

# 高精度、可快速建立的大電流源

■作者：Nick Jiang /

ADI 線性和精密技術部產品應用工程師

電壓控制型電流源 (VCCS) 已經廣泛用於醫療器械、工業自動化等眾多領域中。有鑑於 VCCS 的直流精度、交流性能和驅動能力在這些應用中相當重要，本文特別分析增強型 Howland 電流源 (EHCS) 電路的局限性，並闡述了如何利用複合放大器拓撲進行改進，以實現高精度、快速建立的  $\pm 500$  mA 電流源。

## 增強型 Howland 電流源

圖 1: Howland 電流源電路

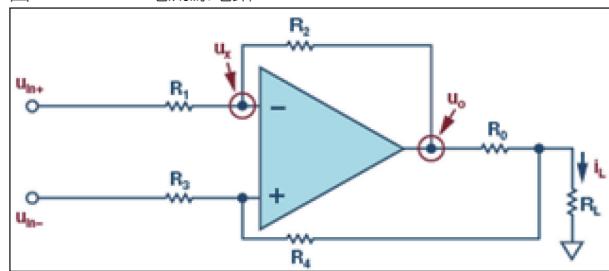
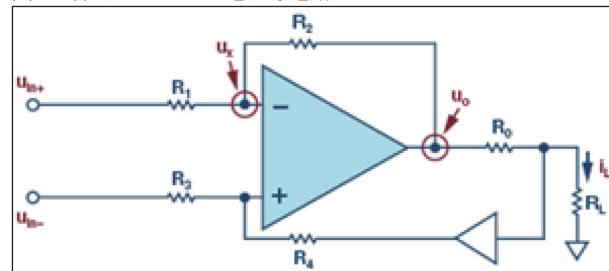


圖 1 所示為傳統的 Howland 電流源 (HCS) 電路，而公式 1 顯示了如何計算輸出電流。如果  $R_2$  足夠大，輸出電流將保持恒定。

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

雖然較大的  $R_2$  會降低電路速度與精度，但在回饋路由中插入一個緩衝器，以形成一個增強型 Howland 電流源可以解決這一個問題，如圖 2 所示。所有通過  $R_0$  的電流都流入  $R_L$ 。輸出電流由公式 2 計算。

圖 2: 增強型 Howland 電流源電路



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

如果  $R_1/R_2 = R_3/R_4 = k$ ，則該公式變為公式 3。輸出電流與負載無關，僅受輸入電壓控制。這是一個理想的 VCCS。

$$i_L = \frac{u_{in+} - u_{in-}}{kR_0} \quad (3)$$

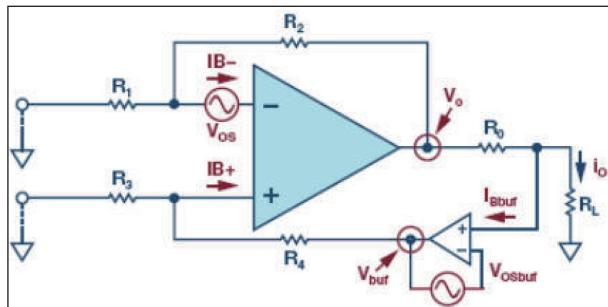
## 性能分析

公式 3 基於一個理想的系統。圖 3 顯示了 EHCS 的直流誤差分析模型。VOS 和  $IB+/IB-$  是

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

主放大器的輸入失調電壓和偏置電流。 $V_{OSbuf}$  和  $I_{Bbuf}$  是緩衝器的輸入失調電壓和偏置電流。總輸出誤差可以透過公式 4 計算。

圖 3: 失調電壓計算



忽略增益電阻的不匹配，並考慮  $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 。輸出失調電流取決於放大器的失調和偏置電流，如公式 5 所示。

考慮  $R_1/R_2$  和  $R_3/R_4$  的不匹配， $R_L$  將會影響輸

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

出失調電流。最差相對誤差如公式 6 所示。這個誤差取決於  $R_L/R_0$  和  $k$ 。減小負載電阻並提高  $k$  將減少失調誤差。

$$I_o \text{ 的最大相對誤差} = \frac{R_L}{R_0} \times \frac{2\Delta_k}{k(k+1)} \quad (6)$$

