

一种高精度恒流源电路的设计与实现

许宜申 顾济华 陶智 吴迪
(苏州大学物理科学与技术学院 苏州 215006)

摘要 介绍了一种由基准电压源、集成运算放大器及复合管等组成的高精度恒流源电路,其输出电流范围为 $1\mu\text{A}\sim 1\text{A}$ 。详细分析了该电路的工作原理,公式推导证明了设计的正确性,并对实际应用中元器件的选取进行了说明。对所设计恒流源电路的性能进行了测试,测试结果表明,该电路精度高,稳定性好,输出电流精度相对误差的最大值为 0.152%,输出电流稳定性误差的最大值为 0.047%。

关键词 恒流源 高精度 运算放大器 反馈

Design and Implementation of a High-precision Constant-current Source

Xu Yishen Gu Jihua Tao Zhi Wu Di

(Department of Physics Science and Technology Soochow University Suzhou 215006 China)

Abstract A high-precision constant-current source is presented, which is mainly comprised of a voltage reference, some operational amplifiers and a Darlington transistor. The range of the circuitry's output current value is from $1\mu\text{A}$ to 1A . The working principle of the designed constant-current circuitry is analyzed in details and deduced mathematically, and the selective rules of the practical elements are illuminated. The performance of the designed constant-current source is tested, and the results indicate that the circuitry could generate a high-precision steady current. The maximal relative error of precision and maximal error of stability of the output current are 0.152% and 0.047%, respectively.

Key words constant-current source high-precision operational amplifier feedback

1 引言

恒流源是指能够向负载提供恒定电流的电源,在仪器仪表、电子通信等领域有着广泛的应用。目前市场上较成熟的恒流源产品的输出虽然可达毫安培到百安培量级,但通常并不能完全满足于具体的应用电路,对输出电流大小、稳定度及精度等指标有特殊要求的恒流源电路仍需要使用者自行研制^[1]。

本文介绍一种由基准电压源、集成运算放大器及复合管等组成的高精度恒流源电路,其输出电流范围为 $1\mu\text{A}\sim 1\text{A}$,精度高,稳定性好。通过简单的元器件参数调整或电路并联等设计后,即可满足多数应用电路的需求。

2 电路设计

2.1 工作原理

所设计的高精度恒流源电路,如图1所示。由该原理图可知,整个恒流源电路包括基准电压源 V_{ref} 、阻抗变换器 A1、电压放大器 A2 与 A3、电流放大器 Q1~Q3、精密采样电阻 $R_{\text{N1}}\sim R_{\text{N7}}$ 以及反馈信号电压跟随器 A4 等部分。其中, V_{ref} 为 5V 基准电压源, Q2、Q3 组成复合管,以便输出较大的电流, S1~S7 为输出电流切换开关。

本恒流源电路的核心设计原理是:通过负载电压反馈,在高精度采样电阻上产生恒定的压降,则与该精密采样电阻相串联的支路中就可以得到恒定的输出电流。

具体的工作过程简述如下:设开关 S1~S7 中某一路接通,当负载电阻 R_x 变大时,其上瞬间压

降 V_x 随之增大, 则运算放大器 A3 的同相输入端与反相输入端之间的压差减小, 输出电压 V_2 小于基准电压 V_{ref} , 此时运算放大器 A2 的反相输入端产生微小的负电压, A2 将其同相输入端与反相输入端之间的压差进行线性放大, 输出的正电压使得三极管 Q3 的发射极电压增大, 从而维持精密采样电阻上的压降保持不变。当负载电阻 R_x 减小时, 工作过程与上述类似。

2.2 公式推导

根据运算放大器的特性, 由图 1 可知:

$$\frac{V_{ref}}{R_1} = -\frac{V_1}{R_2} \quad (1)$$

$$\frac{V_1}{R_3} = -\frac{V_2}{R_4} \quad (2)$$

$$V_3 = V_4 = \frac{(V_x + I \cdot R_N)}{(R_5 + R_7)} \cdot R_5 \quad (3)$$

$$\frac{V_4 - V_2}{R_6} = \frac{V_x - V_4}{R_8} \quad (4)$$

取 $R_1 \sim R_6$ 相等, R_7 与 R_8 相等, 且 $R_1 = 5R_7$, 则结合式(1)~式(4), 可以推导出:

$$V_{ref} = 5I \cdot R_N \quad (5)$$

由式(5)可以看出: 精密采样电阻所在支路上的电流 I 仅与基准电压 V_{ref} 和采样电阻 R_N 阻值相关。

根据运算放大器“虚断”的特性, 即有流过负载电阻 R_x 上的电流恒定。

实际应用中, 基准电压 V_{ref} 取为 5V, 精密采样电阻 $R_{N1} \sim R_{N7}$ 分别为 1M Ω 、100k Ω 、10k Ω 、1k Ω 、100 Ω 、10 Ω 、1 Ω , 开关 $S_1 \sim S_7$ 分别接通时, 即可输出 1 μ A~1A 的恒定电流。

2.3 元器件选取

通过前文对恒流源电路工作原理的分析及公式推导过程可知, 要在实际应用中得到高精度的输出电流, 元器件的选择使用非常重要。

本电路设计中, 运算放大器选用 OP177, 它具有高增益、低漂移、分辨率高、线性度好、输入阻抗高、抗干扰能力强等特点, 其失调电压漂移仅为 0.1 μ V/ $^{\circ}$ C。基准电压源选择温度系数很好的 REF195, 其最大的温度漂移为 5ppm/ $^{\circ}$ C, 输出电压稳定值为 5.000V。精密采样电阻 $R_{N1} \sim R_{N6}$ 选用 RX71 系列精密线绕电阻, 它们具有较低的温度系数; R_{N7} 选用经过老化的 RX24 系列功率型线绕锰铜电阻。反馈回路中的电阻选用经过筛选的精密金属膜电阻, 它们的阻值相对误差控制在 0.01%之内。

