $\Delta\delta=10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 输出电压 U_o 值。

4-3 有一台变间隙非接触式电容测微仪, 其传感器的极限半径 $r=4\text{ mm}$, 假设与被测工件的初始间隙 $\delta_0=0.3\text{ mm}$, 试问

(1) 如果传感器与工件的间隙变化量 $\Delta\delta=\pm 10\text{ }\mu\text{m}$, 电容变化量为多少?

(2) 如果测量电路的灵敏度 $k_u=100\text{ mV/pF}$, 则在 $\Delta\delta=\pm 1\text{ mm}$ 时的输出电压为多少?

4-4 一只电容位移传感器如图 4-5 所示, 由四块置于空气中的平行平板组成。板 A, C 和 D 是固定极板。板 B 是活动极板, 其厚度为 t , 它与固定极板的间距为 d 。B, C 和 D 极板的长度均为 b , A 板的长度为 $2b$, 各板宽度为 l , 忽略板 C 和 D 的间隙及各板的边缘效应, 试推导活动极板 B 从中间位置移动 $x=\pm b/2$ 时电容 C_{AC} 和 C_{AD} 的表达式 ($x=0$ 时为对称位置)。

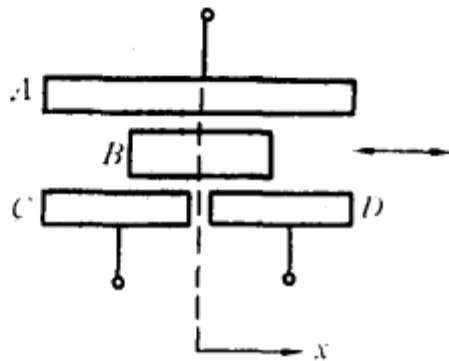


图 4-5 题 4-4 图

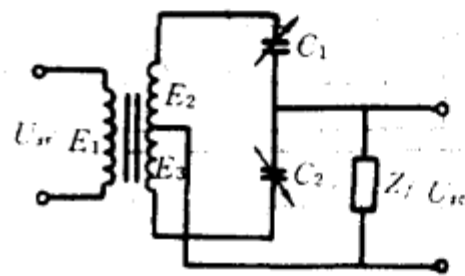


图 4-6 题 4-5 图

4-5 试推导变间隙式差动电容传感元件接入变压器式电桥后的输出特性表达式。线路如图 4-6 所示, C_1 与 C_2 为变间隙式差动电容传感元件, 平衡时, C_1, C_2 极板间隙均为 δ_0 , 设 $E_1=E_2=E_3$, 负载 $Z_f=\infty$ 。

4-6 试计算带固定圆周膜片电容压力传感元件的灵敏度 $(\Delta C/C)/p$, 如图 4-7 所示。

已知半径 r 处的偏移量 y 可用下式表示:

$$y = \frac{3}{16} p \frac{1-\mu^2}{Et^3} (a^2 - r^2)^2$$

式中 p ——压力;

a ——圆膜片半径;

t ——膜片厚度;

μ ——膜片材料的泊松比。

4-7 试述“驱动电缆”的原理, 什么情况下可以不采用“驱动电缆”?

4-8 电容式传感器有哪些优缺点? 适宜于测量哪些参数? 为什么说电容式传感器很有发展前途?

4-9 为什么电容式传感器易受干扰? 采取哪些措施可以减小干扰的影响?

4-10 电容式传感器的温度误差的原因是什么? 如何补偿?

4-11 电容式传感器常用的测量线路有哪几种? 各有什么优缺点?

4-12 为什么电容式传感器特别强调绝缘问题?

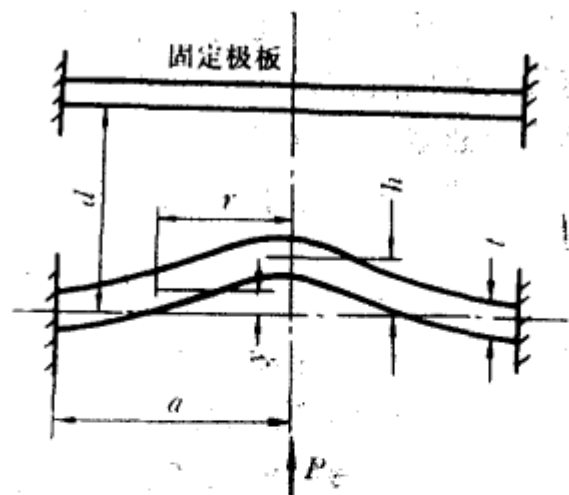


图 4-7 题 4-6 图

第五章 变磁阻式传感器

5.1 例题详解

例一 在某型机中心仪中 M 数传感器采用如图 5-1 所示 E 形差动变压器作为机电转换装置, 试求该传感器的总气隙磁导 G_{δ} , 初级线圈电流 I_1 和次级线圈输出电压 (当气隙变化 0.1 mm 时)。已知: $\delta_0 = 1 \text{ mm}$, $S_1 = S_2 = S_0 = 1 \text{ cm}^2$, 初级线圈激磁电压 $U_{1r} = 10 \text{ V}$, $f = 400 \text{ Hz}$, 初次级线圈分别为 $W_1 = 1000$ 匝, $W_2 = 2000$ 匝, 设中间活动衔铁向右平行移动 0.1 mm (忽略铜电阻, 漏磁通)。

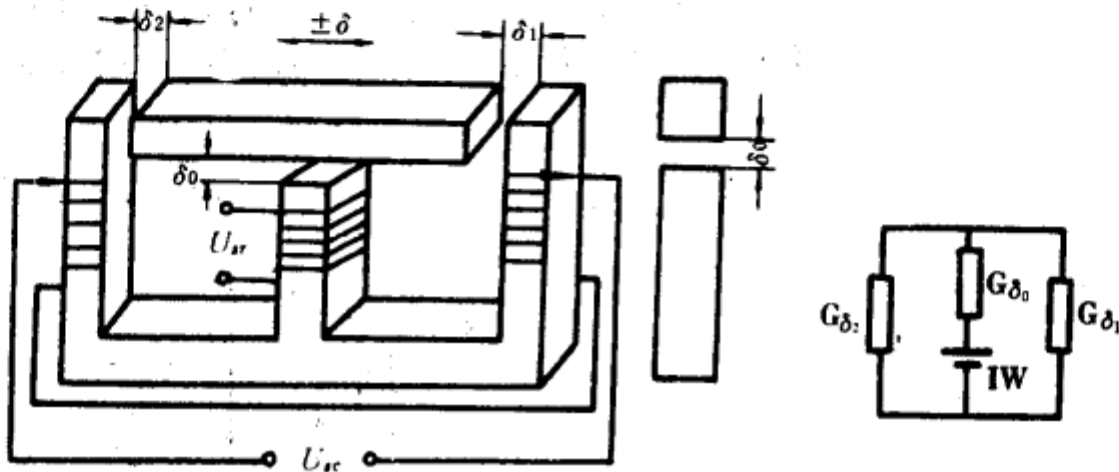


图 5-1 例题一图

解 析

在自动检测系统中较常见的有压力、流量、速度、振幅等物理量的测量, 往往又总是先将它们变换成位移变化, 然后再转换成电量。变磁阻传感器就是把位移量转换成电感量、互感量及线圈阻抗量变化的电量, 为此, 对应地有电感式, 差动变压器式及涡流式传感器, 统称为变磁阻式传感器。

电感式传感器中线圈电感值可由下式表示,

$$L = \frac{\mu_0 S}{\delta} W^2 \quad \text{或} \quad L = W^2 G_{\delta}$$

式中 μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

W ——线圈匝数;

δ ——磁路的长度, 一般指气隙长度, m ;

S ——磁路的截面积, m^2 ;

G_{δ} ——气隙磁导, H 。

差动变压器式传感器中初次级线圈之间的互感为

$$M = W_1 W_2 G_{\delta}$$

式中 W_1 ——初级线圈匝数;

W_2 ——次级线圈匝数。

两次级线圈反接后输出电压的幅值取决于初次级线圈之间电磁耦合的程度，可用下式表示，

$$\dot{U}_{sc} = -j\omega \dot{I}_1 (M_1 - M_2)$$

于是，可根据题意和已知数，计算如下：

各气隙磁导（由等值磁路图）

$$G_{\delta_0} = \frac{\mu_0 S}{\delta_0} = \frac{1}{10} \mu_0$$

$$G_{\delta_1} = \frac{1}{9} \mu_0$$

$$G_{\delta_2} = \frac{1}{11} \mu_0$$

总气隙磁导

$$G_{\delta} = \frac{(G_{\delta_1} + G_{\delta_2}) G_{\delta_0}}{G_{\delta_1} + G_{\delta_2} + G_{\delta_0}} = \frac{20}{299} \mu_0$$

初级线圈电感

$$L_1 = W_1^2 G_{\delta} = (1000)^2 \frac{20}{299} \times 4\pi \times 10^{-7} = 8.4 \times 10^{-2} \text{ H}$$

初级线圈电流

$$I_1 = \frac{U_{sr}}{\omega L} = \frac{10}{2 \times 3.14 \times 400 \times 8.4} = 47.4 \text{ mA}$$

次级线圈互感

$$M_1 = W_1 W_2 G'_{\delta_1}$$

$$\left(G'_{\delta_1} = \frac{G_{\delta_1} G_{\delta_0}}{G_{\delta_1} + G_{\delta_0}} = \frac{1}{19} \mu_0 \right)$$

$$M_1 = 1000 \times 2000 \times \frac{1}{19} \mu_0 = \frac{20}{19} \mu_0 \times 10^5 \text{ H}$$

$$M_2 = W_1 W_2 G'_{\delta_2}$$

$$\left(G'_{\delta_2} = \frac{G_{\delta_2} + G_{\delta_0}}{G_{\delta_2} + G_{\delta_0}} = \frac{1}{21} \mu_0 \right)$$

$$M_2 = 1000 \times 2000 \times \frac{1}{21} \mu_0 = \frac{20}{21} \mu_0 \times 10^5 \text{ H}$$

模值

$$U_{sc} = \omega I_1 (M_1 - M_2)$$

$$= 2 \times 3.14 \times 400 \left(\frac{20}{19} - \frac{20}{21} \right) \times 4 \times 3.14 \times 47.4 \times 10^{-5}$$

$$= 0.15 \text{ V (取有效值二位)}$$

5.2 习题与思考题

5-1 有一只差动电感位移传感器，已知电源电压 $U_{sr} = 4 \text{ V}$ ， $f = 400 \text{ Hz}$ ，传感器线圈铜电阻与电感量分别为 $R = 40 \Omega$ ， $L = 30 \text{ mH}$ ，用两只匹配电阻设计成四臂等阻抗电桥，如

图 5-2, 试求:

- (1) 匹配电阻 R_3 和 R_4 的值;
- (2) 当 $\Delta Z = 10 \Omega$ 时, 分别接成单臂和差动电桥后的输出电压值;
- (3) 用矢量图表明输出电压 U_{sc} 与输入电源电压 U_{sr} 之间的相位差;
- (4) 假设该传感器的两个线圈铜电阻不相等 $R_1 \neq R_2$, 在机械零位时便存在零位电压, 用矢量图分析能否用调整衔铁位置的方法使 $U_{sc} = 0$ 。

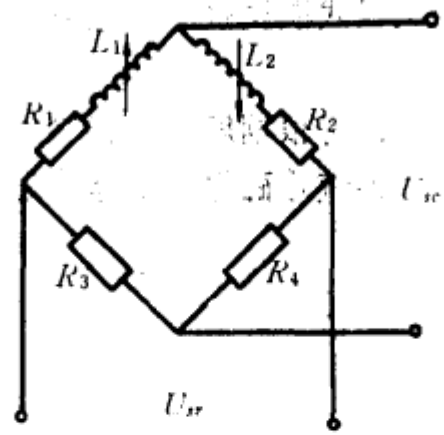


图 5-2 题 5-1 图

5-2 试比较差动电感与简单电感传感器的电感量随气隙变化的特性曲线 (画在同一坐标平面上)。

5-3 电源频率波动对电感式传感器的灵敏度有何影响? 如何确定传感器的最佳电源频率?

