

## Technical Article

## 潛在韌體錯誤可能導致控制不穩定



Desheng Guo 和 Aki Li

在設計升壓功率因數校正 (PFC) 等數位電源供應器時，您是否曾見過類似图 1 中的電流振盪？

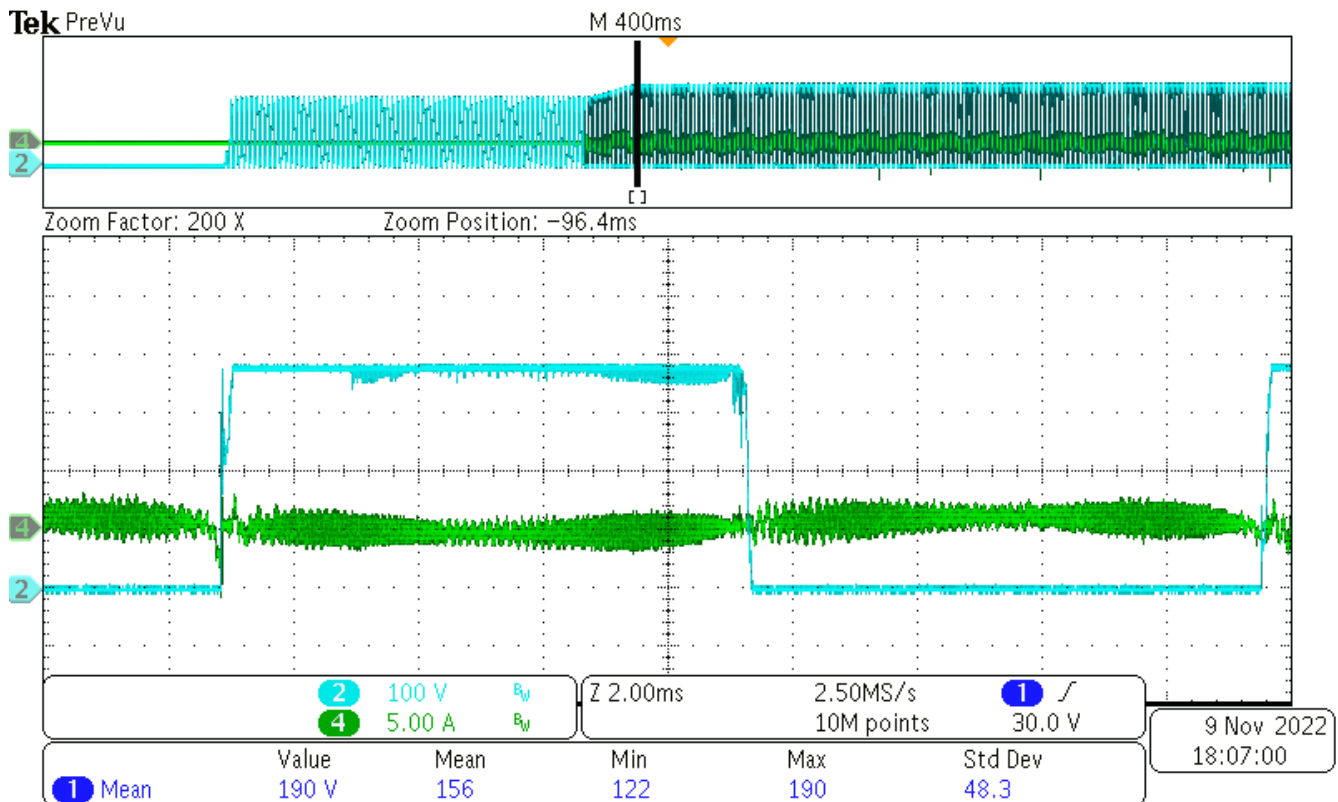


图 1. 在 PFC 級發生的電流振盪。來源：德州儀器

您可能會認為這種不穩定的振盪是由於控制頻帶太快所造成，因此您會降低比例積分 (PI) 控制器的比例增益 ( $K_p$ ) 和積分增益 ( $K_i$ )，進而顯著降低交叉頻率。然後振盪就會消失。