另外, 实际应用中, Q_1 应加装散热片, 以保证工作过程中其上热量的迅速散发, 从而保证输出电流的稳定。开关 $S_1 \sim S_7$ 可由单片机控制的模拟电子开关代替, 结合多路转换器即可实现输出电流的自动切换。

3 实验测试

对所设计的恒流源电路进行性能测试时, 先加

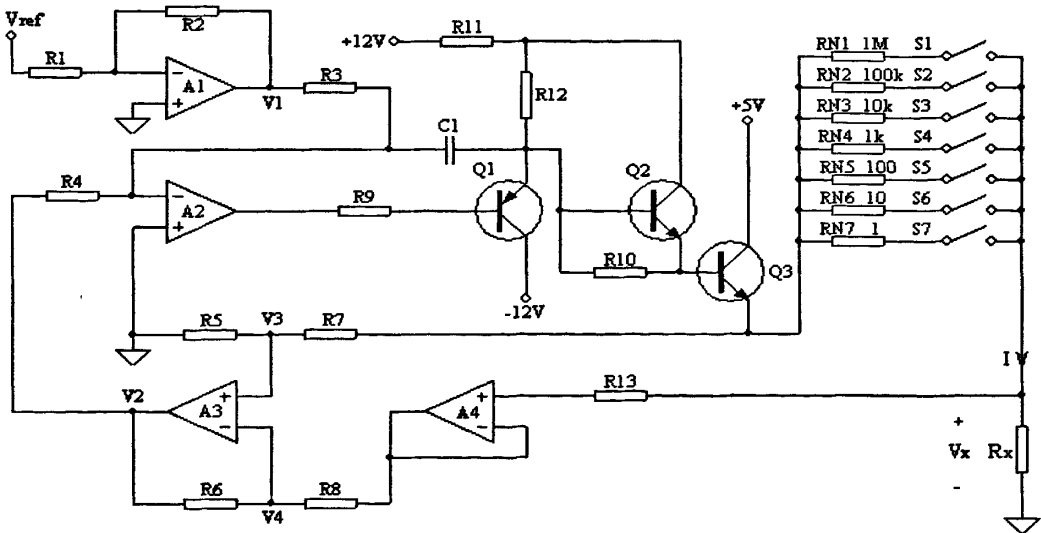


图1 恒流源电路原理图

上负载电阻, 预热 10 分钟左右, 当电路内部温度达到平衡状态后, 再开始测量。通过开关 S1~S7 的切换, 设置不同的额定输出电流值, 利用 5 位半数字万用表测量实际输出电流值。

对于某一路输出电流, 保持负载电阻 R_x 不变, 重复三次测量, 测试间隔约为 2 小时, 所得到的输出电流精度测试结果如表 1 所示。

表 1 输出电流精度测试数据

额定值	测量值	相对误差
1A	0.99991A,0.99998A,0.99996A	0.009%
100mA	99.999mA,100.005mA,100.012mA	0.012%
10mA	10.0027mA,9.9999mA,10.0011mA	0.027%
1mA	1.00031mA,1.00011mA,0.99991mA	0.031%
100 μ A	99.997 μ A,99.996 μ A,100.042 μ A	0.042%
10 μ A	10.0082 μ A,10.0050 μ A,10.0077 μ A	0.082%
1 μ A	1.00152 μ A,1.00099 μ A,1.00147 μ A	0.152%

由表 1 可知, 该恒流源电路实际输出电流与额定输出值之间的最大误差为 0.152%, 且输出电流值越大相对误差越小。

表 2 输出电流稳定性测试数据

负载电阻(Ω)	输出电流值(μ A)	绝对误差(μ A)
2k	100.022	0.022
3k	100.039	0.039
3.9k	100.033	0.033
4.7k	100.042	0.042
5.1k	100.015	0.015
6.8k	100.039	0.039
9.1k	100.029	0.029

选定一路输出电流, 对于某次测量过程, 多次改变负载电阻 R_x 的大小, 测得的输出电流稳定性

数据(限于篇幅, 本文仅列出标称输出电流值为 100 μ A 时的测试数据), 如表 2 所示。

由表 2 可知, 负载电阻的改变对于本电路输出电流值的影响几乎为零, 进一步验证了电路设计的正确性。

实际测试中, 对于每一路输出电流都进行了改变负载电阻测其输出电流的实验。经过计算所有测试数据得到, 该电路输出电流稳定性误差的最大值为 0.047%。

4 结 论

本文采用基准电压源、高性能运算放大器、复合管及精密电阻等元器件构建了一种高精度恒流源电路, 该电路精度高, 稳定性好, 其输出电流精度相对误差的最大值仅为 0.152%, 输出电流稳定性误差的最大值仅为 0.047%。该电路经过简单的元器件参数调整或电路并联等设计后, 即可满足多数恒流源电路的要求。通过进一步电路设计, 配以单片机等微处理器, 便可以设计出多种高精度测量仪器。

参考文献

[1] 秦玲,张良,赖青贵,等. 基于功率运算放大器的恒流源技术研究[J]. 通信电源技术, 2007, 24(1):43-46.

[2] 卫永琴,高建峰. 一种恒流源电路的巧妙设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8):1170-1172.

[3] 曾滨. 高精度恒流源[J]. 电测与仪表, 1994, (6): 11-13.

[4] 陶林伟,王英民,雷开卓. 基于微处理器的精密数控恒流源[J]. 电子技术应用, 2007, (7):138-140.

[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(4):136-138.

[6] 赵海龙,赵军卯. 基于恒流源的多路高精度测温仪的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(26): 242-244.