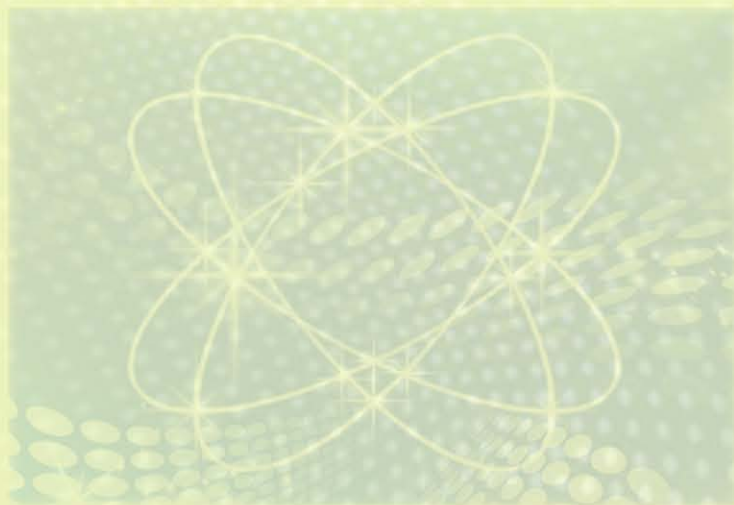


普通高等院校电气信息类专业实验实训系列教材

# 传感器技术实验教程

主 编 刘振方 李 岩

副主编 梁 杰 王 璐 张丽娟



北京理工大学出版社

普通高等院校电气信息类专业实验实训系列教材

# 传感器技术实验教程

主 编 刘振方 李 岩  
副主编 梁 杰 王 璐 张丽娟

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书侧重于对学生实践操作能力和综合设计能力的培养，精选了具有代表性的 27 个实验，具有较强的可操作性和通用性。本书所包括的实验在教学中可根据每个学校的实际情况灵活选择，书中的实验内容和难易程度可以满足不同层次的教学要求。每个实验项目都有实验原理、实验步骤和注意事项等内容，部分实验附带思考题，可供教师和学生选用。

本书内容丰富、全面，可作为应用型本科高等院校的电气与自动化类相关专业课程“传感器技术”的实验教材，也可用作其他高等院校相关专业实验课程教材和教学参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

传感器技术实验教程 / 刘振方, 李岩主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.9

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7467 - 8

I. ①传… II. ①刘… ②李… III. ①传感器 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP212 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 181827 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 8.25

字 数 / 195 千字

版 次 / 2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 28.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

在当今高度信息化社会的时代，传感器技术在工业自动化及机电一体化系统乃至整个现代科学技术领域占有极其重要的地位。为了适应这一时代发展的迫切需要，全国各大高等院校都相继将传感器技术纳入教学任务，作为自动化技术、机电一体化技术、电子技术、通信工程技术等电类相关专业的一门必修课。实验的目的是使学生了解一些电气和各种非电量电测传感元件，熟悉常用的传感器测量技术，学会使用常用的测量仪器仪表，掌握基本的非电量电测方法。要求学生通过实际操作，培养独立思考、独立分析和独立实验的能力，并通过实验加深对理论内容的理解。

《传感器技术实验教程》以普及传感器基础知识、指导应用传感器为主线，在讲述传感器的工作原理、特性、测量电路的基础上，详细讲解了电阻式、压力式、位移式、转速式、温度式、光学式及数据采集等各类传感器的综合应用，重点对检测和应用各种传感器的技能进行实训指导。该书内容全面，深入浅出，图文并茂，通俗易懂，可操作性强，用简明的语言阐明了传感器的工作原理，减少了原理中复杂公式的推导，加强了实用性，能使读者结合实际即学即用。本书可作为各类工科院校传感器技术相关课程的实验教材，也可作为工业技术人员、机电工程技术人员、电子工程企业及广大电子爱好者学习的参考和自学用书。

本书由河北水利电力学院刘振方、李岩担任主编，河北水利电力学院梁杰、王璐、张丽娟担任副主编。其中刘振方编写实验一~实验十五，王璐编写实验十六~实验十九，梁杰编写实验二十~实验二十二，李岩编写实验二十三~实验二十七，张丽娟编写附录部分。

由于时间仓促，编者水平有限，本实验教程难免有疏漏或不当之处，热切期望广大的老师与学生们能够提出宝贵意见。谢谢！

编 者

# 目 录

实验一	应变片性能实验	1
实验二	温度对应变片的影响和电子秤实验	10
实验三	压阻式压力传感器特性实验	12
实验四	差动变压器的性能实验	15
实验五	差动变压器的激励频率和零点残余电压补偿实验	20
实验六	差动变压器和电容式传感器的位移测量实验	23
实验七	光纤传感器、线性霍尔传感器的位移测量实验	29
实验八	电涡流传感器位移测量实验	35
实验九	开关式霍尔传感器、磁电式传感器和光电开关传感器测转速实验	40
实验十	光电开关传感器控制电机转速实验	44
实验十一	温度源的温度调节控制实验	52
实验十二	Pt100 铂电阻测温特性实验	56
实验十三	Cu50 铜热电阻测温特性实验	61
实验十四	K 型热电偶测温性能实验	63
实验十五	E 型热电偶测温性能实验	69
实验十六	集成温度传感器 (AD590) 温度特性实验	71
实验十七	NTC 热敏电阻温度特性实验	74
实验十八	气敏传感器和湿敏传感器实验	77
实验十九	发光二极管 (光源) 的照度标定实验	80
实验二十	硅光电池特性实验	83
实验二十一	光敏电阻特性实验	88
实验二十二	超声波传感器测距实验	93
实验二十三	静态与动态数据监测实验	96
实验二十四	红外发射接收实验	100
实验二十五	ZigBee 无线数据采集实验	102
实验二十六	Wi - Fi 无线数据采集实验	106
实验二十七	BLE 数据采集实验	110

