

複合式放大器： 高精能力度的高輸出驅動

■作者：Jino Loquinario

ADI 線性產品與解決方案部門產品應用工程師

簡介

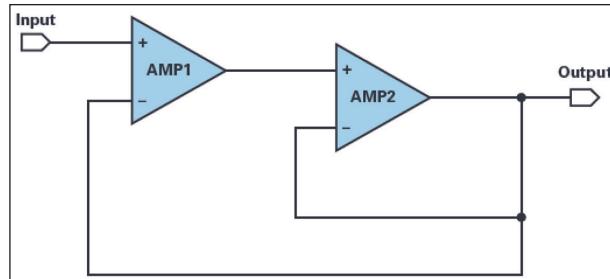
要開發的應用似乎不存在解決方案是很正常的，甚至幾乎是情理之中的。為了滿足應用要求，我們需要想出一種超出市場上現有產品性能的解決方案。例如，應用可能需要具有高速、高電壓、高輸出驅動能力的放大器，同時還可能要求卓越的直流精度、低雜訊、低失真等。

滿足速度和輸出電壓 / 電流要求的放大器以及具有出色直流精度的放大器在市場上很容易獲得，事實上，很多都是如此。但是，所有這些要求可能無法透過單一個放大器得到滿足。當遇到這樣的問題時，有些人會認為我們不可能滿足此類應用的要求，我們必須滿足於平庸的解決方案，如果不是選用精密放大器，那麼就是選用高速放大器，而這可能會在相關要求尚須有所犧牲。幸運的是，這並非全然正確。對此，有一種解決方案是採用複合式放大器，本文將說明它是如何實現的。

複合式放大器

複合式放大器由兩個獨立的放大器組成，其配

圖 1：簡單複合式放大器配置



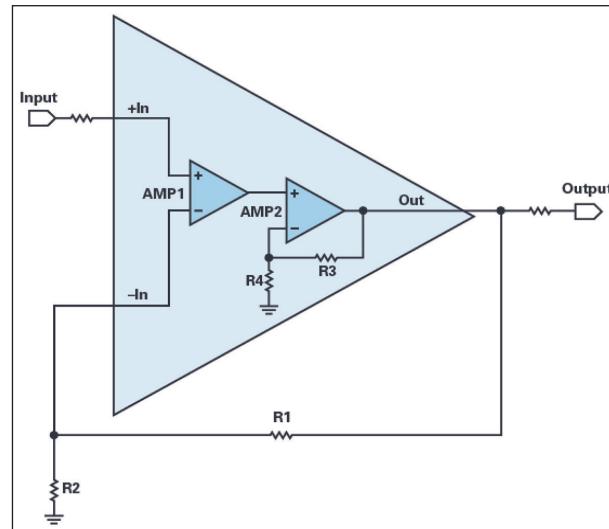
置方式使得人們既能實現每個放大器的優點，又能削弱每個放大器的缺點。

參考圖 1，AMP1 具有應用所需的出色直流精度以及雜訊和失真性能。AMP2 滿足輸出驅動要求。在這種配置中，具有所需輸出規格的放大器 (AMP2) 放置在具有所需輸入規格的放大器 (AMP1) 的回饋迴路中。下面將討論這種配置涉及的一些技術及其益處。

設置增益

初遇複合放大器時，第一個問題可能是如何設置增益。為了解決這個問題，將複合放大器視為包含在大三角形內的單個同相運算放大器是有幫助的，如圖 2 所示。想像大三角形是黑色的，我們無法看清裡面的東西，那麼同相運算放大器的增益就

圖 2：複合放大器被視為單個放大器



是 $1 + R_1/R_2$ 。揭開大三角形內部的複合配置並沒有改變任何東西，整個電路的增益仍然由 R_1 和 R_2 的比率控制。

在這種配置中，人們很容易認為透過 R_3 和 R_4 改變 AMP2 的增益會影響 AMP2 的輸出位準，表明複合增益會發生變化，但事實並非如此。透過 R_3 和 R_4 提高 AMP2 周圍的增益只會降低 AMP1 的有效增益和輸出位準，而複合輸出 (AMP2 輸出) 保持不變。或者，降低 AMP2 周圍的增益將會提高 AMP1 的有效增益。因此，複合放大器的增益一般僅取決於 R_1 和 R_2 。

