

## 簡介

以下是與 [PI 學院](#) 視訊課程「汲極電壓和電流的測量技術」相關的課程要點，請務必閱讀。透過本課程，您將學習如何準確地測量 Power Integrations 裝置上的 MOSFET 汲極電壓和電流。本課程的內容包括使用各種電流探棒、正確的電流測量點和技術來準確地測量電壓。

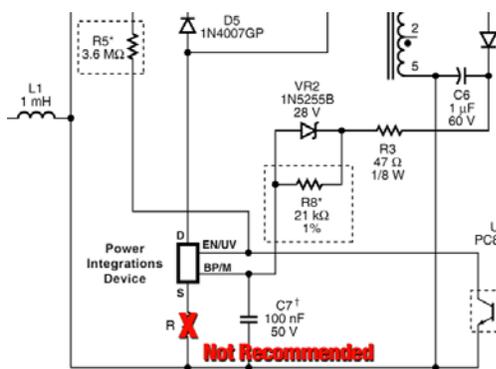
雖然所用範例是針對返馳式轉換器 (converter)，但是本課程中所概述的通則適用於大多數架構。在這些課程要點中，將以使用 [TinySwitch®-III](#) 裝置的 12 W 全電壓輸入 CV 轉換器 (Adapter) 為例。如需進一步資訊，請參閱 Power Integrations 的設計實例 [DI-91](#) 和參考設計報告 [RDR-91](#)。

## 需要的設備

若要完成本課程，您需要一個功能正常的電源供應器和一組標準測試設備。與電源電子裝置配合使用的這組標準測試設備應該含有電流探棒。通常電流探棒並非標準試驗設備，所以此項支出似乎沒有必要，或並非不可或缺。不過，對於查明故障和驗證設計而言，測量電源供應器的電流波形非常關鍵。因此，使用電流探棒可以節省大量的開發時間，並大幅改善設計的品質。

### Equipment Needed to Complete this Course:

- Variac
- Programmable AC Source
- DMMs
- Electronic Load
- Oscilloscope
- Wattmeter
- AC/DC Probes



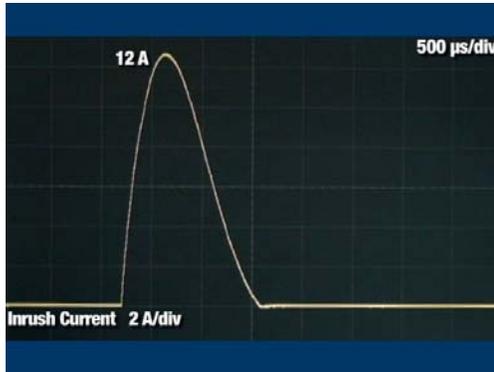
電阻以串聯方式接到源極接腳  
將影響控制器接地。

如果沒有電  
流探棒，您

可能需要將電阻以串聯方式連接至源極接腳，並監測電阻上用於產生汲極電流的電壓降。但是，不建議使用這個程序，因為電阻將影響控制器接地，使裝置無法正常運作。

購買電流探棒時，有兩個最重要的考量事項：所需的電流額定值，以及需要交流還是直流探棒。選擇的電流額定值應稍大於設計中將測量的峰值電流。例如，在 [RDR-91](#) 所述的 12 W 設計中，預期在二次側將出現約 4 A 的峰值電流。因此，您可以使用額定值為 50 A 峰值的標準電流探棒，來測量此設計的大多數電流波形。不過，如果測量啟動時的峰值浪湧電流，或使用更高功率的設計，則可能需要選用額定值更高的探棒才能達到準確的測量結果。

