

# 從正電壓電源產生負電壓： 市場需求和解決方案

■作者：Erik Lamp / ADI 資深產品應用工程師  
Randyco Prasetyo / ADI 首席產品應用工程師

對於物聯網 (IoT) 裝置、工業感測器、儀錶、精密設備和醫療設備而言，同時需要正電壓和負電壓是很常見的情況。通常，正負電壓必須是對稱的，並且由單一電源提供。本文將闡釋市場趨勢和技術要求，並對各種解決方案進行對比分析，目的為使得銷售團隊具備有效推廣產品所需的深刻見解。

## 術語定義

**轉換器**：一種電源管理積體電路，其內部可能整合了開關，也可能沒有整合開關。

**穩壓器**：一種整合了開關的轉換器。

**控制器**：一種使用外部開關的轉換器。

## 市場

在衆多電子設計中，電源部分常常需要提供一個或多個負電壓，且通常與相應的對稱正電壓共同存在。一些典型的應用示例如下：

- ▶ 電動車充電器和牽引逆變器的閘極驅動器；  
例如，用於驅動氮化鎵 (GaN) 場效應電晶體 (FET) 和隔離閘極雙極電晶體 (IGBT)。
- ▶ 用於工業和醫療應用的高性能類比數位轉換器 (ADC)、數位類比轉換器 (DAC) 以及軌對軌運算放大器 (運放)。
- ▶ 消費產品的 LCD 顯示幕。
- ▶ 驅動 (雪崩) 光電二極體時。

## ► X 光等醫療應用。

下文詳細介紹了此類設計的兩個典型方框圖。

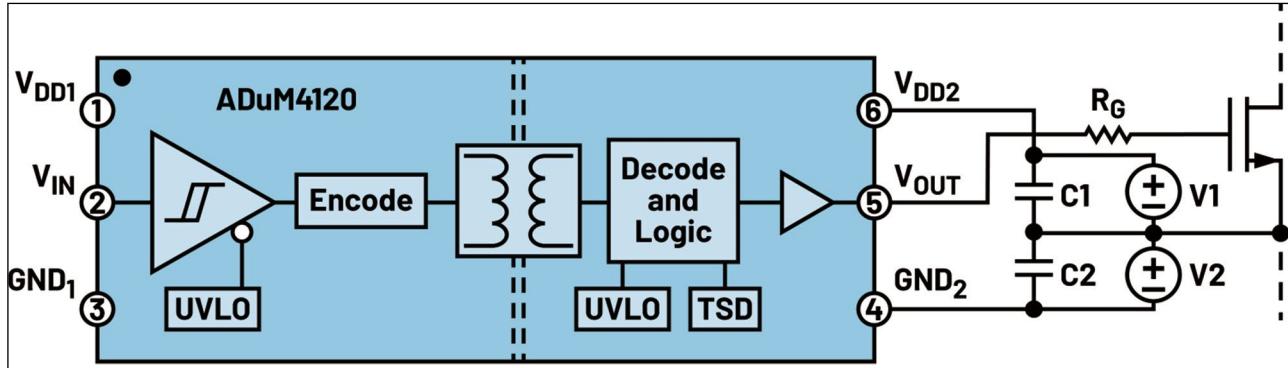
## 閘極驅動器

對於大功率開關電源和馬達驅動器而言，通常需要一個負驅動電壓，原因如下：

- ▶ 系統的印刷電路板 (PCB) 佈局可能並非緊密佈置且耦合繁密，其電路接地端通常會與來自系統各處的雜訊相耦合，並且可能會在接地位準附近波動。
- ▶ 諸如 IGBT、碳化矽 (SiC) 或 GaN FET 等主要功率元件，除非它們都封裝在一個模組內，否則通常與閘極控制電路相距可達數釐米之遠。因此，來自閘極驅動器的訊號在到達功率元件時可能會發生失真，需要額外的安全餘裕。
- ▶ GaN FET 等先進功率元件通常具有較低的導通閾值，這使其對閘極電壓振盪更為敏感。一些高壓 GaN FET 可能具有較高的閘漏電容 (CGD) 或較大的製程偏差範圍，這可能會導致米勒效應引發的導通現象。在這種情況下，建議最終客戶施加一個負閘極電壓，以確保元件保持關斷狀態。對於某些類型的 IGBT，需要施加一個負電壓才能使其完全關斷。