附录 A: Pt100 铂电阻分度表 ( $t - R_t$ 对应值) .....	116
附录 B: Cu50 铜电阻分度表 ( $t - R_t$ 对应值) .....	117
附录 C: K 型热电偶分度表 .....	118
附录 D: E 型热电偶分度表 .....	119
附录 E: JSCG -2 型传感器技术实验台简介 .....	120
参考文献 .....	123

# 实验一 应变片性能实验

## 一、实验目的和要求

- (1) 了解应变片的工作原理与应用并掌握应变片测量电路。
- (2) 了解应变片半桥（双臂）的工作特点及性能。
- (3) 了解应变片全桥的工作特点及性能。
- (4) 比较单臂、半桥、全桥输出时的灵敏度和非线性度，得出相应的结论。

## 二、实验基本理论

电阻应变式传感器是在弹性元件上通过特定工艺粘贴电阻应变片来组成，是一种利用电阻材料的应变效应将工程结构件的内部变形转换为电阻变化的传感器。此类传感器主要是通过一定的机械装置将被测量转化成弹性元件的变形，然后由电阻应变片将弹性元件的变形转换成电阻的变化，再通过测量电路将电阻的变化转换成电压或电流变化信号输出。它可用于能转化成变形的各种非电物理量的检测，如力、压力、加速度、力矩、重量等，在机械加工、计量、建筑测量等行业应用十分广泛。

### 1. 应变片的电阻应变效应

所谓电阻应变效应是指具有规则外形的金属导体或半导体材料在外力作用下产生应变时，其电阻值也会产生相应地改变，这一物理现象称为“电阻应变效应”。以圆柱形导体为例，设其长为 $L$ 、半径为 $r$ 、材料的电阻率为 $\rho$ 时，根据电阻的定义式得：

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi \cdot r^2} \quad (1-1)$$

当导体因某种原因产生应变时，其长度 $L$ 、截面积 $A$ 和电阻率 $\rho$ 的变化为 $dL$ 、 $dA$ 、 $d\rho$ ，相应的电阻变化为 $dR$ 。对式(1-1)全微分得电阻变化率 $dR/R$ 为：

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-2)$$

式中， $dL/L$ 为导体的轴向应变变量 $\varepsilon_L$ ； $dr/r$ 为导体的横向应变变量 $\varepsilon_r$ 。

由材料力学得：

$$\varepsilon_L = -\mu\varepsilon_r \quad (1-3)$$

式中， $\mu$ 为材料的泊松比，大多数金属材料的泊松比为0.3~0.5；负号表示两者的变化方向相反。将式(1-3)代入式(1-2)得：

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-4)$$

式(1-4)说明电阻应变效应主要取决于它的几何应变（几何效应）和本身特有的导电性

能（压阻效应）。

## 2. 应变灵敏度

应变灵敏度是指电阻应变片在单位应变作用下所产生的电阻的相对变化量。

### 1) 金属导体的应变灵敏度 $K$

金属导体的应变灵敏度主要取决于其几何效应，可取

$$\frac{dR}{R} \approx (1 + 2\mu)\varepsilon_r \quad (1-5)$$

其灵敏度系数为：

$$K = \frac{dR}{\varepsilon_r R} = 1 + 2\mu$$

金属导体在受到应变作用时将产生电阻的变化，拉伸时电阻增大，压缩时电阻减小，且与其轴向应变成正比。金属导体的电阻应变灵敏度一般在 2 左右。

### 2) 半导体的应变灵敏度

主要取决于其压阻效应，可取

$$dR/R \leq d\rho/\rho$$

半导体材料之所以具有较大的电阻变化率，是因为它有远比金属导体显著得多的压阻效应。在半导体受力变形时会暂时改变晶体结构的对称性，因而改变了半导体的导电机理，使得它的电阻率发生变化，这种物理现象称为半导体的压阻效应。不同材质的半导体材料在不同受力条件下产生的压阻效应不同，可以是正（使电阻增大）的或负（使电阻减小）的压阻效应。也就是说，同样是拉伸变形，不同材质的半导体将得到完全相反的电阻变化效果。

半导体材料的电阻应变效应主要体现为压阻效应，其灵敏度系数较大，一般为 100 ~ 200。

## 3. 贴片式应变片的应用

在贴片式工艺的传感器上普遍应用金属箔式应变片，贴片式半导体应变片（温漂、稳定性、线性度不好而且易损坏）很少应用。一般半导体应变片采用 N 型单晶硅为传感器的弹性元件，在它上面直接蒸镀扩散出半导体电阻应变薄膜（扩散出敏感栅），制成扩散型压阻式（压阻效应）传感器。