但這是最好的解決方案嗎？低電流迴路頻寬會減慢控制速度，但您可能會發現總諧波失真 (THD) 測試失敗。而且有時當來源阻抗略大時，就會再次出現振盪。

這種不穩定性是否還有其他可能的原因？如何以足夠的相位裕度來實現最佳的控制頻寬？現在讓我們詳細分析數位控制迴路，以了解造成這種潛在錯誤的原因。我們也會向您說明如何檢查在控制韌體中是否發生這種不穩定性。

## MCU 架構的數位控制

图 2 以圖示顯示 MCU 架構的數位控制系統。

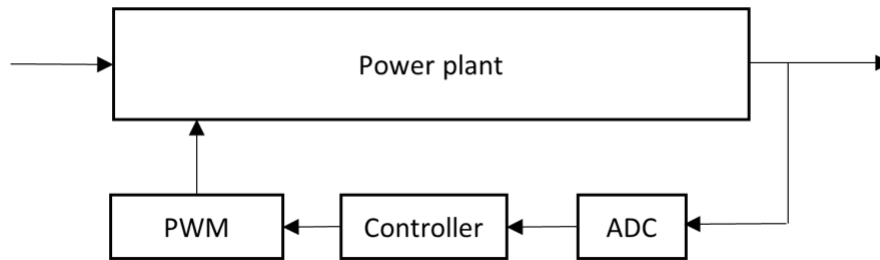


图 2. 數位控制系統是以微控制器為核心建置而成。來源：德州儀器

控制迴路包含用於對目標電流/電壓進行取樣的類比數位轉換器 (ADC)、用於產生調整值的數位控制器，以及用於執行調整的脈衝寬度調變器 (PWM)，可透過變更工作或頻率來變更目標電流/電壓。

切換模式電源供應器 (SMPS) 中的 ADC 取樣通常位於兩個切換週期的中點，這樣不僅可避免切換產生的雜訊干擾，也可取得連續傳導模式 (CCM) 中的功率電感器平均電流值。

數位控制器會在中斷服務例程序 (ISR) 中加以計算，且可與 PWM 輸出同步觸發。觸發事件可能是以下其中一個事件：PWM 的「計數器」等於「零」、「週期」或特定值「CMP」。

雖然無法在控制器完成所有計算時立即更新 PWM，但隱藏暫存器必須在專用時刻載入 PWM 暫存器，例如當 PWM 計數器等於「零」或「週期」時。如果在計數器上升或下降時，PWM 值發生變化，很可能會產生錯誤的 PWM 操作，導致缺少脈衝或複製脈衝。

與類比控制系統不同，數位控制由取樣頻率執行，且取樣必須具有延遲時間 ( $T_d$ ) 以將新值重新載入 PWM。PWM 修改是透過調整翻轉時刻來實作，其在單緣調變時會發生一次 (向上計數/向下計數模式)，且在雙緣調變時會發生兩次 (向上-向下計數模式)。因此，最小  $T_d$  會是一個切換週期  $T_s$  (如 图 3a 所示)，或是二分之一個切換週期  $T_s/2$  (如 图 3b 所示)，根據您選擇的調變重新載入頻率而定。

