

# 選擇精密運算放大器作為 ADC 驅動器

Soufiane Bendaoud, senior business development manager  
Texas Instruments

選擇合適的運算放大器 (op amp) 來驅動類比數位轉換器 (ADC) 並非易事。ADC 的選擇通常由終端設備決定，需要權衡多個參數。即使在同一產業或市場領域內，ADC 的要求也可能有所不同。例如，在測試和測量中，你會發現有漸進法暫存器 (SAR) 和  $\Delta$ - $\Sigma$  ADC 混合使用的情況。SAR ADC 在參數測量單元、記憶體測試儀和電池芯化成測試儀中應用廣泛。

$\Delta$  $\Sigma$  ADC 通常用於振動分析、資料擷取和科學儀器。根據整體系統需求，部分應用常常會同時使用這兩者。由於  $\Delta$  $\Sigma$  ADC 的解析度較高，因此更適合高準確磅秤，而消費級和低端型號則仰賴 SAR 拓撲結構來最大限度地降低功耗。

同樣的，資料通信光學模組傾向於使用 SAR ADC，而電信光學模組則通常仰賴  $\Delta$  $\Sigma$  ADC，即使這兩種應用都屬於資料中心這一個領域。

仔細注意運算放大器（或類比前端）的 DC 和 AC 規格，有助於避免 ADC 性能劣化並最大限度地減少誤差。

## 電路配置與頻寬及其他誤差

反向電路配置具有避免共模調變誤差的優點，因此不需要很高的共模抑制比。但它會降低輸入電阻和回饋電阻器並聯組合的輸入阻抗，並且當存在回饋電阻器時，會引入增益誤差。非反向配置通常提供更高的輸入阻抗。運算放大器的閉環迴路頻寬或有效頻寬是雜訊增益（或非反向增益）的函數，而不是訊號增益的函數。

在 **圖 1** 中，TI 的 OPA325 具有 10MHz 的增益帶寬乘積。在正單一增益（緩衝器）配置中，頻寬為 18MHz。多餘的頻寬歸因於增益峰值，TINA-TI™ 巨集模型透過輸入電容和開環輸出阻抗來解釋這一現象。在這種情況下，訊號增益為 -1，雜訊增益為 1。

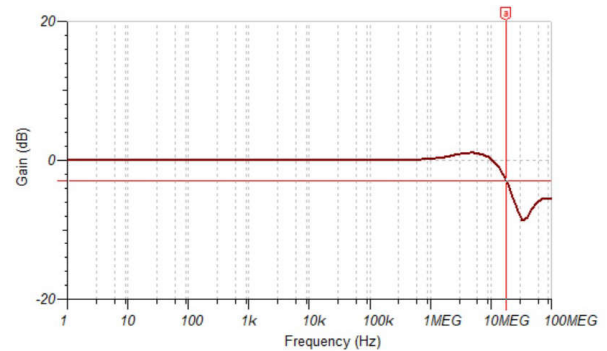
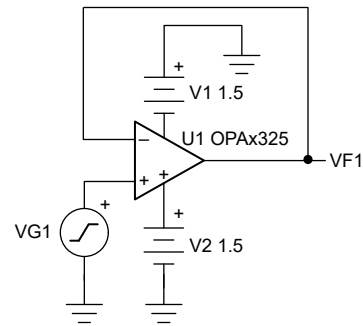
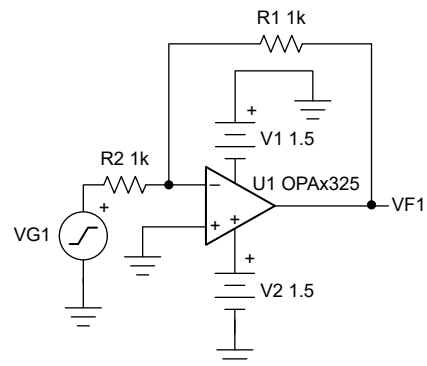