我們還可以計算電路的溫度漂移，它來自放大器和電阻。放大器的失調電壓和偏置電流隨操作溫度而變化。對於大多數 CMOS 輸入放大器而言，溫度每升高  $10^\circ\text{C}$ ，偏置電流便會增加一倍，而不同類型電阻的漂移變化很大。例如，碳膜電阻的 TC 約為  $1500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ，而金屬膜和體金屬電阻的 TC 可

表 1: 精密放大器參數

器件	$V_{os}$ 最大值 ( $\mu\text{V}$ )	$I_B$ 最大值 ( $\text{pA}$ )	GPB (MHz)	壓擺率 ( $\text{V}/\mu\text{s}$ )	ISC (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

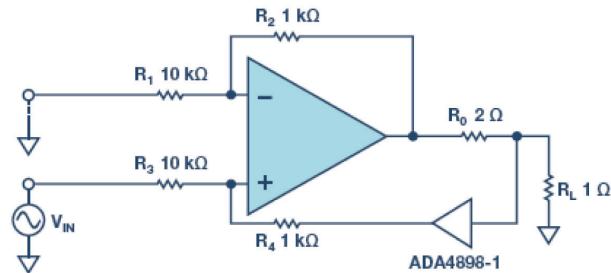
能是  $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。

選擇精密放大器有利於輸出電流的直流精度。然而，精密放大器的選擇也存在許多局限性。其驅動能力和交流性能都不夠好。表 1 列出了一些常見的精密放大器。我們希望構建一個  $\pm 500 \text{ mA}$  的電流源，建立時間為  $1\mu\text{s}$ 。對於電流源，我們需要高驅動能力。對於還要具有快速建立時間的電流源，我們需要卓越的交流性能。一般來說，精密放大器無法提供這兩個規範的組合，因為其壓擺率和頻寬不夠好。這需要從其他類型的放大器中進行選擇。

## EHCS 實現

ADA4870 是一款高速、高電壓、高驅動能力的放大器。它可提供  $10 \text{ V}$  至  $40 \text{ V}$  電壓，輸出電流限制為  $1.2 \text{ A}$ 。大訊號下的頻寬超過  $52 \text{ MHz}$  和壓擺率高達  $2500 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。所有這些規格使它很適合快速建立和大電流源。圖 4 顯示了基於 ADA4870 的 EHCS 電路，其透過  $10 \text{ V}$  輸入可生成一個  $\pm 500 \text{ mA}$  輸出電流源。

圖 4: 基於 ADA4870 的 EHCS 電路



在交流規格中，我們更關心建立時間、壓擺率、頻寬和雜訊。如圖 5 所示，建立時間約為  $60 \text{ ns}$ ，頻寬約為  $18 \text{ MHz}$ 。輸出電流壓擺率可透過測量上升階段和下降階段的斜率來計算。正負壓擺率分別為  $+25 \text{ A}/\mu\text{s}$  和  $-25 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。輸出雜訊密度曲線顯示

了雜訊性能，在  $1 \text{ kHz}$  時大約為  $24 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

