

· 电路与控制 ·

低测试电流的微电阻测量系统

安莹, 胡娟

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要:为了解决现有微电阻测量中采用的测试电流过大、精度不高的问题,给出了一种低测试电流的微电阻测量系统的设计。采用高精密恒流源作为电流源,具有很好的稳流特性、低漂移及低噪声的运算放大器 ICL7650 和 OP07ADJ 构成精密放大电路,通过数据的实时采集、A/D 转换,由单片机进行数据的处理和显示,主要对微弱信号的放大原理以及测量的可行性进行了分析。通过实验验证,实现低测试电流下微电阻的准确测量,当测量电阻为 0.05~0.5 Ω ,测量电流为 5~10 mA 时,测量精度达到 1/1 000。

关键词:微电阻;低测试电流;精密恒流源;

中国分类号:TN707

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)05-0068-04

Micro-resistance Measuring System of Low Measuring Current

AN Ying, HU Juan

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: In order to solve the problem of the excessive current and low precision in micro-resistance measurement at present, a design for the micro-resistance measuring system of the low measuring current is introduced. Taking the constant current source with high precision as current source, the precision amplifying circuit based on a operational amplifier ICL7650 and OP07ADJ with very low drift and low noise, through the real-time data acquisition and A/D converter, the data are processed and displayed by MCU, and the magnify principle of the weak signal and the feasibility of the measurement are analyzed. The experiment shows that the micro-resistance is precisely measured under the low measuring current, the measuring accuracy reaches 1/1 000 when the measuring resistance is 0.05 ~0.5 Ω and the measuring current is 5~10 mA.

Key words: low resistance; low measuring current; precision constant current source

在电气应用中,电机线圈、变压器绕组、测量开关、电力电缆、通信电缆、接触器、继电器与接插件触点的接触电阻通常为毫欧数量级^[1-2]。随着微电阻测试技术的发展,微电阻测量仪器从20世纪90年代以磁电式仪表为主的仪器发展到今天性价比较高的DZC-5型仪器^[3],其可实现对低电压的自动测量,测量范围达到0~160.000 mV,0~1 600.00 mV,精度达到1/100,这些仪器采用的都是通过增大测试电流来提高分辨率,如文献[4]中,采用恒流源输出1 A测试

电流对微电阻进行测量,测量精度为1/100。但实际上,接触电阻往往是电流的函数,对于通讯电缆而言^[5-6],实际工作电流较小,如果为了测出毫欧级电阻而人为地加数安培的测试电流,这将无法正确反映接触状态。但是对于接触器而言,本身工作电流在数安到数百安,倘若用小电流测试,也不能正确反映测量结果。

针对企业实际生产需求,需要对电雷管等易爆产品的性能检测过程需要几毫安电流,提出了智能

收稿日期:2011-09-09

基金项目:陕西省教育厅自然科学基金(05JK214)

作者简介:安莹(1960-),女,副教授,研究方向为光电测试技术与仪器;胡娟(1987-),女,硕士,研究方向为测试计量技术与仪器。

型低测试电流的微电阻测量系统,当测量电流为5~10 mA,测量电阻为0.5~0.05 Ω,测量精度达到1/1 000,实现了低测试电流下微电阻的智能测量。

1 工作原理

1.1 测量原理

从原理上分析,可知只要输出电流已知为 I 的恒流源给待测电阻供电,测得待测电阻上的电压降伏(以 mV 为单位),便可得出 $R = \frac{U}{I}$ 。当测试电压一定时,当 I 取某些值(如 1 A)时, R 便可心算出来 $R = U$ (以 mΩ 为单位)。因为测量时只要采集到相应的电压值,进行运算,进而可实现微电阻的智能测量,耗时短了,可用按钮实现瞬时供电,电流通过待测电阻的时间很短。所以可适当地增大电流以进一步提高测量准确度,又不使电阻发热。但是,在实际中,往往要求在很低的电流下进行微电阻的测量,怎样在测量过程中准确地测量这么小的电压信号呢?这就需要解决微弱信号采集的问题。

采用精密恒流源、放大电路、A/D 转换器和液晶显示构成测量系统,以 AT89C51 单片机为控制显示单元;由精密微电流源的恒定电流通过微电阻,经过运算放大器将信号放大到能被提取出来,接着进行信号处理,然后进行信号采集和 A/D 转换,最后将测量结果显示在液晶显示屏上。测量框图如图 1 所示。

