

高稳定性数控恒流源设计

王波 戴曙光

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 在阻抗的测量过程中,为了提高测量的信噪比,通常需要使用高稳定性的恒流源,同时为了扩展测量的范围,也需要对恒流源进行控制调节,因此本文提出了一种高稳定性数控恒流源的设计方法。本文的恒流源通过对采样电阻端的电压进行差分放大反馈,一方面降低了共模噪声的干扰,提高了反馈精度,另一方面也降低了采样电阻端的热耗,为整个恒流源的长时间稳定性提供了保障,并且通过 DAC 可以实现对电流的线性调节。经过长时间的测试,该恒流源的输出电流的纹波小于 0.1 mA,不同电压下理论电流与实际电流误差在千分之一左右,具有较高的稳定性以及高的控制线性度等特点。

关键词: 恒流源;高稳定性;线性调节

中图分类号: TN431.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design of numerical constant current source with high stability

Wang Bo Dai Shuguang

(School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the signal-to-noise ratio of the measurement, a constant current source of high stability is usually required, and to extent the measuring range, the constant current source can be used for adjusting and controlling. Therefore, this paper presents a highly stable constant current source method. Through the differential amplification and feedback of the voltage on the sampling resistor, on the one hand the common mode noise can be reduced and the accuracy of feedback can be improved, on the other hand also the heat consumption of the sampling resistor can be reduced, these aspects provide the guarantee for the constant current source of long time stability, in addition, the constant current source can be linearly adjusted by a DAC. After a long period of testing, the output ripple of the current is less than 0.1mA, and under different voltage the error of theory and actual in about one thousandth. So the constant current source is of high stability, and high control linearity.

Keywords: constant current source; high stability; linear regulator

1 引言

恒流源在测试测量领域属于一个非常重要的单元,在仪器仪表、电子设备中也是一个重要的部件。其在工业检测领域的应用也越来越广泛,如金属薄膜电阻率的测量,金属丝杨氏模量测量,电气触点的微电阻测量以及光电池特性的测量^[2]等。不仅如此,恒流源在现代通信、激光、超导等高新技术领域也有很好的发展前景。传统的恒流源采用线性调节和模拟控制的方式,而且往往用电位器调节输出电流,不仅转换效率低,控制精度差,而且无法实现精确的步进^[5]。

目前市场上的恒流源产品虽然可以达到毫安培至数百安培的输出范围^[8],但通常满足不了高精度应用要求。因此,对于稳定度以及精度有特殊要求的恒流源需要自行

研制。本文将提供一种由数控基准源、运算放大器以及功率管组成的高稳定性数控恒流源的设计,可以满足大量实验及应用电路的要求。

2 原理分析

2.1 恒流源电路分析

恒流源根据调整方式的不同主要分为:直接调整型恒流源和间接调整型恒流源。其实现方式更是多种多样,但是基于运放负反馈式恒流源以精度高成为高精度应用的最佳选择。该恒流源的结构图如图 1 所示,主要由基准电压源、比较放大器、调整管、采样电阻等组成。

反馈式恒流源主要是通过负反馈的作用,使得加到比较放大器两个输入端的电压相等,从而保持输出电流的恒

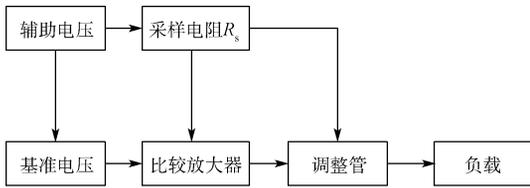


图 1 运放负反馈式恒流源结构

定。其基本电路可以分为:接地负载型和浮地负载型两种^[6]。如图 2 所示,为工业和实验室常用的一种浮地负载型恒流源电路模型。图中负载 R_L 一端和电源相接,另一端与功率管 Q_1 的 S 极相接,采样电阻 R_s 直接接地,整个电路不断地对 R_s 两端的电压进行采样,并与参考电压 V_{ref} 进行比较,最终实现恒流。电路得到的输出电流的表达式为:

$$I = \frac{V_{ref}}{R_s} \quad (1)$$

此种恒流源的负载直接与电源相连接,在某些应用中可以节省电源,因此用的比较多。而且其电路容易比较实现,并可以对输出电流进行线性控制。但该恒流源的负载直接和电源端相接,势必会在负载电阻两端产生很大的共模电压,如果在测量系统的前端输入较大的共模电压有可能导致整个测量电路无法正常工作。

