

Technical Article

GaN 開關整合如何在 PFC 中實現低 THD 與高效率



Brent McDonald

由於使用傳統的連續導通模式 (CCM) 控制，因此需要使用符合成本效益的解決方案，以在輕負載下以峰值效率改善功率因數校正 (PFC)，同時縮減被動元件，也變得越來越困難。工程師正在對複雜的多模解決方案進行重大研究，以解決這些疑慮 [1]、[2]，而這些方法非常有吸引力，因為其可讓您縮小電感器的尺寸，同時還可在較輕負載下透過軟性切換來提升效率。

不過在這篇用電訣竅中，我將介紹可實現高效率與低總諧波失真 (THD) 的新方法，此方法不需要使用複雜的多模控制演算法，並且可在所有操作條件下實現零切換損耗。此方法使用高性能氮化鎵 (GaN) 開關，並具備可指出開關是否於零電壓切換 (ZVS) 開啟的整合式旗標。此方法可在所有操作條件下實現高效率 ZVS，同時迫使 THD 降至極低。

拓撲結構

本系統使用的拓撲結構是整合式三角電流模式 (iTCM) 圖騰柱 PFC [3]。對於高功率與高效率系統而言，圖騰柱 PFC 可針對傳導損耗提供顯著優勢。此拓撲結構的 TCM 版本透過確保在開關開啟之前，電感器電流可一律維持足夠的負值，以強制執行 ZVS [4]。圖 1 以圖示顯示圖騰柱 PFC 的 iTCM 版本。

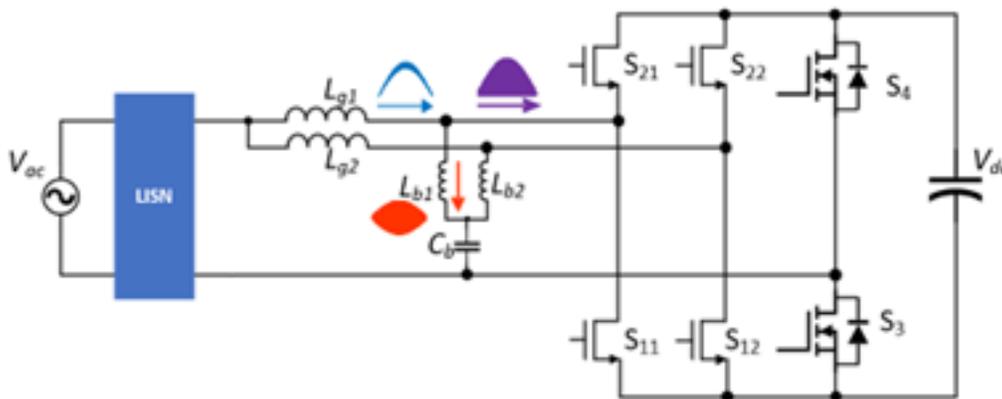


圖 1. iTCM 拓撲結構，顯示 AC 線路頻率電流包絡。

TCM 轉換器和 iTCM 轉換器之間的差異是存在 L_{b1} 、 L_{b2} 和 C_b 。在正常操作期間， C_b 間的電壓等於輸入電壓 V_{ac} 。以 180 度異相運作的兩個相位會充分利用漣波電流抑制，並減少 C_b 中的均方根電流應力。 L_{b1} 和 L_{b2} 的尺寸僅可處理 TCM 操作所需的高頻率 AC 漣波電流。如此一來，在 TCM 中使用的電感器即無需 DC 偏壓，如 [4] 中所定義。在存在 ZVS 所需的高通量擺幅時， L_{b1} 和 L_{b2} 的鐵氧體磁芯有助於確保低損耗。 L_{g1} 和 L_{g2} 的值大於 L_{b1} 和 L_{b2} (最大大 10 倍)，這可防止大部分高頻率電流流入輸入來源，從而降低電磁干擾 (EMI)。此外， L_{g1} 和 L_{g2} 中的漣波電流減少，即可使用低成本的核心材料。圖 1 也以圖示顯示了數個主要分支的漣波電流包絡。