由於 輸入失調電壓和偏

圖 5: 基於 ADA4870 的 EHCS 建立時間和頻率響應

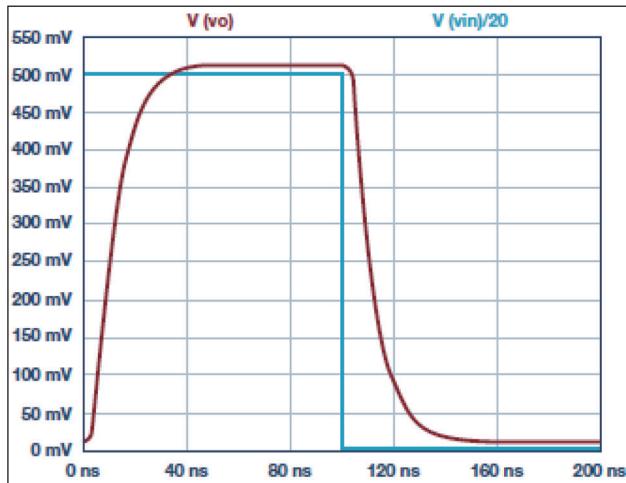
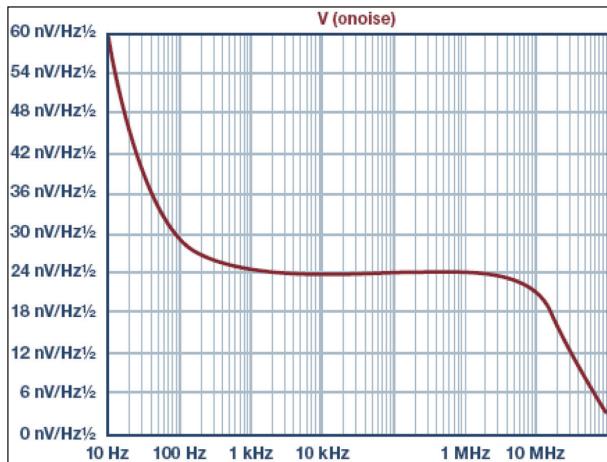


圖 6: 基於 ADA4870 的 EHCS 輸出雜訊密度曲線



置電流較大，該電路的直流精度不高。表 2 顯示了不同的直流誤差源與貢獻。主要的直流誤差來自 ADA4870 的  $V_{OS}$  和  $IB$ 。典型輸出電流失調約為 11.06 mA，這相當於 500 mA 全程時 2.21% 左右的誤差範圍。

## 複合放大器技術

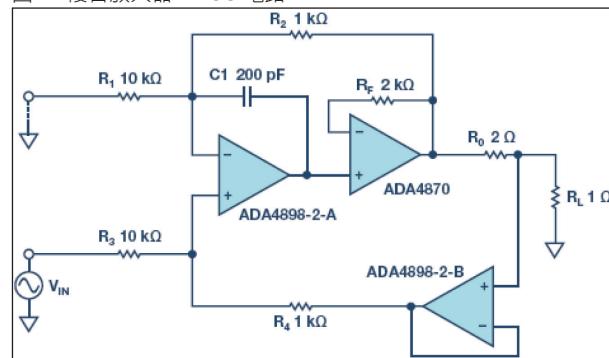
ADA4870 這樣的高驅動放大器的直流參數限制了輸出電流的精度，而高精度放大器的速度又不夠。為此，我們可以利用複合放大器技術在單個電路中整合所有這些特性。圖 7 所示為一個複合放大器增強型 Howland 電流源 (CAEHCS)，它由 ADA4870 和 ADA4898-2 組成。

選擇 ADA4898-2 構成複合放大器是因為它

表 2: 基於 ADA4870 的 EHCS 直流誤差

誤差源	參數 (典型值)	誤差輸出 (mA)	百分比
$IB_-$	$-12 \mu\text{A}$	6.00	54.2%
$IB_+$	$+9 \mu\text{A}$	4.50	40.7%
$V_{OS}$	1 mV	0.55	5.0%
$I_{Bbuf}$	$-0.1 \mu\text{A}$	0.00	0.0%
$V_{OSbuf}$	0.02 mV	0.01	0.1%
總計		11.06	100%

圖 7: 複合放大器 EHCS 電路



具有出色的交流和直流性能。其  $-3 \text{ dB}$  頻寬為 63 MHz。它在輸出階躍為 5 V 時的 0.1% 建立時間為 90ns，壓擺率可達 55 V/μs。它還具有超低雜訊。電壓雜訊密度為  $0.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，電流雜訊密度為  $2.4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。至於直流規格參數，它的性能表現也非常的良好。典型輸入失調電壓為  $20 \mu\text{V}$ ，溫度漂移為  $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。偏置電流為  $0.1 \mu\text{A}$ 。表 3 顯示了 CAEHCS 的直流誤差。輸出電流失調降低至 0.121 mA，這意味著誤差範圍在 0.03% 以下。