圖 1. 在緩衝器配置中的 OPA325

另一方面，**圖 2** 所示的電路頻寬為 6.7MHz，幾乎是 **圖 1** 所示緩衝器頻寬的三分之一。在 **圖 2** 中，訊號增益為 -1，但雜訊增益為 2。請注意，即使增益只有 2，反向配置中的增益峰值也遠沒有那麼明顯。增益越高，增益峰值就越低。



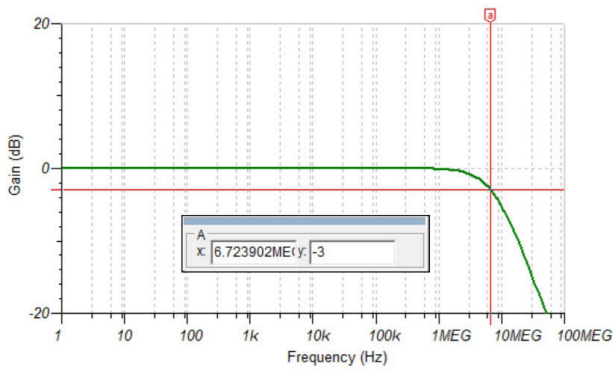


圖 2. 雜訊增益為 2 的 OPA325

### DC 增益誤差

開環增益 (Aol) 在 DC 增益準確度中扮演著重要的角色。如果考慮圖 2 中的反向電路，在 12 位元系統中，Aol 必須至少為 78dB 或 8,192；即  $212 \times 2$ 。幾乎所有現代通用運算放大器都能達到 78dB 的 Aol。如果您需要 16 位元精度（雜訊增益為 2），則最小 Aol 必須為 102dB，這在大多數情況下需要精密設備。請記住，Aol 也是輸出負載的函數，因為最後一級的增益是  $gm \times RL$  的函數。若為反向電路，回饋電阻器（圖 2 中的 R1）即為負載。

### 輸出限制與線性

運算放大器規格表中列出了輸出擺幅，對於互補金屬氧化物半導體 (CMOS) 來說，輸出擺幅的範圍通常為來自電源供應器的 10mV 至 20mV，這通常被稱為衝擊測試。為確保運算放大器保持在線性區內，請查看 Aol 規格中的條件，以確定允許的最大電壓擺幅。由於 ADC 具有較高的輸入阻抗，因此要觀察最高值下的負載情況。

例如，OPA328 在 10kΩ 負載下具有  $\pm 100\text{mV}$  的輸出電壓擺幅。當與 ADS8860 配合使用 3.3V 單電源供電時，OPA328 的線性範圍為 0.1V 至 3.2V，而 ADS8860 的輸入範圍為 0V 至 3.3V。顯然，您沒有充分利用動態範圍，從而造成了代碼浪費。使用 LM7705 負偏壓產生器 (-0.23V) 並將正電源供應提高到 3.5V 可以解決這個問題。由於 OPA328 的輸出限制為  $\pm 100\text{mV}$ ，且 LM7705 也已就位，因此有效的輸出範圍現在是 -0.1V 至 3.4V，這涵蓋了 ADS8860 的輸入範圍，而不會違反其絕對最大額定值 (-0.3V 至 3.6V)。

### 雜訊與 ENOB

在驅動高解析度 ADC 時，運算放大器的雜訊的影響至關重要。低雜訊的放大器有助於提升整個系統的有效位元數 (ENOB)。換句話說，運算放大器雜訊越低，ENOB 的劣化越小，準確度也就越高。別忘了，低雜訊放大器通常需要更高的靜態電流，而靜態電流又與頻寬成正比，頻寬的運算式為：

$$BW = \frac{gm}{2\pi Cc} \quad (1)$$

在電流相同的情況下，雙極型運算放大器可以實現更寬的頻寬（或者換句話說，它們的效率更高）。

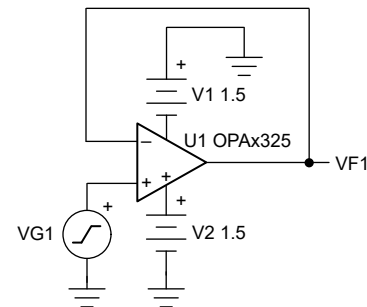
方程式 2 為包括電壓參考在內的總雜訊運算式：

$$V_{ntotal} = \sqrt{V_{nADC}^2 + V_{nopa}^2 + V_{nref}^2} \quad (2)$$

以 ADS8860 為例，使用  $5 / (2 \times \sqrt{2})$  將全刻度範圍 (5V) 轉換為均方根 (RMS) 值，結果為 1.76V。方程式 3 為 ADS8860 的 rms 雜訊運算式：

