

电阻应变传感器灵敏度特性研究实验

一、实验简介

传感器是实验测量获取信息的重要环节,通常传感器是指一个完整的测量系统或装置,它能感受规定的被测量,并按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。由于传感器所感受的信号不必是电信号,因此这种转换在非电量的电测法中应用极为广泛。

电阻应变式传感器是力学量传感器,是由已粘贴了电阻应变敏感元件的弹性元件和变换测量电路组成的。总体思想是:通过电阻敏感元件将力学量引起的弹性元件的形变转换为自身电阻值的变化,再通过变换测量电路,将此电阻值的变化转化为电压的变化后输出。

二、实验原理

1. 物理基础

如果沿导线轴线方向施加拉力或压力使之产生变形,其电阻也会随之变化,这种现象称为应变电阻效应,如图1所示,电阻应变式传感器正是基于此效应而产生的。

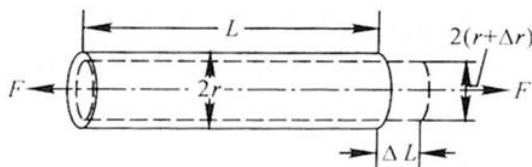


图1 金属丝受力时几何尺寸变化示意图

一段金属导线,设导线长度为L,其截面积为A(直径为D),导线电阻为:

$$R = \rho L / A \quad (1)$$

式中 ρ 为金属导线的电阻率。

将式(1)两边取对数后微分可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2)$$

式中 dL/L 是导线长度的相对变化,可用应变变量 ε 表示, dA/A 是导线截面积的变化,对截面积为圆型的导线,有 $dA/A = 2dD/D$ 。又根据材料力学可知,在导线单向受力时,有 $dD/D = -\nu dL/L$, ν 是材料的泊松比。将这些关系式代入式(2),可得:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= (1 + 2\nu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \\ &= \left[(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} \right] \varepsilon = k_0 \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

此处 k_0 称为电阻应变敏感材料(元件)的灵敏系数,其意义是单位应变变量可产生或转换的电阻值相对变化量,是由材料本身的性质决定的。

$$k_0 = (1 + 2\nu) + d\rho/\rho\varepsilon \quad (4)$$

一般的金属材料,在弹性范围内,其泊松比通常在0.25~0.4之间,因此 $1 + 2\nu$ 在1.5~1.8之间,而其电阻率也稍有变化,一般金属材料制作的应变敏感元件的灵敏系数值 k_0 为2左右,但其具体大小需要经过实验来测定。

2. 金属材料电阻应变片的结构

电阻应变片是常用的电阻应变敏感元件,其结构如右图2所示,由1-敏感栅、2-引线、3-粘接剂、4-盖层和5-基底等组成。其中敏感栅是用厚度为0.003~0.010mm的金属箔制成栅状或用金属丝制成。

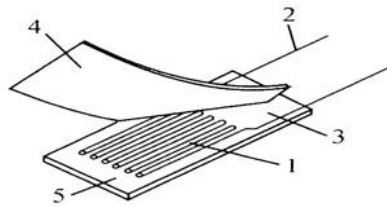


图2 应变片的结构示意图

3. 电阻应变式传感器的转换电路

应变片将应变变量 ε 转换成电阻相对变化量 $\Delta R/R$,为了测量 $\Delta R/R$,通常采用各种电桥线路。根据接入电桥桥臂的工作应变片的位置和数量,可以将电桥电路分为如图3所示的几种情况:

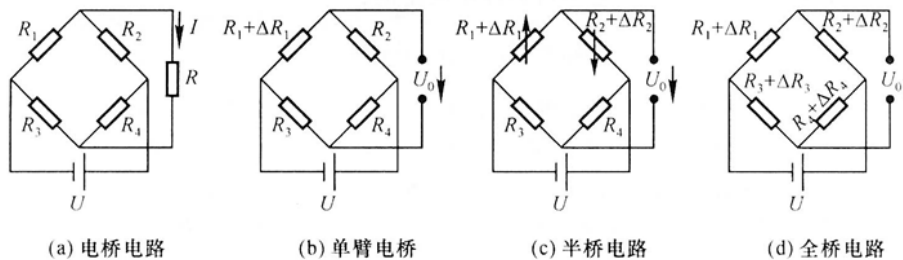


图3 电桥电路

我们知道电桥平衡的条件为: 电桥相对两臂电阻的乘积相等或相邻两臂的电阻比值相等, 即

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{ 或 } R_1/R_2 = R_3/R_4 \quad (5)$$

