

讀懂運算放大器

你必須瞭解的基礎知識

本文重溫了運算放大器 (運放) 的各個基本參數和應用原理，透過瞭解運算放大器的增益、壓擺率、頻寬、輸出類型等主要參數，深入理解其工作原理和應用領域，並介紹了如何利用清晰易用的 Digi-Key 運算放大器產品參數篩選清單，滿足工程師的設計所需。

■作者：Kevin Chow

引言

運算放大器 (或簡稱運放) 是許多電子設計的基本組成部分之一，從簡單的小訊號放大到複雜的類比訊號處理，應用範圍非常廣泛，幾乎可以應用於大多數設計。雖然運放的原理很簡單，但在應用中需要考慮很多的參數。當然，新手是無法掌握原理的，即使是經驗豐富的工程設計人員在選擇材料時，也可能會忽略一些設計的參數，進而影響到產品的工作。

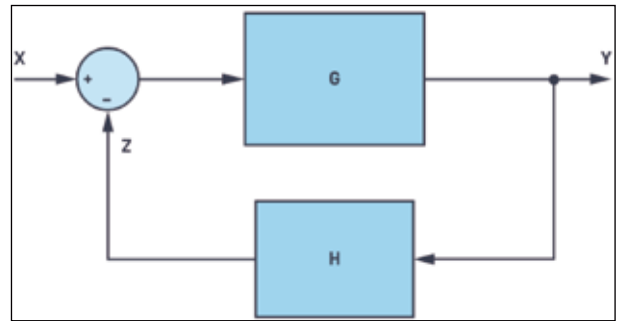
下面就讓我們重溫一下有關運放的基礎電子知識重點。在看實際運放的規格參數之前，我先介紹一下理想的運放模型 (這對以後的理解很重要)。當然，理想的模型只是為了簡化設計中涉及的數學運算，但實際上並沒有那麼簡單。為了清楚起見，現在讓我們看看一些不同的重要參數。

回饋

每個運放都可以進行回饋，讓我們從圖 1 的典型負回饋原理圖開始瞭解。

負回饋是將輸出訊號的一部分“回饋”到輸入端的過程，但要使回饋為負，必須使用外部電路和附加元件將輸出回饋到運放輸入的負端 (或“反相輸入”端)，目的是使輸入端之間的差分輸入電壓接近於零，如以下面的公式 (1) 表示：

圖 1：典型回饋原理圖



圖片來源：ADI

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

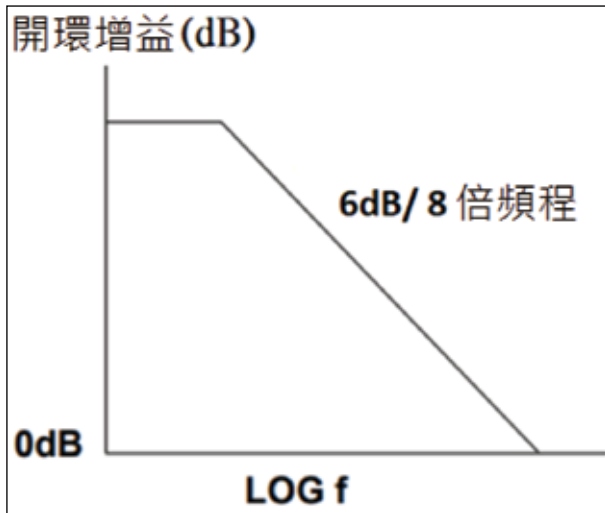
當中

- A_{CL} 是閉環增益
- A_{VOL} 是開環增益
- β 是回饋係數

開環增益 (Open-Loop Gain)

