

最佳化高效率電源設計

如何使用低 EMI 開關穩壓器？

■作者：Steven Keeping

開關穩壓器的效率更高，但是電源中快速開關電晶體會產生 EMI 的問題，必須在設計中權衡考慮。本文簡述了開關穩壓器在可攜式設計中的優勢，以及透過濾波電路減輕 EMI 的重要性，並以 Allegro Microsystems、Analog Devices 和 Maxim Integrated 等公司的產品為例，介紹了內置 EMI 濾波器的開關穩壓器，以及應用其簡化抑制 EMI 設計，最佳化高效率電源設計的方法。

對於要實現電池供電或分散式電源系統的設計人員來說，使用低壓降 (LDO) 穩壓器還是開關穩壓器往往是個問題。開關穩壓器的效率相對更高，可謂是一項優勢，尤其是對於電池供電產品。然而，電源中快速開關電晶體產生的 EMI 才是關鍵權衡要素——在高度整合的緊湊型設計中，EMI 可能會衍生成更嚴重的問題。

輸入和輸出濾波電路可減輕 EMI 的影響，但會增大電路尺寸、增加成本和複雜性。新一代的整合式模組化開關穩壓器解決了這些問題，這些開關穩壓器可提供各種內置技術來抑制 EMI，同時不影響穩壓器的性能或效率。

本文簡要說明了開關穩壓器在可攜式設計中佔據的優勢，以及濾波電路的重要性。此外，還以 Allegro Microsystems、Analog Devices 和 Maxim Integrated 的產品為例，介紹了內置 EMI 濾波器的

開關穩壓器，以及用其簡化功率傳輸的方法。

為何要在可攜式設計中使用開關穩壓器？

效率高、功率消耗低 (降低熱管理難度)、功率密度大，是選擇開關穩壓器而非 LDO 的主要原因。在大部分負載範圍內，商用開關穩壓器模組的效率 (即輸出功率 / 輸入功率 $\times 100$) 通常約為 90% 至 95%，遠高於同等的 LDO。此外，開關穩壓器既能升壓、降壓，也可提供反相電壓，因此在靈活性上也勝過 LDO。

開關穩壓器的核心是脈衝寬度調製 (PWM) 開關元件，包含一兩個金屬氧化物半導體場效電晶體 (MOSFET)，以及與之配對的一兩個電感器用於能量儲存。開關穩壓器的工作頻率決定了單位時間內的開關迴圈次數，而 PWM 訊號的占空比 (D) 決定了輸出電壓 (根據 $V_{OUT} = D \times V_{IN}$)。

在可攜式設計中，開關穩壓器的高效率雖是一項優勢，卻也存在不少待權衡要素，包括成本、複雜性、尺寸、負載瞬變回應慢以及低負載下的低效率 (儘管正在逐步改進)。另一項主要設計挑戰是應對功率電晶體開關產生的 EMI。其開關動作會引起電路其他部分的電壓和電流過衝，進而導致輸入輸出電壓和電流紋波，並在開關頻率處 (及其倍數) 產生瞬態能量尖峰。電壓紋波在 PWM“開啓”週期

圖 1：開關穩壓器的輸出電壓紋波波形圖顯示了瞬態尖峰是 EMI 的主要來源。



圖片來源：Analog Devices

結束時達到峰值 (圖 1)。

EMI 管理策略

如需降低因穩壓器功率 FET 開關引起的 EMI，在輸入和輸出端添加電阻電容 (R-C) 吸收電路是一種行之有效的方法。該電路有助於濾除能量尖峰，減小電壓和電流紋波，進而降低 EMI。在好的設計中，輸出電壓為 2 至 5V 的開關電源最好能將電壓紋波峰峰值降至 10 至 50mV，並使瞬態尖峰最小化。

濾波電路元件的選型是一項棘手的工作，尤其是輸入和輸出端的大容量電容器，因為需要在零組件尺寸、成本 (以及對穩壓器瞬態回應和迴路補償的影響) 與電壓峰峰值、電流紋波和 EMI 抑制之間進行權衡。

借助根據關鍵公式的一些成熟技術是不錯的切入點。輸入電壓紋波包括 ΔV_Q (由輸入電容器放電產生) 和 ΔV_{ESR} (由輸入電容器的等效串聯電阻 (ESR) 產生)。如果已指定輸入端的電壓紋波最大峰峰值，分別透過公式 1 和公式 2 即可估算大容量電容器的所需輸入電容 (C_{IN}) 和 ESR：