### 需要的測試設備



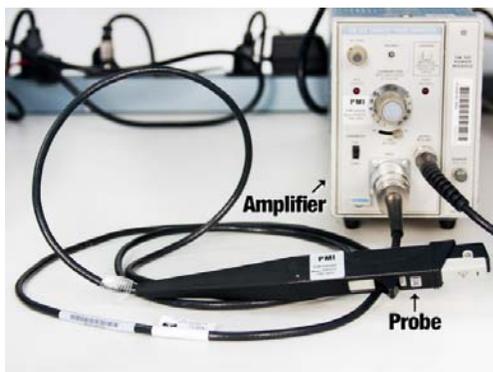
峰值浪湧電流



大電流探棒

### 比較直流探棒與交流探棒

直流電流探棒是一種主動式裝置，使用霍爾效應感應器來測量交流電流和直流電流。這種探棒需要使用相符的探棒放大器 (可能是獨立的裝置，但比較新型的示波器通常已內含探棒放大器)。交流電流探棒只是電流變壓器，不需要使用探棒放大器，但無法測量直流電流。

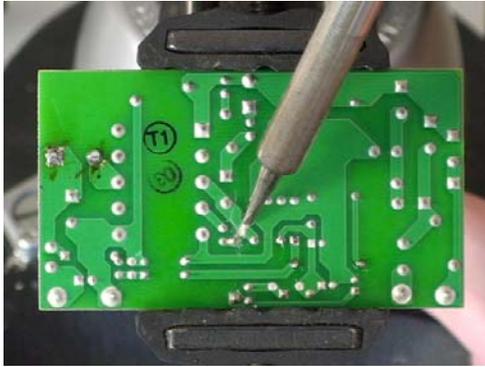


直流電流探棒

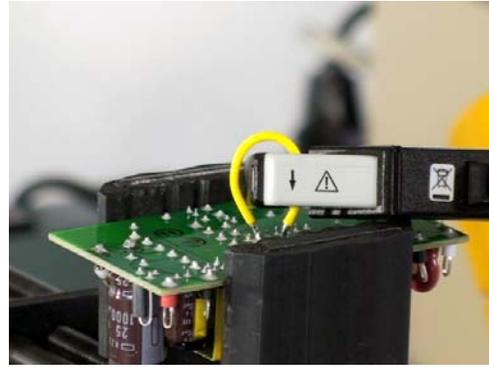
直流電流探棒更適用於電源電子裝置，因為這類探棒可用於進行範圍廣闊的測量。例如，直流電流探棒可用來測量負載並檢驗負載的特性，也可以測量其他架構 (如降壓式轉換器) 的电感器電流。如果您的情況不允許直流探棒這項額外支出，則大約 80% 的典型電源供應器測量 (包括測量汲極電流波形) 均可使用交流電流探棒。交流探棒的費用通常只有直流電流探棒和放大器的一半。

### 針對汲極電流測量的設定

若要測量汲極電流，首先需要插入迴路，以便將電流探棒置於電路中，應該讓該迴路只有汲極電流流過。在印刷電路板上，於 PI 裝置的汲極接腳與一次側箝位電路中任何元件之間的汲極節點 Trace 上建立斷點。將很小的迴路焊接在剛剛建立的斷點處。為了儘量降低雜訊耦合和漏電感，此迴路應儘量小，能讓電流探棒夾住即可。



在 PCB Trace 中建立斷點



電流回路與直流探棒已就緒

執行 EMI 掃描之前，請務必卸除此電流迴路，以免使其成為迴路天線，而耦合高頻雜訊導致 EMI 不佳。

#### 針對電流測量的示波器設定

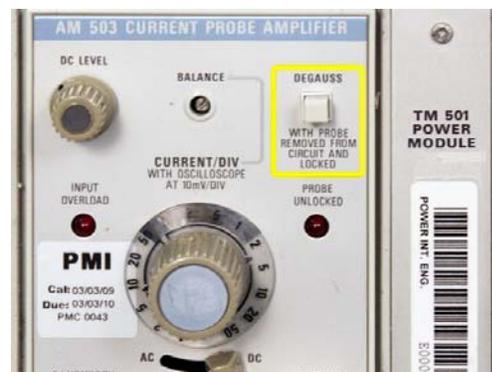
將電流探棒接到示波器。如果使用者可選擇示波器輸入端的頻寬，請將範圍設定為至少 20 MHz。交流和直流電流探棒的設定程序稍有不同，以下將分別說明。

