

## Technical Article

## 高電壓 DC-link 電容器主動預充電電路設計



Tilden Chen, Hrag Kasparian

## 簡介

電動車 (EV) 通常會配置大型 DC-link 電容器 ( $C_{DC\ LINK}$ )，以降低牽引逆變器輸入端的電壓漣波。為 EV 供電時，預充電的目的，是在車輛啟動前，安全地為  $C_{DC\ LINK}$  充電。將  $C_{DC\ LINK}$  充電至電池組電壓 ( $V_{BATT}$ ) 可防止接觸器端子上產生電弧，避免長期下導致災難性故障。

傳統的預充電方法是將功率電阻與  $C_{DC\ LINK}$  串聯，形成一個電阻-電容 (RC) 網路。然而，隨著總  $C_{DC\ LINK}$  電容和  $V_{BATT}$  增加，所需的功率消耗呈指數成長。本文將介紹一種利用試算表計算機設計高效率主動式預充電電路的簡單方法。

## 瞭解主動式預充電

被動式預充電利用功率電阻器形成 RC 電路，讓電容器以漸進方式充電；而主動式預充電則可採用降壓拓撲的切換式轉換器，透過磁滯電感電流控制，為電容器提供恆定充電電流 (圖 1)。

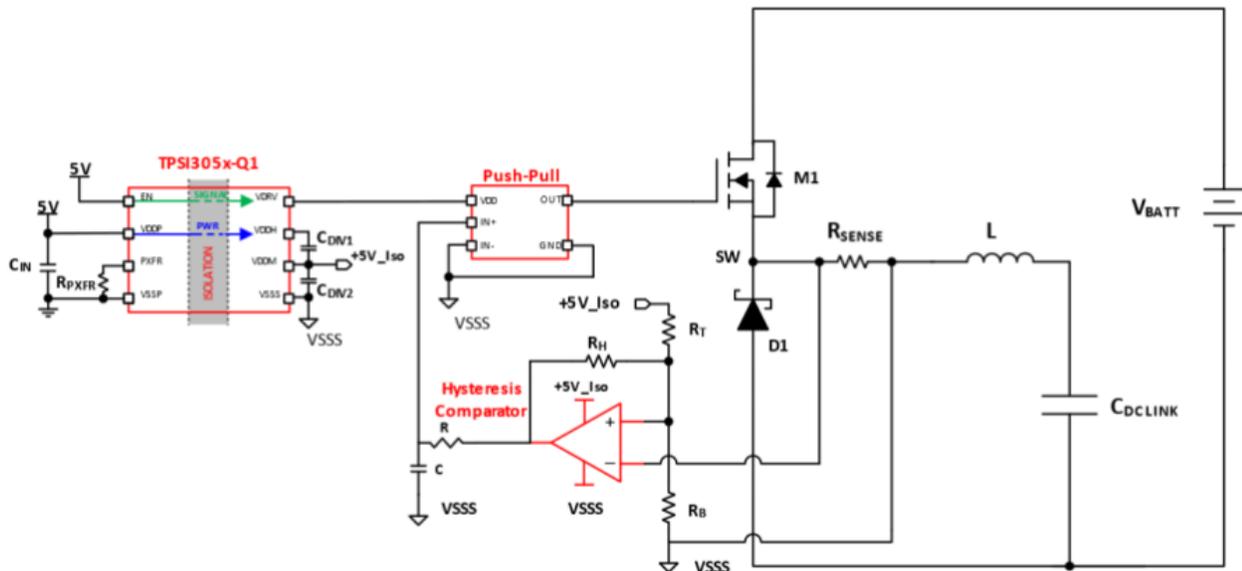


圖 1. 在主動式預充電電路中，降壓轉換器採用磁滯電感電流控制，為電容器提供恆定充電電流，使電容器電壓 ( $V_{CAP}$ ) 線性上升，直到達到與電池電壓 ( $V_{BATT}$ ) 相同的電位。來源：德州儀器

