

# 基于 Howland 电流源的精密压控电流源

陈笑风, 杜磊, 赵柏树

(湖北大学 物理学与电子技术学院, 湖北 武汉 430062)

**摘要:** 设计一种基于 Howland 电流源电路的精密压控电流源, 论述了该精密压控电流源的原理。该电路以 V/I 转换电路作为核心, Howland 电流源做为误差补偿电路, 进一步提高了电流源的精度, 使绝对误差仿真值达到 nA 级, 实际电路测量值绝对误差达到  $\mu\text{A}$  级, 得到高精度的压控电流源。仿真和实验测试均证明该方案是可行的。

**关键词:** Howland 电流源; 正反馈; 压控电流源; Multisim

中图分类号: TM919; TN710

文献标识码: A

文章编号: 0258-7998(2012)09-0071-04

## Precision voltage controlled current source based on Howland

Chen Xiaofeng, Du Lei, Zhao Baishu

(Faculty of Physics and Electronics, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Based on the Howland current source circuit, this article designs one kind of the high precision voltage controlled current source and discusses the principle of it. Using the V/I conversion circuit as the core of the design circuit and Howland current source circuit as error compensation circuit, this circuit can get the high precision voltage controlled current source, which further improves the accuracy of current sources. The absolute error value of simulation can reach a nA level and the actual circuit reaches an  $\mu\text{A}$  level. The simulation and the experiment test prove this plan is feasible.

**Key words:** Howland current source; positive feedback; voltage controlled current source; Multisim

电流源常常用于测试其他设备, 用以驱动电流传感器或其他器材, 提供二晶体管或三极管的偏置, 或者设定测试条件<sup>[1]</sup>。直流电流源还可以精确测量低电阻阻值。电流源在各个领域的广泛使用激发起人们对恒流源的研究更加深入化和多样化。恒流源在加速器中的使用是加速器结构改善的一个标志<sup>[2]</sup>。因此如何提高电流源的精度和拓展其应用电路, 一直是专业人士热衷的研究课题。本文设计了一种基于 Howland 电流源电路和 V/I 转换电路(即其延拓电路)的组合式精密压控电流源。先通过仿真手段研究 Howland 电流源电路及其变形电路的互补组合式的电流特性, 再使用通用集成运算放大器和电阻构建压控电流源的实验测试电路, 并给出精度、输出阻抗以及频率响应特性等实验测试结果。

### 1 Howland 电流源的电压/电流转换特性

设集成运放为理想运放, 并根据集成运放虚短和虚断的理论, 在图 1 中若取  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R}$ , 则有  $I_o = \frac{U_i}{R}$ 。

图 1 所示电路不仅引入了负反馈, 同时也引入了正反馈。若负载减小, 因电路内阻的存在, 一方面  $I_o$  将增

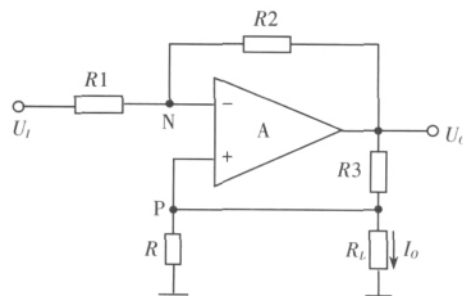


图 1 Howland 电流源电路

大, 另一方面  $U_p$  将下降, 进而使  $U_o$  下降,  $I_o$  将随之减小。从而使得  $I_o$  仅受  $U_i$  控制, 与负载无关, 达到稳流目的。

在 Multisim10.0 的环境下对 Howland 电流源电路进行仿真, 测试实际搭建的电路(测试过程中集成运放均用的是 UA741CN), 得到输入电压和输出电流的对应关系, 如表 1 所示。

### 2 Howland 电流源延拓电路即(V/I 转换电路)

Howland 电流源电路虽然结构简单, 但是输入和输出反相, 不能满足设计需要。为解决这个问题, 将其延拓即得图 2 所示的 V/I 转换电路。

设集成运放为理想运放,在图2中,A1、A2均引入了负反馈,前者构成同相求和运算电路,后者构成电压跟随器。根据虚短、虚断原理,若取 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ,则有: $I_o=\frac{U_i}{R}$ 。输出电流与Howland电流源仅相差一个负号。

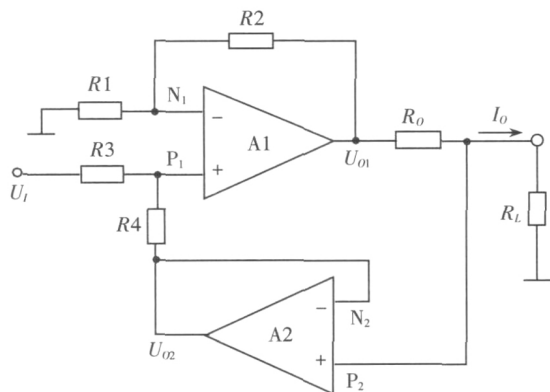


图2 V/I 转换电路

仿真及实测得到的输入电压和输出电流的对应关系,如表2所示。

表1和表2均表明仿真效果很好,但实际电路的效果并不理想,输出电流的精度较差。这是因为仿真过程中数据是理论值,运放参数被理想化,而实际的运放都不理想, $A_{vd}$ 、 $R_{id}$ 、 $K_{CMR}$ 并非无穷大, $R_{od}$ 也不为零,故 $I_o$ 和 $U_i$ 的关系不能严格满足理论公式。所以仅有单纯的

Howland 电流源电路或 V/I 转换电路并不能构成精密压控电流源。

## 3 高精度压控电流源

### 3.1 理论分析及仿真

由本文1、2节看出:Howland 电流源和 V/I 转换电路仿真时的绝对误差在 $\mu A$ 级,但实际电路的绝对误差则接近 mA 级,基本不能满足应用需求。故两个电路在实际的高精度压控电流源中都不实用。

为了提高输出精度,本文引入误差补偿的思想。通过对比、分析上文得到的数据,将 Howland 电流源作为误差补充电路引入到 V/I 转换电路中,得到图3所示高精度压控电流源电路。该电路极大地改善了电路的精度,使实际输出电流的绝对误差达到 $\mu A$ 级。其中 $V_{REF}$ 为基准电压,作为 Howland 电流源的压控端,输出一个小电流用以补偿核心电路的误差。在实际电路中 $R_0$ 、 $R$ 、 $R_7$ 均要求为精密电阻。其余阻值要匹配,否则会带来很大的误差<sup>[3]</sup>。

在 Multisim10.0 的环境下对高精度电流源电路仿真,对 $U_i$ 进行参数扫描分析得到表3所示结果。

表3中数据表明图3电路极大的提高了输出精度,表明该电路理论上可行。

对图3电路进行交流分析可知,该高精度电流源具有较好的频率响应,图4给出了其频率响应曲线,包括有幅度频率响应和相位频率响应。由图可见,电路的上

表1 Howland 电流源电路仿真及实测数据

参数		数据									
仿真	$U_i/V$	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
	$I_o/mA$	0.997 4	1.997 4	2.997 4	3.997 3	4.997 3	5.997 3	6.997 3	7.997 3	8.997 3	9.997 3
	误差/mA	0.002 6	0.002 6	0.002 7	0.002 7	0.002 7	0.002 7	0.002 7	0.002 7	0.002 7	0.002 7
实测	$U_i/V$	-1.000 3	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
	$I_o/mA$	0.91	1.835	2.72	3.63	4.53	5.45	6.35	7.28	8.2	8.23
	误差/mA	0.090 3	0.165	0.28	0.37	0.47	0.55	0.65	0.72	0.8	1.77

注:仿真及实际电路中 $R=1k\Omega$ ,理论值 $I_o=-\frac{U_i}{R}$ ,实测 $I_o$ 为负载 $R_L$ 在 $0\sim 500\Omega$ 之间变化时的值。

表格中误差为绝对误差即 $\Delta I_o=|I_o-\frac{U_i}{R}|$ 。

表2 V/I 转换电路仿真及实测数据

参 数		数 据									
仿 真	$U_i/V$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$I_o/mA$	1.002 6	2.002 5	3.002 5	4.002 4	5.002 3	6.002 2	7.002 1	8.002	9.001 9	10.001 9
	误差/mA	0.002 6	0.002 5	0.002 5	0.002 4	0.002 3	0.002 2	0.002 1	0.002	0.001 9	0.001 8
实 测	$U_i/V$	1.001	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$I_o/mA$	0.913	1.834	2.71	3.62	4.52	5.43	6.35	7.26	8.18	9.02
	误差/mA	0.088	0.166	0.29	0.38	0.48	0.57	0.65	0.74	0.82	0.98

注:仿真及实际电路中 $R_0=1k\Omega$ ,理论值 $I_o=\frac{U_i}{R_0}$ ,实测 $I_o$ 为负载 $R_L$ 在 $0\sim 500\Omega$ 之间变化时的值。表格中误差为

绝对误差即 $\Delta I_o=|I_o-\frac{U_i}{R_0}|$

表 3 高精度压控电流源仿真数据

参数	数据									
$U_i/\text{V}$	-15	-10	-5	-2	0	1	6	10	15	
$I_o$ 仿真值/ $\text{mA}$	-14.999 81	-9.999 88	-4.999 94	-1.999 98	-1.989 90	0.999 99	5.999 93	9.999 88	14.999 81	
绝对误差/ $\mu\text{A}$	0.19	0.12	0.06	0.02	0.00	0.01	0.07	0.12	0.19	

表 4 高精度压控电流源实测数据

参数	数据												
$U_i/\text{V}$	0.499	1.002	2.00	5.00	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	11.00	12.00	15.00	
$V_{\text{REF}}/\text{V}$	-0.050 1	-0.100 9	-0.213 4	-0.526 2	-0.837 1	-0.881 5	-0.933 1	-0.972 1	-1.151	-2.674	-3.574	-7.174	
$I_o/\text{mA}$	0.499	1.002	2.00	5.00	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	11.00	12.00	15.00	

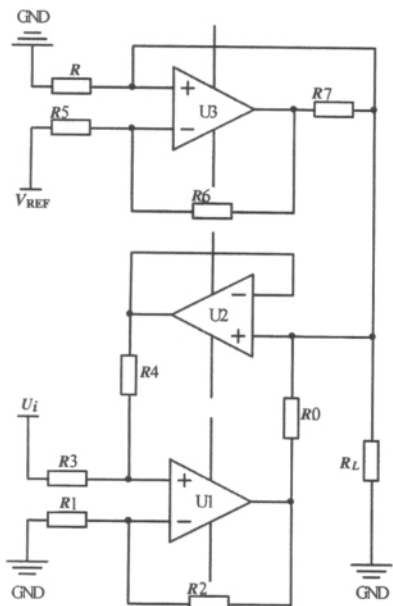


图 3 高精度压控电流源

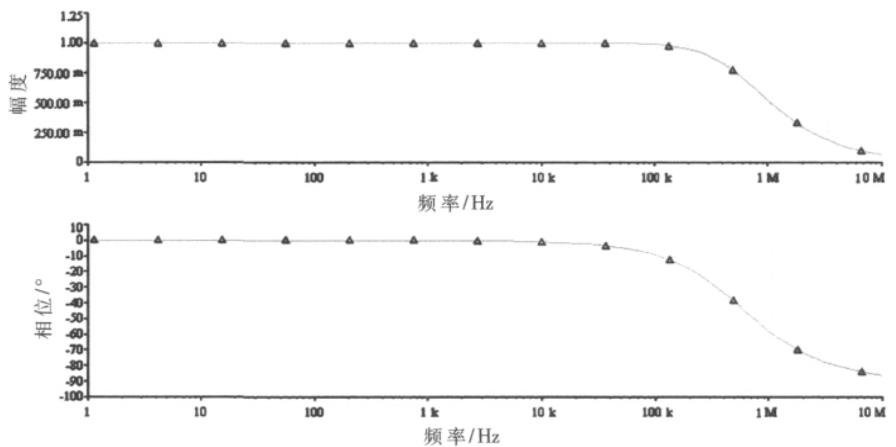


图 4 高精度压控电流源的频率响应曲线

限截止频率达到 600 kHz, 优于运算放大器的单位增益带宽积。当采用 CB 工艺实现单片集成时, 电路的性能会更好<sup>[4]</sup>。

### 3.2 高精度压控电流源实际测试

测试图 3 电路时使输入电压  $U_i$  在 0~15 V 之间变化, 调节  $V_{\text{REF}}$  的输入电压(为负), 使输出电流精确跟随  $U_i$  变化, 达到精确压控目的。记录下对应的  $V_{\text{REF}}$  值, 得到数据如表 4 所示。通过数据处理后发现, 当  $U_i$  在 0~9.5 V 变化时, 在保证电压精密控制  $I_o$  的前提下,  $V_{\text{REF}}$  和  $U_i$  的关系为线性关系:  $V_{\text{REF}} = -0.103 4 U_i - 0.006 8 \text{ V}$ , 其中  $U_i \leq 9.50 \text{ V}$ , 线性拟合度  $R^2 = 0.999 4$ 。

$V_{\text{REF}}$  和  $U_i$  之间存在极好的线性关系, 故在  $U_i$  和  $V_{\text{REF}}$  之间引入反相比例运算电路, 如图 5 所示。不仅很好地解决了  $U_i$  与误差补偿电路的基准电压  $V_{\text{REF}}$  之间的关系, 而且简化了控制方式, 在输入控制电压的同时引入补偿电压, 使电路仅需要一个控制信号即  $U_i$ , 真正做到了压控电流源的设计目的。其中  $R_f$  为电位器, 用以调节  $U_i$  和  $V_{\text{REF}}$  之间的比例关系。

测试图 5 电路时先将  $U_i$  设置在中间值, 如 4 V, 调

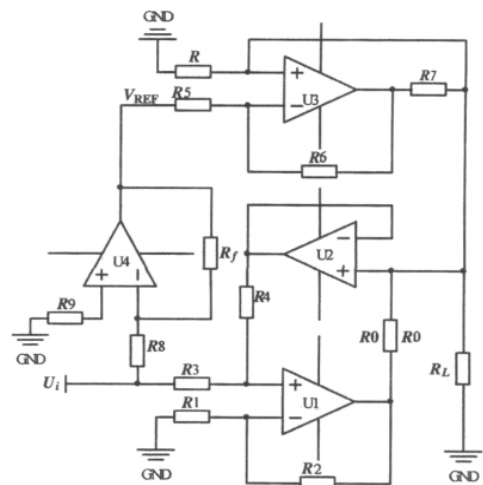


图 5 实际高精度压控电流源

节  $R_f$  使输出电流值与  $U_i$  精确对应, 接着调节  $U_i$  在 0~15 V 之间变化, 记录  $V_{\text{REF}}$  和  $I_o$  的值, 如表 5 所示。在较小量程内(如 0.1 mA~7 mA)绝对误差可以限定在 10  $\mu\text{A}$  以内; 当  $U_i$  在 0~11 V 变化时, 绝对误差可以保证在 50  $\mu\text{A}$  以内, 电路具有很好的输出精度。

表 6 所示为对电路进行带载能力和频率响应测试, 证明该电流源具有一定的带载能力。

从图 6 可知电路频率特性较好, 上限截至频率为 53

表 5 实际高精度压控电流源  $U_i-I_o$  关系表

参数	测试数据											
$U_i/V$	0.101	0.499	1.000	1.999	4.000	7.010	9.038	10.507	10.934	11.498	14.000	15.002
$V_{REF}/V$	-0.012 9	-0.055	-0.108 1	-0.213	-0.426	-0.745	-0.961	-1.117	-1.169	-1.223	-1.489	-1.596
$I_o/mA$	0.103	0.504	1.009	1.997	4.00	7.02	9.08	10.55	10.91	10.96	11.21	11.31
误差/ $\mu A$	2	5	9	2	0	10	34	42	20	538	1 790	3 692

注:理论值  $I_o=\frac{U_i}{R0}$ ,表格中误差为绝对误差即  $\Delta I_o=|I_o-\frac{U_i}{R0}|$ 。

表 6 实际高精度电流源带载能力表

$I_o/mA$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$I_o$ 的绝对误差 $10\mu A$	5 520	2710	1 782	1 320	1 041	825	565	364	212	89
$RL_{max}/\Omega$	5 520	2724	1 797	1 334	1 056	842	577	379	224	100

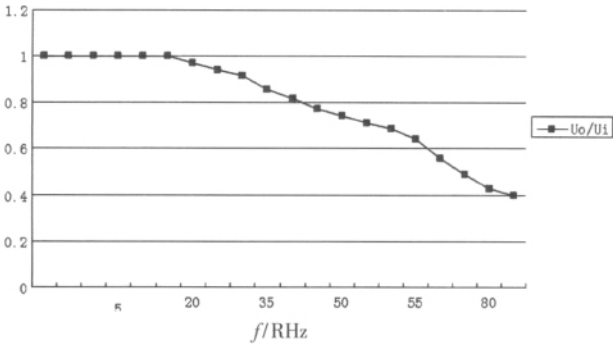


图 6 实际高精度压控电流源频响特性曲线

kHz。基本可以用在低频测试环境中。当频率要求比较高时,集成运放可以改为宽带集成运放。

本文巧妙运用 Howland 电流源电路及其延拓电路,构建压控电流源,使电流源性能显著提高。由于图 5 电路继承了运算放大器的优良性能,使该电流源具有精度高,输出阻抗高,频率响应好等特点。在兼有 Howland 电流源主要特征的同时,对其进行了改进和补充,使其性能更优。该电路可以应用在仪表放大器电流传输器、浮置阻抗变换器、高性能模拟放大器等电路的设计中,由于电路结构简单,易于集成化,集成后的性能将更加优越,应用前景广阔。

(上接第 70 页)

[4] CHAO R M, KO S H, PAI F S, et al. Evaluation of a photovoltaic energy mechatronics system with a built-in quadratic maximum power point tracking algorithm [J]. Solar Energy, 2009, 83(12):2177-2185.

[5] 刘邦银, 段善旭. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6):91-94.

[6] ABDELSALAM A K, MASSOUD A M, AHMED S, et al. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4):1010-1021.

[7] SERA D, TEODORESCU R, HANTSCHER J, et al.

参考文献

[1] PEASE R A. Pease, A Comprehensive Study of the Howland current pump[EB]. National Semiconductor Application Note, 2008.

[2] 秦玲, 赖青贵, 张良. 基于运算放大器的压控恒流源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(3):553-556.

[3] 杨永辉, 颜晓熾, 郭恒. 高精度工频恒流源设计[J]. 电测与仪表, 2009, 46(10):72-75.

[4] YING J H, FANG C, ZHANG J Y. Design of temperature independent current reference based on superposition technology[J]. Microelectronics & Computer, 2008, 25 (3):114-118.

(收稿日期:2012-04-22)

作者简介:

陈笑风, 女, 1991 年生, 在读本科, 主要研究方向: 集成电路设计、移动通讯。

杜磊, 男, 1989 年生, 在读本科, 主要研究方向: 集成电路设计、电源设计、信号处理。

赵柏树, 男, 1959 年生, 副教授, 主要研究方向: 电子技术应用、电视技术、集成电路设计。

Optimized maximum power point tracker for fast changing environmental conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7):2629-2637.

[8] 易灵芝, 王根平, 刘魏宏, 等. Research of SVPWM based on ANN in Photovoltaic grid-connected inverter[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2009, 31(4):55-61.

(收稿日期:2012-05-20)

作者简介:

罗晓雪, 女, 1988 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子装置与系统。