#### 直流探棒的設定程序

對於直流探棒，請檢查探棒放大器所需的示波器輸入阻抗。大多數探棒放大器所需的值為 50  $\Omega$ 。如果您的示波器沒有 50  $\Omega$  設定值，則可使用與阻抗相符的轉換器 (adapter)。如果電流探棒與示波器直接連接，通常會自動進行此項處理。接下來，使用放大器上的按鈕或設定將探棒消磁。請確保先斷開電路與探棒的連接，然後再消磁，這樣可以避免產生的電流損壞電路。



檢查示波器輸入阻抗



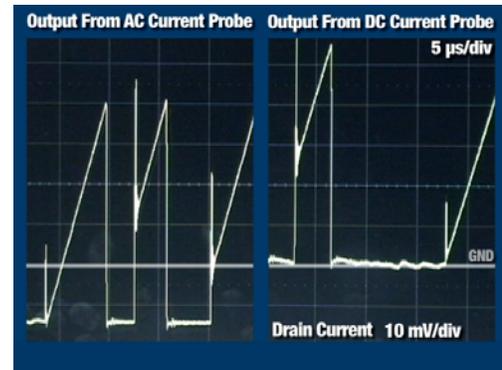
消磁控制

現在，使用探棒鉗住電流迴路，將其夾緊。為確保方向正確，請務必讓探棒上標示的箭頭 (表示電流方向) 指向汲極接腳。設定示波器的增益，使其符合探棒放大器的輸出，並調整探棒放大器的直流偏移量，使示波器上的電流為零。

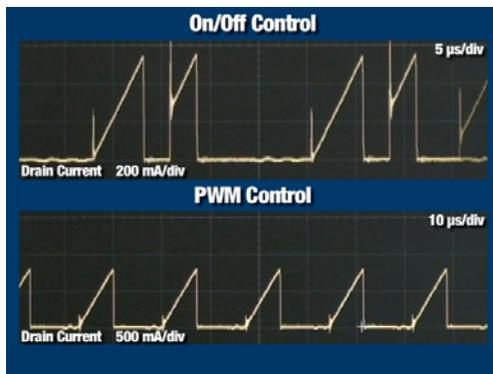
### 交流探棒的設定程序

對於交流探棒，請確認示波器的輸入阻抗是否符合探棒所需的值。大多數交流探棒均具有  $1\text{ M}\Omega$  的輸入阻抗，因此不需要與阻抗相符的轉換器 (adapter)。使用探棒鉗住電流迴路，將其夾緊。請確保讓探棒上標示的箭頭 (表示電流方向) 指向汲極接腳。設定示波器的增益，以顯示清晰可讀的波形。查看設計所用 Power Integrations 裝置的產品規格型錄，確定其限電流。然後，選擇可以使用螢幕上的五格來顯示接地端電流和峰值汲極電流之間範圍的示波器通道增益。在供應器運作後，視需要調整增益以進行測量。供應器運作時，您會看到交流探棒的輸出是以接地端電流為中心上下波動的訊號。

透過調整示波器上的一些設定，可以讓交流探棒的訊號類似直流探棒的輸出訊號。首先，將示波器輸入設定為直流耦合。然後調整示波器的偏移量，直到關閉 MOSFET 時可以在示波器接地端看到電流。接下來，檢查供應器運作時顯示的電流波形，此步驟對交流和直流探棒均適用。調整探棒放大器的增益和示波器的時間基準，以便使波形清晰可見、易於測量。如果是交流探棒，調整增益將會調整整個波形，因此需要再次調整直流偏移，以便重新以接地端電流為中心。



調整交流探棒的輸出 (左側)，使其符合直流探棒的輸出 (右側)