此定電流使電容器電壓 ( $V_{CAP}$ ) 線性充電，最高可達與電池電壓相同的電位。圖 2 等式 1 則說明此線性行為。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I_{CHARGE}}{C_{DC\ LINK}} \quad (1)$$

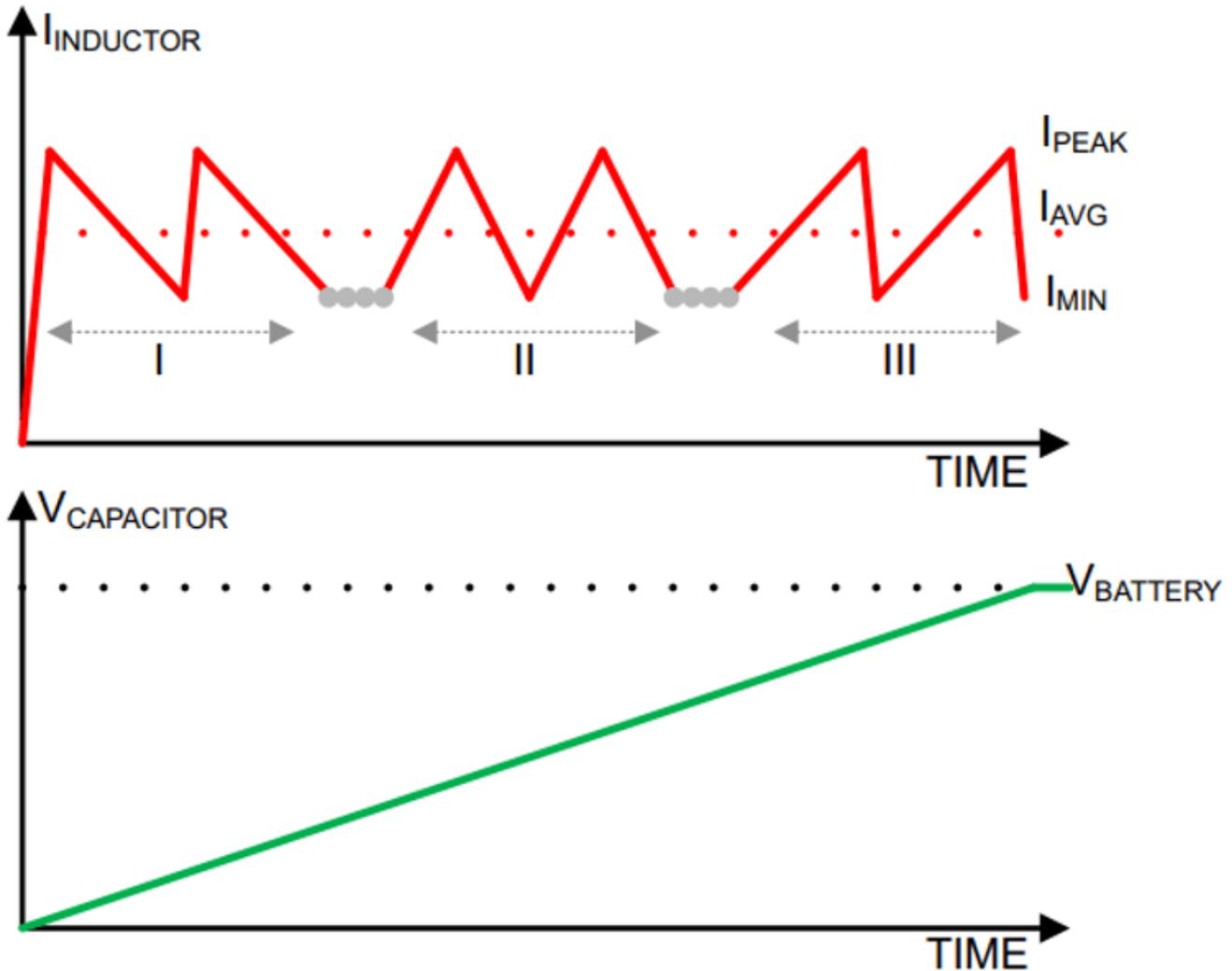


图 2. 使用降壓拓撲與磁滯電感電流控制的主動預充電具備線性充電特性。來源：德州儀器

第一步是確定所需的充電電流 ( $I_{CHARGE}$ )。  $I_{CHARGE}$  是總 DC 鏈路電荷 ( $Q_{DC LINK}$ ) 和所需預充電時間 ( $t_{CHARGE}$ ) 的商，如等式 2 所示。