如图 3 所示为工业和实验室常用的接地负载型恒流源

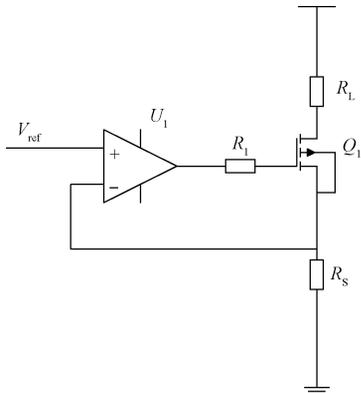


图 2 浮地负载恒流源电路

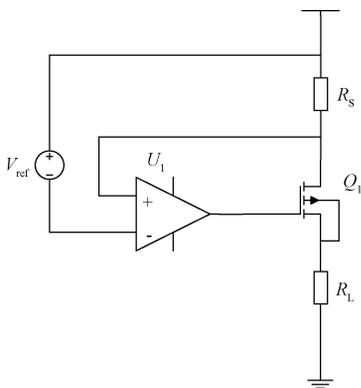


图 3 接地负载型恒流源电路

电路模型。与浮地负载型恒流源相反,接地负载型恒流源的采样电阻 R_s 一端和电源相接,另一端与功率管 Q_1 的 S 极相接,负载 R_L 直接接地。此种恒流源的负载两端没有共模电压输入,因此非常有利于前端测量使用。但由于该恒流源的基准是浮地的,因此很难实现对输出电流的线性控制。

综合上述两种恒流源的特点,本文设计的恒流源电路模型如图 4 所示,采样电阻 R_s 两端的电压由差动放大器放大后反馈到比较器的负输入端。该恒流源电路得到的输出电流的表达式为:

$$I = \frac{V_{ref}}{R_6/R_3 \cdot R_s} \quad (2)$$

对比式(1)和式(2),可以看出本文设计的恒流源的采样电阻可以设置较小,当流过相同电流时,该恒流源的功耗更低。此外该恒流源结合了浮地负载恒流源和接地负载恒流源的优点,负载两端不仅没有共模电压输入,而且恒流源的输出电流可以进行线性控制。

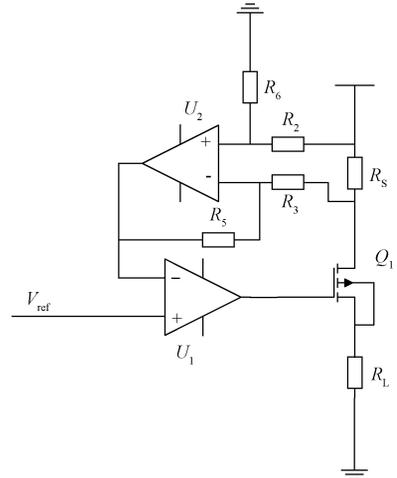


图 4 恒流源电路

2.2 电流稳定性分析

根据图 4 所示的恒流源电路,可以定量地给出输出电流与各种不稳定因素的解析关系,现假设:

VCC 供电电压是: U_i

差分放大器的放大倍速是: K_d

输出电流是: I_o

基准电压 V_{ref} 是: U_r

放大器的开环增益是: K_a

调整管的电流放大倍数是: β

调整管的等效输入阻抗是: R_i

调整管的等效输出阻抗是: R_o

调整管漏极和源极电压是: U_{ce}

调整管栅极和源极电压是: U_{be}

负载两端的电压是: U_o

由上述假设以及图 4 电路,可以列出回路方程:

$$U_i = K_d \cdot I_o \cdot R_s + U_{ce} + U_o \quad (3)$$

$$I_o = \beta \frac{U_{be}}{R_i} + \frac{U_{ce}}{R_o} \quad (4)$$

$$U_{be} = K_a (U_r - K_d \cdot I_o \cdot R_s) \quad (5)$$

由式(3)~(5)可以解得

$$I_o = \frac{K \cdot U_r + U_i - U_o}{K \cdot R_s + R_s + R_o} \quad (6)$$

式中: $K = K_a \cdot \beta \frac{R_o}{R_i}$

影响恒流源输出电流稳定性的因素有很多,但综合起来可以归纳为两个部分:一是构成恒流源的内部因素,如基准电压 U_r , 采样电阻 R_s , 放大器的增益 K_a 、零点漂移、噪声。二是恒流源所处的外部因素,如输入电源 U_i , 负载电阻 R_L , 以及环境温度 T 的变化。考虑到噪声电压和零点漂移 e 对输出电流的影响,重新列出 I_o 的表达式如下:

$$I_o = \frac{K \cdot (U_r + e) + U_i - U_o}{K \cdot R_s + R_s + R_o} \quad (7)$$

