

高精度、快速建立的大电流源

作者: Nick Jiang



电压控制型电流源 (VCCS) 广泛用于医疗器械、工业自动化等众多领域。VCCS的直流精度、交流性能和驱动能力在这些应用中至关重要。本文分析了增强型Howland电流源 (EHCS) 电路的局限性,并阐述了如何利用复合放大器拓扑进行改进,以实现高精度、快速建立的±500 mA电流源。

增强型Howland电流源

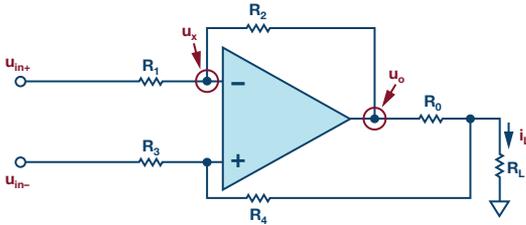


图1. Howland电流源电路。

图1所示为传统的Howland电流源 (HCS) 电路,而公式1显示了如何计算输出电流。如果R2足够大,输出电流将保持恒定。

$$i_L R_0 \left[1 + \frac{R_1}{R_2} + R_L \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1 - \frac{R_1}{R_2} \times \frac{R_4}{R_3}}{R_0} \right) \right] = u_{in+} \left(\frac{R_0}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) - u_{in-} \left(\frac{R_4}{R_3} + \frac{R_1}{R_2} \times \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (1)$$

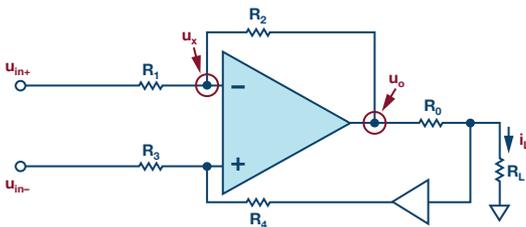


图2. 增强型Howland电流源电路。

虽然较大的R2会降低电路速度与精度,但在反馈路由中插入一个缓冲器,形成一个增强型Howland电流源可以解决这一问题,如图2所示。所有通过R0的电流都流入RL。输出电流由公式2计算。

$$i_L R_0 \left[1 + \frac{R_1}{R_2} + R_L \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \times \frac{R_4}{R_3} \right) \right] = u_{in+} \left(\frac{R_4}{R_3} + 1 \right) - u_{in-} \left(\frac{R_4}{R_3} + \frac{R_1}{R_2} \times \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (2)$$

如果R1/R2 = R3/R4 = k, 则该公式变为公式3。输出电流与负载无关,仅受输入电压控制。这是一个理想的VCCS。

$$i_L = \frac{u_{in+} - u_{in-}}{k R_0} \quad (3)$$

性能分析

公式3基于一个理想系统。图3显示了EHCS的直流误差分析模型。Vos和IB+/IB-是主放大器的输入失调电压和偏置电流。Vosbuf和IBbuf是缓冲器的输入失调电压和偏置电流。总输出误差可以通过公式4计算。

$$I_O \left[R_0 + R_L \left(1 - \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \right] = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \times V_{os} + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \times \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \times I_{B+} - \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \times \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \times I_{B-} + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \times \frac{R_3}{R_3 + R_4} \times V_{osbuf} - I_{Bbuf} R_0 \quad (4)$$

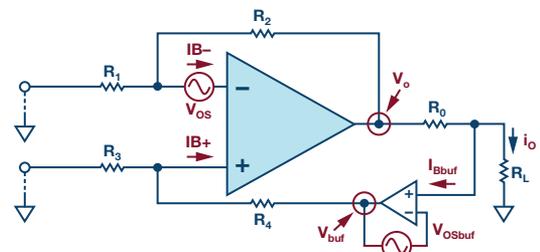


图3. 失调电压计算。

忽略增益电阻的不匹配, 并考虑 $R_1/R_2 = R_3/R_4 = k$, $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 。输出失调电流取决于放大器的失调和偏置电流, 如公式5所示。

$$I_O = \left(\frac{1}{k} + 1 \right) \times \frac{1}{R_0} \times V_{os} + \left(\frac{1}{k} + 1 \right) \times \frac{1}{R_0} \times \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \times I_{os} + \frac{1}{R_0} \times V_{OSbuf} - I_{Bbuf} \quad (5)$$

考虑 R_1/R_2 和 R_3/R_4 的不匹配, R_L 将会影响输出失调电流。最差相对误差如公式6所示。这个误差取决于 R_L/R_0 和 k 。减小负载电阻并提高 k 将减少失调误差。

$$I_o \text{ 的最大相对误差} = \frac{R_L}{R_0} \times \frac{2\Delta k}{k(k+1)} \quad (6)$$

我们还可以计算电路的温度漂移, 它来自放大器和电阻。放大器的失调电压和偏置电流随工作温度而变化。对于大多数CMOS输入放大器而言, 温度每升高 10°C , 偏置电流便增加一倍。不同类型电阻的漂移变化很大。例如, 碳膜电阻的TC约为 $1500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, 而金属膜和体金属电阻的TC可能是 $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。

表1. 精密放大器参数

器件	V_{os} 最大值 (μV)	I_B 最大值 (pA)	GBP (MHz)	压摆率 ($\text{V}/\mu\text{s}$)	I_{sc} (mA)
ADA4522	5	150	3	1.3	22
ADA4077	25	1500	4	1	22
LTC2057HV	4	120	2	1.2	26
LT1012	25	100	1	0.2	13

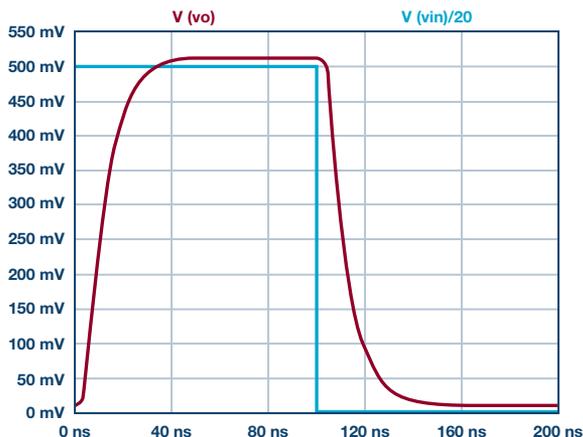


图5. 基于ADA4870的EHCS建立时间和频率响应。

选择精密放大器有利于输出电流的直流精度。然而, 精密放大器的选择也存在许多局限性。其驱动能力和交流性能都不够好。表1列出了一些常见的精密放大器。我们希望构建一个 $\pm 500 \text{ mA}$ 的电流源, 建立时间为 $1 \mu\text{s}$ 。对于电流源, 我们需要高驱动能力。对于还要具有快速建立时间的电流源, 我们需要出色的交流性能。一般来说, 精密放大器无法提供这两个规范的组合, 因为其压摆率和带宽不够好。这需从其他类型的放大器中进行选择。

EHCS实现

ADA4870是一款高速、高电压、高驱动能力的放大器。它可提供 10 V 至 40 V 电压, 输出电流限制为 1.2 A 。大信号下的带宽超过 52 MHz 和压摆率高达 $2500 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。所有这些规格使它很适合快速建立和大电流源。图4显示了基于ADA4870的EHCS电路, 它通过 10 V 输入可生成一个 $\pm 500 \text{ mA}$ 输出电流源。

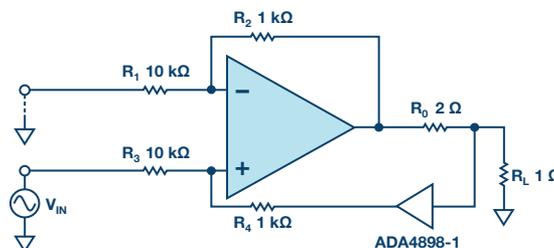
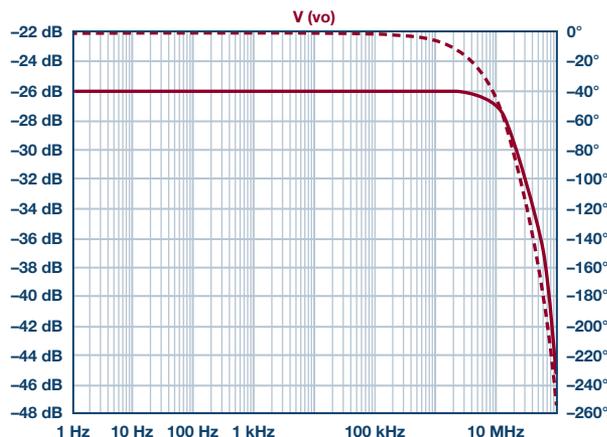


图4. 基于ADA4870的EHCS电路。

在交流规格中, 我们更关心建立时间、压摆率、带宽和噪声。如图5所示, 建立时间约为 60 ns , 带宽约为 18 MHz 。输出电流压摆率可以通过测量上升阶段和下降阶段的斜率来计算。正负压摆率分别为 $+25 \text{ A}/\mu\text{s}$ 和 $-25 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。输出噪声密度曲线显示了噪声性能, 在 1 kHz 时大约为 $24 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。



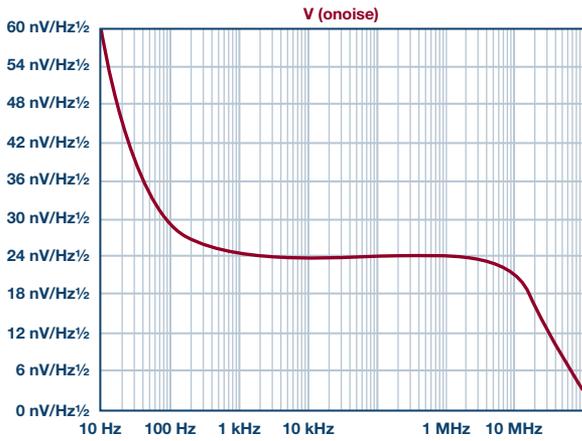


图6. 基于ADA4870的EHCS输出噪声密度曲线。

由于输入失调电压和偏置电流较大，该电路的直流精度不高。表2显示了不同的直流误差源与贡献。主要的直流误差来自ADA4870的 V_{OS} 和 I_B 。典型输出电流失调约为11.06 mA，这相当于500 mA全程时2.21%左右的误差范围。

表2. 基于ADA4870的EHCS直流误差

误差源	参数 (典型值)	误差输出 (mA)	百分比
I_B	-12 μA	6.00	54.2%
I_{B+}	+9 μA	4.50	40.7%
V_{OS}	1 mV	0.55	5.0%
I_{Bbuf}	-0.1 μA	0.00	0.0%
V_{OSbuf}	0.02 mV	0.01	0.1%
总计		11.06	100%

复合放大器技术

ADA4870这样的高驱动放大器的直流参数限制了输出电流的精度，而高精度放大器的速度又不够。为此，我们可以利用复合放大器技术在单个电路中集成所有这些特性。图7所示为一个复合放大器增强型Howland电流源(CAEHCS)，它由ADA4870和ADA4898-2组成。

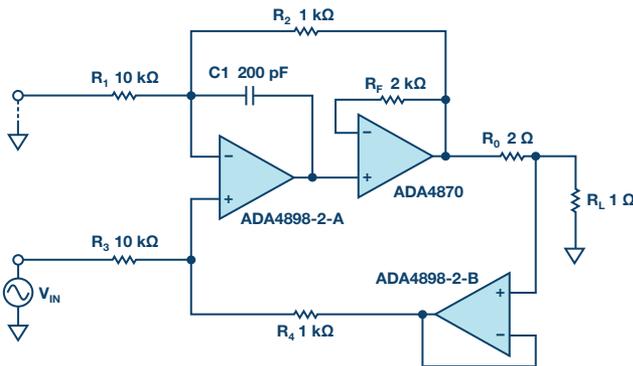


图7. 复合放大器EHCS电路。

选择ADA4898-2构成复合放大器是因为它具有出色的交流和直流性能。其-3 dB带宽为63 MHz。它在输出阶跃为5 V时的0.1%建立时间为90ns，压摆率可达55 V/ μs 。它还具有超低噪声。电压噪声密度为0.9 nV/ \sqrt{Hz} ，电流噪声密度为2.4 pA/ \sqrt{Hz} 。至于直流规格参数，它的性能表现也很好。典型输入失调电压为20 μV ，温度漂移为1 $\mu V/^\circ C$ 。偏置电流为0.1 μA 。表3显示了CAEHCS的直流误差。输出电流失调降低至0.121 mA，这意味着误差范围在0.03%以下。

表3. 基于ADA4898的CAEHCS直流误差

误差源	参数 (典型值)	误差输出 (mA)	百分比
I_{B-}	-0.1 μA	0.050	41.3%
I_{B+}	+0.1 μA	0.0050	4.1%
V_{OS}	20 mV	0.011	9.1%
I_{Bbuf}	-0.1 μA	0.000	0.1%
V_{OSbuf}	20 μV	0.01	8.2%
总计		0.121	100%

CAEHCS的交流性能如表4所示。由于复合放大器的环路延迟，其建立时间和带宽均低于EHCS。由于ADA4898-2的电流噪声低，因此CAEHCS的输出噪声远低于EHCS的输出噪声。如数据手册中所标明的，ADA4870的反向输入电流噪声密度为47 pA/ \sqrt{Hz} 。通过使用几个k Ω 级阻值的电阻，它将产生比电压噪声(2.1 nV/ \sqrt{Hz})高很多的噪声。然而，CAEHCS中的输入电流噪声密度为2.4pA/ \sqrt{Hz} 。它产生的输出噪声要低很多。

表4. CAEHCS的交流规格

参数	CAEHCS	EHCS
建立时间 (ns)	200	60
压摆率 (A/ μs)	7.7	25
带宽 (MHz)	6	18
1kHz时的输出噪声密度 (nV/ \sqrt{Hz})	4	24

首先，CAEHCS大大提高了VCCS的直流精度，并具有同等驱动能力和交流性能。此外，可供选择的复合放大器产品很多，以满足不同的需求。表5显示了CAEHCS电路中不同放大器的性能。LT6275的交流性能最好。它的建立时间可达100 ns以内，压摆率高达15 A/ μs 。ADA4522-2等零漂移放大器非常适合输出电流失调误差约为0.002 mA的高精度应用。

表5. CAEHCS中主放大器的选择

主放大器	DC性能	AC性能
ADA4898	好	好
LT6275	好	极佳
ADA4522	极佳	不好

测试结果

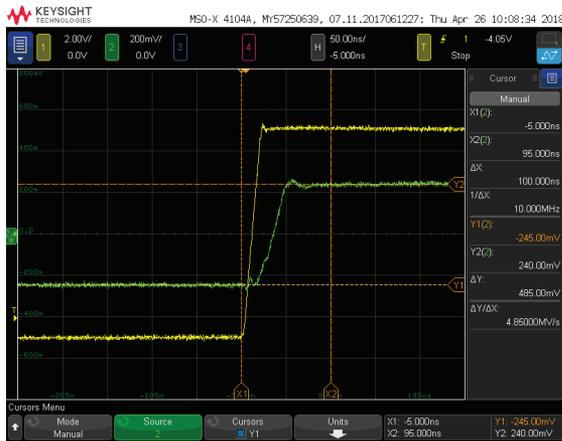
基于ADA4898的EHCS和CAEHCS的性能如表6和图8所示。

表6. EHCS与CAEHCS的比较

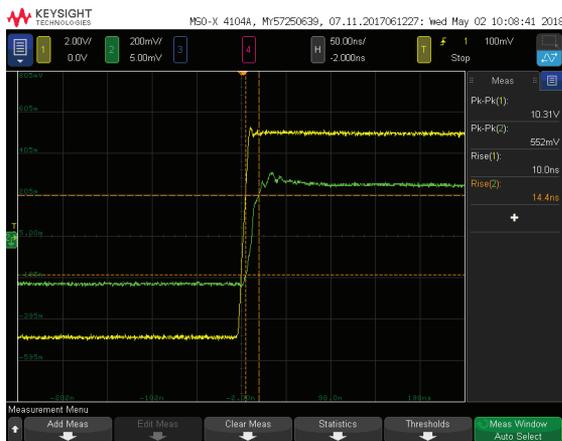
主放大器		EHCS	CAEHCS
直流参数	输出电流失调 (mA)	10.9	0.2
	建立时间 (ns)	100	100
交流参数	压摆率 (A/μs)	22.2	12.6
	带宽 (MHz)	18	8

表7. CAEHCS中不同主放大器的测试结果

主放大器	los (mA)	建立时间 (ns)	压摆率 (A/μs)	带宽 (MHz)
ADA4898	0.2	100	12.6	10
LT6275	0.8	60	16.6	11
ADA4522	0.04	1000	0.4	1.2



(a)



(b)

图8. ADA4898-2 (CH1-输入、CH2-输出) 的建立时间。

CAEHCS电路具有比EHCS电路好很多的直流规格。其输出电流失调为0.2 mA，而EHCS电路的输出电流失调为10.9 mA。CAEHCS电路也具有很好的交流规格。两者的建立时间均为100 ns。EHCS电路的带宽为18 MHz，而CAEHCS电路的带宽为8 MHz。

基于ADA4522-2和LT6275的CAEHCS性能如表7所示。ADA4522-2版本的输出失调误差更低，低至0.04 mA。LT6275的建立时间约为60 ns，输出电压压摆率高达16.6A/μs（如图9所示）。



图9. LT6275 (CH1-输入、CH2-输出) 的建立时间。

散热考虑

VCCS的输出电流可以达到几百毫安。整体功耗可达几瓦。如果输出效率不高，器件的温度将快速上升。ADA4870不使用散热器时的热阻 (θ_{JA}) 为15.95°C/W。温升可采用公式7计算。

$$T_{rise} = \theta_{JA} \times P \quad (7)$$

R_0 的取值将影响ADA4870的功耗。表8显示了在±20 V电源电压下选择不同 R_0 值的温升。当选用较大的 R_0 时，温升会大大降低。因此，建议使用较大的 R_0 以降低温升。

表8. ADA4870的功耗和温升与 R_0 的关系 ($I_o = 500 \text{ mA}$)

RL/Q	功耗 (W)		温升 (°C)	
	$R_0 = 2 \Omega$	$R_0 = 10 \Omega$	$R_0 = 2 \Omega$	$R_0 = 10 \Omega$
1	6.92	4.92	110.4	78.5
5	5.92	3.92	94.5	62.6
10	4.67	2.67	74.6	42.7

结论

CAEHCS电路将高驱动放大器和高精度放大器相结合，可在VCCS应用中提供出色的交流和直流性能以及大输出容量。建议在此电路中将ADA4870与ADA4898、LT6275和ADA4522结合使用。

Nick Jiang是ADI公司线性和精密技术部的产品应用工程师，工作地点在北京。他毕业于西安交通大学，拥有电气工程学士和硕士学位。



Nick Jiang