(1). 单臂电桥

在四臂电桥中,如果只有 R_1 为工作应变片,由于应变而产生相应的电阻变化为 ΔR_1 ,而 R_2 、 R_3 和 R_4 为固定电阻,则称此电桥为单臂电桥,如图3-b所示。 U_0 为电桥输出电压。初始状态下,电桥处于平衡状态, $U_0=0$ 。当有 ΔR_1 时,电桥输出电压 U_0 为:

$$U_0 = \frac{U(R_4/R_3)(\Delta R_1/R_1)}{[1 + (R_2/R_1) + (\Delta R_1/R_1)](1 + R_4/R_3)} \quad (6)$$

电桥电压灵敏度定义为:

$$k_{\mu} = U_0(\Delta R_1/R_1) \quad (7)$$

在式(6)中设桥臂比 $n = R_2/R_1$ ，由于电桥初始平衡时有 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ ，略去分母中的 $\Delta R_1/R_1$ ，可得

$$U_0 = \frac{nU}{(1+n)^2} \cdot \Delta R_1/R_1 \quad (8)$$

于是可以得到单臂为工作应变片时的电桥电压灵敏度为：

$$k_{\mu} = nU/(1+n)^2 \quad (9)$$

(2). 半桥电桥

考虑单臂电桥中U值的选择受到应变片功耗的限制，为此可通过选择n值获得最高的灵敏度 k_{μ} ，由 $dk_{\mu}/dn = 0$ 可得，当 $n=1$ 时，即： $R_1=R_2$ ， $R_3=R_4$ 时， k_{μ} 为最大，并且此时

$$U_0 = U\Delta R_1/4R_1 \quad (10)$$

因此

$$k_{\mu} = U/4 \quad (11)$$

考虑到(8)式中求出 U_0 时忽略了分母中的 $\Delta R_1/R_1$ 项，是近似值，实际值存在有非线性误差，为了减小和克服非线性误差，常用的方法是采用差动电桥，如图3-c所示，在试件上安装两个工作应变片，一片受拉力，另一片受压力，然后接入电桥的相邻两臂，电桥此时的输出电压 U_0 为：

$$U_0 = U \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \quad (12)$$

设平衡电桥初始时 $R_1=R_2=R_3=R_4$ ， $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ，则 $U_0 = U \cdot \Delta R_1/2R_1$

因此

$$k_{\mu} = U/2 \quad (13)$$

此时输出电压不存在非线性误差，而且电桥灵敏度比单臂电桥时提高了一倍，还具有温度补偿作用。

(3). 全桥电桥

为了进一步提高电桥的灵敏度和进行温度补偿，在桥臂中经常安置多个应变片，电桥可采用四臂电桥(或称为全桥)，如图3-d所示。

设平衡电桥初始时 $R_1=R_2=R_3=R_4$ ，忽略高阶微小量，则 $U_0 = U\Delta R_1/R_1$ 。因此

$$k_{\mu} = U \quad (14)$$

此时可见灵敏度最高，且输出与 $\Delta R_1/R_1$ 成线性关系。

实际测试中由于电阻应变片工作时，其电阻变化通常是很小的，电桥相应的输出电压也很小，要推动检测或记录仪器工作，还必须将电桥输出电压放大处理，本实验中用到的放大器为差分放大器，实际用电路图如图4所示：

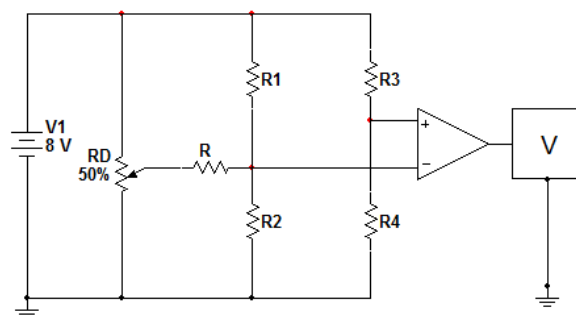


图 4 实验用电桥电路

三、实验内容

1. 熟悉仪器内部各部件配置，功能和使用方法
2. 观察传感器结构及应变片位置，熟悉仪器上的电桥线路
3. 按照图4的电路图连接电路，测量传感器单臂电桥V-W曲线，并求灵敏度 $S = \Delta V / \Delta W$ 。测重物W与电压V的关系曲线，增加砝码(上升曲线)和减小砝码(下降曲线)时各测一条。分别求出上升曲线和下降曲线的灵敏度并求出灵敏度S的平均值。
4. 测量传感器半桥和全桥的灵敏度，并与单臂电桥进行比较