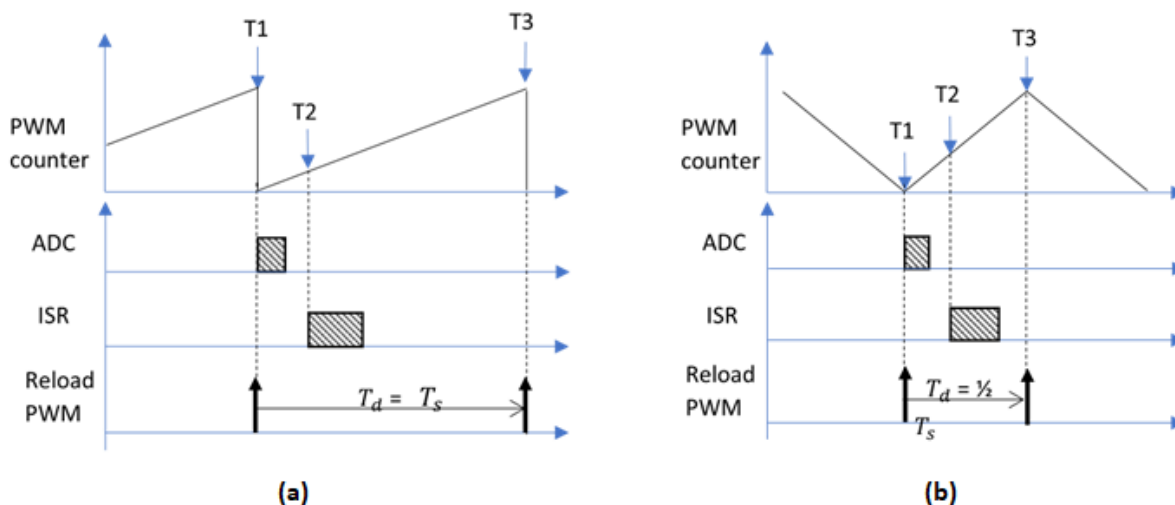


图 3. PWM 調整帶來的最低延遲時間：(a) 向上模式，(b) 向上-向下模式。來源：德州儀器

請檢視 图 4， $T_d$  在其轉移函數中表示為  $e^{-sT_d}$ ，這會減少相位裕度。當然，當相位裕度小於 45 度時，系統將變得不穩定，且會發生振盪。

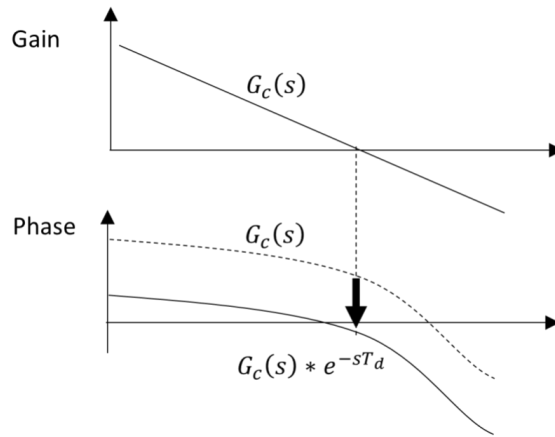


图 4. 以波德圖顯示延遲時間的影響。來源：德州儀器

### 數位控制實作中的潛在程式碼錯誤

在正確執行的情況下，最小  $T_d$  是一個切換週期  $T_s$ 、半個切換週期  $T_s/2$ 。但如果您未考量 ADC、ISR 和 PWM 重新載入的後果，則將控制延遲延長至超過一個切換週期，可能會減少相位裕度並導致不穩定。

例如，在图 5 中，ADC 的 ISR 觸發和 PWM 重新載入均在相同時刻開始，也就是當 PWM 計數器等於零的時候。雖然所有區塊同時執行，但在這種情況下，是否可預期  $T_d$  為零？當然不行！

