

電源設計中，常用的穩壓器拓撲架構有哪些？

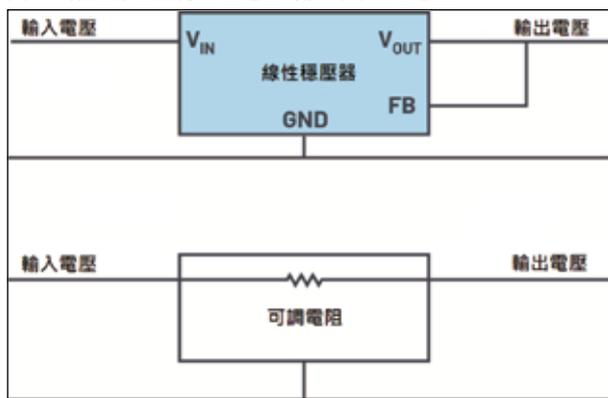
如何輕鬆設計電源

本文介紹了低壓降線性穩壓器 (LDO)、切換式電源等電源穩壓器的基本原理和主要的知識點，並詳細分析了不同拓撲結構 (特別是非隔離切換式電源拓撲) 的性能特點及其對系統設計的重要性，以幫助大家輕鬆設計電源。

■作者：Kevin Chow

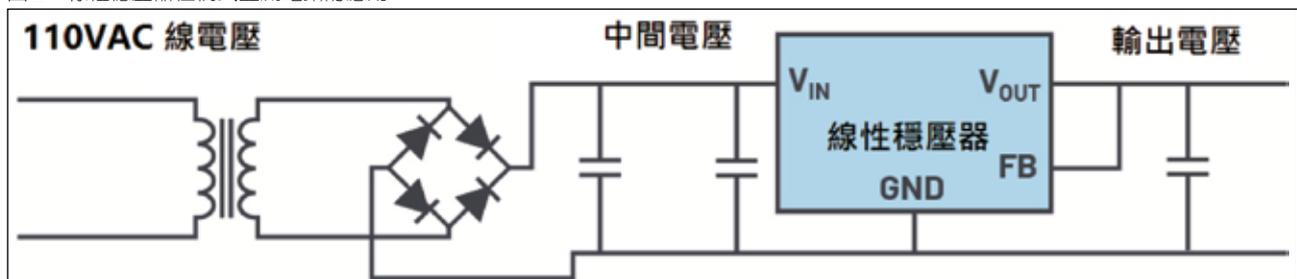
大多數電子系統能正常工作，往往需要電源電壓和系統之間進行電壓轉換。在電壓轉換設計過程中，實在需要注意不少因素——如精準度、電源管理和效率等。本文將重溫電源穩壓器的基本原理，並介紹不同拓撲結構對系統設計的重要性，同時，本文還介紹了如何透過 DigiKey 官網的電源穩壓器產品類別中的參數篩選功能，快速搜索所需的物料，借此幫助大家輕鬆設計電源。那麼，先從一些常見電路拓撲結構說起……

圖 1：線性穩壓器將一種電壓轉換成另一種電壓



圖片來源：ADI

圖 2：線性穩壓器在橋式整流電路的應用



圖片來源：ADI

低壓降線性穩壓器

在現今電源設計中，低壓降線性穩壓器 (LDO) 是最簡單的電壓轉換的形式之一。LDO 是線性穩壓器，而不是切換式穩壓器，其原理是在輸入電壓和輸出電壓之間放置了一個可調電阻，這意味著輸出電壓是固定的，與輸入電壓如何變化以及通過裝置的負載電流無關。圖 1 顯示了這種簡單電壓轉換器的基本原理。

以 110VAC 輸入電壓為例，利用 50Hz / 60Hz 變壓器和二極體的橋式整流，將 110VAC 轉成直流電壓。為使整流後的電壓穩定，使用線性穩壓器能有效地將該電壓穩定。下圖 2 顯示了這個應用的概念，但這個設計使用笨重且較昂貴的 50Hz / 60Hz 變壓器，而且線性穩壓器工作中，會散發出大量熱量，整體系統效率較低。