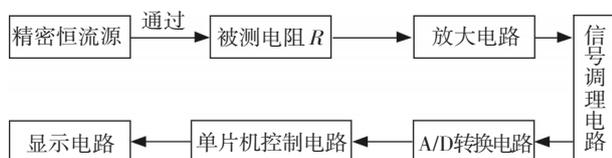


图1 测量系统框图

1.2 恒流源

系统设计思想不拘泥于常规的恒流源设计,选择了凌特公司生产的一款微电流源芯片 LT3092,其特点:可编程两端电流源;最大输出电流:200 mA;宽输入电压范围:1.2~40 V(电流调节性能优于 10 ppm/V);无需输入输出电容器,用电阻比来设定输出电流;初始 SET 引脚电流准确度:1%;反相电压保护;反相电流保护;<0.001%/V 电压调节(典型值);具有电流限制和热停机保护功能;原理图如图 2 所示。

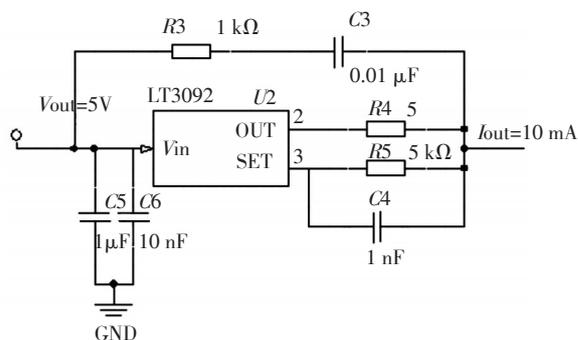


图2 LT3092原理图

输出电流计算公式为: $I_{out} = 10\mu A \times \frac{R_{set}}{R_{out}}$, 注:

10 μA 为 IC 内部恒流值; R_{out} 属于功率型电阻,一般不会发生变化; R_{set} 属于信号型电阻,可通过选择 R_{set} 阻值的大小来调节输出电流的大小,据资料显示,一般用的是数组电阻,直接可以跟 I/O 口通信,通过阻值的大小来调节电流大小;由于系统需要电流是恒值的,所以选一般固定阻值的精密电阻就好。在信号输入端加上 10 nF 和 1 uF 接地电容,能够很好地滤除噪声。

1.3 微弱信号的放大电路

根据输出信号特点,放大器的设计主要是高增益、低噪声。一方面,提高增益的最直接措施是采用多个放大器级联,但这种结构在提高增益的同时也引入了噪声干扰,并且级数越多给电路引入的传输函数极点就越多,从而造成系统不稳定,一般不选择三级以上级联方式,常用两级级联^[7]方式。另一方面多级放大电路噪声系数及电压增益满足

$$NF_{TOTAL} = 1 + (NF_1 - 1) + (NF_2 - 1)/AV_1 + \dots + (NF_n - 1)/AV_1AV_2\dots AV_m \quad (1)$$

由此可见,多级放大电路总噪声主要取决于第一级。

放大电路的设计分析及其结构图如图 3 所示,由

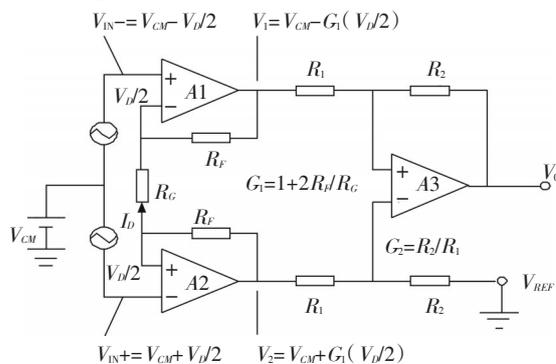


图3 放大电路的结构图

3个运放构成的两级放大电路,输入 V_{CM} 、 V_{IN+} 及 V_{IN-} 由差动放大器 A3 的输入级决定。

根据定义,放大器的输入信号可细分为共模电压 V_{CM} 以及差动电压 V_D 。尽管 V_{CM} 是2个输入的共用电压,但仍可定义为 V_{IN+} 与 V_{IN-} 之和的平均值, V_D 表示电压之间的静差有

$$V_{CM} = \frac{V_{IN+} + V_{IN-}}{2}; V_D = V_{IN+} - V_{IN-} \quad (2)$$

解上面2个等式求 V_{IN+} 或 V_{IN-} , 解得任意输入电压时,得出一组新的等式

$$V_{IN+} = V_{CM} + \frac{V_D}{2}; V_{IN-} = V_{CM} - \frac{V_D}{2} \quad (3)$$

在非饱和模式下, R_G 上产生输入电流 I_D

$$I_D = \frac{V_{IN+} + V_{IN-}}{R_G} = \frac{V_D}{R_G} \quad (4)$$

因此, A1 及 A2 的输出电压为

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} - I_D R_F; V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} + I_D R_F$$

