

# 比較離散式與整合式差動放大器

您可以使用運算放大器 (op amp) 與電阻器網路組成的眾多實用電路之一，就是差動放大器 (DA)。差動放大器可以用於測量兩個訊號之間的差值，這在太陽能板、行動電源及其他直流對直流模組等系統中，對於電流與電壓的感測非常有用。此外，許多差動放大器還能提供增益、將參考電壓加入訊號中，並降低輸入端共模雜訊的影響。

差動放大器主要有兩大類型：離散式（使用外部電阻器）與整合式（使用單晶片或晶粒內建電阻器）。本文中，我們將使用實測資料（包括偏移電壓、共模抑制比 [CMRR]、增益誤差以及溫度變化下的增益誤差漂移），來比較離散式與整合式差動放大器。

## 增益誤差

如圖 1 所示，典型的差動放大器由一個運算放大器與四個電阻器組成。梯形電阻器 R1/R2 的中點連接到運算放大器的反向終端，而 R3/R4 的中點則連接到非反向終端。

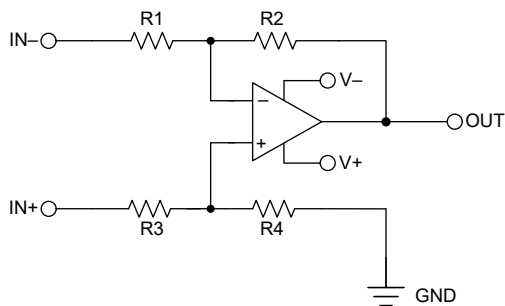


圖 1. 典型 DA

方程式 1 描述了典型差動放大器的傳遞函數。請注意，R2 與 R1 的比值（假設 R1 = R3 且 R2 = R4）決定了增益。若您希望達到低增益誤差，就必須使用匹配的電阻器。公差為 ±1% 的電阻器可能會導致高達 2% 的增益誤差。雖然離散式電阻器可能會呈現較大的變異，但整合式差動放大器中採用的單晶片電阻器通常經過微調處理，能夠將增益誤差控制在僅 0.01% 的水準。

$$V_{OUT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \times \left(\frac{R2}{R1}\right) + V_{REF} \quad (1)$$

## 增益誤差漂移

增益漂移也是一項重要的參數，特別是在太陽能板、馬達驅動器及電池組等系統中，這些系統的溫度可能會在一天之中或運作期間產生波動。由於 TI 的 INA600 差動放大器中的薄膜電阻器皆位於同一封裝內，並彼此交錯排列，因此這四個電阻器都會均勻地感受到任何溫度波動，使得它們同步產生漂移，同時保持相同的增益比。若採用外接電阻器的離散式實作方案，您的差動放大器在增益漂移性能上可能會出現較大的變異，這是因為溫度所造成的熱應力會在電路板表面形成溫度梯度，進而導致施加於輸入訊號上的增益產生變化。

## 偏移電壓

對輸入訊號施加增益時，偏移電壓的大小會顯著影響輸出訊號中所產生的誤差量。因此，我們建議在進行任何電壓或電流感測時，選擇具有優異偏移電壓特性的運算放大器。在建構離散式差動放大器時，您可以靈活選擇任一可用的運算放大器作為設計核心；然而，整合式差動放大器的偏移電壓則是固定的，並且取決於其內部所使用的運算放大器。不過，若採用諸如 e-Trim™ 運算放大器技術等電阻器微調技術，仍有可能降低整合式差動放大器中的偏移電壓。

## CMRR

在電壓和電流感測應用中，抑制共模訊號的能力是評估差動放大器時的一個主要考量因素。與增益誤差類似，CMRR 也取決於所使用元件（例如電阻器）之間的匹配程度。雖然典型的運算放大器可能具有高達 100dB 的 CMRR，但若使用失配的電阻器，則可能使 CMRR 降低至 60dB，從而導致其不適合用於嘈雜環境中的工業系統。典型整合式差動放大器的 CMRR 一般至少可達 90dB，但最高可達 130dB。

## 支援超供應軌電壓監測的增益配置

差動放大器通常設定為單一增益配置（即增益 = 1），但其增益值亦可在 0.5 至 2 之間變化。透過改變差動放大器中電阻器網路的阻值，可以實現多種不同的增益比，以因

應各種應用需求。某些應用可能需要較大的衰減，以便將電壓縮放至 ADC 輸入範圍（3.3V 或 5V）。如圖 2 所示，改變電阻器網路的阻值可實現更大的衰減。

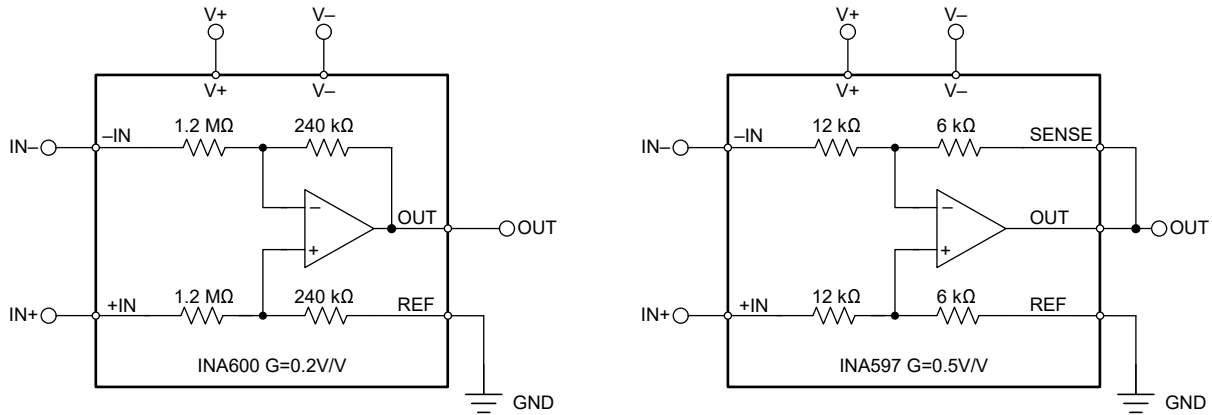


圖 2. INA600A DA 與 INA597 DA 的對比

差動放大器有一個常被忽略的優點，那就是它們能讓輸入訊號超出供應軌。由於梯形電阻器會將差動放大器的輸入電壓進行分壓，因此整合式放大器的輸入端只會看到經過衰減後的電壓。對於標準運算放大器而言，其供電電壓會限制共模電壓範圍。差動放大器的這種靈活性使其非常適

合在可用供電軌有限的情況下用來監測較高的電壓。如圖 3 所示，輸入電壓範圍可超出差動放大器的建議供電電壓範圍。

### 6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage $V_S = (V+) - (V-)$	Single-supply	2.7	40	V
	Dual-supply	±1.35	±20	
Input voltage range	Single-supply / Dual-supply	(V-) - 40	(V+) + 85	V
$C_{BYP}$	Bypass capacitor on the power supply pins (1)	0.1		μF
Specified temperature	Specified temperature	-40	125	°C

圖 3. INA600 差動放大器的建議操作條件

在高功率密度系統中，由於印刷電路板走線所引起的切換頻率升高與寄生電感增加，可能會產生額外的電壓干擾，進而影響電壓監測的準確性，因為共模雜訊無法完全消除。雖然使用具有高 CMRR 的整合式差動放大器可以消除輸入端之間觀察到的任何共模雜訊，但在離散式差動放大器中，由於外部電阻器之間存在微小失配（特別是在較高增益比的情況下），要利用外部電阻實現高 CMRR 就會變得困難。