四、实验仪器

电阻应变传感器灵敏度特性研究实验装置包括：SET-N型传感器实验仪；砝码；砝码盒。

1. SET-N型传感器实验仪：

实际照片和程序中的显示：



实际仪器



仿真仪器

电阻应变式传感器通过电阻敏感元件将力学量引起的弹性元件的形变转换为自身电阻值的变化，再通过变换测量电路，将电阻值的变化转化为电压的变化后输出。



仿真仪器操作界面

操作提示：

电源开关：图中 1 为电源的开关按钮，按下则表示电源开关打开，弹起则表示电源按钮关闭。

电桥调零旋钮：图中2为电桥调零旋钮，鼠标左击旋钮，旋钮顺时针旋转，桥路电阻 R 增大；鼠标右击旋钮，旋钮逆时针旋转，桥路电阻 R 减小。

增益旋钮：图中3为增益调节旋钮，鼠标左击旋钮，旋钮顺时针旋转，差动放大器增益变大，放大系数增大；鼠标右击旋钮，旋钮逆时针旋转，差动放大器增益减小，放大系数减小。

电路调零旋钮：图中4为电路调零旋钮，鼠标左击旋钮，旋钮顺时针旋转，差动放大器零点电平升高；鼠标右击旋钮，旋钮逆时针旋转，差动放大器零点电

平减小。

电压表量程按钮：图中7、5、6分别是200mV、2V、20V；点击不同按钮，切换电压表测量量程和精度；

a量程200mV，测量范围-199.9mV~200.0mV，精度0.1mV；

b量程2V，测量范围-1.999V~2.000V，精度0.001V；

c量程20V，测量范围-19.99V~20.00V，精度0.01V；

2. 砝码

实际照片和程序中的显示：



实际仪器



仿真仪器

3. 砝码盘



实际仪器



仿真仪器

五、实验指导

实验重点及难点

- 1、能够依照电路图正确连接实物电路
- 2、能够正确连接全桥电路中不同应变方向的应变片

辅助功能介绍：

界面的右上角的功能显示框:当在普通做实验状态下，显示实验实际用时、记录数据按钮、结束实验按钮、注意事项按钮；在考试状态下，显示考试所剩时间的倒计时、记录数据按钮、结束考试按钮、显示试卷按钮(考试状态下显示)、注意事项按钮。

右上角工具箱:各种使用工具，如计算器等。

右上角help和关闭按钮： help可以打开帮助文件，关闭按钮功能就是关闭实验。

实验仪器栏:存放实验所需的仪器，可以点击其中的仪器拖放至桌面，鼠标触及到仪器，实验仪器栏会显示仪器的相关信息；仪器使用完后，则不允许拖动仪器栏中的仪器了。

提示信息栏:显示实验过程中的仪器信息，实验内容信息，仪器功能按钮信息等相关信息，按F1键可以获得更多帮助信息。

实验状态辅助栏:显示实验名称和实验内容信息(多个实验内容依次列出)，当前实验内容显示为红色，其他实验内容为蓝色；可以通过单击实验内容进行实验内容之间的切换。切换至新的实验内容后，实验桌上的仪器会重新按照当前实验内容进行初始化。

实验操作方法:

(1). 主窗口介绍

成功进入实验场景窗体，实验场景的主窗体如下图组所示：



实验主场景图

(2). 差动放大器调零

1). 差动放大器调零连线

当鼠标移动到实验仪器接线柱的上方，拖动鼠标，便会产生“导线”，当鼠标移动到另一个接线柱的时候，松开鼠标，两个接线柱之间便产生一条导线，连线成功；如果松开鼠标的时候，鼠标不是在某个接线柱上，画出的导线将会被自动销毁，此次连线失败。



