

电阻应变片的实验与应用

李巧真, 李 刚, 韩钦泽

(天津大学 自动化学院, 天津 300072)

摘 要: 电阻应变片是广泛应用的传感元件之一, 已成为非电量电测技术中重要的检测手段。介绍了其工作原理及测量电路的设计与特性, 并通过两个实例说明了电阻应变片的应用。

关键词: 电阻应变片; 传感器; 测量电路; 直流电桥; 交流电桥

中图分类号: TP212.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-7167(2011)04-0134-05

Experiment and Application of Resistance Strain Gauge

LI Qiao-zhen LI Gang HAN Qin-ze

(School of Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Resistance strain gauge is one of widely used sensors, hence has become the important mean in non-electricity measurement. This paper introduced its operation principle and characteristics of measuring circuits. Two examples were presented to explain the application of resistance strain gauge.

Key words: resistance strain gauge; sensors; measuring circuit; DC bridge; AC bridge

0 引 言

近年来传感器技术的应用研究已经在许多工业发达的国家中得到了普遍的重视^[1]。电阻应变片是应用最广、最方便的传感元件之一, 本文结合教学实验作一简介。

1 电阻应变片

1.1 工作原理^[2]

电阻应变片的应用原理是基于金属电阻丝的电阻应变效应。

设有一段长 L 、截面积 A 、电阻率 ρ 的金属丝 (见图 1), 其原始电阻值为:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

式中: R 为金属丝的原始电阻 (Ω); ρ 为金属丝的电阻率 ($\Omega \cdot m$); L 为金属丝的长度 (m); A 为金属丝的横截面积 (m^2), $A = \pi r^2$, r 为金属丝的半径。

当金属丝受到轴向力 F 而被拉伸 (或压缩) 时, 其 L 、 A 和 ρ 均发生变化。

可以证明:

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

其中: λ 为压阻系数; μ 为金属丝材料的泊松比; E 为金属丝材料的弹性模量; ϵ 为金属丝材料的应变。

由式 (1) 可知, 电阻相对变化量是由 2 方面的因素决定: ① 由金属丝几何尺寸的改变而引起, 即 $(1 + 2\mu)$ 项; ② 材料受力后, 材料的电阻率 ρ 发生变化而引起, 即 λE 项。对于特定的材料, $(1 + 2\mu + \lambda E)$ 是一常数, 因此, 式子所表达的电阻丝电阻变化率与应变成线性关系, 这就是电阻应变计测量应变的理论基础。

式 (1) 中, 令 $K_0 = (1 + 2\mu + \lambda E)$, 则有

$$\frac{dR}{R} = K_0 \epsilon \quad (2)$$

式中: K_0 为单根金属丝的灵敏系数, 其物理意义是当金属丝发生单位长度变化 (应变) 时, 其大小为电阻变化率与其应变的比值, 亦即单位应变的电阻变化率。

1.2 电阻应变片的基本结构

电阻应变片 (也称应变计) 的基本结构见图 1。

(1) 敏感栅。应变计中实现应变—电阻转换的敏感元件。敏感栅合金材料的选择对所制造的电阻应变

收稿日期: 2010-09-03

作者简介: 李巧真 (1960-) 女, 河北沧州人, 工程师, 主要从事检测技术与自动化装置。

Tel: 022-27404274 022-81998228 E-mail: liqiaozhen@eyou.com

计性能的好坏起着决定性的作用。

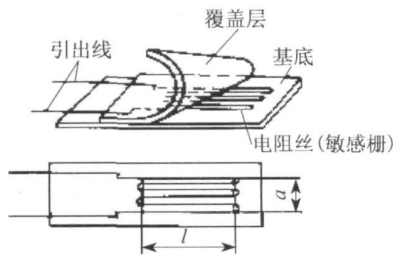


图 1 电阻应变片结构

(2) 基底。固定敏感栅, 并使敏感栅与弹性元件相互绝缘; 应变计工作时, 基底起着把试件应变准确地传递给敏感栅的作用, 为此基底必须很薄, 一般为 0.02 ~ 0.04 mm。常用的基底材料有纸、胶膜和玻璃纤维布。