5-4 变间隙式, 变截面式和螺管式三种电感式传感器各适用于什么场合, 各有什么优缺点。

5-5 某线性差动变压器式传感器用频率 1 kHz, 峰-峰值为 6 V 的电源激励, 假设衔铁的输入运动是频率 100 Hz 的正弦运动, 位移幅值为 $\pm 3 \text{ mm}$, 已知传感器的灵敏度为 2 V/mm, 试画出激励电压, 输入位移和输出电压的波形。

5-6 上题中线性差动变压器式传感器的技术参数如下:

线性度	0.4%
分辨力	10 μm
零点残余电压	0.5%
热漂移	$< 0.1\% / ^\circ\text{C}$
输出阻抗	2.5 k Ω
响应时间	1 ms

试说明这些参数的含义。

5-7 将两只相同的大功率差动螺管式电感传感器组成平衡式位置传递系统, 如图 5-3 所示, 试定性分析其工作原理。

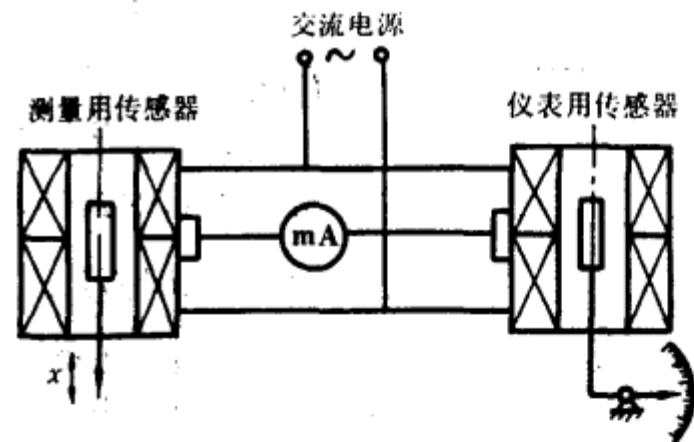


图 5-3 题 5-7 图

5-8 比较差动电感传感器和差动变压器式传感器的异同。

5-9 试从电涡流式传感器的基本工作原理出发, 简要说明它的各种应用。

5-10 使用电涡流式传感器测量位移或振幅时对被测物体要考虑哪些因素, 为什么?

5-11 电涡流式传感器探头线圈为什么通常做成扁平型?

5-12 差动变压器式传感器的激励电压与频率应如何选择?

5-13 造成差动变压器式传感器温度误差的原因是什么? 试述减小温度误差的措施?

5-14 试比较电涡流传感器三种测量电路 (恒定频率调幅式、变频调幅式和调频式) 的优缺点, 并指出它们的应用场合?

$$0.1\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 + 0.36\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 0.9 = 0$$

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \frac{-0.36 \pm \sqrt{0.1296 + 0.36}}{0.2}$$

解此式，舍去不合理的负值，取正值，

$$f_0 = 38.4 \text{ Hz}$$

例二 某振动传感器的技术数据如下（磁电式速度传感器）：

频率范围	20~1000 Hz
幅值范围	5 mm, 最大峰-峰值
加速度范围	0.1~30 g (峰值)
有阻尼固有频率	5 Hz
线圈电阻	600 Ω
横向灵敏度	最大 20%
灵敏度	4.88 \pm 0.2 V/(m/s)
质量	170 g

试求(1) 在有效载荷作用下测得最小频率时的最大振幅数据如上，计算这时的输出电压值；

(2) 当频率为 100 Hz 时测得输出电压峰值为 0.5 V，确定这时的速度和相应位移。

解 析

假设振动是简谐运动，则各振动参数间有如下关系：

位移	$x = A \sin \omega t$	幅值 = $A = \frac{A\omega}{\omega}$
速度	$v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t$	幅值 = $A\omega = \frac{A\omega^2}{\omega}$
加速度	$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin \omega t$	幅值 = $A\omega^2$

将题中已知数分别代入上列几式，得

$$(1) \text{ 速度} = \text{位移} \times \omega = 5 \times 10^{-3} \text{ m} \times 2\pi \times 20 \text{ Hz} = 0.628 \text{ m/s}$$

$$\text{输出电压} = \text{速度} \times \text{灵敏度} = 0.628 \times 4.88 = 3.07 \text{ V}$$

$$(2) \text{ 输出电压} = 0.5 \text{ V (峰值)}$$

$$\text{速度峰值} = \frac{0.5}{4.88} = 0.102 \text{ m/s}$$

$$\text{位移峰值} = \text{速度} / \omega = \frac{0.102}{2\pi \times 100} = 0.16 \text{ mm}$$

6.2 习题与思考题

6-1 某电动式速度传感器的弹簧-质量系统的弹簧刚度 $k = 3200 \text{ N/m}$ ，测得其固有频率 $f_0 = 20 \text{ Hz}$ ，若将传感器固有频率减小为 10 Hz ，问弹簧刚度应为多大。

6-2 电动式速度传感器固有频率为 10 Hz ，质量块重 2.08 N ，气隙磁感应强度 $B_g = 1 \text{ T}$ ，单匝线圈长度为 4 mm ，线圈总匝数 1500 匝，试求弹簧刚度 k 值和灵敏度 k_0 值 ($\text{mV}/(\text{m/s})$)。

6-3 某传感器要求在最大允许振幅误差 2% 以下工作, 若取相对阻尼系数 $\xi=0.6$, 试求 ω/ω_0 的范围。

6-4 试述电动式速度传感器为什么必须满足 $\omega/\omega_0 \gg 1$ 的条件。

6-5 已知电动式振动传感器的固有频率 $f_0=15$ Hz, 阻尼比 $\xi=0.7$, 若输入频率为 $f=45$ Hz 的简谐振动, 求传感器输出的振幅误差为百分之几。

6-6 电动式振动传感器的电磁阻尼是如何产生的?

6-7 试分析绝对式电动测振传感器的工作频率范围, 若要扩展其测量频率范围的上限和下限, 各有什么措施可以采取?

6-8 为什么电动式传感器要考虑温度误差? 有什么办法可减小温度误差?

第七章 压电式传感器

7.1 例题详解

例一 分析压电式加速度传感器的频率响应特性。又若测量电路的总电容 $C=1000\text{pF}$ ，总电阻 $R=500\text{M}\Omega$ ，传感器机械系统固有频率 $f_0=30\text{kHz}$ ，相对阻尼系数 $\xi=0.5$ ，求幅值误差在2%以内的使用频率范围。

解析

压电元件受外力作用时，压电元件的两个极化表面将产生电荷，由于输出电信号非常微弱，通常应将传感器输出信号输入到高输入阻抗的前置放大器（电压放大器或电荷放大器）中转换成低阻抗输出信号，由于前置放大器的输入电阻和压电元件的绝缘电阻都不可能做得无穷大，因此，压电电荷就会通过放大器的输入电阻和传感器本身的泄漏电阻漏掉，这就从原理上决定了压电式传感器不能测量绝对静态物理量。前置放大器的实际输入电压 U_{srm} 与理想输入电压 U_{sm} 之幅值比为

$$\frac{U_{srm}}{U_{sm}} = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$

式中 τ ——测量回路时间常数， $\tau=RC$ ；

ω ——作用在压电元件上的频率。

上式决定了压电传感器的低限频率。

由压电式加速度传感器的频响特性决定其高限频率，其幅值比为，

$$\left| \frac{x_i}{a_0} \right| = \frac{\left(\frac{1}{\omega_0} \right)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right]^2}}$$

式中 ω_0 ——传感器固有频率；

x_i ——质量块相对于传感器壳体位移的振幅；

a_0 ——加速度振幅；

ξ ——相对阻尼系数。

上式决定了振动加速度测量的高限频率。

根据题意，将已知数代入以上二式，便可分别求出低限频率与高限频率。

对于低限频率，

$$\begin{aligned} \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} &= 0.98 \\ 0.96[1+(\omega\tau)^2] &= (\omega\tau)^2 \\ \omega^2 &= \frac{24}{\tau^2} = \frac{24}{(500 \times 10^6 \times 1000 \times 10^{-12})^2} = 96 \\ f &= 1.6 \text{ Hz (低限频率)} \end{aligned}$$

对于高限频率,

$$\left(\frac{1}{\omega_0}\right)^4 = 0.96 \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right]^2 + 2 \times 0.5 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right\}$$

忽略 $\left(\frac{1}{\omega_0}\right)^4$ 无限小项, 得

$$0.96 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 - 0.96 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 0.96 = 0$$

忽略方程解中虚数项, 得近似解

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 0.48$$

$$f = 20.7 \text{ kHz (高限频率)}$$

因此, 该压电加速度传感器使用频率范围为 1.6 Hz—20.7 kHz。

例二 用石英晶体加速度计及电荷放大器测量机器的振动, 已知: 加速度计灵敏度为 5 pC/g, 电荷放大器灵敏度为 50 mV/pC, 当机器达到最大加速度值时相应的输出电压幅值等于 2 V, 试计算该机器的振动加速度。

解析

系统灵敏度 k 等于传感器灵敏度与电荷放大器灵敏度的乘积, 所以,

$$k = 5 \times 50 = 250 \text{ mV/g}$$

测得的加速度 = 测得的电压值 / 系统灵敏度 = $2 / 0.25 = 8 \text{ g}$ 。

7.2 习题与思考题

7-1 试用直角坐标系画出 AT 型, GT 型, DT 型, $x-18.5^\circ$ 的晶体切型的方位图。

7-2 用 ZK-2 型阻抗变换器与压电式传感器相配, 要求低频时灵敏度下降不超过 5%, 求可测频率下限, 已知 ZK-2 的输入阻抗为 2000 M Ω , 测得回路的总电容为 1000 pF。

7-3 已知电压前置放大器的输入电阻为 100 M Ω , 测量回路的总电容为 100 pF, 试求用压电式加速度计相配测量 1 Hz 低频振动时产生的幅值误差。

7-4 用压电式传感器测量最低频率为 1 Hz 的振动, 要求在 1 Hz 时灵敏度下降不超过 5%, 若测量回路的总电容为 500 pF, 求所用电压前置放大器的输入电阻应为多大。

7-5 已知压电式加速度传感器的阻尼比 $\xi = 0.1$, 其无阻尼固有频率 $f_0 = 32 \text{ kHz}$, 若要求传感器的输出幅值误差在 5% 以内, 试确定传感器的最高响应频率。

7-6 有两只压电式加速度传感器, 固有频率分别为 200 kHz 和 35 kHz, 阻尼比均为 0.3, 今欲测频率为 10 Hz 的振动应选用哪一只, 为什么?

7-7 压电式传感器的阻尼比很小, 试分析它为什么可以响应很高频率的输入信号而失真却很小。

7-8 试分析外圆配合压缩式压电加速度传感器受声场噪声和基座应变的影响情况。

7-9 试述压电加速度传感器的工作原理, 绘出其幅-频响应特性曲线和相-频响应特性曲线, 并指出传感器的工作频率范围。

7-10 压电元件在使用时常采用多片串接或并接的结构形式, 试述在不同接法下输出电压、输出电荷、输出电容的关系, 以及每种接法适用于何种场合。

7-11 何谓电压灵敏度 K_v 和电荷灵敏度 K_q , 这两者有什么关系?