本实验以金属箔式应变片为研究对象。

## 4. 金属箔式应变片的基本结构

金属箔式应变片是在采用苯酚、环氧树脂等绝缘材料的基板上，粘贴直径为 0.025 mm 左右的金属丝或金属箔制成，如图 1-1 所示。

金属箔式应变片就是通过光刻、腐蚀等工艺制成的应变敏感元件，与丝式应变片工作原理相同。电阻丝在外力作用下发生机械变形时，其电阻值发生变化，这就是电阻应变效应，描述电阻应变效应的关系式为：

$$\Delta R/R = K\varepsilon$$

式中， $\Delta R/R$  为电阻丝电阻的相对变化量； $K$  为应变灵敏度系数； $\varepsilon = \Delta L/L$  为电阻丝长度的相对变化量。

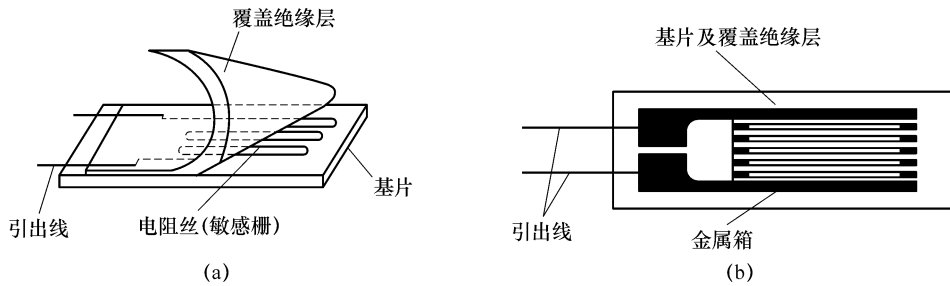


图 1-1 应变片结构图  
(a) 丝式应变片；(b) 箔式应变片

### 5. 测量电路

为了将电阻应变式传感器的电阻变化转换成电压或电流信号，在应用中一般采用电桥电路作为其测量电路。电桥电路具有结构简单、灵敏度高、测量范围宽、线性度好且易实现温度补偿等优点。能较好地满足各种应变测量要求，因此在应变测量中得到了广泛的应用。

电桥电路按其工作方式分有单臂、双臂和全桥三种，单臂电路工作输出信号最小，线性、稳定性较差；双臂电路输出是单臂的两倍，性能比单臂电路有所改善；全桥电路工作时的输出是单臂时的四倍，性能最好。因此，为了得到较大的输出电压信号一般都采用双臂或全桥电路工作。其基本电路如图 1-2 中 (a)、(b)、(c) 所示。

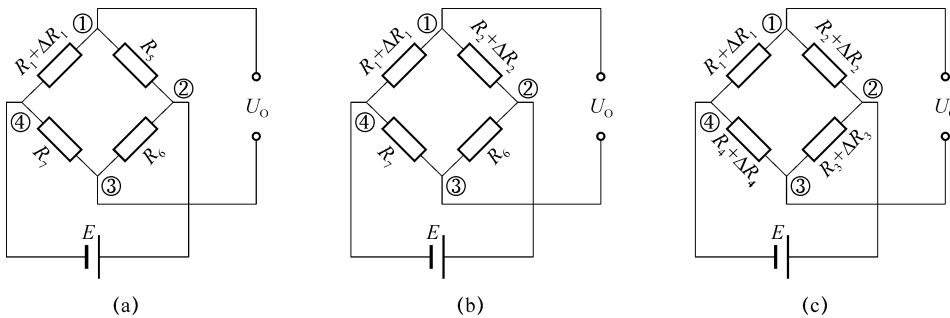


图 1-2 应变片测量电路  
(a) 单臂电路；(b) 双臂（半桥）电路；(c) 全桥电路

#### 1) 单臂电路

$$\begin{aligned}
 U_o &= U_{10} - U_{30} \\
 &= [(R_1 + \Delta R_1)/(R_1 + \Delta R_1 + R_5) - R_7/(R_7 + R_6)] E \\
 &= \{ [(R_7 + R_6)(R_1 + \Delta R_1) - R_7(R_5 + R_1 + \Delta R_1)] / [(R_5 + R_1 + \Delta R_1)(R_7 + R_6)] \} E
 \end{aligned}$$

设  $R_1 = R_5 = R_6 = R_7$ ，且  $\Delta R_1/R_1 = \Delta R/R \ll 1$ ， $\Delta R/R = K\varepsilon$ ， $K$  为灵敏度系数。则：

$$U_o \approx (1/4)(\Delta R_1/R_1)E = (1/4)(\Delta R/R)E = (1/4)K\varepsilon E$$

所以电桥的电压灵敏度为：

$$S = U_o/(\Delta R_1/R_1) = (1/4)E$$

2) 双臂 (半桥) 电路

同理：
$$U_o \approx (1/2)(\Delta R/R)E = (1/2)K\varepsilon E$$
$$S = (1/2)E$$

3) 全桥电路

同理：
$$U_o \approx (\Delta R/R)E = K\varepsilon E$$
$$S = E$$

6. 金属箔式应变片电桥实验原理图

1) 应变片单臂电桥性能实验原理图

图 1-3 中  $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$  为  $350\ \Omega$  固定电阻,  $R_1$  为应变片;  $R_{W1}$  和  $R_8$  组成电桥调平衡网络,  $E$  为供桥电源 ( $\pm 4\ V$ )。桥路输出电压  $U'_o \approx \frac{1}{4}(\Delta R_1/R_1)E = (1/4)(\Delta R/R)E = \frac{1}{4}K\varepsilon E$ 。差动放大器输出为  $U_o$ 。