2). 差动放大器调零:

- (1) 鼠标点击主电源按钮，打开SET-N型传感器实验仪的电源；
- (2) 点击电路调零旋钮（参照“SET-N型传感器实验仪”功能描述）给差动放大器调零。



(3). 计算单臂电桥的灵密度

1). 单臂电桥连线:

单臂电桥中只有一个工作应变片，其余三个为定值电阻，实验中单臂电桥中的应变片可以更换成其他的应变片，电路连接的方式类似，只是更换不同的应变片。



根据电路图连接好电路，然后在数据表格中点击单臂电桥模块下的“确定状态”按钮，保存连线状态。

2). 单臂电桥调零:

(1) 在差动放大器调零的基础之上，打开实验仪器主电源，鼠标点击电桥调零旋钮（参照“SET-N型传感器实验仪”功能描述）给单臂电桥调零。

(2) 鼠标点击增益旋钮，确定实验中差动放大器的增益。（注意：在实验过程中，请勿改变差动放大倍数和调零电阻阻值）



3). 测量并记录砝码盘上的砝码质量W与对应的电压表读数

电桥调零后，用鼠标将砝码依次拖动到传感器实验仪的砝码盘上，测量每增加(减少)一个砝码电压表的读数，本实验中共需要添加10个砝码。下图为单臂电

桥测量1个砝码示意图；



5). 计算单臂电桥的灵敏度

重复C 步骤，依次测量10个砝码传感器单臂电桥V-W曲线，并由灵敏度 $S = \Delta V / \Delta W$ 求出单臂电桥的灵敏度。增加砝码(上升曲线)和减小砝码(下降曲线)时各测一条。分别求出上升曲线和下降曲线的灵敏度并求出灵敏度S的平均值。

(4). 计算半桥电路的灵敏度

1). 半桥电路连线

半桥电路中有两个工作应变片，其余两个为定值电阻。试验中半桥电路中的工作应变片，一片受拉力，另一片受压力，然后接入电桥的相邻两臂；受拉力的应变片和受压力的应变片可以有多种组合，连线方式类似，只是更换不同的应变片接入电路。



2). 半桥电路调零

该操作与单臂电桥的调零操作方法相同。

3). 测量并记录砝码盘上的砝码质量 W 与对应的电压表读数

电桥调零后，用鼠标将砝码依次拖动到传感器实验仪的砝码盘上，测量每增加(减少)一个砝码电压表的读数，本实验中共需要添加10个砝码，下图为半桥电路测量1个砝码示意图：



4). 计算半桥电路的灵敏度。

计算过程与单臂电桥的计算方法相同。

(5). 计算全桥电路的灵敏度

1). 全桥电路连线。

全桥电路四个电阻都是应变片，实验中对臂的应变片受力方向必须相同(同时受到拉力或者压力)，应变片的组合方式也有多种，电路连接时除电桥的连接方式不同外，电桥的输入和输出也可以互换。



2). 测量并记录砝码盘上的砝码质量W与对应的电压表读数。

电桥调零后，用鼠标将砝码依次拖动到传感器实验仪的砝码盘上，测量每增加(减少)一个砝码电压表的读数，本实验中共需要添加10个砝码，下图为全桥电路测量1个砝码示意图。



3). 计算全桥电路的灵敏度

全桥电路灵敏度的计算方法与单臂电桥灵敏度计算方法相同。

(6). 比较单臂电桥、半桥电路和全桥电路的灵敏度。

将测量和计算得到的单臂电桥、半桥电路和全桥电路的灵敏度相比较。

六、思考题

1. 仔细观察单臂、半桥和全桥电路灵敏度与应变片数量之间的关系，推想三臂电路的电桥灵敏度，并通过实验验证。

2. 半桥测量时，二片不同受力状态的应变片接入电桥时应放在对边还是邻边，为什么？

3. 在许多物理实验中(如拉伸法测钢丝杨氏模量，金属热膨胀系数测量以及本实验)加载(或加热)与减载(降温)过程中对应物理量的变化有滞后效应。试总结它们的共同之处，提出解决方案。

七、参考资料

1. 谢行恕,康士秀,霍剑青.大学物理实验 第二册.第二版 北京:高等教育出版社,2005.192-200.