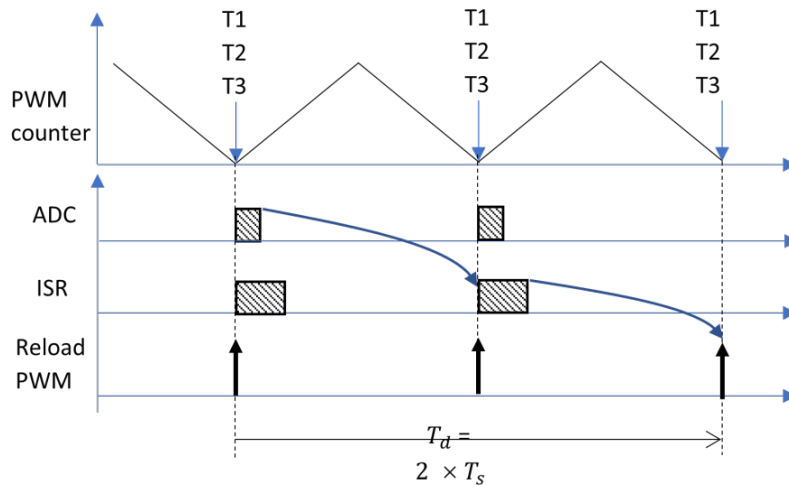


图 5. 這是造成延遲時間增加的錯誤程式碼範例。來源：德州儀器

這是因為 ADC 轉換和 ISR 計算都需要多個 MCU 時脈週期；當 ISR 讀取 ADC 結果時，ADC 轉換仍未完成。因此，ISR 會取得「舊」取樣值來進行計算，而最新值的計算則會延遲至下一個切換週期。完成 ISR 計算後，新的 PWM 值只會寫入隱藏暫存器，並在下一個切換週期時重新載入。實際上， $T_d$  的總控制延遲是兩個切換週期，即  $2 \times T_s$ 。

除了此處所示的範例外，其他實作方式可能會造成類似的控制延遲延長，例如若您在 ISR 程式碼中，將讀取 ADC 值放在計算控制器後，或是在計算控制器前新增 N 週期演算法平均等。

如图 6 所示，若在發生图 5 的錯誤實作時，將增益交叉頻率設定為約 3 kHz，則相位裕度為 41.68 度。這小於 45 度，且扼流圈電流具有顯著振盪 (如同图 1 的波形)，因此迫使您需將交叉頻率降至低於 2 kHz；隨後 iTHD 即會惡化，無法滿足要求。