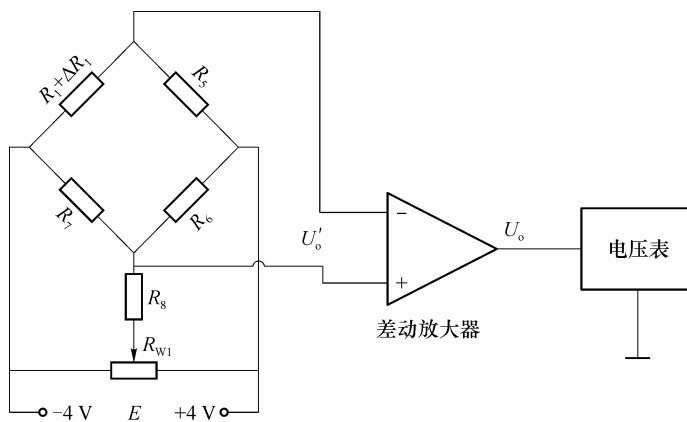


图 1-3 应变片单臂电桥性能实验原理图

2) 应变片半桥性能实验原理图

应变片半桥特性实验原理如图 1-4 所示。不同应力方向的两片应变片接入电桥作为邻边, 输出灵敏度提高, 非线性得到改善。其桥路输出电压  $U'_o \approx \frac{1}{2}(\Delta R/R)E = \frac{1}{2}K\varepsilon E$ 。

3) 应变片全桥性能实验接线原理图

应变片全桥特性实验原理如图 1-5 所示。应变片全桥测量电路中, 将应力方向相同的两应变片接入电桥对边, 相反的应变片接入电桥邻边。当应变片初始阻值:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , 其变化值  $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$  时, 其桥路输出电压  $U'_o \approx (\Delta R/R)E = K\varepsilon E$ 。其输出灵敏度比半桥又提高了一倍, 非线性得到改善。

### 三、设备仪器、工具及材料

JSCG-2 型传感器检测技术实验台主机箱中的  $\pm 2 \sim \pm 10\ V$  (步进可调) 直流稳压电源、 $\pm 15\ V$  直流稳压电源、电压表; 应变传感器实验模板、托盘、砝码;  $4\ \frac{1}{2}$  位数显万用表 (自备)。

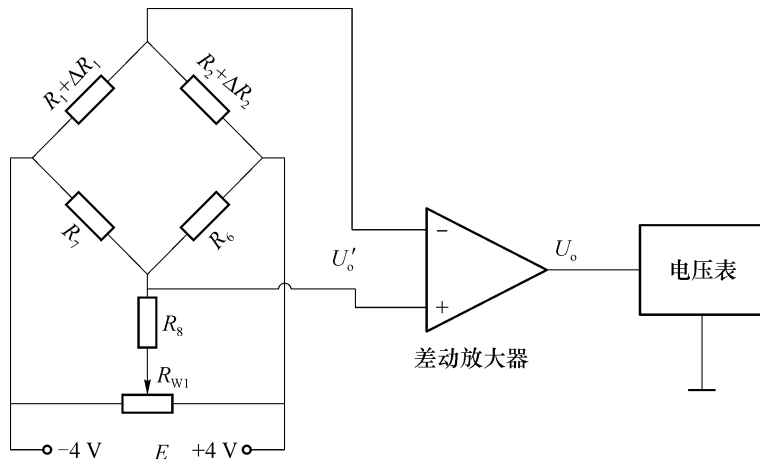


图 1-4 应变片半桥性能实验原理图

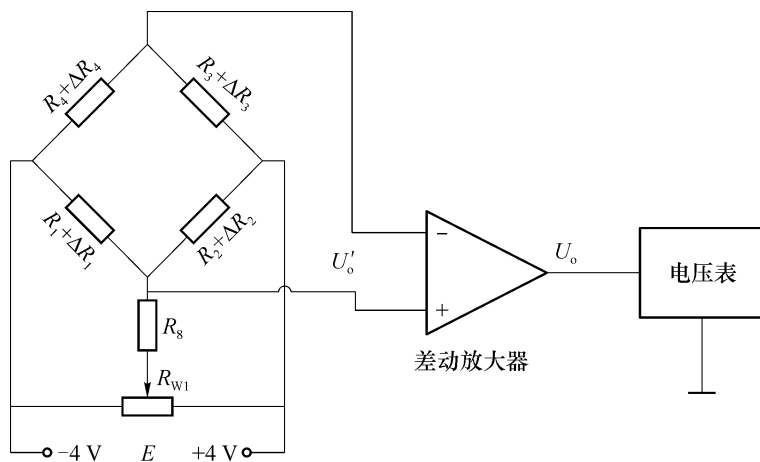


图 1-5 应变片全桥性能实验原理图

#### 四、步骤和过程

应变传感器实验模板使用说明：应变传感器实验模板由应变式双孔悬臂梁载荷传感器（称重传感器）、加热器 +5 V 电源输入口、多芯插头、应变片测量电路、差动放大器组成。应变传感器实验模板中的  $R_1$ （传感器的右上）、 $R_2$ （传感器的右下）、 $R_3$ （传感器的左上）、 $R_4$ （传感器的左下）为称重传感器上的应变片输出输入口；没有文字标记的 5 个电阻符号是空的无实体，其中 4 个电阻符号组成电桥模型是为电路初学者组成电桥接线方便而设； $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$  是  $350\ \Omega$  固定电阻，是为应变片组成单臂电桥、双臂电桥（半桥）而设的其他桥臂电阻。加热器 +5 V 是传感器上的加热器的电源输入口，做应变片温度影响实验时用。多芯插头是振动源的振动梁上的应变片输入口，做应变片测量振动实验时用。