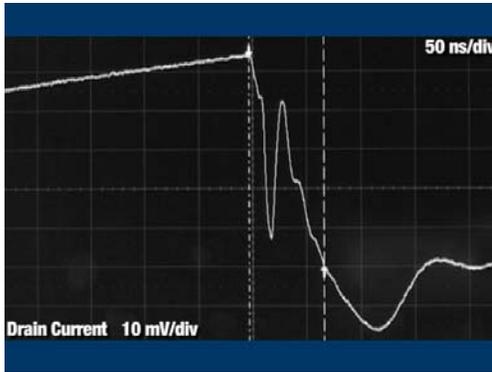


開/關控制可能顯示為不穩定

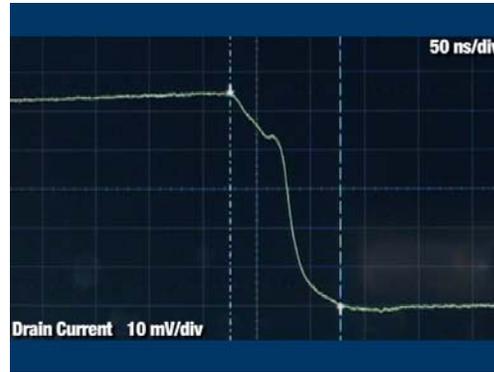
請注意，[RDR-91](#) 所述的設計範例使用 [TinySwitch-III](#) 裝置，該裝置採用開/關控制。與 PWM 產品不同，開/關控制裝置不會透過控制工作週期來控制功率傳送，而是會跳過整個週期。這可能會在設計中顯示為不穩定，但是實際上，這是產品的正常運作現象。

如果顯示的波形是反的，則表示電流探棒上的箭頭指向錯誤的方向。請調換迴路上電流探棒的方向。

如果正確連接並配置探棒，則返馳式設計的汲極電流波形應該在約  $100\text{ ns}$  內無波動地降至 0。



電流迴路放置錯誤時產生的波形

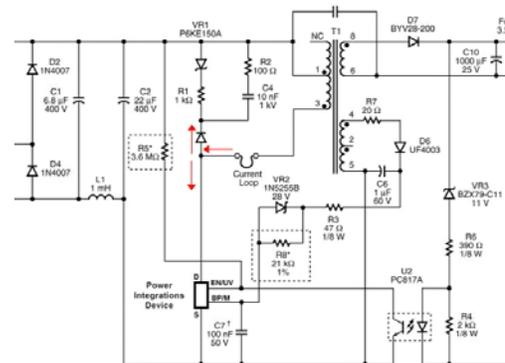


預期的汲極電流波形

如果所顯示波形的電流下降時間明顯超過 100 ns，請檢查電流迴路的插入點是否正確。如果在變壓器接腳和箝位元件之間放置迴路，探棒還將測量流入箝位網路的電流。

請注意，電流探棒會在顯示的電流波形中產生延遲。若探棒使用 50 MHz 頻寬，則延遲通常為 10 到 15 ns。測量切換損失或對螢幕上的電流波形和其他波形進行時間敏感的比較時，需要將延遲納入考量。

現在，您可以開始測量汲極電流。

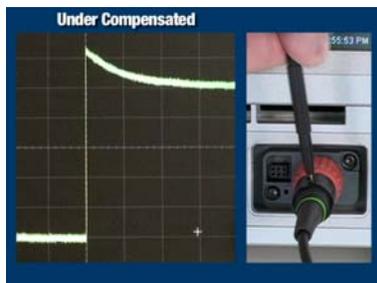


電流迴路放置錯誤時所產生的額外電流路徑

### 針對汲極電壓測量的設定

若要測量 MOSFET 上的切換電壓，您需要額定值至少為 1000 V 的 100x 電壓探棒。用於檢視汲極電壓波形的示波器和探棒的頻寬都必須至少為 100 MHz。