$$V_{nADC} = \frac{V_{FSR\_rms}}{10\left(\frac{SNR_{ADC}}{20}\right)} = \frac{1.76}{10\left(\frac{93\text{dB}}{20}\right)} = 39.6\mu\text{Vrms} \quad (3)$$

在正單一增益下模擬 OPA328，所得的總雜訊為  $47\mu\text{Vrms}$ ，在反向增益為 2（雜訊增益）時，所得的總雜訊約為  $83\mu\text{Vrms}$ 。圖 3 和 圖 4 展示了對應的模擬結果。



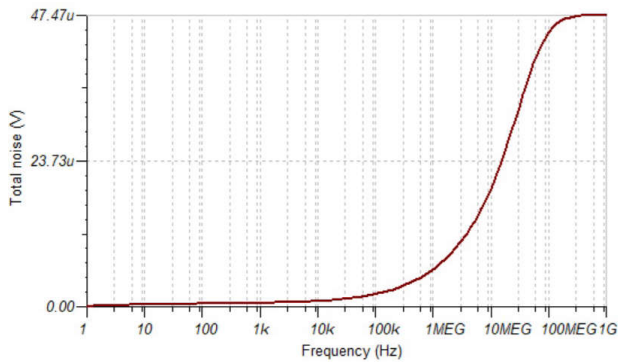


圖 3. 正單一增益下的 OPA328 RMS 雜訊

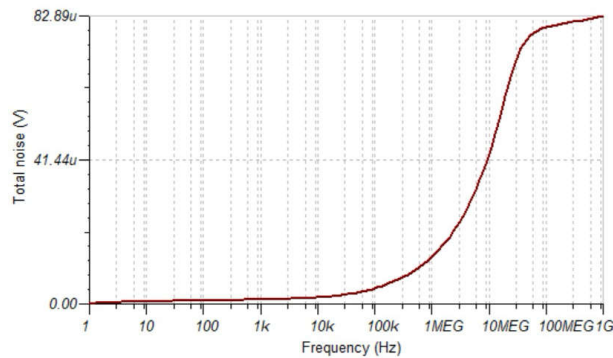
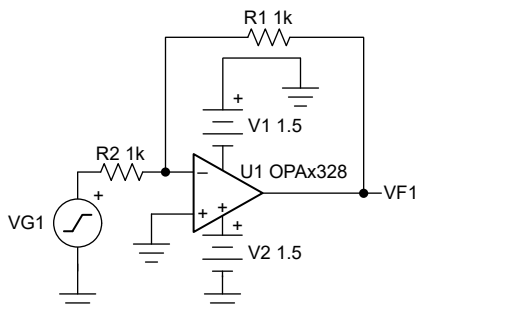


圖 4. 反向配置下的 OPA328 RMS 雜訊

在相同的電路中使用 OPA325 分別產生 39 $\mu$ Vrms 和 55 $\mu$ Vrms。

雖然選擇雜訊最低的運算放大器似乎是一個自然的選擇，但必須謹記的是，低雜訊放大器的性能只取決於其雜訊頻寬。換句話說，寬頻電壓雜訊密度為  $9nV/\sqrt{Hz}$  的 OPA325 的雜訊密度為  $6nV/\sqrt{Hz}$ ，此雜訊位準較 OPA328 高約 20%。OPA328 的頻寬是 OPA325 的四倍。

