

文章编号 1004-924X(2007)06-0910-05

用放大器反馈控制消除电桥非线性误差

朱 武, 张佳民

(上海电力学院, 上海 200090)

摘要:采用放大器反馈控制法克服了传感器电桥的非线性误差,通过解析的方法找到了克服非线性误差的放大器反馈控制条件。在忽略放大器输入偏置电流和输入噪声电压的情况下,给出了四种校正电路中放大器失调电压对测量系统影响的输出表达式,并分析比较了每一种校正方法的特点,得到最佳的测量线路,使失调电压及其漂移的影响减小了 5 倍。本研究为传感器电桥测量系统设计中的放大器选择和测量方案的确定提供了理论指导。

关键词:电桥;运算放大器;非线性误差;失调电压;反馈控制

中图分类号:TM938.42 **文献标识码:**A

Cancellation of nonlinear error of bridge using op amp feedback control

ZHU Wu, ZHANG Jia-min

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A method to reduce the nonlinear error of a bridge using operational amplifier (op amp) feedback were introduced, the feedback conditions of canceling nonlinearity were found by circuit analyzing. Ignoring input bias current and input noise voltage of op amp in four linearity circuits, the output expressions for affect of offset voltage on measuring system were given. The correction characteristic of each method was analyzed to attain optimal testing bridge circuit to reduce the errors of offset and drift by five times. The results show the method can provide a theory guidance for choosing op amp and determining method in bridge circuit measuring system.

Key words: bridge; op amp; nonlinear error; offset voltage; feedback control

1 引 言

在工程测试试验中,各种非电物理量通过传感器转换成电信号,如温度、压力、力矩、加速度、位移和应变等,对这些非电量的测量广泛采用电桥原理^[1-5]。由于桥臂传感器电阻的变化与电桥

不平衡输出电压之间呈现非线性特性,尤其在电阻值变化较大时,不平衡输出电压的非线性愈加严重,因而极大地影响了不平衡电桥的测量准确度,限制了它的应用范围。很多学者为电桥的线性化做了很多工作^[1-4]。电桥直接输出的不平衡电压信号很小,必须通过放大器放大几百倍,甚至上千倍,放大器失调电压及其漂移也是影响系统

收稿日期:2006-08-22;修订日期:2007-01-07.

基金项目:上海市重点学科建设资助项目(No. P1303);上海市教委优秀青年教师后备人选培养计划项目(No. 04YQHB126)

测量准确度的重要因素。为了提高系统测量的准确度,必须研究不平衡输出电压的非线性误差和放大器失调电压对系统准确度的影响,为提高测量系统准确度提供理论指导。本文以电桥非线性误差和放大器失调电压为主要误差对象,讨论了几种减小测量误差的有源电桥。

2 无反馈电压源激励单臂电桥

通常传感器电桥多采用全等电桥,即电桥平衡时,四个桥臂的电阻都为 R 。为讨论问题方便并不失一般性,这里只对全等情况进行讨论。在全等情况下,当只有一臂接入传感器时,设传感器的电阻值为 $R+\Delta R$,采用仪用放大器直接测量电桥的不平衡电压,电路如图 1 所示^[4]。其中,仪用

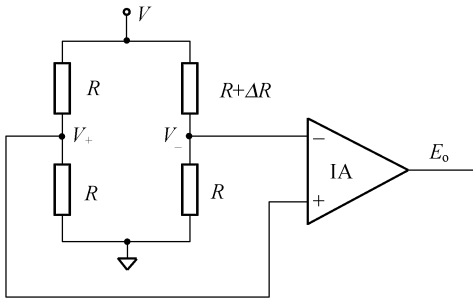


图 1 仪用放大器电桥检测

Fig. 1 Instrumentation amplifier for bridge testing

放大器的放大倍数为 A ,放大器的失调电压为 V_{os} ,电桥激励电压为 V ,忽略放大器的输入电流,则得:

$$E_o = \frac{AV(\Delta R/R)}{4(1+\Delta R/2R)} - AV_{os}, \quad (1)$$

由式(1)可见,由于 ΔR 在分子和分母中都出现,该电路产生非线性输出响应。在小应变的条件下,即 $(\Delta R/2R) \ll 1$,式(1)可以近似化简为:

$$E_o = \frac{A \cdot V \cdot \Delta R}{4R} \left(1 - \frac{\Delta R}{2R}\right) - AV_{os}, \quad (2)$$

从式(2)可以看出,这种检测电路引入的非线性误差为 $(\Delta R/2R)$,非线性误差随应变的增大而增大;失调电压及其漂移通过放大器放大 A 倍直接输出,给测量结果带来较大的误差。所以,不进行校正难以实现高准确度的测量。