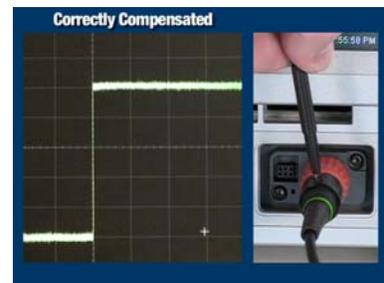
將探棒接到電路之前，需要先確保已對探棒進行正確補償。首先，將電壓探棒接到示波器。使用探棒鉤住示波器的補償端，調整示波器的電壓和時間基準設定，使測試訊號的上升邊緣和下降邊緣佈滿螢幕。現在，使用探棒所附的非金屬探棒調整工具來調整補償電容器，直到波形的正尖峰或負尖峰減至最小。



補償不足的探棒



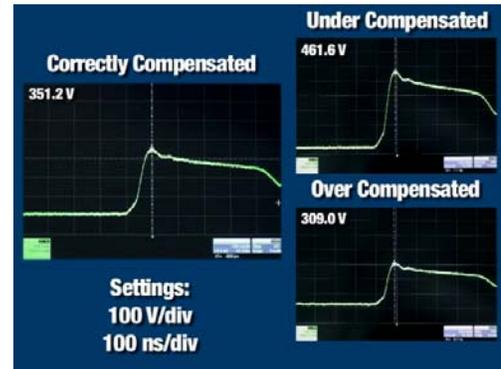
過度補償的探棒



正確補償的探棒

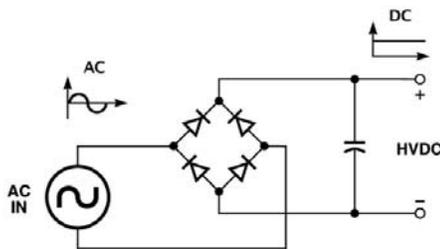
### 調整補償電容器使正尖峰或負尖峰減至最小

調整探棒補償非常重要，因為這樣可以確保取得最準確的電壓測量值。例如，如右圖所示，可以看到在探棒補償不足、過度補償及正確補償的不同情況下，同一汲極電壓波形的測量結果。在探棒補償不當的兩種情況下，測量出的峰值汲極電壓與正確的峰值汲極電壓之間的差異會超出 50 V，若是補償不足的情況，更是超出 100 V。

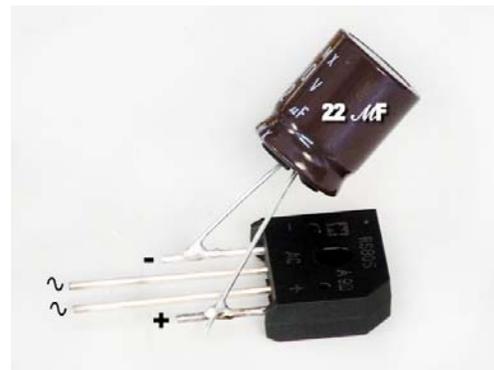


正確補償對確保  
電壓讀值準確非常重要。

此外，請使用已校正的數位萬用表和示波器來測量固定直流電壓，以檢查示波器本身的校正。由於高電壓探棒在測量低電壓時不太準確，因此校正時最好與高電壓源進行比較。如果沒有高電壓源，則產生固定直流高電壓最簡單的方式為，對交流高電壓進行整流，然後使用大電容器進行濾波。在本例中，對 265 VAC 輸入進行整流，然後使用 22  $\mu$ F 電容器進行濾波。

