

电阻应变电桥的激励源对测试灵敏度的影响*

温开旭, 龙兴明, 罗海军, 范嗣强

(重庆师范大学 物理与电子工程学院, 光电功能材料重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:【目的】随着电阻应变片制造工艺的提高,电阻应变片不仅在称量装置中应用广泛,在低功耗形变检测系统中也能得到应用。由此研究了在低电压工作环境下电桥激励源对测试灵敏度的影响。【方法】整个测试系统在3.3 V的电压下工作,在实验中改变电桥的激励电压和激励电流,将电桥输出电压经高共模抑制比仪表放大器INA333放大后通过模数转换器ADS1118采集后显示。【结果】3 V激励电压提高到5 V激励电压时每克导致的输出电压变化幅度增加66.9%,激励电流每增加1 mA,输出电压灵敏度增加0.16。【结论】激励电压和激励电流的增大有利于提高电桥输出电压,提高测试微小形变的灵敏度,降低后级数模转换电路要求。

关键词:灵敏度;激励源;电阻应变片

中图分类号: TN791

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)06-0089-04

随着现代计量技术的发展,传统的模拟式称量工具逐渐由数字式称量工具所替代。电阻应变片凭借体积小、成本低、变化灵敏度高的特点成为目前测量应变的主要元件,它能将被测器件的应变变量转换成电阻变化^[1]。电阻应变片可以应用在很多微弱形变监测装置中,如高精度电子天平、人体脉搏信号采集^[2]等。这些装置对系统测试精度都有较高要求,但由于电阻应变片可以测量构件的力、力矩、压力等物理量,因此贴装方位不准确会造成测量误差^[3]。此外,不同电桥电路结构也会造成不同误差。虽然这些影响可以通过工厂制作工艺的提高而改善,但是系统实际工作电路的激励源对系统测试精度的影响有待研究。为此,本研究在低电压供电条件下探究了电阻应变片的电桥电路激励电压和电流对测试灵敏度的影响。

1 电阻应变片的电桥电路分析

1.1 电阻应变片结构

应变片主要由敏感栅、基底、覆盖层及引出线组成^[4](图1)。敏感栅是电阻应变片转化为电阻变化量的敏感部分;基底和覆盖层具有定位和保护电阻丝与被测体绝缘的作用;引线起着连接测量导线的作用^[4]。

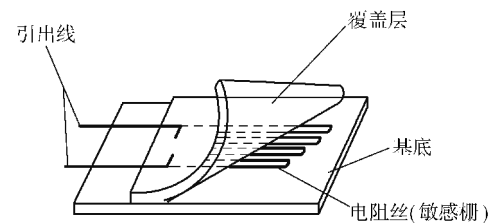


图1 电阻应变片结构

Fig. 1 Structure of resistance strain gauge

1.2 差动全桥电路分析

差动全桥电路理论上不仅不存在非线性误差,而且电桥电压灵敏度最高,并具有温度补偿。虽然全桥需要消耗更多的应变片,但应变片成本低,因此综合考虑全桥是综合性能最好的测量电路^[5]。差动全桥电路中电阻应变片电阻变化与输出电压关系分析如下^[6](图2)。

电桥的输出电压为 $U_0 = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$ 。其中 R_1, R_2, R_3, R_4 为同种类型完全相同的电阻应变片,它们受力的变化 ΔR 也相同; E 为电桥的激励电压, U_0 为输出电压。

当4个电阻应变片受力变化时,由于应变片在电子秤中的悬臂梁上的粘贴位置不同,因而电阻变化也不同。受到拉力的两个应变片的 ΔR 为正值,受到压力的两个应变片的 ΔR 为负值。所以将相同变化属性的电阻应变片接入电桥电路的相对位置。此时电桥输出电压为:

$$U_0 = E \left(\frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_2 - \Delta R} - \frac{R_3 - \Delta R}{R_3 - \Delta R + R_4 + \Delta R} \right)。$$

* 收稿日期:2017-03-08 修回日期:2017-05-17 网络出版时间:2017-11-10 15:40

资助项目:国家自然科学基金(No. 51507023);重庆市科委项目(No. CSTC2016JCYJA0920);重庆市基础与前沿研究计划项目(No. CSTC2014JCYJA70005)

第一作者简介:温开旭,男,研究方向为电磁测量和电磁计算,E-mail: xindipingxian@outlook.com;通信作者:罗海军,副教授,E-mail: lhj19830330@126.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20171110.1540.032.html>

所以 $U_0 = E \left(\frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + R_2} - \frac{R_3 - \Delta R}{R_3 + R_4} \right)$ 。又因为 4 个电阻应变片完全相同, 所以 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 。由此有:

$$U_0 = E \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right) = E \left(\frac{R + \Delta R - R + \Delta R}{2R} \right) = E \frac{\Delta R}{R} \quad (4)$$