表 3: 基於 ADA4898 的 CAEHCS 直流誤差

誤差源	參數 (典型值)	誤差輸出 (mA)	百分比
$I_{B-}$	$-0.1\mu A$	0.050	41.3%
$I_{B+}$	$+0.1\mu A$	0.0050	41.3%
$V_{OS}$	20 mV	0.011	9.1%
$I_{Bbuf}$	$-0.1\mu A$	0.000	0.1%
$V_{OSbuf}$	20 $\mu V$	0.01	8.2%
總計		0.121	100%

CAEHCS 的交流性能如表 4 所示。由於複合放大器的迴路延遲，其建立時間和頻寬均低於 EHCS。由於 ADA4898-2 的電流雜訊低，因此 CAEHCS 的輸出雜訊遠低於 EHCS 的輸出雜訊。如產品手冊中所標明的，ADA4870 的反向輸入電流雜訊密度為  $47\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。透過使用幾個  $k\Omega$  級阻值的電阻，它將產生比電壓雜訊 ( $2.1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) 高很多的雜訊。然而，CAEHCS 中的輸入電流雜訊密度為  $2.4\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。它產生的輸出雜訊要低很多。

表 4: CAEHCS 的交流規格

參數	CAEHCS	EHCS
建立時間 (ns)	200	60
壓擺率 ( $\text{A}/\mu\text{s}$ )	7.7	25
頻寬 (MHz)	6	18
1kHz 時的輸出雜訊密度 ( $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	4	24

首先，CAEHCS 大幅提高了 VCCS 的直流精度，並具有同等驅動能力和交流性能。此外，可供選擇的複合放大器產品很多，可以滿足不同的需求。表 5 顯示了 CAEHCS 電路中不同放大器的性能。LT6275 的交流性能最好。它的建立時間可達 100 ns 以內，壓擺率高達  $15\text{ A}/\mu\text{s}$ 。ADA4522-2 等零漂移放大器非常適合輸出電流失調誤差約為 0.002 mA 的高精度應用。

表 5: CAEHCS 中主放大器的選擇

主放大器	DC Performance	AC Performance
ADA4898	好	好
LT6275	好	極佳
ADA4522	極佳	不好

## 測試結果

基於 ADA4898 的 EHCS 和 CAEHCS 的性能如表 6 和圖 8 所示。

表 6: EHCS 與 CAEHCS 的比較

主放大器	EHCS	CAEHCS
直流參數 輸出電流失調 (mA)	10.9	0.2
交流參數 建立時間 (ns)	100	100
壓擺率 ( $\text{A}/\mu\text{s}$ )	22.2	12.6
頻寬 (MHz)	18	8

圖 8: ADA4898-2 (CH1- 輸入、CH2- 輸出) 的建立時間



CAEHCS 電路具有比 EHCS 電路好很多的直流規格。其輸出電流失調為 0.2 mA，而 EHCS 電路的輸出電流失調為 10.9 mA。CAEHCS 電路也具有很好的交流規格。兩者的建立時間均為 100 ns。EHCS 電路的頻寬為 18 MHz，而 CAEHCS 電路的頻寬為 8 MHz。