模擬總雜訊 (RMS) 是分析中的重要一環，也是提高系統 ENOB 的簡單方法。

例如，在 圖 5 的雜訊圖中，為了將雜訊降低到 ADS8660 的 39 $\mu$ V 的最低有效位元 (LSB) 的一半，需要將頻寬限制在 2MHz 左右。

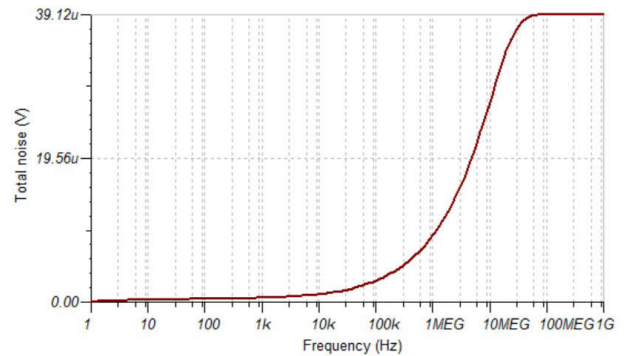
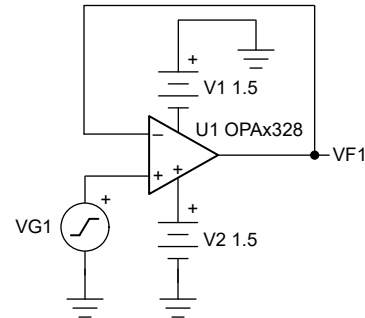


圖 5. 正單一增益下的 OPA325 RMS 雜訊

圖 6 顯示反向配置下 OPA325 的 rms 雜訊模擬。

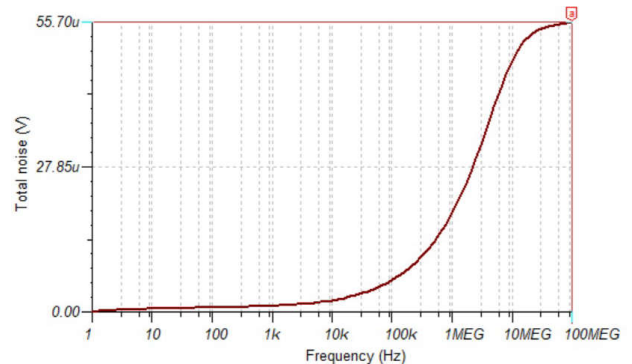
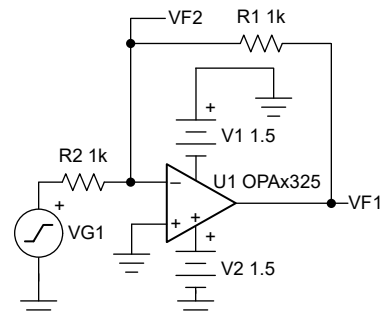


圖 6. 反向配置下的 OPA325 RMS 雜訊

圖 7 顯示 REF7050 的總雜訊 (RMS) 約為 2.2μV，對系統總雜訊的影響很小。將其代入 方程式 2，可計算出總雜訊為 55.7μV。若忽略電壓參考雜訊，方程式 1 給出的結果為 55.6μV。如果將 OPA325 頻寬限制在 2MHz，則雜訊約為 18μV，系統總雜訊為 43μV，ADS8860 雜訊明顯佔據支配地位。