本文將討論實現複合放大器配置的主要優點和設計考慮因素。並將重點說明其對頻寬、直流精度、雜訊和失真的影響。

頻寬擴展

與配置為相同增益的單個放大器相比，實現複合放大器的主要優點之一是頻寬更寬。

參考圖 3 和圖 4，假設我們有兩個獨立的放

圖 3：單位增益複合放大器

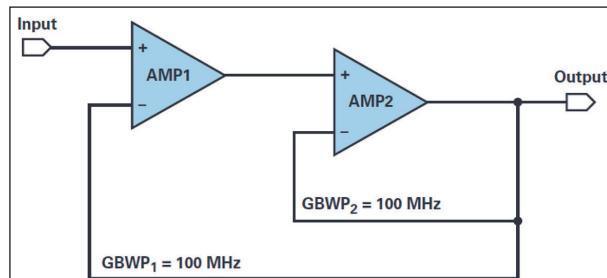
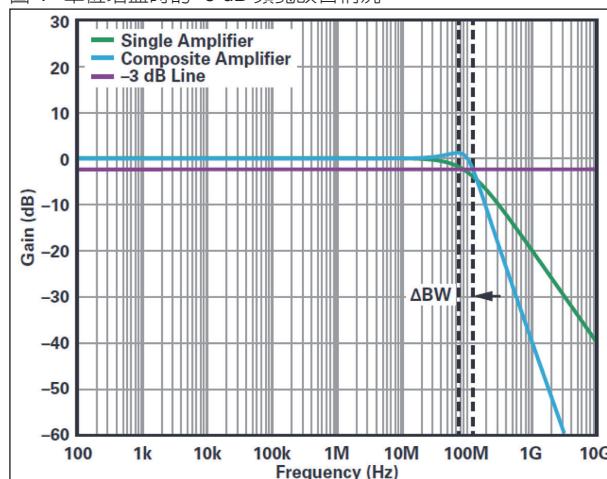


圖 4：單位增益時的 -3 dB 頻寬改善情況



大器，每個放大器的增益頻寬積 (GBWP) 為 100 MHz。將它們組合成一個複合配置，整個組合的有效 GBWP 將會增加。在單位增益時，複合放大器的 -3 dB 頻寬要高出約 27%，儘管有少量峰化。在更高增益下，這種優勢變得越發明顯。

圖 5 顯示了增益為 10 的複合放大器。請注意，複合增益透過 R_1 和 R_2 設定為 10。AMP2 周圍的增益設定為約 3.16，迫使 AMP1 的有效增益與此相同。在兩個放大器之間平均分配增益可以產生最大可能的頻寬。

圖 5：複合放大器的增益配置為 10

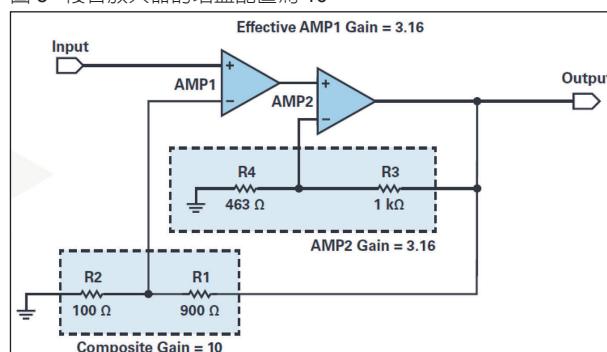


圖 6 比較了增益為 10 的單個放大器的頻率回應與配置為同樣增益的複合放大器的頻率回應。在這種情況下，複合放大器的 -3 dB 頻寬高出約 300%。只是，這怎麼可能？