最后得到输出电压 U_0 与电阻应变片变化和激励电压的关系为 $U_0 = E \frac{\Delta R}{R}$ 。由于电桥灵敏度定义为 $K = \frac{U_0}{\Delta R/R}$, 所以 $K = \frac{E \cdot \Delta R/R}{\Delta R/R} = E$ 。由此可知激励电压与电桥灵敏度成正比。

2 测试平台设计

本研究搭建了一个悬臂梁测试平台, 可通过砝码的加减改变电阻应变片的形变。由于电桥激励源恒压时在 5 V 以下、恒流时在 15 mA 以下, 故输出电压 U_0 只有 2~3 mV, 不便于直接测量。为此, 后级加入了放大电路和高精度数模转换器, 以便更方便地直接观察输出电压大小, 并比较不同激励电压或电流对系统灵敏度的影响。

2.1 测试装置

测试电路由悬臂梁和托盘构成, 悬臂梁上下各粘贴两个电阻应变片, 构成电桥电路^[7-8]。输出电压 U_0 经过高共模抑制比的 INA333 仪表放大器放大, 再通过内置可编程增益模块的高精度 16 位模数转换器 ADS1118 采集, 最后用 STM32F303 微控制器处理采集到的数据并显示。

INA333 可提供超低失调电压 (25 μ V), 卓越的失调电压漂移及高共模抑制性能, 静态电流仅为 50 μ A。ADS1118 集成了可编程增益放大器 (PGA)、电压基准、振荡器和高精度温度传感器, 2~5.5 V 的宽电源电压范围, ADS1118 数据转换速率最高可达每秒 860 次采样 (SPS)。PGA 的输入范围为 ± 256 mV 至 ± 6.144 V, 能够以高分辨率测量大信号和小信号。测量装置电路如图 3 所示。

