

一個簡單的三角形符號 代表著什麼？

■作者：Harry Holt / ADI 核心應用部門資深應用工程師
Michael Skroch / ADI 應用工程師

符號，是有助於、還是妨礙我們的思考設計？
符號很重要，但如果一個符號可以表示多種東西呢？

正如我們將看到的，這可能會造成問題。在類比世界中，三角形可以表示運算放大器、比較器或儀錶放大器。您可以使用其中之一實現另一個的功能，但系統性能將不是最佳的。本文將討論其區別以及需要注意的地方，以便我們設計的時候能繞開麻煩。我們將看到，在某些情況下，您根本不想嘗試使用錯誤類型的元件進行設計。

查看圖 1，哪個三角形表示運算放大器？哪個三角形表示比較器？哪個三角形表示儀錶放大器？
答案：

它們都是！

那麼，它們有何區別，我們為什麼要關注？從圖 1：運算放大器、儀錶放大器和比較器。

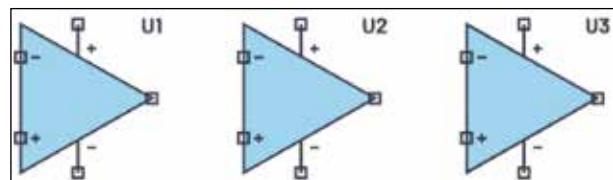


表 1：運算放大器、比較器和儀錶放大器的比較

	運算放大器	比較器	儀錶放大器
回饋	負	無 / 正	內部
開迴路增益	5k 至 1000 萬	3k 至 50k	固定在 0.2 至 10k
閉迴路增益	通常 <10,000		固定在 0.2 至 10k
輸入電容	無	可能有	良好
輸出	類比 / 線性	數位	類比 / 線性
重要規格	V_{os} , GBW/PM	傳輸延遲	CMRR
編程	R 或 C	無	R、SPI、跳線

表 1 可知，某些特性有很大差別，但它們對電路和系統代表什麼？

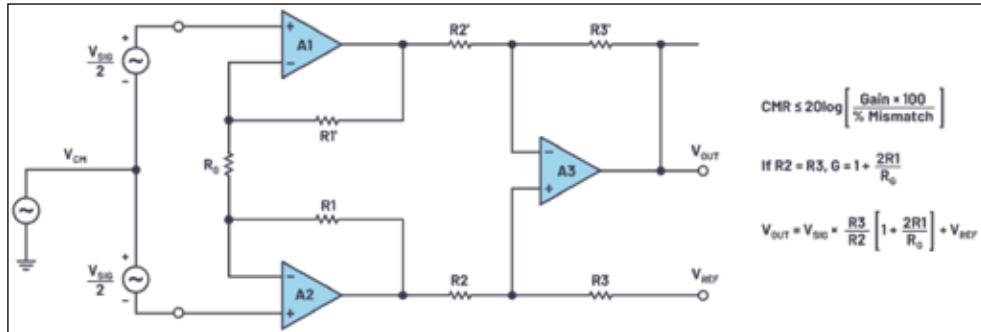
我們來看看大家是如何陷入困境的……

回饋

運算放大器具有巨大的增益。學校老師教導我們，開始分析時，兩個輸入之差等於零。但在現實生活中，這是不可能的。如果開迴路增益為一百萬，那麼要在輸出上獲得 5 V，輸入上須有 5 μ V。為使電路可用，我們需要施加回饋，當輸出要變得過高時，控制訊號會回饋到輸入，抵消原始激勵——例如負反饋。當用於比較器時，如果沒有回饋，輸出將直接沖到一個軌或另一個軌。如果是正回饋，輸出將在同一方向上被驅動到更遠。因此，運算放大器需要負反饋。實際上，當某些運算放大器用於無回饋的比較器時，電源電流可能比產品手冊上的最大值高 5 至 10 倍¹。

但是，對於比較器來說，正回饋才是我們需要的。在沒有回饋的情況下，如果比較器的一個輸入緩慢超過另一輸入的位準，輸出將開始緩慢變化。如果系統中存在雜訊，例如接地反彈，輸出可能會反轉，這在控制系統中當然是不希望發生的。但隨後它開始回頭，產生振盪行為，有時稱之為震顫（參見 MT-083² 中的圖 5）。Reza Moghimi 的文章「透過遲滯根除比較器的不穩定性」充分介紹了增加正回饋（也稱為遲滯）的好處³。