首先对式(7)两边取对数,再对两端求全微分得:

$$\frac{dI_o}{I_o} = \frac{KdU_r + Kde + (U_r + e)dK + dU_i - dU_o}{K \cdot (U_r + e) + U_i - U_o} - \frac{KdR_s + R_s dK + dR_s + dR_o}{K \cdot R_s + R_s + R_o} \quad (8)$$

一般 $K * (U_r + e) \gg U_i - U_o$, $U_r \gg e$, $(K + 1)R_s \gg R_o$, $K \gg 1$, $dR_o \approx 0$ 。因此,式(9)可以简化为:

$$\frac{dI_o}{I_o} = \frac{dU_r}{U_r} + \frac{de}{U_r} + \frac{dU_i}{KU_r} - \frac{dU_o}{KU_r} - \frac{dR_s}{R_s} \quad (9)$$

通过限定式(9)的条件,可以进行进一步简化分析:

1)若恒流源外部条件不变

$$\frac{dI_o}{I_o} = \frac{dU_r}{U_r} + \frac{de}{U_r} - \frac{dR_s}{R_s} \quad (10)$$

即恒流源内部不稳定因素,基准电压 U_r , 噪声电压和零点漂移 e , 以及采样电阻的不稳定度对输出电流的影响分别是 1:1 的关系。

2)若恒流源内部条件不变

$$\frac{dI_o}{I_o} = \frac{dU_i}{KU_r} - \frac{dU_o}{KU_r} = \frac{U_i}{KU_r} \frac{dU_i}{U_i} - \frac{U_o}{KU_r} \frac{dU_o}{U_o} = \frac{U_i}{KU_r} \frac{dU_i}{U_i} - \frac{RL}{KR_s} \frac{dU_o}{U_o} \quad (11)$$

即输入电压 U_i 和负载 R_L 的变化也会导致恒流源输出电流的改变。

3)环境温度的影响

由放大器两个输入端的电压近似相等,可得:

$$U_r + e = I_o \cdot R_s \quad (12)$$

因此有

$$I_o = \frac{U_r + e}{R_s} \quad (13)$$

对式(13)两边取对数并对温度 T 求导可以得到:

$$\alpha_1 = \frac{1}{I_o} \frac{aI_o}{aT} = \frac{1}{U_r} \frac{aU_r}{aT} + \frac{1}{U_r} \frac{ae}{aT} - \frac{1}{R_s} \frac{aR_s}{aT} =$$

$$aU_r + ae - aR_s \quad (14)$$

由式(14)可以看出恒流源的温度系数受基准电压,放大器的零点漂移和噪声电压,以及采样电阻的温度系数共同决定。

3 电路设计

3.1 误差分配

由第二节分析可以知道影响恒流源稳定性的因素,主要有内部因素和外部因素两种,而且由式(11)可以看出当增益 K 足够大时,外部因素的影响很小可以忽略不计。因此,主要的影响因素是内部因素即基准电压,放大器零点漂移和噪声,以及采样电阻的不稳定度。由于这些因素的变化是不确定的随机量,所以误差的分配可用均方根计算,即有:

$$\frac{dI_o}{I_o} \geq \sqrt{\left(\frac{dU_r}{U_r}\right)^2 + \left(\frac{de}{U_r}\right)^2 + \left(\frac{dR_s}{R_s}\right)^2} \quad (15)$$

通常恒流源的稳定性用纹波指标来衡量,本文提供的高稳定性恒流源的纹波 $< 1 \times 10^{-4}$, 即有:

$$\frac{dI_o}{I_o} \leq 1 \times 10^{-4} \quad (16)$$

因此根据式(16)可以确定恒流源内部因素容许的相对误差,若对 3 个内部影响因素的取值如下:

$$\frac{dU_r}{U_r} = 5 \times 10^{-5} \quad (17)$$

$$\frac{de}{U_r} = 5 \times 10^{-5} \quad (18)$$

$$\frac{dR_s}{R_s} = 7 \times 10^{-5} \quad (19)$$

则可以满足式(15)误差要求,即误差分配完成。

3.2 器件选择

3.2.1 基准电压选择

由于基准电压通常受到温度变化而产生漂移,而且具有低频噪声,因此在选择基准时应该满足:

$$\alpha_T \times \Delta T + e < \frac{dU_r}{U_r} = 5 \times 10^{-5} \quad (20)$$

式中: α_T 是基准电压的温度系数, ΔT 是规定时间内的温升, e 基准电压的低频噪声。根据以上要求选择 ADI 公司生产 AD780BN 高精度基准源,该芯片的相关参数如表 1 所示。

