

一种基于运算放大器的高灵敏度惠斯通电桥*

何华平

(西南大学计算机与信息科学学院 重庆 400715)

徐伟

(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

何立蜓

(西南大学计算机与信息科学学院 重庆 400715)

黄俊华

(重庆市松树桥中学校 重庆 401147)

陈平

(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

(收稿日期: 2021-08-19)

摘要:关于如何提升惠斯通电桥灵敏度一直是惠斯通电桥研究的热门话题. 运算放大器组装成为的差分放大电路在一定范围内可以线性放大输入电压. 但是, 使用运算放大器提高电桥灵敏度的方法并未被采用. 本文采用 LM358N 型运算放大器来提高电桥两端电势差的测量精度, 从而提升惠斯通电桥的灵敏度. 我们使用 Multisim 软件对该方案进行仿真, 结果表明如果将放大倍数调至 20 倍, 那么实际误差将小于 2%. 经过对改进电桥进行实际测量, 实验和理论结论符合得很好. 采用此方法可以得到一个易操作、低成本、高灵敏度的惠斯通电桥.

关键词:惠斯通电桥 差分放大电路 灵敏度

1 引言

判断惠斯通电桥是否平衡一般以检流计支路中是否有电流经过, 即检流计指针是否偏转为标准. 指针式灵敏电流计的精确度和肉眼的分辨能力是有限的, 所以指针式检流计被数字式检流计替代. 但是经过实际操作发现, 使用数字检流计并不能明显提高灵敏度. 所以如何制作易操作、低成本、高精度的惠斯通电桥成为亟需解决的问题.

关于惠斯通电桥灵敏度^[1]提升, 研究方向主要有两个: 一个是改良电阻的计算公式^[2], 另一个则是

改变惠斯通电桥的结构^[3,4]. 然而, 改善电阻的计算公式尽管能提高惠斯通电桥的灵敏度, 但在一定程度上也增加了计算难度^[5], 不能从根本上解决硬件带来的仪器误差. 在现有的研究中, 大多设计方案为改变电阻材料, 采用精确度更高的检流计等. 这无疑是提高了实验的成本^[4].

在模拟电路^[6]中, 运算放大器组装的差分放大电路具有线性放大输入电压的效果, 并且使用该方法所得出的放大倍数可以随着输入两端的电阻的比值增加而增大. 于是结合这一特性, 我们将差分放大电路运用到电桥中, 得到了兼顾成本和操作难易

* 西南大学 2021 年实验技术研究项目, 项目编号: SYJ2021032; 国家级“大学生创新创业训练计划”项目, 项目编号: 202110635095

作者简介: 何华平(1999 -), 男, 在读本科生, 就读于自动化专业.

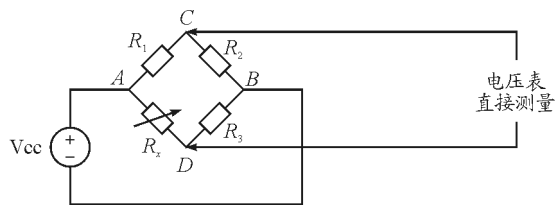
通讯作者: 陈平(1986 -), 男, 副教授, 主要承担大学物理和中学物理实验技能训练等课程的教学.

程度的高精确度的惠斯通电桥。

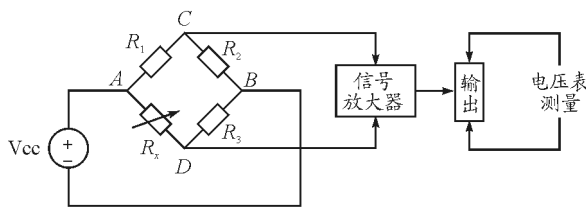
本文还利用 Multisim 软件进行仿真^[7], 模拟不同电桥电阻阻值的实验, 以此来证明该方案的可行性。本文还使用 3 次样条插值法插值得出不同的放大倍数与电阻值、测量误差关系的曲线图, 并得出结论: 随着放大倍数的增大, 待测电阻 R_x 的计算值与真实值的偏差将减小。此外再通过最小二乘法拟合得到了一条不同放大倍数下灵敏度的关系直线, 发现随着差分放大电路放大倍数增大, 改进惠斯通灵敏度也逐渐增大。所以本工作改进的惠斯通电桥灵敏度是可调节的。