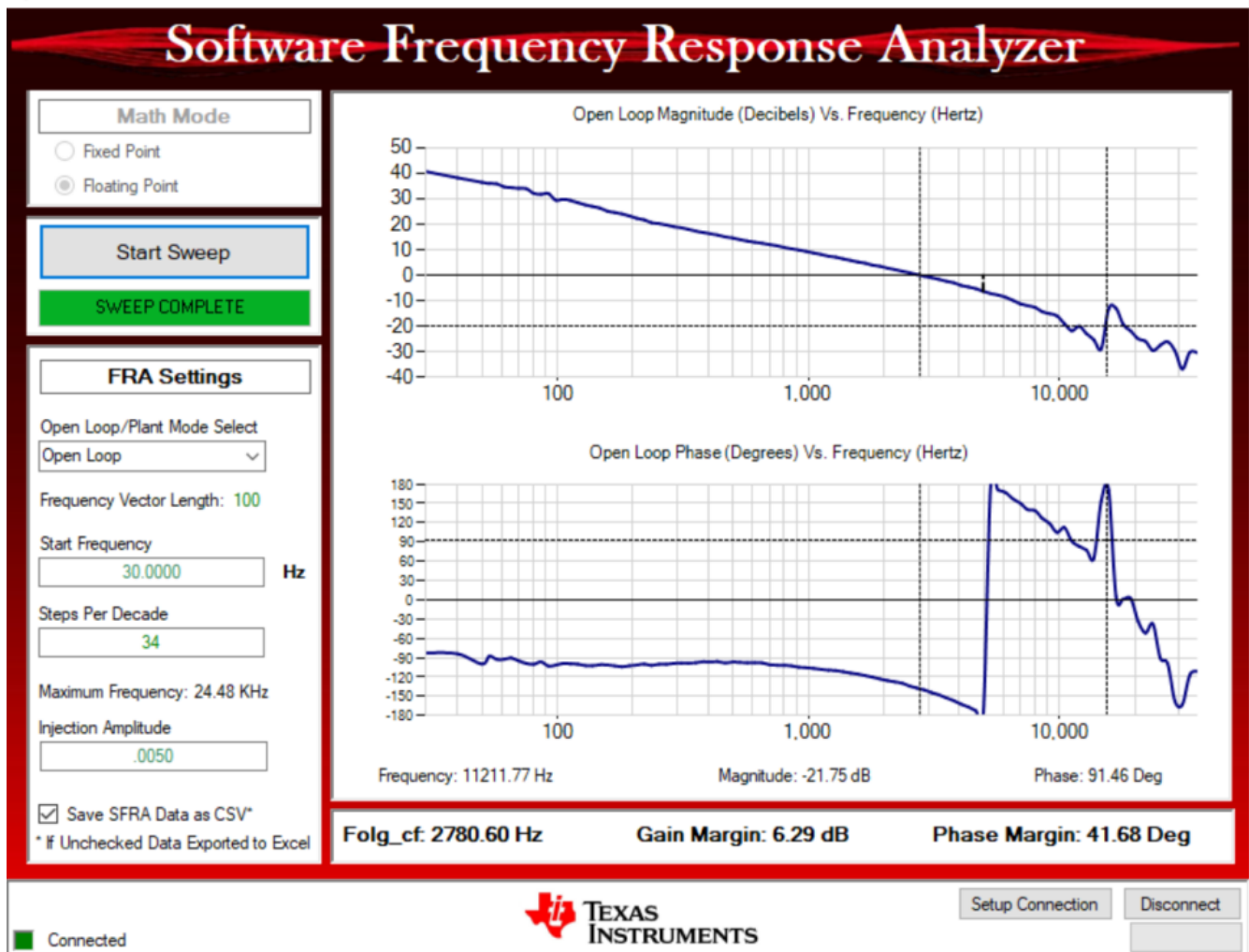


图 6. 實作錯誤程式碼的波德圖。來源：德州儀器

### 設計解決方案

您可以透過將 ADC 轉換移至計數器 = 週期的時刻，並在下一個計數器 = 週期時進行重新載入 PWM 的作業，即可輕鬆解決此問題，如圖 7 所示。

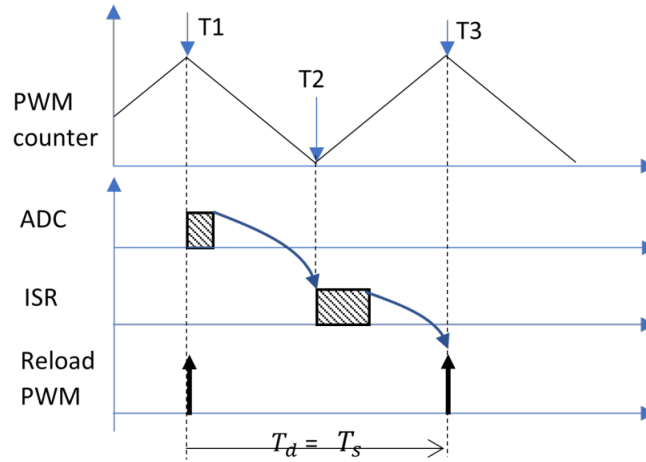


图 7. 改善程式碼可減少控制延遲。來源：德州儀器

控制延遲會減少至一個切換週期。相位裕度會顯著增加，且電流振盪會消失，如圖 8 和圖 9 所示。

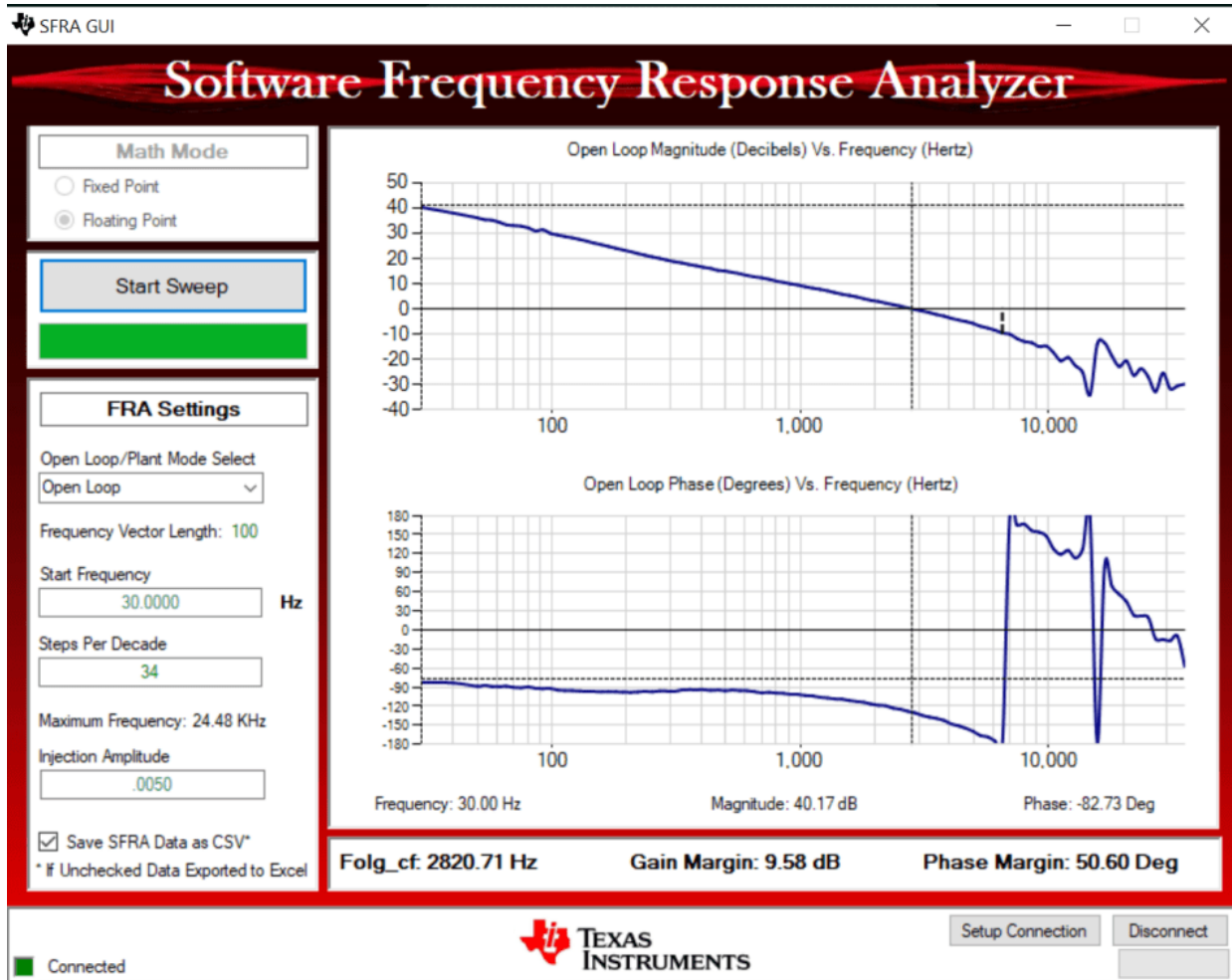


图 8. 程式碼經改善的波德圖。來源：德州儀器

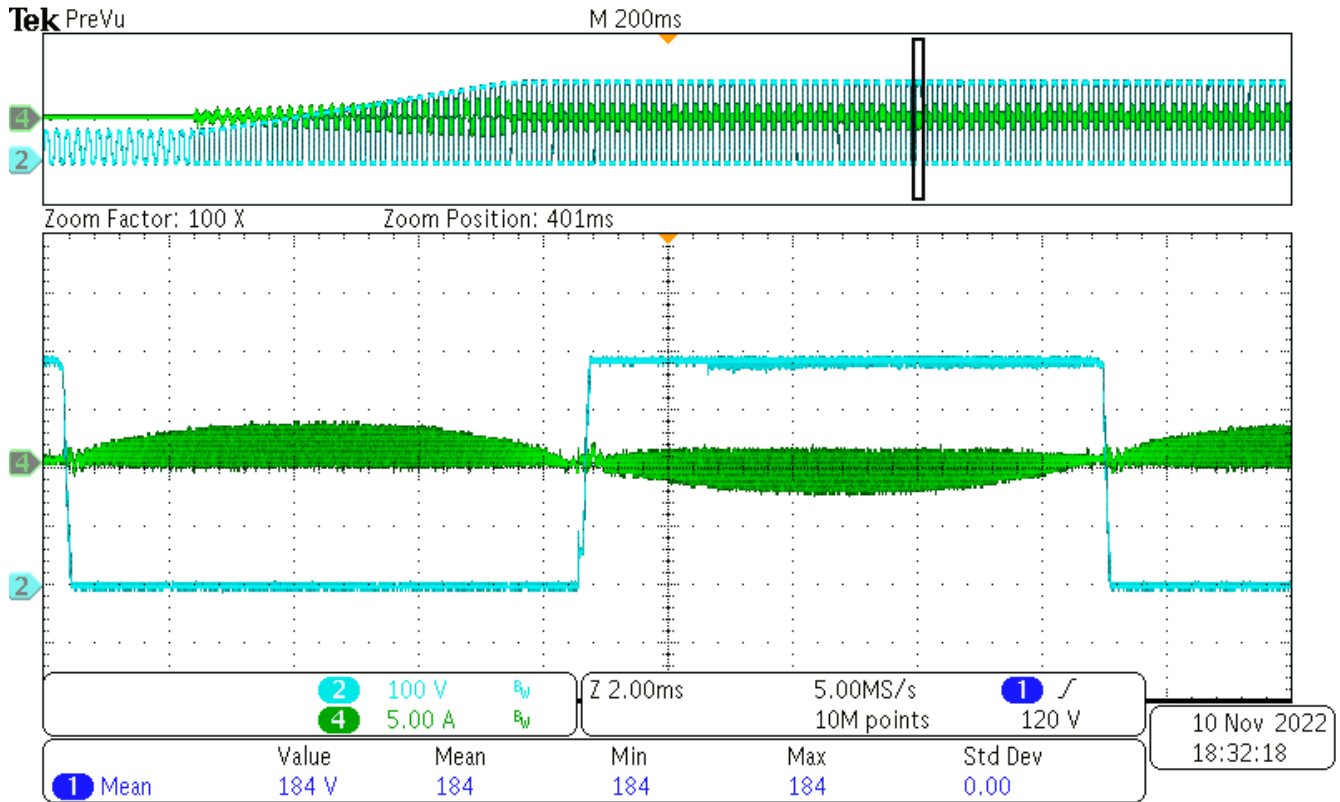


图 9. 程式碼經改善的波形。來源：德州儀器

### 組織良好的控制方案

在數位實作中從 ADC 取樣到 PWM 調整的控制延遲，將會減少相位裕度並造成振盪。解決此問題時，應考量 ADC 取樣、控制器計算和 PWM 重新載入的後果。組織良好的控制方案可將延遲最小化，達到二分之一個或一個切換週期，進而增加相位裕度與迴路頻寬。

### 相關內容

- 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
- 用電訣竅 #110：寄生如何產生非預期的 EMI 濾波器共振
- 進行 PID 設計的基礎知識：第 1 部分 - 傳統控制理論
- 測試電源供應器 - 穩定性 (第 3 部分)

先前發佈在 [EDN.com](https://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