切換式電源

為了避免圖 2 所示的整流電路的缺點，可以考慮使用切換式電源。切換式電源的輸入不再依賴

50Hz 或 60Hz 交流電壓，反而是採用直流電壓或經過整流的交流電壓，以產生直流輸出電壓。這優點可以提供尺寸更小的方案，而且成本相對較低。這種方法產生的交流電壓不需要正弦電壓波形，一個簡單的 PWM 訊號形狀加上一個開關元件就可以正常工作。

在今天的切換式電源中，切換式穩壓器是透過控制電晶體切換，使輸出電壓保持穩定。切換大多採用 MOS 電晶體代替雙極電晶體，使切換速度更快，降低了系統中的切換損耗。雙極型電晶體的功率效率不高，切換頻率一般限制在 50kHz 或 100kHz 左右。在高頻切換中，使用 MOS 電晶體允許在功率級中使用非常小的電感器和電容器。

使用切換式穩壓器會帶來了很多好處。它們通常可以有效地轉換電壓，對輸出電壓升壓和降壓的控制，並提供相對緊湊和低成本的设计。不過缺點是它們的设计和最佳化不是那麼簡單，並且它們會從切換轉換和切換頻率產生 EMI。所以業界也提供了很多資源，例如應用電路及一些電源設計工具，以利於工程師簡化設計過程。

電源是否需要隔離

在设计電源時，一個首先要回答的問題是“是否需要電流隔離”？使用電流隔離可以使電路更安全，抗干擾能力更強，更容易實現升降壓轉換，並更容易實現多路輸出和很寬的輸入電壓範圍。

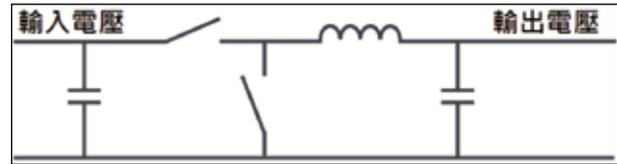
兩種最常見的隔離電源的拓撲形式是“反激”和“正向”。但是為了獲得更高的功率輸出，可以使用其他隔離拓撲如“推挽”、“半橋”和“全橋”。實際上，如果不需要電流隔離，工程師會儘量使用非隔離電源，因為隔離的拓撲形式總是需要變壓器或額外的線路，而且這種裝置往往會增加成本和體積，通常很難滿足訂製電源的需求。

較常見的非隔離拓撲

降壓轉換器 (Buck)

最常見非隔離切換式電源的拓撲結構是降壓轉

圖 3：降壓轉換器的概覽圖



圖片來源：ADI

換器。它將正輸入電壓轉換為低於輸入電壓的輸出電壓。其結構簡單，只需要兩個開關、一個電感器和兩個電容器，如圖 3 所示。高側切換從輸入端產生脈衝電流並產生一個切換節點電壓，該電壓在輸入電壓和接地之間來回震盪。之後，使用 LC 濾波器產生直流輸出電壓。根據控制高側切換 PWM 訊號的占空比，產生不同電平的直流輸出電壓。這種 DC-DC 降壓轉換器非常省電，設計亦相對簡單，並且需要的零組件很少。

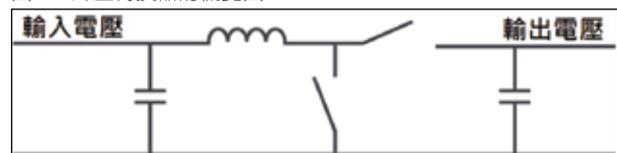
設計低雜訊系統時要留意，降壓轉換器在輸入側產生脈衝電流，而輸出側有來自電感器的連續電流。這就是降壓穩壓器在輸入端雜訊很大，而在輸出端雜訊不大的原因。

升壓轉換器 (Boost)

除了降壓外，另一種常見拓撲是升壓。它的拓撲結構由五個基本功率元件組成，與降壓轉換器的拓撲有點不同，如圖 4 所示。

選擇升壓轉換器時，需要留意規格表上較普遍列出最大額定切換電流而不是最大輸出電流。在降壓轉換器中，最大開關電流與可實現的最大輸出電流直接相關，但與輸入電壓和輸出電壓之間的電壓比無關。而在升壓穩壓器中，電壓比是根據固定的最大開關電流，而直接影響可能的最大輸出電流。所以在選擇合適的升壓穩壓器時，工程師不僅需要瞭解所需的輸出電流，還需要瞭解系統需要的輸入和輸出電壓。

圖 4：升壓轉換器的概覽圖



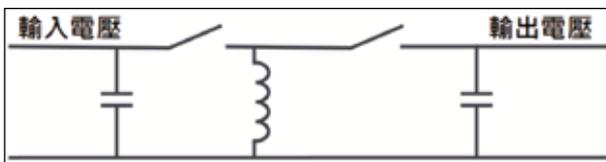
圖片來源：ADI

升壓轉換器的輸入端雜訊非常低，因為與輸入端連接的電感可防止電流快速變化。然而，輸出端雜訊較大，因為 LC 濾波器位於輸入端，我們會看到脈衝電流流向外部切換，造成輸出紋波。因此與降壓拓撲相比，輸出紋波更受關注。

反相降壓 - 升壓穩壓器 (Inverting)

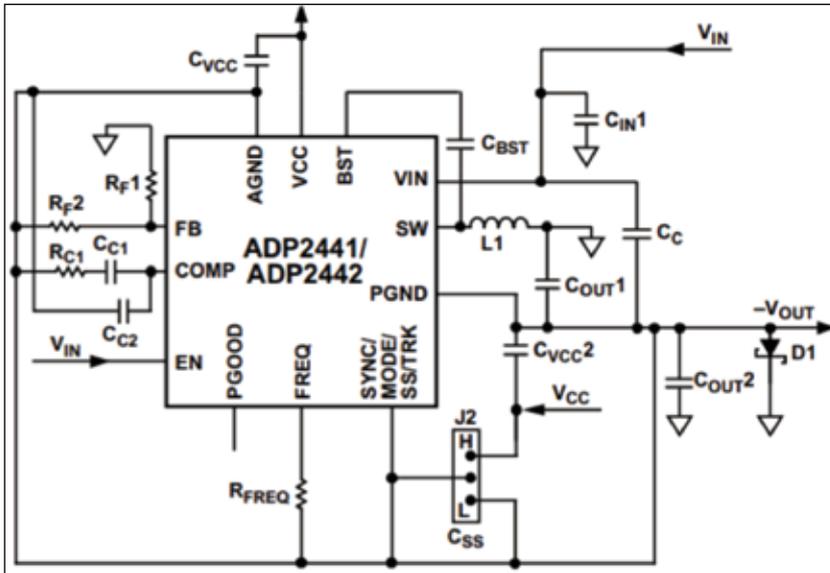
第三種常見拓撲是反相降壓 - 升壓轉換器，其由五個零組件組成。該名稱源於該轉換器採用正輸入電壓並將其轉換為負輸出電壓的事實。除此之外，輸入電壓可能大於或小於反相輸出電壓的絕對值。例如，輸入端的 5V 或 24V 可能會產生 -12V 輸出電壓。這是可行而無需進行任何特殊的電路修改，如圖 5 所示。

圖 5：反相降壓 - 升壓轉換器的概覽圖



圖片來源：ADI

圖 6：ADP2441/ADP2442 實現的反相降壓 - 升壓拓撲結構



圖片來源：ADI

在反相降壓 - 升壓拓撲中，電感從切換節點連接到接地。轉換器的輸入端和輸出端都看到脈衝電流，輸出電流是不連續的，使反相降壓 / 升壓轉換器的輸出電壓往往雜訊較大，所以在低雜訊應用中，可以透過增加額外的輸入和輸出濾波來補償。

反相降壓 - 升壓拓撲在電源設計中有一個好處，就是任何降壓穩壓器均可應用此拓撲。如 ADI 的 ADP2441 或 ADP2442，為了將降壓穩壓器轉換為反相降壓 - 升壓拓撲結構，電感和輸出電容應以與降壓拓撲結構相似的方式連接，如圖 6 所示。

專業的拓撲結構

除了以上三種常見非隔離切換式電源拓撲之外，還有更多的拓撲如 SEPIC、Zeta、Ćuk 和 4 開關降壓 - 升壓。相比以上三種切換式電源拓撲而言，這些拓撲結構都需要額外增加一些主動元件，會增加產品成本，功率轉換效率也會降低。一般而言，在電路中添加額外零組件會增加損耗。以下簡單介紹一下這四款不同拓撲的一些最重要功能。

SEPIC：單端初級電感轉換器

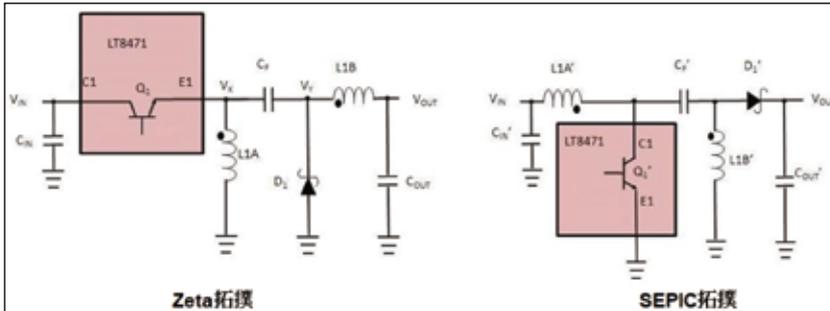
(SEPIC) 允許輸出電壓大於或小於輸入電壓的電壓轉換，輸出電壓由主控開關（三極電晶體或 MOS 電晶體）的占空比控制。升壓穩壓器 IC 可用於設計 SEPIC 電源電路。要留意，這種拓撲在電路中需要添多額外元件（電感和電容），如圖 7 所示。

Zeta：Zeta 轉換器與 SEPIC 轉換器類似，如 LT8461 Zeta 和 SEPIC 拓撲的簡化原理圖（圖 7）所示，都需要兩個電感（L1A 和 L1B）、兩個開關（Q1 和 D1）和一個電容器（CF）。Zeta 轉換器能夠產生正或負輸出電壓，此

小知識：右半平面零點 (RHPZ)

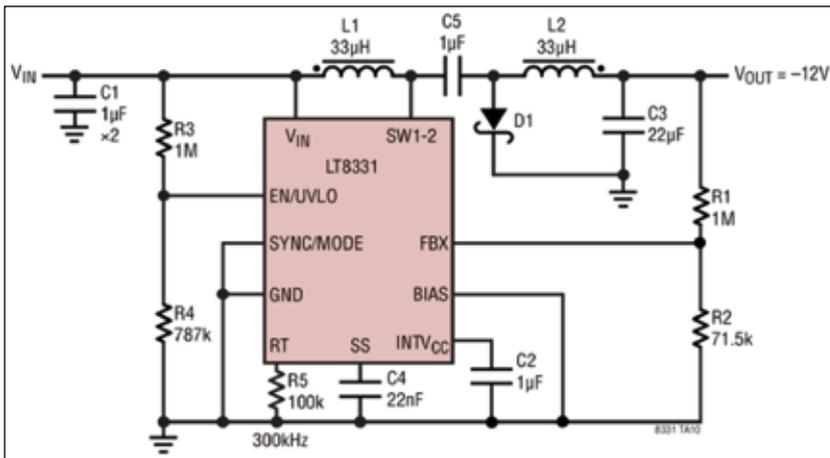
含有右半平面零點 (RHPZ) 的切換式 DC-DC 變換器發生占空比突變時，暫態過程會出現負調現象，該現象會導致系統暫態性能變差，負調持續時間段系統易形成正回饋而出現不穩定現象，傳統的頻域法無法直接進行控制器設計，因此對其進行控制較最小相位系統困難的多。

圖 7：Zeta 和 SEPIC 拓撲結構



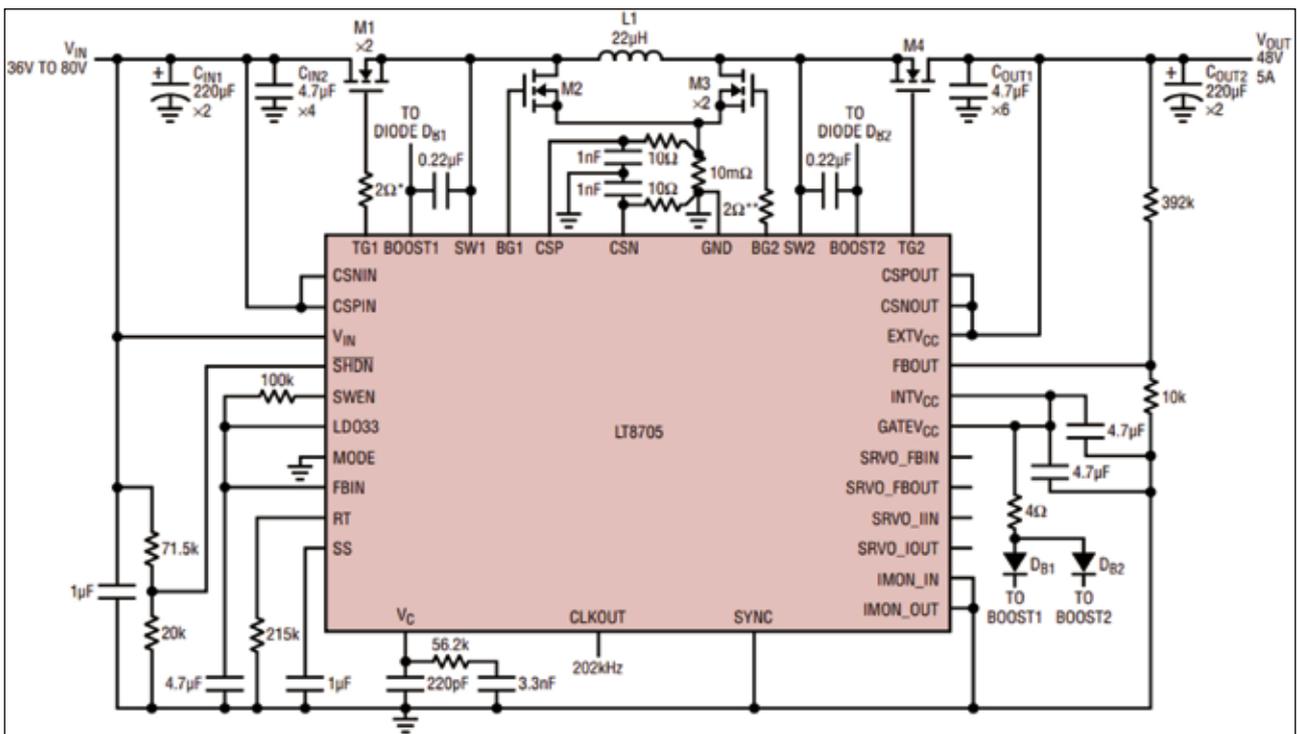
圖片來源：ADI

圖 8：LT8331 實現的 Ćuk 拓撲結構



圖片來源：ADI

圖 9：LT8705 實現的四開關降壓-升壓拓撲結構



圖片來源：ADI

外，它沒有右半平面零 (RHPZ) 問題存在，進而簡化了調節迴路。

Ćuk：Ćuk 轉換器可將正輸入電壓轉換為負輸出電壓。它使用兩個電感器，一個在輸入側，一個在輸出側，因此輸入和輸出側的雜訊非常低。可是，支援這種拓撲結構的切換式電源轉換器的元件並不多，因為調節回路需要一個負電壓回饋接腳。如 ADI 的 LT8331，它需要在輸入和輸出之間使用兩個電感器和一個耦合電容器 (C5)。耦合或阻塞電容器從電路的輸入側接收能量並將其傳輸到電路的輸出側。在穩態條件下 (即供電後)，該電容器兩端的電壓是恒定的，大約等於 V_{IN} (如圖 8 所示)。

四開關降壓-升壓：這種類型的轉換器近年來變得非常流行。四開關降壓-升壓從正輸入電壓中提供正輸出電壓，該輸入電壓可能高於

或低於調整後的輸出電壓。這類型的轉換器能夠提供更高的電源轉換效率並且只需要一個電感器，所以該轉換器可以取代了 SEPIC 的設計。如 ADI 的 LT8705，它是一款同步四開關降壓 - 升壓控制器，運用輸入和輸出側各兩個開關，使用穩健的同步開關拓撲結構，以高效率為恒壓或恒流應用提供高功率輸出 (如圖 9 所示)。

切換式穩壓器選料上的考慮

要選擇一款切換式穩壓器，要瞭解系統上需要升壓或降壓，接下來要如上文所述決定選擇哪種拓撲類型，對於其他基本參數，例如“輸出類型”、“電流 - 輸出”及“電壓 - 輸入 (最大 / 小值)”的要求也十分重要。

想要快速鎖定合適的切換式穩壓器，工程師只需在 Digi-Key 官網的搜尋引擎中輸入關鍵字「DC DC 穩壓器」或「穩壓器」，進入「電源管理 (PMIC) - 穩壓器 - DC DC 切換式穩壓器」後，產品的詳細參數便一目了然了。

總結

本篇文章重溫了電源穩壓器的基本知識點，包括：