### 1. 应变片单臂电桥性能实验

(1) 将托盘安装到传感器上，如图 1-6 所示。

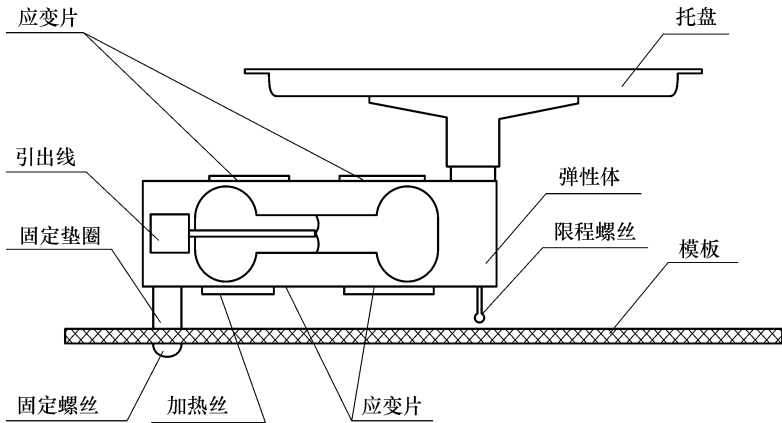


图 1-6 传感器托盘安装示意图

(2) 测量应变片的阻值：当传感器的托盘上无重物时，如图 1-7 所示，分别测量应变片  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  的阻值。在传感器的托盘上放置 10 只砝码后再分别测量  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  的阻值变化，分析应变片的受力情况（受拉的应变片：阻值变大；受压的应变片：阻值变小）。

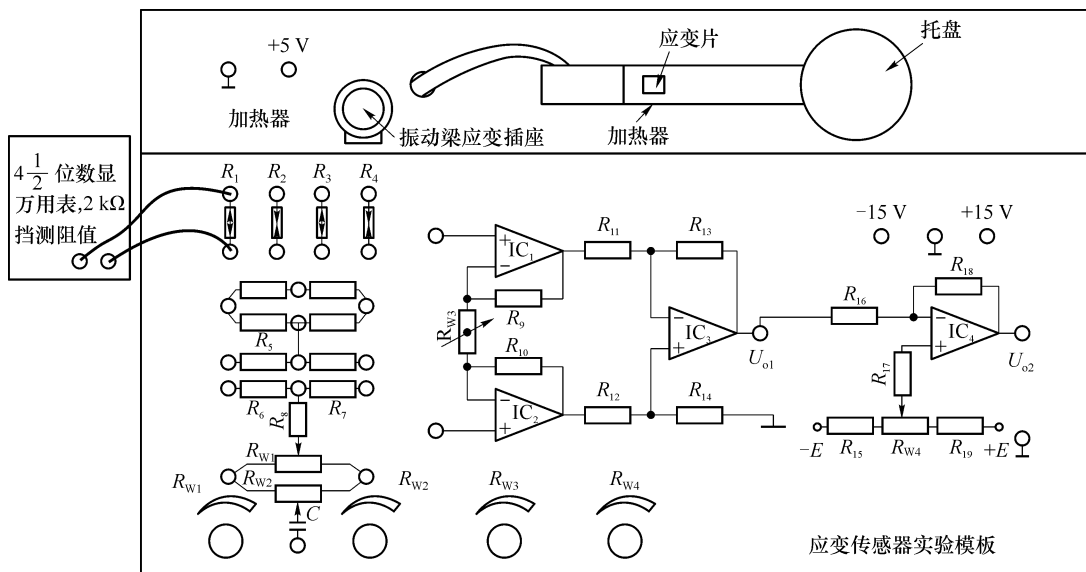


图 1-7 测量应变片的阻值示意图

(3) 应变传感器实验模板中的差动放大器调零：按图 1-8 示意图接线，将主机箱上的电压表量程切换开关切换到 2 V 挡，检查接线无误后合上主机箱电源开关；调节放大器的增益电位器  $R_{W3}$  合适位置（先顺时针轻轻转到底，再逆时针回转 1 圈）后，再调节实验模板放