2 信号放大式惠斯通电桥灵敏度提升设想

如图 1(a) 所示, 惠斯通电桥平衡的条件是电桥两端 C 和 D 两点的电势差相等, 满足方程。通过平衡方程的计算, 可以求出电阻 R_x 。电桥是否平衡检测的关键是测量 C 和 D 两点的电势差是否为零。我们在现有设备的基础上添加一个放大电路, 如图 1(b) 所示, 将 C 和 D 两点的电势差放大。再检测电势差是否为零, 从而判断电桥是否平衡。该方法能有效地减小由于电压表量程小造成的误差, 并且由于运算放大器成本较低且易于操作, 该方案具有很好的可行性。



(a) 传统惠斯通电桥测量电阻原理图



(b) 改进惠斯通电桥测量电阻原理图

图 1 两种惠斯通电桥测量电阻的原理图

3 利用运算放大器改进惠斯通电桥原理

运算放大器是一种具有很高放大倍数的电路单元。本实验采用的运算放大器型号为 LM358N, 其管脚分布如图 2(a) 所示。我们将使用 1~4 以及 8 引脚, 其中 1 号引脚是输出信号端口。2 和 3 号引脚是输入信号的端口, 8 和 4 号端口需要接上外电源电压。同时运算放大器的输入信号端口(2 号与 3 号)还需满足

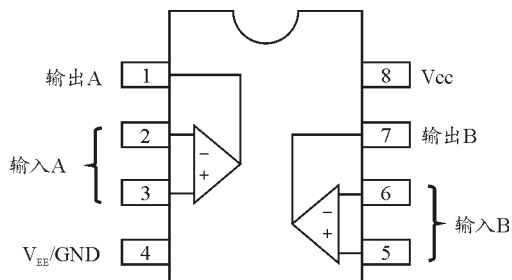
$$I_+ = I_- = 0 \quad (1)$$

差分放大电路, 如图 2(b) 所示, 可以将输入信号端口的电势差进行放大, 由式(1)与基尔霍夫定律可以得到输出与输入电势差的关系

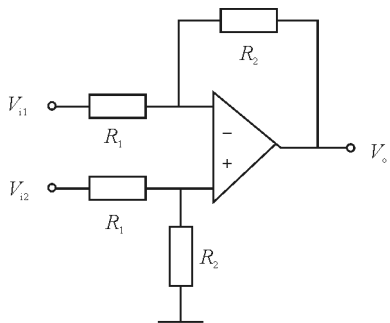
$$\begin{cases} \frac{V_o - V_-}{R_2} = \frac{V_- - V_{i1}}{R_1} \\ 0 - V_+ = \frac{V_+ - V_{i2}}{R_1} \\ V_+ = V_- \end{cases} \quad (2)$$

$$V_o = \frac{R_{12}}{R_{11}}(V_D - V_C) \quad (3)$$

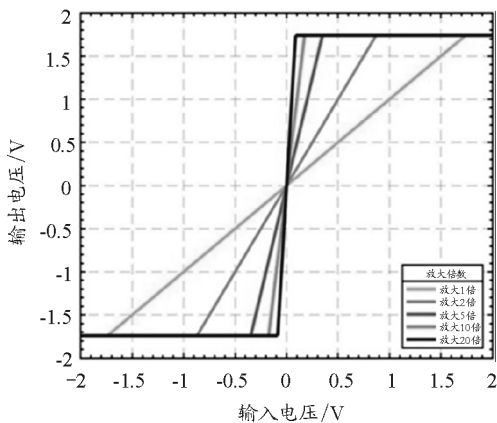
电路中输入两端有电势差的时候, 输出电压才有变动, 这种电路称之为差分放大电路。LM358N 型运算放大器的差分放大电路输入与输出电压关系的线性化模型如图 2(c) 所示。随着差分放大电路放大倍数的提升, 线性放大的区间将变小。在线性放大区间内, 无论输入电压如何变化, 输出电压始终保持线性增长。而超过线性放大区间, 其输出则不是线性关系, 这不利于计算。为使得计算更精确应保证输入电压在该放大倍数的放大区间中。



(a) LM358N 运算放大器管脚引脚图



(b) 运算放大器搭建的差分放大电路



(c) 差分放大电路线性放大区间

图2 运算放大器与差分放大电路

4 改进惠斯通电桥实验研究

改进的惠斯通电桥利用了运算放大器的差分放大原理将输入电势差放大,然后输出给电压表.当C和D两点的电势差过于微弱,普通电压表难以测量的时候,差分放大电路可以将这个电势差放大,并输出给电压表.由于放大倍数是线性且可调的,通过改变放大倍数可以得到不同灵敏度的惠斯通电桥.改进惠斯通电桥如图3所示.