表 1 AD780BN 相关参数

参数	AD780BN
α_T	3 ppm/°C
e	4 μ Vpp

计算可得:

$$\alpha_T \times T + e = 3 \times 10^{-6} \times 10 + 4 \times 10^{-6} = 3.4 \times 10^{-5} < 5 \times 10^{-5} \quad (21)$$

因此该基准满足设计要求。

3.2.2 采样电阻的选择

由误差分配要求可知采样电阻的变化要 $<7 \times 10^{-5}$,因此本文选择温漂最小的锰铜电阻^[3]作为检流电阻,其温度系数是,若检流电阻为 0.1Ω ,容许的温升 10°C ,可得

$$\alpha \times \Delta T \times R = 0.1 \times 5 \times 10^{-5} \times 10 = 5 \times 10^{-5} < 7 \times 10^{-5} \quad (22)$$

可以满足设计要求。

3.2.3 比较放大器的选择

由于要求放大器的开环增益 K 尽可能大,而且零点漂移和噪声尽可能小且满足:

$$\frac{d_e}{U_r} = 5 \times 10^{-5} \quad (23)$$

因此本文选择斩波稳零放大器 ICL7650 作为比较放大器,该放大器零点漂移为 $0.01 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,噪声 e 为 $2 \mu\text{V}$,能够满足设计要求。

3.2.4 调整管的选择

调整管主要用来对输出电流进行扩展,通常有晶体管和场效应管两种。由于晶体管是电流型控制器件,如果选择用其作为调整管,其基极电流会引入到恒流源的输出端^[10],而场效应管是压控性元件,其栅极几乎没有

电流流入,用其作为调整管可以获得误差极小的恒流源^[9]。因此,本文选用大功率 MOSFET IRF640N 作为调整管^[4]。

电路中电压基准源作为 DAC 数模转换器的基准电压^[1],DAC 输出电压作为恒流源的基准电压,采样电阻 R_S 两端的电压经过差分放大器 INA106 放大后反馈到 ICL7650 的负输入端。整个电路通过调节 DAC 的输出电压即可实现电流的线性调节^[11-12]。

在搭建电路过程为了达到更好的效果还应该考虑以下两点:

1) 采样电阻两端最好采用四线接法。若不采用四线接法,则容易将其他电阻引入从而造成输出电流不稳。

2) MOS 管的驱动电压要充分,而且在管的漏极和源极之间的电源电压要根据恒流源的输出电压范围而定,否则可能造成 MOS 管发热严重也会导致输出电流不稳,同时要根据 MOS 管的功耗选择尽可能大的散热片。

3.3 整体电路设计

整体电路分为 4 个部分:电源,电压基准源,DAC 转换器,恒流 μVpp 源。其中电源采用独立电源,即将芯片的供电电源与恒流源的供电电源分开^[7]。具体电路图如图 5 所示。

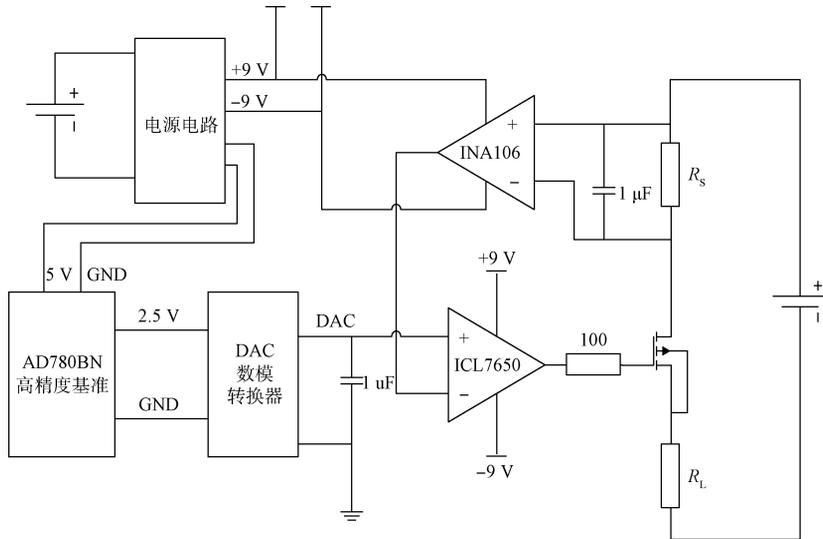


图 5 硬件电路

4 测试结果

表 1 是恒流源 8 min 内连续输出 1 A 电流时的电流统计数据,每分钟进行 6 次电流数据记录,即每隔 10 s 记录 1 次。

表 2 是输入不同基准电压下测得的实际电流值和理论电流值得对比表。

由表 1 可以看出恒流源在输出 1 A 电流时具有较高的稳定性,短时间电流波动小于 0.1 mA。表 2 显示出在 0.25 V,0.5 V,0.75 V 和 1 V 的基准电压下输出电流的理论值和实测值的误差,该误差基本在千分之一左右,因此恒流源具有较好的线性和精度。综合表 1 和表 2,该恒流源具有较好的稳定性和线性,并具有较高的精度,能够满足要求较高的应用设计。