方程式 2 闡明了寄生電感和切換頻率如何影響訊號中的電壓干擾程度：

$$V = L \times \frac{di}{dt} \tag{2}$$

圖 4 說明了整合式差動放大器的 CMRR 性能隨頻率變化。

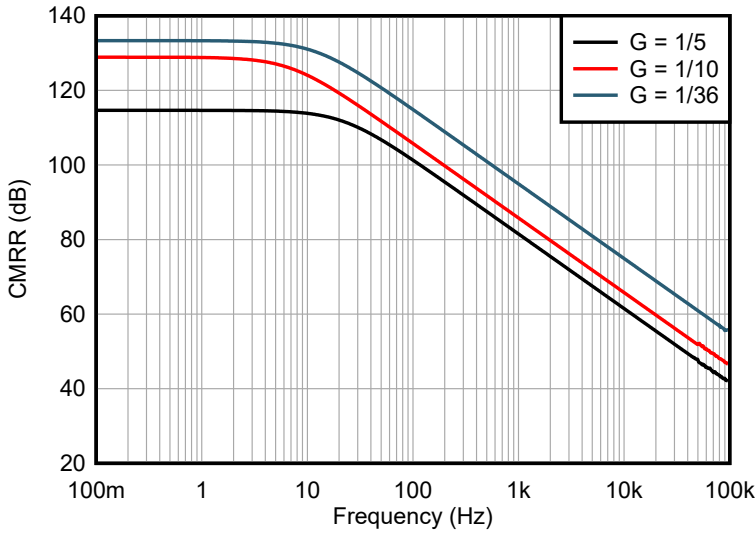


圖 4. INA600 差動放大器的輸出端參考 CMRR 隨頻率變化曲線

### 測試設定與比較

我們以 CMRR 與偏移電壓誤差作為指標，用以評估各電路在不同溫度下的相對表現。針對每個裝置，我們將一個精密源測量單元連接至差動放大器的兩個輸入接腳，並使用一支經校正的 8.5 位元數位萬用表來測量偏移電壓的變化。我們將所有測試重複執行五次，取平均掃描，以取得更精準的裝置性能表現，並將裝置設定為對共模電壓進行從 -35V 至 35V 的掃描，同時採用 ±18V 的分離式供電組態。我們使用烘箱執行過熱測試，並設定足夠的恆溫時間，以確保測試板上的溫度均勻一致。

在將差動電壓施加於裝置輸入端，同時將共模電壓維持在中間供電電壓的條件下，可同時測試增益誤差與增益誤差漂移。將每個裝置依其對應的輸入範圍進行掃描，可使輸出電壓範圍落在 -10V 至 +10V 之間，藉此將實際的斜率與理想斜率進行比較，進而評估增益誤差的百分比。

表 1 比較了離散式差動放大器與兩款 TI 整合式差動放大器在不同操作溫度下的 CMRR 與偏移電壓表現。

溫度 (°C)	離散式差動放大器		INA600		INA597	
	CMRR (dB)	偏移 (µV)	CMRR (dB)	偏移 (µV)	CMRR (dB)	偏移 (µV)
125	73.06	-237.88	98.33	801.82	102.66	-26.12
85	71.89	-285.95	100.12	661.56	103.70	-10.22
25	70.35	-221.42	101.63	582.19	100.33	-3.24
-40	73.26	-206.95	106.82	500.60	105.97	13.4

表 1. CMRR 與偏移電壓比較

表 2 比較了相同的離散式差動放大器與整合式差動放大器在不同操作溫度下的增益誤差與漂移表現。

溫度 (°C)	離散式差動放大器		INA600		INA597	
	增益誤差 (%)	GE 漂移 (ppm/°C)	增益誤差 (%)	GE 漂移 (ppm/°C)	增益誤差 (%)	GE 漂移 (ppm/°C)
125	0.14806	17.12823	-0.0015	-0.08134	-0.0093	-0.20993
85	0.07448		-0.0011		-0.0085	
25	-0.03470		-0.0005		-0.0072	
-40	-0.13460		-0.0001		-0.0058	

表 2. 增益誤差和漂移比較

如同預期，與離散式差動放大器相比，整合式差動放大器在實現高 CMRR、低增益誤差和低增益誤差漂移方面表現卓越。雖然離散式差動放大器的偏移電壓表現優於其中一款整合式差動放大器，但此差異可透過軟體校正來加以補償。

圖 5 顯示了三種差動放大器版本的簡化佈局，並比較了各方案的尺寸。為了便於比較，我們採用了最小尺寸的裝置封裝，並搭配使用 0402 封裝的電阻器與電容器。

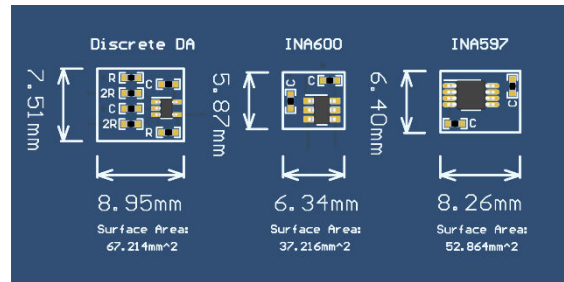


圖 5. 尺寸比較

### 結論

雖然實現電壓感測的方法有很多種，但整合式差動放大器能提供卓越的性能優勢，這是離散式實作方案所無法達到的。對於 TI 的 INA600 這類整合式差動放大器而言，運算放大器供電電壓所帶來的輸入電壓限制不再是問題；而高衰減比則能在監測超出供應軌的電壓時提供靈活性。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 Texas Instruments Incorporated



NEST191A

## 重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

## 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