有關具體示例，請參閱圖 7 和圖 8。我們要求系統增益為 40 dB，使用兩個相同的放大器，每個放大器的開迴增益為 80 dB，GBWP 為 100 MHz。

圖 6：增益為 10 時的 -3 dB 頻寬改善情況

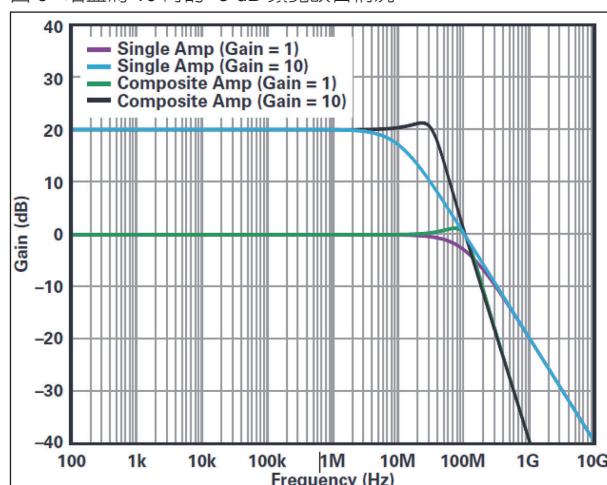


圖 7: 分配增益以獲得最大頻寬

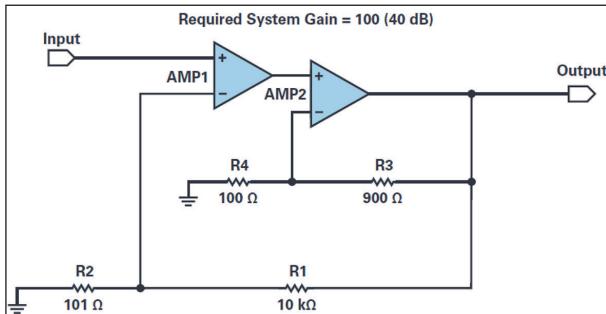
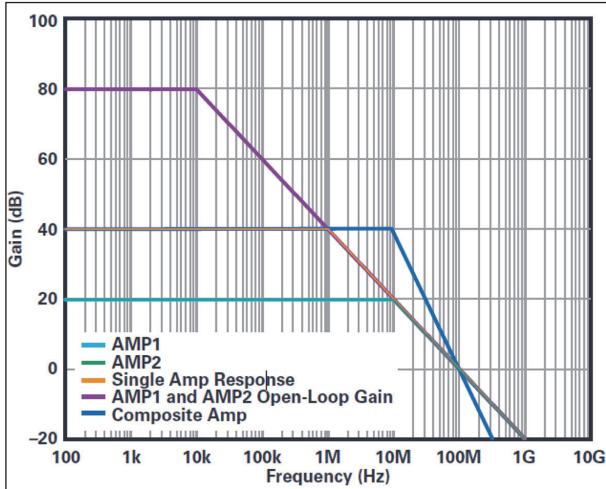


圖 8: 單個放大器的預期回應



為使組合實現最高可能頻寬，我們將在兩個放大器之間平均分配所需的系統增益，每個放大器需提高 20 dB 的增益。因此，將 AMP2 的閉迴增益設定為 20 dB 會迫使 AMP1 的有效閉迴路增益同樣達到 20 dB。採用這種增益配置，兩個放大器在開迴曲線上的工作點均低於任何一個在 40 dB 增益時的工作點。因此，與同樣增益的單個放大器解決方案相比，複合放大器在增益為 40 dB 時將具有更高的頻寬。

雖然看似相對簡單且易於實現，但在設計複合放大器時應採取適當的措施來獲得盡可能高的頻寬，同時不能犧牲組合的穩定性。在實際應用中，放大器具有非理想特性，而且可能不完全相同，這就要求使用適當的增益配置來保持穩定性。另外應注意，複合增益將以 $-40 \text{ dB}/\text{十倍頻率}$ 的速度滾降，因此在兩級之間分配增益時必須小心。

在某些情況下，平均分配增益可能無法做到。就此而言，要在兩個放大器之間均等分配增益，AMP2 的 GBWP 必須始終大於或等於 AMP1 的

GBWP，否則將導致峰化，並且可能導致電路不穩定。在 AMP1 GBWP 必須大於 AMP2 GBWP 的情況下，在兩個放大器之間重新分配增益通常可以校正不穩定性。在這種情況下，降低 AMP2 的增益會導致 AMP1 的有效增益提高。結果是 AMP1 閉迴頻寬降低，因為其在開迴曲線上的工作點提高，而 AMP2 閉迴頻寬提高，因為其在開迴曲線上的工作點降低。如果充分應用 AMP1 的減速和 AMP2 的加速，複合放大器的穩定性就會恢復。