用式(4)替代电流 I_D , 得出

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} G_1; V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} G_1 \quad (5)$$

其中, $G_1 = 1 + 2 \frac{R_F}{R_G}$ 。

式(5)显示,仅差动组件 $V_D/2$ 通过输入增益 G_1 得到放大,同时,共模电压 V_{CM} 以单位增益通过输入级。差动放大器 A3 为 V_2 减去 V_1 , 然后以增益 G_2 对差值进行放大

$$V_O = (V_2 - V_1) G_2 \quad (6)$$

其中, $G_2 = \frac{R_2}{R_1}$, 将式(4)代入式(5)得出放大器的传递函数 V_O/V_D

$$\frac{V_O}{V_D} = G_1 G_2 = G_{TOT} \quad (7)$$

但是,式(5)中的 V_1 及 V_2 并不代表绝对电压。由于 V_{CM} 及 V_D 的极性可能会发生改变,在达到饱和状态之前,可将任一输出的最大电压假定为

$$\pm |V_{1,2}| = \pm \left(|V_{CM}| + \left| \frac{V_D}{2} \right| \right) \leq \pm |V_{SAT}| \quad (8)$$

为了明确起见,以下描述忽略了信号的极性,而变量仅指幅度值。假定 $V_{1,2}$ 及 $V_D/2$ 为常量,则使输入共模电压从 V_{CM} 增加至 V_{CM}' 的唯一办法就是将输入增益从 G_1 降低至 G_1' , 从而

$$V_{1,2} = \text{constant} = V_{CM} + \frac{V_D}{2} G_1 = V_{CM}' + \frac{V_D}{2} G_1' \quad (9)$$

求解 V_{CM}' 可以得出

$$V_{CM}' = V_{CM} + \frac{V_D}{2} (G_1 - G_1') \quad (10)$$

减少 G_1 的值会使放大差动组件 $G'(V_D/2)$ 值的范围减小,从而扩展 V_{CM} 的范围。标准放大器使用单位增益差动放大器,参数有 $R_2 = R_1$ 及 $G_2 = 1$ 。当共模信号受到邻近设备以及不同位置的信号源的较大差动直流电位感应,可使放大器的输入电压升高,输入级发生饱和,饱和现象^[8]将产生放大器的输入电压,尽管该电压值是错误的,但随后的处理电路却无法识别,此系统设计模式,在扩展了输入共模电压范围,保持了整体增益的最大化的同时避免了饱和现象的发生。

由上述理论分析,第一级 A1、A2 选择高精度斩波稳零运算放大器 ICL7650 作为小信号的放大,放大 23 倍;第二级 A3 由运放 OP07 构成,作为信号的二级放大及滤波,放大 20 倍。输出端出来的信号送 A/D 进行模数转换,转换完成送 CPU 进行数字信号处理。

采集的模拟电压信号转换精度是否高^[9],一方面取决于 A/D 转换器的精度。A/D 转换器是智能化仪器中的重要组成部分,选用 ADI 公司的 16 位 sigma-delta 模数转换器 AD7171 可实现比同类小型封装 ADC 竞争性产品更低的噪声,并减少约 25% 的电流消耗,其分辨率 LSB 为:当输入量为 5 V 时, $LSB = 5 / (2^{16} - 1) = 0.76 \mu V$ 。

2 系统的抗干扰问题

(1) 电源干扰

对于微弱信号处理系统,应妥善解决电源去耦。电源系统对系统正常工作很重要。恒流源、电压测量部分都有一套独立的电源^[10-13];不仅做到传统上将模数转换中模拟的和数字的严格分开,还要采用将模拟的和数字的之间用 2 kΩ 的电阻连接起来再接地。模拟电源采用电阻和电容进行低通滤波,滤掉高频噪声干扰。

(2) PCB 布线

①合理布置印刷电路板上的器件;②印刷电路板合理布线。

为了保证测试的精度,除了硬件滤波措施外,采取进一步提高系统抗干扰和噪声的能力,还采取了

对获得的测量值进行数字滤波处理,即进行多次测量后取平均值。经过硬件、软件滤波处理后的系统误差有 ± 1 LSB。

3 程序设计

使用C语言编写 AT89C51 单片机程序,使得程序移植和调用方便、灵活,在程序发生错误的时候,可以很快找到并改正,能最大限度地提高系统程序的可靠性和稳定性,程序流程图如图4所示。

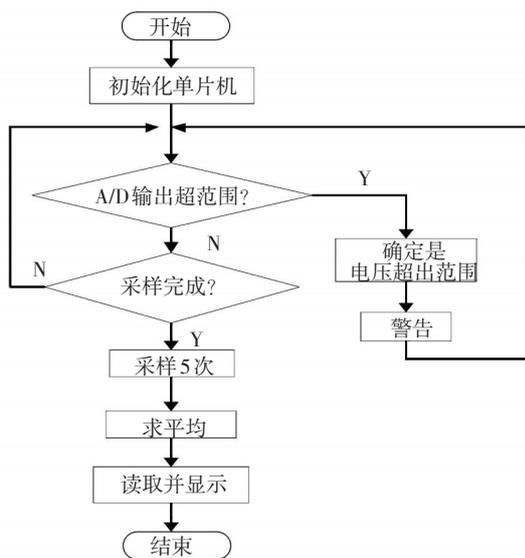


图4 程序流程图

为了保证数据采集和传输的正确性,如果单片机的晶振选择不当,则可能造成单片机不能正常工作。开始运行时,需要对系统进行初始化,由于单片机接收到的是数字信号,先检测 A/D 输出是否超出范围,当系统正常采样时,采样几次完成后,进行平均值的求取,由单片机处理并完成显示。

4 结论

采用的微电流源芯片 LT3092 输出的恒流装置

和采用的高性能 ICL7650 和 OP07ADJ 构成测量放大电路,实现测量了低测试电流的微电阻测量,在测量范围 $0.5\sim 0.05\ \Omega$, 测量电流为 $5\sim 10\ \text{mA}$ 时,测量精度可达 $1/1\ 000$ 。同时,采用微处理器进行控制,可实时在线显示所测量电阻值,并实时进行自校准处理,进一步地提高测量的准确性,实现了智能化的测量,但是,系统测量范围存在一定的局限性,有待于进一步的深入研究。

参考文献

- [1] 刘振来,李成虎.利用恒流源测低电阻[J].河西学院学报,2005,21(5):35-36.
- [2] 吴文全. $\mu\Omega$ 小电阻测量方法研究[J].电测与仪表,2003,11(9):26-28.
- [3] 史翔,张岳涛.基于 AT89C51 单片机微电阻测量系统[J].甘肃科技,2007,23(7):31-32
- [4] 李建新.基于恒流源的电阻测量[J].现代电子技术,2004,19(9):89-90.
- [5] 赵少波.毫欧姆级电阻测量电路设计[J].仪器仪表学报,2001,22(8):137-138.
- [6] 吕泉.低电阻测量方法分析[J].贵州教育学院学报(自然科学),2005,16(4):30-32.
- [7] 江小安,孙肖子.模拟电子技术[M].西安:西北工业大学出版社,2008:127-139.
- [8] 张永瑞,杨林耀.电路分析基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995,2(5):10-38.
- [9] 郭天祥.新概念51单片机C语言教程书[M].北京:电子工业出版社,2008,1(3)147-177.
- [10] 翟玉文,艾学忠,杨潇,等.实用恒流源电路设计[J].电子测量技术,2002,4(3):25-40.
- [11] 陈炯,王永红,魏新劳.新型电缆导体直流电阻测量仪器的研制[J].电线与电缆,2002,1(2):40-42.
- [12] 顾洪涛,仇延生.恒流电位降法低值电阻精密测量及其应用[J].电测与仪表,1998,35(7):17-19.
- [13] 穆云田.基于单片机控制的直流恒流源的设计[J].2007,1(12):15-19.

(上接第27页)

Electromagnetic scattering of two-dimensional surface-relief dielectric gratings [J]. Applied Optics, 1992,31(13): 2343-2352.

- [3] J B Harris, T W Preist, J R Sambles, et al. Optical response of bigratings[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1996, 13(10):2041-2049.

