

設計完美反相軌

我們常看到有些設計需要運算放大器，總會好奇如何取得這項麻煩的負供？雖然想尋找符合成本效益、簡易與彈性的解決方案，但常衍生出既難處理又不夠直接的拓樸或選項。本文介紹典型反相升降壓拓樸，幾乎能夠使用各種降壓轉換器，迅速設計出負輸出電壓，再應用於各種手邊擁有的運算放大器、記憶體或放大器電路。

作者：Anston Joel Lobo/德州儀器系統與應用工程師

序論

每當一個好的設計靈感湧現，常會出現類比元件對負輸入功率軌需求彈性不足，關鍵通常在於運算放大器，但也可能是記憶體晶片、射頻放大器，或是體積更大的磁控管。我們大多著重於處理手邊問題，很少顧及功率需求，工程師也常自詡能按部就班解決問題，希望最終改善整體情況，可是卻常完全忽略系統整體考量，或太晚才想到此事，因此引發新問題。

有了放大器後，必須先瞭解系統主要層面，以功率而言，正軌較容易取得，並依據設計敏感程度決定正軌來源，若是基礎設計或需要無電磁干擾的環境，正軌大多來自低壓降穩壓器，但在同步穩壓器問世後，這項趨勢迅速變遷，由於 μA 暫態電流與效能大幅提升，讓同步穩壓器成為相當理想的功率轉換器選項。

挑戰

不過設計負軌的需求仍在，要處理通常也無法如此直接，若使用電池，顛倒電極看似簡單，但電池開始放電後，電極的電壓開始下滑，最終不符合運算放大器需求，而且依據電路設計不同，要達到電池使用指標也不容易，因此可能並不理想。從反相穩壓器中取得這項電壓，似乎是最佳方式，因為輸入電極可接受的電壓範圍較寬，排除不理想的電池安排需求，亦可從正軌驅動，減少電路糾纏與增加可用空間。

決定使用反相拓樸後，得選擇使用特定選

項，丘克轉換器必須客製，會增加成本及複雜度；返馳設計需要變壓器，也增加使用空間與成本；反相穩壓電荷幫浦適合低於 $-5V$ 輸出且單一鋰離子電池設計，但其他情況下都不實用。

反相升降壓是較少人考慮的第四種選項，功率設計師都很熟悉降壓拓樸，但只要將 VOUTPUT 與接地簡單互換，就能創造新的拓樸，此外，還能將正軌上的元件用於他處，例如電感或幾項電阻，有時非常方便，接下來向各位介紹如何快速設計負軌。

我們在範例中使用德儀 SIMPLE SWITCHER 寬輸入電壓同步降壓轉換器，LM46002，可處理 $3.5V$ 至 $60V$ 的輸入電壓、最高 $2A$ 的負載電流、峰值效能 95% ，且封裝使用簡單，適合簡易配置與低電磁干擾。此外，低壓降穩壓器得與毫無 μA 的超低暫態電流競爭，德儀亦提供名為 WEBENCH 的軟體套組，相當易於使用，有助各位設計。

設計

若仔細對比降壓與升壓拓樸(圖 1)，可見反相拓樸中，電感做為主要電源儲存元件，連接在切換節點與接地之間；在降壓拓樸中，電感位於穩壓器輸出，而升壓拓樸的電感位於穩壓器輸入。

由於電感可避免電流突然改變，我們運用這項功能提供所需輸出，且反相拓樸在輸入與輸出側都有很多雜訊，故需要良好的電容過濾，才能減少濾波電壓。在反相拓樸中，輸入與輸出節點均需要良好的低 ESR 旁路電容，將電壓濾波與雜訊降至最

圖 1：降壓與升壓拓樸比較圖

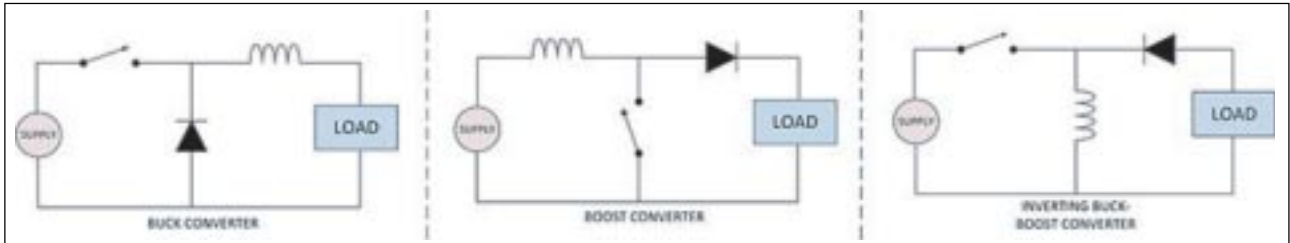
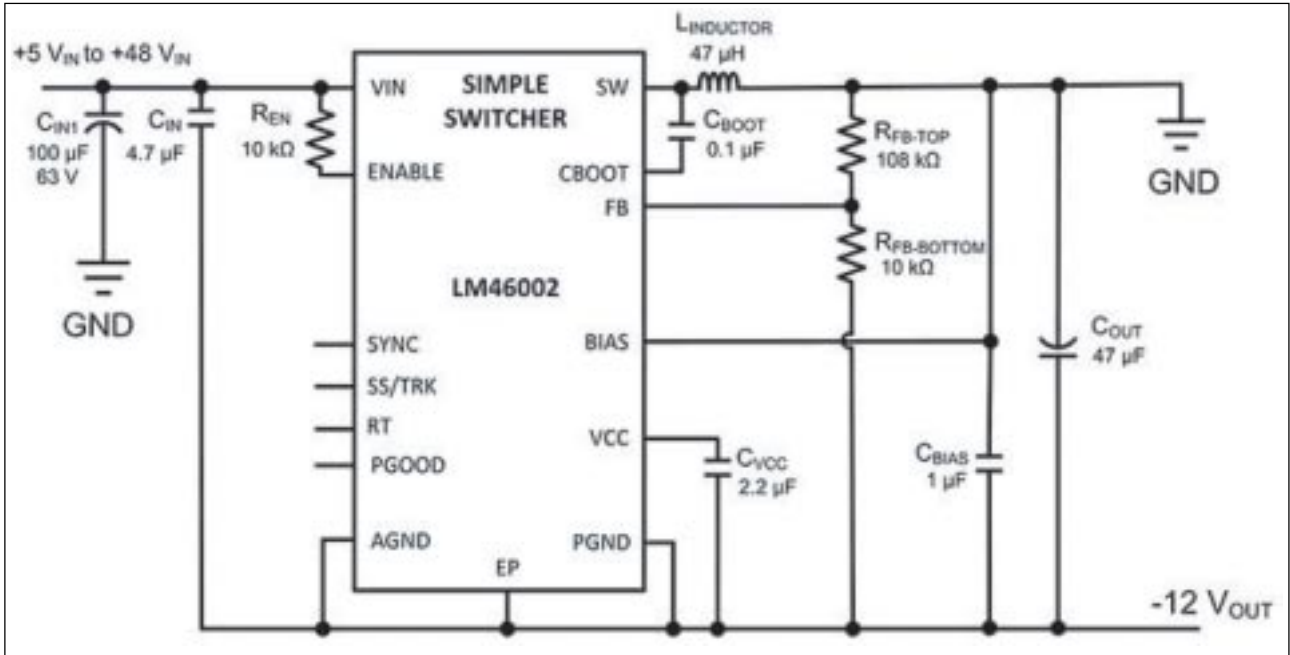


圖 2：反相圖樣



低。

在此類電路裡，我們必須分辨系統接地與晶片接地的差別，兩者在反相拓樸中並不相同。系統接地為 0 V 或零電位，晶片接地則為裝置負輸出，輸入供應接地應小心連接至系統接地，而非晶片接地，因為後者為負，可能損害特定供應。

圖 2 的電路設計相當簡單，本文提及的幾項設計重點將有助各位設計，在設計過程中請切記，封裝外的金屬板等裝置接地不應與系統接地相連。

為了對系統設計保持宏觀視野，首先說明本設計的規格，其中需決定我們想要的輸入軌及負輸出電壓，有助驗證是否選擇正確降壓。

在本設計範例中，源極為 24-V DC，常見於車載匯流排(+24 V)，我們需要穩壓後的 +12 V 及 -12 V 功率軌，供應電路設計裡所有下游運算放大器

(如音訊軌應用)，+12 V 軌在傳統降壓拓樸可輕鬆完成，接著處理 -12 V，我們確認所有電流需求後，共需 1A，其中少數已內建，圖 2 繪製出大略配置情況，亦標示穩定反相設計所需的被動數值。