其中一個例子是使用隔離式驅動器

圖 1：雙極性電源的設置示例。

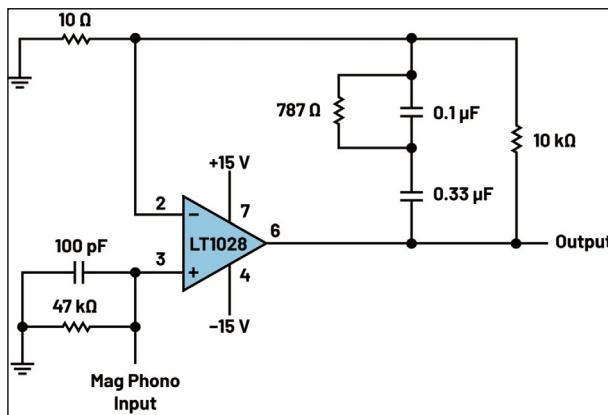


ADuM4120。在這類應用中，功率元件由正電壓(如V1)和負電壓(如V2)驅動，如圖1所示。

### 軌對軌運算放大器

對於各種訊號處理應用，當輸出需要實現接近電源的寬範圍變化，輸入需要圍繞基準電壓源擺動，或是對精度有著極高要求時，通常會使用軌對軌運算放大器。光電前置放大器系統的一個典型示例如圖2所示。此種設計需要一個正15V電壓和一個負15V電壓。

圖2：超低雜訊1M TIA光電二極體放大器的典型應用電路。



### 要求

從主電源產生正電壓的積體電路拓撲通常已廣為人知，包括低壓差(LDO)穩壓器、降壓型、升壓型、壓型-升降型等。然而，以往的文獻中並未對負電壓生成方案的選擇與權衡進行深入探討。以下將說明一些相關要求和設計

挑戰。

### 隔離

有時，正負電壓需要與電源隔離，這主要是出於安全方面的考慮，或者是因為不存在公共接地。例如，在電動車動力系統中，12V控制匯流排主要由12V輔助電池供電。為了控制高壓電池，必須進行隔離，這樣一來，任何低壓故障都不會導致安全隱患。通常來說，這樣的12V電壓會在經過電氣隔離後轉換為±5V或±15V，以便為牽引逆變器或充電器中的多個訊號鏈和驅動積體電路供電。其他一些工業逆變器，如光伏逆變器或馬達驅動器，可能也需要進行隔離。

### 精巧尺寸

對於某些應用，如醫療病人監護儀，小型化是一個關鍵設計目標。這類裝置需要透過多個高精度轉換器讀取並放大各種感測器訊號。因此，非常需要一種能產生正負電壓為這些轉換器供電的微型解決方案。

### 效率

對於任何新設計而言，提高效率往往都是目標之一。例如，在運算放大器應用中，一個普遍的趨勢是使用更低的軌電壓，前提是輸出

端沒有明顯的失真，而且如果產生這些軌電壓所消耗的功率更少，效率也就更高。

### 時序和對稱性

對於像是醫用 X 光這類的特殊應用，正負電壓可能並不需要很高的精度，但它們必須是對稱的，且絕對值的差異要極小。因此，最好對正負電壓都進行精準的調節和時序控制。

## 解決方案

解決方案按照複雜程度和總體性能的順序列出，同時也列出它們的優缺點以便進行比較。

### 齊納二極體

一種不使用積體電路來產生正負電壓的簡單方法是使用齊納二極體，如圖 3 所示。在此種解決方案中， $V_3$  源的輸出由  $D_Z$  和  $R_Z$  進行分壓。如果  $V_3$  為 9 V， $D_Z$  是一個 5 V 齊納二極體，那麼閘極將由 +5 V 和 -4 V 的電壓驅動。由於不需要額外的積體電路，這種方法成本較低。然而，這種解決方案效率極低，並且不適用於那些需要幾十毫安培電流以及輸出電壓需精準調節的應用場景。因此，這種拓撲結構並不常用。