本文選用了 AD8397 來作為輸出級 (AMP2)，與各種精度的放大器 AMP1 連接以展示複合放大器的優勢。AD8397 是一款高輸出電流放大器，可提供 310 mA 電流。

表 1: 同放大器組合的頻寬擴展，增益為 10， $V_{OUT} = 10 \text{ V p-p}$

放大器	單個放大器頻寬 (kHz)	複合放大器頻寬 (kHz)	頻寬擴展 %
ADA4091	30	94	213
AD8676	165	517	213
AD8599	628	2674	325

保持直流精度

在典型運算放大器電路中，輸出的一部分會被回饋到反相輸入。輸出端存在的誤差 (迴路中產生) 乘以回饋因數 (β)，然後予以扣除。這有助於保持輸出相對於輸入乘以閉迴增益 (A) 的保真度。

圖 9: 運算放大器回饋迴路

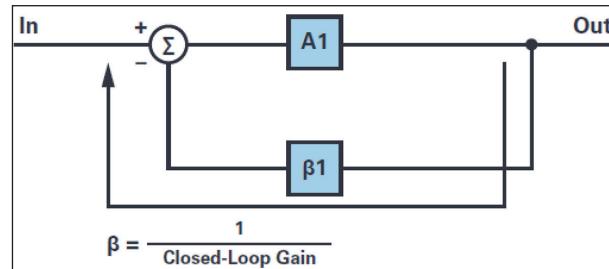


圖 10: 複合放大器回饋迴路

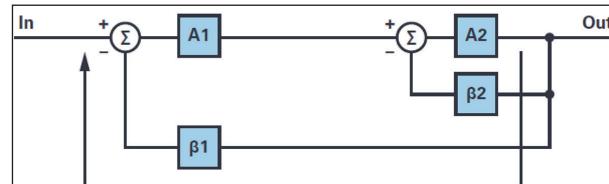


圖 11：失調誤差貢獻

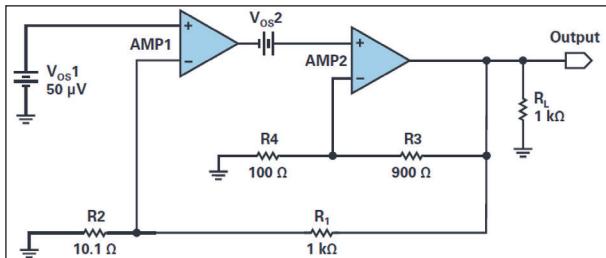
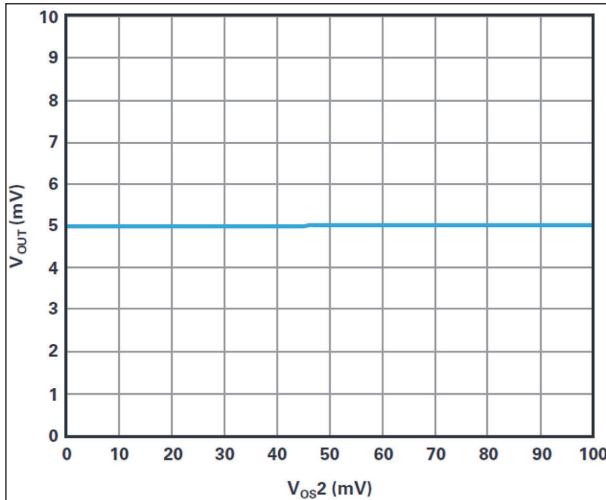


圖 12：複合輸出失調與 VOS2 的關係



對於複合放大器，放大器 A2 有自己的回饋迴路，但 A2 及其回饋迴路都在 A1 的較大回饋迴路內。輸出現在包含 A2 引起的較大誤差，這些誤差被回饋到 A1 並進行校正。較大的校正訊號導致 A1 的精度得以保留。