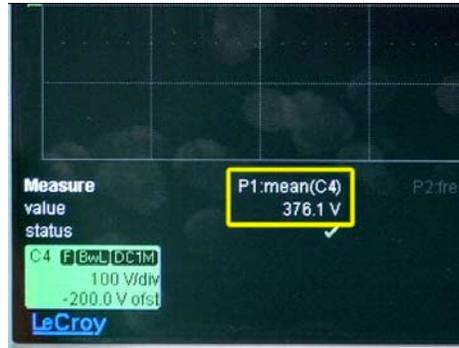


電路圖：高電壓產生電路



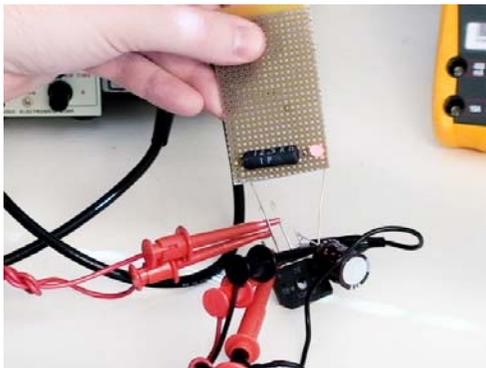
架構的高電壓產生電路

在本例中，萬用表的電壓讀值為 374 VDC，而示波器的讀值為 376 VDC。這表示測量準確的可信度很高。



萬用表和示波器讀值的比較。

請謹記完成本測試後，對電容器進行安全放電。接下來，將示波器探棒接到汲極節點，然後將接地線夾到源極接腳。為減少雜訊干擾，請將接地線纏繞在探棒上，以縮小迴路面積，然後再將其接到電路板。



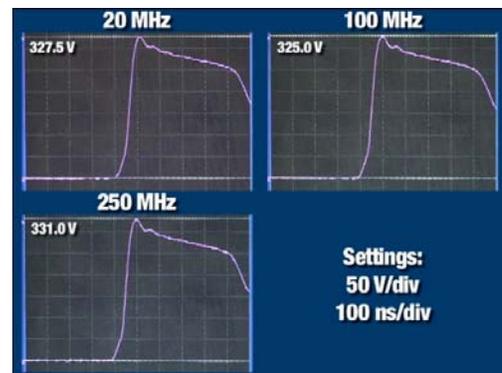
對電容器進行安全放電



將接地線纏繞在電壓探棒上

開啓供應器，然後調整示波器的垂直增益和時間基準，讓汲極電壓波形清晰可見。為了取得最穩定的測量結果，請在電壓波形的下降邊緣觸發示波器。最後，將示波器的數位取樣率設為可能的最大非重複值。另外，將示波器和輸入通道設定為最大頻寬，然後關閉示波器所提供的任何其他濾波。這些步驟可確保獲得最高的準確度。

測量峰值汲極電壓時，示波器的高頻寬對確保測量結果準確尤為重要。例如，以下顯示了三個峰值電壓測量結果，使用的頻寬分別是 20 MHz、100 MHz 和 250 MHz。使用 20 MHz 和 250 MHz 測量的峰值電壓差異超過 3V。



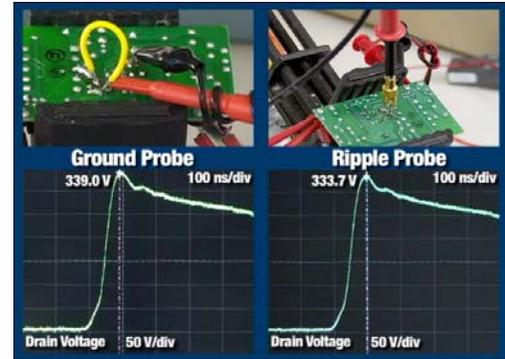
不同的示波器頻寬產生不同的電壓測量結果

對於非常重要的汲極電壓測量 (例如峰值電壓的絕對值很重要時)，將示波器探棒換成漣波探棒可獲得最佳結果。這可將探棒接地線的迴路面積減至最小，從而最大程度地減少噪音干擾。使用漣波探棒通常會使峰值測量結果降低 5 到 10 V。

現在，您可以開始測量汲極電壓。

### 如需更多資訊

對於本課程所提供的資訊，如有任何疑問或意見，請寄電子郵件到 [PIUniversity@powerint.com](mailto:PIUniversity@powerint.com)。



使用漣波探棒可取得最準確的測量