- [4] Eero Noponen, Jari Turunen. Eigenmode method for electromagnetic synthesis of diffractive elements with three-dimensional profiles[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(9):2494-2502.
- [5] Jean-Jacques Greffet, C Baylard, P Versaevel. Diffraction of electromagnetic waves by crossed gratings: a series solution [J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1740-1742.(下转第80页)

红外目标的检测算法有多种多样,但是要实现目标的实时检测,则难度很大,一般算法都无法满足实时性的要求。通过对动态规划的能量累加算法理论的分析,结合FPGA+DSP高速信号处理电路设计,在硬件平台上实现了对红外弱小运动目标的检测,验证了基于动态规划的能量累加算法的有效性和实时性,为实现红外弱小目标检测算法提供了一个新的解决思路。在试验过程中发现该算法对天空背景的红外慢速运动目标检测可靠性高,对地物背景复杂的情况下,算法检测可靠性差,还有许多可以改进的地方。再有该算法适合应用于对固定场景进行检测,对于运动场景的跟踪则需要先进行图像的配准,难度增加,可以在下一步工作中深入研究。

参考文献

- [1] 王亮,胡卫明,谭铁牛.人运动的视觉分析综述[J].计算机学报.2002.25(3):225-2371.
- [2] 刘其真,姚剑,孙薇,等.红外成像运动目标识别与跟踪方法研究[J].遥感技术与应用,1999,14(2):27-33.
- [3] Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dimming targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1):144-156.
- [4] 陈尚锋,陈华明,卢焕章.基于加权动态规划和航迹关联的小目标检测技术[J].国防科技大学学报,2003,25(2):46-50.
- [5] 陈华明,孙广富,卢焕章,等.基于动态规划和置信度检验的小目标检测[J].系统工程与电子技术,2003,25(4):472-476.
- [6] 强勇,焦李成,保铮.动态规划算法进行弱目标检测的机理研究[J].电子与信息学报,2003,25(6):721-727.
- [7] 张兵,卢焕章.动态规划算法在运动点目标检测中的应用研究[J].电子与信息学报,2004,26(12):1895-1900.
- [8] 谭晓宇,陈谋,姜长生.改进动态规划算法在小目标检测中的应用[J].光电工程,2008,35(5):23-27,84.
- [9] Oscar P Bruno, Fernando Reitich. Numerical solution of diffraction problem: a method of variation of boundaries. III. Doubly periodic gratings [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1993, 10(12):2551-2562.
- [7] Li Lifeng. Recent advances and present limitations of the electromagnetic theory of diffraction gratings [C]// Diffraction Optics and Micro-Optics (DOMO). Québec City, Canada: OSA, 2000: 1-3.
- [8] Song Peng, G Michael Morris. Resonant scattering from two-dimensional gratings [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1996, 13(5):993-1005.
- [9] Nicolas Chateau, Jean-Paul Hugonin. Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(14):1321-1331.
- [10] Guido Niederer, Wataru Nakagawa, Hans Peter Herzig. Design and characterization of a tunable polarization-independent resonant grating filter [J]. Optics Express, 2005, 13(6):2196-2200.
- [11] Fu Xiaoyong, Yi Kui, Shao Jianda, et al. Nonpolarizing guided-mode resonance filter [J]. Optics Letters, 2009, 34(2):124-126.
- [12] 张帆,袁博,许丽丽. Nonpolarizing guide-mode resonance filter with ultra-narrow linewidth [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(3):033101.
- [13] Akio Mizutani, Hisao Kikuta, Kiminori Nakajima, et al. Nonpolarizing guided-mode resonant grating filter for oblique incidence [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2001, 18(16):1261-1265.
- [14] Tina Clausnitzer, Alexander V Tishchenko, Ernst-Bernhard Kley, et al. Narrowband, polarization-independent free-space wave notch filter [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2005, 22(12):2799-2803.
- [15] Li Lifeng. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(10):2758-2767.
- [16] Bai Benfeng, Li Lifeng. Group-theoretic approach to enhancing the Fourier modal method for crossed gratings with square symmetry [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2006, 23(3):572-580.
- [17] Bai Benfeng, Li Lifeng. Group-theoretic approach to the enhancement of the Fourier modal method for crossed gratings: C₂ symmetry case [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2006, 22(4):654-661.
- [18] Bai Benfeng, Li Lifeng. Reduction of computation time for crossed-grating problems: a group-theoretic approach [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2004, 21(10):1886-1894.
- [19] Thomas Schuster, Johannes Ruoff, Norbert Kerwien, et al. Normal vector method for convergence improvement using the RCWA for crossed gratings [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2007, 24(9):2880-2890.
- [20] Joerg Bischoff. Formulation of the normal vector RCWA for symmetric crossed gratings in symmetric mountings [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2010, 27(5):1024-1031.

(上接第71页)