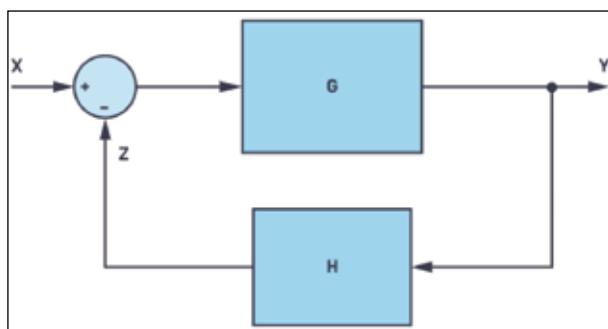
圖 2: 經典三運放儀錶放大器



對於儀錶放大器，回饋已在內部，增加回饋只會產生不精準的增益。圖 2 顯示了一種利用運算放大器建構儀錶放大器的典型方法。

注意：每個運算放大器都有回饋。我們從使用標準負反饋圖（見圖 3）開始，儀錶放大器為 G ，期望增益為 10，這表示回饋係數為 0.1。接下來，選擇儀錶放大器固定增益為 100。使用式 1，實際的閉迴路增益將為 9.09，幾乎有 10% 的誤差。因此，將儀錶放大器用於運算放大器並為其增加回饋是沒有意義的。

圖 3: 經典回饋原理圖



$$A_{CL} = \frac{1}{\beta} \times \frac{1}{1 + 1/A_{VOL} \times \beta} \quad (1)$$

運算放大器需要負反饋；比較器需要正回饋；儀錶放大器不需要任何回饋。

開迴路和閉迴路增益

對於運算放大器，參見式 1，開迴路增益 (A_{VOL}) 越高，閉迴路增益將越精準。大多數運算放大器的開迴路增益在 100,000 至 1000 萬之間，但某些較早的高速運算放大器可能低至 3000。如前所述，開

迴路增益越高，閉迴路增益誤差越小。

對於比較器，如果輸出的邏輯擺幅為 3 V，並且您需要 1 mV 閾值，則最小增益須為 3000。較高的增益將使不確定性視窗變小，但如果增益過高，微伏級的雜訊

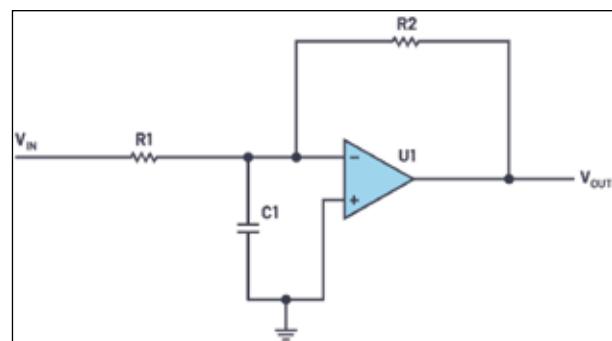
就會觸發比較器。

對於儀錶放大器，開迴路增益的概念並不適用。

輸入電容

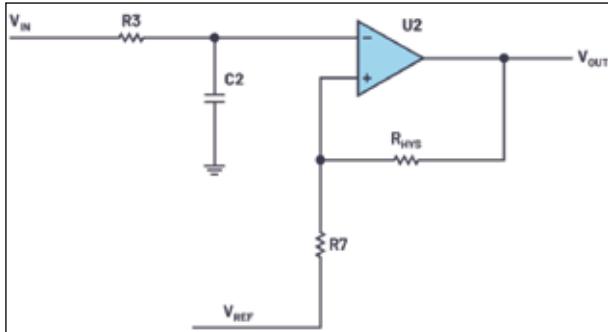
電路中常常會增加電容以限制頻寬。檢查圖 4，乍看之下 R_1 和 C_1 似乎構成了一個低通濾波器。這行不通，可能導致振盪。反相放大器的回饋係數為 R_2/R_1 ，但在圖 4 中，回饋係數為 $R_2/(R_1 // C_1)$ 。隨著頻率提高，回饋係數也會提高，因此雜訊增益以 +20 dB/10 倍頻率的速率上升，而運算放大器開迴路增益以 -20 dB/10 倍頻率的速率下降。它們在 40 dB 處交叉，根據控制系統理論，這肯定會產生振盪。限制電路頻寬的正確方法是在 R_2 兩端放置電容。