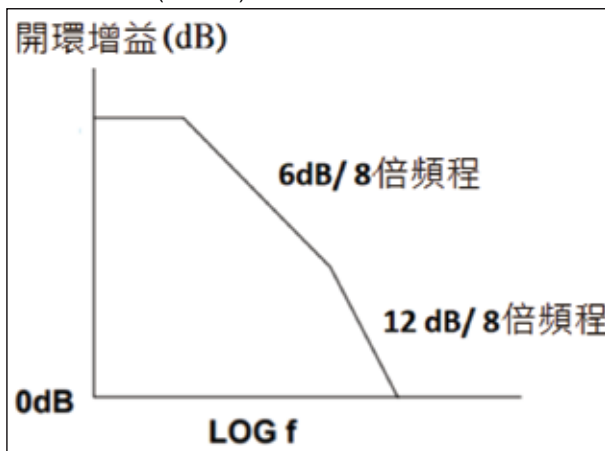
開環增益 (AVOL) 是放大器在沒有閉合回饋環路情況下的增益，因此稱為“開環”。對於精密運算放大器，該增益可能非常高，能達到大約為 160dB 或以上。從直流到主導極點轉折頻率，該增益表現平坦。此後，增益以 6dB/ 倍頻程 (20 dB/10 倍頻程) 下降 (注：8 倍頻程指頻率增加一倍，10 倍頻程指頻率增加十倍)。如果運算放大器只有一個單極點，則開環增益繼續以該速率下降，如圖 2 (單極點回應)

圖 2：開環增益 (波德圖) - 單極點回應



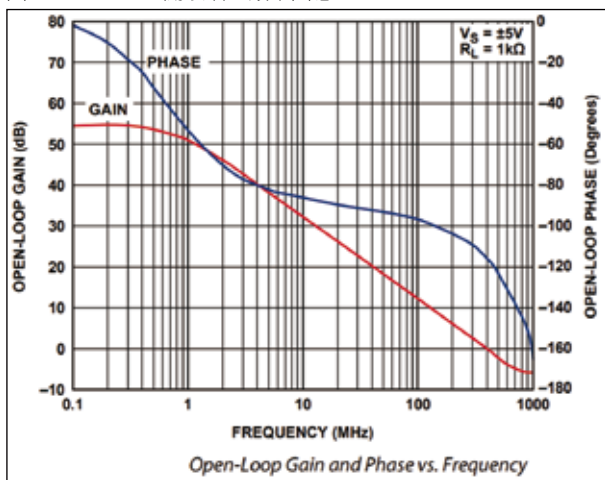
圖片來源：ADI

圖 3：開環增益 (波德圖) - 雙極點回應



圖片來源：ADI

圖 4：ADA4857 開環增益頻率回應



圖片來源：ADI

所示。

實際上，一般運算放大器有一個以上的極點，如下圖 3 所示。

在圖 3 所示，第二個極點會使開環增益下降至 12dB/ 倍頻程 (40dB/10 倍頻程) 的速率增加一倍。如果開環增益在達到第二個極點的頻率之前降 0dB 以下，則運算放大器在任何增益下均會無條件地保持穩定。在規格書上，一般將這種情況稱為“單位增益穩定 (Unity Gain Stable)”。具體情況，可以參考 ADI 公司 ADA4857 的規格書中，有關開環增益頻率回應的圖表 (圖 4)。

注意：開環增益的不穩定狀態

如果達到第二個極點的頻率且閉環增益大於 1(0dB)，則放大器可能不穩定。有些運算放大器設計只是在較高閉環增益下才保持穩定，這就是所謂的非完全補償運算放大器。然而，運算放大器可能在較高頻率下擁有更多額外的寄生極點，前兩個極點一般都是最重要的。

開環增益並不是一項精確控制的參數，其範圍相對較大，在規格參數中，多數情況下均表示為典型值而非最小/最大值。在有些情況下，一般指高精度運算放大器，該參數會有一個最小值。另外，開環增益可能因輸出電壓電平和負載而變化，這就是所謂的開環增益非線性度。該參數與溫度也有一定的相關性。一般來說，這些影響很小，多數情況下都可以忽略不計。事實上，一些運算放大器的資料手冊中未必包含開環增益非線性度。

閉環增益 (Close-Loop Gain)

閉環增益指放大器在回饋環路閉合時的增益。閉環增益有兩種形式：訊號增益和雜訊增益。

訊號增益和雜訊增益

閉環放大器增益的經典表達方式涉及開環增益。設定 G 為實際閉環增益， N_G 為雜訊增益， A_{VOL} 為放大器的開環增益，則：

$$G = \frac{N_G}{1 + \frac{N_G}{A_{VOL}}}$$

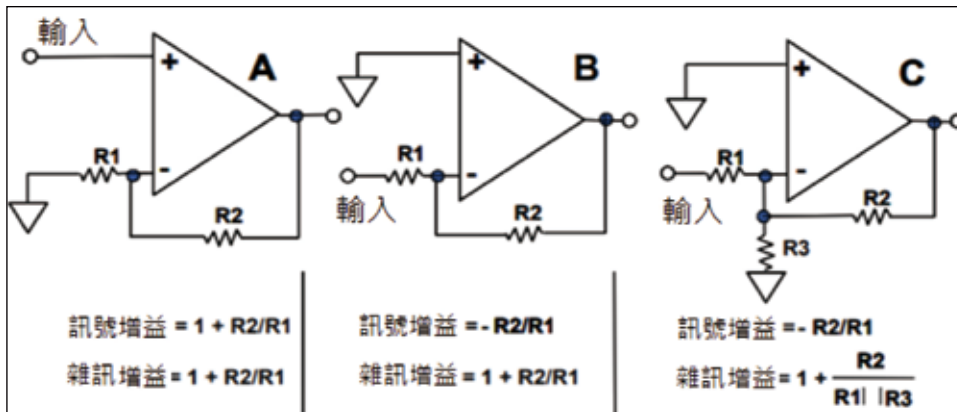
這樣，一般情況下如果開環增益很高，則電路的閉環增益大多數是雜訊增益。

請留意，用於確定運算放大器穩定性的是雜訊增益，而非訊號增益。大多數現代運算放大器都能在單位增益下穩定，但某些特殊用途的放大器無法做到這一點。與標準單位增益穩定型運算放大器相比，非完全補償運算放大器可提供獨特的優勢，比如更低的雜訊電壓和更寬的頻寬。

增益頻寬積 (Gain-Bandwidth Product)

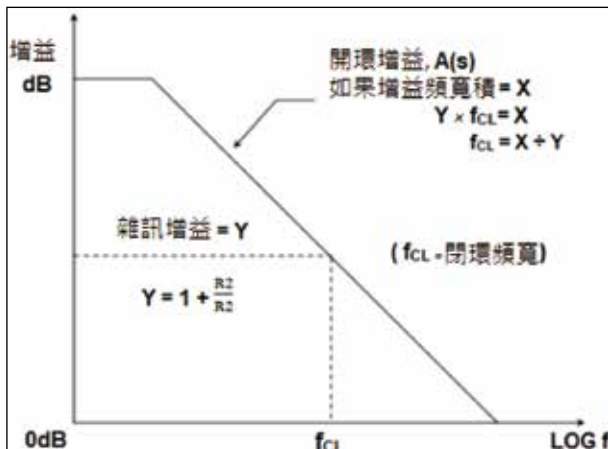
對於單極點回應，開環增益以 6dB/8 倍頻程下

圖 5：訊號增益與雜訊增益



圖片來源：ADI

圖 6：訊號增益與雜訊增益



圖片來源：ADI

降。這就是說，如果我們將頻率增加一倍，增益將下降到一半。相反地，如果使頻率減半，則開環增益會增加一倍。如圖 6 所示，結果產生了所謂的增益頻寬積。如果用頻率乘以開環增益，其積始終為一個常數，但這個積必須處於整條曲線中以 6dB/8 倍頻程下降的部分。這樣，我們就得到了一個品質因素，可以據此決定某個運算放大器是否適合特定的應用。請注意，增益頻寬積僅對電壓回饋 (VFB) 運算放大器有意義。

例如，如果我們有一個需要閉環增益為 10 和 100kHz 頻寬的應用，那麼我們是否需要一個至少 1MHz 增益頻寬積的運算放大器呢？

這樣解釋有點過分簡化，在現實中，由於增益頻寬積的可變性，以及在閉環增益與開環增益相交的位置，回應實際上要下降 3dB，而且最好應留一點額外餘量。在上述應用中，增益頻寬積為 1MHz 的運算放大器只是最少的要求。