7-12 某压电式压力传感器的灵敏度为 80 pC/Pa ，如果它的电容量为 1 nF ，试确定传感器在输入压力为 1.4 Pa 时的输出电压。

7-13 一只测力环在全量程范围内具有灵敏度 3.9 pC/N ，它与一台灵敏度为 10 mV/pC 的电荷放大器连接，在三次试验中测得以下电压值：(1) -100 mV ；(2) 10 V ；(3) -75 V ，试确定三次试验中的被测力大小及性质。

7-14 一只石英晶体加速度的技术数据为，

频率范围	$0-15 \text{ kHz}$
测量范围	$\pm 3500 \text{ g}$
灵敏度	5 pC/g
有阻尼固有频率	22 kHz
质量	0.05 kg
分辨力	0.002 g
横向灵敏度	最大 2%

试求(1) 振动加速度为 0.21 g 时的电荷输出；

(2) 横向振动为 10000 g 时的规定最大电荷输出量。

第八章 谐振式传感器

8.1 思考题

- 8-1 试分析机械二阶系统谐振时，弹性力、惯性力、阻尼力和外力之间的关系。
- 8-2 试述振动筒压力传感器的工作原理。
- 8-3 为什么要求谐振式传感器的品质因素越高越好？
- 8-4 试定性分析改变振动筒压力传感器的筒壁厚度和筒的长度对振筒的谐振频率 f_0 及输出灵敏度的影响。
- 8-5 谐振式传感器输出信号的测量为什么用周期法比频率法精度高？
- 8-6 振动筒压力传感器非线性误差的软件补偿如何进行？
- 8-7 试述振动筒压力传感器温度误差产生的原因，以及补偿措施。
- 8-8 试述振膜式谐振传感器的工作原理及其优缺点。
- 8-9 试述振弦式传感器的工作原理。
- 8-10 当振弦式传感器采用方波间歇激发时，试画出其输出信号波形。
- 8-11 试分析振弦式传感器连续激发电路的工作原理。

第九章 压阻式传感器

9.1 例题详解

例一 在(100)晶面的 $\langle 011 \rangle$ 和 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 晶向上各放置一电阻条,如图9-1所示,试求(1)在0.1 MPa压力作用下电阻条 σ_r 与 σ_t 为何值($\mu=0.28$);(2)两电阻条分别为P型和N型时的 $\Delta R/R$ 值。硅膜片尺寸为 $r=4.17 \times 10^{-3}$ m, $a=5 \times 10^{-3}$ m, $h=0.15 \times 10^{-3}$ m,忽略电阻系本身尺寸对输出的影响。

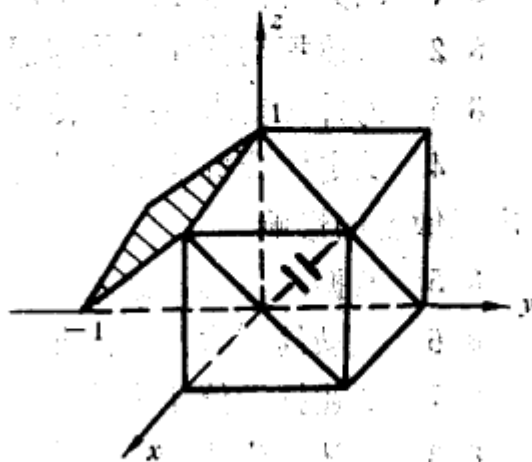


图 9-1 例题一图

解析

压阻式传感器中,晶向是指该晶面的法线方向,在同一晶面上可以扩散无数多根任意方向的P型或N型电阻条,二晶向之间应该是互相垂直的,任意晶向的纵向与横向压阻系数分别由下式决定,

$$\pi_{\parallel} = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_1^2 n_1^2) \quad (1)$$

$$\pi_{\perp} = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (2)$$

式中,方向余弦分别为

$$l_1 = \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} \quad m_1 = \frac{y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} \quad n_1 = \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad m_2 = \frac{y_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad n_2 = \frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad (4)$$

式中 $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 分别为纵向与横向所对应晶轴的截距。

在晶向上受径向和切向应力作用后电阻的变化率为,

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp} \pi_{\perp} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp} \quad (6)$$

压阻式压力传感器的 σ_{\parallel} 与 σ_{\perp} 是根据圆形膜片各点的径向应力 σ_r 与切向应力 σ_t 来决定的,可用下式表示,

$$\sigma_r = \frac{3p}{8h^2} [(1+\mu)a^2 - (3+\mu)r^2] \quad (7)$$

$$\sigma_t = \frac{3q}{8h^2} [(1+\mu)a^2 - (1+3\mu)r^2] \quad (8)$$

于是,可由题意先求出P型电阻条的电阻变化率,设电阻条在(100)晶面内以 $\langle 011 \rangle$ 为纵向, $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 为横向,由晶轴坐标转换到新坐标代入(3)、(4)式可得

$$l_1 = 0 \quad m_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad n_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$l_2=0 \quad m_2=-\frac{1}{\sqrt{2}} \quad n_2=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

再代入(1)(2)式, 由教材上表 9-1 查到 P 型电阻条的 $\pi_{11}=6.6$, $\pi_{12}=-1.1$, $\pi_{44}=138.1$, 因此,

$$\begin{aligned} \pi_{\parallel} &= 6.6 - 2(6.6 + 1.1 - 138.1) \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = 71.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N} \\ &\approx \frac{1}{2} \pi_{44} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi_{\perp} &= -1.1 + (6.6 + 1.1 - 138.1) \frac{1}{2} = -66.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N} \\ &\approx -\frac{1}{2} \pi_{44} \end{aligned}$$

分别代入(7)(8)二式, 求出 σ_r 与 σ_t ,

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{3 \times 0.1 \times 10^6}{8(0.15 \times 10^{-6})^2} [(1+0.28)(5 \times 10^{-3})^2 - (3+0.28)(4.17 \times 10^{-3})^2] \\ &= -41.73 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{3 \times 0.1 \times 10^6}{8(0.15 \times 10^{-6})^2} [(1+0.28)(5 \times 10^{-3})^2 - (1+3 \times 0.28)(4.17 \times 10^{-3})^2] \\ &= 0 \end{aligned}$$

由电阻条在圆膜片位置可知, 以 $\langle 011 \rangle$ 为纵向, 它与 σ_r 一致, 其横向与 σ_t 一致, 而在 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 为横向电阻条中, 其纵向压阻系数 π_{\parallel} 与切向应力 σ_t 一致, 所以

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r &= \pi_{\parallel} \sigma_r + \pi_{\perp} \sigma_t = \pi_{\parallel} \sigma_r \\ &= 71.8 \times 10^{-11} (-41.73 \times 10^6) = -2.996 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t &= \pi_{\parallel} \sigma_t + \pi_{\perp} \sigma_r = \pi_{\perp} \sigma_r \\ &= -66.2 \times (41.73 \times 10^6) = 2.76 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$-\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r \approx \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t$$

大小相等方向相反。

四个电阻条刚好构成差动全桥电路, 可获得最大的输出电压灵敏度。

如果采用 N 型电阻条而其他条件均不变, 则用 $\pi_{11}=-102.2$, $\pi_{12}=53.4$, $\pi_{44}=-13.6$ 代入(1)(2)式,

$$\pi_{\parallel} = -102.2 - 2(-102.2 - 53.4 + 13.6) \frac{1}{4} = -31.2 \times 10^{-11} \text{ N/m}$$

$$\pi_{\perp} = 53.4 + (-102.2 - 53.4 + 13.6) \frac{1}{2} = -17.6 \times 10^{-11} \text{ N/m}$$

于是

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r = \pi_{\parallel} \sigma_r + \pi_{\perp} \sigma_t = -31.2 \times 10^{-11} (-41.72) \times 10^6 = 1.3 \times 10^{-2}$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \pi_{\parallel} \sigma_t + \pi_{\perp} \sigma_r = -17.6 \times 10^{-11} (-41.72) \times 10^6 = 0.74 \times 10^{-2}$$

由此看出，用 N 型扩散电阻条引起的电阻变化率小，而且受压力后变化方向一致，构成惠斯登电桥时，输出电压灵敏度很低。

9.2 习题与思考题

9-1 用密勒指数表示图 9-2 中剖面线所示的晶面的晶向。

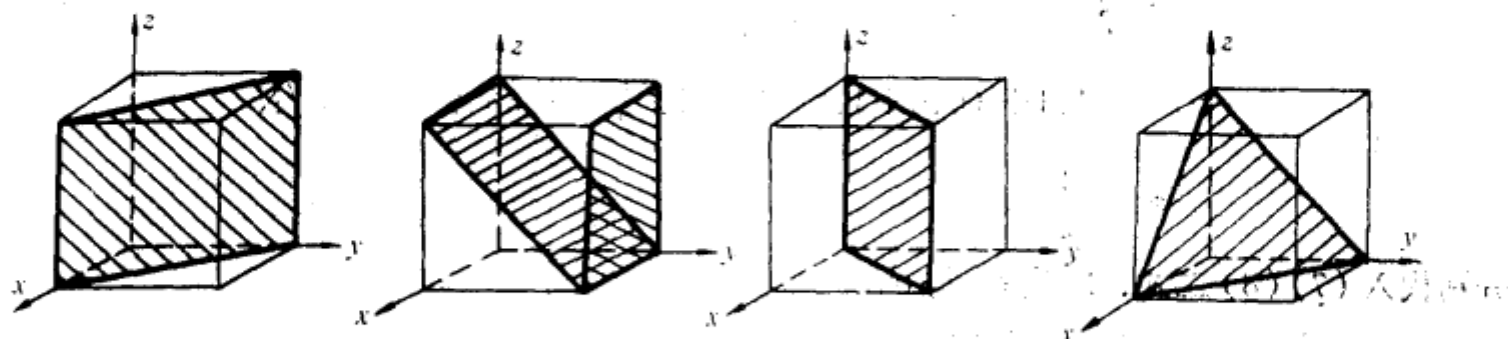


图 9-2 题 9-1 图

9-2 画出单晶硅立方晶体，并在其上画出下列各晶面，纵向和横向的位置，说明纵横两晶向之间的关系。

晶面	纵向	横向	晶面	纵向	横向
$(1\bar{1}0)$	$\langle 001 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	(100)	$\langle 011 \rangle$	$\langle 0\bar{1}1 \rangle$
(110)	$\langle 001 \rangle$	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$(0\bar{1}1)$	$\langle 011 \rangle$	$\langle 100 \rangle$
(100)	$\langle 0\bar{1}1 \rangle$	$\langle 011 \rangle$	(011)	$\langle 100 \rangle$	$\langle 0\bar{1}1 \rangle$

9-3 在 N 型衬底晶面上扩散 P 型电阻条时，试求 (110) 晶面上以 $\langle 001 \rangle$ 晶向为纵向，而以 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 晶向为横向的压阻系数 π_{\parallel} 和 π_{\perp} 。

9-4 已知硅膜片厚 0.15 mm ，有效直径 10 mm ，硅膜片材料的泊松比 $\mu=0.28$ ，在 0.25 MPa 压力作用下，求距膜片中心 4.17 mm 的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t 。

9-5 在 (110) 晶面 $\langle 001 \rangle$ 和 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 晶向上各放置一电阻条，试求：

(1) 在 0.1 MPa 压力作用下电阻条的 σ_r 和 σ_t ；

(2) 两电阻条分别为 P 型和 N 型电阻条时的 $\Delta R/R$ 值，已知硅膜片半径 $a=10 \text{ mm}$ ，电阻条半径 $r=8.12 \text{ mm}$ ，泊松比 $\mu=0.35$ 。

9-6 从输出电压灵敏度出发，如何设计压阻式压力传感器电阻条的位置，试举例说明。

9-7 在晶面为 (110) 的圆形 N 型单晶硅膜片上，已知有两个晶向， $\langle 001 \rangle$ 和 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ ，欲在膜片上扩散四个 P 型电阻条，试在圆膜片中画出这四个电阻条的位置并组成惠斯登电桥，说明理由。

9-8 设计一只压阻式低频加速度传感器，试画出工作原理图，相应的电桥测量线路，并画出该加速度传感器的幅-频特性示意图。

第十章 热电式传感器

10.1 例题详解

例一 将一支铬镍-康铜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 60 mV ,问热电偶热端温度是多少?该热电偶的灵敏度为 $0.08\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