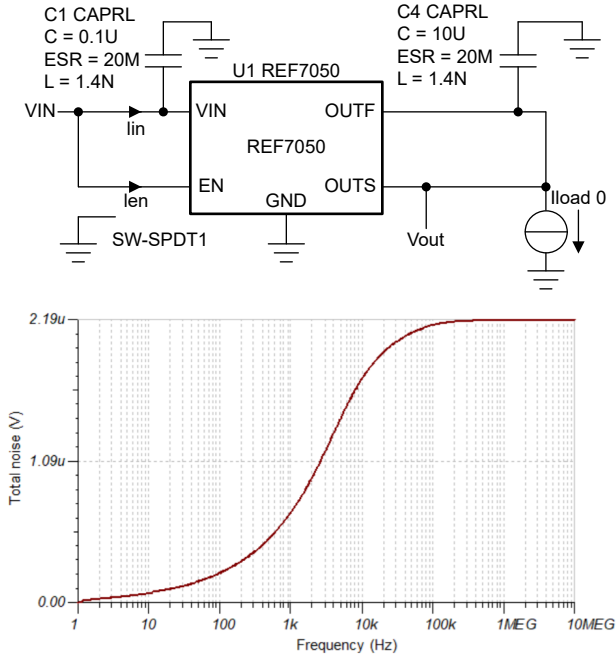


圖 7. REF7050 RMS 雜訊

裝置	技術	Vs (V)	Vos 最大值 (μV)	TCVos, 典型值 (μV/°C)	頻寬 (MHz)	寬頻電壓雜訊 (nV/√Hz)
OPA392	e-trim™	1.7-5.5	10	0.18	13	4.4
OPA325	雷射修整, 零交點	2.2-5.5	150	2	10	9
OPA328	e-trim™, 零交點	2.2-5.5	50	0.15	40	6.1
OPA383	零飄移	2.7-5.5	5	0.025	2.5	32
OPA192	e-trim™, 支援多工器	4.5-36	25	0.1	10	5.5

表 1. 用於驅動高解析度 ADC 的低雜訊精密運算放大器

方程式 4 為系統總訊號雜訊比 (SNR) 的運算式：

$$SNR_{total} = 20 \log \left( \frac{V_{FSR_{rms}}}{V_{ntotal}} \right) \quad (4)$$

總雜訊為 55.6μV 時，總 SNR 為 90dB。將 OPA325 的頻寬濾波至 2MHz 後，總 SNR 為 92.2dB，相比於 ADS8860 的原始 SNR 93dB 下降了不到 1dB。

### 輸入補償電壓與漂移

運算放大器的補償電壓是誤差的來源之一，會對系統準確度產生影響。在 5V 全刻度電壓範圍下，ADS8860 (16 位元) 的量化錯誤為 5/(2<sup>16</sup> + 1)，即 76μV。為避免量化誤差並維持系統準確度，將目標設定為二分之一個 LSB 或 38μV。雖然可以透過校準消除輸入補償電壓，但偏移漂移可能涉及更複雜的校準方法。汽車和井下鑽探等應用所需的溫度比實驗室和現場儀器、測試和測量以及醫療儀器所需的溫度要高得多。現代高精度運算放大器採用零漂移或 e-trim™ 等技術，具有補償電壓和漂移非常低的優點，遠低於理想的 LSB 大小，有助於實現更高的系統準確度。

表 1 列出了 TI 採用各種技術的幾款精密運算放大器。

### 安定時間

具有高轉換速率、低輸出阻抗和高相位裕度的寬頻寬放大器能夠更快地安定下來。驅動 ADC 時，選擇安定時間與 ADC 擷取時間相符的運算放大器，使其達到所需的解析度。別忘了，擷取時間等於取樣時間減去轉換時間。降低取樣率有助於放寬運算放大器的安定時間需求。

理想情況下，運算放大器應安定在 ADC 的二分之一 LSB 內，以避免誤差。然而，運算放大器的產品規格表很少規定最高可達 16 位元的安定時間 (0.0015%)。一個經常被忽略的規格是開環輸出阻抗。較低的開環輸出阻抗意味著較高的相位裕度，進而意味著更短的安定時間。此外，開環輸出阻抗的形狀會影響電路穩定性。平坦（電阻性）開環輸出阻抗的運算放大器更容易進行補償。運算放大器輸出端的電荷槽電阻電容濾波器會產生一個極點，劣化相位裕度，但可以最大限度地減少取樣期間的輸出電壓下降。根據極點位置的不同，可能會出現過度振鈴（過衝），這會影響安定時間。

圖 8 顯示使用 OPA328 驅動 ADS8860 的電路。取樣率設定為 500kSPS。ADS8860 的擷取週期為  $T_{acq} = 2\mu s - 710ns = 1,290ns$ 。