表 7:CAEHCS 中不同主放大器的測試結果

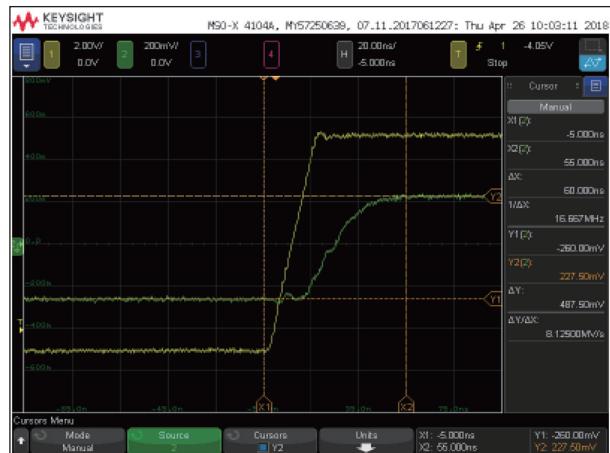
主放大器	Io(mA)	建立時間 (ns)	壓擺率 (A/μs)	頻寬 (MHz)
ADA4898	0.2	100	12.6	10
LT6275	0.8	60	16.6	11
ADA4522	0.04	1000	0.4	1.2

基於 ADA4522-2 和 LT6275 的 CAEHCS 性能如表 7 所示。ADA4522-2 版本的輸出失調誤差更低，低至 0.04 mA。LT6275 的建立時間約為 60 ns，輸出電流壓擺率高達 16.6A/μs( 如圖 9 所示 )。

## 散熱考量

VCCS 的輸出電流可以達到幾百毫安培。整體

圖 9:LT6275(CH1- 輸入、CH2- 輸出 ) 的建立時間



## 艾睿電子亮相美國消費性電子展 展示頂尖設計資源和工程專業知識

全球技術解決方案公司艾睿電子於美國拉斯維加斯 2019 年 “美國消費性電子展” 上展示初創公司成功案例和工程師實驗室，實踐為創造、製造和管理未來技術的創新者和工程師提供頂尖設計工具，資源和工程專業知識的承諾。艾睿電子於地尤里卡公園 (Eureka Park) 的展位上展示多個幫助客戶開發的嶄新技術，其中包括用於自動駕駛輔助系統研發的 3D 飛行時間平台 (3D Flight of Time) 以及適用於零售和高端醫學研究、基於人工智能的可視化分析工具。

艾睿電子首席市場官高志輝先生表示：「世界各地的創新者和工程師不僅要面對現有或新的對手的競爭，更要挑戰自己：如何以最大限度發揮其產品的影響力；如何設計出更直觀易明的用戶界面；如何調控生產規模實現可持續增長；如何更準確地抓緊相關市場的各種商機；以及如何迅速拓展海外業務 . . . . . 艾睿電子作為擁有關鍵資源且廣泛的全球網絡的技術平台公司，將能建立創新合作夥伴關係，幫助這些創造者和製造商保持持續的競爭優勢。」

艾睿電子於 2016 年在香港科學園建立了第一所「艾睿電子技術應用工作間」(Arrow Open Lab)，協助本地創新者和工程師獲得設計工具、資源和工程專業知識。該自成立以來？超過 800 多名工程師解決工程問題和加快從概念到原型至生產的過程。目前，艾睿正在擴大其在全球主要科技創新樞紐設立工程實驗室的計劃，網絡將遍及中國，印度，以色列和美國。

2017 年，艾睿電子與 Indiegogo 建立獨家合作夥伴關係，為企業者提供高達 50,000 美元的資助基金，協助企業家於原型設計和製造創新產品方面贏得成就。該公司於 2018 年吸引了數千家初創公司加入該平台。

功耗可達幾瓦。如果輸出效率不高，元件的溫度將快速上升。ADA4870 不使用散熱片時的熱阻 ( $\theta_{JA}$ ) 為  $15.95^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。溫升可採用公式 7 計算。

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

$R_o$  的取值將影響 ADA4870 的功耗。表 8 顯示了在  $\pm 20$  V 電源電壓下選擇不同  $R_o$  值的溫升。當選用較大的  $R_o$  時，溫升會大大降低。因此，建議使用較大的  $R_o$  以降低溫升。

表 8:ADA4870 的功耗和溫升與  $R_o$  的關係 ( $Io = 500$  mA)

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

## 結論

CAEHCS 電路將高驅動放大器和高精度放大器相結合，可在 VCCS 應用中提供出色的交流和直流性能以及大輸出容量。建議在此電路中將 ADA4870 與 ADA4898、LT6275 和 ADA4522 結合使用。 