解析

通常将温度变化转换为电量变化的装置称为热电式传感器,其中以热电偶和热电阻应用最多。热电偶的优点是尺寸小,可用来测量局部位置的温度,测量范围宽可以测量 $-250^{\circ}\text{C}\sim 2600^{\circ}\text{C}$ 范围的温度,但热电偶能直接输出的电压一般很小,只有 mV 级。

由题意,温度为 50°C 时热电偶输出 $=4\text{ mV}$,以参考温度 0°C 为基础时的热电偶输出等于 $60+4=64\text{ mV}$,热电偶热端温度为 $50+\frac{64}{0.08}=850^{\circ}\text{C}$ 。

例二 铂电阻温度计在 100°C 时电阻值为 $13.9\ \Omega$,当它与热的气体接触时,电阻值增至 $281\ \Omega$,试确定气体的温度,设 0°C 时电阻值为 $100\ \Omega$ 。

解析

各种金属做成的电阻温度计,在上限为 600°C 低温测量时均能满足精确度高,长时间稳定性好的要求,金属的电阻与温度的关系在 0°C 附近时可表示如下,

$$R=R_0(1+\alpha\theta)$$

式中 α ——材料的电阻温度系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

R_0 —— 0°C 时的电阻值;

θ ——相对于 0°C 的温度。

常见金属的电阻温度系数:铜 $0.0043^{\circ}\text{C}^{-1}$,镍 $0.0068^{\circ}\text{C}^{-1}$,铂 $0.0039^{\circ}\text{C}^{-1}$,假设温度变化由 θ_1 到 θ_2 ,则有 $R_2=R_1+R_0\alpha(\theta_2-\theta_1)$,所以

$$\theta_2=\theta_1+\frac{R_2-R_1}{\alpha R_0}$$

由题意,已知铂的 α 为 $0.0039^{\circ}\text{C}^{-1}$,把已知数代入上式,得

$$\theta_2=100+\frac{281-139}{0.0039\times 100}=464.1^{\circ}\text{C}$$

10.2 习题与思考题

10-1 铬镍-康镍热电偶灵敏度为 $0.04\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$,把它放在温度 1200°C 处,若以指示表作为冷端,此处温度为 50°C ,试求热电势大小。

10-2 热电偶温度传感器的输入电路如图 10-1 所示, 已知铂铑-铂热电偶当温度在 $0-100^{\circ}\text{C}$ 之间变化时, 其平均热电势波动为 $6\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, 桥路中供桥电压为 $4\ \text{V}$, 三个锰铜电阻的阻值均为 $1\ \Omega$, 铜电阻的电阻温度系数为 $\alpha_w=0.004^{\circ}\text{C}^{-1}$, 已知当温度为 0°C 时电桥平衡, 为了使热电偶的冷端温度在 50°C 时, 其热电势得到完全补偿, 试求可调电阻的阻值 R_x 。

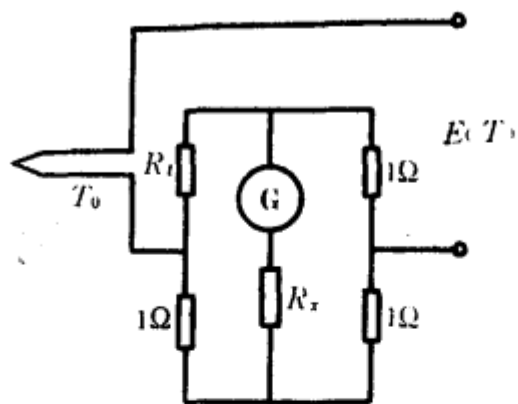


图 10-1 题 10-2 图

10-3 某热敏电阻, 其 β 值为 $2900\ \text{K}$, 若冰点电阻为 $500\ \text{k}\Omega$, 求热敏电阻在 100°C 时的阻抗。

10-4 以热敏电阻作温度敏感元件, 设计一个水温测量仪表, 测量范围 $-20^{\circ}\text{C}\sim+90^{\circ}\text{C}$, 非线性度 1% 。

10-5 在某一瞬间, 电阻温度计上指示温度 θ_2 为 50°C , 而实际温度 θ_1 是 100°C , 设电阻温度计的动态关系为

$$\frac{d\theta_2}{dt} = K(\theta_1 - \theta_2)$$

$K=0.2\ \text{s}^{-1}$, 试确定温度计达到稳态读数所需的时间。

10-6 热电偶测温的基本原理是什么? 它主要利用哪种电势变化?

10-7 试述热电偶的种类及其应用。

10-8 试述对热电偶冷端进行温度补偿常用哪些方法, 如何进行温度补偿?

10-9 试述半导体热敏电阻的工作原理, 并画出其电阻-温度特性曲线。

第十一章 智能传感器

11.1 思考题

- 11-1 什么叫智能传感器,它与一般传感器有哪些区别?
- 11-2 试画出智能传感器的一般组成方块图。
- 11-3 智能传感器对预处理电路有哪些要求。
- 11-4 智能传感器是如何进行自检和自校的。
- 11-5 智能传感器是如何有效抑制随机误差而提高重复性的。
- 11-6 用连续函数拟合方法修正传感器非线性误差的具体步骤有哪些。
- 11-7 智能传感器的数据处理的含义何在?如何进行查表处理。
- 11-8 如何用查表法补偿传感器的温度误差,试用程序流程图说明之。
- 11-9 试画出用 8031 单片机为中央控制器的智能传感器主程序流程图。
- 11-10 如何实现智能传感器量程的自动选择?
- 11-11 提高智能传感器静态测量精度和提高采样速度的因素有哪些。

第十二章 光纤传感器

12.1 思考题

- 12-1 试述光纤传感器有哪几种分类方法，各有哪些优缺点。
- 12-2 什么叫功能型光强调制的光纤传感器。
- 12-3 相位调制型光纤传感器的基本检测方法是什么，该类传感器的主要技术难点是什么。
- 12-4 说明光纤温度传感器的工作原理及结构形式。

第十三章 其它传感器

13.1 思考题

- 13-1 试述半导体的光导效应和光敏电阻的工作原理。
- 13-2 试述光敏电阻的弛豫现象和频率响应特性。
- 13-3 试述光敏二极管和三极管的工作原理，为什么光敏管需加反向偏压。
- 13-4 比较硅光敏管和锗光敏管的光谱响应特性。
- 13-5 试述硅光电池的工作原理。
- 13-6 试举出光电传感器的一种应用实例，画出其工作原理图，并加以说明。
- 13-7 试述霍尔元件的工作原理。
- 13-8 试述霍尔元件产生温度误差的原因及其补偿方法。
- 13-9 试画出霍尔角位移传感器的结构原理图，并加以说明。
- 13-10 半导体气敏元件的性能好坏主要取决于哪些因素，试举应用实例。
- 13-11 试比较三种以上湿敏传感器的优缺点。
- 13-12 当采用波长为 $8000\text{--}9000\text{\AA}$ 的红外光源时宜采用哪几种光电元件做测量元件，为什么？
- 13-13 举出你所熟悉的光电传感器应用实例，画出原理结构图，并说明其工作原理。

第二部分 实验指导书

实验一 压力传感器静态特性校准

(示范实验报告)

一、实验目的

1. 熟悉压力传感器静态特性校准方法;
2. 进一步掌握计算传感器非线性度, 迟滞误差和重复性误差的方法。

二、实验设备

1. CYG 型压阻式压力传感器 (测量范围 0~0.1MPa) 一只, 别种压力传感器也可;
2. 1503 型数字三用表一台;
3. 直流稳压电源 (30 V, 2 A) 一台;
4. 标准压力表和三通开关各一只。

三、实验内容

1. 在 0~0.1 MPa 范围内, 正反行程每隔 0.02 MPa 记录一次传感器的输出值, 共做三次循环, 并列表记录数据。
2. 对所得实验数据进行必要的处理, 计算和分析。

四、实验步骤

1. 首先熟悉各仪器仪表的使用方法;
2. 用橡皮管将压力源与传感器、标准压力表相连;
3. 调节直流稳压电源, 使输出为 +6 V (用 1503 数字式三用表测量);
4. 按照压力传感器使用说明书的要求, 将 +6 V 电压接入传感器的输入线, 传感器的两根输出线接到 1503 型数字三用表;
5. 记录零压力时的输出值;
6. 逐渐加压, 在正、反行程中每隔 0.02 MPa 记录一次输出值, 所加最大压力为 0.1 MPa, 共做三次循环, 所得实验数据列于表 1。

五、实验数据的处理

首先, 根据表 1 的实验数据计算几个特征数据和最小二乘直线方程;

(1) 算术平均值
$$\bar{y}_i = \frac{1}{2}(y_{i1} + y_{i2})$$

表 1 原始实验数据

输出 y_i (mV) 压力 x_i (MPa)	第一次循环		第二次循环		第三次循环	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0.00	-4.66	-4.64	-4.65	-4.61	-4.66	-4.65
0.02	3.93	3.98	3.98	3.99	3.97	4.01
0.04	12.48	12.50	12.52	12.54	12.49	12.50
0.06	20.96	21.12	21.02	21.10	21.01	21.03
0.08	29.49	29.56	29.48	29.50	29.47	29.60
0.10	38.07	38.07	38.02	38.02	38.03	38.03

(2) 迟滞

$$\Delta y_H = |\bar{y}_{II} - \bar{y}_{ID}|$$

$$\bar{y}_{II} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{iII}$$

$$\bar{y}_{ID} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{iID}$$

(3) 子样方差

$$S_{II}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{iII} - \bar{y}_{II})^2$$

$$S_{ID}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{iID} - \bar{y}_{ID})^2$$

(4) 标准子样方差

$$S = \sqrt{\frac{1}{2m} \left(\sum_{i=1}^m S_{II}^2 + \sum_{i=1}^m S_{ID}^2 \right)} \Big|_{m=6}$$

计算结果列于表 2。

表 2 实验数据的计算结果

压力 (MPa)	输出平均值 (mV)		迟滞 Δy_H (mV)	子样方差 平方根		子样 标准差	最小二乘直线 $y = 426.5x - 4.588$			正反行程 平均值 \bar{y} (mV)	
	正行程	反行程		正行程 S_{II}	反行程 S_{ID}		理论值 y (mV)	系统误差			非线性 Δy_i
								$(\Delta y)'_I$	$(\Delta y)''_D$		
0.00	-4.657	-4.633	0.024	0.0154	0.0252	0.0409	-4.588	0.069	0.045	0.057	-4.645
0.02	3.960	3.993	0.033	0.0336	0.0251		3.943	-0.017	-0.05	0.034	3.977
0.04	12.497	12.513	0.016	0.0231	0.0253		12.474	-0.023	-0.039	0.031	12.505
0.06	20.997	21.083	0.086	0.0620	0.0711		21.005	0.008	-0.078	0.035	21.040
0.08	29.480	29.553	0.073	0.0465	0.0672		29.535	0.055	-0.018	0.018	29.517
0.10	38.040	38.040	0	0.0264	0.0264		38.066	0.026	0.026	0.026	38.040

根据表 2，可算出该压力传感器的各项性能指标：

a. 理论满量程输出

$$y_{F.S.} = |(x_m - x_1)K| = 42.65 \text{ mV}$$

b. 重复性误差 取置信系数 $\lambda = 3$

$$\xi_R = \frac{\lambda S}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.2877\%$$

c. 非线性误差

$$\xi_L = \frac{(\Delta y_L)_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.1336\%$$

d. 迟滞误差

$$\xi_H = \frac{(\Delta y_H)_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% = 0.2016\%$$

六、实验讨论 (误差分析)

实验中的重复性误差表征随机性误差, 其产生原因可以是传感器的材料和结构方面的缺陷, 如摩擦、松动等, 也可以是测量读数过程中的操作和读数不一致, 而系统中使用的弹性元件、摩擦、间隙等, 则会造成正反行程的不一致, 即造成迟滞误差。