控制

德州儀器 (TI) TMS320F280049C 微控制器和 LMG3526R030 GaN 場效電晶體 (FET) 可協助進行控制。這些 FET 具備整合式零電壓偵測 (ZVD) 訊號，可隨時在開關於 ZVS 開啟時進行宣告。微控制器使用 ZVD 資訊以調整切換時序參數，以在電流剛好足以達到 ZVS 的時開啟開關。為簡單起見，圖 2 以圖示顯示單相 iTCM PFC 轉換器。表 1 定義此圖中使用的關鍵變數。微控制器使用的演算法可對系統的精確微分方程組求解。這些方程式使用的條件可在兩個開關上強制執行 ZVS，並迫使電流等於電流命令。只要就兩個開關而言，系統以正確的 ZVS 量運作，方程式即準確無誤。正確運作時，演算法可產生實現 0% THD 的時序參數和最佳的 ZVS 量。為了協助實現 ZVS 條

件，每個開關 (S_1 和 S_2) 都會以逐週期方式向微控制器回報各自的 ZVS 開啟狀態。在圖 2 中， $V_{hs,zvd}$ 和 $V_{ls,zvd}$ 代表 ZVD 報告。

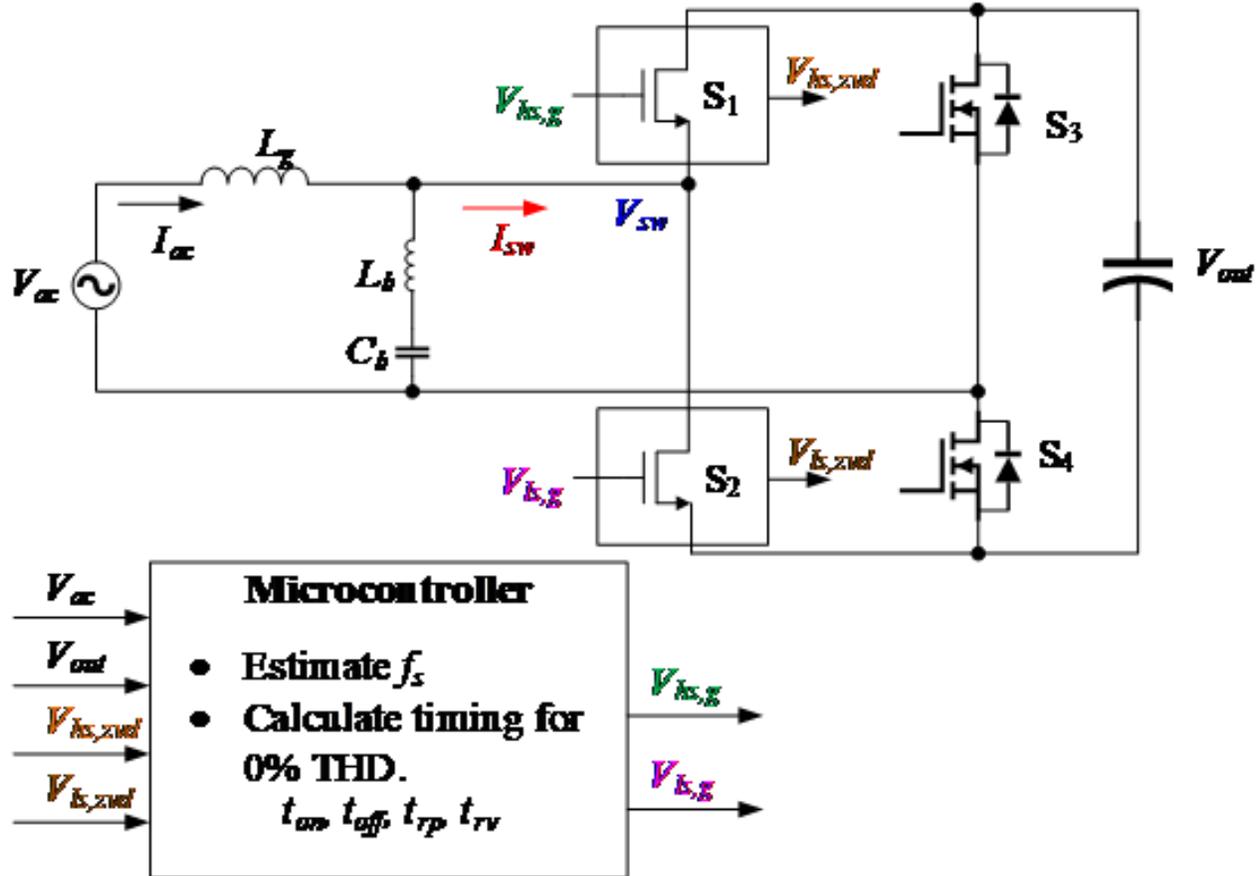


圖 2. 具有控制訊號的單相 iTCM 電路圖。

表 1. 切換時序參數和定義。

Timing parameter	Definition
f_s	Switching frequency
t_{on}	This is the control switch on time; during the positive half cycle, the control switch is S_2 ; during the negative half cycle, the control switch is S_1
t_{off}	This is the off time of the control switch
t_{rp}	This is the dead time between the turnoff of the control switch and the turnon of the synchronous rectifier
t_{rv}	This is the dead time between the turnoff of the synchronous rectifier and the turnon of the control switch

圖 3 以圖示顯示 ZVD 時序調整流程。在每個切換週期期間，微控制器會根據 ZVD 訊號的累積記錄來計算切換時序參數 (t_{on} 、 t_{off} 、 t_{rp} 和 t_{rv})。圖 3b 顯示了以理想頻率運作的系統。前述的「理想」意味著 THD 為 0%，且高壓側與低壓側 FET 均具有完美的 ZVS 量。圖 3a 顯示了當操作頻率低於理想頻率 50 kHz 時會發生的情況。此時可發現高壓側 FET 會失去 ZVS (失去高壓側 ZVD 訊號即指出此情況)，而低壓側 FET 的負電流則高於達到 ZVS 所需的負電流。如此會損失效率並導致功率因數失真。在操作頻率高於理想頻率 50 kHz 時，則會發生圖 3c 的情況。在此情況下，高壓側 FET 具有 ZVS，但低壓側 FET 會失去 ZVS。同樣地，這會明顯地損失效率並出現失真情況。

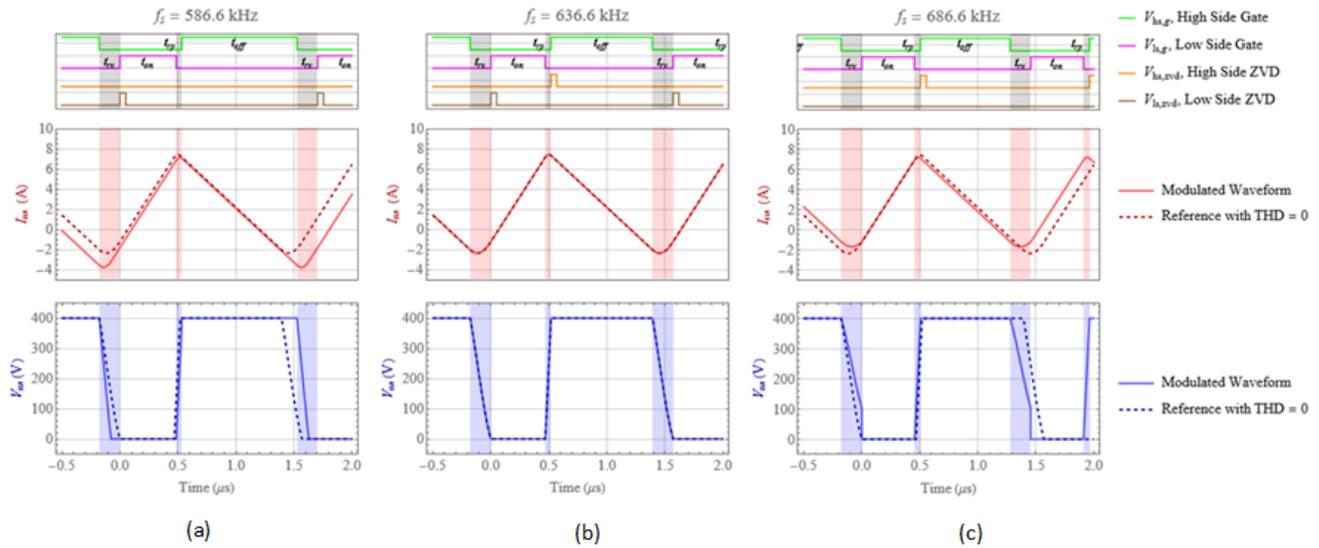


图 3. ZVD 行為，分別具有低 f_s (a)；理想 f_s (b)；和高 f_s (c)。

根據是否存在 ZVD 訊號而定，控制器可以增加或降低頻率，以將系統推至最佳操作點。如此一來，控制作業就會如同試圖找出最佳操作頻率的積分器一樣運作。當系統剛好停留在每個週期都可勉強達到 ZVS 的閾值上時，就會出現最佳狀態。

原型性能

图 4 顯示的原型，是使用我至今討論的拓撲結構和演算法所建置。

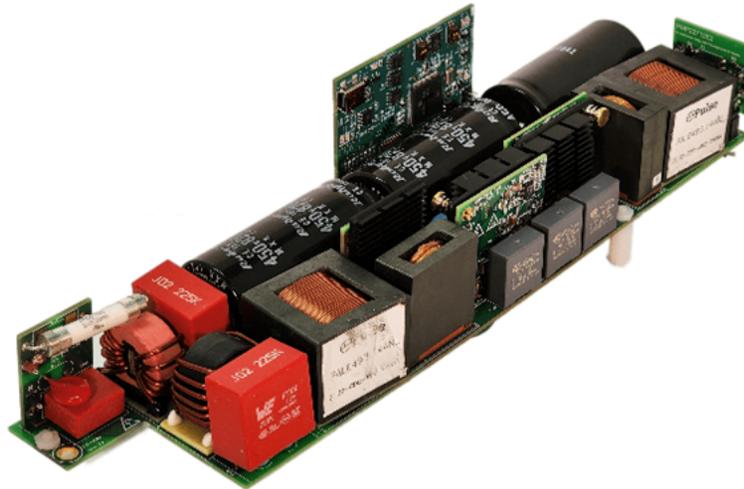


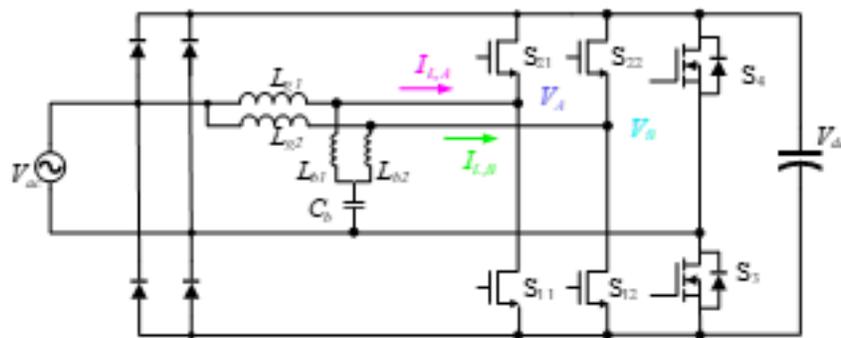
图 4. 功率密度為 120 W/in^3 的 400-V、5-kW 原型。

表 2 總結了原型的規格和重要元件值。

表 2. 系統規格和重要元件

Parameters	Value
AC input	90 V-264 V
Line frequency	50-60 Hz
DC output	400 V
Maximum power	5 kW
Holdup time at full load	20 ms
L_g , low-frequency inductor	140 μ H
L_b , high-frequency inductor	14 μ H
C_b , high-frequency blocking capacitor	1.5 μ F
THD	Open Compute Project (OCP) v3
EMI	European Standard 55022 Class A
Operating frequency	Variable, 75 kHz-1.2 MHz
Microcontroller	TMS320F280049C
High-frequency GaN FETs (S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{21})	LMG3526R030
Low-frequency silicon FETs (S_3 , S_4)	IPT60R022S7XTMA1
Internal dimensions	38 mm \times 65 mm \times 263 mm
Power density	120 W/in ³