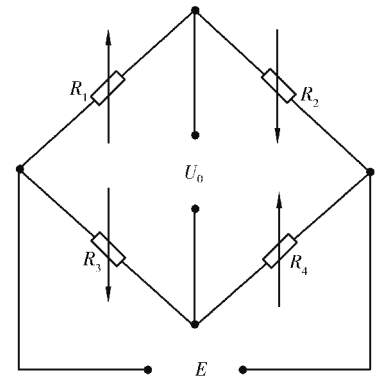


图 2 差动全桥电路
Fig. 2 Differential full bridge circuit

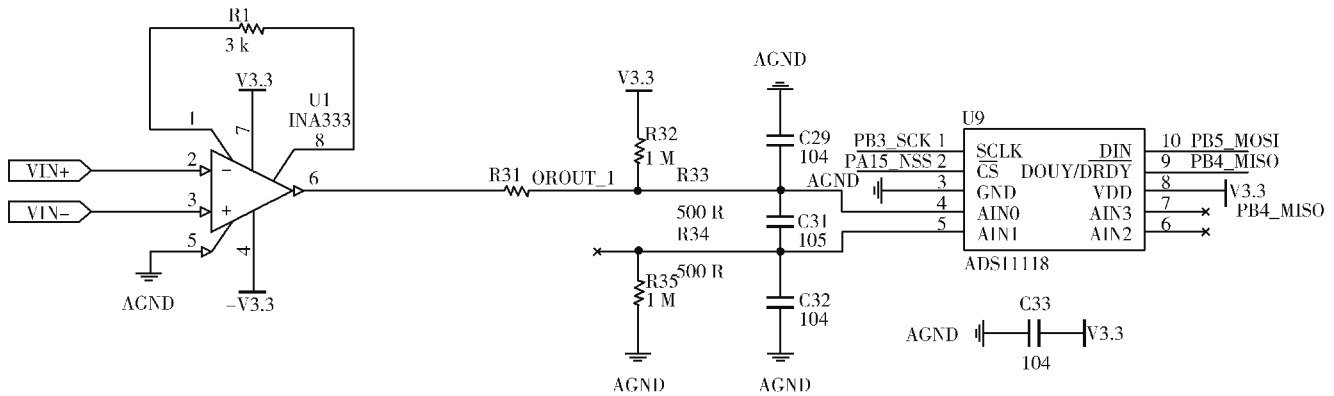


图 3 测试装置电路
Fig. 3 Test device circuit

2.2 测试方法

准备一组标准砝码供测试使用, 砝码最小值为 5 g, 最大值为 50 g。以 5 g 砝码开始, 每次增加 5 g 的方式依次将砝码放到托盘上, 记录每次对应质量的输出电压 U_{out} (U_{out} 为 U_0 经过线性放大后的值)。每组数据测试过程中保证电桥的激励电压或电流不变, 最后通过改变激励源输出记录多组数据。由于实验研究激励源对电阻应变片的测试精度有影响, 所以需要采用高精度的电源作为激励源, 以尽量减小由于测试仪器测量误差对测试结果的影响。实验仪器采用 RIGOL 公司的 DP832 可编程电源产生系统工作电压; 而激励电源采用 ITECH 公司的 IT6132B 高精度数字电源, 该电源输出电压变化从 10% 到 90% 的响应时间小于 20 ms, 并具有 0.1 mV, 0.01 mA 的高分辨率, 电压回读值精确度 $3 \times (1 \pm 0.000 2)$ mV, 电流回读值精确度 $2.5 \times (1 \pm 0.000 5)$ mA。总之, 该激励电源能满足本实验研究的测试精度要求。

3 测试数据分析

为了提高实验结果的准确性, 一共记录了 5 组激励为恒定电压的输出电压值, 记录了 4 组激励为恒定电流

下的输出电压值。每组记录了砝码从 5 g 到 100 g 变化共 20 组数据。

3.1 恒压源激励测试数据分析

将恒压源作为激励源的测试数据描绘到同一个坐标系中,如图 4 所示。由图 4 可看出激励电压越大直线的斜率也越大。将每组数据线性拟合后得到不同激励电压下输出电压 U_{out} 与悬臂梁受力的关系。定义输出电压灵敏度: $K = \Delta U_{\text{out}} / \Delta M$, 其中 ΔU_{out} 为输出电压变化, 单位: mV; ΔM 为砝码质量变化, 单位: g。

将激励电压与输出电压灵敏度(表 1)线性拟合后得到:

$$K = 0.5058U + 0.046. \quad (1)$$

其中 K 为输出电压灵敏度, U 为激励电压大小。

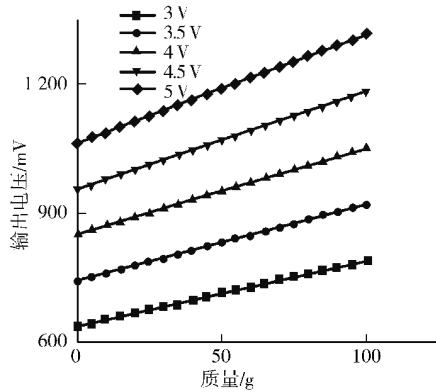


图 4 恒压源激励测试数据

Fig. 4 Constant pressure source excitation test data

表 1 激励电压与灵敏度

Tab. 1 Excitation voltage and sensitivity

激励电压/V	灵敏度/(mV · g ⁻¹)
3	1.513 8
3.5	1.765 5
4	2.017 2
4.5	2.272 7
5	2.524 8

从(1)式可以得到激励电压每增加 1 V, 每克质量变化导致的输出电压变化会增加 0.5 mV。3 V 电压激励得到每克 1.51 mV 的变化, 5 V 电压激励时每克导致的输出电压变化会增加到 2.52 mV, 较前者增加了 66.9%, 更加有利于后级数模转换器的采集, 减小采集的误差。

3.2 恒流源激励测试数据分析

将恒流源作为激励源的测试数据描绘到同一个坐标系中, 如图 5 所示。同恒压源激励的影响一样, 恒流源输出的激励电流越大, 质量对应输出电压直线的斜率也越大。同样将每组数据拟合后得到, 在激励电流与对应的输出电压灵敏度如表 2 所示。

得到直线斜率与激励电流的关系为:

$$K = 0.1695A + 0.0451. \quad (2)$$

其中 K 为输出电压灵敏度, A 为激励电流大小。

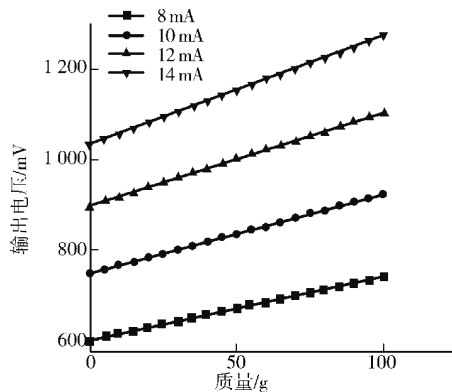


图 5 恒流源激励测试数据

Fig. 5 Constant current source excitation test data

表 2 激励电流与灵敏度

Tab. 2 Excitation current and sensitivity

激励电流/mA	灵敏度/(mV · g ⁻¹)
8	1.400 9
10	1.738 5
12	2.085 6
14	2.415 5

由(2)式可知, 激励电流每增加 1 mA, 输出电压灵敏度增加 0.16, 表示每克质量引起的输出电压变化会增加 0.16 mV。

在对电桥用恒流源和恒压源激励的实验中, 两种驱动方式对输出电压的影响类似, 随着激励电压或电流的增加, 输出电压灵敏度增加。输出电压的增加有利于后级数模转换电路的采集, 信号抗干扰能力更强。但是激励电压会受到电源内阻影响, 实际加到电桥的电压比理论值低。如果恒流源作为激励电源可以不用考虑电源内

阻对输出电流的影响,可以更大限度的加大电桥的激励电流,提高输出电压灵敏度。

4 总结

电阻应变片式电桥电路的激励源对测试灵敏度有一定影响。在类似于脉搏测量的生物类震动形变监测的低功耗应用中,电阻应变片式电桥电路的激励电压或电流应尽可能满足功耗的情况下增大,以提高系统测试灵敏度。在低功耗系统中应尽量采用恒流源驱动电桥,以减小电源内阻对激励源实际输出的影响,最大限度提高激励电流,提高系统测试灵敏度。

参考文献:

- [1] 尹福炎.电阻应变片与应变传递原理研究[J].衡器,2010,39(2):1-8.
YING F Y. Researching of electronic resistance strain gauge and strain transmit principle[J]. Weighing Instrument,2010,39(2):1-8.
- [2] 夏明一.以应变式传感器为核心的人体脉搏信号采集与处理[J].江苏大学学报(自然科学版),2016,37(4):424-428.
XIA M Y. Acquiring and processing of human pulse signal based on strain sensor[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2016,37(4):424-428.
- [3] 高晓丁,胥光申,王锦.电阻应变片贴装方位偏差对测量结果的影响[J].西安石油学院学报(自然科学版),2001,16(6):41-42.
GAO X D, XU G S, WANG J. Effect of the azimuthal error of a strain gauge on the measuring result of strain[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute(Natural Science Edition),2001,16(6):41-42.
- [4] 夏祁寒.应变片测试原理及在实际工程中的应用[J].山西建筑,2008,34(28):99-100.
XIA Q H. Testing principle of the strain gauge and its application in the practical engineering[J]. Shanxi Architecture,2008,34(28):99-100.
- [5] 吴祥晨,吴炆杰,王柳烟.电阻应变片测量电路的灵敏度研究与误差分析[J].电子制作,2014(3):51.
WU X C, WU Y J, WANG L Y. Sensitivity analysis and error analysis of resistance strain gauge measurement circuit[J]. Practical Electronics,2014(3):51.
- [6] 李巧真,李刚,韩钦泽.电阻应变片的实验与应用[J].实验室研究与探索,2011,30(4):134-137.
LI Q Z, LI G, HAN Q Z. Experiment and application of resistance strain gauge[J]. Research and Exploration in Laboratory,2011,30(4):134-137.
- [7] 李寿松,李锦英.电阻应变片灵敏度测量[J].物理实验,1999,19(4):5-6.
LI S S, LI J Y. Measurement of the sensitivity of the resistance strain gauge[J]. Physics Experimentation,1999,19(4):5-6.
- [8] 康鲁杰,杨继红.电阻应变片的选用[J].衡器,2004,33(6):9-10.
KANG L J, YANG J H. Selection of resistance strain gauge[J]. Weighing Instrument,2004,33(6):9-10.

Influence of Excitation Source of Resistance Strain Bridge on Test Sensitivity

WEN Kaixu, LONG Xingming, LUO Haijun, FAN Siqiang

(College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing

Key Laboratory of Opto-Electric Functional Materials, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] With the improvement of the manufacturing process of the resistance strain gauge, the resistance strain gauge is not only widely used in the weighing device, but also can be applied in the low power deformation detection system. It studies the influence of bridge excitation source on test sensitivity in low voltage operating environment. [Methods] The test system in the working voltage of 3.3 V, change the excitation voltage and excitation current of the bridge in the experiment, the output voltage of the bridge by the high CMRR instrumentation amplifier INA333 amplified by analog-to-digital converter ADS1118 acquisition display. [Findings] When the 3 V excitation voltage is increased to 5 V, the amplitude of the output voltage variation increases by 66.9% per gram, and the sensitivity of the output voltage is increased by 0.16 when the excitation current is increased by 1 mA each. [Conclusions] It is found that the increase of the excitation voltage and the excitation current is beneficial to increase the output voltage of the bridge, increase the sensitivity of the test micro deformation, and reduce the requirement of the post series mode conversion circuit.

Keywords: sensitivity; excitation source; resistance strain gauge

(责任编辑 许 甲)