实验二 电阻应变片传感器综合实验(I)

一、实验目的

1. 实验研究金属箔式和半导体式电阻应变片的工作原理。
2. 观察和掌握应变片式传感器的温度效应和补偿方法。
3. 比较金属箔式和半导体式两种应变片的灵敏度, 温度效应和频响特性等性能。
4. 熟悉 CSY-1 型传感器系统实验仪*的使用方法。

二、实验设备

1. CSY-1 型传感器系统实验仪 (后附简介);
2. 中频信号发生器;
3. 双踪示波器。

三、实验原理

电阻应变片是将机械构件上的应变变化转换为应变片的电阻值变化的一种传感元件, 它精度高, 分辨力强 (原理上讲, 它本身没有极限精度, 其最大分辨力主要取决于测量电路的分辨力), 重量轻, 尺寸小, 在测量中有广泛的应用。

在实验仪的双平行梁上共贴有 6 片金属箔式应变片和 2 片半导体式应变片, 它们感受梁的上下方向运动所产生的应变状态变化。在它们附近装有电加热器和测温热电偶, 配合使用就可测量应变片的温度效应。

应变片的粘贴位置为,

6 片金属箔式片:

2 片拉伸片, 位于上梁上表面, 符号 ↑;

2 片压缩片, 位于下梁下表面, 符号 ↓;

2 片补偿片, 上梁上表面和下梁下表面各一片, 符号 ↔ 和 ↔。

* 系浙江大学研制的产品

2 片半导体片;

1 片拉伸片, 位于上梁上表面, 符号 \uparrow ;

1 片压缩片, 位于下梁下表面, 符号 \downarrow 。

四、实验内容

1. 金属箔式应变片的工作特性

(1) 需用仪器 直流稳压电源, 电桥, 差动放大器, 测微头, 毫伏表。

(2) 旋钮初始位置 直流稳压电源 0V 挡, 毫伏表 $\pm 50 \text{ mV}$ 挡, 差动放大器增益调节旋钮放在最左边。

(3) 步骤

① 毫伏表调零;

② 差动放大器调零;

③ 按实验图 2-1 接好线路;

④ 调整测微头, 使梁处于水平;

⑤ 直流电源调至 $\pm 4 \text{ V}$, 预热几分钟后, 然后调电桥平衡电位器 W_1 , 使表针指

示为零。于是用手将梁压到最低点, 调整差动放大器的增益, 使表针正好满刻度指示, 以后增益就不用再调了;

⑥ 使梁回复到水平位置, 从 15 mm 位置开始, 记下梁端的位移与表针指示电压值, 每 2.00 mm 记一组数据;

⑦ 根据以上结果作出数据表格, 并计算系统的灵敏度 S ,

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

式中, ΔV 是电压变化量, Δx 是相应的位移变化量, 作出 $V-x$ 关系曲线。

2. 金属箔式应变片温度效应及补偿

(1) 需用仪器 直流稳压电源, 差动放大器, 电桥, 毫伏表, 测微头, 加热器, 整流电源。

(2) 旋钮初始位置 整流电源置于 0V 挡, 其余同实验内容 1。

(3) 步骤

① 整流源加到加热器上, 直流稳压电源转到 $\pm 2 \text{ V}$ 挡, 按实验图 2-1 接线;

② 旋动测微头使梁水平, 调电桥平衡器 W_1 使表针指零;

③ 整流电源调至 10 V 挡, 观察温升与表头指示的变化;

④ 几分钟后表头稳定, 记读数;

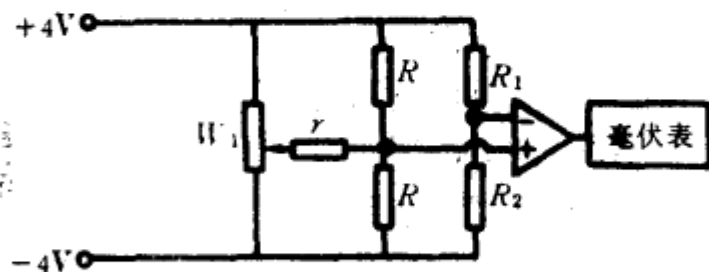
⑤ 整流电源转回到 0 V 挡, 停止加热, 几分钟后梁冷却至室温;

⑥ 将实验图 2-1 中的电阻 R_3 用一适当的补偿片代替, 仍按图 2-1 接好线路;

⑦ 重复步骤①—④;

⑧ 比较两种情况下表针变化的速度和最终稳定指示值, 分析其中差别的原理(可将 R_3 用 \downarrow 或 \leftrightarrow 或 \dashv 分别代替, 进行比较)。

3. 半导体应变片的工作性能和温度效应



实验图 2-1

(1) 需用仪器 与实验内容 2 相同。

(2) 旋钮初始位置 直流稳压电源 0 V 挡, 毫伏表 ± 0.5 V 挡, 差动放大器增益旋钮调向最左边, 整流电源 0 V 挡。

(3) 步骤

① 毫伏表调整零位, 差动放大器调整零位。

② 按实验图 2-2 接线, R_1 为半导体应变片。

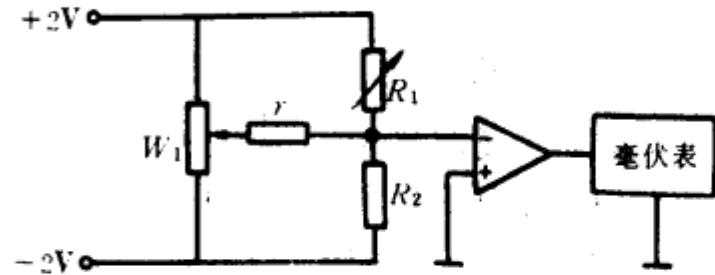
③ 按实验内容 1 的⑤—⑦做。

④ 调测微头使梁回到水平位置, 这时表针指零, 将整流电源接入加热器, 整流电源调至 10V 挡, 观察表头的变化情况。

⑤ 整流电源回到 0 V 挡, 停止加热, 冷却后将 R_2 用另一片半导体应变片代替, 重复④, 比较两者的差别 (注意, 更换电阻时直流稳压源应调到 0V 挡)。

⑥ 用两片半导体应变片代替金属箔式应变片, 重做实验内容 2 中的所有内容 (按实验图 2-1 做)。

⑦ 将步骤⑥的结果与实验内容 2 中的进行比较, 说明半导体应变片与金属箔式应变片温度效应方面有什么特点。



实验图 2-2

五、实验报告

1. 按各实验内容要求整理数据表格, 作出必要的曲线;
2. 综合分析比较金属箔式应变片和半导体应变片的性能差异。

附 CSY-1 型传感器实验仪简介

该仪器是配合传感器原理课程的教学实验而设计的一种多功能教学仪器, 其特点是集被测体、各种传感器、激励源以及信号调理电路等于一体, 组成一个完整的测量系统。它由基座、试验台、处理电路等三大部分组成, 三者之间无任何内部连接, 由实验者自己在面板上用选插式插头完成所需的电路联接。使用时根据实验内容的要求, 设计合理的实验方案, 选择仪器上的有关部分构成所需的实验测量系统。

试验台的主体部分是一个双平行悬臂梁 (采用这种结构是为了减小梁的自由端运动时的非线性)。该梁的固定端处贴有电阻应变片, 自由端处则装有激振器、差动变压器式位移传感器、磁电式速度传感器和压电式加速度传感器。应变片附近还装有加热器和热电偶式温度传感器, 它们用于应变片温度效应的实验。实验台上还可加装电涡流式、霍尔式、电容式等各种传感器。双平行梁的自由端上方可装上测微头进行传感器的静态标定试验, 而激振器则可使悬臂梁上下振动, 进行有关的动态测量实验。

电路部分包括电桥、差动放大器、相敏检波器、移相器、低通滤波器、涡流变换器、电荷放大器、电压放大器等, 它们用于处理各传感器的输出信号。

基座部分由低频振荡器、音频振荡器、直流稳压电源、整流电源、毫伏表等组成。面板下部约有 8 个 ± 15 V 稳压电源输出插座为仪器的其他部分提供激励。

该仪器使用时应注意以下几点:

1. 确保接线无误后再开启电源;
2. 选插式插头使用中避免拉扯、硬行插拔, 以免造成损坏;
3. 各电源和振荡器的引出线不能短路(例如, 不能让它们接触机壳), 也不能将它们随意乱插(例如, 不能将用于加热的整流电源直接接到应变片上)。
4. 使用激振器时, 不可将低频振荡器的输出信号开得过大(特别是在平行梁的固有频率附近), 以免梁的振幅过大而损坏。
5. 各单元电路的输出应避免长时间短路。

实验三 电阻应变片传感器综合实验(II)

一、实验目的

1. 研究实际应用中采用的直流应变电桥的原理和性能;
2. 研究和比较半导体应变片的电桥电路与金属箔式应变片应变电桥的性能和结构上的异同。

二、实验设备

CSY-1型传感器系统实验仪(见实验二附的简介)。

三、实验原理

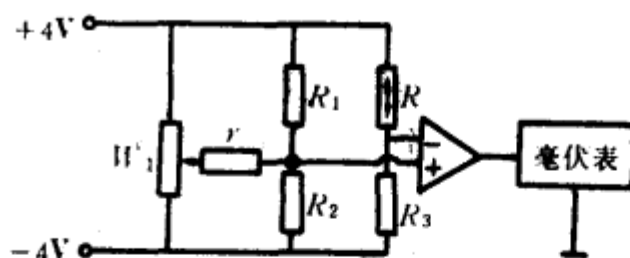
电阻应变片利用应变产生电阻值的变化而实现传感。从原理上讲, 这种传感器是没有极限灵敏度的, 测量的灵敏度仅取决于信号检测电路的最小分辨力。由于应变片的电阻的变化非常小, 通常不超过应变片静态阻值的1%, 所以必须使用合适的(简便和灵敏)信号拾取处理方法来进行测量。惠斯登电桥就是这样一种结构既简单, 灵敏度又较高的测量电路, 如实验图3-1所示, 实际应用中的应变测量都采用这种方法。

在直流偏置下, 一个调平了的电桥满足 $R_1R_4=R_2R_3$; 这时, a 、 b 两点等电位, 输出电流为零, 否则, 电桥不平衡, 就有输出信号。

将 R_2 用一应变片代替, 就成为一个实际使用的单臂电桥。

若 R_2 、 R_4 均用应变片代替(两应变片工作性质相反), 则构成所谓的直流半桥, 其灵敏度是单臂电桥的两倍。

又若所有四只电阻均用应变片代替, 且每相邻两片的工作性质相反, 就构成一个直流全桥, 其灵敏度比半桥又提高一倍。



实验图 3-1 电桥电路

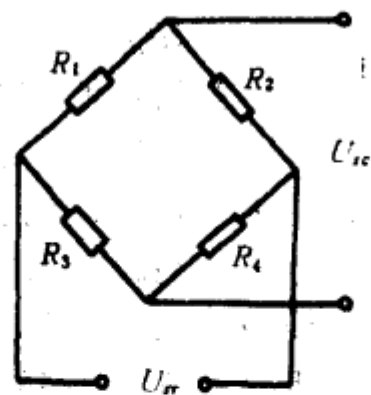
四、实验内容

1. 直流单臂电桥特性

第1步 毫伏表调零, 放大器调零。

第2步 按实验图3-2接好线路，其中的 R_1 是工作片， R_2 为补偿片， R 为精密电阻， r 和 W_1 构成调平网络。

第3步 装上测微头，用调平电位器使毫伏表指零，然后作梁位移-电压特性（位移从20.00 mm开始到7.50 mm，间隔2.5 mm）。



实验图3-2 线路图

2. 直流半桥特性

保持放大器增益不变，将 R_2 换成一片与 R_1 工作状态相反的应变片，按上面的步骤再做，得出另一组数据。

3. 直流全桥特性

保持放大器增益不变，将实验图3-2中的 R_1 、 R_2 和两个精密电阻均用电阻 R 应变片代替（两两工作状态相反），调零。

按实验内容1的步骤，测得第三组数据。

4. 半导体片直流半桥特性

保持增益不变，用两片工作状态相反的半导体应变片构成一直流半桥，调零。

按实验内容2的步骤，测量，读数。

五、实验报告

1. 在同一个坐标系中，画出以上四组数据的位移-电压特性曲线，并计算它们的灵敏度。
2. 分析四种电桥的结构特点和性能特点。

实验四 电阻应变片传感器综合实验(III)