大器的调零电位器  $R_{W4}$ ，使电压表显示为零。

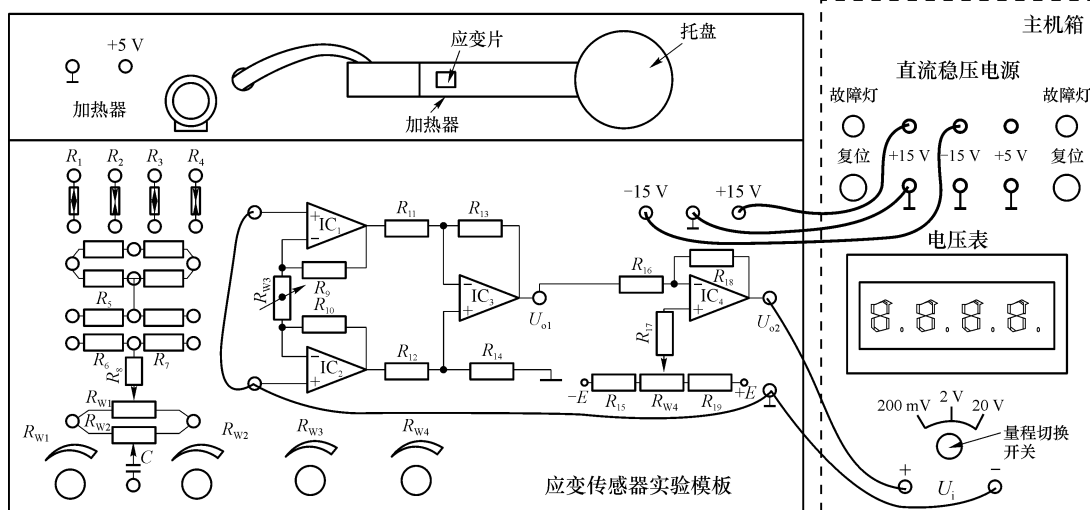


图 1-8 差动放大器调零接线示意图

(4) 应变片单臂电桥实验：关闭主机箱电源，按图 1-9 示意图接线，将  $\pm 2 \sim \pm 10 \text{ V}$  可调电源调节到  $\pm 4 \text{ V}$  挡。检查接线无误后合上主机箱电源开关，调节实验模板上的桥路平衡电位器  $R_{W1}$ ，使主机箱电压表显示为零；在传感器的托盘上依次增加放置一只  $20 \text{ g}$  砝码（尽量靠近托盘的中心点放置），读取相应的数显表电压值，记下实验数据并填入表 1-1。

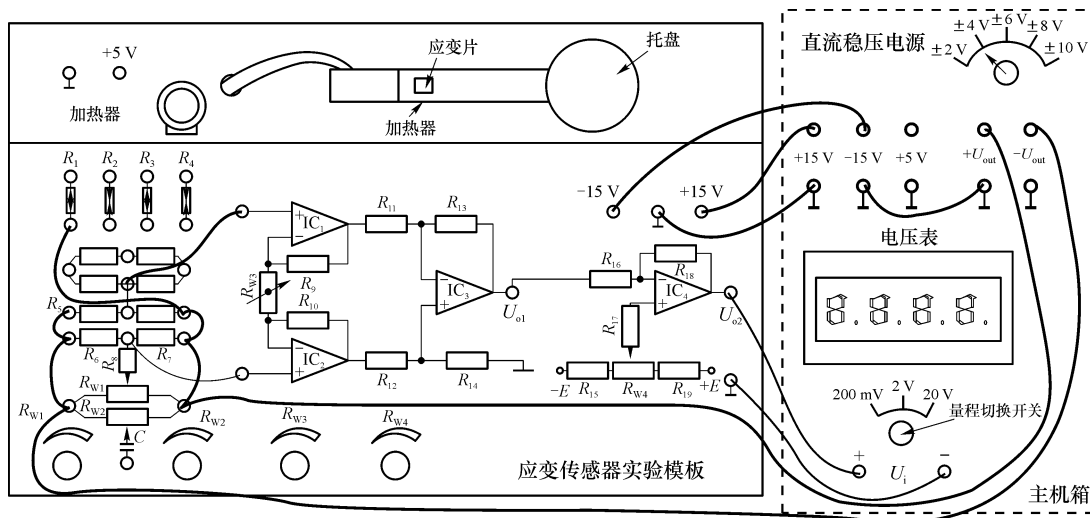


图 1-9 应变片单臂电桥性能实验接线示意图

表 1-1 应变片单臂电桥性能实验数据

质量/g	0								
电压/mV	0								

(5) 根据表 1-1 数据作出曲线并计算系统灵敏度  $S = \Delta U / \Delta W$  ( $\Delta U$  为输出电压变化量,  $\Delta W$  为质量变化量) 和非线性误差  $\delta$ ,  $\delta = \Delta m / y_{FS} \times 100\%$ , 式中  $\Delta m$  为输出值 (多次测量时为平均值) 与拟合直线的最大偏差;  $y_{FS}$  为满量程输出值, 此处为 200 g。

实验完毕, 关闭电源。

## 2. 应变片半桥性能实验

(1) 按单臂电桥性能实验中的前三个步骤进行操作。

(2) 关闭主机箱电源, 除将图 1-9 改成图 1-10 示意图接线外, 其他按单臂电桥性能实验中的第四步进行实验。读取相应的数显表电压值, 记下实验数据并填入表 1-2 中。