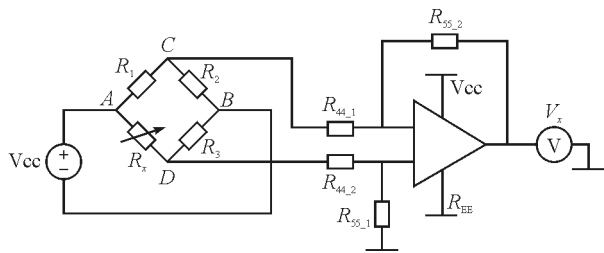


图3 改进惠斯通电桥

根据差分放大电路与电路分析可以求解出待测电阻 R_x

$$\frac{V_D - V_0}{R_x} = \frac{0 - V_D}{R_3} \quad (4)$$

$$\frac{V_C - V_0}{R_1} = \frac{0 - V_C}{R_2} \quad (5)$$

由式(4)、(5)得到

$$V_C = \frac{V_0 R_2}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

$$V_C = \frac{V_0 R_3}{R_3 + R_x} \quad (7)$$

根据式(3)、(6)、(7)得到

$$R_x = \frac{R_3 V_0}{V_x \frac{R_{44}}{R_{55}} + \frac{R_2 V_0}{R_1 + R_2}} - R_3 \quad (8)$$

电桥的灵敏度的表达式为

$$S_o = \frac{\Delta n}{\frac{\Delta R_x}{R}} \quad (9)$$

其中, Δn 是电压表示数的变化量, ΔR_x 是待测电阻示数的变化量. S_o 反映的是 R_x 发生小变化的时候,引起电压表示数的改变大小.

5 利用运算放大器改进惠斯通电桥实验研究

在本章节中,我们将要介绍有关利用运算放大器改进惠斯通电桥的具体操作方法与测试结果.

首先,对待测电阻调零并使用万用表测量待测电阻的阻值为 $2\,000\ \Omega$,误差为1%的金属膜电阻表示为 R_3 ;使用总阻值为 $50\ \Omega$ 滑动变阻器2个,分别表示 R_1 和 R_2 ,调节初始阻值在 $25\ \Omega$ 左右.使用万用表测量3个电阻的阻值并记录在表1中.采用LM358N型运算放大器在合理判断引脚后接入电路.接通电源后参照图3接线.

然后调节电阻 R_1 和 R_2 的阻值使电压表示数接近零,根据式(9)求得改进电桥灵敏度.

最后,设置多组不同放大倍数的改进惠斯通电桥对同一待测电阻进行测量,重复多次实验后,记录各个参数,得出实验结果如表1所示.根据表1的实验结果在图4(a)中作出了待测电阻的测量值与拟合曲线,在图4(b)中作出灵敏度的计算值与拟合直线.从图4(a)中可以看出改进电桥测量的电阻值随

着放大倍数的增加越来越接近 $2\ 000\ \Omega$, 即越来越接近待测电阻真实值, 误差随着放大倍数的增大而减小. 在拟合灵敏度得到直线时, 图 4(b) 中电桥的灵敏度随着放大倍数的增加而线性增加, 这证明得到的改进惠斯通电桥灵敏度是线性可调的. 拟合的直

线满足的方程为

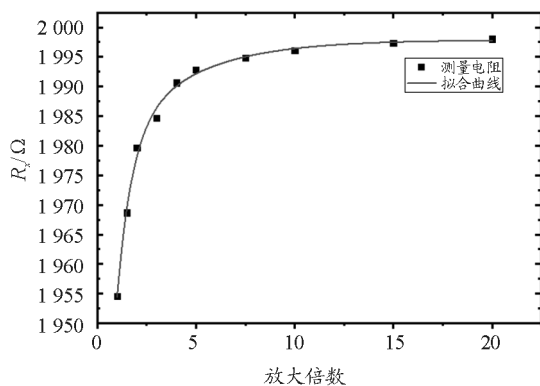
$$S = -2.204\ 5 + 3.668\ 9x$$

其中 x 为放大倍数.