圖 4: 嘗試減少運算放大器頻寬



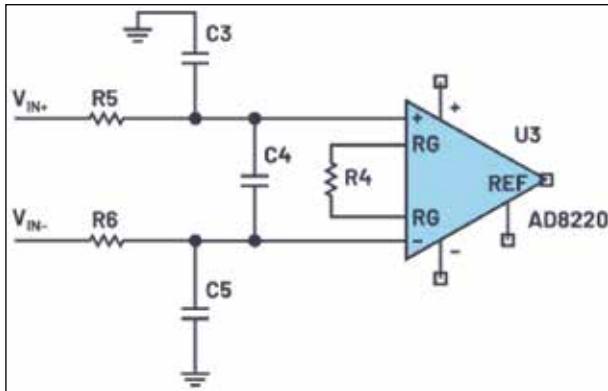
比較器通常沒有負反饋網路，因此圖 5 中比較器前面的簡單 R 和 C 構成的低通濾波器效果很好。 R_{HYS} 應比 R_7 大得多，兩者分割輸出擺幅以提供少量的正回饋（遲滯）。如果比較器有內建遲滯，例如 LTC6752 或 ADCMP391，則不使用 R_7 和 R_{HYS} 。

圖 5: 具有 LPF 和遲滯的比較器



對於儀錶放大器，輸入端放置電容是完全可以接受的，如圖 6 中的 C4 所示。ADI 儀器儀錶指南⁴第 5 章中的圖形顯示了每次使用儀錶放大器時都要做的一件好事情。如果用適當的佈線和焊墊對印刷電路板進行佈局，以允許增加兩個電阻和三個電容，那麼便可以從 0Ω 電阻和無電容開始，測量系統性能。透過調整五個元件的值，可以單獨設定共模滾降和正常模式滾降（詳情參見指南）。

圖 6: RFI 濾波器前置於儀錶放大器



輸出

運算放大器或儀錶放大器的輸出會從接近一個軌擺動到另一個軌。根據輸出級是使用共射極還是共源極配置，輸出可能達到任一供電軌的 25 mV 至 200 mV 範圍內。這被視為軌對軌輸出。如果運算放大器由 $+15\text{ V}$ 和 -15 V 供電，則不便於與數位電路介面。一種最差的解決方案是在輸出端放置二極體箝位，以保護數位輸入免受損壞。但取而代之的是，運算放大器因電流過高而損壞。運算放大器與數位邏輯介面有更複雜的方法，但何必那麼麻煩？只需

使用比較器即可。

比較器可以有 CMOS 圖騰柱輸出，或者有 NPN 或 NMOS 開集或開漏輸出。雖然開集或開漏輸出需要一個上拉電阻，導致上升和下降時間不等，但它有如下優點：比較器採用一個電壓（如 5 V ）供電，並在其他電壓（如 3.3 V ）下與邏輯介面。

重要規格

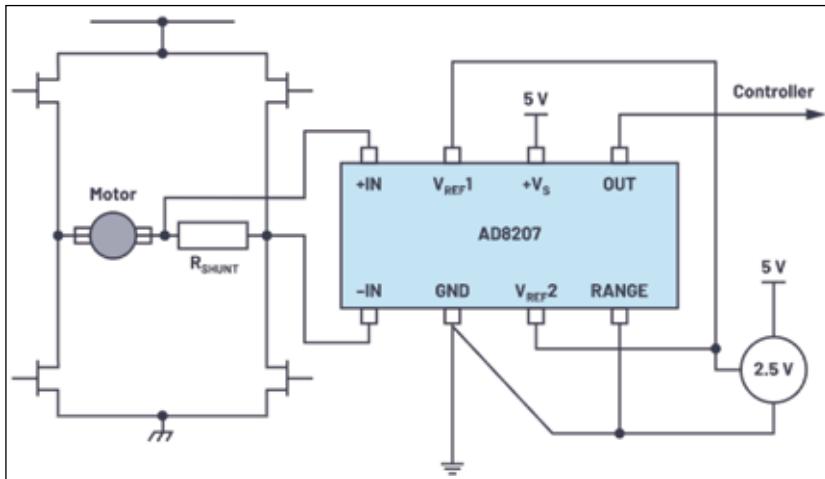
運算放大器需要一個高於最高訊號頻率的增益頻寬，以使閉迴路誤差保持較低水準。根據公式 1，我們知道增益頻寬應為最高訊號頻率的 10 至 100 倍。如前所述，從式 1 中可以看出， A_{vol} 是頻率的函數，會影響閉迴路精度。相位餘裕也很重要，它會隨容性負載而變化，因此規格表應清楚說明測試條件。為了確保直流精度，失調電壓應較低。對於經過調整的雙極性運算放大器， $25\text{ }\mu\text{V}$ 至 $100\text{ }\mu\text{V}$ 比較好；對於 FET 輸入運算放大器， $200\text{ }\mu\text{V}$ 至 $500\text{ }\mu\text{V}$ 比較好。自穩零 / 斬波 / 零漂移運算放大器幾乎總是低於 $20\text{ }\mu\text{V}$ （最大值），這是就整個溫度範圍而言的。請查閱相關典型運算放大器的產品手冊，如 OP27、AD8610 或 ADA4522。

傳輸延遲是比較器的關鍵規格。運算放大器在過驅時會變慢，比較器與之不同，當過驅時會變快。規格表有時會提供少量過驅（例如 5 mV ）下的傳輸延遲，以及 50 mV 甚至 100 mV 的較大過驅下的不同傳輸延遲。

儀錶放大器重要的指標是共模抑制比（CMRR），因為應用需要提取一個位於大共模電壓之上的非常小的差模訊號。如同許多規格，此規格隨頻率而變化，有時還會列出直流 CMRR 或非常低頻率下的 CMRR。通常會提供 CMRR 與頻率的關係圖。例如，當檢測 H 橋電機驅動器中的電流時，此圖將非常重要，如圖 7 所示。

這可能是儀錶放大器最困難的應用，因為共模電壓從一個軌附近變到接近另一個軌，並且電流迅速反向。增益頻寬和壓擺率都很重要。

圖 7: 具有高共模擺幅的雙向電流檢測



編程

這裡的編程並不代表編寫代碼，它是指配置元件以滿足系統要求（儘管某些儀錶放大器確實有透過 SPI 埠和暫存器進行傳統軟體編程的功能）。

運算放大器需配置為負反饋。這可以是純阻性元件，但通常將電阻與電容並聯使用以限制頻寬。這樣有助於提高訊號雜訊，因為雜訊會在整個範圍內積分，哪怕我們僅使用其中一部分。只使用電容也是可行的，如此可獲得一個積分器或微分器。

比較器應始終有一點正回饋，以確保一旦輸入迫使輸出移動，輸出就會強化移動（參見圖 4 和圖 5）。圖片和計算參見 MT-083。一些比較器具有內部遲滯，但如果需要，通常可以增加更多遲滯。一些具有內部遲滯的比較器有一個接腳用來增加一個電阻，以改變其遲滯量。

運算放大器可以做為比較器，但這並不理想，有一些事項要注意。您必須是一個很好的類比設計人員才能做到這一點。MT-083 介紹了一些注意事項，討論其利弊的相關文章有很多。如果您不懼風險，可以查閱參考資料。

比較器幾乎總是用電阻進行編程。您可以增加一個高阻值電阻來提供一點正回饋，也可以使用一個電容來提供交流回饋以避免增加直流遲滯。一些比較器具有內建遲滯，但這同樣可以透過增加少量正回饋來提高。

最後注意事項

嘗試將運算放大器用作比較器時，會有微妙的事情發生。有不少低雜訊雙極性運算放大器的輸入之間具有反並聯二極體。大多數比較器的輸入共模範圍占總範圍的 80% 或更多。但是，某些低雜訊雙極性運算放大器的輸入之間有一個或兩個串聯二極體。這是為了防止輸入級與發射極基極結之一形成齊納效應，導致雜訊性能隨時間推移而降低。

在一個 3.3 V 系統中，如果將 5 V 運算放大器用於比較器，電源良好指示器的閾值位準為 3 V，那麼將會出現一個輸入為 3 V 而另一個輸入為 0 V 的問題，因為這些二極體限制了運算放大器輸入端允許的最大差分電壓。

總結

對於許多應用而言，運算放大器的選擇取決於用戶是注重直流精度、交流精度、輸入失調電壓、增益頻寬或是電源電壓。直到 2020 年，有超過 700 款元件可供選擇。比較器的關鍵參數通常是傳輸延遲和電源電壓。選擇上更為簡易，共有 122 款元件可供選擇。儀錶放大器的主要標準是 CMRR 與頻率的關係，但在 DC 附近，失調電壓和增益精度也很重要。由於儀錶放大器是專用的元件，因此「只有」63 款可供選擇。

只有選擇正確的元件，才能實現未來若干年內無故障、且可大量生產的產品和設計。

參考電路：

¹ Harry Holt. "The Maximum Supply Current that Wasn't." ADI, 2011 年 11 月。

² MT-083 教程：“比較器。”ADI, 2009 年。

³ Reza Moghimi. "Curing Comparator Instability with Hysteresis." 《類比對話》，第 34 卷第 7 期，2000 年 11 月。

⁴ 《A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers》，第 3 版。ADI, 2006 年。 