$$I_{CHARGE} = \frac{Q_{DC LINK}}{t_{CHARGE}} \quad (2)$$

$Q_{DC LINK}$  是  $C_{DC LINK}$  和  $V_{BATT}$  的乘積，如等式 3 所示。

$$Q_{DC LINK} = C_{DC LINK} \times V_{BATT} \quad (3)$$

### 計算機概覽

此主動式磁滯降壓電路的接地電位懸浮於開關節點，因此控制系統需使用隔離式偏壓電源供電。計算機工具可確保此控制電路的功耗維持在隔離式偏壓電源供應能力內，否則電壓將會崩潰。

德州儀器 (TI) 的高電壓固態繼電器主動預充電參考設計，採用主動式方案，可提升能量傳輸效率並縮短實際充電時間。TI 的 [TPSI3052-Q1](#) 是一款完全整合的隔離式偏壓電源，應用於主動預充電參考設計中，可為隔離端提供最高 83 mW 的電力。閘極驅動電流、裝置靜態電流和電阻分壓器是造成功耗的主要因素。等式 4 將閘極驅動器功率 ( $P_{GATE DRIVE}$ ) 特性化為閘極驅動電流 ( $I_{GATE DRIVE}$  極驅動器) 與閘極驅動電壓 ( $V_{S GATE DRIVER}$ ) 的乘積，在本參考設計中，閘極驅動電壓為 15V。

$$P_{GATE\ DRIVE} = I_{GATE\ DRIVE} \times V_{S\ GATE\ DRIVER} \quad (4)$$

等式 5 將閘極驅動電流特性化為金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 總閘極電荷 (Q<sub>G</sub>) 和切換頻率 (F<sub>SW</sub>) 的乘積。

$$I_{GATEDRIVE} = Q_G \times F_{SW} \quad (5)$$

等式 6 表示 F<sub>SW</sub> 在整個充電期間如何根據 V<sub>CAP</sub> 變化，在中的 F<sub>SW</sub> 與 V<sub>CAP</sub> 曲線中產生倒置拋物線 圖 3。如下圖所示，當 V<sub>CAP</sub> 達到 V<sub>BATT</sub> 的一半時，最大切換頻率 (F<sub>SW\_MAX</sub>) 時，閘極驅動器電流峰值會發生。等式 7 說明 F<sub>SW\_MAX</sub>、V<sub>BATT</sub>、電感 (L) 與峰間電感器電流 (dI) 之間的關係：