公式 1：

$$C_{IN}[\mu F] = \frac{I_{LOAD(MAX)}[A] \times \left(\frac{V_{OUT}[V]}{V_{IN}[V]} \right)}{\Delta V_Q[V] \times f_{SW}[MHz]}$$

公式 2：

$$ESR[m\Omega] = \frac{\Delta V_{ESR}[mV]}{\left(I_{LOAD(MAX)} + \frac{\Delta I_{p-p}}{2} \right)[A]}$$

其中：

$I_{LOAD(MAX)}$ 是最大輸出電流

ΔI_{p-p} 是電感器電流峰峰值

V_{IN} 是輸入供電電壓

V_{OUT} 是穩壓器輸出電壓

f_{SW} 是開關頻率

同樣，如果已指定輸出端的電壓紋波最大峰峰值，則分別透過公式 3 和公式 4 即可確定大容量電容器的電容和 ESR：

公式 3：

$$C_{OUT}[\mu F] = \frac{\Delta I_{p-p}[A]}{8 \times \Delta V_Q[V] \times f_{SW}[MHz]}$$

公式 4：

$$ESR[m\Omega] = \frac{2 \times \Delta V_{ESR}[mV]}{\Delta I_{p-p}[A]}$$

請務必注意， ΔV_{ESR} 和 ΔV_Q 不可直接相加，因為兩者彼此相位相異。如果設計人員選擇陶瓷電容器 (ESR 通常較低)，則主要是 ΔV_Q ；若選擇電解電容器，則主要是 ΔV_{ESR} 。

快速負載瞬變期間輸出電壓與期望輸出的可接受偏差，也會影響輸出電容容量和 ESR 電阻值的選擇。具體而言，在開關穩壓器控制器增大 PWM 占空比來回應負載瞬變前，輸出電容器必須能夠在瞬變期間支援負載電流。如需計算負載階躍期間最小輸出偏差所需的輸出電容和 ESR，可分別使用公式 5 和公式 6：

公式 5：

$$ESR[m\Omega] = \frac{\Delta V_{ESR}[mV]}{I_{STEP}[A]}$$

公式 6：

$$C_{OUT}[\mu F] = \frac{I_{STEP}[A] \times t_{RESPONSE}[\mu s]}{\Delta V_Q[V]}$$

其中：

I_{STEP} 是負載階躍

$t_{RESPONSE}$ 是控制器的回應時間

這些計算雖有助於簡化相應元件的選擇以管理電壓和電流紋波及瞬態尖峰，但設計人員仍必須考慮電容器的耗散功率 (P_{CAP})。計算公式如下：

$$P_{CAP} = I_{RMS}^2 \times ESR$$

其中 I_{RMS} 是 RMS 輸入紋波電流。

該公式表明在給定 ESR 的情況下，內部溫升與紋波電流的平方成正比。在用於減小較大的紋波電

流時，可能會造成電容器明顯發熱，如果散熱不及時，則電容器的電解液將逐漸蒸發，使其性能下降直至完全失效。為了避免出現這種情況，工程師必須選擇表面積較大、價格更昂貴的元件以促進散熱。

使用低 EMI 穩壓器

儘管輸入和輸出濾波可減小電壓和電流紋波，但是選擇一款既符合規格，又能實現最小紋波高度峰峰值的開關穩壓器才是好的設計習慣。藉此減少濾波電容器因功率耗散而產生的應力，進而使用更為小巧、便宜的元件。

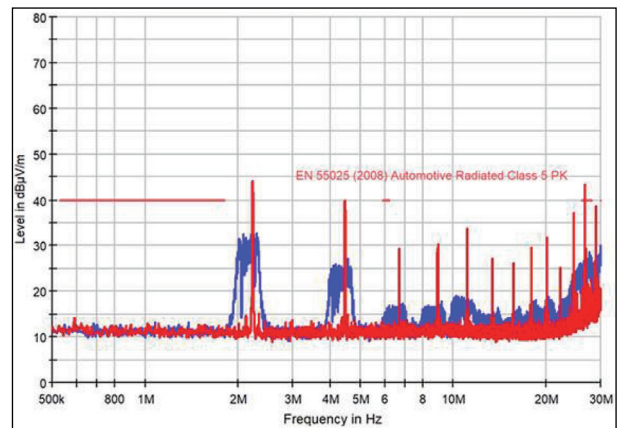
實現最小電壓和電流紋波的一種技術是採用電壓模式控制方案。在此方案中，透過將控制電壓施加到比較器的一個輸入端，並將時鐘產生的固定頻率鋸齒電壓（或“PWM 斜坡”）施加到另一輸入端來產生 PWM 訊號。相較於另一種可選的電流模式控制方案，該技術在實現 EMI 最小化方面性能更佳。前者更容易加劇 EMI 程度，因為功率級產生的雜訊往往會進入控制反饋迴路。（參閱 Digi-Key 文庫文章《DC-DC 開關穩壓器中用於 PWM 訊號發生的電壓和電流模式控制》）

除了考慮採用電壓模式控制外，多家晶片供應商還提供了許多方法來從內部減小電壓和電流紋波的幅度。Allegro Microsystems 的 A8660 同步降壓轉換器正是一個實例。這款高階元件通過了汽車 AEC-Q100 認證。該穩壓器的輸入電壓 (V_{IN}) 範圍為 0.3 至 50V，可調輸出電壓範圍為 3 至 45V，可設定基本頻率 (f_{OSC}) 範圍為 200kHz 至 2.2MHz。此外，A8660 還提供一系列保護功能，包括在元件退出壓降狀態時，透過軟恢復來防止 V_{OUT} 過衝和電壓尖峰干擾。

穩壓器實現 EMI 最小化的關鍵在於一種稱作 PWM 基本頻率抖動的技術。啟用後，內部設置的“抖動掃描”會系統地將 f_{OSC} 改變 $\pm 10\%$ ，進而使開關頻率能量分散。抖動調製頻率 (f_{MOD}) 為 12kHz，以三角調製波形進行掃描。

在啟用和禁用抖動的情況下，A8660 的傳導和

圖 2：使用固定基本頻率（紅色）的開關穩壓器與採用頻率抖動（藍色）的穩壓器之輻射發射頻譜對比。工作參數： $f_{OSC} = 2.2\text{MHz}$ ， $V_{IN} = 12\text{V}$ ， $V_{OUT} = 3.3\text{V}$ ，負載 = 3A。



圖片來源：Allegro Microsystems

輻射發射頻譜對比如圖 2 所示。兩個測試設置採用的外部零組件和印刷電路板佈局完全相同。

對於工作頻率低於 AM 無線電頻段 ($f_{OSC} < 520\text{kHz}$) 的設計，A8660 的同步輸入可用於 f_{OSC} 及其諧波的頻移，以進一步降低 EMI。只需將外部時鐘連接至 SYNC_{IN} 接腳，並將 A8660 的基本頻率由 f_{OSC} 的 1.2 倍增至 1.5 倍即可實現。

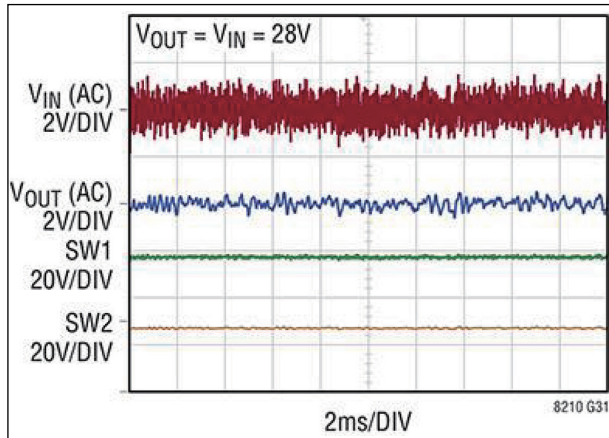
Analog Devices 的 LT8210IFE 同步降壓／升壓控制器也具有三角頻率調製方案。在這種情況下，LT8210IFE 可將 f_{SW} 由標稱設定頻率緩慢擴展至設定值的 112.5%，並解擴恢復。

此外，該元件還具有“直通”功能可暫停開關，進而消除開關損耗以降低 EMI 並提高效率。該穩壓器的輸入範圍為 2.8 至 100V，輸出為 1 至 100V。輸出電壓精度為 $\pm 1.25\%$ ，反向輸入保護高達 -40V。

啟用直通模式時，穩壓器的降壓和升壓調節迴路可獨立運行。透過將降壓調節模式預設輸出電壓 $V_{OUT(BUCK)}$ 設置成高於升壓調節模式預設輸出電壓 $V_{OUT(BOOST)}$ ，即可使用獨立的誤差電流來產生直通窗口。直通模式對輸出電壓紋波的影響如圖所示（圖 3）。

V_{IN} 在 $V_{OUT(BOOST)}$ 與 $V_{OUT(BUCK)}$ 之間時，輸出電壓追蹤輸入電壓。一旦 V_{OUT} 趨近於 V_{IN} ，LT8210 就會進入低功率消耗狀態（直通模式），即開關 A 和 D

圖 3：在直通模式下，即使面對高雜訊輸入源（紅色跡線），LT8210 穩壓器亦可減小輸出電壓紋波（藍色跡線）。



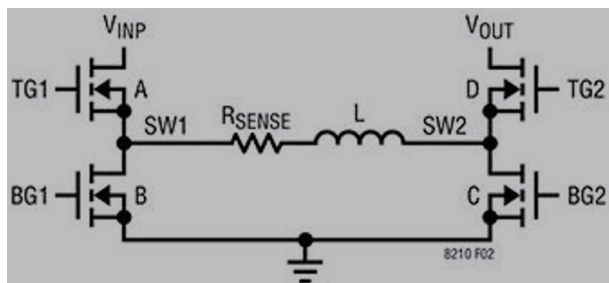
圖片來源：Analog Devices

持續導通，而開關 B 和 C 關斷。 V_{OUT} 超出 V_{IN} 達到設定百分比時，開關 A、C 和 D 關斷，直至放電使輸出電壓與 V_{IN} 幾乎相等時，才重新連接輸出。如果處於（非開關）直通窗口內時輸入出現正瞬變，使得 V_{IN} 超出 V_{OUT} 達到設定百分比，則開關將重新導通，以防電感器電流中出現較大幅度暫態振盪。此時，輸出電壓將逐漸接近輸入電壓，方式類似於軟啟動，而 V_{OUT} 趨近於 V_{IN} 時，開關 A 和 D 將再次持續導通。開關拓撲如圖 4 所示。

Maxim Integrated 的低 EMI 產品是 MAX15021ATI+T 降壓開關穩壓器。輸入電壓範圍為 2.5 至 5.5V，並具有兩路輸出，每路輸出都可由 0.6V 調節至輸入電壓大小。該穩壓器的基本頻率範圍為 500kHz 至 4MHz，可透過單個電阻器進行調節。

除了支援電壓模式控制方案以減小電壓紋波外，MAX15021 穩壓器還可使用 180° 異相時鐘訊號來工

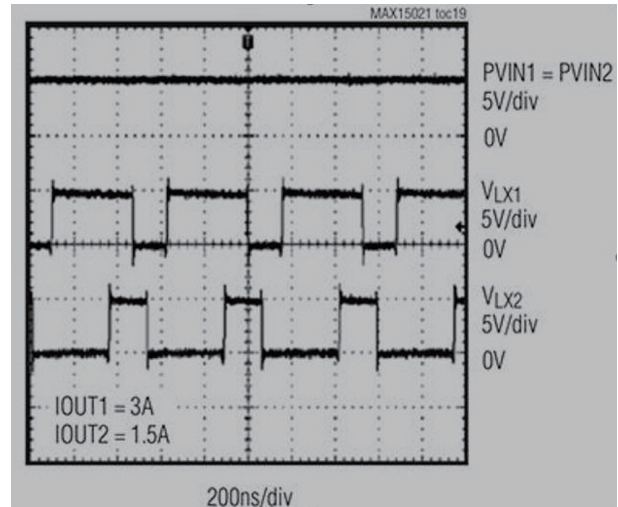
圖 4：LT8210 穩壓器的開關。在直通模式下，開關 A 和 D 持續導通，而開關 B 和 C 關斷。



圖片來源：Analog Devices

作（圖 5）。此外，該元件的開關頻率可調節，最高可達 4MHz，藉此可顯著減小 RMS 輸入紋波電流。而輸入電流峰值的減小（紋波頻率增高），使所需輸入旁路電容容量減小，進而縮小所需電容器的尺寸。

圖 5：MAX15021 雙通道穩壓器可實現 180° 異相工作以抑制 EMI。



圖片來源：Maxim Integrated

小結

在高效率至關重要的應用中，模組化開關穩壓器是電壓調節的不錯選擇。但是，相較於 LDO 等替代解決方案，權衡要素包括電壓和電流紋波，以及穩壓器開關元件產生的瞬態電壓尖峰。若不經濾波，雜訊會產生 EMI，進而影響靠近穩壓器的敏感晶片。

雖然使用輸入和輸出濾波電路等成熟設計技術可降低 EMI，但也需要借助大容量電容器來解決瞬態尖峰和紋波問題，同時還會產生較大耗散功率，導致零組件過熱。

不過，工程師現可使用採用各種內置技術的新一代模組化開關穩壓器，來減小電壓和電流紋波以及瞬態尖峰，甚至在添加濾波電路前就可以抑制 EMI。透過在設計中使用這些穩壓器，工程師能縮小輸入和輸出端的大容量電容器尺寸，進而縮小濾波電路的尺寸並降低成本。 CTA