- 瞭解切換式電源的特點，以及常見電路拓撲的特性以及可以為系統帶來的不同優點
- 低壓降線性穩壓器與切換式電源的基礎知識

- 電流隔離的概念，其可使電路更安全，抗干擾能力較強，更容易實現升降壓轉換

- 如何更便捷地實現多路輸出和很寬的輸入電壓範圍，以及如何利用不同拓撲讓電路設計更加多樣化。

DigiKey 官網目錄中「DC DC 切換式穩壓器」產品類別中，包含了各類型拓撲類型的產品，參數篩選清單清晰易用，能夠滿足工程師選料所需。

更多與電源穩壓器相關的技術資訊，請點選以下連結參閱相關文章，也歡迎大家在文末留言討論。

- 線性穩壓器的冷卻要求：<https://forum.digikey.com/t/topic/19745>

- 在 DC-DC 切換式穩壓器中產生 PWM 訊號的電壓和電流模式控制：<https://www.digikey.tw/zh/articles/voltage-and-current-mode-control-for-pwm-signal-generation-in-dc-to-dc-switching-regulators>

- 瞭解線性穩壓器的優點與缺點：<https://www.digikey.tw/zh/articles/understanding-the-advantages-and-disadvantages-of-linear-regulators>

- 使用低 EMI 的切換式穩壓器，最佳化高效率的電源設計：<https://www.digikey.tw/zh/articles/use-low-emi-switching-regulators-high-efficiency-power-designs>

- LDO 的基礎知識與如何應用來延長可攜式、穿戴式裝置的電池續航力：<https://www.digikey.tw/zh/articles/the-basics-of-lmos-and-how-to-apply-them-to-extend-battery-life-in-portables-and-wearables> GTA

圖 10：Digi-Key 官網的切換式穩壓器篩選選項