$$F_{SW} = \frac{V_{CAP} - \frac{V_{CAP}^2}{V_{BATT}}}{L \times dI} \quad (6)$$

$$F_{SW\_MAX} = \frac{V_{BATT}}{4 \times L \times dI} \quad (7)$$

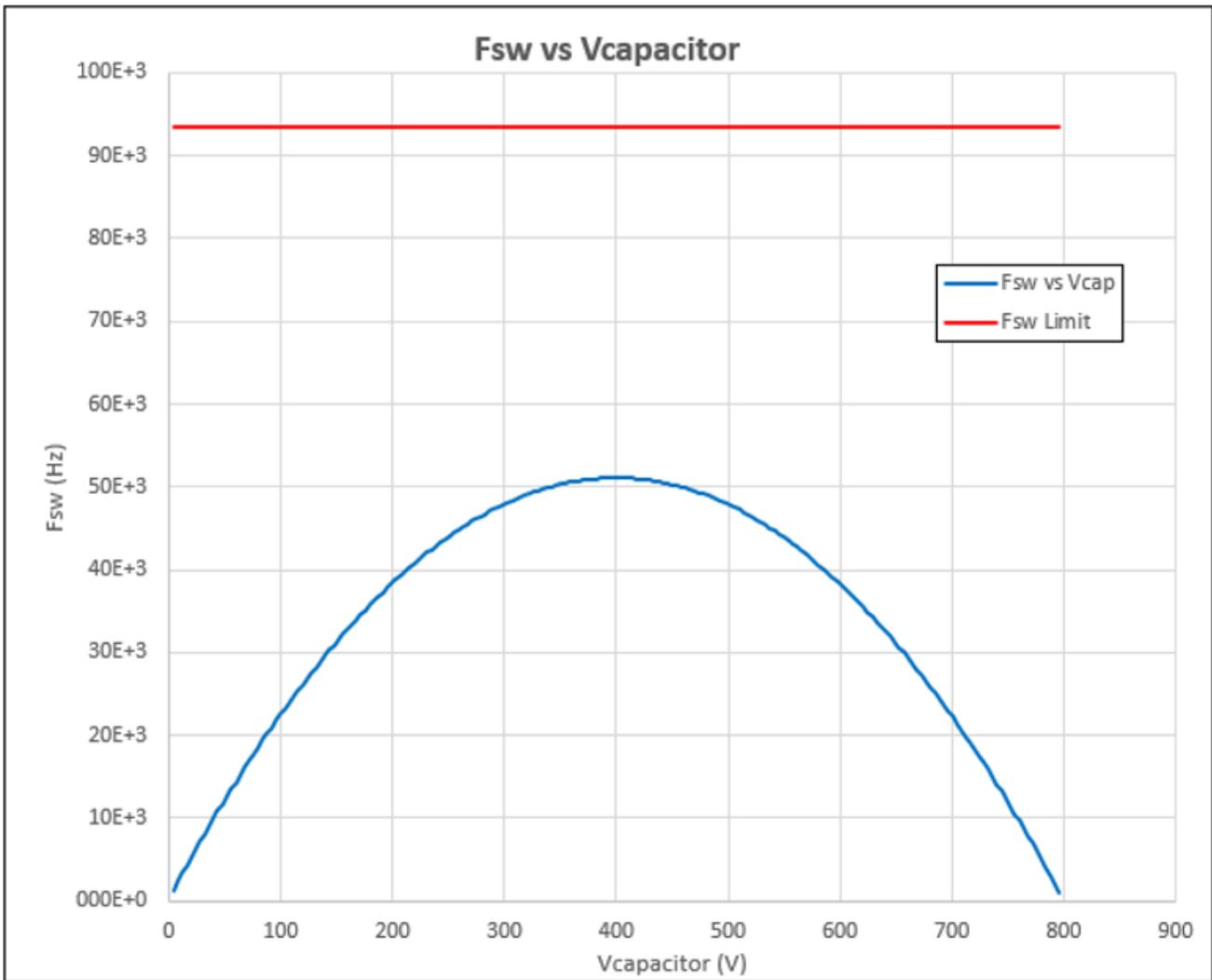


圖 3. 顯示 F<sub>SW</sub> 相對於 V<sub>CAP</sub> 和 F<sub>SW LIMIT</sub> 的計算機曲線。來源：德州儀器

## 使用計算機工具

計算機會提示您輸入各種設計參數。黃色儲存格為必填項目，灰色儲存格則為選填項目。灰色儲存格中的預設值反應了參考設計的參數。使用者可以根據需要更改灰色儲存格值。白色儲存格將計算值顯示為輸出。儲存格右上角的紅色三角形表示錯誤；使用者將可以看到有關如何修復的彈出文本。其目標是實現無紅儲存格的成功設定。這可以是一個迭代過程，使用者可以將滑鼠懸停在每個單元儲存格上以閱讀解釋性資訊。