表 1 恒流源 8 min 统计数据

序号	电流/A							
时间/min	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.001 0	1.001 0	1.001 0	1.001 1	1.001 1	1.001 2	1.001 2	1.001 2
2	1.001 0	1.001 0	1.001 1	1.001 1	1.001 1	1.001 1	1.001 2	1.001 2
3	1.001 0	1.001 0	1.001 0	1.001 1	1.001 1	1.001 2	1.001 2	1.001 2
4	1.001 0	1.001 0	1.001 1	1.001 1	1.001 1	1.001 1	1.001 2	1.001 2
5	1.001 0	1.001 0	1.001 1	1.001 1	1.001 1	1.001 2	1.001 2	1.001 2
6	1.001 0	1.001 0	1.001 1	1.001 1	1.001 1	1.001 2	1.001 2	1.001 2

表 2 不同基准电压下输出电流数据

输入电 压/V	采样电 阻/ Ω	理论电 流/A	实测电 流/A	误差/ (%)
0	0.102	0	0	0
0.250 0	0.102	0.245 0	0.244 8	0.12
0.500 0	0.102	0.490 1	0.489 3	0.18
0.750 0	0.102	0.735 2	0.734 0	0.17
1.000 0	0.102	0.980 3	0.980 0	0.04

5 结 论

通过对以往恒流源电路的分析,采用了差动放大器对采样电阻两端电压进行采样反馈,既消除了引线电阻等造成的输出电流精度低、稳定性差的问题,又将传统恒流源电路的优点进行了结合,使得负载两端无共模电压输入,并可线性调节输出电流,非常适合前端的测试测量。该恒流源的输出电流纹波小于 0.1 mA,调节的线性误差在千分之一左右,能够进行较长时间的工作,已成功用于微电阻测量领域中。此外,本恒流源的功耗低非常适合在便携式的设备中使用。

参 考 文 献

- [1] 鲍玉军,钱显毅,何一鸣.采用PID算法的高稳定恒流源设计[J].南京航空航天大学学报,2013,45(4):571-574.
- [2] 吴茂成.高精度宽范围恒流源设计[J].电测与仪表,2011,48(1):64-66.
- [3] 吉慧芳,王菊叶,王浩,等.基于OPA549的多路电流恒流源设计[J].测控技术,2011,30(9):4-7.
- [4] 江进国,陈泽平,王嘉伟,等.基于功率管并联的恒流

源设计与分析[J].电测与仪表,2013,50(6):115-119.

- [5] 黄天辰,贾嵩,余建华,等.高精度数控直流恒流源的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2013,(6):27-29.
- [6] 米卫卫,扬风,徐丽丽.高精度恒流源的设计与制作[J].电子测试,2012,(12):65-71.
- [7] 郝丽俊,单纯玉,白宝丹.基于方波恒流源细胞电阻测量系统的设计实现[J].国外电子测量技术,2015,34(3):77-80.
- [8] 吴桂初,章上聪,舒亮.栅片灭弧室灭弧效率的耦合仿真及其测量方法[J].电子测量技术与仪器学报,2015,29(5):115-123.
- [9] 徐猛,李智.恒流源在高精度数字多用表中的设计与实现[J].电测与仪表,2009,46(5):72-75.
- [10] 鞠康,何为,何传红,等.基于直接数字频率合成的混合频率恒流源设计[J].仪器仪表学报,2010,31(9):2110-2114.
- [11] 程磊,章雯,沈涵颖.基于DSP的高精度数控恒流源设计[J].电测与仪表,2014,51(19):100-122.
- [12] 沈小东,刘倩,邓安仲,等.基于恒压源的精密恒流源研究[J].后勤工程学院学报,27(4):79-81.

作 者 简 介

王波,1991年出生,上海理工大学在读硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail:1109283762@qq.com

戴曙光,1957年出生,上海理工大学教授,主要研究方向为测试信息的获取与处理、在线检测技术与装置。