3 电压反馈可变电电压源激励电桥

由式(1)知,其分母中存在 $(1+\Delta R/2R)$ 的非线性项,如果能够使电桥两端电压是变化的,并且使其与 $(1+\Delta R/2R)$ 成正比,则可消去分母中非线性项,从而得到线性响应。由于放大器输出信号与 $(1+\Delta R/2R)$ 成比例,因此与 $(1+\Delta R/2R)$ 成比例的信号可取自放大器的输出,将此信号通过运放反馈,来调节电桥的激励电源。当应变增大时,电桥的激励电源也增大,根据这种变换关系设计电路如图 2 所示^[4,5]。其中,放大器 A_1 为仪用放

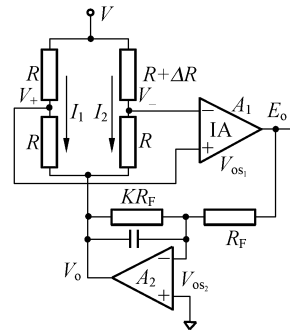


图 2 电压反馈消除电桥非线性误差电路

Fig. 2 Circuit to cancel bridge nonlinearity using voltage feedback

大器,失调电压为 V_{os1} ,放大器 A_2 为高精度的电压反馈放大器,失调电压为 V_{os2} ,反馈放大倍数为 K 。忽略放大器的输入电流,由图 2 得:

$$V_+ = I_1 R + V_o, \quad (3)$$

$$V_- = I_2 R + V_o, \quad (4)$$

$$V_o = -K E_o + V_{os2} (K + 1), \quad (5)$$

$$I_1 = (V_+ - V_o) / 2R, \quad (6)$$

$$I_2 = (V_- - V_o) / (2R + \Delta R), \quad (7)$$

$$E_o = (V_+ - V_- - V_{os1}) A, \quad (8)$$

由式(3)~(8)可求

$$E_o = \frac{\Delta R A V - (K + 1) V_{os2} \Delta R A - 2(2R + \Delta R) V_{os1} A}{4R + 2\Delta R - \Delta R A K}, \quad (9)$$

由式(9)知,满足电桥输出线性化响应的条件为 $2\Delta R - \Delta R A K = 0$,即:

$$K = 2/A, \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)化简为:

$$E_o = \frac{\Delta R A V}{4R} - \frac{V_{os_2} (2+A) \Delta R}{4R} - V_{os_1} A \left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right). \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,理论上,电桥的输出可得到线性化响应。但是,由于反馈放大器的增益不能正好设定为 $-2/A$,所以,这种电路非线性校正的效果取决于增益设定的准确度,使用受到一定的限制。放大器 A_1 的失调电压及其漂移放大 A 倍直接输出,对测量产生较大的误差。从式(11)可以看出,放大器 A_2 的失调电压及其漂移影响较小。

4 电流源激励双臂电桥

从式(2)、(11)可以看出,由于传感器只放入单臂电桥,电桥信号输出灵敏度较低。因此,很多应用情况下,经常是双臂接入传感器,即在相对桥臂上接入传感器提高灵敏度,设计测量电路如图3所示。其中,放大器 A_1 为仪用放大器,其失调电压为 V_{os_1} ,放大倍数为 A , A_2 为高准确度的

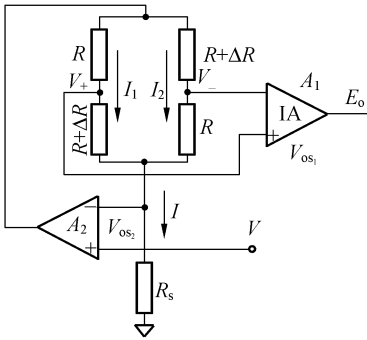


图3 放大器反馈控制恒流源电桥

Fig. 3 Constant-current bridge bias using op amp feedback control

直流电压反馈放大器,其失调电压为 V_{os_2} 。忽略放大器的输入电流,由电路图3得:

$$V_+ = (V - V_{os_2}) + I_1(R + \Delta R), \quad (12)$$

$$V_- = (V - V_{os_2}) + I_2 R, \quad (13)$$

$$I_1 = I_2 = 0.5I = (V - V_{os_2}) / 2R_s, \quad (14)$$

$$E_o = (V_+ - V_- - V_{os_1}) \cdot A, \quad (15)$$

由式(12)~(15)可求得:

$$E_o = \frac{AV\Delta R}{2R_s} \left(1 - \frac{V_{os_2}}{V}\right) - AV_{os_1}. \quad (16)$$