在圖 11 所示電路和圖 12 所示結果中可以清楚地看到該複合回饋迴路的影響。圖 11 顯示了一個由兩個理想運算放大器組成的複合放大器。複合增益為 100，AMP2 增益設定為 5。VOS1 表示 AMP1 的 $50\mu\text{V}$ 失調電壓，而 VOS2 表示 AMP2 的可變失調電壓。圖 12 顯示，當 VOS2 從 0 mV 掃描到 100 mV 時，輸出失調不受 AMP2 貢獻的誤差（失調）幅度的影響。相反的，輸出失調僅與 AMP1 的誤差 ($50\mu\text{V}$ 乘以複合增益 100) 成比例，並且無論 VOS2 的值是多少，它都保持在 5 mV 。如果沒有複合迴路，我們預計輸出誤差會高達 500 mV 。

雜訊和失真

複合放大器的輸出雜訊和諧波失真以與直流誤

表 2：增益為 100 時的輸出失調電壓

放大器	有效 V_{OS} (mV)	V_{OS} 降幅 (複合配置)
AD8397	100	
AD8397 + ADA4091	3.5	28.6×
AD8397 + AD8676	1.2	83.3×
AD8397 + AD8599	1	100×

圖 13：複合式放大器的雜訊源

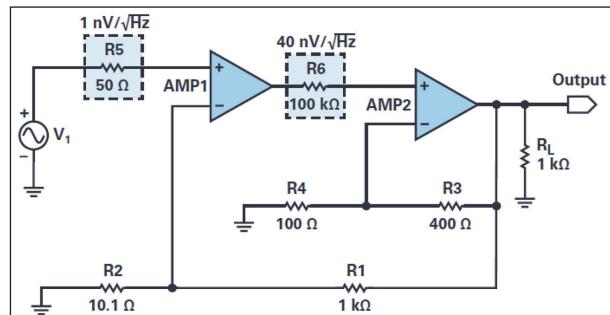
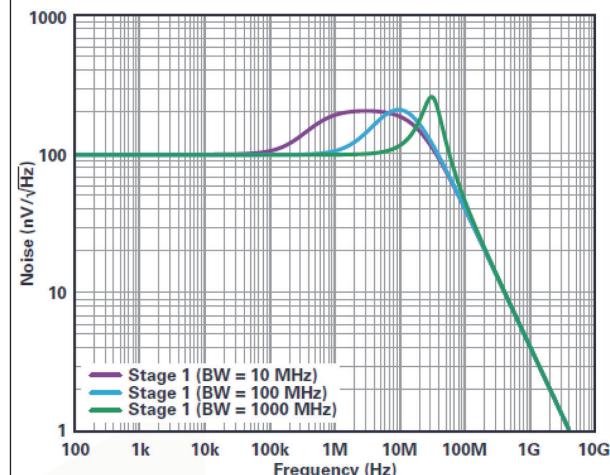
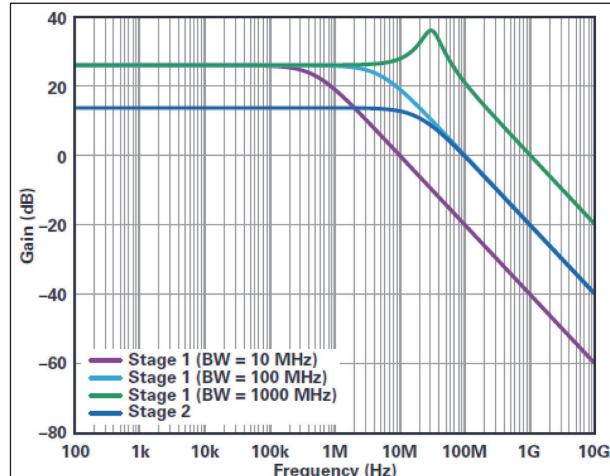


圖 14：雜訊性能與第一級頻寬的關係



差類似的方式進行校正，但對於交流參數，兩級的頻寬也會發揮作用。我們將舉一個例子，使用輸出雜訊來說明這一點；同時應理解，失真消除方式大致相同。

參考圖 13 所示電路，只要第一級 (AMP1) 擁有足夠的頻寬，它就會校正第二級 (AMP2) 的較大雜訊。當 AMP1 的頻寬開始耗盡時，來自 AMP2 的雜訊將開始占主導地位。但是，如果 AMP1 頻寬過多，並且頻率回應中存在峰化，那麼在相同頻率處將產生雜訊峰值。

對於此例，圖 13 中的電阻 R5 和 R6 分別代表 AMP1 和 AMP2 的固有雜訊源。圖 14 的上部曲線顯示了各種 AMP1 頻寬的頻率回應以及單一固定頻寬的 AMP2 的頻率回應。回憶增益分配部分，若複合增益為 100 (40 dB)，AMP2 增益為 5(14 dB)，則 AMP1 的有效增益將為 20 (26 dB)，如此處所示。

下部曲線顯示了每種情況的寬頻輸出雜訊密度。在低頻時，輸出雜訊密度以 AMP1 為主 ($1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 乘以 100 的複合增益等於 $100 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)。只要 AMP1 有足夠的頻寬來補償 AMP2，這種情況就會持續下去。

若 AMP1 頻寬小於 AMP2 頻寬，當 AMP1 頻寬開始滾降時，雜訊密度將開始由 AMP2 主導。這

表 3: 使用不同前端放大器的降噪情況，有效增益 =100, f=1 kHz

配置	雜訊， en(nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	有效雜訊降幅 (%)
僅 AD8397	450	
AD8397 + ADA4084	390	13.33
AD8397 + AD8676	280	37.78
AD8397 + AD8599	107	76.22

表 4: 使用不同前端放大器的 THD+n 比較，有效增益 =10, f=1 kHz, ILOAD=200 mA

配置	有效 THD+n (dB)	THD+n 改善幅度 (dB)
僅 AD8397	-100.22	
AD8397 + ADA4084	-105.32	5.10
AD8397 + AD8676	-106.68	6.46
AD8397 + AD8599	-106.21	5.99

可以在圖 14 的兩條跡線中看到，雜訊上升至 $200 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 乘以 AMP2 的增益 5)。最後，若 AMP1 具有比 AMP2 大得多的頻寬，導致頻率回應出現峰化，則複合放大器將在相同頻率處呈現雜訊峰值，如圖 14 所示。由於頻率響應峰化引起過大增益，雜訊峰值的幅度也會更高。

表 3 和表 4 分別顯示了使用不同精密放大器作為第一級與 AD8397 形成複合放大器時的有效雜訊降低情況和 THD+n 改善情況。

系統級應用

在此示例中，DAC 輸出緩衝器應用的目標是為低阻抗探針提供 10 V p-p 的輸出，電流為 500 mA p-p ，要求低雜訊、低失真、出色的直流精度以及盡可能高的頻寬。DAC 輸出的 4 mA 至 20 mA 電流將透過 TIA 轉換為電壓，然後轉換為複合放大器的輸入以進一步放大。輸出端的 AD8397 可滿足輸出要求。AD8397 是一款軌對軌、高輸出電流放大器，能夠提供所需的輸出電流。

圖 15:DAC 輸出驅動器的應用電路

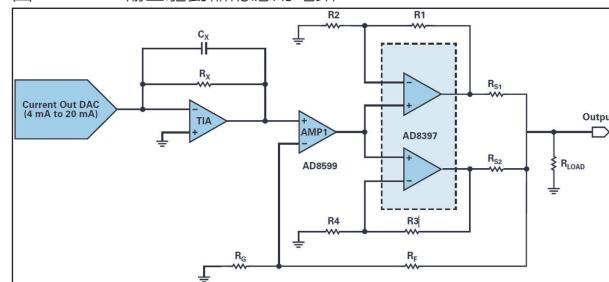
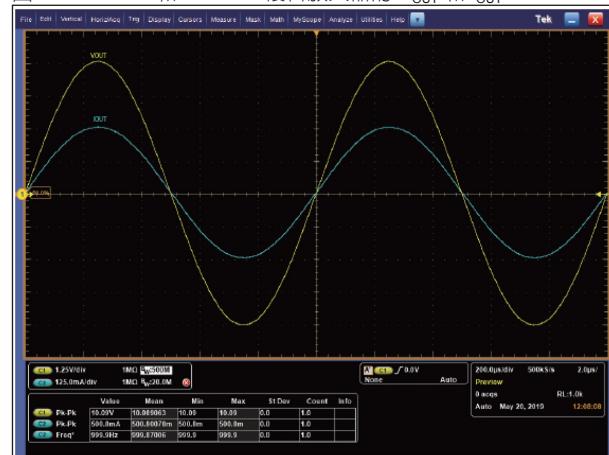