壓擺率

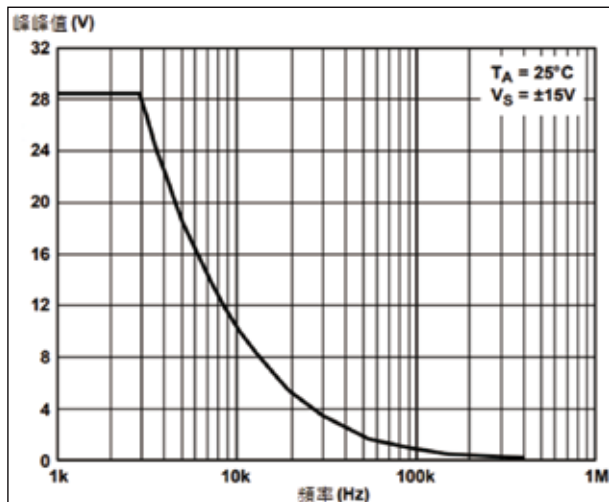
壓擺率 (SR) 是指放大器輸出因放大器輸入突然變化而發生變化的速率，其測量單位通常是 V/ μ s。大訊號最大工作頻率

可以透過下式確定：

$$f = SR / 2\pi V_p \quad (\text{其中 } V_p \text{ 為峰值電壓})$$

某些放大器具有非常大的壓擺率，試圖以漂亮的數字來獲得工程師的青睞，但有時未必真正用的上，因為最大工作頻率受到失真的限制。最簡單的判斷方法是查看失真曲線，瞭解具體應用在無法接受的失真時對應的頻率是多少。同樣地，能夠清楚知道系統要求，這點也是至關重要的。然後，將該頻率代入壓擺率計算公式，計算到底需要多大的壓擺率。

圖 7：OP177 最大輸出幅度與頻率



圖片來源：ADI

頻寬

有些人認為頻寬越高越好，但經驗豐富的類比工程師知道，頻寬足夠適合應用要比頻寬過高更好。評估任何參數的最佳方法是翻閱資料手冊來查看特性曲線，只有這樣才能真正了解放大器的特性。頻寬曲線中是否有過高的峰化呢？有些製造商將這種現象說成是 -3dB 頻寬較大，但它也可能說明元件存在穩定性問題。即使 -3dB 頻寬看起來較大，但放大器的增益平坦度可能會因為峰化而降低。因此，頻寬能夠滿足您的需求即可，頻寬較寬的放大器需要更加注意穩定性和 PCB 佈局佈線。

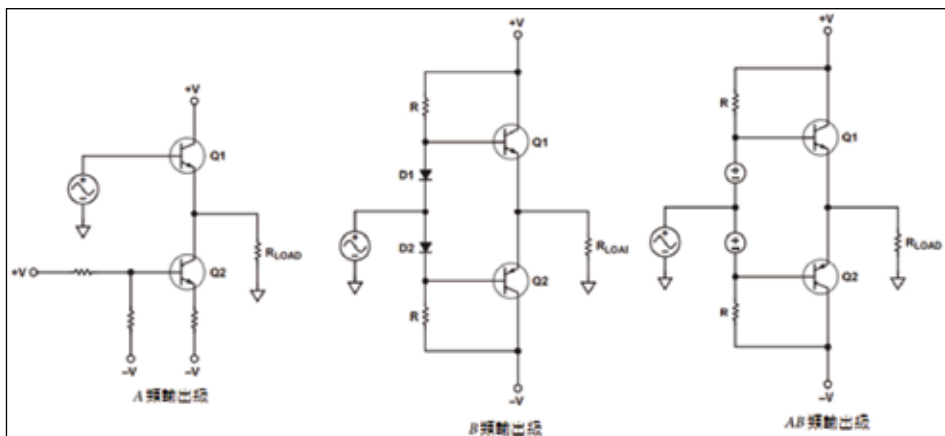
輸出類型

通常，運算放大器的“輸出類型”是根據放大器的輸出結構和應用類別來分類的，在 Digi-Key 網站內“線性元件 - 放大器 - 儀器、運算放大器、緩衝放大器”產品類別中已經列出不同輸出類型，方便大家挑選合適的運算放大器。