這項降壓轉換器的最大輸入運算電壓 $V_{\text{DEVICE(maximum)}}$ 為 +60V，而根據我們所需的負輸出，其中只有一部分會做為負軌設計的輸入，算式一說明可安全應用的最大輸入電壓。

$$V_{\text{INPUT(maximum)}} \leq V_{\text{DEVICE(maximum)}} - |V_{\text{OUTPUT}}| \quad (1)$$

$V_{\text{DEVICE(maximum)}}$ 在此為裝置最大輸入運算電壓。

本設計規格需要 -12 V 輸出電壓，故可供應的最大輸入為 +48 V，因為比輸入規格高一倍，因此暫態突增保護最高達 +48 V，而最低的輸入標準為：

$$V_{\text{DEVICE(minimum)}} \leq V_{\text{INPUT}} \leq V_{\text{INPUT(maximum)}} \quad (2)$$

$V_{\text{DEVICE(minimum)}}$ 在此為最低輸入運算電壓，晶片載明為 +3.5 V。

有一點要注意：千萬別因降壓的輸入電壓很低而誤會，這個元件的輸入電流很高，若以此電壓直接進入全負載，即便啟動時少量突增也可能摧毀元件。較安全的解決方案會使用「電壓過低鎖定」(UVLO)，在輸入的致能針腳做為分壓器，確保在最低電壓達到安全值之間，元件不會啟動。

下一設計元素為回授分壓器電阻比例，在每一元件都不同，各品牌的容忍度也不同，不過一般可接受的算式為：

$$R_{\text{Resistor Feedback Top}} = R_{\text{Resistor Feedback Bottom}} \times \left(\frac{V_{\text{Output}}}{V_{\text{REFERENCE}}} - 1 \right) \quad (3)$$

其中 $V_{\text{REFERENCE}}$ 為設計中的回授參考電壓。

接下來到了有趣的地方，計算工作週期 D 與輸出電流 I_{OUTPUT} ，對反相升降壓而言，是以輸入與輸出電壓的比例關係算出工作週期：

$$\text{Duty Cycle, } D = \frac{V_{\text{Output}}}{(1 + V_{\text{Output}}) + V_{\text{Output}}} \quad (4)$$

其中 I_{Output} 是元件在產品說明書圖表中載明的元件效能。

最糟情況意指最大工作週期 D_{MAXIMUM} ，在工作週期算式中，使用最低輸入電壓 $V_{\text{INPUT (minimum)}}$ 取代輸入電壓 V_{INPUT} ，假設 V_{INPUT} 為 +5 V、 V_{OUTPUT} 為 -12 V，產品說明書的效能值為 80%，則最大工作週期 D_{MAXIMUM} 為 0.75。

最後還需計算最大輸出電流，同步反相升降壓運作時，上側 FET 開啟時，電感所見的電壓為 V_{INPUT} ，電流增加速率為 $di/dt = V_{\text{INPUT}}/L$ ，上側 FET 開啟時，必要負載電流來自儲存在輸出電容的電荷。

關閉時，上側 FET 會關閉，而電感兩極必須顛倒，確保電感電流持續不中斷，電感內的電壓約等於 V_{OUTPUT} ，而電感電流的放電速率計算式為 $di/dt = -V_{\text{OUTPUT}}/L$ ，在關閉階段中，電感提供電流至負載，同時得在啟動時間內，彌補電感的能源損失。

切記，平均輸出電流不得超過特定元件額外

輸出，因此可用負載電流比 $(1 - D)$ 少了好幾倍，LM46002 產品說明書指出，平均電感電流為 2A，為電子特色表內最低電流限制的一般值。

在設計中，由於關閉時間為切換階段內的 $(1 - D)$ ，故輸出電流 I_{OUTPUT} 為：

$$I_{\text{OUTPUT}} \leq I_{\text{INDUCTOR(AVERAGE)}} \times (1 - D) \quad (5)$$

I_{OUTPUT} 在此算式中為 1.23 A，可滿足 1 A 需求。

確定最終設計元素後，要選擇外部被動項目。

電感

維持電感 AC 鏈波電流低點很重要，峰值電感電流意指平均電感電流加上半數峰到峰 AC 電流，應低於內部控制電路的電流限制，電路進入不連續傳導模式的起點亦受電感 AC 鏈波電流影響。