(3) 引线。连接敏感栅和测量线路的丝状或带状金属导线。一般要求引线材料具有低的稳定的电阻率及小的电阻温度系数。

(4) 覆盖层。保护敏感栅使其避免受到机械损伤或防止高温氧化。

(5) 黏结剂。分别把盖层和敏感栅固结于基底, 用它把应变计基底再粘贴在试件表面的被测部位, 因此它也起着传递应变的作用^[3]。

2 测量电路的设计

2.1 实验装置

实验装置如图 2 所示。传感器实验台装有双平行振动梁、激振线圈、双平行梁测微头、显示、电源和各种处理电路单元等等。

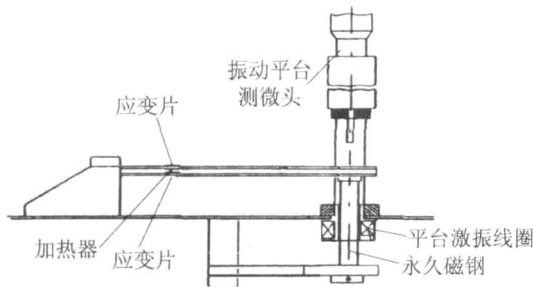


图 2 CY-10 实验装置示意图

电阻应变计把机械应变信号转换成电阻后, 由于应变值及其应变电阻变化一般都很微小, 既难以直接精确测量, 又不便直接处理^[4]。因此, 必须采用转换电路或仪器, 把应变计的电阻变化转换成电压或电流变化。通常采用电桥电路实现这种转换。根据电源的不同, 电桥分直流电桥和交流电桥^[5]。

2.2 直流电桥电路

2.2.1 实验原理

直流电桥结构如图 3 所示。它有 4 个纯电阻的桥臂, 传感器电阻可以充任其中任意 1 个桥臂。图中: U_E 为电源电压; U_L 为输出电压; R_L 为负载电阻, 由此

可得桥路输出电压的一般形式为

$$U_L = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_E - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_E = U_E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \tag{8}$$

显然, 当 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 时, 电桥平衡, 桥路输出电压 $U_L = 0$

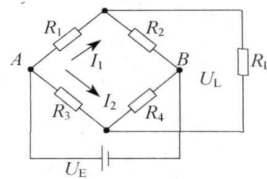


图 3 直流电桥结构

(1) 直流单臂电桥输出电压灵敏度。若电桥中 R_1 为应变片, 它随被测参数变化而变化, R_2, R_3 与 R_4 为固定电阻。当被测参数的变化引起电阻变化 ΔR_1 时, 即 $R_1 = R_1 + \Delta R_1$, 则桥路平衡被破坏, 产生电桥输出不平衡电压为

$$U_L \approx \frac{U_E}{4} \frac{\Delta R}{R} = \frac{U_E}{4} K_\epsilon \tag{4}$$

(2) 如果 2 个应变片同时参与测量, 则称为半桥测量。采用差动电桥是消除非线性误差影响的有效措施, 将 2 个工作应变片接入电桥的相邻臂, 并使它们 1 个受拉, 另 1 个受压, 半桥差动电桥电路的输出电压为

$$U_L = \frac{U_E}{2} \frac{\Delta R}{R} \tag{5}$$

因此, 差动电桥消除了非线性误差, 灵敏度比单臂电桥提高了 1 倍。

(3) 让 4 个桥臂都由应变片组成, 且都产生适当的电阻变化, 即为全桥测量。一个等臂全桥的输出电压为

$$U_L = \frac{U_E}{4} K(\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3 + \epsilon_4) \tag{6}$$

全桥电路电压灵敏度为单臂桥的 4 倍, 减小了非线性误差。

2.2.2 应变测量^[7]

测量电路如图 4 所示, R_1, R_2, R_3 为固定电阻, $R_x = R_4$ 为应变片。经过电桥和测量系统的调零, 即可进行测量, 往下或往上旋动测微头, 使梁的自由端产生位移, 每旋动测微头 1 周即 $\Delta X = 0.5 \text{ mm}$ 采集一个数

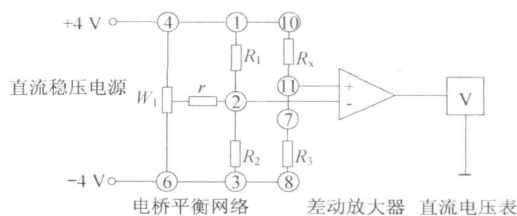


图 4 直流单臂电桥

据^[8,9],可获得直流电桥的特性曲线,如图 5(a)所示。

ΔX 为梁的自由端的位移, ΔU 为输出电压的变化。

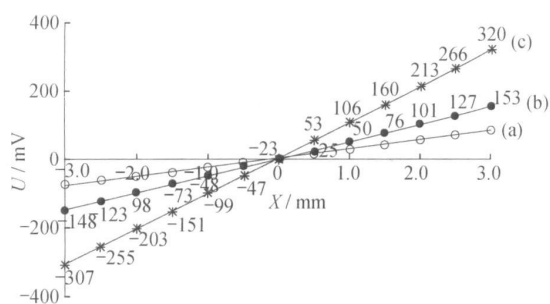


图 5 直流电桥 $U-X$ 特性曲线

保持放大器增益不变,将 R_3 固定电阻换为与 R_4 工作状态相反的另一应变片,即取 2 片受力方向不同应变片,形成半桥,分析步骤与直流单臂电桥一样。特性曲线如图 5 中 (b) 所示。保持差动放大器增益不变,将 R_1 、 R_2 2 个固定电阻换成另 2 片受力应变片,组桥时只要掌握对臂应变片的受力方向相同,邻臂应变片的受力方向相反即可,否则相互抵消没有输出,接成一个直流全桥,特性曲线如图 5 中 (c) 所示。

实验结果得出:直流单臂电桥、直流半桥、直流全桥的灵敏度 $S(=\Delta U/\Delta X)$ 依次为 27、50、103 mV/mm,可见它们的灵敏度是成倍数关系依次增大的。

2.3 交流全桥电路

2.3.1 电桥平衡时的条件

电桥平衡时的条件为

$$Z_1 Z_2 = Z_3 Z_4$$

式中, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 分别为电桥桥臂阻抗,交流电桥平衡条件为:相对桥臂阻抗模之积相等,幅角之和相等。由于交流电桥中的各种阻抗的影响,改变激励频率可以提高交流全桥的灵敏度和提高抗干扰性。传感器最好是纯电阻性或纯电抗性^[10]。

2.3.2 特性分析

(1) 测量系统调零。测量系统如图 6 图中, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为应变片; W_1 、 W_2 、 C 为交流电桥调节平衡网络,音频振荡器 0 端输出信号,频率从 0.4~10 kHz 音频振荡器幅度旋钮置中间位置,幅值保持不变。

旋转测微头脱离振动梁自由端并远离,将 F/V 表的切换开关置 20 V 档,示波器 X 轴扫描时间切换到 0.1~0.5 ms, Y 轴 CH1 或 CH2 切换开关置 5 V/div,音频振荡器的频率旋钮置 5 kHz 幅度旋钮置中间幅度。调节电桥网络中的 W_1 和 W_2 ,使 F/V 表和示波器显示最小,再把 F/V 表和示波器 Y 轴的切换开关分别置 2 V 档和 50 mV/div 细调 W_1 和 W_2 及差动放大器调零旋钮,使 F/V 表的显示值最小,示波器的波形大致为一条水平线。

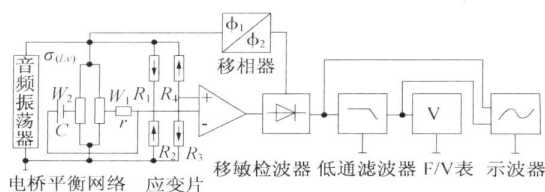


图 6 交流全桥电路

在双平行梁的自由端装上测微头,旋转测微头使 F/V 表显示为零。

(2) 应变测量。旋动测微头 1 周,即 $\Delta X=0.5$ mm 采集一个数据,测出系统输出电压,作出 $U-X$ 特性曲线,见图 7 ($f=3.5.8.10$ kHz 时的 $U-X$ 特性曲线分别为曲线 (b)、(c)、(d))。

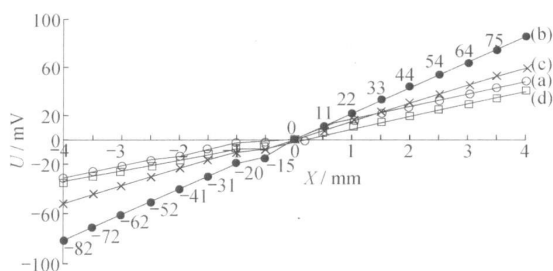


图 7 交流全桥 $U-X$ 特性曲线

实验结果得出: $f=3.5.8.10$ kHz 时交流全桥的灵敏度 $S(=\Delta U/\Delta X)$ 依次为 10、21、14、9 mV/mm,可见, $f=5$ kHz 时交流全桥的灵敏度最大,所以交流全桥工作在 5 kHz 时最为合适。

3 交流全桥的应用

3.1 电子秤

在双平行梁自由端放上重物,双平行梁产生应变, F/V 表显示对应量值,并且与重物质量呈一定线性关系。这样,若在梁自由端放上一重量未知的重物,通过记录 F/V 表的显示值,即可得出该重物的重量。

按图 6 接线,将测量系统调零。在梁的自由端加所有砝码,调节差放增益旋钮,使 F/V 表显示对应的量值,去除所有砝码,调 W_1 使 F/V 表显示零,这样重复几次进行标定。在梁自由端逐一加上砝码,记录 F/V 表的显示值,得出 $U-W$ 特性曲线,如图 8 所示。

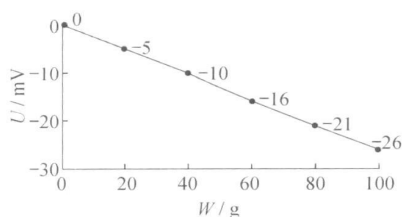


图 8 电子秤 $U-W$ 特性曲线

因此, 电子称的灵敏度为

$$S=\Delta U/\Delta W=(-26-0)/100=0.26\text{ mV/g}$$

3.2 振幅测量

当梁受到不同的频率信号激励时, 振幅不同, 带给应变片的应力不同, 电桥输出也不同。若激励频率和梁的固有频率相同时, 产生共振, 此时电桥输出为最大, 根据这一原理可以找出梁的固有频率。

按图 6 接线, 将测量系统调零; 将低频振荡器的输出 U_0 引入激振线圈的一端, 激振线圈的另一端接地, 双平行梁在振动, 改变低频振荡器频率 $f(3\sim20\text{ Hz})$, 测得相应的电压峰峰值 U_{p-p} , 作出幅度 U_{p-p} 曲线, 如图 9 所示。

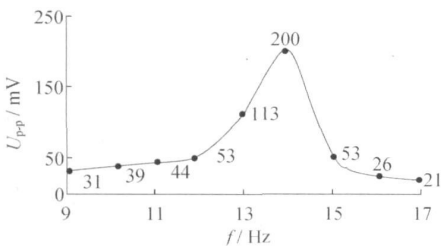


图 9 振幅测量 U_{p-p} 曲线

梁的振幅不同时, 输出电压峰峰值 U_{p-p} 不同, 当激励频率为 14 Hz 时, 梁产生共振, 振幅最大, 输出电压峰峰值 U_{p-p} 最大, 可见梁的固有频率为 14 Hz。

4 结 语

电阻应变片将机械变形转换成电信号输出的传感元件, 可获得较高的准确度和灵敏度。因此凡可与机械变形联系的任何变化, 如构件的受力情况、位移、应力分布、振动的振幅、频率等都可测量, 同时还可完成多点测量。因此广泛用于教学、科研和生产实践中。

参考文献 (References):

[1] 王华祥. 自动检测技术 [M]. 天津: 化学工业出版社, 2006 204-205
[2] 王化祥, 张淑英. 传感器原理及应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002
[3] 郭振芹. 非电量电测技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1986
[4] 周求湛, 胡封哗, 张利平. 弱信号检测与估计 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2007
[5] 张永瑞. 电子测量技术基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008
[6] 童诗白. 模拟电子技术基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1988
[7] 张迎新. 非电量测量技术基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002
[8] 吴玲达. 计算机通信原理与系统 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008
[9] 史斌星, 史佳. Visual Basic 贯通教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
[10] 王新礼. 交流电桥灵敏度问题的探讨 [J]. 吉林化工学院学报, 2005 22(2): 68-70

(上接第 10 页)

$$A \circ B = (A \oplus B) \otimes B$$

2.2 数学形态学法作图像预处理

为了较好地解决光照带来的问题, 本文采用数学形态学方法中的腐蚀、膨胀 2 种基本运算来预处理昆虫图像。经过 2 次腐蚀、2 次膨胀可以较好地消除反光带来的问题, 同时也能消除很多噪声的干扰, 如图 2 所示。

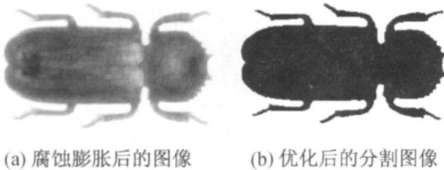


图 2 改进后的结果

3 结 语

通过实验可以得出, O_{tsu} 方法能够很好地将目标与背景区分开来。但是光线很强时, 昆虫表面将会因光照不匀而产生反光、阴影等现象, 而这种现象往往在拍摄昆虫图像或数字化标本时是难以避免的。为了解决光照对昆虫分割的影响, 本文引入数学形态学方法来减少或消除光照的影响, 提高分割的精度, 为计算机自动识别出昆虫创造更好的条件。实验证明, 这种方

法是切实可行的。

参考文献 (References):

[1] 于新文, 沈佐锐. 几种图像分割算法在棉铃虫图像处理中的应用 [J]. 中国农业大学学报, 2004 6(5): 69-75
[2] 马骏, 王建华. 一种基于数学形态学的植物病虫害识别方法 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2004 21(1): 72-75
[3] 牟少敏. 基于数学形态学的重叠昆虫图像分离的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2003 18 219-220
[4] 黄小燕, 郭勇, 赵太飞. 数学形态学的储粮害虫彩色数字图像分割 [J]. 计算机测量与控制, 2003 11(6): 467-469
[5] 罗清华. 基于自适应阈值的储粮害虫图像分割算法 [J]. 武汉工业学院学报, 2006 25(01): 5-8
[6] 程小梅, 耿国华, 周明全, 等. 基于多特征的 EM 算法在昆虫图像分割中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2009 26(2): 20-22
[7] 许立民, 何斌, 黎明和. 昆虫运动图像分割中的阴影消除算法 [J]. 计算机与数字工程, 2009 37(3): 161-163
[8] 周龙, 牟恽, 尤新革. 模拟退火算法在粮虫图像分割中的应用 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2010 38(5): 72-74
[9] 杨杰. 数字图像处理及 Matlab 实现 [J]. 北京: 电子工业出版社, 2010
[10] 蓝章礼, 李益才, 李艾星. 数字图像处理与图像通信 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009
[11] 杨帆. 数字图像处理与分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007
[12] 普拉特. 数字图像处理 [J]. 北京: 机械工业出版社, 2010