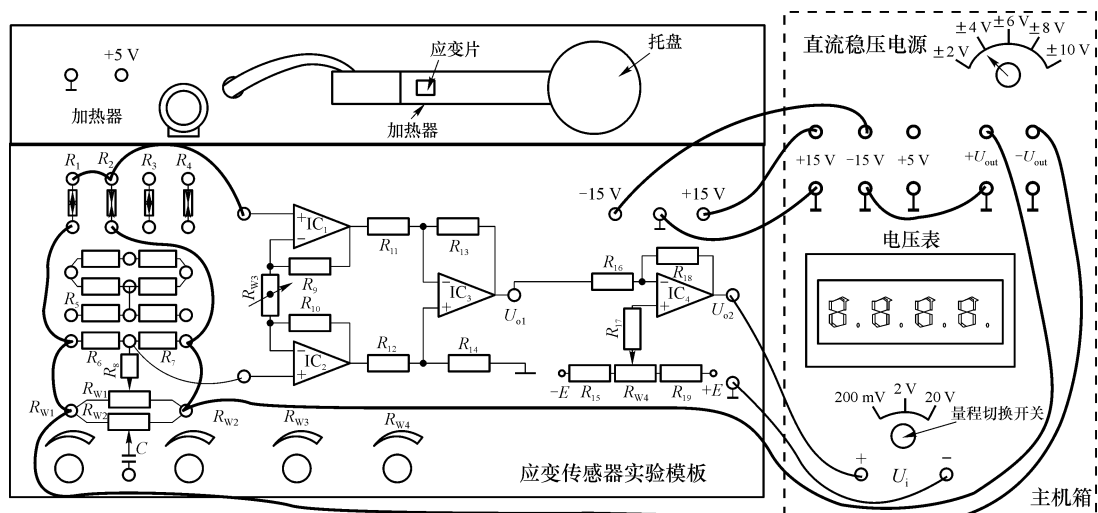


图 1-10 应变片半桥性能实验接线示意图

表 1-2 应变片半桥性能实验数据

质量/g	0								
电压/mV	0								

(3) 根据表 1-2 实验数据作出实验曲线, 计算灵敏度  $S = \Delta U / \Delta W$ , 以及非线性误差  $\delta$ 。实验完毕, 关闭电源。

## 3. 应变片全桥性能实验

(1) 按单臂电桥性能实验中的前三个步骤进行操作。

(2) 关闭主机箱电源, 除将图 1-9 改成图 1-11 示意图接线外, 其他按单臂电桥性能实验中的第四步进行实验。读取相应的数显表电压值, 记下实验数据并填入表 1-3 中。

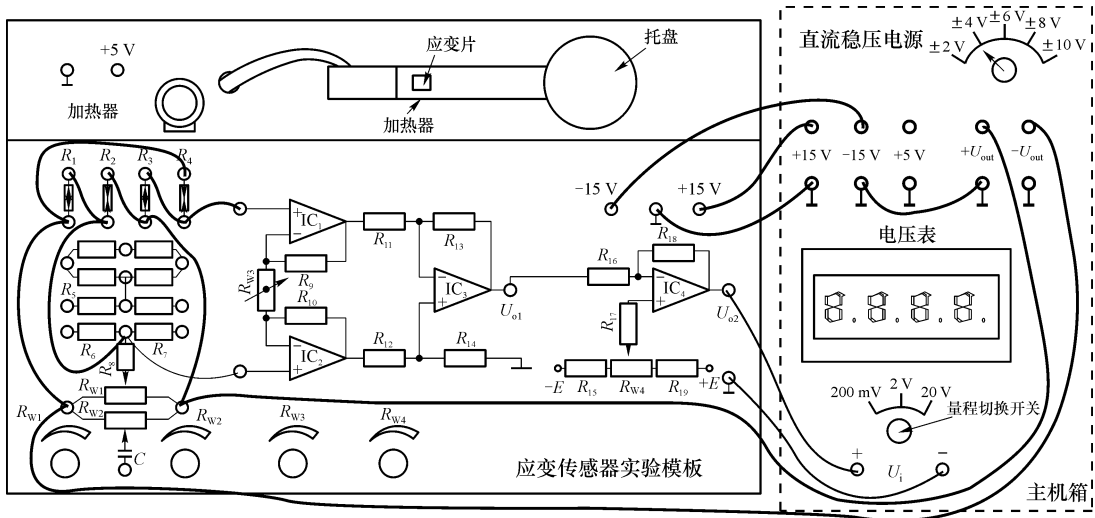


图 1-11 应变片全桥性能实验接线示意图

表 1-3 应变片全桥性能实验数据

质量/g													
电压/mV													

(3) 根据表 1-3 实验数据作出实验曲线，计算灵敏度  $S = \Delta U / \Delta W$ ，以及非线性误差  $\delta$ 。实验完毕，关闭电源。

## 五、实验注意事项

- (1) 接线与拆线前先关闭电源。
- (2) 实验前应检查实验接插线是否完好，连接电路时应尽量使用较短的接插线，以避免引入干扰。
- (3) 将接插线插入插孔，以保证接触良好，切忌用力拉扯接插线尾部，以免造成线内导线断裂。
- (4) 稳压电源不要对地短路。

## 六、思考题

- (1) 在半桥测量中两片不同受力状态的电阻应变片接入电桥时，应放在对边还是邻边？
- (2) 实验测量中，当两组对边 ( $R_1$ 、 $R_3$  为对边) 电阻值  $R$  相同时，即  $R_1 = R_3$ ， $R_2 = R_4$ ，而  $R_1 \neq R_2$  时，是否可以组成全桥？
- (3) 根据实验所得的单臂、半桥和全桥输出时的灵敏度和非线性度，从理论上进行分析比较。经实验验证并阐述理由（注意：实验中的放大器增益必须相同）。