不連續傳導模式出現時，通過電感的平均電流等於峰到峰 AC 電流的一半，這項參數的限制通常比先前的電流限制更嚴格。

電感鏈波電流對輸出電壓鏈波影響甚鉅，因為電感會傳輸能量至電容，兩者也一同運作，電感鏈波電流較低時，輸出電壓也較乾淨，但若太低，會大大影響訊號雜訊比，可能導致維持穩定運作的電感鏈波不足。

各種拓樸的連續與不連續運作模式差異都很大，有些設計在不連續模式中很穩定，但隨著負載電流增加而進入連續模式後，回授迴路包括右半平面零點，反而變得不穩定。

我們瞭解這些邊緣條件後，電感 L 數值(以微亨為單位)的選擇基準大約是：

$$\frac{V_{\text{Output}} \times D}{0.4 \times I_{\text{Average}} \times I_{\text{INDUCTOR(AVERAGE)}}} \leq L \leq \frac{V_{\text{Output}} \times D}{0.2 \times I_{\text{Average}} \times I_{\text{INDUCTOR(AVERAGE)}}} \quad (6)$$

左右出現 0.4 與 0.2 的差別，這一點與鏈波比例相關，通常 40% 為上限、20% 為下限，也會隨著選擇的元件而異，不過約略介於這個區間。

電容

輸入電容

本應用的電容材質無論是陶瓷、聚合物、鈹或鋁，幾乎都能穩定，但各種降壓轉換器應對不同電容時，可能會有細微差別，因此請詳閱產品說明書，找出適合的類別與建置方案。 V_{INPUT} 至接地以及輸入側 V_{INPUT} 與 V_{OUTPUT} 之間必須使用旁路電容，而在裝置電壓輸入中，從 V_{INPUT} 至 V_{OUTPUT} 的旁路電容及其額定必須審慎選擇。

通常 $0.1 \mu F$ 陶瓷電容就足以做為輸入旁路電容，而針對穩壓器表現， $4.7 \mu F$ 至 $22 \mu F$ 陶瓷電容在輸入與負輸出軌之間已足夠，不過上限會隨元件而異。最後，在輸入與系統接地之間，大容量電解電容可有效撫平輸入漣波，並在高負載要求下，為穩壓器提供必要安定器。

輸出電容

要選擇輸出電容較為複雜，更容易受元件影響，由於輸出電壓為負，必須確定輸出電容的電極無誤，原則是在反相配置中，降壓轉換器輸出電容用量比建議值高一倍，再經過調整，能夠在輸出


穩定度與暫態反應之間找到折衷，但很難在此提供算式，因為每個元件自有其補償機制。

輸出電容 C_{OUTPUT} 應謹慎選擇，因為將直接影響穩定狀態輸出電壓漣波、迴路穩定度，以及負載電流暫態的超射 / 底射電壓。

結論

處理負輸出問題的方式眾多，希望在本文介紹後，各位能瞭解反相升降壓優於其他選項的原因，別忘了先規劃出系統主要層面，再著手處理最終細節，希望各位下次規劃完美反相設計時，都能享受樂趣。

關於作者

Anston Joel Lobo 為德州儀器 SIMPLE SWITCHER 部門系統及應用工程師，畢業自印度安得拉邦國立技術學院電子工程系，後於美國聖塔克拉拉大學取得科學、工程管理與領導碩士，主修系統工程與類比電子學，聯絡方式：ti_anstonlobo@list.ti.com。 

Manz 亞智科技與 adidas 簽訂合作協議

Manz 集團與 adidas 集團簽訂了一份合作協議，一同為 adidas 「Speedfactory」計劃而努力。雙方能簽訂這份協議，必須歸功於成功開發了最新運動用品的自動化生產設備及技術。藉由這項靈活的技術，將客製化的運動鞋元件、材質及配件設計轉化成生產資料，再透過未來的全自動化系統進行生產。合作內容包括先將這項技術實作於位在德國及美國的「Speedfactory」，最後再部署到全球，這些「Speedfactory」將在當地針對未來的目標市場生產運動鞋。這次與運動用品產業頂尖公司的合作，新開發的技術已從先導生產轉移到量產的階段，突顯了 Manz 集團有能力為高度需求自動化的客戶開發出創新解決方案。

未來透過「Speedfactory」在地生產運動鞋，adidas 將能直接在消費者所在地區生產運動鞋，實現客製化，並將資源有效地運用以具備成本效益的方式生產運動鞋。