一、实验目的

1. 研究金属箔式应变片交流全桥电路的原理和特性。
2. 交流全桥应变测量的实际应用研究。

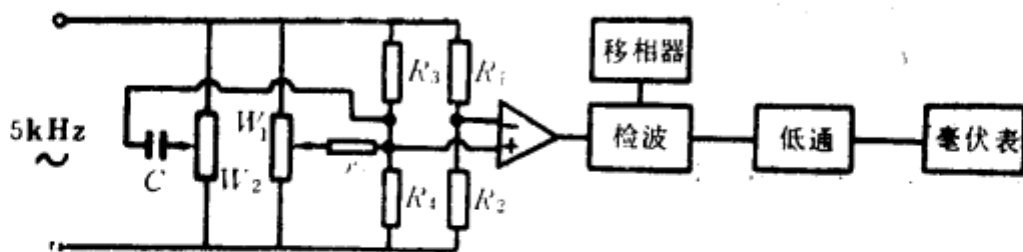
二、实验设备

CSY-1型传感器系统实验仪——音频振荡器，电桥，差动放大器，移相器，相敏检波器，低通滤波器，毫伏表，螺旋测微头，双踪示波器。

三、实验原理

全桥灵敏度最高，这是实验三的结论。但是，直流偏置下须使用直流放大器，容易产生零漂，影响测量精度，而抗零漂的直流系统结构复杂，成本高，所以目前大多用交流电压激励全桥，构成交流全桥，相应地就可使用交流放大器。

交流全桥系统除了在信号检测处理电路方面不同于直流电桥外（见实验图4-1），在电桥结构上也有一点差异：交流全桥有两个可调参量构成调平衡网络，一个是纯电阻性的（ W_1 ），另一个是带有一定容抗的（ W_2 和 C ）。这是为保证交流电桥平衡时，不仅满足幅值相等，而且对臂幅角也必须相同的条件而设置的，详细的原理分析留给实验者完成。



实验图 4-1 交流电桥系统原理图

四、实验内容

1. 交流全桥原理及性能

步骤 ① 毫伏表调零，差动放大器调零；

② 用四片合适的金属箔式应变片构成全桥（注意各应变片的工作状态）；

③ 按实验图 4-1 准备好电路系统，并调平之；

④ 用测微头进行静态校准实验（ $x=20.00\sim 7.50\text{ mm}$ ，间隔 2.50 mm ）。

2. 交流全桥测量系统应用

步骤 ① 取下测微头，换上端盖以接通电路，将毫伏表换成示波器，观察低通滤波器和差动放大器的输出波形（平行梁用激振器驱动）；

② 保持激振器驱动电压的幅值不变，改变其频率，同时用示波器读出低通滤波器的输出电压的相应变化（即幅频特性），并根据以上数据确定梁的自振频率约为多少；

③ 去除激振器，换上称重平台进行电子秤实验，平台未加砝码时，系统调零，然后加砝码进行逐点标定。

五、实验报告

1. 作出交流全桥的 $x-V$ 曲线，并与直流全桥的结果相比较。
2. 画出实验内容 2 步骤①得到的两个波形，指出各是什么波，为什么？
3. 分析交流全桥调平网络的原理。
4. 求出平行梁的自振频率，作幅频归一化特性曲线。
5. 对所建立的电子秤进行标定，给出必要的数据或曲线。

实验五 螺管形差动电感传感器

一、实验目的

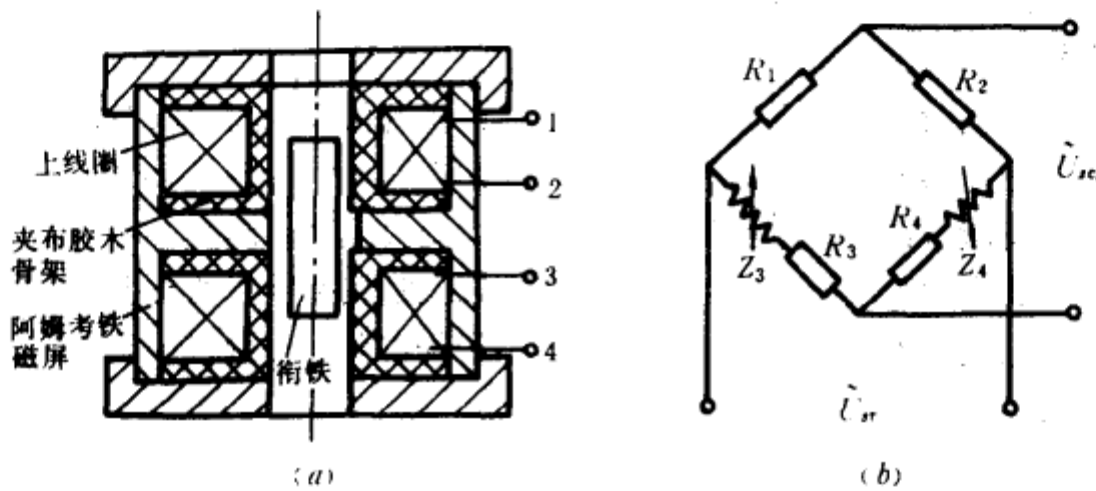
1. 熟悉螺管形差动电感传感器的构造以及验证所用的测量线路（四臂交流电桥线路）的最佳匹配条件。
2. 研究差动电感传感器的静特性 $U=f(\pm\delta)$ 。
3. 分析电源电压及频率对静特性的影响。
4. 比较差动式与简单式电感传感器的灵敏度和优缺点。

二、实验设备

- | | |
|----------------------|-----|
| 1. 低频信号发生器 (XFD-7 型) | 1 台 |
| 2. 真空管电压表 (GB-9 型) | 1 台 |
| 3. 可变标准电阻箱 | 3 只 |
| 4. 可变标准电感箱 (0—50 mH) | 1 只 |
| 5. 示波器 | 1 台 |

三、实验原理

1. 实验所用螺管式电感传感器的结构简图见实验图 5-1 (a)。将电感传感器中二个线圈分别作为电桥线路中二个桥臂 Z_3 和 Z_4 。当衔铁在中间位置时, 上下两线圈的阻抗是相等的, 这时电桥平衡无输出 ($R_1=R_2, Z_3=Z_4$), 一旦衔铁离开平衡位置时, 由于气隙磁导 G_0 改变, 对应地 Z_3 与 Z_4 也改变, 则 $\Delta Z_3 = -\Delta Z_4$, 所以电桥就失去平衡而有电压输出, 这样可得到 $U = f(\delta)$ 特性曲线, 实验就是利用此原理而进行的。



实验图 5-1 结构简图和测量线路

2. 四臂交流电桥输出接真空管电压表, 其输入阻抗可看作无限大, 从而认为电桥是工作在空载状态。为了使四臂电桥输出电压达最大, 可采用等阻抗电桥, $Z_{30} = Z_{40} = R_1 = R_2 = 70 \Omega$ 左右。由于每个电感传感器的等效参数 $R + j\omega L$ 不太一致, 电桥输出电压灵敏度与零位均可通过调节可变电阻箱 R_1 和 R_2 而获得。

四、实验内容

1. 测定螺管形差动电感传感器的输出特性 $U_{sc} = f(\pm \delta)$ 。将传感器两个线圈 (Z_3, Z_4) 和电阻箱 ($R_1 = R_2 = 70 \Omega$), 按实验图 5-1 (b) 接入电桥线路。 $\tilde{U}_r = 4 \text{ V}$, $f = 400 \text{ Hz}$ 。在测输出特性之前, 必须先调零位, 即调节活动衔铁, 使电压输出为最小值。然后每隔 0.5 mm 读一输出值。正反行程均测到 $\pm 4 \text{ mm}$, 列表记录 $U_{sc} = f(\pm \delta)$ 数据。

2. 测定该传感器的频率特性 $U_{sc} = f(\omega)$, $\tilde{U}_r = 4 \text{ V}$, $\delta = 1 \text{ mm}$, f 从 $50 - 200 \text{ Hz}$ 时, 每隔 50 Hz 读一数, f 从 $200 - 1 \text{ kHz}$ 时每隔 100 Hz 读一数。

3. 电源电压波动时对输出的影响, $\tilde{U}_r = 2 \text{ V}, 4 \text{ V}, 6 \text{ V}$, $f = 400 \text{ Hz}$, $\delta = 1 \text{ mm}$, 列表记录 $U_{sc} = f(\tilde{U}_r)$ 数据。

4. 比较简单电桥与差动电桥的灵敏度, 用 $L_0=25\text{ mH}$, $R=36\ \Omega$ 左右匹配之, 分别记录 $\delta_1=1\text{ mm}$ 和 $\delta_2=2\text{ mm}$ 时的输出电压 \bar{U}_{sc1} 和 \bar{U}_{sc2} 。

五、实验报告

1. 画出输出特性 $U_{sc}=f(\pm\delta)$ 曲线, 并计算出该传感器的灵敏度和非线性误差(用独立线性度算)。
2. 画出频率特性曲线 $U_{sc}=f(\omega)$ 。
3. 列表记录实验内容 2、3、4 三项实验结果, 并比较之。
4. 分析其零位误差与非线性误差产生的原因。

实验六 差动变压器传感器的原理和性能

一、实验目的

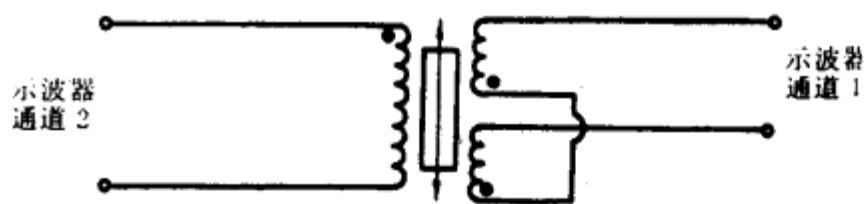
1. 研究差动变压器式传感器的原理构造和工作性能。
2. 掌握差动变压器式传感器零位信号的补偿方法。

二、实验设备

1. 双踪示波器
2. CSY-1 型传感器系统实验仪——音频振荡器, 螺旋测微头, 电桥, 差动放大器, 差动变压器式位移传感器。

三、实验原理

差动变压器的初级线圈用交流激励, 两次级线圈按电势的反方向串联, 衔铁固定在双平行悬臂梁上, 并随梁的运动而发生位置变化, 如实验图 6-1 所示, 线圈次级产生电压信号输出。



实验图 6-1

当衔铁处于中间位置时, 两个次级线圈感应的电势大小相等, 总输出应为零。实际上, 这时的输出不是理想地为零, 其原因可以是线圈的电气参数及几何形状的不对称, 也可以是材料的电磁性能有差异。总之, 零位电压的存在使传感器在零位附近的灵敏度降低, 并给后级信号处理造成麻烦; 必须加以克服, 消除零位电位, 除电气参数及加工时几何尺寸有严格要求外, 也常用电路的方法进行零位电压的补偿。

四、实验内容

1. 按实验图 6-1 接好电路。音频振荡器置于 4 kHz 位置, 双踪示波器第一通道的电压灵敏度为 500 mV/cm , 第二通道为 10 mV/cm , 选择触发打到第一通道。