# 实验二 温度对应变片的影响和电子秤实验

## 一、实验目的和要求

- (1) 了解温度对应变片测试系统的影响。
- (2) 了解应变直流全桥的应用及电路的标定。

## 二、实验基本理论

(1) 电阻应变片的温度影响，主要来自两个方面：敏感栅丝的温度系数；应变栅的线膨胀系数，与弹性体（或被测试件）的线膨胀系数不一致时会产生附加应变。因此当温度变化时，在被测体受力状态不变时，输出会有变化。

(2) 常用的称重传感器就是应用了金属箔式应变片及其全桥测量电路。数字电子秤实验原理如图 2-1 所示。本实验只做放大器输出  $U_0$  实验，通过对电路的标定使电路输出的电压值为质量对应值，将电压量纲（V）改为质量量纲（g）即成为一台原始电子秤。

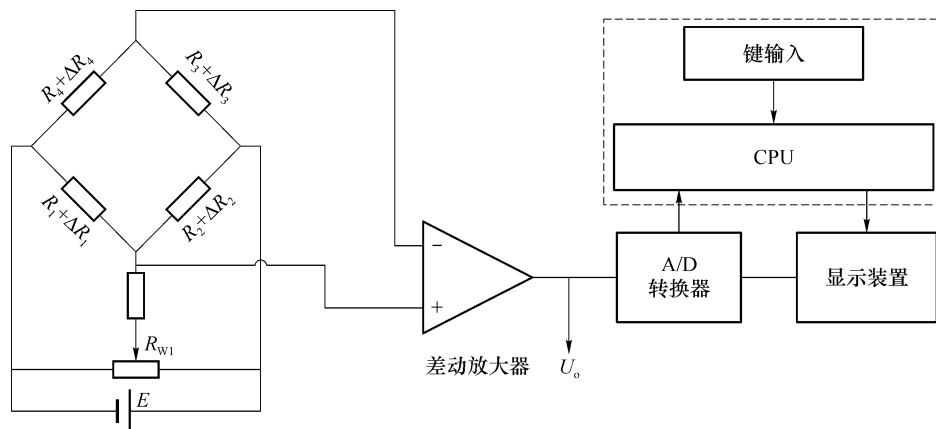


图 2-1 数字电子秤原理框图

## 三、设备仪器、工具及材料

JSCG-2 型传感器检测技术实验台主机箱中的  $\pm 2 \sim \pm 10 \text{ V}$ （步进可调）直流稳压电源、 $\pm 15 \text{ V}$  直流稳压电源、电压表；应变传感器实验模板、托盘、砝码、加热器（在实验模板上，已粘贴在应变传感器左下角底部）。

## 四、步骤和过程

### 1. 应变片的温度影响实验

- (1) 按照实验一中全桥性能实验进行实验。
- (2) 将 200 g 砝码放在托盘上，在数显表上读取并记录电压值  $U_{o1}$ 。
- (3) 将主机箱中直流稳压电源 +5 V、“ $\perp$ ”接于实验模板的加热器 +5 V、“ $\perp$ ”插孔上，数分钟后待数显表电压显示基本稳定后，记下读数  $U_{ot}$ ， $U_{ot} - U_{o1}$  即为温度变化的影响。计算这一温度变化产生的相对误差：

$$\delta = \frac{U_{ot} - U_{o1}}{U_{o1}} \times 100\%$$

实验完毕，关闭电源。

### 2. 应变片直流全桥的应用——电子秤实验

- (1) 按实验一中 (1) ~ (3) 步骤实验。
- (2) 关闭主机箱电源，按图 1-11 (应变片全桥性能实验接线示意图) 接线，将  $\pm 2 \text{ V} \sim \pm 10 \text{ V}$  (步进可调) 直流稳压电源调节到  $\pm 4 \text{ V}$  挡。检查接线无误后合上主机箱电源开关，调节实验模板上的桥路平衡电位器  $R_{W4}$ ，使主机箱电压表显示为零。
- (3) 将 10 只砝码全部置于传感器的托盘上，调节电位器  $R_{W3}$  (增益即满量程调节) 使数显表显示为 0.200 V (2 V 挡测量)。
- (4) 拿去托盘上的所有砝码，调节电位器  $R_{W1}$  (零位调节) 使数显表显示为 0.000 V。
- (5) 重复以上 (3) ~ (4) 步骤的标定过程，一直到精确为止，把电压量纲 V 改为质量量纲 g，将砝码依次放在托盘上称重；放上笔、钥匙之类的小东西称一下质量。

实验完毕，关闭电源。

## 五、实验注意事项

- (1) 接线与拆线前先关闭电源。
- (2) 将接插线插入插孔，以保证接触良好，切忌用力拉扯接插线尾部，以免造成线内导线断裂。
- (3) 不要在砝码盘上放置超过 1 kg 的物体，否则容易损坏传感器。
- (4) 电桥的电压为  $\pm 5 \text{ V}$ ，绝不可错接成  $\pm 15 \text{ V}$ 。

## 六、思考题

- (1) 温度对金属箔式应变片的影响分几个方面？金属箔式应变片的温度影响有哪些消除方法？
- (2) 分析什么因素会导致电子秤的非线性误差增大？怎么消除？若要增加输出灵敏度，应采取哪些措施？