“輸出類型”大致可分為：

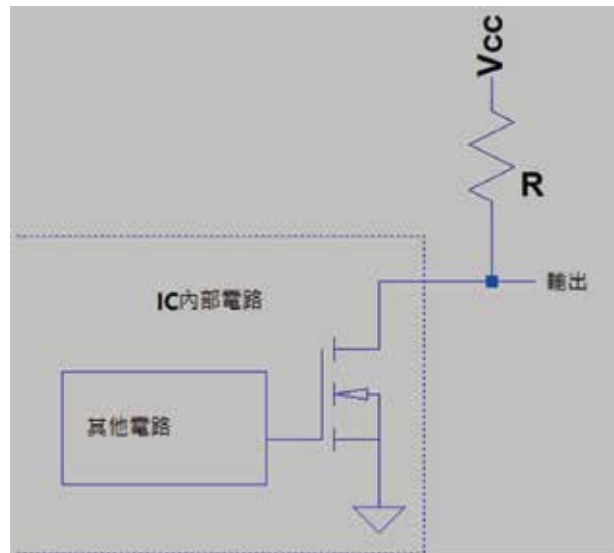
■**差分**：這類運算放大器具

圖 9：A 類、B 類、AB 類輸出級推挽式放大器



圖片來源：ADI

圖 8：漏極開路運算放大器輸出電路圖



有正輸出和負輸出，它將兩個輸入端電壓的差以一種固定增益放大

■**軌對軌**：這類運算放大器（或稱滿擺幅）的輸入和輸出電壓擺幅非常接近或幾乎等於電源電壓值（通常在毫伏範圍內），這類型在運算放大器中是最普遍。

■**漏極開路**：這類運算放大器的輸出連接到 IC 內部電晶體的基極。因此，運放工作時，電晶體的漏極導通；只能吸收電流，如圖 8 所示。這類運放一般用於電流檢測，可應用範圍不多，所以市場上的選擇較少。

■**推挽式**：推挽式放大器是指使用 NPN 電晶體和 PNP 電晶體的放大器。電晶體相互匹配，因此它

圖 10：Digi-Key 官網運算放大器篩選選項



們具有大致相同的增益、速度和電流規格。電晶體交替工作在訊號的正、負兩個半週期成一推一挽形式的功率放大器。不過和漏極開路一樣，應用範圍並不大，國外也沒有多少廠商會開發這種輸出級運放，所以市場上的選擇比較少。

更多關於運算放大器的參數資訊，這裡有一篇很好的文章可分享給大家。

運算放大器選料上的考慮

工程師選擇合適的運算放大器瞭解轉換器的參數非常重要。例如上面提到的“增益頻寬積”、“輸出類型”等要求，甚至還要考慮封裝尺寸。如果有一個既簡單又清晰的篩選列表，總結了大部分主要參數，透過它便可以靈活地選擇合適放大器的

參數，這一定會提升工程師們選料的效率。

這樣的工具，Digi-Key 已經為大家提供了一一現在，工程師只需在 Digi-Key 官網的搜尋引擎中輸入關鍵字「opamp」或「運算放大器」，進入「線性元件 - 放大器 - 儀器、運算放大器、緩衝放大器」後，各種運放的詳細參數便可一目了然。

總結

透過本文，我們一起重溫了運算放大器的各個基本參數和應用原理。透過瞭解運算放大器的增益、壓擺率、頻寬、輸出類型等主要參數，深入理解其工作原理和應用領域，並介紹了如何利用清晰易用的 Digi-Key 運算放大器產品參數篩選清單，滿足工程師的設計所需。 CTA

COMPOTECHAsia 臉書

每週一、三、五與您分享精彩内容

<https://www.facebook.com/lookcompotech>