必须注意, 振荡器的输出必须用它的电压输出口(LV), 决不允许从 0° 到 180° 两个

电压输出口接出，另外，差动变压器传感器与示波器的连线应尽量短一些，以免引入干扰。

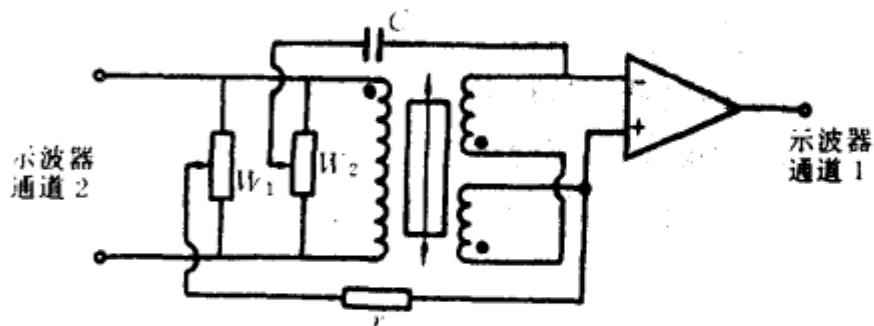
实验中振荡器的输出调至峰-峰值电压值 2V，然后用螺旋测微头测量平行梁位移与次级输出，峰-峰值电压的对应关系 ($x=20.00-7.50\text{ mm}$ ，间隔 2.50 mm)。

2. 零位电位补偿实验

自行设计一个补偿电路，或参考实验图 6-2 的电路。

初级仍用 4 kHz 激励(LV口)，示波器通道 1 灵敏度为 500mV/cm，通道 2 为 1 V/cm，第一通道选择触发，差动放大器增益调至最大。

激励电压为峰-峰值 2V 的条件下，调整 W_1 和 W_2 ，使零位信号最小，并与补偿前的相比较。



实验图 6-2

五、实验报告

1. 测出补偿前后零位电压的大小，并观察比较两波形的差异。经过补偿后的残余电压波形为一个什么波形？这说明波形中残留有什么分量？

2. 根据实验内容 1，作 $V_{P-P}-x$ 曲线，找出线性工作范围，并求出灵敏度 S ，

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

更一般地，灵敏度与激励电压有关，因此定义

$$S' = \frac{\Delta V / \Delta x}{V_{\text{激}}}$$

实验七 差动变压器式传感器测量系统

一、实验目的

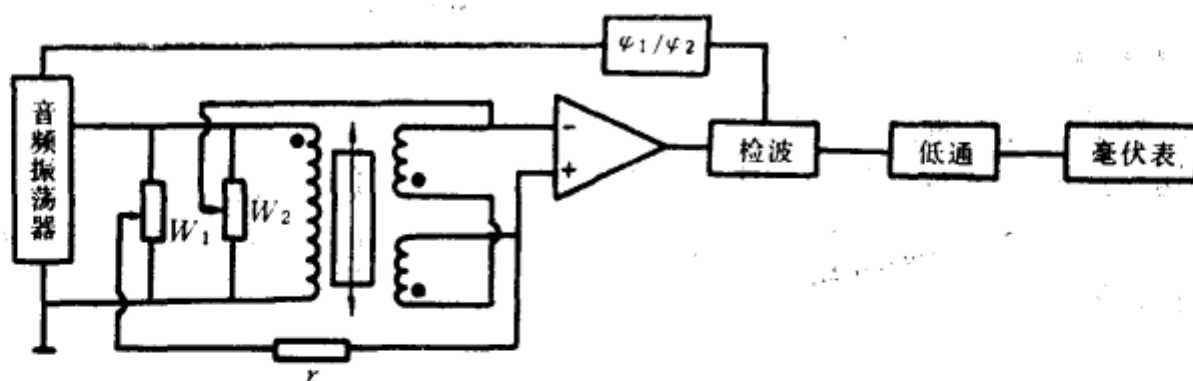
1. 研究差动变压器式传感器测量系统的一般组成和标定。
2. 差动变压器用于振动测量和称重等实际应用的方法。

二、实验设备

1. 双踪示波器；
2. CSY-1 型传感器系统实验仪——音频及低频振荡器，电桥，相敏检波器，移相器，低通滤波器，差动放大器，激振器，螺旋测微头，称重平台和砝码，毫伏表。

三、实验原理

实验七中观察到的次级输出电压峰-峰值的变化，必须转换成一定的电压大小输出才有实际测量意义，实验图 7-1 表示了一般差动变压器传感器测量系统的组成。其中激励频率 4 kHz，放大器增益调至最大（约 100 倍），毫伏表置于 $\pm 0.5\text{ V}$ 挡。



实验图 7-1 测量系统

四、实验内容

1. 测量系统实验

激励幅值调至 1.5 V，调整衔铁于中段位置，调整零位电位最小。

给梁一最大位移，调整移相器，使毫伏表指示最大，然后进行静态标准操作($x=20.00—7.50$ mm，间隔 2.50 mm)。

2. 振动测量实验

各仪表旋钮位置不变，便于比较。

取下测微头，用低频振荡器激励激振器，使梁振动。

低频振荡器幅值不变，改变输出频率，记录峰-峰电压变化。

3. 电子秤实验

换上称重平台，参照前面几个实验的有关内容，设计一个差动变压器式电子秤实验方案，并进行标定和称重。

五、实验报告

1. 根据实验内容 1，作 $x-V$ 曲线，并求灵敏度。

2. 根据实验内容 2，作平行梁的振幅-频率响应曲线，找出梁的自振频率，并与应变片实验中的结果相比较。

3. 画出电子秤的实验方案框图，作出该电子秤的定标曲线。

实验八 电涡流式传感器综合实验

一、实验目的

1. 掌握电涡流式传感器的结构原理和工作性能。
2. 研究不同性质的被测物体对电涡流传感器的影响。
3. 研究电涡流传感器的实际应用，即测振的原理与方法（动态测量），以及称重的原理与方法（静态测量）。

二、实验设备

1. 双踪示波器；
2. CSY-1 型传感器系统实验仪——电涡流传感器，铁铜铝被测物各一块，涡流变换器，电桥，直流稳压电源，振荡器，激振器，称重平台及砝码。

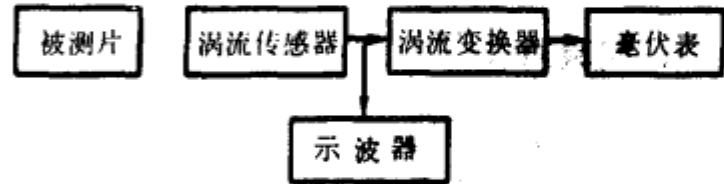
三、实验原理

电涡流式传感器是一种应用较广泛的非接触式测振动或位移的传感器，它基于电磁感应定律工作，涡流线圈的感抗与被测导体离线圈的远近有关。实验仪的平行梁上固定有被测导体测量片，它与涡流传感器的距离随梁的位置移动而变化，相应地在线圈的输出端输出信号。被测导体不同，涡流传感器将表现出不同的传感灵敏度。

四、实验内容

1. 静态校准

按实验图 8-1 接好线路。调整被测片与涡流线圈的距离，使系统发生振荡（用示波器监视）。示波器上读出输出峰-峰值，毫伏表上读平均值，每隔 0.25 mm 读一次数，直到线性严重破坏为止，即静态校准。



实验图 8-1

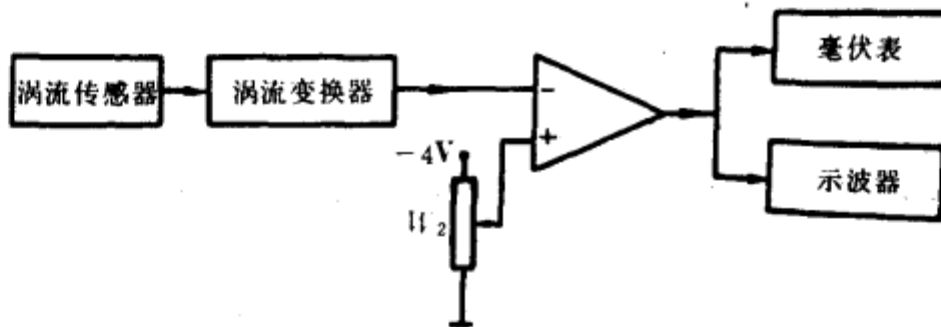
根据以上数据，找出传感器与被测体间的最佳工作距离和起始点。

2. 被测体对传感器特性的影响

根据实验图 8-1，分别用铝、铜、铁被测片重复实验内容 1，分析比较所得结果。

3. 电涡流式振幅测量系统

按实验图 8-2 接线。用激振器激励平行梁振动，激振频率为 15, 20, 30 Hz 处分别记录对应的输出峰-峰值，并根据前面得到的校准曲线计算出对应的振动幅度。



实验图 8-2

4. 电涡流系统用于称重

按实验图 8-2 接线，换上称重平台。

重调零点，测量校准数据，对该称重系统进行定标。

五、实验报告

1. 根据实验内容 1 的结果，作 $V_{PP}-x$ 和 $V-x$ 曲线（在同一坐标系中），求出线性范围和系统灵敏度 S ，

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

2. 根据实验内容 2 的结果，在同一坐标系中作出 $V_{Cu}-x$ ， $V_{Fe}-x$ ， $V_{Al}-x$ 三条曲线，分析比较它们的灵敏度和线性范围。

3. 给出称重系统的定标曲线。

实验九 振动筒压力传感器的静态特性

一、实验目的

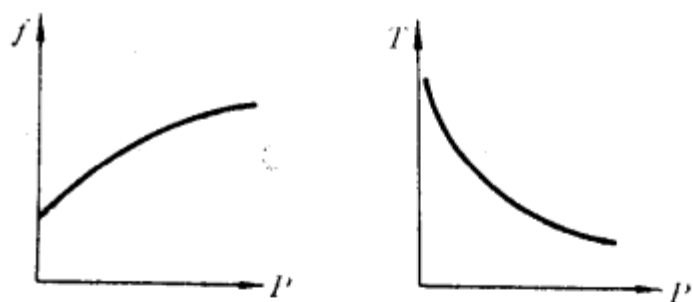
1. 掌握振动筒压力传感器静态特性的校准方法。
2. 用 CAD 方法分析与建立振动筒压力传感器的静态数学模型。

二、实验设备

1. 振动筒压力传感器及测量电路板；
2. 空气压缩机或旋片式真空泵；
3. 精密压力表或真空表；
4. 三通开关及管路；
5. 周期-频率计；
6. $\pm 15\text{V}$ 直流稳压电源；
7. 数字计算机。

三、实验原理

振动筒压力传感器是利用弹性振动筒的谐振频率随压力的变化而改变的特性来完成测量任务的。它结构牢固，具有较强的抗干扰能力，较宽的动态范围和很好的长期稳定性，可广泛地应用于精度要求较高，可能出现振动、冲击、加速度等各种场合。这种传感器存在的问题是传感器的输出谐振频率与被测压力呈抛物线的单值非线性函数关系，如实验图 9-1 所示。这种非线性误差可高达 6%，因此不能满足实际使用与显示要求，必须进行非线性校正。



实验图 9-1 输出特性

本实验就是研究利用计算机进行软件非线性校正的方法，首先通过实测获得一组传感器校准数据，根据实验数据建立相应的数学模型，即进行曲线拟合，然后根据这一拟合函数关系对传感器的输出进行运算，直接显示被测压力值。曲线拟合有多种方法可以选用，其中以最小二乘法建立的数学模型最为合理。

合理的数学模型是指它应以最简化的形式正确地代表研究对象的特性，最小二乘法不要求拟合曲线经过所有的实验点，而只要求在定点上误差向量的欧氏范数 $\|\cdot\|_2$ 最小，这可大大抵消实验数据包含的观测误差对最终建立的数学模型的影响，即