圖 16:AD8599 和 AD8397 複合放大器的 V_{OUT} 和 I_{OUT}



AMP1 可以是任何具有配置所需直流精度的精密放大器。在此應用中，各種前端精密放大器都能與 AD8397(以及其他高輸出電流放大器)配合使用，以實現應用所需的卓越直流精度和高輸出驅動能力。

參數	值
增益	10 V/V
-3 dB 頻寬	1.27 MHz
輸出電壓	10 V p-p
輸出電流	500 mA p-p
輸出失調電壓	102.5 μ V
電壓雜訊 ($f = 1$ kHz)	20.95 nV/ \sqrt{Hz}
THD+n ($f = 1$ kHz)	-106.14 dB

表 6: 具有高輸出電流驅動能力的放大器

高輸出電流放大器	電流驅動 (A)	斜率	V_s 範圍，最大值 (V)
ADA4870	1	2.5 kV/ μ s	40
LT6301	1.2	600 V/ μ s	27
LT1210	2	900 V/ μ s	36

表 7: 精密前端放大器

精密放大器	$V_{OS}(\mu$ V)	V_{NOISE} , $en(nV/\sqrt{Hz})$	THD+n, 1 kHz (dB)
LT6018	50	1.2	-115
ADA4625	80	3.3	-110
ADA4084	100	3.9	-90

ADI 收購 Test Motors 以擴展用於工業 4.0 之狀態監測產品

Analog Devices, Inc. (ADI) 宣佈收購 Test Motors，其為一家專門從事電機和發電機預測性維護之公司，總部位於西班牙巴賽隆納。該公司所提供的產品和服務可提前檢測出電機故障以避免影響生產進程，並會根據如何、及何時進行維護提供建議。此次收購擴展了 ADI 狀態監測解決方案組合，協助於停機和災難性故障發生前識別設備故障。

此次收購是 ADI 繼 2018 年成功收購 OtoSense 後於工業領域的又一舉措。OtoSense 為一新創企業，所開發之學習和識別聲音或振動的“感測解譯”軟體能在問題惡化前確定工廠機器或汽車引擎中的潛在問題。OtoSense 的人工智能 (AI) 平台專用於感測解譯，並支援對任何資產的監控而不受位置限制。ADI 計畫將 OtoSense 的軟體與 Test Motors 的監控功能相結合以創建解決方案，透過掌握更廣泛的潛在故障為機器提供更先進、全面的健康狀態監測。

ADI 自動化和能源事業部副總裁 Kevin Carlin 表示：「機器維護在很大程度上依賴於經驗豐富的技術人員和工程師，他們能夠檢測和診斷可能導致意外停機的問題。但是，隨著需要維護的機器數量快速成長，受過訓練的專業人員開始供不應求。透過收購 Test Motors 和 OtoSense，ADI 的狀態監測方案能為客戶提供具備完整早期異常檢測功能的系統，進而解決此專業資源短缺的難題，避免意外且代價高昂的機器停機。」

Test Motors 團隊將加入 ADI 的自動化和能源事業部，並作為關鍵技術小組工作。所收購的財務條款並未披露。

此配置不限於 AD8397 和 AD8599，其他放大器組合也是可行的，只要滿足輸出驅動要求並提供卓越的直流精度即可。表 6 和表 7 中的放大器也適合此應用。

結論

將兩個放大器結合成複合式放大器可實現每個放大器的最佳規格，同時並可以彌補各自的局限性。具有高輸出驅動能力的放大器與精密前端放大器相結合，可為非常棘手的應用提供解決方案。設計時務必考慮穩定性、雜訊峰化、頻寬和斜率，以獲得最佳性能。

有許多可能的方案來滿足各種應用需求。正確的實施和組合可以實現應用的恰當平衡。

致謝

針對 Zoltan Frasch 和 Bruce Petipas 為本文提供的技術貢獻，作者對此表示感謝。