### 電荷泵

使用電荷泵是一種將正輸入電壓進行反相

圖 3: 負電壓齊納二極體軌的示例。

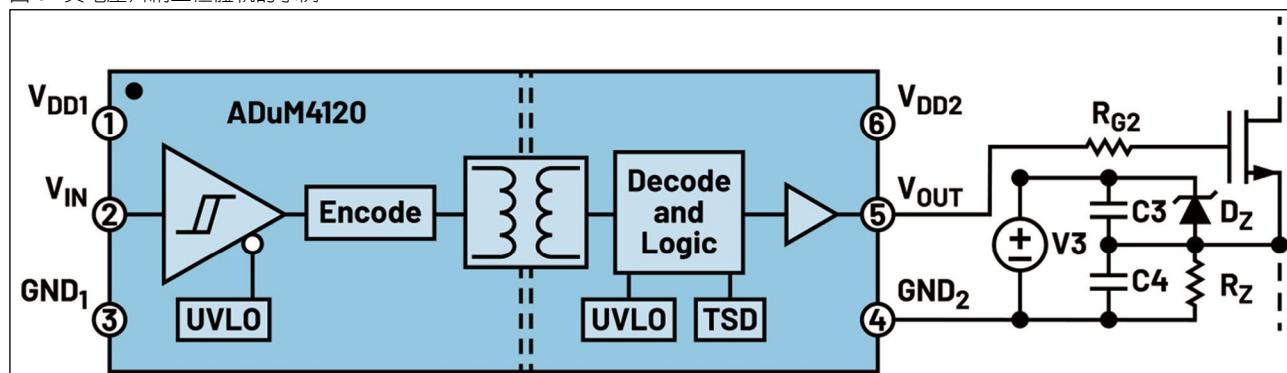
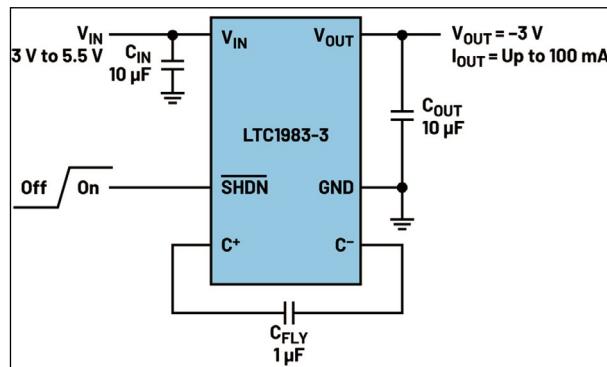


圖 4: 100 mA、-3 V 輸出的 DC-DC 轉換器典型應用電路。

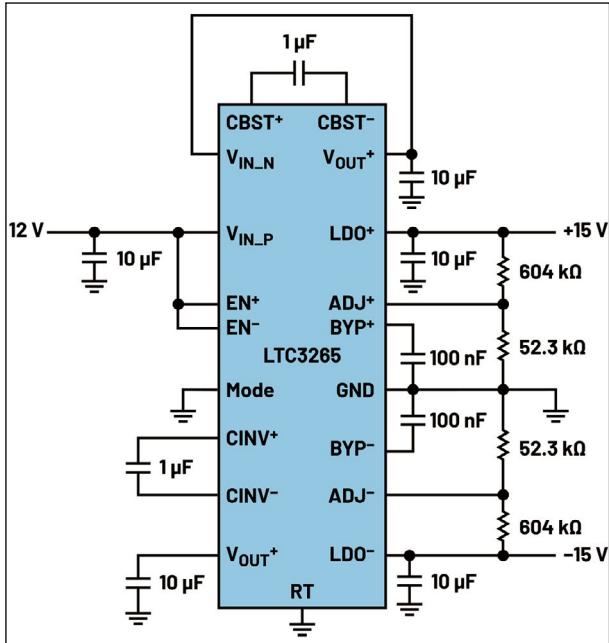


的便捷方法，因為不需要磁性元件。市面上有許多能實現此功能的電荷泵積體電路，並且在不同情況下各有優勢。

對於低功耗需求，ADI 提供了多種穩壓和非穩壓電荷泵，例如圖 4 中的 LTC1983。雖然這種解決方案非常簡單且外型精巧，但缺點在於效率方面，並且可能會產生較高的電磁干擾 (EMI)。此類元件在負載電流方面存在限制，通常用於所需電流小於 100 mA 的應用。

另外，考慮到需要低雜訊 / 低電磁干擾以避免對其他敏感電路產生干擾 (尤其是對於醫療設備、感測和通訊應用而言)，ADI 提供了諸如 LTC3265 之類的產品，在雙電荷泵的每個輸出端都整合了低雜訊 LDO 穩壓器 (見圖 5)。雖然輸出電流限制在 50 mA，但此種解決方案對電磁干擾更為友善，並且僅用一個積體電路就整合了正輸出軌和負輸出軌。由於輸出雜訊極低，在驅動低功耗運算放大器和資料轉換器的

圖 5：單 12 V 輸入產生低雜訊  $\pm 15$  V 輸出的典型應用電路。



精密儀器儀錶應用中非常有用。

在既需要高負載電流的正電壓軌（用於系統供電），又需要較小負載電流的負電壓軌（用於偏置或基準電壓源）的應用中，一個分立的負電壓電荷泵幾乎可以應用於任何降壓型或升壓型穩壓器，且無需額外的積體電路。「使用具有主動放電功能的 MAX17291 升壓轉換器積體電路從正輸入電壓產生負輸出電壓」這篇文章中展示了一個示例電路，使用 MAX17291 搭配外部電路來構成電荷泵。其缺點在於電荷泵的負載調整和動態負載回應能力。

### 反相轉換器

在已知輸入 / 輸出組合且無需精準穩壓的場景中，電荷泵相對更為實用，而相關的雜訊干擾則可透過額外的濾波措施來處理。對於那些輸入或輸出電壓範圍較寬且對穩壓要求嚴格的應用，建議採用基於電感的開關模式拓撲結構。

有幾種此類拓撲結構可以處理正電壓到負電壓的轉換，它們通常都被歸類為反相拓撲結構，但這種歸類方式可能會讓工程師產生混淆。

雖然它們通常都能完成相同的功率轉換任務，但在設計上需要進行權衡取捨。以下是三種典型的拓撲結構：前兩種較為相似；然而，使用降壓型積體電路儘管並非專門為產生負電壓而設計，但它能提供更多的選擇。

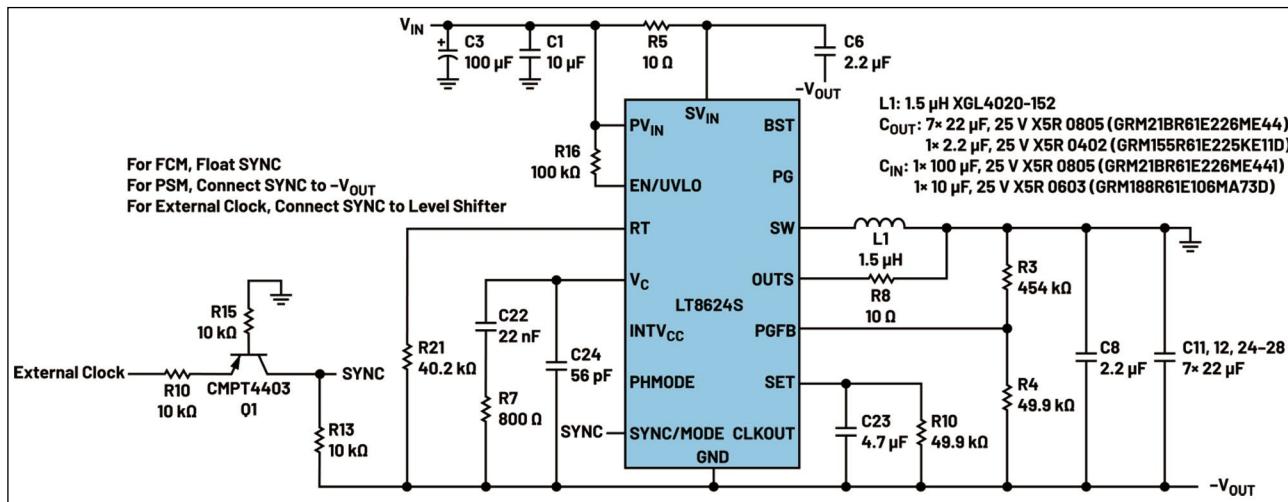
- ▶ 使用降壓型積體電路的反相降壓 - 升壓轉換器
- ▶ 獨立式反相降壓 - 升壓轉換器
- ▶ 雙電感器 (CÜK) 反相降壓 - 升壓轉換器