图 5 顯示原型的量測節點，图 6 則以圖示顯示在全功率 (5 kW) 下運作的原型系統波形。開關節點電流 $I_{L,A}$ 和 $I_{L,B}$ 是各自分支在 L_g 和 L_b 的電流和。圖形的放大部分顯示正半週期期間的波形細節。電流波形具有理想的三角形，且負電流剛好足以達到 ZVS，如開關節點電壓 V_A 和 V_B 所示。此外，電流波形的正弦包絡顯示 THD 偏低。


图 5. 原型測量節點

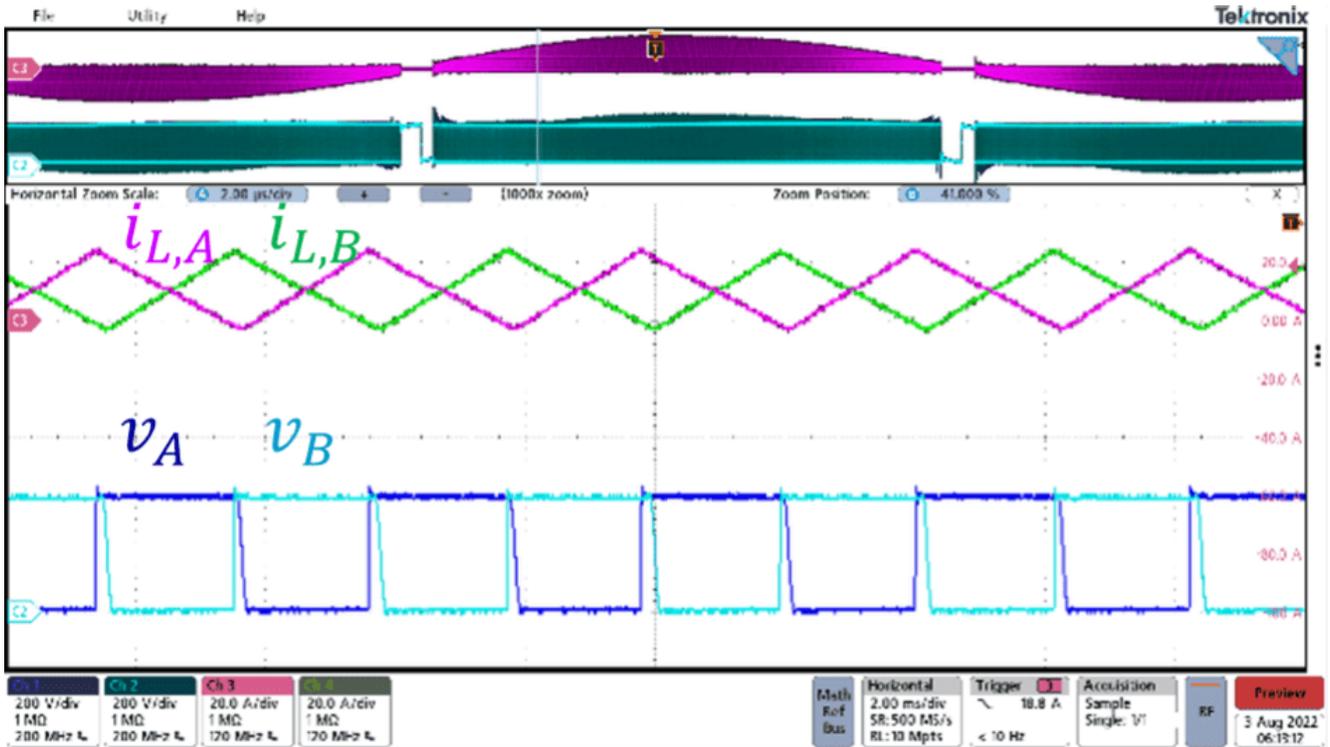


图 6. 在全功率下運作的原型系統波形 ($V_{in} = V_{out}/2$ 、負載 = 5 kW、 $V_{in} = 230 V_{ac}$ 、 $V_{out} = 400 V$)。

图 7 顯示在負載範圍中所測量的效率與 THD。效率峰值高於 99%，且幾乎整個負載範圍的效率峰值均高於 98.5%。THD 的最大值為 10%，且在大部分負載範圍中均低於 5%。為了將性能最佳化，單元相位會以約 2 kW 切減或增加相位。