由于 V_{os_2} 与 V 相比是非常小,目前的放大器

完全可以达到 $(V_{os_2}/V) < 10^{-5}$ 。因此,放大器 A_2 的失调电压及其漂移产生的误差可以忽略不计。放大器 A_1 的失调电压及其漂移产生的误差通过放大器 A_1 放大 A 倍,直接输出对系统测量准确度的影响较大。电桥线性化输出无其他调节环节,灵敏度可以通过 R_s 调整,线路简单,易于实现。

5 电流反馈单臂电桥

由式(2)可知,单臂电桥工作时,信号响应输出误差为负,前面分析过电压反馈可变电压源供电可以得到线性化的输出响应,同样可以采用电流反馈电流源的方式线性化电桥的输出响应。根据电桥非线性误差的特性,线性化校正的指导思想是给电桥供电的电流源随着电桥输出增大而增大。根据这一指导思想设计电路如图4所示。其

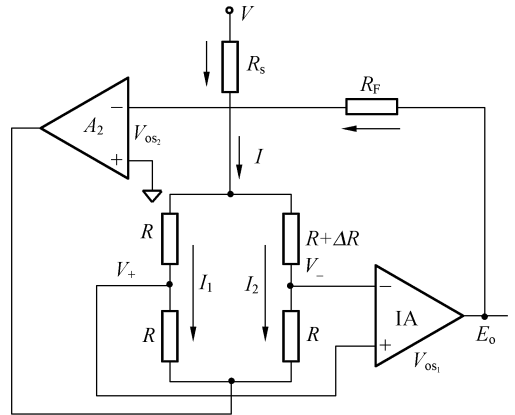


图4 电流反馈线性化校正电路

Fig. 4 Circuit of nonlinearity correction using current feedback

中, A_1 为仪用放大器,其失调电压为 V_{os_1} ,放大倍数为 A , A_2 为高准确度的直流电压反馈放大器,其失调电压为 V_{os_2} ,反馈电阻为 R_F 。通过解析分析,求解电桥线性化输出的条件。忽略放大器的输入电流,由电路图4得:

$$I = (V - V_{os_2}) / R_s + (E_o - V_{os_2}) / KR, \quad (17)$$

$$V_+ = -V_{os_2} - I_1 R, \quad (18)$$

$$V_- = -V_{os_2} - I_2 (R + \Delta R), \quad (19)$$

$$I_1 + I_2 = I, \quad (20)$$

$$I_1 / I_2 = (2R + \Delta R) / 2R, \quad (21)$$

$$E_o = (V_+ - V_- - V_{os_1}) A, \quad (22)$$

由式(17)~(22)可求得:

$$E_o = \frac{R \cdot \Delta R \cdot R_F \cdot A \cdot (V - V_{os_2})}{R_s(4R \cdot R_F + R_F \cdot \Delta R - R \cdot \Delta R \cdot A)} - \frac{A[R \cdot \Delta R \cdot V_{os_2} + R_F(4R + \Delta R)V_{os_1}]}{4R \cdot R_F + R_F \cdot \Delta R - R \cdot \Delta R \cdot A}, \quad (23)$$

由上式可知,满足电桥的输出线性化响应的条件为 $R_F \cdot \Delta R - R \cdot \Delta R \cdot A = 0$,即:

$$R_F = AR, \quad (24)$$

将上式化简得:

$$E_o = \frac{\Delta R V A}{4R_s} \left(1 - \frac{V_{os_2}}{V}\right) - \frac{\Delta R V_{os_2}}{4R} - \left(1 + \frac{\Delta R}{4R}\right) V_{os_1} A. \quad (25)$$

由上述推导可知,该电桥线性化输出是有条件的,即反馈电阻为 AR ,准确地设定该电阻是非常烦琐的工作,调整不准确,影响非线性校正的效果。放大器 A_1 的失调电压及其漂移对测量带来较大的误差。

6 放大器控制电流输出型电桥

前面几种校正电路都是电桥输出不平衡电压,现改变电桥不平衡输出方式,采用放大器反馈,使电桥输出不平衡电流,设计电路如图 5 所示。将接入传感器的电桥臂放入放大器的反馈回

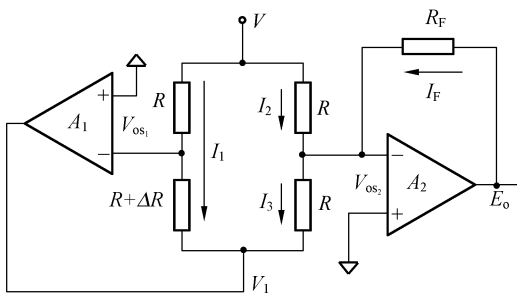


图 5 放大器反馈控制线性化电路

Fig. 5 Linearization circuit using op amp feedback control

路中,电桥电源低压端由放大器 A_1 的输出端进行伺服控制,当传感器的阻值发生变化时,伺服放大器的输出电压随之变化,从而引起电桥的不平衡电流输出,通过放大器 A_2 和反馈电阻 R_F 产生输出电压。图中放大器 A_1 为电桥提供一个虚地点和伺服控制电桥电压的作用,放大器 A_2 起电流-电压变换的作用。放大器 A_1 、 A_2 为高准确的直流电压反馈放大器,其失调电压分别为 V_{os_1} 、

V_{os_2} 。由电路可得:

$$I_1 = (V - V_{os_1})/R, \quad (26)$$

$$I_2 = (V - V_{os_2})/R, \quad (27)$$

$$I_3 = I_2 + I_F, \quad (28)$$

$$I_3 = (V_{os_2} - V_1)/R, \quad (29)$$

$$E_o = I_F R_F + V_{os_2}, \quad (30)$$

由式(26)~(30)可求得:

$$E_o = \frac{A}{2} \left(\frac{V \Delta R}{R}\right) + A(V_{os_2} - V_{os_1}) + V_{os_2}, \quad (31)$$

式中: $A = 2R_F/R$ 。

由上述分析可知,这种放大器反馈方式可线性化电桥输出,无任何调节环节,电路简单,易于实现,系统增益调整简单;从式(31)的第二项可以看出,放大器 A_2 的失调电压与放大器 A_1 的失调电压是相减关系,当采用两个同一种型号的双极性放大器时,两个放大器的失调电压温漂变化方向一致,在相同温度下,其变化大小比较接近,有非常好的补偿作用,保守估算也能使失调电压及其漂移的影响减小 5 倍。因此,失调电压及其漂移对测量准确度的影响很小,是较理想的测量线路。

7 结 论

本文采用放大器反馈控制的方法克服传感器电桥的非线性误差,通过解析的方法找到克服非线性误差的放大器反馈控制条件以及放大器失调电压对测量系统影响的输出表达式。通过分析可以得出以下结论:(1)电压反馈可变电压源激励电桥,理论上,可以得到线性化的输出响应。但是,受反馈放大器的增益不能正好设定为 $-2/A$ 的影响,使用受一定的限制。此外,放大器 A_1 的失调电压及其漂移对测量系统准确度的影响大。(2)电流源激励的双臂电桥,电桥线性化输出无其他调节环节,线路简单,易于实现。不足之处是放大器 A_1 的失调电压及其漂移产生的误差通过放大器 A_1 放大 A 倍,直接输出对系统测量准确度的影响较大。(3)电流反馈单臂电桥,受线性化条件反馈电阻不能准确设定的限制,影响非线性校正的效果,放大器 A_1 的失调电压及其漂移的影响大。(4)放大器控制电流输出型电桥,电桥线性化校正无任何调节环节,电路简单,易于实现,系统增益调整简单,两个放大器的失调电压可以相互

补偿,失调电压及其漂移对测量准确度的影响大大减小,与其它几种电路相比,失调电压及其漂移对测量准确度的影响至少要减少 5 倍以上,是最为理想的电桥线性化测量线路。

参考文献:

- [1] 刘光达,王红宣. 电桥应变传感器信号线性的修正方法[J]. 光学精密工程, 1998,6(2): 95-99.
LIU G D, WANG H X. Bridge elastic signal linearization by way of A/D convertor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(2):95-99. (in Chinese)
- [2] 魏俊波,张士勇. 对传感器非线性误差的研究[J]. 大学物理实验, 2005,18(1):55-57.
WEI J B, ZHANG SH Y. The study nonlinear error of transducer[J]. *Physical Experiment of College*, 2005,18(1):55-57. (in Chinese)
- [3] 文成,秦树人. 应变测量中单臂电桥输出的线性化处理[J]. 重庆大学学报, 2004,27(1):29-31.
WEN CH, QIN SH R. Linear disposal of wheatstone bridge in strain measurement[J]. *Journal of Chongqing University*, 2004,27(1):29-31. (in Chinese)
- [4] 郑旭初,施昭云,施朝华,等. 超大应变测量中输出线性化问题的解决[J]. 实验力学, 1998,13(2):257-261.
ZHENG X CH, SHI ZH Y, SHI CH H, *et al.*. Output linearization for extralarge-strain measurement[J]. *Journal of Experiment Mechanics*, 1998,13(2):257-261. (in Chinese)
- [5] 曾晓洋. 高精度自动称量系统数据采集功能的实现[J]. 光学精密工程, 2001,9(2):186-190.
ZENG X Y. Design of a high precision electronic steelyard data sampling system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):186-190. (in Chinese)

作者简介:朱 武(1969—),男,湖北随州人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要从事检测技术、智能仪器、大功率超声应用等方面的研究。E-mail:zjmzwzsy@126.com