

电阻应变式传感器原理及其应用举例*

孙 辉 韩玉龙 姚星星

(安徽信息工程学院基础教学部 安徽 芜湖 24100)

(收稿日期:2016-11-09)

摘 要:电阻式应变传感器应用广泛,可将位移、压力、加速度等非电物理量转换成电阻变化,从而进行信息采集.利用大学物理和物理实验课程中包含的基础知识,分析电阻应变式传感器的原理并介绍实际使用的典型实例,以为大学物理教学提供一个综合的应用型案例.

关键词:电阻 传感器 应用 大学物理

传感器是一种可以将非电学的物理量、化学量和生物量等转换成电信号或其他可用信号的装置,它感知的对象包括位移、压力、流量、湿度、温度、光强、浓度和分子种类等.传感器具有微型化、数字化、智能化等特点.它是实现自动检测和自动控制的首要环节.传感器使毫无生命力的物体有了触觉、视觉、味觉和嗅觉等感官,让物体“活”了起来^[1].

现代家用电器中普遍应用着传感器,比如在空调、电热水器、电熨斗、电冰箱中我们都能发现传感器的身影.传感器在汽车上的应用也极其广泛,如汽车安全气囊、防盗装置、防抱死装置等.在现代化工业生产尤其是自动化生产过程中,传感器被用来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态.传感器也为物联网技术和人工智能技术的发展和应用提供了极大的助力.传感器属于物联网的神经末梢,负责信息采集,各类传感器的大规模部署和应用是构成物联网不可或缺的基本条件^[2].

1 原理简介

在种类繁多的传感器中,电阻式传感器的应用非常广泛,尤其是电阻应变式传感器.这类传感器的工作原理是基于电阻应变效应,即材料在外力作用下产生机械变形(拉伸或压缩)时,其电阻值相应发

生变化.根据制作材料的不同,应变原件分为金属和半导体两大类.现以金属为例,介绍其工作原理^[3].

如图1所示,一根金属电阻丝,在其未受力时,原始电阻值为 $R = \rho \frac{l}{A}$,其中 ρ 为金属电阻率, l 为轴向长度, A 为横截面积.当电阻丝受到拉力 F 作用时,沿轴向伸长 Δl ,沿径向缩短 Δr ,横截面积相应减小 ΔA ,电阻率因材料晶格发生变形等因素影响而改变了 $\Delta \rho$,从而引起电阻值相对变化.

将电阻表达式两边取对数后,再代入 $A = \pi r^2$ 微分可得

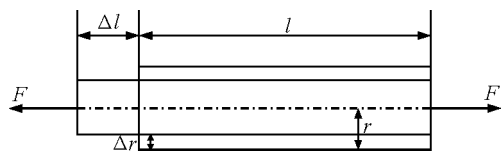


图1 金属丝在力 F 作用下的拉伸示意图

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

用相对变化量表示则有

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{2\Delta r}{r} \quad (2)$$

纵向应变定义为 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$,径向应变定义为 $\epsilon_r = \frac{\Delta r}{r}$,且径向应变和纵向应变之间有 $\epsilon_r = -\mu \epsilon$,其中 μ

* 安徽省教育厅教学研究项目“应用型本科学物理教学改革——以安徽工程大学机电学院为例”,项目编号:2015jyxm726;安徽工程大学机电院校级教学研究项目“构建工科类专业大学物理教学的典型案例库”.

作者简介:孙辉(1986-),男,博士,主要从事大学物理教学研究.

为泊松系数, 则式(2)可转换为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon \quad (3)$$

式中 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ 的值与敏感元件在轴向所受的应变有关, 其关系为

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \lambda \sigma = \lambda E \epsilon \quad (4)$$

式(4)中 λ 为材料的压阻系数(单位应力作用下电阻率的相对变化), σ 为材料所受的应力, E 为半导体材料的弹性模量, ϵ 为材料的应变. 代入式(3)有

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \lambda E)\epsilon \quad (5)$$

对于金属电阻丝来说 λE 很小, 所以 $\frac{\Delta R}{R} \approx (1 + 2\mu)\epsilon$, 电阻应变片的应变系数(灵敏系数) $K = 1 + 2\mu$, 其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化量, 即 $\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon$. 而对于半导体材料来说, λE 通常是 $1 + 2\mu$ 的上百倍, $1 + 2\mu$ 可以忽略, 即式(5)可简化为 $\frac{\Delta R}{R} = \lambda E \epsilon$, 所以对于半导体材料来说, 灵敏系数 $K = \lambda E$. 半导体材料的 K 值可达 $60 \sim 180$. 半导体应变片的灵敏系数比金属丝式高 $50 \sim 80$ 倍. 虽然半导体应变片的灵敏度更高, 但是其温度稳定性差、较大应力作用下非线性误差大、机械强度低, 而金属电阻应变片使用寿命长、性能稳定可靠、价格低廉、易于加工、品种多样, 所以更便于选择和大量使用.

2 应变片构成及测量电路

金属电阻应变片有多种形式, 常用的有丝式和箔式. 它是由直径为 $0.02 \sim 0.05$ mm 的康铜丝或者镍铬丝绕成栅状(或用很薄的金属箔腐蚀成栅状)夹在两层绝缘薄片(基底)中制成, 用镀锡铜线与应变片敏感栅连接作为应变片引线, 用来连接测量导线.

用应变片测量应变或应力时, 将应变片贴在被测物上. 在外力作用下, 被测物产生微小变形, 应变片随之发生相同的变化, 应变片电阻值也相应变化. 当测得应变片电阻变化 ΔR 时, 便可得到被测对象的应变值 ϵ . 根据应力与应变的关系, 进一步得到应力值 $\sigma = E\epsilon$. 不同的敏感栅金属材料有不同的灵敏

系数, 常见的康铜箔的灵敏系数在 $2.00 \sim 2.20$ 之间. 由于应变是相当微小的变化, 所以产生的电阻变化也是极其微小的. 要精确地测量这么微小的电阻变化是非常困难的, 为了对这种微小电阻变化进行测量, 常使用带有惠斯通电桥的专用应变测量电路^[4].

惠斯通电桥(如图2所示)由4个电阻组合而成, 如果 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 或者 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$, 则无论输入电压多大, 输出电压总为零, 这种状态称为平衡状态.

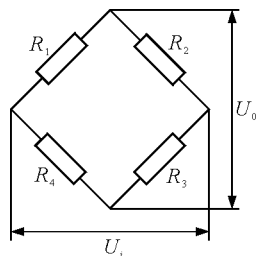


图2 惠斯通电桥 ($\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ 时为平衡电桥)

如果平衡被破坏, 就会产生与电阻变化相对应的输出电压. 如图3所示, 将这个电路中的 R_1 处接应变片, 有形变产生时, 应变片的电阻变化量为 ΔR_1 .

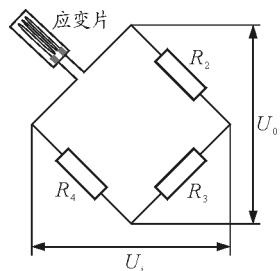


图3 接入一枚应变片的电桥

设 $\frac{R_3}{R_4} = t$, 则有

$$U_o = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{(1+t) + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \frac{t}{1+t} U_i \quad (6)$$

如果使用的是等臂电桥, 即 $t = 1$; 且为了简化, 使 $R_1 = R_2$, 则

$$U_o = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \frac{U_i}{2} \quad (7)$$

因为电阻变化率远远小于2,所以输出电压 U_0 的计算公式简化为

$$U_0 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} U_i = \frac{1}{4} K \epsilon U_i \quad (8)$$

式中 U_i 为输入电压,所以只要测出电桥的输出电压,根据已知的灵敏系数 K 和输入电压,就可以计算出应变 ϵ 的大小.

另一类电路如图4所示,在电桥中连接两枚相同的应变片,共有两种方法.

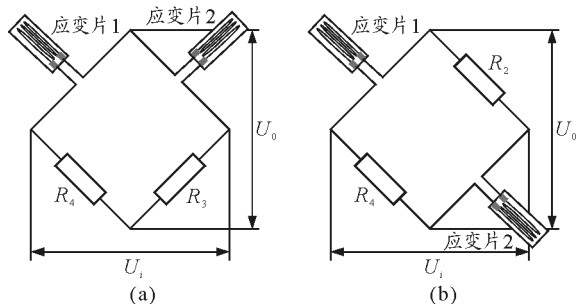


图4 双应变片半桥的两种接法

电桥的4条边中有两条的电阻发生变化,利用上述的简化处理,对于图4(a)可得

$$U_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) U_i = \frac{1}{4} K (\epsilon_1 - \epsilon_2) U_i \quad (9)$$

对图4(b)可得

$$U_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) U_i = \frac{1}{4} K (\epsilon_1 + \epsilon_3) U_i \quad (10)$$

也就是说当连入两枚应变片时,根据连入方式的不同,两枚应变片上产生的应变或加或减,这种接法称为半桥接法.

3 半桥接法应用举例

半桥接法在实际中最常用,比如可以利用图4(a)中的接法, R_1 处接工作片, R_2 处接温度补偿片, R_3 和 R_4 为电路内部的两个电阻,由于接在相邻边的两应变片置于相同的温度环境里,所以它们各自自由温度引起的应变相同,故由温度引起的输出电压为零.那么就可以利用这样的半桥抵消掉工作片纯粹由于温度变化而引起的应变,这种温度补偿法在实际测量中必不可少.再如,可以利用半桥同时测量两种应变.如图5所示,在梁的上下表面对应的位置分别贴上一枚应变片,同时对悬臂梁施加使其弯

曲和伸长的两个力,将两应变片连入电桥的相邻边和相对边就可以测知分别由弯曲和伸长所产生的应变.由于悬臂梁的弯曲,在应变片1上产生拉伸的正应变,而在应变片2上产生压缩的负应变.

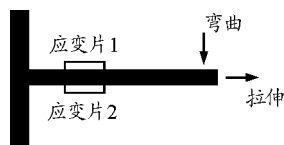


图5 利用双应变片同时测量弯曲和拉伸应变

因为两枚应变片与梁末端距离相同,所以虽然二者正负不同,但绝对值相同.这样,如果只想测弯曲应变,则利用图4(a)的接法;对于拉伸变形,在应变片1和2上会同时产生大小相等的正应变,所以根据式(9),不会产生相应的输出电压;而对于弯曲变形,式(9)括号中的项变为每枚应变片上产生应变的2倍,从而利用式(9)测得弯曲应变.若想测拉伸应变,则按照图4(b)的接法将应变片连入桥路的相对边;对于弯曲变形,由于应变大小相等正负相反,根据式(10),弯曲应变对于输出电压贡献为零;由于拉伸应变所产生的输出电压为每枚应变片所产生电压的2倍,所以可通过式(10)测得拉伸应变.

4 电阻式应变片实际用途

应变片在大坝、桥梁、航天飞机、船舶结构、发电设备等工程结构的应力测量中至今仍是应用最广泛和最有效的传感器.如美国波音767飞机静力结构试验中就采用了2000多个电阻应变片和1000多个应变花来测量飞机结构大量部位的应变数据.而日常生活中所见的用于测量重量的仪器,如电子秤、地磅等也都利用了电阻应变式传感器作为信息采集装置.

参考文献

- 1 栾桂冬. 传感器及其应用. 西安: 电子科技大学出版社, 2002
- 2 朱仲英. 传感网与物联网的进展与趋势. 微型电脑应用, 2010, 26(1): 1 ~ 3
- 3 陆旭明. 电阻式传感器物理解析. 物理教师, 2014, 35(8): 56 ~ 58
- 4 李艳, 李新娥, 裴东兴. 应变式压力传感器及其应用电路设计. 计量与测试技术, 2007, 34(12): 32 ~ 33