### 預充電系統要求

計算器的第一部分（如圖 4 所示）將計算所需的充電電流

（ $I_{\text{CHARGE REQUIRED}}$ ）是根據  $V_{\text{BATT}}$ 、 $t_{\text{CHARGE}}$  和  $C_{\text{DC LINK}}$  系統參數所計算。

Parameter	Value	Units
$V_{\text{BATT}}$	800 V	
$t_{\text{CHARGE}}$	400.0E-3 sec	
$C_{\text{DC LINK}}$	2.0E-3 F	
$Q_{\text{DC LINK}}$	1.6E+0 C	
$I_{\text{CHARGE REQUIRED}}$	4.00E+0 A	

Battery or supply voltage, which will also be the final voltage the capacitor gets charged up to.

圖 4. 根據  $V_{\text{BATT}}$ 、 $t_{\text{CHARGE}}$  和  $C_{\text{DC LINK}}$  系統參數所需的充電電流（ $I_{\text{CHARGE REQUIRED}}$ ）。來源：德州儀器

### 電感和充電電流編程

圖 5 中顯示的計算器部分計算了實際平均充電電流（ $I_{\text{CHARGE}}$ ）和  $F_{\text{SW\_MAX}}$ 。平均電感電流基本上等於  $I_{\text{CHARGE}}$ ，而  $I_{\text{CHARGE}}$  必須大於或等於前一節中為達成預期  $t_{\text{CHARGE}}$  所計算出的  $I_{\text{CHARGE REQUIRED}}$ 。

請注意等式 7 中表示的  $L$ 、 $di$  和  $F_{\text{SW\_MAX}}$  之間的關係。 $L$  和  $di$  都與  $F_{\text{SW}}$  成反比，因此選擇不超過最大切換頻率限制（ $F_{\text{SW\_LIMIT}}$ ）的值非常重要。您的電感器選擇應適應適當的均方根電流（ $I_{\text{RMS}} > I_{\text{CHARGE}}$ ）、飽和電流（ $I_{\text{SAT}} > I_{\text{L\_PEAK}}$ ）和額定電壓，並有足夠的空餘空間作為每個電流的緩衝器。

L	560.0E-6	H
I <sub>L PEAK</sub>	7.5E+0	A
I <sub>L VALLEY</sub>	500.0E-3	A
V <sub>HYSTERISIS + OFFSET COMP.</sub>	22.00E-3	V
V <sub>F</sub>	1.25	V
I <sub>L PK-TO-PK</sub>	7.00E+0	A
I <sub>CHARGE</sub>	4.00E+0	A
F <sub>SW MIN.</sub>	1.0E+3	Hz
F <sub>SW MAX.</sub>	51.1E+3	Hz
F <sub>SW MAX. LIMIT</sub>	93.5E+3	Hz

图 5. 電感和充電電流編程參數。來源：德州儀器

### 電流感測和比較器設定點

图 6 中顯示的計算機部分計算出了滿足前一部分中指定的峰值 ( I<sub>L PEAK</sub> ) 和波谷 ( I<sub>L VALLEY</sub> ) 電感器電流閾值所需的磁滯電路周圍的底部電阻 ( R<sub>B</sub> )、頂部電阻 ( R<sub>T</sub> ) 和磁滯電阻 ( R<sub>H</sub> )。輸入電流感測電阻 ( R<sub>SENSE</sub> ) 和 R<sub>B</sub>。這些選項具有靈活性，可根據需要進行更改。確保比較器的電源電壓 ( V<sub>S COMPARATOR</sub> ) 正確。

$R_{SENSE}$	100.0E-3	$\Omega$
$P_{AVG. Rsense}$	1.60E+0	W
$V_{COMP. LOW}$	50.00E-3	V
$V_{COMP. HIGH}$	750.00E-3	V
$V_S$ COMPARATOR IC	5.00	V
$R_B$	2.37E+3	$\Omega$
$R_T$	201.45E+3	$\Omega$
$R_H$	14.39E+3	$\Omega$