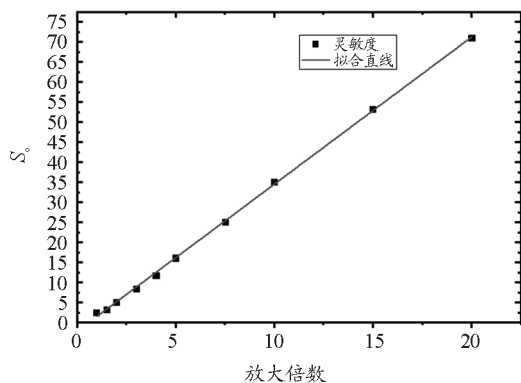
通过以上操作及测试结果得出结论: 改进电桥能有效地提高惠斯通电桥的精度.

表 1 实际操作测试结果

序号	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	放大倍数	V_x/mV	R_x/Ω	误差	S_0
1	24.400	24.600	2 000	1.0	0.004 52	1 968.65	0.015 677	2.518
2	24.410	24.590	2 000	1.5	0.005 02	1 968.65	0.015 677	3.163
3	24.412	24.588	2 000	2.0	0.005 02	1 974.29	0.012 856	5.076
4	24.415	24.585	2 000	3.0	0.006 32	1 984.68	0.007 661	8.324
5	24.419	24.581	2 000	4.0	0.006 51	1 990.61	0.004 695	11.732
6	24.423	24.577	2 000	5.0	0.007 12	1 992.77	0.003 616	16.073
7	24.430	24.570	2 000	7.5	0.008 96	1 994.80	0.002 599	25.071
8	24.435	24.565	2 000	10.0	0.010 42	1 996.10	0.001 948	35.092
9	24.468	24.532	2 000	15.0	0.008 47	1 997.36	0.001 32	53.142
10	24.480	24.520	2 000	20.0	0.007 52	1 998.03	0.000 986	70.922



(a) 实验中待测电阻的测量值与拟合曲线



(b) 实验中灵敏度的计算值与拟合直线

图 4 实验结果

6 Multisim 仿真

在 Multisim 中, 将电压表、运算放大器等模块按照图 3 连接. 设定不同的待测电阻 R_x 的阻值. 在放大倍数固定为 20 倍的情况下, 改变 R_1 , R_2 和 R_3 的阻值. 利用式(8) 根据电压表示数 V_x , 求出 R_x 的仿真值. 仿真结果如表 2 所示.

改变电桥的放大倍数, 改变 R_1 , R_2 和 R_3 的阻值使得电压表示数不变仍为 $0.03\ \text{V}$, 让待测电阻 R_x 为 $2\ 000\ \Omega$. 在不同放大倍数的仿真中, 计算 R_x 的仿真值与误差. 让 R_1 和 R_2 为 $2\ 000\ \Omega$, 待测电阻 R_x 也为 $2\ 000\ \Omega$. 改变电桥的放大倍数, 在不同放大倍数下的仿真结果如表 2 所示.

在仿真测试中, 为了验证灵敏度是可调的, 仿真还设置了不同的放大倍数. 从表 2 可以看出随着放大倍数的提升, 电阻 R_x 的仿真值越来越接近 $2\ 000\ \Omega$, 误差也越来越接近零. 这是由于电压表的可检测精度没有改变, 随着差分放大电路放大倍数的提升, 电路将微弱的电压放大, 使得小信号增强, 这使

得低精度的电压表检测也比较容易,这与实际操作中表1得出的结论相符.将不同放大倍数下仿真结果的灵敏度进行直线拟合得到拟合直线

$$S = -1.736 + 3.069x$$

其中 x 为放大倍数,从拟合方程中可以看出放大倍数与灵敏度是正相关关系.随着放大倍数的增大,灵敏度也越高.所以本文提出的方案有效地提高了惠斯通电桥的灵敏度.

表2 改进电桥不同倍数下的仿真结果

序号	R_2/Ω	R_1/Ω	R_3/Ω	放大倍数	R_x/Ω	误差/%	R_2 增量/ Ω	S_0
1	2 024.40	1 000	1 000	1.0	1 956.23	2.19	2 032.51	2.466
2	2 015.00	1 000	1 500	1.5	1 971.92	1.40	2 020.53	3.617
3	2 010.69	1 000	2 000	2.0	1 979.45	1.03	2 014.25	5.618
4	2 008.33	1 000	2 500	2.5	1 983.75	0.81	2 010.96	7.605
5	2 006.62	1 000	3 000	3.0	1 986.77	0.67	2 008.87	8.889
6	2 004.76	1 000	4 000	4.0	1 990.27	0.49	2 006.94	12.422
7	2 003.69	1 000	5 000	5.0	1 992.32	0.38	2 004.94	16.000
8	2 003.01	1 000	6 000	6.0	1 993.67	0.32	2 004.02	19.802
9	2 002.52	1 000	7 000	7.0	1 994.63	0.27	2 003.38	23.256
10	2 002.18	1 000	8 000	8.0	1 995.33	0.23	2 002.92	27.027
11	2 001.70	1 000	10 000	10.0	1 996.30	0.18	2 002.28	34.483
12	2 001.39	1 000	12 000	12.0	1 996.95	0.15	2 001.87	41.667
13	2 001.17	1 000	14 000	14.0	1 997.40	0.13	2 001.58	48.780
14	2 001.01	1 000	16 000	16.0	1 997.74	0.11	2 001.37	55.556
15	2 000.89	1 000	18 000	18.0	1 998.00	0.10	2 001.21	62.500
16	2 000.79	1 000	20 000	20.0	1 998.21	0.09	2 001.07	71.429

7 总结

由于惠斯通电桥使用检流计的实质是测量两端是否产生电势差,而市面上现有的检流计价格昂贵,从这一点出发,相较于传统测量惠斯通电桥的方案本工作根据运算放大器差分法放大的原理提出了一种改进惠斯通电桥测量电阻的方案.该方案利用运算放大器将两端的电势差放大,从而解决了使用低量程仪器测量不准确微弱信号的问题.本文还用 Multisim 软件进行仿真与灵敏度分析.在不同放大倍率的情况下保证电压表示数 V_x 不变,通过改变 R_2 计算出 R_x .该灵敏度仿真结果表明,随着放大倍数的增大,改进电桥能有效地提高精度,并且这个精度随着放大倍率的提高而增加.该方法能有效地减

小传统方案中由于电压表量程小造成的误差.本工作得到了一个易操作、低成本、高灵敏度的惠斯通电桥.本文将运算放大电路的放大模型划定为线性放大区间中,可以在仿真结果和实际结果中观察到尽管我们提高了电桥的灵敏度与测量的精度,仍然有微弱的误差.尽管如此,该方案仍然在原有实验的基础上极大提高了电桥的灵敏度与测量精度.在后面的研究中我们将继续研究并改进方案,并将推广该方案使其得到更多应用.

参考文献

- 1 廖晓伟,马利祥,李爱兰.两种不同激励电源的惠斯通电桥灵敏度研究[J].中国仪器仪表,2019(12):48~50
- 2 金宇,黄薪薪,冯卓宏,等.基于惠斯通电桥的非极值电阻自动测量方法[J].实验室科学,2020,23(5):29~31,36

- 3 邬斌,尹会听.关于“桥”内阻对惠斯通电桥灵敏度影响的研究[J].大学物理实验,2014,27(6):61~63
- 4 陈碧海,陈杉杉,程宝进.惠斯通电桥式压力传感器温度补偿电路设计[J].遥测遥控,2020,41(2):15~19,26
- 5 简榕杰,赵芳琦.一种基于MOSFET镜像结构的电流模式惠斯通电桥[J].东北电力大学学报,2020,40(3):68~74
- 6 何晓勇,卢红霞.理论与实践相结合的大学物理实验模式——以惠斯通电桥实验为例[J].教育教学论坛,2020(5):383~386
- 7 李增,韩玉龙,孙金芳.自组式直流电桥测电阻仿真实验[J].机电信息,2019(27):31,33

A Highly Sensitive Wheatstone Bridge Based on Operational Amplifier

He Huaping

(College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715)

Xu Wei

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715)

He Liting

(College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715)

Huang Junhua

(Chongqing Songshuqiao Middle School, Chongqing 401147)

Chen Ping

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Improving the sensitivity of Wheatstone Bridge has always been a hot topic in Wheatstone Bridge research. The differential amplifier can linearly amplify the input voltage within a certain range. However, the application of operational amplifiers to improve the bridge sensitivity has not been reported. In this paper, LM358N operational amplifier is used to improve the sensitivity of Wheatstone bridge by increasing the measurement accuracy of the potential difference between the two ends of the bridge. The Multisim software is used to simulate the assumption, and the results show that the actual error will be less than 2% if the magnification is adjusted to 20 times. Through the actual measurement of the improved bridge, the experimental results are in good agreement with the theoretical calculating. By using this method, a Wheatstone bridge with easy operation, low cost and high sensitivity can be obtained.

Key words: Wheatstone bridge; differential amplifier circuit; the sensitivity