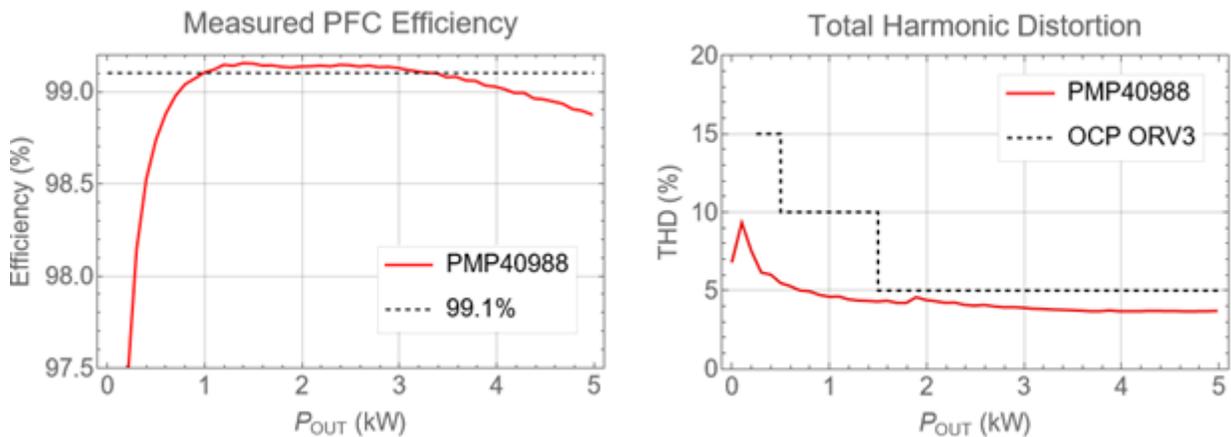


图 7. 在負載範圍中的原型效率和 THD。

讓圖騰柱 PFC 實現高效率與低 THD

您可使用 ZVD 訊號來控制圖騰柱 PFC 轉換器的操作頻率，以實現高效率與低 THD。如需有關此方法的詳細資訊及系統的模擬模型，請參閱[可變頻率、ZVS、5-kW、GaN 架構、二相圖騰柱 PFC 參考設計](#)。

相關內容

- [用電訣竅 #114](#)：潛在韌體錯誤可能導致控制不穩定
- [用電訣竅 #113](#)：8 W 以下的兩種簡單隔離式電源選項
- [用電訣竅 #112](#)：用於故障測試的板載設備
- [用電訣竅 #111](#)：為何協作、行動機器人必須具備電流感測功能
- [結合 PFC 圖騰柱架構與 GaN，實現高功率與效率](#)
- [可實現高效率電源轉換的 GaN 電晶體：降壓轉換器](#)

參考

1. Fernandes、Ryan 和 Olivier Trescases。「具備數位峰值電流調變的多模式 1-MHz PFC 前端」出版於《IEEE Transactions on Power Electronics》第 31 冊第 8 期 (2016 年 8 月)：第 5694-5708 頁。數位物件識別碼：10.1109/TPEL.2015.2499194。
2. Lim、Shu Fan 和 Ashwin M. Khambadkone。「輕負載狀態下具備更高效率與功率因數的升壓 PFC 多模式數位控制方案」發表於 2012 年第二十七屆 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (2012 年 2 月 5-9 日)，第 291-298 頁。數位物件識別碼：10.1109/APEC.2012.6165833。
3. Rothmund、Daniel、Dominik Bortis、Jonas Huber、Davide Biadene 和 Johann W. Kolar。「用於中壓固態變壓器的 10kV SiC 雙向軟性切換單相 AC/DC 轉換器概念」發表於 2017 年第八屆 IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) (2017 年 4 月 17-20 日)，第 1-8 頁。數位物件識別碼：10.1109/PEDG.2017.7972488。
4. Liu, Zhengyang。2017 年。「高頻功率轉換用寬頻隙裝置的特性與應用」維吉尼亞理工學院暨州立大學博士論文。<http://hdl.handle.net/10919/77959>。

先前發佈在 [EDN.com](http://www.edn.com) 上。

重要聲明與免責聲明

TI 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知識產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated

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 © 2024, Texas Instruments Incorporated