### 拓撲結構 (1)：使用降壓型積體電路的反相降壓 - 升壓轉換器

當典型的同步降壓轉換器的輸出側與電路接地進行切換時，就會產生一個反相降壓 - 升壓 (IBB) 轉換器，如圖 6 所示。這種方法很受歡迎，因為市面上有許多可供選擇的同步降壓穩壓器或控制器。針對於雜訊敏感型應用而言，ADI 的 Silent Switcher 單片降壓穩壓器，例如採用 Silent Switcher 3 技術的 LT8624S，可配置為 IBB 以產生具有卓越的寬頻和 EMI 雜訊性能的負電壓軌。圖 6 顯示了將 LT8624S 用於 IBB 的轉換器的一個示例電路，詳見「針對雜訊敏感型應用的快速瞬變負電壓軌」這篇文章。為了進行進一步的濾波處理，可以在輸出端增加一個低雜訊的負輸入 LDO 穩壓器。如果在使用這種拓撲結構時需要更高的功率，ADI 提供多種同步降壓控制器可供選擇，並且可以搭配外部 FET 使用。

這裡的不足之處在於，這種積體電路所參考的是降壓轉換器的接地，而非系統接地（系統接地是輸出的正極側）。如果需要微控制器來執行諸如致能、同步之類的功能，或者僅僅是接收 PGOOD 訊號，那麼可能就需要一個外部位準轉換器電路，這可能會不太方便。關於這一類額外位準轉換器電路的示例，可以參閱「產生負電壓——為什麼需要在降壓 - 升壓電路中

圖 6: 使用 LT8624S 降壓型 IC 的 IBB 轉換器。



進行位準轉換」這篇文章，如圖 6 所示。如果需要 PMBus/I<sup>2</sup>C 通訊，則位準轉換器可能無法發揮作用，並且可能需要外部數位隔離器 IC。

如果使用的是無需外部感測或控制的轉換器，那麼將降壓型 IC 用於 IBB 會更受青睞，因為如此會有更豐富的選擇。不管具備何種電壓和電流額定值，所有降壓型負載點轉換器都可以透過這種方式進行配置，但大多數都需要外部位準轉換器以便進行外部控制。

### 拓撲結構 (2)：獨立式反相降壓 - 升壓轉換器

當應用中不希望使用外部位準轉換器時，有兩種解決方案：使用非同

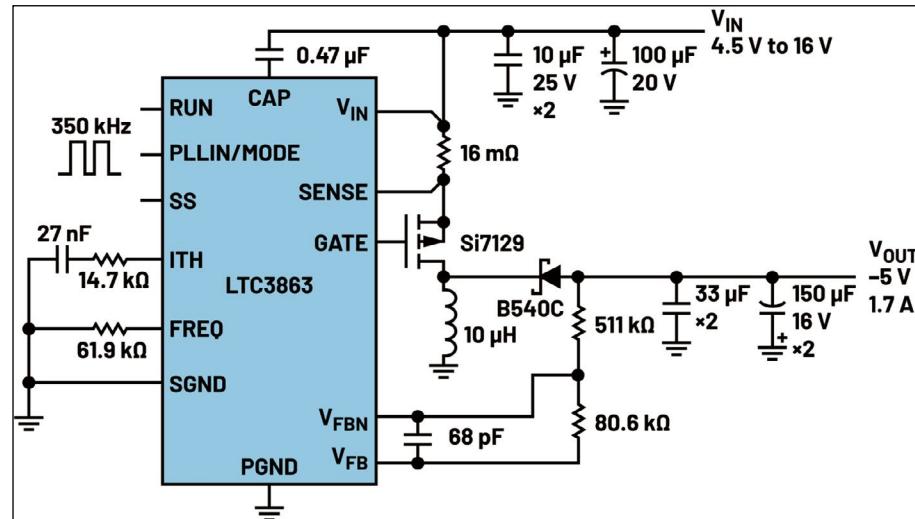
步 IBB，或者將位準轉換器整合到降壓型 IC 中。例如：

► **非同步 IBB**：可以透過使用 PMOS 作為主開關，並採用二極體來取代同步開關，進而設計出非同步 IBB。如此一來，IC 就可以參考系統接地，而無需位準轉換器。在此種情況下，輸出負載的正極側連

接到輸入接地。這裡的 IC 選項可以是如圖 7 所示的 LTC3863。它的效率通常比使用降壓型 IC 要低，因為 PMOS 和二極體所產生的損耗，通常要比基於 NMOS 的同步轉換器更大。

► **整合了位準轉換器的降壓型 IBB**：把降壓型 IC 用於 IBB 時，無需使用外部位準轉換器，而是可以將每個輸入和輸出訊號各自對應的位準轉換器整合到 IC 中。這對於設計師來說十分方便。例如，MAX17577/MAX17578 和 MAX17579/MAX17580 都是基於降壓的 IBB 轉換器，它們在 EN 和 RESET 接腳整合了位準轉換器。

圖 7: 非同步 IBB 轉換器。



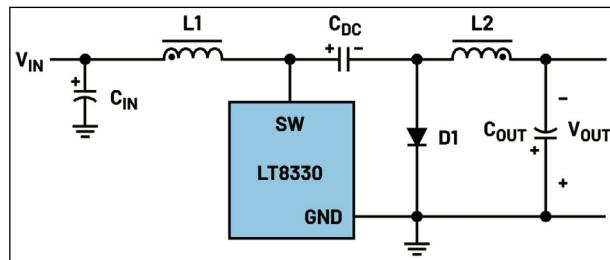
如果需要高功率和高效率，那麼推薦使用 LTC3896。其是一款更為精密的高性能同步開關控制器，並且整合了位準轉換器。儘管其採用 38 接腳 TSSOP 封裝，是相對較大的一款 IC，但它的能源效率非常高，而且兩個開關均支援使用 NMOS。對於功率需要大於 100 W 的場景，建議使用這款元件。

### 拓撲結構 (3)：雙電感 (CÜK) 反相降壓 - 升壓轉換器

當需要考慮開關雜訊問題時，CÜK 轉換器能夠產生負輸出電壓，且其造成的雜訊比 IBB 轉換器要小。這種拓撲結構如圖 8 所示，它包含兩個電感器和一個耦合電容。這種轉換器的優點在於其結構簡單，僅需一個低側開關即可將輸入電壓反相，並且該開關可以是 NMOS，因此效率很高。例如，LT8330 僅需 8 個接腳，而且設計起來並不困難。此 IC 是 ADI 的穩壓器之一，它整合了兩個誤差放大器，因而能夠感測正輸出電壓或負輸出電壓。類似的穩壓器，例如 LT8331、LT8333、LT8334、LT8570 和 LT8580，提供了不同的額定參數和特性，以滿足各種常見的應用需求。

雖然這種拓撲結構確實需要兩個電感器，但若像圖 8 所示那樣將兩個電感器進行耦合，輸出漣波會顯著降低，還可能減小輸出電容的尺寸。此外，由於輸入側和輸出側各有一個電感器，因此電流是連續的，並且整個電路的雜訊也要小於其他拓撲結構。如果需要更大的功

圖 8: 簡化的反相轉換器。



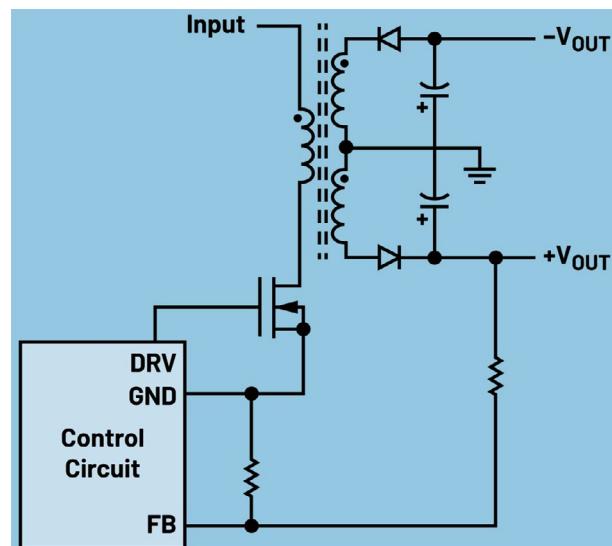
率，採用 LT3758 等具有外部低端 FET 的控制器 IC 可能是一個不錯的選擇。

### 反馳式轉換器

如果出於隔離目的而需要變壓器（例如在反馳式轉換器中），那麼只需在輸出側增加另一個繞組，就能非常容易地產生正負輸出電壓。在這個變壓器上，透過設定多個繞向不同的繞組，並配合使用隔離二極體，就能夠產生正電壓或負電壓，如圖 9 所示。例如，LT8306 無需使用光耦合器來進行回饋，進而節省了物料清單成本。

儘管這種方式很方便，但所產生的負電壓是未經過穩壓的。如果需要穩壓，建議在輸出端增加另一個負輸入 LDO 穩壓器。

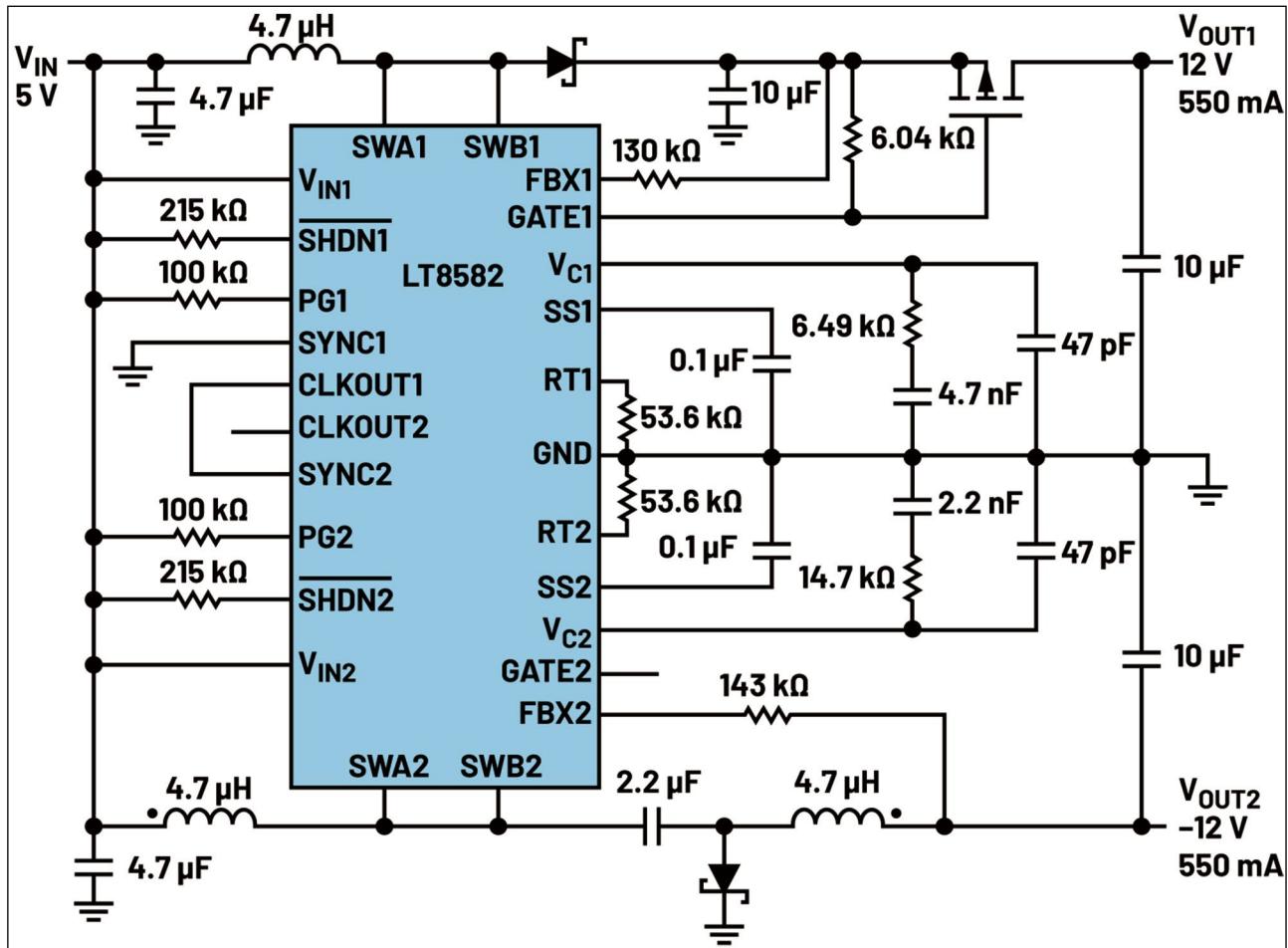
圖 9: 具有多個輸出繞組的典型反馳式轉換器。



### 特殊雙多拓撲結構轉換器

考慮到大多數需要負輸出電壓的應用同時也需要與之互補的正輸出電壓，ADI 提供了多種解決方案。這些方案採用了先前提到的拓撲結構，並且能在一個積體電路內提供兩個或更多的正負電壓。

一些例子如下：

圖 10:5 V 至  $\pm 12$  V 升壓和反相轉換器的典型應用電路。

- 雙 42 VIN、3 A 升壓 / 反相穩壓器 LT8582：
- 雙 50 VIN、2 A 多拓撲結構穩壓器 LT8471：
- 雙 5.5 VIN、2 A/1.2 A 升壓 / 反相穩壓器 ADP5076：
- 3 通道 60 V 隔離式微功率管理單元 ADP1034

### 電源模組解決方案

對於許多希望解決方案尺寸超小，或者想要現成的完全整合式電源解決方案的工程師來說，可以考慮使用微型電源模組。

例如，LTM4655 是一款 40 VIN、雙 4A 反相  $\mu$ Module 穩壓器，具有兩個完全獨立的輸出通道，每個通道都可配置為正輸出或負輸出，並且其低電磁干擾性能已符合 EN550222 B 類

標準，可以節省大量的設計和故障排除工作。

LTM8049 是另一個不錯的選擇，其輸入電壓最高可達 20 V，兩個輸出端的輸出電壓最高可達 +24 V，最低可至 -24 V。

### 結論

在系統中增加負電壓軌並不方便，因此積體電路供應商將「無需負電壓」作為一大優勢進行推廣。例如，GaNFET 製造商正在說服客戶不使用負閘極驅動，而運算放大器製造商則推薦性能更好的單電源運算放大器。然而，在許多先進應用中，對負電壓的需求仍然存在。

表 1 列出了本文提及的一些解決方案的對比情況，以供參考。ADI 製造了數千種適用的

表 1：產生負電壓的各種拓撲結構

拓撲結構	IC 通道	隔離	此拓撲結構的推薦負載電流	效率	穩壓	解決方案成本	雜訊	示例 IC
齊納二極體	0	否	<10 mA	低	否	低	中	N/A
電荷泵	1	否	<100 mA	低	否	低	高	LTC1983
電荷泵 +LDO 穩壓器	2	否	<100 mA	低	否	中	低	LTC3265
反相降壓 - 升壓	1 1	否 否	0.5 A 至 2 A 2 A 至 10 A+	中 高	是 是	中 中至高	低至中 低至中	LTC3863、MAX17579 LTC3896
使用降壓型 IC 的反相降壓 - 升壓轉換器	1	否	0.1 A 至 10 A+	高	是	低至中	低至中	LT8624S
雙電感器反相轉換器	1	否	0.1 A 至 10 A+	高	是	中至高	低	LT8330/LT8331/(CÜK) LT8333/LT8334、 LT8570、LT8580
反馳式	1 或 2	是	0.1 A 至 10 A+	中	否 (2 個繞組以上)	中至高	中至高	LT8306
多拓撲結構轉換器	2 個或以上	否	0.1 A 至 3 A	高	是	中至高	低至中	LT8582、LT8471
電源模組	1 或 2	否	0.1 A 至 10 A+	高	是	高	低至中	LTM4655、LTM8049

積體電路，這些產品具有不同的拓撲結構和不同的額定參數，因此所推薦的限制條件和一般特性可能帶有主觀性，並且因各個產品型號的不同而有所差異。如果您是一名設計工程師，在閱讀本文時，除了在 [analog.com](http://analog.com) 上進行搜尋之外，也歡迎隨時聯繫當地的 ADI 業務辦事處諮詢最適合您設計需求的產品。

## 參考文獻

- Ryan Schnell, 「用雙極性方法驅動單極性閘極驅動器」，《類比對話》，第 52 卷第 10 期，2018 年 10 月。
- 「使用具有主動放電功能的 MAX17291 升壓

轉換器積體電路從正輸入電壓產生負輸出電壓」，ADI。

- Frederik Dostal, 「產生負電壓——為什麼需要在降壓 - 升壓電路中進行位準轉換」，《類比對話》，第 57 卷第 2 期，2023 年 5 月。
- 內部電源開關升壓穩壓器，ADI。
- Thomas Schaeffner, “The Best Way to Generate a Negative Voltage for your System”，Newelectronics，2018 年 1 月。
- Frederik Dostal, “The Art of Generating Negative Voltages”，Power Systems Design，2016 年 1 月。

**COMPOTECHAsia 敦書**  
**每週一、三、五與您分享精彩內容**  
<https://www.facebook.com/lookcompotech>