设 $(x_i, y_i) \quad i=0, 1, \dots, m$ ，是一组校准数据，

$\psi\{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_n\}$ 是一函数空间，

$S=(S_0, S_1, \dots, S_m)^T$ 是误差向量，

$S_i=Z^*(x_i)-y_i$

$y=Z^*(x_i) \in \psi$

则

求函数

使

$$\begin{aligned} \|S\|_2^2 &= \sum_{i=0}^m S_i^2 = \sum_{i=0}^m [Z^*(x_i) - y_i]^2 \\ &= \min_{z(x) \in \psi} \sum_{i=0}^m [Z(x_i) - y_i]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

成立

式中

$$Z(x) = \sum_{i=0}^n a_i \psi_i \in \psi;$$

$$Z^*(x) = \sum_{i=0}^n a_i^* \psi_i \in \psi;$$

$$n < m$$

根据式(1), 最小二乘的问题可转化为求多元函数

$$F(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=0}^m \left[\sum_{j=0}^n a_j \psi_j(x_i) - y_i \right]^2$$

的极小点 $(a_0^*, a_1^*, \dots, a_n^*)$ 的问题, 即

$$\frac{\partial}{\partial a_k} F(a_0, a_1, \dots, a_n) = 0 \quad (2)$$

$$(k=0, 1, \dots, n)$$

式(2)即

其中

$$\mathbf{G}\mathbf{a} = \mathbf{D} \quad (3)$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^n (\psi_0, \psi_j) a_j \\ \sum_{j=0}^n (\psi_1, \psi_j) a_j \\ \vdots \\ \sum_{j=0}^n (\psi_n, \psi_j) a_j \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} (\psi_0, \psi_0) & (\psi_0, \psi_1) & \dots & (\psi_0, \psi_n) \\ (\psi_1, \psi_0) & (\psi_1, \psi_1) & \dots & (\psi_1, \psi_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\psi_n, \psi_0) & (\psi_n, \psi_1) & \dots & (\psi_n, \psi_n) \end{bmatrix}$$

内积为

$$(\psi_k, \psi_j) \triangleq \sum_{i=0}^m \psi_k(x_i) \psi_j(x_i)$$

$$(\psi_k, a_j) \triangleq \sum_{i=0}^m a_j \psi_k(x_i)$$

求解式(3)所表达的关于 a_0, a_1, \dots, a_n 的线性方程组, 即得解。

四、实验内容

1. 实测振动筒压力传感器输入输出特性曲线 $P=f(T)$, 正反方向各三次循环, 校准数据取平均值。

2. 分析并建立振动筒压力传感器的数学模型，进行编程，在计算机上拟合曲线，要求拟合精度 $C < 0.05\%$ 。

五、实验报告

1. 自拟数据表格。
2. 计算程序最终应解出，振动筒压力传感器特性曲线的非线性误差，数学模型最佳阶次，拟合曲线的拟合精度 C ，重复性和滞迟误差的大小。

实验十 电容式位移传感器结构分析及测量线路

一、实验目的

1. 分析电容式位移传感器结构设计的特点。
2. 掌握变面积电容位移传感器测量电路的设计与调试。

二、实验设备

1. 变面积式电容位移传感器；
2. 千分测微头（分辨力 $1\mu\text{m}$ ）；
3. 示波器，数字万用表及直流稳压电源；
4. 电路实验面包板，集成运放及电阻电容若干。

三、实验原理

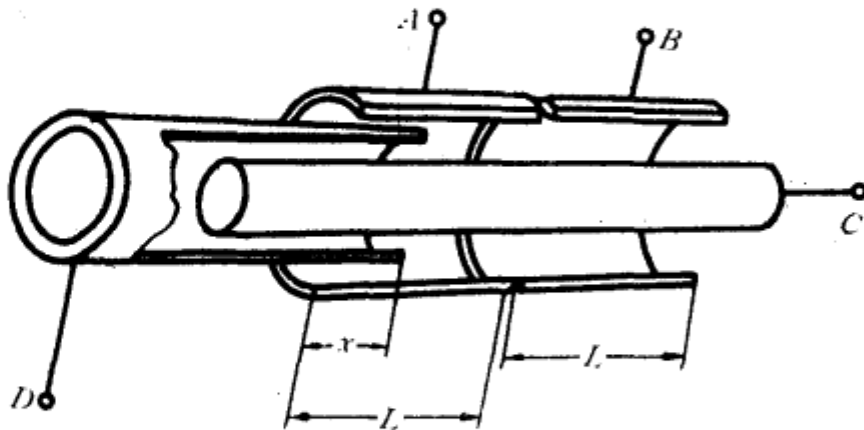
变面积电容位移传感器的结构如实验图 10-1 所示。

屏蔽套筒伸入的深度为变量 x ，因此，

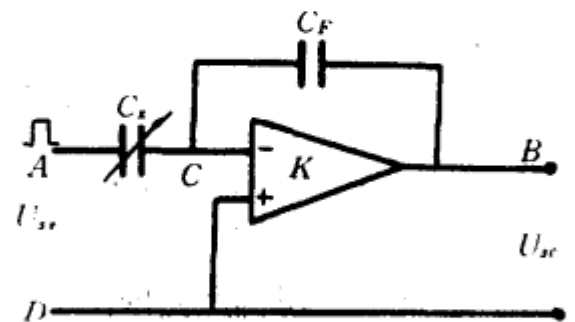
固定电容
$$C_F = \frac{\epsilon_r \cdot l}{1.8 \ln R_1/R_2}$$

变化电容
$$C_x = \frac{\epsilon_r \cdot x}{1.8 \ln R_1/r}$$

可见变化电容 C_x 与伸入位移 x 呈线性关系。传感元件输出的电容变化信号必须转换成电压或电流信号以便检测。实现 C/V 转换最简单的方法是用电容阻抗比例电路，其原理如实验图 10-2 所示。



实验图 10-1 结构简图



实验图 10-2 测量线路原理

结点 C 虚地，设电位 U_c ，由理想运放理论可知

$$U_{s,r} = \frac{I_x}{j\omega C_x} + U_c$$

$$U_{s,c} = \frac{I_F}{j\omega C_F} + U_c$$

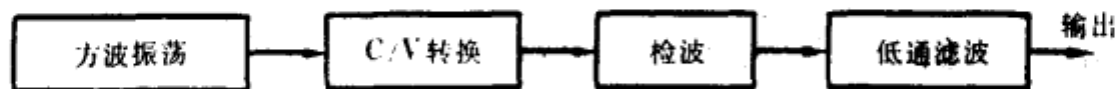
$$I_x + I_F = 1$$

解之得

$$U_{s,c} = \frac{C_x}{C_F} U_{s,r}$$

虚地条件： $I \approx 0$ ， $U_c \approx 0$ 。

电容式位移传感器测量电路方块图示于图 10-3。



实验图 10-3 测量电路方块图

四、实验内容

1. 分析该电容位移传感器的结构原理。
2. 自行设计一套完整的信号调理电路。

实验十一 霍尔传感器特性研究

一、实验目的

1. 研究霍尔式传感器的原理。
2. 分析霍尔传感器分别在直流和交流激励下的输出特性。
3. 研究霍尔传感器的应用实例——电子秤与振动测量情况。

二、实验仪器

CSY-1 型传感器系统实验仪，包括：霍尔片及磁路系统，电桥，毫伏表，差动放大器，相敏检波器，低通滤波器，移相器，振荡器，激振器，稳压电源（直流可变），测微头，秤重平台，砝码，电桥调平网架。

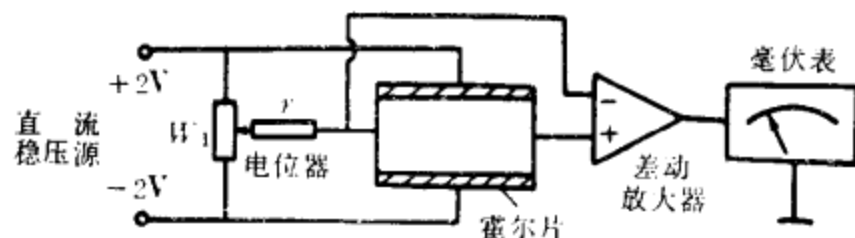
三、实验原理

霍尔电势

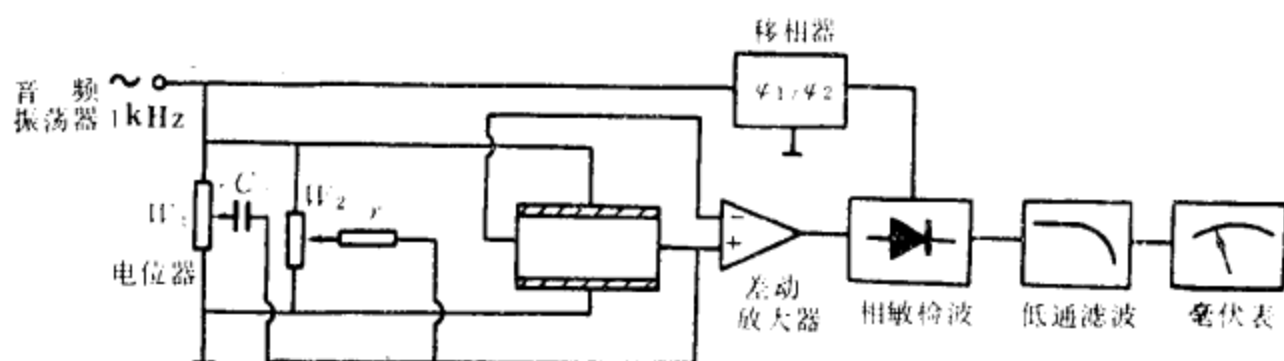
$$U_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (\text{V})$$

式中 R_H ——霍尔常数；
 I ——控制电流；
 B ——磁感应强度；
 d ——霍尔元件的厚度

这是所有金属或半导体的特性表达式，一旦器件确定后，霍尔电势 U_H 大小取决于 I 与 B 。本实验分别用直流激励（如实验图 11-1 所示）和交流激励（如实验图 11-2 所示），二种情况进行称重与振幅测量。二者均采用永磁磁路系统的磁偏量。



实验图 11-1 直流激励下特性实验



实验图 11-2 交流激励下特性实验

四、实验内容

1. 直流激励下霍尔特性实验，按实验图 11-1 所示接系统，差动放大器调零，在霍尔片远离磁路系统时，调整电位器 W_1 ，使表头指零。装好磁路系统，用测微头，每 0.2mm 读输出值，从 15 mm 直到 5 mm 左右。

2. 直流激励下的应用：接线不变，装上称重平台。适当调节放大器的放大倍数，然后不再改变。在称重平台上放砝码，消除摩擦力后读数 W_1-V ，在台面上放一未知重物，记下表头读数，由定标曲线，求出重量。

3. 交流激励下特性实验：用直流毫伏表，示波器，调整 W_1 、 W_2 ，使不等位电势输出最小，交流激励源只能以音频振荡器的电压输出端（ 0° ， 180° ）输出，幅度限制在峰-峰值 5 伏以下，以免霍尔片产生过热现象。

4. 振幅测量：放大器放大倍数为 1 倍（旋至最左边），音频振荡频率 1 kHz，直流稳压源 ± 2 伏档，接线不变，用示波器观察差动放大器和低通滤波器的输出波形。再按直流激励接线，调零。用示波器观察差动放大器和低通滤波器的波形。

五、实验报告

1. 作输出静特性曲线，指出线性范围，求出灵敏度，直流激励下测振动的波形。
2. 作称重系统的定标曲线。
3. 解释大振幅时，直流激励下测振动的波形，由此得知霍尔传感器是否适合测大位移。

4. 交流激励时，波形又说明什么？

注意事项：激励电压不能过大，以免损坏霍尔片；霍尔传感器线性范围很小，所以砝码和重物不应太重。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 《传感器原理》习题与实验指导书

作者 =

页数 = 6 1

出版社 =

出版日期 =

SS号 = 1 0 9 5 3 0 4 1

DX号 =

URL = <http://book.szdnnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=&d=204018350E153ABB9B73FEBc82B56715>