图 6. 會計算磁滯電路中為滿足電感電流峰值 ( $I_{L PEAK}$ ) 與谷值 ( $I_{L VALLEY}$ ) 閾值所需的下電阻 ( $R_B$ )、上電阻 ( $R_T$ ) 及磁滯電阻 ( $R_H$ )。來源：德州儀器

### 偏壓電源和切換頻率限制

图 7 中所示的計算器的部分會計算可用於切換 MOSFET 的剩餘功率 ( $P_{REMAINING FOR FET DRIVE}$ ，其方法是先計算由磁滯電路電阻 ( $P_{COMP. RESISTORS}$ )、閘極驅動 IC ( $P_{GATEDRIVER}$ ) 和比較器 IC ( $P_{COMPARATOR IC}$ ) 所消耗的總功率 ( $P_{TOTAL}$ )，再從 TPSI3052-Q1 的最大隔離偏壓供應功率 ( $P_{MAX ISOLATED BIAS SUPPLY}$ ) 中扣除。輸入 MOSFET 總閘極電荷 ( $Q_{G total}$ )、設備靜態電流 ( $I_{S GATE DRIVER IC}$  和  $I_{SUPPLY COMP IC}$ )，以及閘極驅動器 IC 電源電壓 ( $V_S GATE DRIVER IC$ )。該工具使用這些輸入來計算图 3 中以紅線顯示的  $F_{SW LIMIT}$ 。

$V_S$ COMPARATOR IC	5.00	V
$R_B$	2.37E+3	$\Omega$
$R_T$	201.45E+3	$\Omega$
$R_H$	14.39E+3	$\Omega$
$V_S$ GATE DRIVER IC	15.00	V
$I_S$ GATE DRIVER IC	750.00E-6	A
$I_{SUPPLY COMP.}$	10.00E-6	A
$P_{MAX ISOLATED BIAS SUPPLY}$	83.00E-3	W
$R_{DIVIDER MIN.}$	15.80E+3	$\Omega$
$I_{MAX R\_DIVIDERS}$	316.46E-6	A
$P_{GATE DRIVER IC}$	11.25E-3	W
$P_{COMPARATOR IC}$	50.00E-6	W
$P_{COMP. RESISTORS}$	1.58E-3	W
$P_{TOTAL}$	12.88E-3	W
$P_{REMAINING FOR FET Drive}$	70.12E-3	W
$Q_G TOTAL$	50.00E-9	Q
$I_{GATE DRIVE}$	4.67E-3	A

图 7. 隔離式偏壓電源與切换頻率限制參數。來源：德州儀器

計算機工具基於特定假設進行計算，未納入比較器延遲、MOSFET 以及自由續流二極體中的功率損耗等因素。工具假設使用軌對軌輸入與輸出比較器。確保選擇具有適當額定電壓、 $R_{DSON}$  和寄生電容參數的 MOSFET。確保 MOSFET 和飛輪二極體的功率損耗都在可接受的限制範圍內。最後，針對電流感測峰值與波谷位準電壓，選擇具備低偏移與低磁滯電壓的比較器。使用最終計算器值模擬電路可確保預期運作。

### 達到所需的充電曲線

採用主動式磁滯控制的降壓電路，能大幅提升電動車高電壓 DC 鏈路電容器的充電效率，並有效縮減充電電路的體積。這有助於降低預先充電解決方案的尺寸、成本及散熱。

本文介紹計算適當元件值的設計流程，以協助實現所需的充電曲線。

透過採用這些技術和工具，工程師可以有效改善電動車的預充電功能，進而改善電源管理系統，以滿足汽車產業日益增加的需求。

### 相關內容

- [用電訣竅 #127：運用先進控制方法提升 GaN 基礎 PFC 的功率密度](#)
- [用電訣竅 #126：安全地熱插拔 DC/DC 轉換器](#)
- [用電訣竅 #125：光電模擬器如何提升隔離式 DC/DC 轉換器的可靠性及瞬態回應](#)
- [拆卸：變頻驅動器的細微差別](#)

先前已發表於 EDN.com。

### 註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

## 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 © 2025, 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](#) 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated