

使用第二級濾波器來減少電壓漣波

Rich Nowakowski
Product Marketing Engineer

Sarmad Abedin
Power Design Services Engineer

簡介

具備整合式點對點序列通訊或類比前端 (AFE) 的進階處理器和晶片系統 (SoC) 需要具備低輸出電壓漣波的電源供應器，以維持訊號完整性並提升性能。處理器負載點 (POL) 電源的輸出電壓漣波需求可低於 2-mV (約為一般設計漣波的十分之一)，對同步降壓轉換器造成設計上的沉重限制。由於處理器的輸出電流要求超出線性後穩壓器的能力，因此採用第二級濾波器、較高切換頻率和額外輸出電容將可大幅減少 POL 的漣波。同步降壓轉換器可搭配多種不同控制架構使用，每種架構都有其獨特方法，確保進行低漣波電壓設計時的穩定性。本文將比較三種不同控制架構：外部補償電壓模式、固定開啟時間與可選補償電流模式，以達到 1-mV 輸出電壓漣波與使用相同電氣規格的測試資料，並比較輸出電壓漣波、解決方案大小、負載暫態與效率。

選擇應用並放置邊界

我們共設計與製造三種不同的電源供應器，來展示各控制模式在類似操作條件下的效能。在每個設計中，輸入電壓為 12 V，輸出電壓為 1 V，各裝置的輸出電流則可達 15-A。這些需求在為整合敏感類比電路且需低輸出電壓漣波的高效能 SoC 供電時十分常見。

為滿足濾波器設計與性能預期，允許漣波電壓為輸出電壓的 $\pm 0.15\%$ 或 $\pm 1.5\text{ mV}$ (3 mVpp)。我們的比較包括三個 TI DC/DC 轉換器：一個 15-A D-CAP3™ 降壓轉換器 (TPS548A28)、一個 20-A 內部補償進階電流模式 (ACM) 降壓轉換器 (TPS543B22) 和一個 15-A 電壓模式降壓轉換器 (TPS56121)。我們在轉換器的能力範圍內盡可能選擇彼此相近的輸出電壓、輸出電流和操作頻率，以支援類似的第二級濾波器元件。

設計第二級濾波器

即使以低等效串聯電阻 (ESR) 陶瓷輸出電容器，使用降壓轉換器的電感器和電容器 (LC) 輸出濾波器來實現低輸出電壓漣波的做法仍較不實際。設計人員可能需要使用第二級 LC 濾波器，才能將輸出漣波降至 5-mV 以下。如需有關第二級濾波器設計或漣波測量技術設計的詳細資訊，請參閱資源章節。第二級濾波器的電感器值可利用 **方程式 1** 計算並解出 L_2 。電感器 L_2 為第二級電感器， C_1 為降壓轉換器的主要級輸出電容器， C_2 則為第二級電容器網路。三種設計皆使用相同的第二級濾波器 (如 **表 1** 所示)，佔用電路板面積為 92mm^2 (如 **圖 1** 所示)。

$$\text{Switching Frequency} = 1 / \left(2\pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_s}, \text{ where } C_s = 1 / \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right) \quad (1)$$

零件編號	控制架構	切換頻率	第二級電感	第二級電容
TPS548A28	D-CAP3	800 kHz	2 x 0.68 μH	4x 100 μF + 0.1 μF
TPS543B22	ACM	1000 kHz	2 x 0.68 μH	4x 100 μF + 0.1 μF
TPS56121	電壓模式	500 kHz	2 x 0.68 μH	4 x 100 μF + 0.1 μF

表 1. 轉換器控制架構和第二級濾波器。

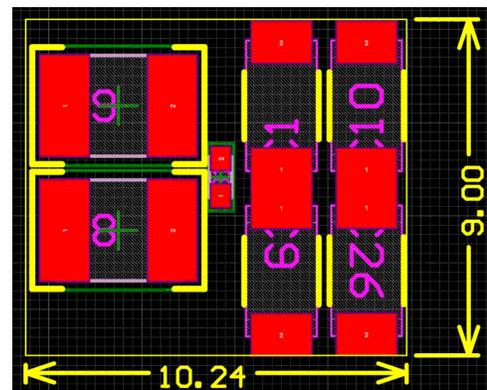


圖 1. 第二級過濾器電路板面積 92mm^2 。

選擇第二級電感器值 (L2) 並完成元件組裝後，下一步是增加第二級電感和電容重新補償 DC/DC 轉換器的控制迴路，以確保穩定性。請務必注意各控制架構都有其獨特技術，可視需要在增加第二級濾波器後重新補償控制迴路。評估各控制架構的輸出電壓漣波、效率損失及穩定性，並為結果進行總結。

電壓模式控制架構

我們透過將輸出電壓與參考電壓的電壓誤差訊號與恆定鋸齒斜率波形相比較，以完成具電壓模式控制架構的脈衝寬度調變 (PWM)。斜率由來自振盪器的時脈訊號開始。

TPS56121 採用外部補償的 Type-3 補償處理雙極功率級，讓轉換器可在加入第二級濾波器後重新補償。在加入第二級濾波器後調整外部電阻器和電容器值，以確保穩定性。輸出電壓峰間漣波在無額外濾波器的情況下為 4.8-mV。在使用額外濾波器的情況下，輸出電壓漣波為 1.9-mV (如 **圖 2** 所示)。在此情況下，TPS56121 設計無需迴路補償調整即可確保穩定性。**圖 3** 為具有 10-A 負載步進的負載暫態波形，執行第二級濾波器後的輸出電壓波形沒有不穩定的跡象。

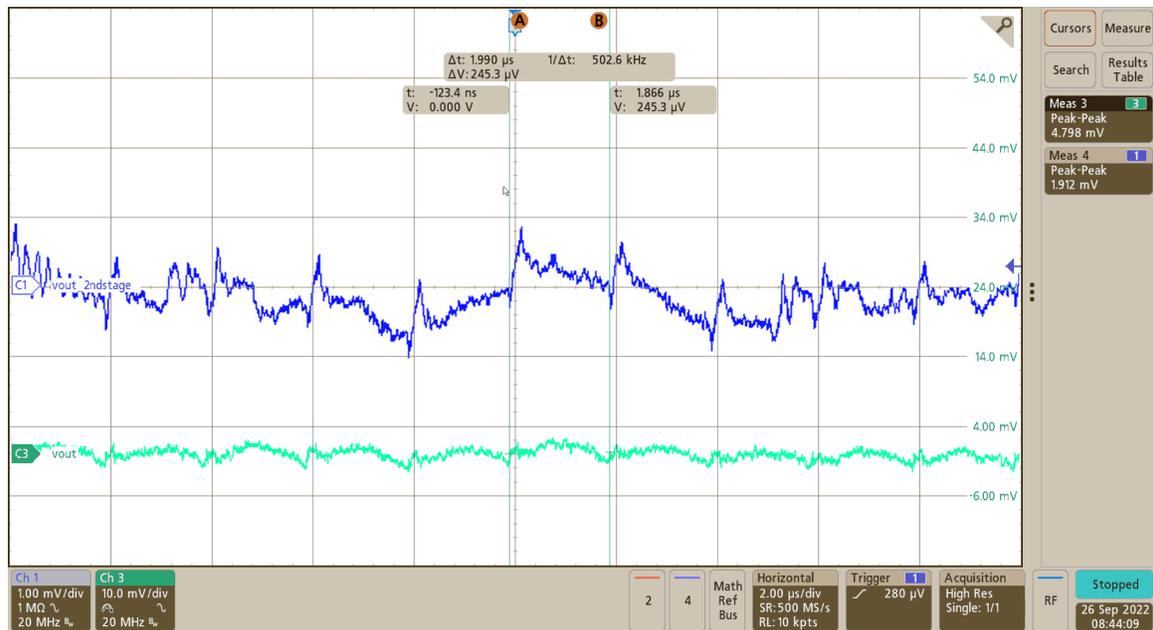


圖 2. 有無額外第二級濾波器下的 TPS56121 輸出電壓漣波。

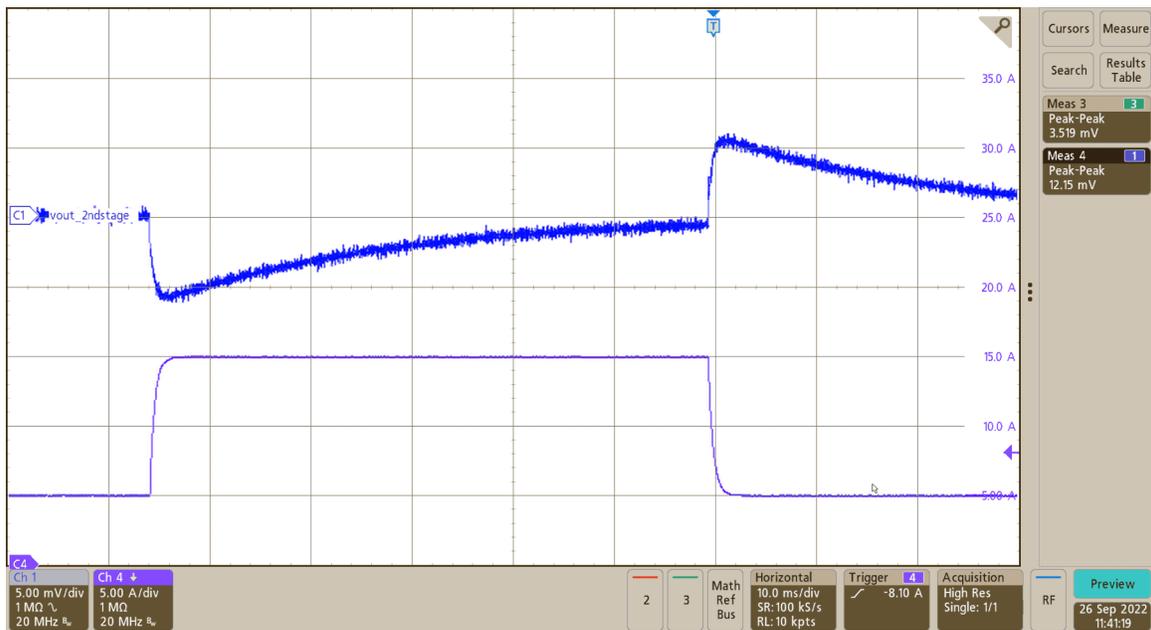


图 3. 使用電壓模式控制的 TPS56121 暫態響應。

D-CAP3 控制架構

D-CAP3 使用單次計時器來產生與輸入電壓及輸出電壓成正比的開啟時間脈衝。當下降的回饋電壓等於參考電壓時，將會產生新的 PWM 啟動脈衝。輸出電感器負責模擬斜率。內部漣波注入電路的訊號會直接饋入比較器並消除其偏移電壓，進而可減少電容器 ESR 的輸出電壓漣波需求。D-CAP3 和其他固定開啟時間轉換器的優點之一，是不需要額外迴路補償電路。但如果裝置支援此功能，控制

迴路的能力可由可調式斜率進行調整，並可在輸出電壓回饋電阻分壓器網路增加前饋電容。**TPS548A28** 輸出電壓峰間漣波在無額外濾波器的情況下為 7.6-mV。在使用額外濾波器的情況下，輸出電壓漣波為 2.3-mV (如 图 4 所示)。在此情況下，**TPS548A28** 設計無需進行調整即可確保穩定性。图 5 為與前一個轉換器具有相同 10-A 負載步進的負載暫態波形，執行第二級濾波器後的輸出電壓波形沒有不穩定的跡象。

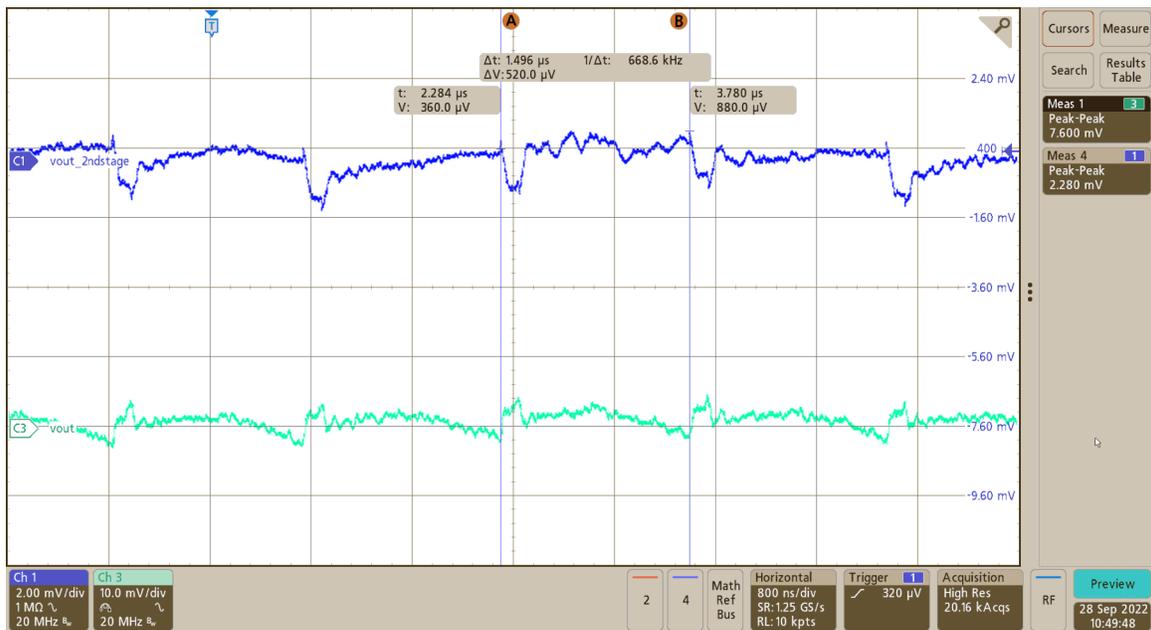


图 4. 有無額外第二級濾波器下的 TPS548A28 輸出電壓漣波。

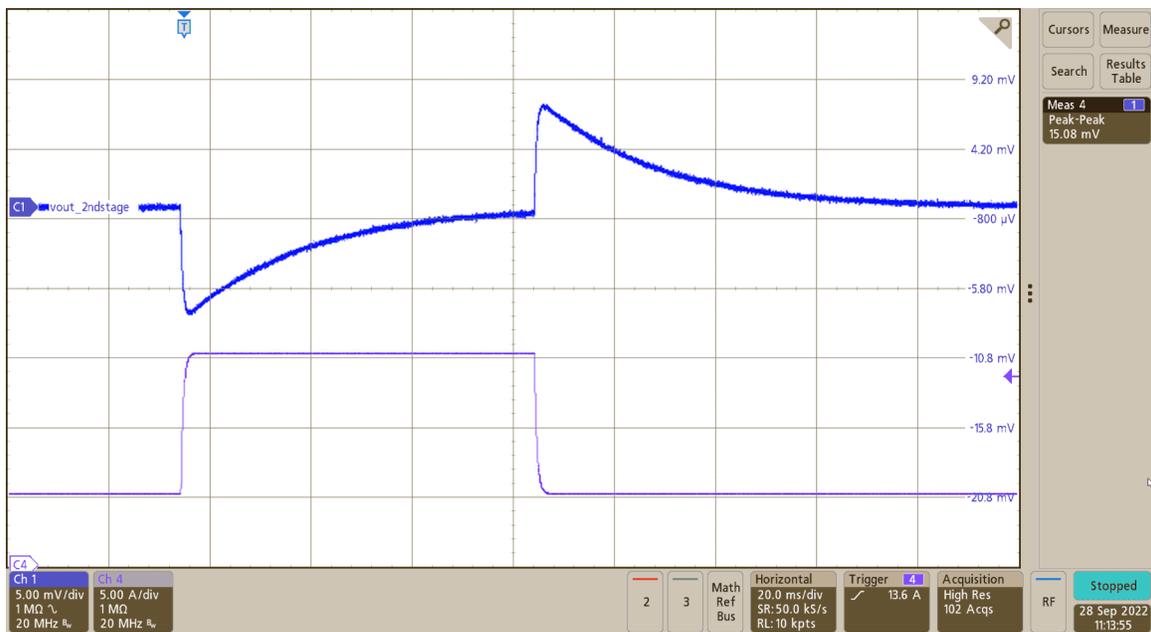


图 5. 使用 D-CAP3 控制的 TPS548A28 暫態響應。

進階電流模式 (ACM) 控制架構

內部補償 ACM 為一以鏈波為基礎的峰值電流模式控制機制，使用內部產生的斜率來代表電感器電流。此控制模式可在非線性控制模式 (如 D-CAP3) 快速暫態響應與其他外部補償固定頻率控制架構 (如電壓模式控制) 的廣泛電容穩定性間提供平衡。ACM 是較新的控制架構，其以單一電阻

器補償迴路，而非透過電阻器與電容器網路。TPS543B22 有三個可選 PWM 斜率選項，可在執行第二級濾波器時將控制迴路性能最佳化。有趣的是，我們注意到其評估模組在電路板上有電容器和電感器錫墊，可方便地放入二級濾波器元件。TPS543B22 輸出電壓峰間漣波在無額外濾波器的情況下為 7.4-mV。在使用額外濾波器的情況下，輸出電壓漣波為 1.3-mV (如 图 6 所示)。TPS543B22 設計無需

進行斜率調整即可確保穩定性。圖 7 為與前一個轉換器具
有相同 10-A 負載步進的負載暫態波形，執行第二級濾波
器後的輸出電壓波形沒有不穩定的跡象。

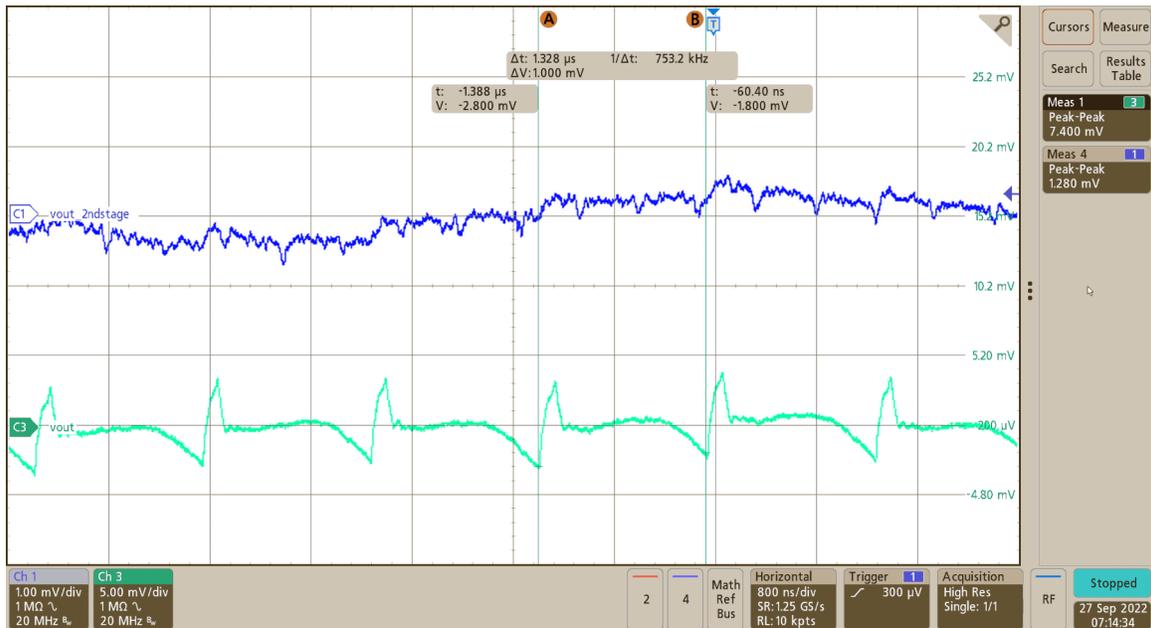


圖 6. 有無額外第二級濾波器下的 TPS543B22 輸出電壓漣波。

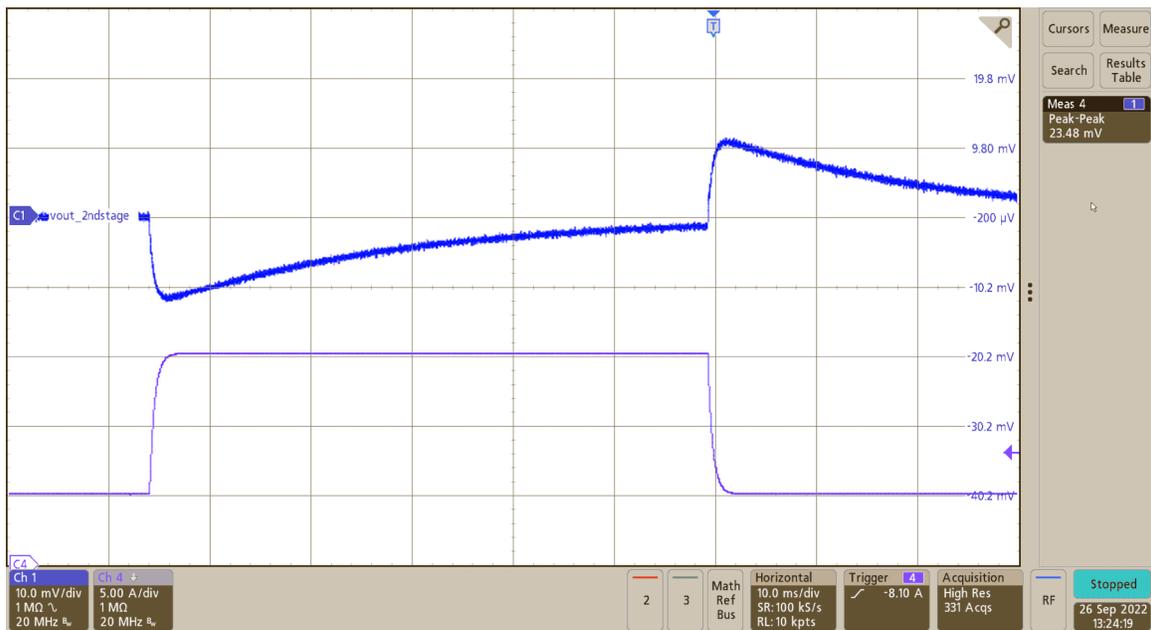


圖 7. 使用 ACM 控制的 TPS543B22 暫態響應。

效率損失

在有無其他第二級濾波器的情況下測量各 DC/DC 轉換器
的全負載效率，以比較功率損耗。結果如表 2 所示。第二

級濾波器會產生可忽略的功率損耗及效率損失。由於各
DC/DC 轉換器都有獨特的功率 MOSFET，導致效率結論
不準確，因此針對缺陷及功率損耗差異進行量測。設計人

員負責決定在進行輸出電壓漣波提升時，產生的效率損失與額外需要的 92mm² 電路板空間是否值得。

過去設計人員採用額外的低壓降 (LDO) 穩壓器，對 DC/DC 轉換器的輸出電壓進行後穩壓，並實現低輸出電壓漣波。如果設計人員偏好使用 LDO 而非第二級濾波器，則可將 4-A **TPS7A54** 並聯，以提供高達 8-A 的結果。舉例來說，如果 LDO 有 175-mV 壓降，兩個 LDO 將在 8-A 耗散 1.4-W，第二級濾波器則耗散 0.02-W。LDO 的輸出電壓漣波雜訊較低，只有 4 μ V，但

如果第二級濾波器為 SoC 和 AFE 提供可接受的低輸出電壓漣波，優點是設計體積縮小、功率損耗與元件成本降低。

P/N	I _{out} (A)	濾波器	效率	功率損耗 (W)
TPS543B22	15	主要	86.43%	2.358
		主要 + 次要	86.33%	2.378
		差異	-0.1%	-0.02
TPS548A28	15	主要	83.98%	2.829
		主要 + 次要	83.87%	2.850