將取樣率降低到 500kSPS 可以讓電路更快安定在 425ns，遠低於 LSB 的一半。

圖 9 顯示與 ADS8860 配對的 OPA328，並使用此電路來模擬安定時間 (圖 10)。

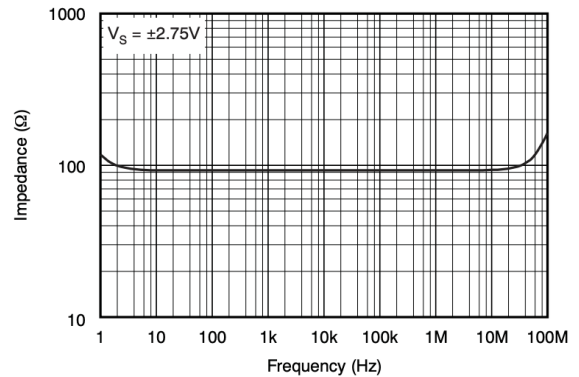


圖 8. OPA320 開環輸出阻抗與頻率的關係

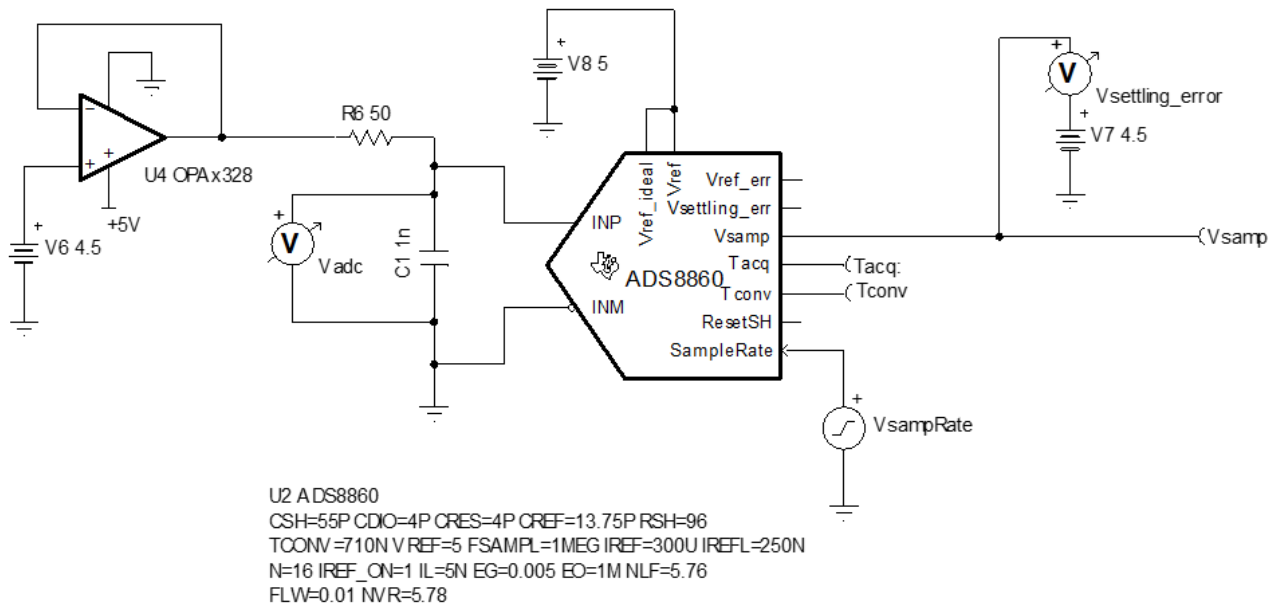


圖 9. OPA328 驅動 ADS8860

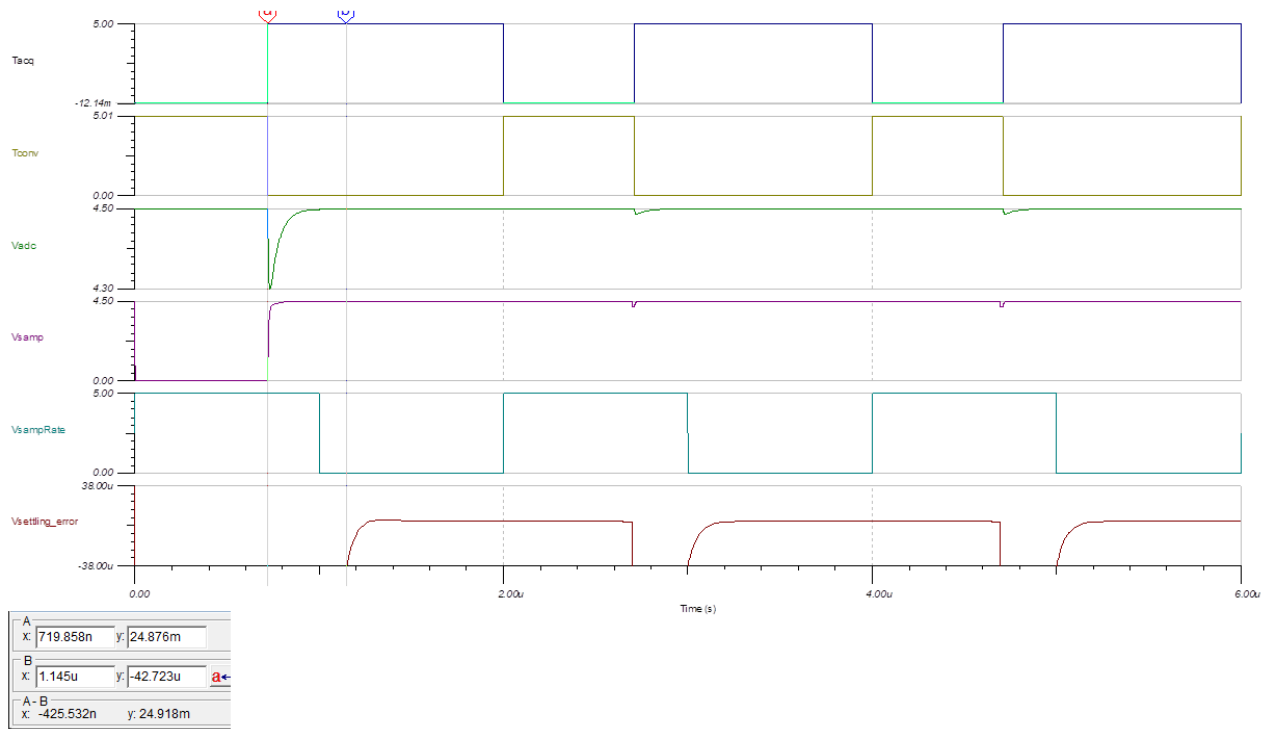


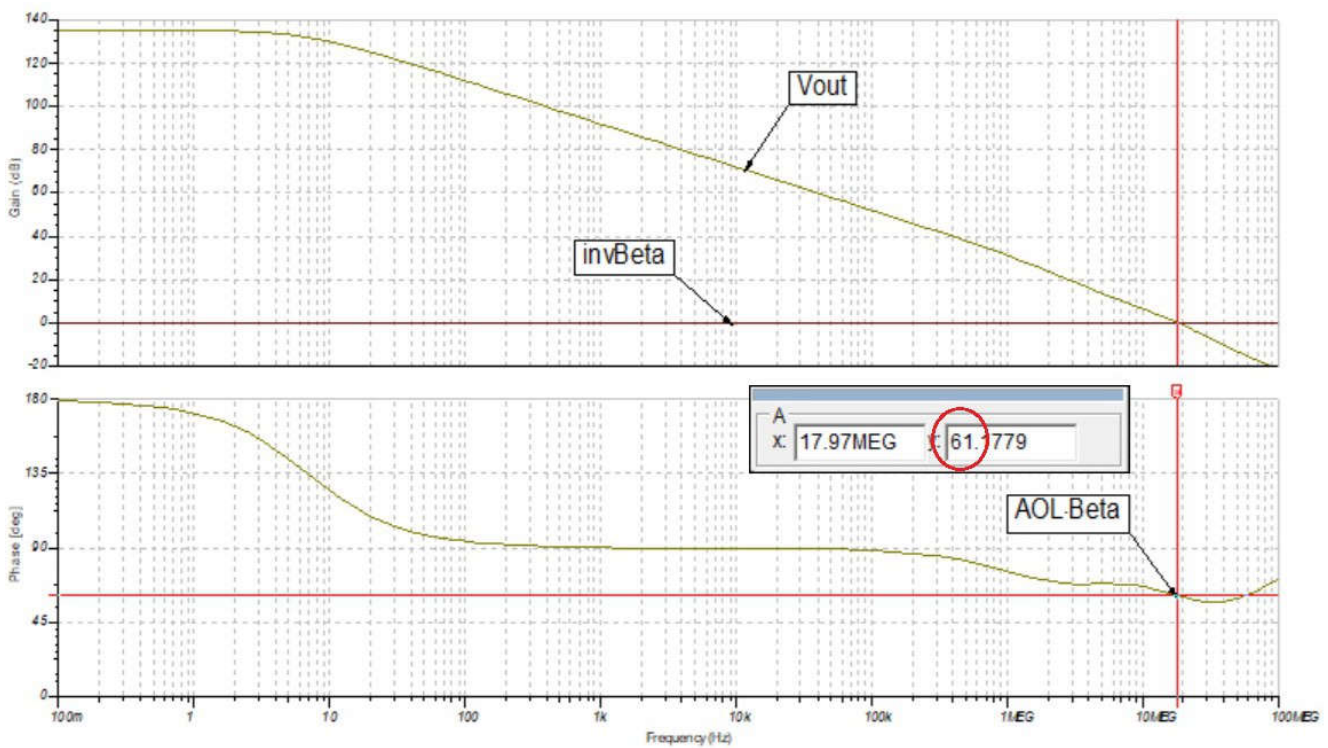
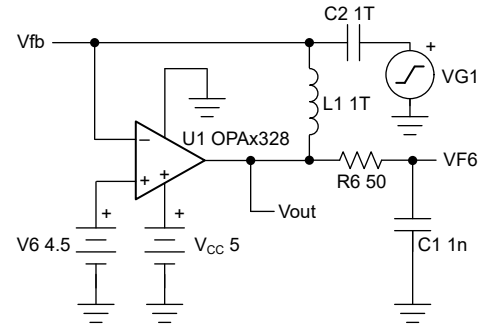
圖 10. OPA328 驅動 ADS8860 時的安定時間

## 穩定性

對電路安定時間和雜訊性能的最佳化不應以犧牲穩定性為代價。本文討論的運算放大器具有低而平坦的開環輸出阻抗，這使得補償變得更加簡單。

**圖 11** 顯示 OPA328 驅動一個 1nF 電容器，回饋迴路外部有一個 50Ω 的隔離電阻器，與驅動 ADS8860 的電阻器相同。相位裕度為 61 度，保證了設計的穩定性，從而實現了可靠的設計。

運算放大器的穩定性至關重要。如果運算放大器不穩定或即將變得不穩定，出現嚴重的振鈴和過衝，那麼其他一切都無關緊要了。



**圖 11.** 高電容負載下的 OPA328 開環增益與相位裕度

## 結論

選擇運算放大器作為 ADC 驅動器首先要考慮具體的應用。可攜式測試測量設備、醫療設備和條碼掃描器都依賴低功耗，而天然氣勘探、位移測量和半導體測試設備則需要更高的解析度，因此需要低雜訊的精確運算放大器。對於給定的 ADC，在選擇運算放大器時沒有萬全之策；實際上，部分方案是針對特定方面進行最佳化，而會犧牲其他方面的。

## 作者簡介

Soufiane Bendaoud，德州儀器精準放大器業務發展經理，擁有超過 25 年的類比訊號鏈專業知識。他撰寫了 60 多篇技術文章、應用說明和論文，同時定期為世界各地的工程師提供技術培訓。

**重要聲明：**本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

TINA-TI™ and e-trim™ are trademarks of Texas Instruments.  
所有商標均為其各自所有者的財產。

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](http://ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025