		差異	-0.11%	-0.021
TPS56121	15	主要	89.19%	1.834
		主要 + 次要	89.34%	1.806
		差異	-0.15%	-0.028

表 2. 效率與功率損耗比較。

結論

第二級濾波器是一款設計簡單、體積小巧、高效且低成本的解決方案，可為高電流負載提供低輸出電壓漣波。雖然沒有能夠適用各種設計情況的完美控制模式，但您可在許多降壓轉換器控制架構中採用第二級濾波器。若您以網路介面卡 SoC 或使用 AFE 的遠端無線電單元進行設計，第二級濾波器將提供比標準降壓轉換器更低的漣波。表 3 整理出漣波及與各裝置相關的效率和尺寸優缺點。

裝置	電流能力 (A)	控制架構	漣波電壓 (mV)	濾波器尺寸	功率損耗損失 (W)
TPS543B22	20	ACM	1.3	92mm ²	0.020
TPS548A28	15	D-CAP3	2.3	92mm ²	0.021
TPS56121	15	電壓模式	1.9	92mm ²	0.028

表 3. 漣波、尺寸和效率優缺點。

參考

- 德州儀器：[用電訣竅：設計第二級 LC 濾波器](#)
- 德州儀器：[減少切換穩壓器輸出的雜訊](#)
- 德州儀器：[控制模式快速參考指南 - 降壓非隔離式 DC/DC](#)

相關網站

- [TPS548A28](#) - 具有遠端感測功能和 3-V LDO 的 2.7-V 至 16-V、15-A 同步降壓轉換器
- [TPS543B22](#) - 4-V 至 18-V 輸入、進階電流模式、20-A 同步 SWIFT™ 降壓轉換器
- [TPS56121](#) - 4.5-V 至 14-V、15-A 同步 SWIFT™ 降壓轉換器
- [TPS7A54](#) - 4-A、低 VIN (1.1-V)、低雜訊、高準確度、超低壓降電壓穩壓器

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated