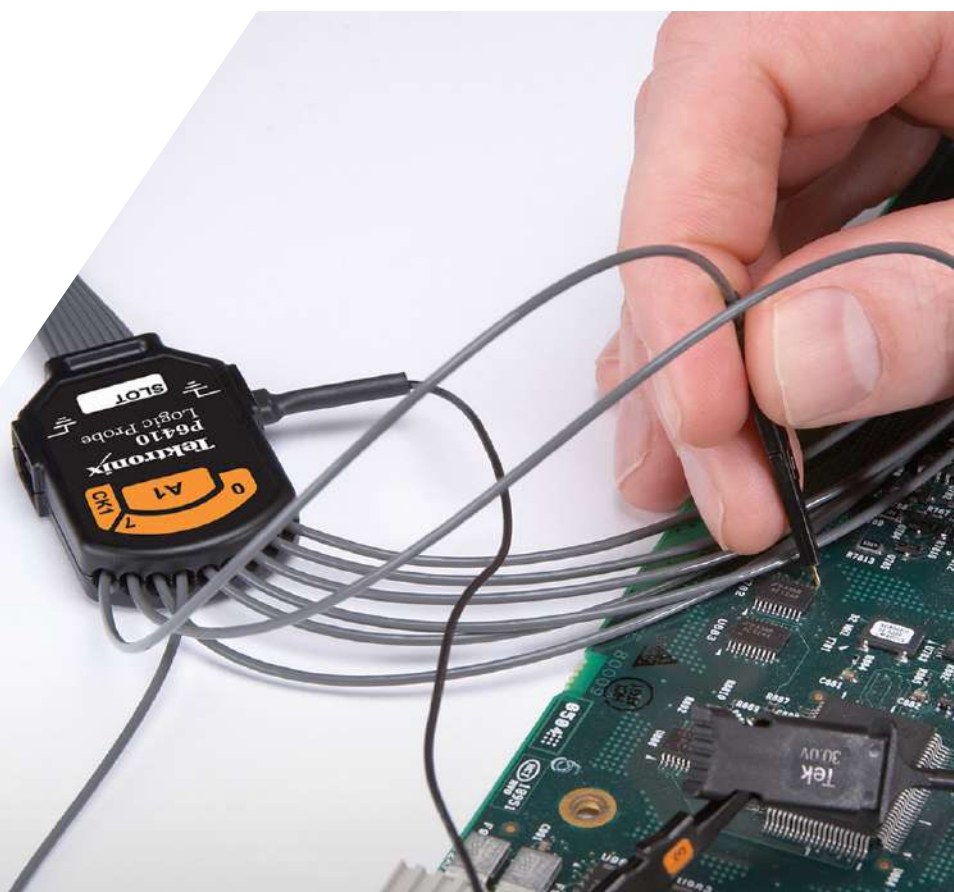




探棒入門手冊

入門手冊



Tektronix 探棒選購工具

透過此線上互動工具，您可依系列、產品型號、標準/應用來選擇產品，並根據特定測試需求微調搜尋條件。僅需點擊滑鼠，即可更新符合搜尋條件的產品清單。

請立即嘗試：[tw.tek.com/probes](https://www.tek.com/probes)。

Tektronix 資源

我們持續擴大技術簡介、應用摘要和其他資源的資料庫，協助您確保盡量取得探棒和其他設備的相關資訊。請與本地Tektronix業務單位聯絡，或是造訪網址：[tw.tek.com](https://www.tek.com) 即可。

目錄

1. 探測安全	4	7. 差動式量測	46
安全摘要	4	瞭解差動訊號和共模訊號	46
安全注意事項說明	4	8. 量測低振幅訊號	49
2. 精密量測從探棒頭開始	6	雜訊降低	49
什麼是探棒?	6	提高量測靈敏度	49
理想的探棒	7	9. 如何處理探測的影響	51
探棒的現實情況	8	10. 瞭解探棒規格	52
一些探測技巧	12	偏差 (通用)	52
總結	14	準確度 (通用)	52
3. 不同探棒滿足不同需求	15	安培秒乘積 (電流探棒)	52
為什麼有這麼多探棒?	15	衰減係數 (通用)	53
不同探棒類型及其優勢	17	頻寬 (通用)	53
浮動量測	21	電容 (通用)	54
危險	21	CMRR (差動式探棒)	54
探棒配件	26	衰退時間常數 (電流探棒)	54
4. 探棒選型指南	28	直流 (電流探棒)	54
選擇適當的探棒	28	頻率降額 (電流探棒)	54
瞭解訊號源	29	插入阻抗 (電流探棒)	55
瞭解示波器	31	輸入電容 (通用)	55
選擇正確的探棒	33	輸入電阻 (通用)	55
5. 探棒對量測的影響	34	最大額定輸入電流 (電流探棒)	55
來源阻抗的影響	34	最大額定峰值脈衝電流 (電流探棒)	55
電容負載	35	最大額定電壓 (通用)	55
頻寬考慮因素	37	傳播延遲 (通用)	55
6. 探棒接地和接地引線影響	40	上升時間 (通用)	55
接地引線長度和頻率回應	40	正切雜訊 (主動式探棒)	55
確定偏差來源	42	溫度範圍 (通用)	55
接地技術不良導致的雜訊	42	閾值電壓 (邏輯)	56
接地迴路雜訊注入	42	11. 詞彙表	57
感應的雜訊	43		
確定雜訊源	43		
接地最佳實作	43		

1. 探測安全

安全摘要

進行電氣或電子系統，或是電路量測時，人身安全是最為重要的問題。使用者除需瞭解所使用量測設備的功能和限制外，還需在進行任何量測之前，徹底瞭解待測的系統或電路。詳讀待測系統的所有文件和線路圖，特別注意電路中的電壓位準和位置，以及所有的注意符號。

此外，務必詳讀下列安全注意事項，以免人身傷害或損及量測設備或其連接的系統。如需進一步瞭解下列注意事項，請參閱「安全注意事項說明」一節。

- 遵守所有終端的額定資料
- 使用正確的接地程序
- 正確連接和斷開探棒
- 避免暴露的電路
- 在處理探棒時避免射頻熔固
- 切勿在沒有保護蓋的情況下使用量測設備
- 切勿在潮濕的環境中使用量測設備
- 切勿在易爆環境中使用量測設備
- 切勿在疑似失效時使用設備
- 保持探棒表面清潔和乾燥
- 切勿將探棒浸入液體中

安全注意事項說明

詳閱下列安全注意事項，以免人身傷害、損及測試設備或任何連接到測試設備的任何產品。為避免潛在的危險，僅根據製造商的說明使用測試設備。

請記住，所有的電壓和電流都有潛在的危險，包括人身傷害或損及設備。

遵守所有終端的額定資料

- 為避免火災或電擊危險，應遵守產品上的所有額定值和標誌。請在連接產品前，先查閱產品手冊，以取得更詳盡的額定資訊。
- 切勿對任何超過額定上限的終端供電。
- 僅將探棒的接地引線接地。

注意

專門設計及規定用於浮動示波器應用的示波器，其第二條線是公共線，不是接地引線。在這種情況下，請遵循製造商規定的可連接的電壓上限規範。

- 檢查探棒和測試設備說明書，遵守任何額定值下降的資訊。例如，最大輸入電壓額定值會隨頻率提高而下降。

使用正確的接地程序

- 探棒透過示波器電源線的地線間接地。為避免電擊危險，必須正確連接地線。確認產品已接妥地線，再連接產品的輸入或輸出終端。
- 切勿嘗試讓任何測試設備的電源線不接地。
- 僅將探棒接地引線接地。
- 若未將不是專為不接地操作設計和指定的示波器接地，或是將接地引線連接到接地以外的任何其他項目上，可能會導致示波器和探棒的連接器、控制器或其他表面上出現危險電壓。

注意

這適用於大多數的示波器，但有些示波器是為在浮動應用中工作而設計。

正確連接和斷開探棒

- 先將探棒連接到示波器。探棒正確接地後，再連接到任何測試點。
- 探棒接地引線僅能接地。
- 從待測電路斷開探棒時，先從電路移開探棒頭，再斷開接地引線。
- 除探棒頭和探棒連接器中心導線外，探棒上可以接觸到的所有金屬(包括接地夾)都要連接到連接器外殼上。

避免暴露的電路

- 避免以手或身體任何其他部位碰觸暴露的電路或元件。
- 確認已接妥探棒頭和接地引線夾，以免發生互碰或是碰到待測電路的其他零件。

在處理探棒時避免射頻熔固

- 射頻功率呈現時，共振和反應效應會讓極小的電壓轉換成潛在有害或是危險性的電壓。
- 若需在有射頻熔固危險的區域使用探棒時，請先關閉訊號源的電源後，再連接或斷開探棒引線。切勿在通電時，處理輸入引線。

切勿在沒有保護蓋的情況下使用量測設備

- 切勿在卸除任何保護蓋或保護外殼時，使用示波器和探棒。卸除保護蓋、外殼、探棒機身或連接器外殼，將存有潛在危險電壓的導線或元件暴露在外。

切勿在潮濕的環境中使用量測設備

- 為避免電擊或損壞設備，切勿在潮濕的環境中使用量測設備。

切勿在易爆環境中使用量測設備

- 在易爆環境中使用電氣或電子設備可能會導致爆炸發生。在使用或存放汽油、溶劑、乙醚、丙烷和其他揮發性物質時，可能會產生易爆的氣體。另外，懸浮在空氣中的某些微塵或粉末也可能會產生易爆氣體。

切勿在疑似失效時使用量測設備

- 若懷疑示波器或探棒有電子或實體方面的問題，請在合格的維修人員檢查後，再繼續使用。

保持探棒表面清潔和乾燥

- 探棒上的水氣、灰塵和其他雜質會產生一條傳導路徑。為確保量測的安全和準確度，應保持探棒表面的清潔和乾燥。
- 僅應使用探棒說明書規定的程序清潔探棒。

切勿將探棒浸入液體中

- 探棒浸入液體中可能會在內部裝置之間產生一條傳導路徑，或損壞、腐蝕內部元件或外部機體和屏蔽。
- 僅應使用探棒說明書規定的程序清潔探棒。

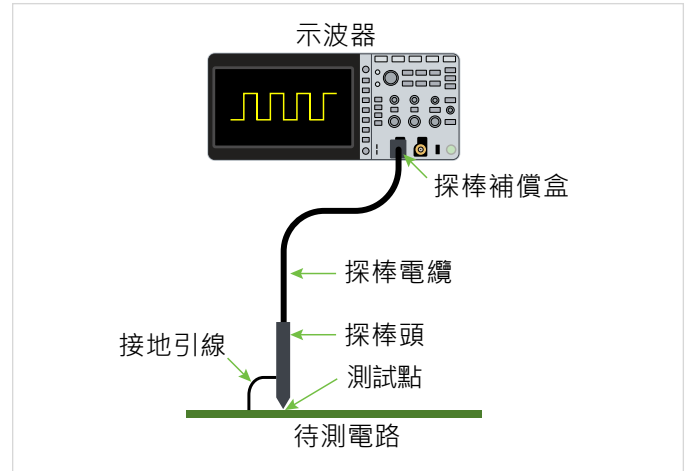


圖 2.1. 大多數探棒由探棒頭部、探棒纜線和補償盒或其他訊號調節網路組成。

2. 精密量測從探棒頭開始

探棒在示波器量測中具有舉足輕重的地位。若要瞭解探棒的重要性，請嘗試不讓示波器連接探棒，然後進行量測。您將發現這是做不到的事。在要量測的訊號和示波器的輸入通道之間必須有某種電氣連接，即某種探棒。

除了對示波器的量測至關重要之外，探棒對於量測品質也極為重要。將探棒連接至電路會影響電路的運作，示波器只能顯示和量測探棒傳遞到示波器輸入的訊號。

因此，迫切要求探棒對欲探測電路的影響達最低程度，且對希望的量測維持足夠的訊號完整性。若探棒不能維持訊號完整性，或若以任何方式改變訊號或改變電路運作方式，示波器即看到真正訊號的失真結果，最後可能導致錯誤或誤導的量測結果。

從本質上看，探棒是示波器量測鏈中的第一個環節。此量測鏈的強度依賴探棒和示波器的程度是相同的。採用不適當的探棒或較差的探測方法會削弱第一個環節，進而削弱整個量測鏈。

在本節和接下來的部分中，您將瞭解是什麼導致了探棒的優勢和劣勢，以及如何為您的應用選擇正確的探棒。您還將學習正確使用探棒的一些重要技巧。

什麼是探棒？

首先，讓我們建立有關示波器探棒的觀念。

探棒會在測試點或訊號源與示波器之間建立實體和電氣連接。根據您的量測需要，這種連接可以只使用一段導線來完成，也可以是如[主動式差動探棒](#)一樣複雜的連接裝置。

此時，您可以說示波器探棒是將訊號源連接到示波器輸入的某種裝置或網路。

無論探棒實際上是什麼，都必須能在訊號源和示波器輸入之間提供足夠便利和高品質的連接（圖 2.1）。連接的充分性具有三個關鍵的定義問題——實體連接、對電路操作的影響和訊號傳輸。

若要進行示波器量測，您必須首先能夠將探棒實際接觸到測試點。為了實現這一點，大多數探棒至少有一兩公尺的纜線與之相連，如圖 2.1 所示。當探棒在待測電路中的測試點之間移動時，探棒纜線可讓示波器留在推車或工作台上的固定位置。但是，這種便利性需要權衡。探棒纜線降低探棒頻寬；纜線越長，下降振幅越大。

除了纜線的長度外，大多數探棒還具有附有探棒頭的探棒頭部或拖曳點。探棒頭部可讓您在操縱探棒以與測試點接觸時握住探棒。通常，此探棒頭採用彈簧加載鉤的形式，可讓您將探棒實際連接到測試點。

將探棒實際連接到測試點也會在探棒頭和示波器輸入之間建立電氣連接。為了獲得可用的量測結果，將探棒連接到電路必須對電路工作方式的影響最小，並且探棒頭的訊號必須以足夠的完整性，透過探棒和纜線傳輸到示波器的輸入端。

這三個問題——實體連接、對電路操作的最小影響和足夠的訊號完整性——涵蓋了正確選擇探棒的大部分內容。由於探測效應和訊號完整性是更複雜的主題，因此本入門手冊的大部分內容都針對這些問題。然而，實體連接的問題絕對不能被忽視。將探棒連接到測試點的困難通常會導致降低完整性的探測實作。

理想的探棒

在理想的世界中，理想的探棒將提供以下關鍵屬性：

- 連接簡單方便
- 絕對訊號完整性
- 零訊號源負載
- 完全抗噪性

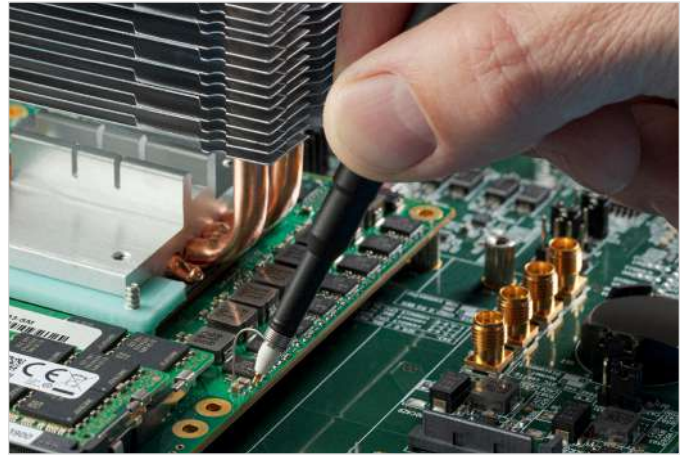
連接簡單方便

前文已經提過，與測試點建立實體連接是探測的關鍵要求之一。使用理想的探棒，您還應該能夠輕鬆方便地進行實體連接。

對於小型化電路，例如表面貼裝技術 (SMT)，透過為 SMT 裝置設計的超小型探棒和各種探棒頭轉接器提高了連接的簡易性和便利性。

這種探測系統如圖 2.2a 所示。然而，這些探棒太小，無法在工業電源電路等應用中實際使用，在這些應用中嘗會使用高電壓和更大規格的電線。對於電源應用，需要具有更大安全餘裕且實體上更大型的探棒。圖 2.2b 和 2.2c 顯示了此類探棒的示例，其中圖 2.2b 是高壓探棒，圖 2.2c 是鉗式電流探棒。

圖 2.2. 各種探棒可用於不同的應用技術和量測需求。



a. 探測 SMT 裝置。



b. 高電壓探棒。



c. 鉗式電流探棒。

從這些實體連接的幾個例子中，很明顯，沒有一種適用於所有應用的理想探棒尺寸或組態。因此，我們設計了各種探棒尺寸和組態以滿足各種應用的實體連接要求。

絕對訊號完整性

理想的探棒應該具備絕對的訊號完整性，將任何訊號從探棒頭傳輸到示波器輸入端。換言之，在探棒頭出現的訊號應該在示波器輸入端忠實地複製。

對於絕對完整性，從尖端到示波器輸入的探棒電路必須在所有頻率上都具有零衰減、無限頻寬和線性相位。這些理想的要求在現實中不僅不可能實現，而且不切實際。例如，當您處理音訊訊號時，不需要無限頻寬探棒或示波器。當 500 MHz 可以覆蓋大多數高速數位、電視和其他典型示波器應用時，也不需要無限頻寬。

零訊號源負載

測試點後面的電路可以被視為或建模為訊號源。任何連接到測試點的外部裝置 (例如探棒) 皆可在測試點後面的訊號源上顯示為附加負載。

外部裝置在從電路 (訊號源) 汲取訊號電流時充當負載。這種負載或訊號電流消耗改變了測試點後面電路的操作，進而改變了在測試點看到的訊號。

理想的探棒會導致訊號源負載為零。換句話說，探棒不會從訊號源汲取任何訊號電流。這意味著，對於零電流消耗，探棒必須具有無窮大的阻抗，本質上對測試點呈現開路。

但在實作中，無法實現零訊號源負載的探棒。這是因為探棒必須汲取少量訊號電流才能在示波器輸入端產生訊號電壓。因此，在使用探棒時會出現一些訊號源負載。然而，目標應該始終是透過選擇適當的探棒最小化負載量。

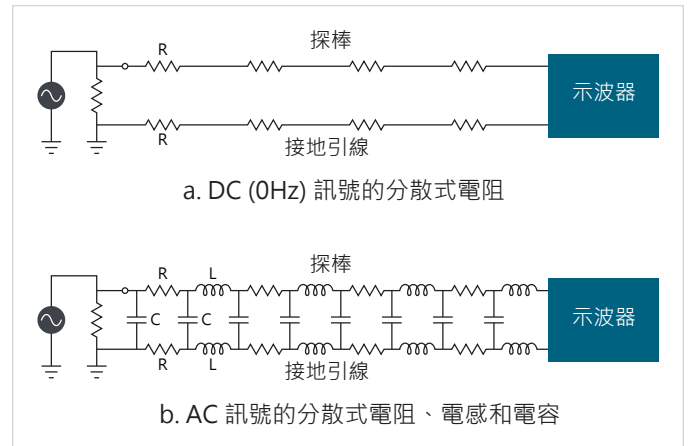


圖 2.3. 探棒是由分佈電阻、電感和電容 (R、L 和 C) 組成的電路。

完全抗噪

螢光燈和風扇馬達只是我們環境中眾多電雜訊源中的兩個。這些來源會將其雜訊引入附近的纜線和電路中，進而導致雜訊被加入訊號中。由於對感應雜訊的敏感性，一根簡單的導線對於示波器探棒並不是理想的選擇。

理想的示波器探棒完全不會受到所有雜訊源的影響。因此，傳送到示波器的訊號不會出現比測試點訊號上更多的雜訊。

在實作中，使用遮蔽可讓探棒對最常見的訊號位準達到高位準的抗擾度。但是，對於某些低位準訊號，雜訊仍然是一個問題。特別是，共模雜訊可能會給差動量測帶來問題，這將在後面討論。

探棒的現實情況

前面對理想探棒的討論提到了使實際探棒無法達到理想的幾個現實。若要瞭解這會如何影響您的示波器量測，我們需要進一步探索探棒的實際情況。

首先，重要的是要意識到探棒，即使只是一根簡單的電線，也可能是一個非常複雜的電路。

對於直流訊號 (0 Hz 頻率)，探棒表現為帶有一些串聯電阻和終端電阻的簡單導體對 (圖 2.3a)。然而，對於交流訊號，隨著訊號頻率的增加，圖像則會發生顯著的變化 (圖 2.3b)。

交流訊號的圖片會發生變化，因為任何一根電線都有分佈電感 (L)，而任何線對都有分佈電容 (C)。隨著訊號頻率的增加，分佈式電感通過越來越多地阻礙交流電流對交流訊號作出反應。隨著訊號頻率的增加，分佈電容對交流訊號作出反應，對交流電流的阻抗降低。這些電抗元素 (L 和 C) 與電阻元素 (R) 的相互作用會產生隨訊號頻率變化的總探棒阻抗。透過良好的探棒設計，可以控制探棒的 R、L 和 C 元素，以在指定的頻率範圍內提供所需的訊號完整性、衰減和源負載。即使設計良好，探棒也會受到其電路性質的限制。在選擇和使用探棒時，瞭解這些限制及其影響非常重要。

頻寬和上升時間限制

頻寬是示波器或探棒設計的頻率範圍。例如，100 MHz 探棒或示波器設計用於在高達 100 MHz 的所有頻率上進行規格範圍內的量測。超出指定頻寬的訊號頻率可能會出現不需要或不可預測的量測結果(圖 2.4)。

一般而言，若要進行精確的振幅量測，示波器的頻寬應該是待測波形頻率的三到五倍。這樣可以避免 3 dB 衰減頻率，進而提高振幅量測的準確性，如圖 2.4 所示。對於一階 (高斯) 滾降的系統，在 -3 dB 點量測的振幅約為實際振幅的 70%。一些高效能示波器和探棒具有更陡峭的滾降，並且會產生更接近其額定頻寬的更準確的振幅量測。使用頻寬為訊號頻率五倍的探棒/示波器組合可以毫無顧慮地提供準確的振幅量測。

同時，務必要記住，圖 2.4 中的圖表適用於純正弦波。方波和脈衝的最大頻率成分是訊號基頻的諧波。為了準確地觀察方波，必須能夠看到五次諧波甚至七次諧波。

同樣，示波器必須為待測波形提供足夠的上升時間。示波器或探棒的上升時間定義為脈衝從 10% 振幅位準上升到 90% 振幅位準所需的時間。為了量測脈衝上升或下降時間的合理準確度，探棒和示波器的上升時間應該比待測脈衝的上升時間快三到五倍 (圖 2.5)。

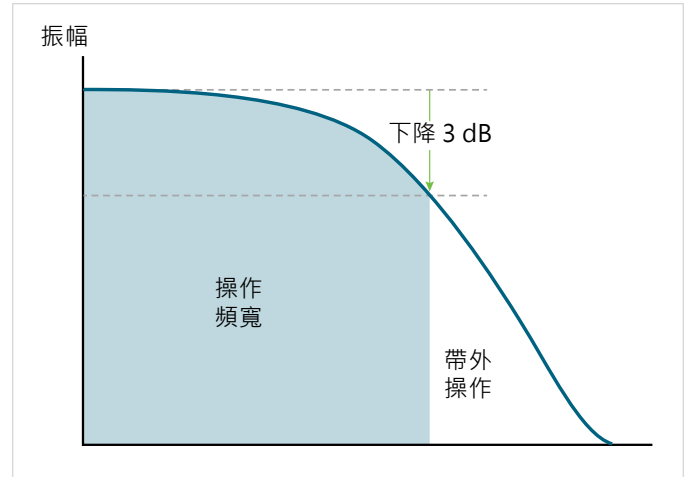


圖 2.4. 探棒和示波器設計用於在操作頻寬上依照規範進行量測。在超過 3 dB 點的頻率上，訊號振幅變得過度衰減，量測結果可能無法預測。

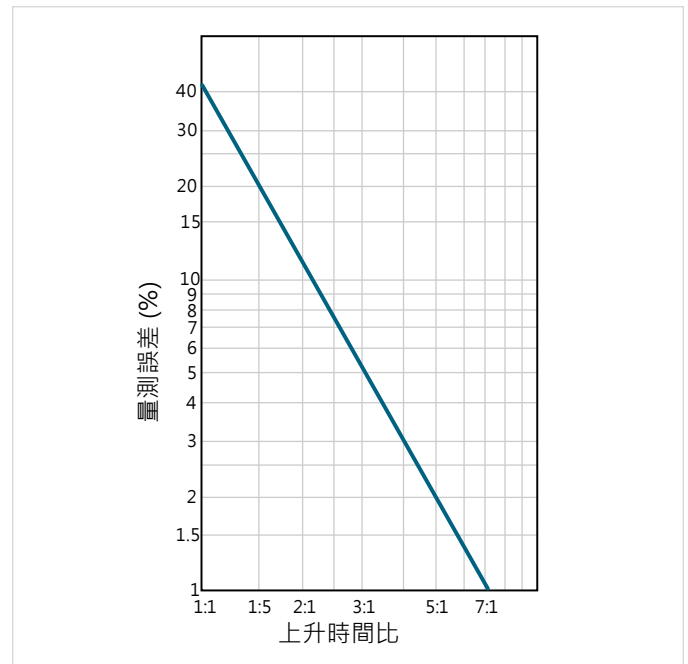


圖 2.5. 上升時間量測誤差可以從上圖估計。上升時間比待測脈衝快三倍 (比率為 3:1) 的示波器/探棒組合可以預期量測脈衝上升時間在 5% 以內。5:1 的比率將僅會導致 2% 的誤差。

在未指定上升時間的情況下，假設系統具有高斯滾降，您可以透過以下關係從頻寬 (BW) 規格中推導出上升時間 (Tr)：

$$T_r = \frac{.35}{BW}$$

每個示波器都定義了頻寬和上升時間限制。同樣，每個探棒也有自己的一組頻寬和上升時間限制。當探棒連接到示波器時，您將得到一組新的系統頻寬和上升時間限制。

不幸的是，系統頻寬與單個示波器和探棒頻寬之間的關係並不簡單。上升時間也是如此。為瞭解決此問題，當示波器與特定的探棒型號一起使用時，優質示波器的製造商會指定探棒頭的頻寬或上升時間。這很重要，因為示波器和探棒共同構成了一個量測系統，而系統的頻寬和上升時間決定了其量測能力。如果您使用的探棒不在示波器推薦的探棒清單中，則會面臨量測結果不可預測的風險。

動態範圍限制

所有探棒皆有不應超過的高壓安全限制。對於被動式探棒，此限制範圍可以從數百伏到數千伏。但是，對於主動式探棒，最大安全電壓限制通常在幾十伏的範圍內。為避免人身安全危險以及探棒的潛在損壞，您應充分瞭解所量測的電壓和所用探棒的電壓限制。

除了安全考慮，還有量測動態範圍的實作考慮。示波器具有振幅靈敏度範圍。例如，1 mV 至 10 V/格是典型的靈敏度範圍。在 8 分區顯示器上，您通常可以對 4 mV 峰對峰值到 40 V 峰對峰值的訊號進行相當準確的量測。

這至少假設採用 4 分區振幅的訊號顯示，以獲得合理的量測解析度。

使用 1X 探棒 (1 倍探棒)，動態量測範圍與示波器相同。對於上面的範例，訊號量測範圍即為 4 mV 至 40 V。

但是，若必須量測 40V 範圍以上的訊號時，會怎麼樣呢？

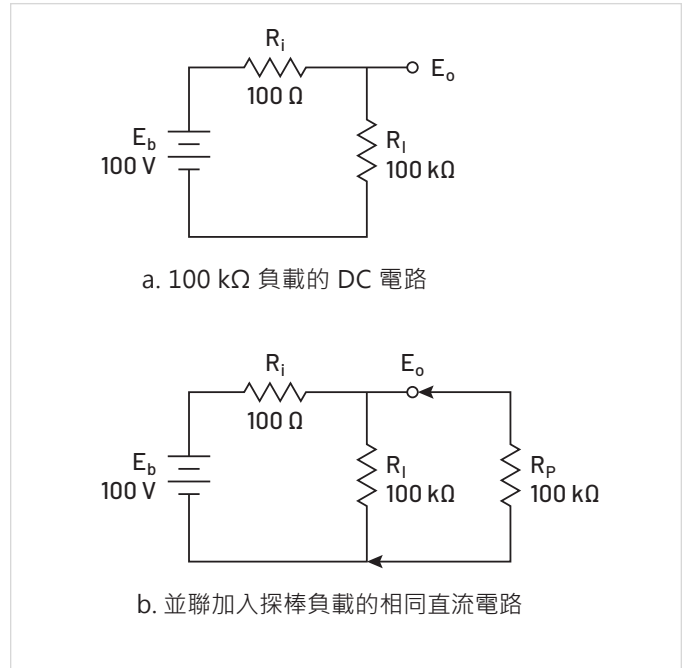


圖 2.7. 電阻負載範例。

您可以使用衰減探棒將示波器的動態範圍轉移到更高的電壓。例如，10X 探棒將動態範圍移到 40 mV - 400V。透過將輸入訊號衰減 10 倍，將示波器的標度有效地乘以 10，來實現這一點。在最通用的用途中，10X 探棒是首選的工具，這是因為高端電壓範圍及其導致的訊號源負載較少。但是，如果您計劃量測範圍很廣的電壓位準，您可能需要用 1X 探棒來補充 10X 探棒。這組合為您提供了 4 mV 至 400 V 的動態範圍。但是，在 1X 模式下，必須更加注意訊號源負載。

源負載

如前所述，探棒必須吸取一些訊號電流，以便在示波器輸入端產生訊號電壓。這會在測試點放置一個負載，該負載可改變電路或訊號源傳送到測試點的訊號。

源負載效應的最簡單範例是考慮量測電池驅動的電阻網路。如圖 2.7 所示。在圖 2.7a 中，在連接探棒之前，電池的直流電壓被分配到電池的內阻 (R_i) 和電池驅動的負載

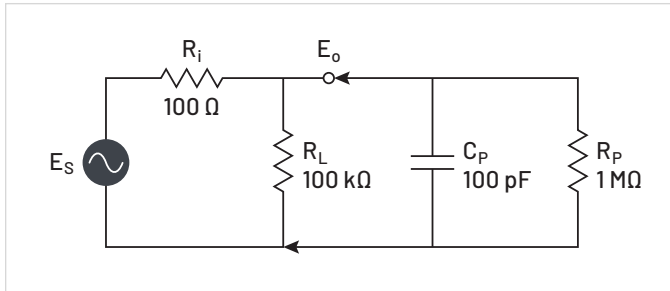


圖 2.8. 對於交流訊號源，探棒頭電容 (C_p) 是最大的負載問題。隨著訊號頻率的增加，容抗 (X_c) 會降低，進而導致更多的訊號流過電容器。

電阻 (R_i) 間。對於圖中給出的值，這會導致輸出電壓為：

$$\begin{aligned}
 E_o &= E_b \left(\frac{R_l}{R_i + R_l} \right) \\
 &= 100 \text{ V} \left(\frac{100 \text{ k}\Omega}{100 \Omega + 100 \text{ k}\Omega} \right) \\
 &= 99.9 \text{ V}
 \end{aligned}$$

在圖 2.7b 中，探棒已連接到電路，將探棒電阻 (R_p) 與 R_i 並聯。如果 R_p 為 100 kΩ，則圖 2.7b 中的有效負載電阻減半至 50 kΩ。

這對 E_o 的負載效果是：

$$\begin{aligned}
 E_o &= 100 \text{ V} * \frac{50,000}{(100 + 50,000)} \\
 &= \frac{5,000,000 \text{ V}}{50,100} \\
 &= 99.8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

99.9 V與99.8 V的負載效應僅為0.1%，在大多數情況下可以忽略不計。但是，如果探棒電阻(R_p)更小，例如 10 kΩ，則效果將不再可忽略。

為了盡量減少這種電阻負載，1X 探棒的電阻通常為 1 MΩ，而 10X 探棒的電阻通常為 10 MΩ。在大多數情況下，這些值並不會導致電阻負載。但是，在量測高電阻源時，應該會出現一些負載。

通常，最受關注的負載是由探棒頭的電容引起(圖 2.8)。對於低頻，該電容的電抗非常高，幾乎沒有影響。但是，隨著頻率的增加，容抗會降低。

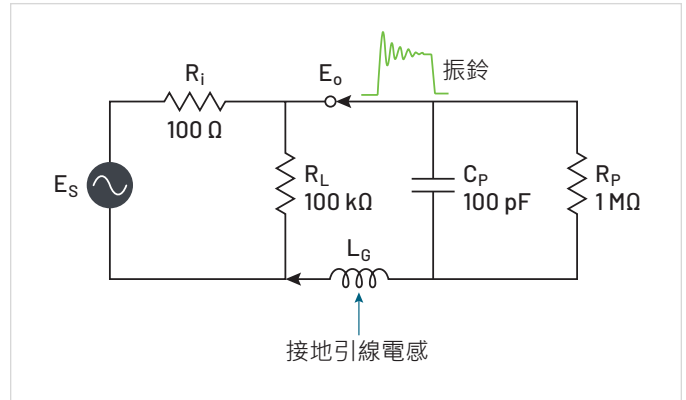


圖 2.9. 探棒接地引線為電路增加了電感。接地引線越長，電感越大，看到快速脈衝的可能性就越大。

結果是增加了高頻負載。

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

此容性負載會透過減少頻寬和增加上升時間來影響量測系統的頻寬和上升時間特性。

選擇具有低尖端電容值的探棒，可以最大限度地減少電容負載。下表提供了各種探棒的一些典型電容值：

探棒	衰減	電阻	電容
P6101B	1X	1 MΩ	100 pF
P6139B	10X	10 MΩ	8 pF
P6243	10X	1 MΩ	≤1 pF
TPP1000	10X	10 MΩ	12 pF

表 1.1. 探棒電容。

由於接地引線是一根導線，具有一定的分佈電感(圖 2.9)。此電感與探棒電容相互作用，在由L和C值確定的特定頻率下引起振鈴。這種振鈴是不可避免的，可以視為施加在脈衝上的振幅衰減的正弦曲線。透過設計探棒接地可以減少振鈴的影響，使振鈴頻率超出探棒/示波器系統的頻寬限制。

為避免接地問題，請務必使用探棒隨附的最短接地引線。改採其他接地方式可能會導致在量測脈衝上出現振鈴。

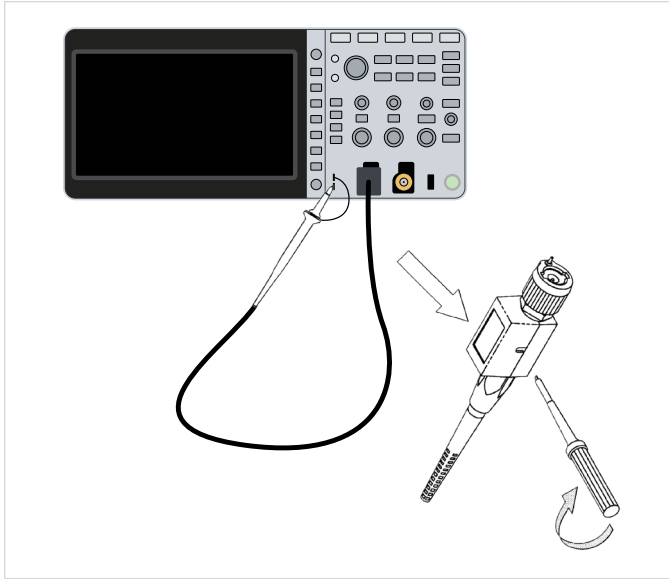


圖 2.10. 對於需要手動補償的示波器和探棒，補償調整可以在探棒頭部或連接到示波器輸入的補償盒上完成。

探棒就是感應器

在處理示波器探棒的實際情況時，重要的是要記住探棒就是感應器。大多數示波器探棒是電壓感應器。也就是說，探棒會感測或探測電壓訊號，並將該電壓訊號傳送到示波器輸入端。但是，還有一些探棒可以讓您偵測電壓訊號以外的現象。

例如，電流探棒設計用於偵測流過電線的電流。探棒會將感測到的電流轉換為相應的電壓訊號，然後將其轉接到示波器的輸入端。同樣地，光學探棒會感測光功率並將其轉換為電壓訊號以供示波器量測。

此外，示波器電壓探棒可與各種其他感應器或換能器一起使用，以量測不同的現象。例如，振動感應器允許您在示波器螢幕上查看機械振動特徵。可能性與市場上可用的感應器種類一樣廣泛。

但是，在所有情況下，須將感應器、探棒和示波器的組合視為一個量測系統。此外，上面討論的探棒的實際情況也向下延伸到換能器。換能器也有頻寬限制，可能會導致負載影響。

一些探測技巧

選擇與您的示波器和應用需求相符的探棒才能進行必要的量測。若要實際進行量測並獲得有用的結果，亦取決於您如何使用工具。以下探測技巧將有助於避免一些常見的量測陷阱：

補償探棒

大多數探棒旨在符合特定示波器型號的輸入。但是，不同的示波器，甚至同一示波器的不同輸入通道之間，都存在細微的差異。為了在必要時處理這個問題，許多探棒，尤其是衰減探棒（10X 和 100X 探棒），均有內建的補償網路。

如果您的探棒具有補償網路，則應調整此網路以針對您正在使用的示波器通道補償探棒。為此，請使用以下程序：

對於需要手動補償的探棒：

1. 將探棒連接到示波器。
2. 將探棒頭連接到示波器前面板上的探棒補償測試點(圖 2.10)。
3. 使用探棒隨附的調整工具或其他非磁性調整工具調整補償網路，以取得平頂、無過衝或圓角的校準波形顯示(圖 2.12)。
4. 如果示波器具有內建校準程序，請執行此程序以提高準確度。

對於具有自動數位補償功能的現代探棒：

1. 將探棒連接到示波器。
2. 將探棒頭連接到示波器前面板上的探棒補償測試點(圖 2.10)。
3. 按一下示波器前面的「自動設定」按鈕。
4. 連按兩下螢幕左下角的通道標籤。
5. 導覽至「探棒設定」下拉式功能表。
6. 按一下「補償探棒」按鈕(圖 2.11)。

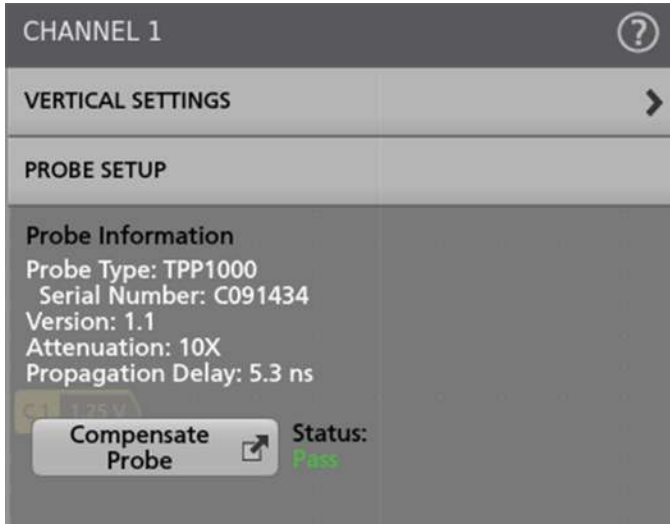
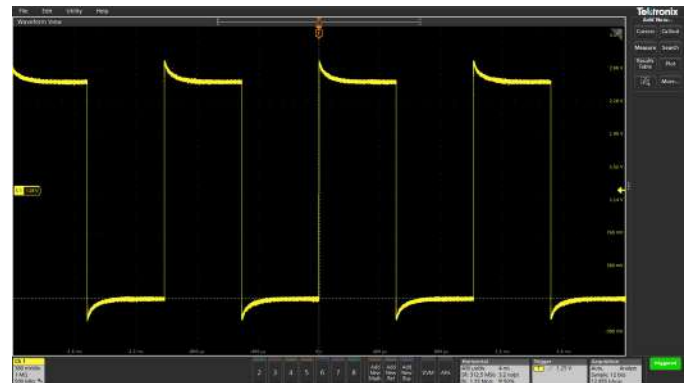


圖 2.11. 示波器上的探棒補償具有自動數位補償功能。

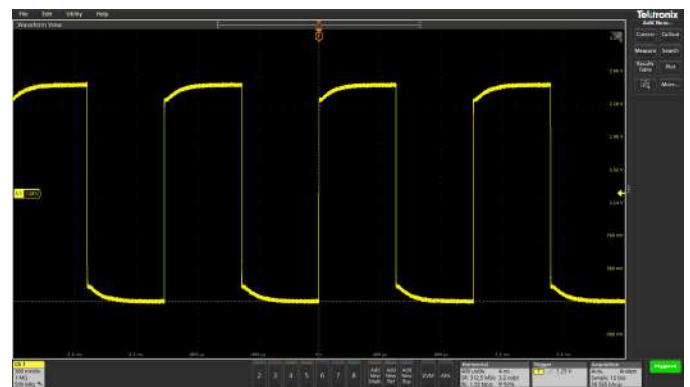
未補償的探棒會導致各種量測誤差，尤其是在量測脈衝上升或下降時間時。為避免此類錯誤，請務必在將探棒連接到示波器後立即對其進行補償，並經常檢查補償情況。

此外，您應在每次更換探棒頭轉接器時均檢查探棒補償。一些現代示波器會「記住」特定探棒的補償，例如 TekVPI 探棒。對於這些系統，可以透過快速測試簡單地驗證探棒補償。

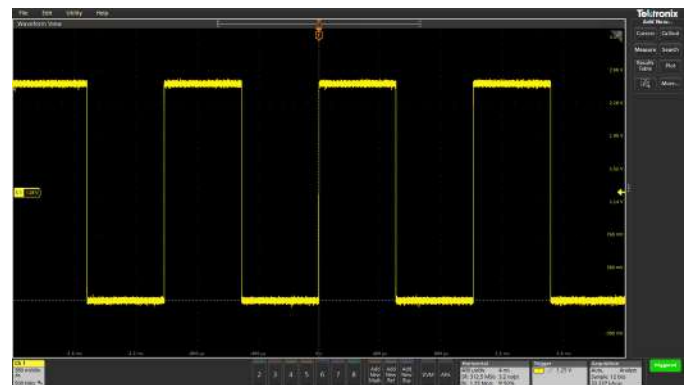
圖 2.12. 方波上的探棒補償效應範例。



補償過度。

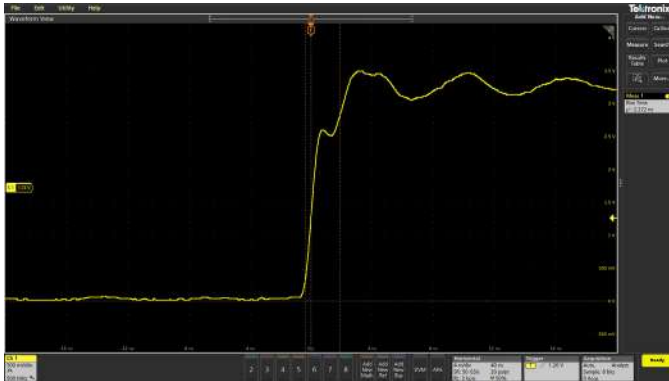


補償不足。

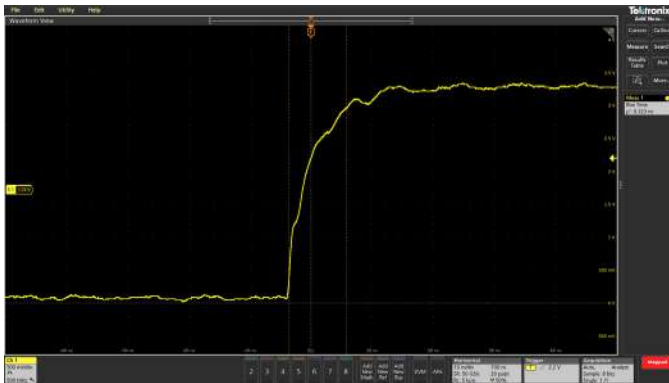


適當補償。

圖 2.13. 即使是焊接到測試點的一小段電線也會導致訊號完整性問題。在這種情況下，上升時間已從 4.74 ns 變更為 5.67 ns。

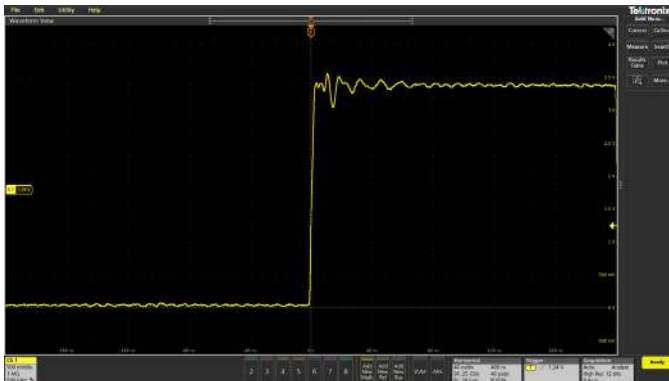


直接探棒頭觸點

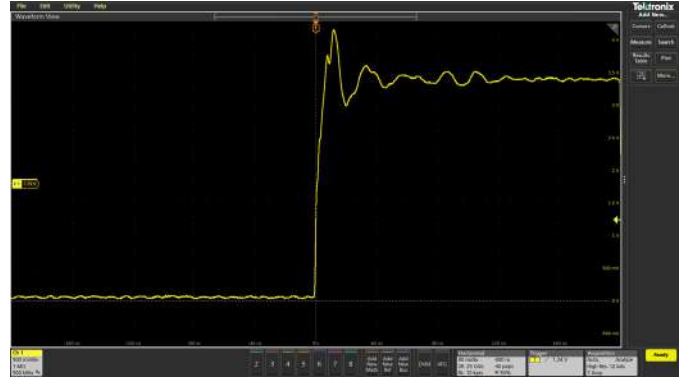


探棒頭上的兩吋導線

圖 2.14. 延長探棒接地引線的長度會導致脈衝出現振鈴。



6.5 吋探棒接地引線



連接到探棒引線上的 28 吋引線

盡可能使用合適的探棒轉接器

適用於待測電路的探棒頭轉接器可使探棒連接快速、方便、電氣可重複和穩定。不幸的是，看到焊接到電路點的短線代替探棒轉接器的情況並不少見

問題是，即使是一、兩吋的電線也會在高頻下引起顯著的阻抗變化。其效果如圖 2.13 所示，其中會透過直接接觸探棒頭來量測電路，然後再透過電路和探棒頭之間的一小段導線進行量測。

保持接地導線盡可能短且直。

在進行效能檢查或對大型電路板或系統進行疑難排解時，延長探棒的接地引線可能很誘人。延長的接地引線可讓您一次就接地，並在您查看各種測試點時在系統周圍自由移動探棒。但是，延長接地引線的附加電感會導致快速轉換波形上出現振鈴。如圖 2.14 所示，其中顯示了在使用標準探棒接地引線和延長接地引線時進行的波形量測。

總結

在第一章中，我們已嘗試提供正確選擇探棒和正確使用探棒所需的所有基本資訊。在接下來的章節中，我們將擴展這些資訊，並介紹有關探棒和探測技術的更進階資訊。

3. 不同探棒滿足不同需求

市場上提供了數百種、甚至數千種不同的示波器探棒。

選擇範圍如此廣泛的探棒是否真有必要呢？答案是肯定的，在本章中，您將發現其原因是什麼。

在瞭解這些原因之後，您將更充分地做好準備，選擇能夠與正在使用的示波器和需要進行的量測類型相匹配的探棒。其帶來的好處是，選擇適當的探棒將能夠增強量測功能和結果。

為什麼有這麼多探棒？

可供選擇的示波器型號和功能非常廣泛，只是市場上出現大量探棒的基本原因之一。不同的示波器要求不同的探棒。400 MHz 示波器要求支援 400 MHz 頻寬的探棒。

但是，許多功能和成本相同的探棒會爭奪 100 MHz 示波器，因此，必須設計一套不同的探棒，來支援 100MHz 的頻寬。

一般來說，應盡可能選擇與示波器的頻寬相符的探棒。若不能做到這一點，則最好選擇超過示波器頻寬的探棒。

但是，頻寬只是一個開始。示波器還可能有不同的輸入連接器類型和不同的輸入阻抗。例如，大多數示波器使用一個簡單的 BNC 類型的輸入連接器。其他示波器可能會使用 SMA 連接器，如圖 3.1 所示，還有的示波器帶有專門設計的連接器，支援讀數、軌跡 ID、探棒功率或其他專用功能。

因此，探棒選擇中還必須包括使連接器能夠相容使用的示波器。這可以是直接相容連接器，也可以是透過相應轉接器進行的連接。

圖 3.1. 探棒接示波器介面。



標準 BNC 探棒。帶有普通 BNC 連接器的探棒幾乎可以連接所有 Tektronix 示波器。低價被動式探棒一般帶有普通 BNC 連接器。



TekProbe™ Level 1 BNC 探棒。配有 TekProbe Level 1 BNC 連接器的探棒將標度資訊傳送給示波器，進而示波器可以正確傳送準確的振幅資訊。



TekProbe™ Level 2 BNC 探棒。TekProbe Level 2 BNC 共用 Level 1 的標度資訊，同時還為全系列主動式電子探棒設計供電。



TekVPI® 探棒。TekVPI 提供與相容示波器的雙向通訊，用於從示波器進行縮放、補償、相差校正、消磁和調零。



TekConnect® 探棒。配有 TekConnect 介面的探棒支援 Tektronix 提供的最高頻寬的主動式探棒。TekConnect 介面被設計成支援 >20 GHz 的探棒要求。

讀數支援在探棒/示波器連接器相容能力尤為重要。在示波器上互換 1X 和 10X 探棒時，示波器的垂直標度讀數應體現 1X 到 10X 的變化。例如，若示波器連接 1X 探棒時的垂直標度讀數是 1 V/格 (每格 1 伏特)，然後換成 10X 探棒，則垂直讀數應以 10 倍的係數變成 10 V/格。若示波器讀數中沒有體現這種從 1X 到 10X 變化，則使用 10X 探棒進行的振幅量測將比本來數位低 10 倍。

某些通用或商用探棒可能不支援所有示波器的讀數功能。結果，在使用通用探棒代替示波器製造商專門推薦的探棒時必須特別注意。

除頻寬和連接器差異外，各種示波器還有不同的輸入電阻和電容值。一般來說，示波器輸入電阻是 50 Ω 或 1 M Ω 。但是，根據示波器的頻寬規格和其他設計因素，輸入電容可能會出現很大的變化。為實現正確傳送訊號和完整性，重要的一點是探棒的電阻和電容與其使用的示波器的電阻和電容相符合。例如，50 Ω 探棒應與 50 Ω 示波器輸入一起使用。同樣，1 M Ω 探棒應在 1 M Ω 輸入電阻的示波器上使用。

在使用衰減器探棒時，這種一對一電阻符合會出現例外。例如，用於 50 Ω 環境的 10X 探棒將有 500 Ω 的輸入電阻，用於 1M Ω 環境的 10X 探棒將有 10 M Ω 的輸入電阻 (衰減器探棒如 10X 探棒也稱為分路器探棒和複用器探棒。這些探棒乘以示波器的量測範圍，其透過衰減或除以示波器提供的輸入訊號來實現此點)。

除電阻符合外，探棒電容還應與示波器的額定輸入電容相符合。通常情況下，這一電容符合可以透過調節探棒的補償網路來實現。但是，只有在示波器的額定輸入電容落在探棒的補償範圍內時，才有可能實現這一點。因此，探棒具有不同的補償範圍，以滿足不同示波器輸入要求的情況並不少見。

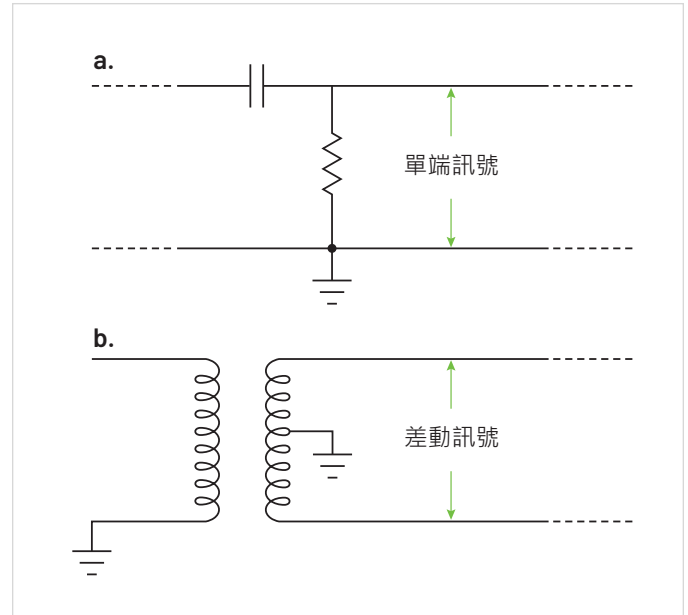


圖 3.2. 單端訊號參考接地 (a)，而差動訊號則是兩條訊號線或兩個測試點之差 (b)。

示波器製造商已大大簡化了探棒與示波器的相符合問題。示波器製造商作為完整系統審慎地設計探棒和示波器。結果，一直可以透過使用示波器製造商指定的標準探棒，來實現探棒與示波器的最佳符合效果。使用製造商指定探棒外的任何其他探棒，都可能會使量測效能達到最佳水準。

僅探棒與示波器符合要求一項，就導致了市場上出現大量的基本探棒。然後，必須使用不同的探棒滿足不同的量測需求，又明顯提高了探棒數量。其最基本的差異在於待測的電壓範圍。毫伏特、伏特和千伏特量測一般要求具有不同衰減係數 (1X、10X、100X) 的探棒。

此外，許多情況下訊號電壓是差動電壓。也就是說，訊號存在於兩個點或兩條線中，這兩個點或兩個訊號都沒有處於接地或公共電位 (圖3.2)。這種差動訊號在電話語音電路、電腦磁片讀通道和多相電路十分常見。量測這些訊號也要求另一種探棒，稱為差動式探棒。

還有許多情況，特別是在電源應用中，電流或多或少地與電壓相關。感測電流、而不是電壓的另一類探棒可以最好地滿足這些應用需求。

不同探棒類型及其優勢

在討論各種常見探棒類型前，必須知道類型經常會有重疊。當然，電壓探棒僅感測電壓，但電壓探棒可以是被動式探棒，也可以是主動式探棒。同樣地，差動式探棒是特定類型的電壓探棒，差動式探棒也可以是主動式探棒或被動式探棒。在相應的地方，我們將指出這些重疊關係。

被動式電壓

探棒被動式探棒由導線和連接器製成，在需要補償或衰減時，還包括電阻器和電容器。探棒中沒有主動式裝置 (電晶體或放大器)，因此不需為探棒供電。

由於相對簡單，被動式探棒一般是最堅固、最經濟的探棒。這些探棒使用方式簡便，也是使用最廣泛的探棒。

被動式電壓探棒為不同電壓範圍提供了各種衰減係數 -1X、10X 和 100X。在這些被動式探棒中，10X 被動式電壓探棒是最常用的探棒，也是通常作為示波器標準配件提供的探棒類型。

對訊號振幅是 1V 峰值或更低的應用，1X 探棒可能要比較合適，甚至是必不可少的。在低振幅和中等振幅訊號混合 (幾十毫伏特到幾十伏特) 的應用中，可切換 1X/10X 探棒要方便得多。但要記住，可切換 1X/10X 探棒在本質上是一個產品中的兩個不同探棒，不僅其衰減係數不同，而且其頻寬、上升時間和阻抗 (R 和 C) 特點也不同。結果，這些探棒不能與示波器的輸入完全符合，不能提供標準 10X 探棒實現的最優效能。

大多數被動式探棒是為用於通用示波器而設計的，因此其頻寬範圍一般在小於 100 MHz 到 500 MHz 或更高的頻寬之間。

這些探棒有多種配件可供選擇，以方便連接不同的電線、元件或測試點。請參閱本章後面的「探棒附件」和圖 3.17。

但是，有一種特定類型的被動式探棒提供了高得多的頻寬，其稱為 50 Ω 探棒、Zo 探棒和分壓器探棒。這些探棒是為用於 50 Ω 環境中而設計的，這些環境一般是高速設備檢定、微波通和時訊域反射儀 (TDR)。這些應用使用的典型 50 Ω 探棒擁有幾千赫茲的頻寬和 100 皮秒或更快的上升時間。

單端主動式電壓探棒

主動式探棒包含或依賴主動式裝置操作，如電晶體。最常見的情況下，主動式裝置是場效應電晶體 (FET)。

FET輸入的優勢是提供了非常低的輸入電容，一般為幾皮法拉，最低不到 1 皮法拉。這種超低電容可以實現使用者希望的多種效應。

首先，低電容值 C 相當於高電容電抗值 X_C 。可以從下面的 X_C 公式中看出這一點：

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

由於電容電抗是探棒的主要輸入阻抗要素，因此低電容會在更寬的頻段上導致高輸入阻抗。結果，主動式 FET 探棒的規定頻寬一般在 500 MHz 至幾 GHz 之間。

除頻寬更高外，主動式 FET 探棒的高輸入阻抗允許在阻抗未知的測試點上進行量測，而負載效應的風險要低得多。另外，由於低電容降低了接地引線影響，可以使用更長的接地引線。但最重要的是，FET 探棒提供的負載非常低，因此可以用於給被動式探棒帶來嚴重負載的高阻抗電路上。

由於這些積極優勢，包括 DC 至幾 GHz 的頻寬，您可能要問：為什麼還要使用被動式探棒呢？

答案是主動式 FET 探棒沒有被動式探棒的電壓範圍。主動式探棒的線性動態範圍一般在 $\pm 0.6\text{ V}$ 到 $\pm 10\text{ V}$ 之間。另外，其可以耐受的最大電壓最低可以在 $\pm 40\text{ V}$ (DC + 峰值 AC)。換句話說，其不能像被動式探棒一樣量測從幾毫伏特到幾十伏特的電源，在因疏忽而探測較高的電壓時，可能會損壞主動式探棒。靜電放電甚至也會損壞主動式探棒。

但是，FET 探棒的高頻寬是一個重大優勢，其線性電壓範圍涵蓋了許多典型的半導體電壓。因此，主動式 FET 探棒通常用於低位準應用，包括快速邏輯系列，如 ECL、GaAs 等等。

電源軌探棒

傳統的電源完整性應用通常是使用被動或差動式探棒來量測電軌。不斷變化的技術環境意味著設計人員需要更高準確度的漣波量測，並可快速轉換推向多 GHz 範圍。新的設計挑戰需要新的探測技術，以有效地減少量測工具所產生的雜訊，同時提供更寬的頻寬以查看更多的訊號內容。電軌探棒就是為此目的而建造，可提供低負載準確度（特別是在最靈敏的量測中），並提供低雜訊和高頻寬選項。其頻寬越高，使用者能查看直流電軌上可能影響的資料訊號、時脈的內容（諧波、更快的漣波等）也就越多。



圖 3.3. TPR4000 電軌探棒。

圖 3.3 顯示了此類探棒的範例。

電軌探棒可涵蓋高達數 GHz 的電軌暫態事件，並提供 10 伏特的大直流偏移電壓範圍，以量測從插頭到整合式電路針腳的電源供應器。同時還支援電源完整性應用的寬動態範圍，在較高的電壓軌上，您可以看到線路上的動態載變電壓，或是負載或暫態何時會消耗大量電流。探棒中較高的輸入阻抗（直流下為 50 k Ω ）可有效地減少示波器負載對直流電軌的影響。

隨著技術的進步，電力工程師面臨的挑戰是如何從更精巧質輕的設計中獲得更高的電源效率。對於汽車、工業和消費者市場的工程師尤其如此，這些領域的典型驗證需要探測至少一或多個與其他訊號並列的軌道。由於間距緊密、隱藏訊號和更微小的幾何元件等因素，進而對連接產生新的約束。電軌探棒具有模組化和靈活的連接選項，可滿足大多數的量測需求。

差動式探棒

差動訊號是互相參考、而不是參考接地的訊號。圖 3.4 說明這些訊號的多個範例，包括集電極負載電阻器中形成的訊號、磁碟機讀通道訊號、多相電源系統和訊號在本質上「漂浮」在接地之上的各種其他情況。有些差動式探棒也配有接地電纜。這並非在所有應用中都必要，但有助於提高訊號完整性。如果存在大量共模雜訊，接地電纜可能是

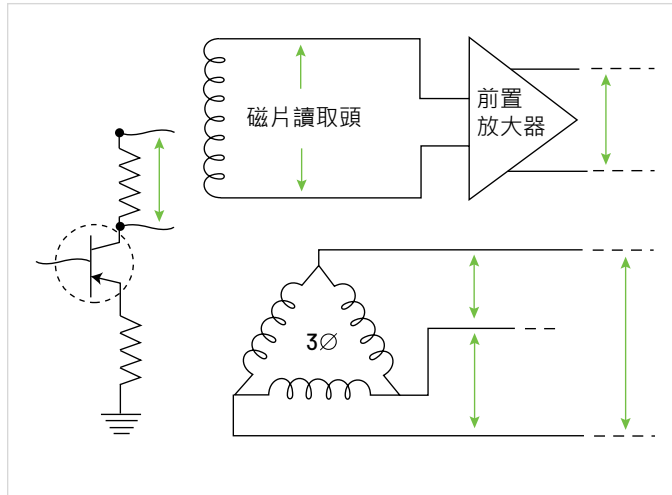


圖 3.4. 差動訊號源範例。

雜訊傳播的更好路徑，因此不會污染您的量測結果。使用此接地線的另一個原因是為了安全。使用差動式探棒時，測試點通常會浮動在地面以上數百伏特。加上接地電纜還可以防止靜電放電 (ESD)。

您可使用兩種基本方式來探測和量測差動訊號。圖3.5說明這兩種方法。

如圖 3.5 所示，使用兩隻探棒進行兩項單端量測是一種常用方法。通常情況下，這也是進行差動式量測時最不希望使用的方法。但是，之所以這一方法十分常用，是因為雙通道示波器帶有兩個探棒。量測到地的訊號 (單端) 及使用示波器的數學運算函數從其他通道中減去一條通道 (通道 A 訊號減通道 B)，這似乎是獲得差動訊號的優秀解決方案。在訊號是低頻訊號、擁有足夠振幅、能夠超過任何擔心的雜訊的情況下，都可以採用這種解決方案。

將兩個單端量測組合在一起有多個潛在問題。其中一個問題是沿著每個探棒直到每條示波器通道有兩條單獨的長訊號通路。這兩條通路之間的任何延遲差都會導致兩個訊號發生時間偏移。在高速訊號上，這個偏移會導致計算的差動訊號中發生明顯振幅和定時誤差。為使這種誤差達到最小，應使用相符的探棒。

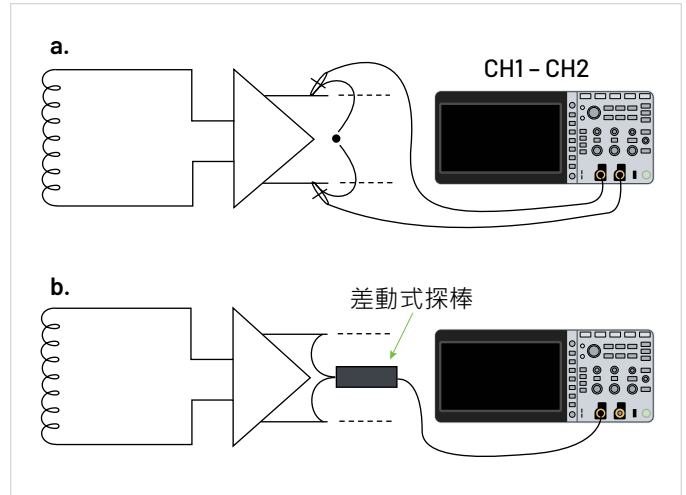


圖 3.5. 差動訊號可以使用兩個通道和波形減法 (a) 進行量測，或最好使用差動式探棒 (b) 進行量測。

單端量測的另一個問題是無法提供足夠的共模雜訊抑制。共模雜訊是附近時脈線在兩條訊號線上導致的雜訊，或螢光等外部來源發出的雜訊。許多低位準訊號如磁片讀通道訊號以差動方式傳輸和處理，以利用共模雜訊抑制功能。在差動系統中，一般從差動訊號中去掉這種共模雜訊。成功實現這種功能稱為共模抑制比 (CMRR)。

由於通道差異，隨著頻率提高，單端量測的CMRR 效能會迅速下降到令人失望的水準。若訊號源保持共模抑制比，這會導致訊號表現的雜訊超過實際水準。

另一方面，差動式探棒使用差動放大器減去兩個訊號，進而可以使用一條示波器通道量測一個差動訊號 (圖 3.5b)。

這可以在更寬的頻率範圍內提供明顯高得多的CMRR效能。此外，電路縮微術的發展允許差動放大器移動到實際探棒頭。在最新的差動式探棒中，如 Tektronix P6247 中，這可以實現 1 MHz 時 60 dB (1000:1) 到 1GHz 時 30 dB (32:1) 的 CMRR 效能。光隔離探棒可提供更高的 CMRR。



圖 3.6. 高壓探棒可量測高達 20 kV 的直流電壓和高達 40 kV 的脈衝，頻寬為 75 MHz。

高電壓探棒

「高壓」是相對概念。在半導體行業中視為高壓，在電源行業中實際上沒有任何意義。但從探棒角度看，我們可以將高壓定義為超過典型的通用 10X 被動式探棒可以安全處理的電壓的任何電壓。

一般來說，通用被動式探棒的最大電壓在 400 - 500 V 左右 (DC + 峰值 AC)。另一方面，高電壓探棒的最大額定電壓可以高達 20,000 V。這一探棒的範例如圖 3.6 所示。

安全對高電壓探棒和量測尤其重要。為適應這一點，許多高電壓探棒的纜線要比普通纜線長。典型纜線長度是 10 呎。將示波器放在安全保護箱外部或安全保護罩後面通常就已經足夠了。另外，在需要從高壓電源中進一步去掉示波器操作的情況下，還可以選擇 25 呎纜線。



圖 3.7. IsoVu 光隔離探棒具有高頻寬和極高的共模抑制。

光隔離探棒

隔離探棒使用電流隔離將探棒的參考電壓與示波器的參考電壓 (通常是接地) 隔離。由於待測裝置和示波器之間沒有電氣連接，因此共模電流沒有通過儀器的路徑，導致非常高的共模抑制比，即使在 500 MHz 或 1 GHz 頻寬下也是如此。

高品質傳統差動式探棒在 100 MHz 時可提供 -25dB 的 CMRR，而光隔離探棒則可提供 -120dB。隔離還可以實現高達千伏特範圍的高差動電壓範圍。

Tektronix 開發了一項專利技術 (稱為 IsoVu)，該技術使用光隔離在寬頻寬內提供同類最佳的共模抑制效能。IsoVu 技術使用光纖供電和光學類比訊號路徑，在量測系統和 DUT 之間達到完全的電流隔離。這項技術非常實用，特別是對於使用快速開關寬能隙半導體的電源轉換器進行精確的電壓量測。

Tektronix IsoVu 探棒如圖 3.7 所示。

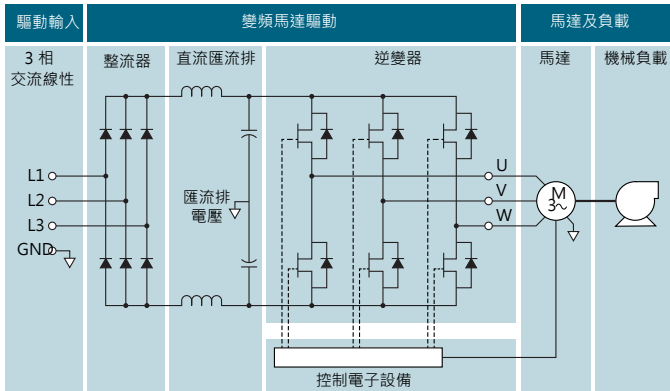


圖 3.8. 在這個三相馬達驅動裝置中，所有點都在接地之上，因此必須進行浮動量測。

浮動量測

浮動量測是在兩點之間進行的量測，這兩個點都未處於接地電位上。這聽上去有點像前面差動式探棒中介紹的差動式量測，事實上確實如此。浮動量測就是一種差動式量測，實際上也可以使用差動式探棒進行浮動量測。

但是，一般說來，「浮動量測」使用時都會與功率系統量測有關，如開關電源、馬達驅動裝置、鎮流器、不間斷電源等等，其中兩個量測點都不在接地(接地電位)上，訊號「公共」電位可能會從接地提升(浮動)到幾百伏特。這些量測通常要求抑制高共模訊號，以評估這些訊號上的低位準訊號。外來接地電流也會在顯示中增加雜訊，導致量測變得更加困難。

典型浮動量測情況如圖 3.8 所示。在這個馬達驅動系統中，三相 AC 線路整流到高達 600 V 的浮動 DC 匯流排中。參考接地的控制電路產生脈衝調變閘極驅動訊號，透過隔離的驅動裝置傳送到電橋電晶體，導致每個輸出以脈衝調變頻率擺動整個匯流排電壓。為精確量測閘極 - 源極的電壓，要求抑制匯流排轉換。此外，馬達驅動裝置精巧的設計、快速電流轉換及接近旋轉馬達，都導致了嚴酷的 EMI 環境。

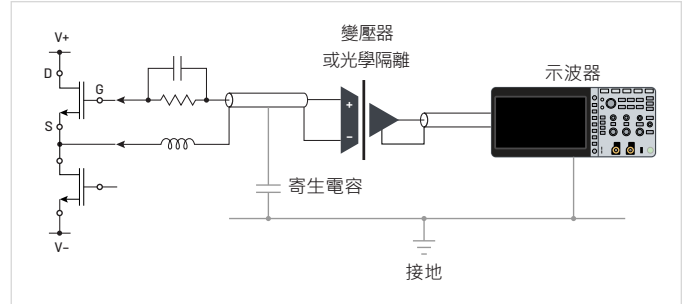


圖 3.9. 進行浮動量測的探棒隔離範例。

此外，將示波器探棒的接地引線連接到馬達驅動電路的任何部分，都會導致接地短路。

探棒隔離裝置只浮動探棒，而不浮動示波器。這種探棒隔離可以透過變壓器或光學耦合機制完成，如圖 3.9 所示。在這種情況下，示波器應保持接地，並將差動訊號施加到隔離的探棒頭和參考引線。隔離裝置將差動訊號傳送到接收器，接收器會產生參考地位準的訊號，這個訊號與差動輸入訊號成比例。這樣，探棒隔離裝置幾乎能夠相容任何儀器。

為滿足不同需求，業內提供了各種類型的隔離裝置，包括多通道隔離裝置，其提供了兩條或兩條以上的通道及多條獨立參考引線。此外，對隔離裝置需要與儀器在實體上隔開很長距離的應用 (如 100 公尺以上)，還提供了基於光纖的隔離裝置。與差動式探棒一樣，隔離裝置的主要選型規格是頻寬和 CMRR。此外，最大工作電壓也是隔離系統的一個主要規格。

警告！

為避開這種直接的接地短路，某些示波器使用者一直使用使示波器接地電路發生缺陷的不安全作法。這允許示波器的接地引線浮動馬達驅動裝置電路，進而可以進行差動量測。遺憾的是，這種作法還會使示波器主機殼以可能危及、甚至會電死示波器使用者的電位浮動。

「浮動」示波器不僅是一種不安全的作法，而且雜訊和其他效應通常會損害量測結果。

電流探棒

流經導線的電流會導致在導線周圍形成電磁通量場。電流探棒是為感測這個通量場的場強而設計，並將其轉換成相應的電壓，以使用示波器進行量測。這允許使用示波器查看和分析電流波形。在與示波器的電壓量測功能結合使用時，電流探棒還允許進行各種功率量測。根據示波器的波形數學運算功能，這些量測可以包括暫態功率、真實功率、表現功率和相位。

示波器的電流探棒基本上分成兩類：即 AC 電流探棒和 AC/DC 電流探棒，AC 電流探棒通常是被動式探棒，AC/DC 電流探棒通常是主動式探棒。這兩種類型都採用相同的變壓器動作原理，感應導線中的交流 (AC)。

對變壓器動作，必須先有交流流經導線。這個交流導致根據電流流動的振幅和方向構建和拆除通量場。在這個場中放一個線圈時，如圖3.10所示，變動的通量場會透過簡單的變壓器操作，在線圈中引起電壓。

這種變壓器操作是 AC 電流探棒的基礎。AC 電流探棒頭實際上是一個線圈，根據高準確度規格纏在磁芯上。當這個探棒頭保持在指定方向及接近承載 AC 電流的導線時，探棒會輸出一個線性電壓，此電壓與導線中電壓的比例已知。這種與電流有關的電壓可以在示波器上顯示為電流標度的波形。

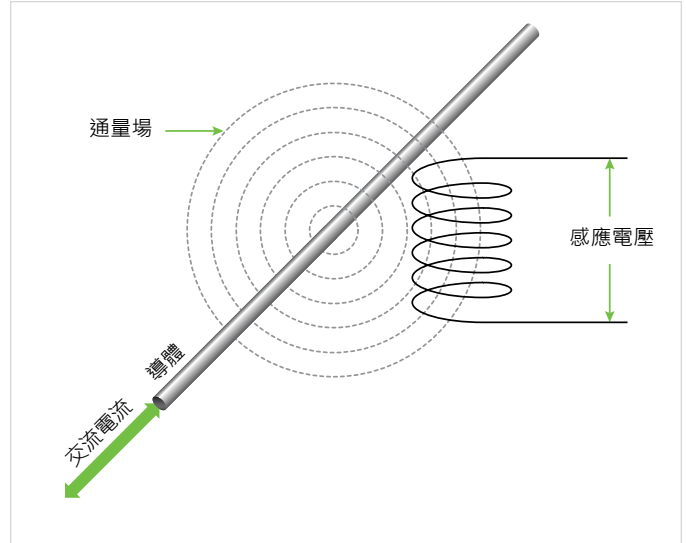


圖 3.10. 在線圈上感應電壓，線圈放在承載交流 (AC) 的導線周圍變動的通量場中。

在任何情況下，AC 電流探棒還有一個低頻截止點，這包括直流 (DC)，因為直流不會引起變化的通量場，因此不會引起變壓器動作。另外在非常接近 DC 的頻率上，如 0.01 Hz，通量場不可能變化得足夠快，能夠實現可以感知的變壓器動作。但是，最終會達到低頻，使得變壓器動作足以在探棒頻寬範圍內產生可以衡量的輸出。根據探棒線圈的設計，頻寬的低頻一端再次可能會低達 0.5 Hz 或高達 1.2 kHz。

對起始頻寬在 DC 附近的探棒，可以在探棒設計中增加霍爾效應裝置以偵測 DC。其結果是得到頻寬從 DC 開始、擴展到規定頻率上限 3 dB 點的 AC/DC 探棒。這類探棒至少要求一個電源，來偏置 DC 感測使用的霍爾效應設備。根據探棒設計，還可能會要求電流探棒放大器，以組合和定標 AC 和 DC 位準，為在示波器上觀察訊號提供單一的輸出波形。

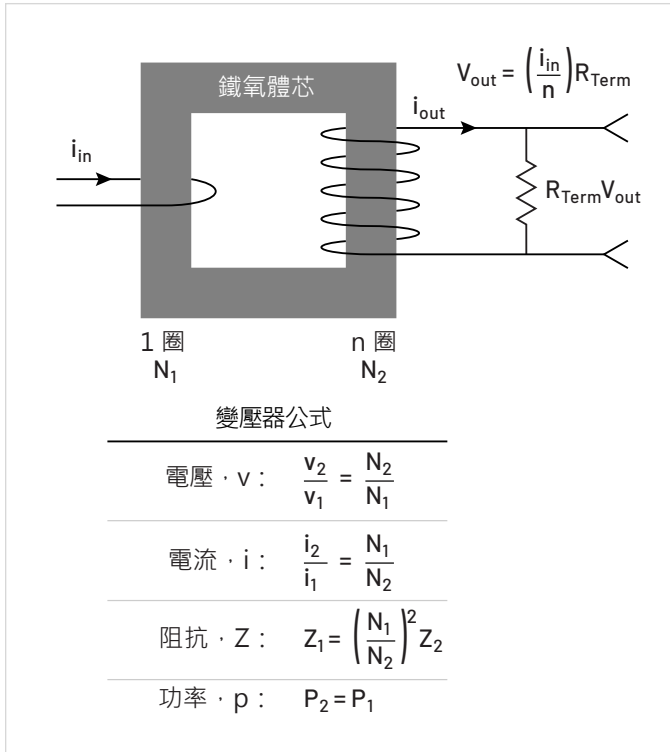


圖 3.11. 透過 AC 變壓器動作，一圈承載電流的導線 (N₁) 會在 AC 探棒的線圈 (N₂) 中感應電流，在探棒端子 (R_{term}) 中導致與電流成比例的電流。

必須記住，從本質上看，電流探棒的工作方式類似於緊密耦合的變壓器。圖 3.11 說明這一概念，其中包括基本變壓器公式。對標準操作，感測的電流導線是一圈線圈 (N₁)。來自這個單線圈的電流會轉換成與線圈比率成比例 (N₂/N₁) 的多線圈 (N₂) 探棒輸出電壓。同時，探棒的阻抗作為串聯插入阻抗轉換回到導線上。這種插入阻抗與頻率相關，其 1-MHz 值一般位於 30 - 500 MΩ 的範圍內，具體視探棒而定。阻抗在待測電路內串列出現。在大多數情況下，電流探棒的插入阻抗很小，所施加的負載可以忽略不計。

可以利用變壓器基礎知識，透過將導體多次纏在探棒上來提高探棒靈敏度。兩圈可以使靈敏度提高兩倍，三圈可以使靈敏度提高三倍。但是，這會使插入阻抗以增加的圈數的平方提高。



圖 3.12. 分芯 AC 電流探棒範例。在探棒上將導線繞 n 圈可以使有效的靈敏度提高 n 倍。

圖 3.12 還說明一種特定的探棒類型，稱為分芯探棒。這類探棒的線圈放在「U」形芯上，「U」形芯帶有一鐵素體滑塊，滑塊蓋住「U」形頂部。這類探棒的優點在於，鐵素體滑塊可以收縮，使得探棒能夠方便地卡到量測電流的導線上。在量測完成時，滑塊可以收縮，探棒可以移到其他導線上。

探棒還帶有實芯電流變壓器。這些變壓器完全繞在待測導線上。結果，必須斷開待測導線，將導線穿過變壓器，然後重新將導線連接到電路上，才能安裝這些變壓器。實芯探棒的主要優勢是其體積非常小，提供了非常快的頻響，可以量測快速、低振幅電流脈衝和 AC 訊號。

到目前為止，分芯電流探棒是最常用的探棒類型，其分為 AC 型和 AC/DC 型，並有各種每格電流顯示範圍，具體視安培秒乘積而定。

安培秒乘積定義了任何電流探棒線性操作的最大極限。對電流脈衝，這一乘積定義為平均電流振幅乘以脈寬。在超過安培秒乘積時，探棒線圈的芯材會變得飽和。由於飽和的芯不能處理更多的電流感應的通量，因此在電流輸入和電壓輸出之間不再成恆定的比例。

其結果，波形峰值基本上會在超過安培秒乘積的區域中「被削掉」。

透過被感應的導線傳送很高的直流，也會導致磁芯飽和。為處理磁芯飽和及有效擴展電流量測範圍，某些主動式電流探棒提供了抵償電流。透過感測待測導線中的電流位準，然後透過探棒輸回一個相等但相反的電流，可以設定抵償電流。透過減去相反電流的現象，可以調節抵償電流，以防止磁芯飽和。

由於從幾毫安培到幾千安培、從直流到高頻的廣泛的電流量測需求，相應地可供選擇的電流探棒也非常廣泛。為某個應用選擇電流探棒在很多方面與選擇電壓探棒類似。重要的選擇標準包括：

- 電流處理能力
- 範圍和靈敏度
- 插入阻抗
- 頻率範圍和降額
- 最大安培秒乘積
- 連線能力

邏輯探棒

由於各種原因，數位系統可能會發生問題。儘管邏輯分析儀是識別和隔離發生的故障的主要工具，但邏輯故障的實際成因通常是由於數位波形的類比特點導致。脈寬抖動、脈衝振幅偏差和普通的老式模擬雜訊和串擾都可能會引起數位問題。



圖 3.13. 適用於混合訊號示波器 (MSO) 的邏輯探棒，簡化到您裝置的連接性。

分析數位波形的類比特點要求使用示波器。但是，為隔離確切的成因，數位設計人員通常需要查看在具體邏輯條件下發生的特定資料脈衝。透過使用數位探棒，可將邏輯觸發和時序分析加到混合訊號示波器中。

圖 3.13 所示的邏輯探棒提供兩個 8 通道轉接夾。每條通道末端皆有一個探棒頭，具有隱藏式接地，簡化與待測裝置的連接。每個轉接夾第一條通道上的同軸纜線的顏色為藍色，容易識別。公共接地可透過兩個 0.187 吋快速連接卡舌存取，進而可以使用廣泛使用的快速連接插座，輕鬆建立用於連接待測裝置的自訂接地，連接到方形針腳上，然後可以使用轉接器連接探棒頭，與探棒頭齊平延長探棒接地，然後可以連接到頭部。這些探棒提供了良好的電氣特點及最小的電容負載。



圖 3.14. 為探測形狀小的裝置設計的探測站範例，如混合電路和 IC。

光學探棒

隨著基於光纖的通訊技術的出現和推廣，人們正日益需要查看和分析光學介面波形。業內已經研製出各種專用光學介面系統分析儀，以滿足通訊系統檢修和分析的需求。但是，在光學元件開發和檢驗過程中，人們對通用光波形量測和分析的需求也在不斷擴大。光學探棒允許在示波器上查看光學訊號，滿足了這一不斷擴大的需求。

光學探棒是一種光電轉換器。在光纖端，必須選擇符合特定光學連接器和光纖類型或待測裝置光學模式的探棒。在電氣端，則應遵循標準的探棒與示波器相符標準。

其他探棒類型

除所有上述「相當標準」的探棒類型外，還有各種專用探棒和探測系統，包括：

- 環境探棒，專為在非常廣泛的溫度範圍內工作而設計。
- 溫度探棒，量測元裝置的溫度和其他產生熱量的項目。
- 探測站和杆狀臂(圖 3.14)，探測精細間距的設備，如多晶片模組、混合電路和 IC。



圖 3.15. 附有標準附件的典型通用電壓探棒。

探棒配件

大多數探棒均附有一套標準配件。這些配件通常包括連接探棒的接地引線夾、補償調節工具及協助將探棒連接到各個測試點的一或多個探棒頭配件。探棒通常會附帶探棒補償工具；然而，一些現代探棒不需要手動補償，而是採用自動數位補償。圖 3.15 說明典型通用電壓探棒及其標準配件範例。

為特定應用領域 (如探測表面封裝設備) 設計的探棒可能在標準配件包裝中包括額外的探棒頭轉接器。另外，可以作為探棒選件，提供各種專用配件。圖 3.16 說明為用於小型探棒而設計的多種探棒頭轉接器類型。

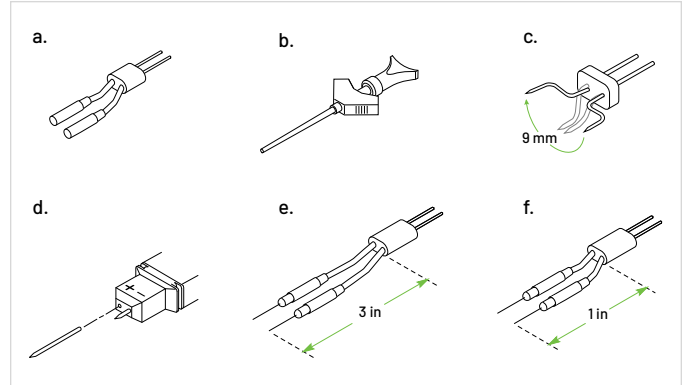


圖 3.16. 小型探棒使用的探棒頭轉接器部分範例。這些特殊的轉接器包含在低壓差動式探棒中，可以更輕鬆地連接到小型電路：a. Y 型引線轉接器；b. MicroCKT 夾；c. 可變螺距 (「長角」)；d. 直型針腳 3 吋焊錫；e. 1 吋焊錫。

您必須知道，大多數探棒配件，特別是探棒頭轉接器，是為與特定探棒型號一起使用而設計。我們建議不要使用在不同探棒製造商生產的探棒型號之間倒換的轉接器，因為這可能會導致測試點連接不良，或損壞探棒或探棒轉接器。

在選擇要購買的探棒時，應考慮將要探測的電路類型及使探測變得更快、更簡便的任何轉接器或配件。在許多情況下，價格低廉的商用探棒不允許選擇轉接器選配。另一方面，透過示波器製造商獲得的探棒通常允許非常廣泛地選擇根據特定需求調整探棒的配件。圖 3.17 說明了其中一個範例，其中顯示了為某類探棒提供的各種配件和選配。當然，這些配件和選配會因不同的探棒類型和型號而變化。

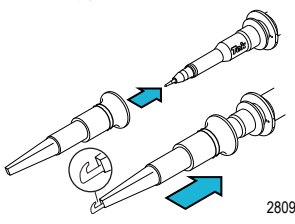
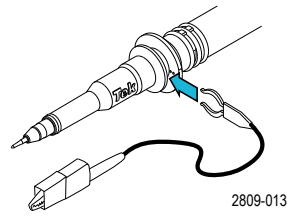
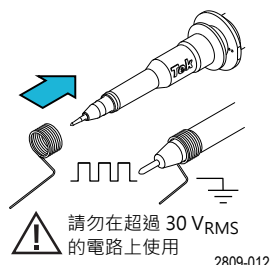
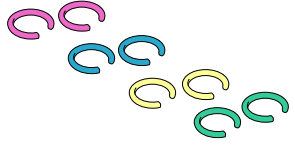
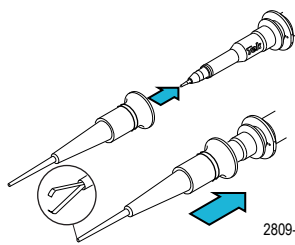
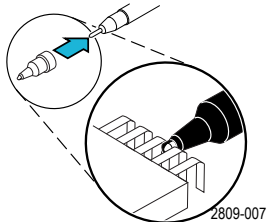
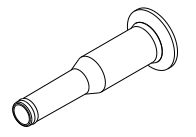
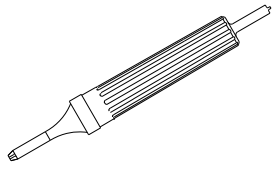
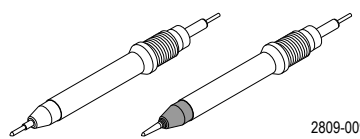
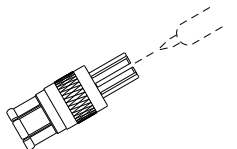
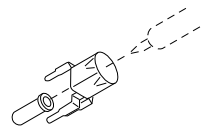
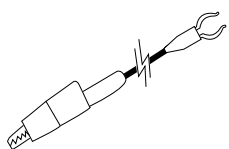
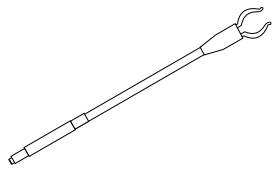
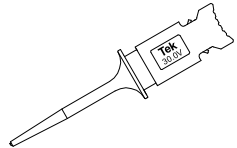
<p>掛鉤探棒頭 通常與探棒一起提供。掛鉤探棒頭用於連接電線和測試點上的訊號。</p>  <p>2809-011</p>	<p>6 吋接地引線 · 附鱷魚夾 通常與探棒一起提供並連接到探棒主體。用於一般探測。</p>  <p>2809-013</p>	<p>接地彈簧 可能包含在探棒中。用於限制由接地路徑電感引起的偏差。彎曲彈簧以到達附近的接地連接。請勿在超過 30 V_{RMS} 的電路上使用。</p>  <p>2809-012</p>	<p>色帶 用於對探棒進行顏色編碼以便於識別。安裝在探棒頭附近以及示波器連接處附近。</p> 
<p>微型掛鉤探棒頭 這些掛鉤探棒頭可用於連接小電線或通孔元件腿上的訊號</p>  <p>2809-006</p>	<p>通用 IC 帽 取下掛鉤探棒頭後，此帽蓋住了探棒頭的接地筒，但會露出探棒頭，進而降低了 IC 針腳短路的風險。</p>  <p>2809-007</p>	<p>絕緣套 此套筒包含在探棒中。其會旋入探棒頭盒上，使探棒盒的接地筒絕緣。</p>  <p>3164-002</p>	<p>調整工具 此工具用於對需要手動補償的探棒進行調整。</p> 
<p>探棒頭盒 探棒頭已安裝在探棒上。在高階被動式探棒上，通常可以更換探棒頭。某些探棒可能提供具有彈簧加載「pogo」針腳或高頻MMCX連接器的選配探棒頭。</p>  <p>2809-009</p>	<p>BNC 轉探棒頭轉接器 允許將探棒頭連接至 BNC 連接器。使用探棒代替同軸電纜將減少高輸出阻抗訊號的負載。</p> 	<p>電路板測試點/PCB 轉接器 這些轉接器設計為作為高完整性測試點安裝在 axe 電路板上。其可以將探棒頭牢固地連接到 PCB。</p> 	
<p>接地引線 · 12 吋鱷魚夾 可以使用長接地引線來達到更遠的距離，但增加的電感會導致高頻訊號和轉換出現偏差。</p> 	<p>6 吋接地引線 · 附 0.025 吋插座 這些接地引線可與終止於 0.025 方形針腳的附件或測試點一起使用。</p> 	<p>MicroCKT 測試探棒頭 這些夾子用於連接小導體，例如小電線或 IC 針腳。終止於一對 0.024 方形針腳。</p> 	

圖 3.17. 適用於 10X 被動式探棒的各種配件的範例。探棒附件相容性取決於特定探棒的機械設計。請參閱探棒手冊以確定相容的附件。

4. 探棒選型指南

前幾章介紹示波器探棒的各個方面，包括探棒運作方式、各種探棒類型及其對量測的影響。大部分內容將重點放在探棒連接到測試點時發生的情況。

在本章中，我們的重點轉向訊號源及如何將其屬性轉換成相應探棒選型規格。

我們的目標一直是選擇能提供示波器最佳訊號效果的探棒。但不止於此，在選擇探棒過程中，還需考量到一些示波器的需求。

本章將探索多種選購要求，我們首先來介紹訊號源的相關要求。

選擇適當的探棒

由於廣泛的示波器量測應用和需求，市場上可供選擇的示波器探棒很多，因此探棒選擇過程很容易引起混淆。

為減少大量的混淆及縮小選擇過程，應一直遵守示波器製造商的探棒建議，這一點非常重要，因為不同的示波器是為不同的頻寬、上升時間、靈敏度和輸入阻抗考慮因素而設計。探棒要與示波器的設計考慮因素需相符，才能完整利用示波器的量測功能。

此外，探棒選擇過程應考慮量測需求。您要量測哪些項目？是電壓？電流？還是光訊號？透過選擇適合訊號類型的探棒，可以更快地獲得直接量測結果。

另外，要考慮量測的訊號振幅。振幅是否位於示波器的動態範圍內？若不是，必須選擇可以調節動態範圍的探棒。一般來說，這透過使用 10X 或更高的探棒進行衰減來實現。

您要確保探棒頭上的頻寬或上升時間應超過計畫量測的訊號頻率或上升時間。請記住，非正弦曲線訊號具有重要的頻率成分或諧波，其可能會在很大程度上超過訊號的基礎頻率。例如，為完整包括 100 MHz 方波的第 5 個諧波，您需要探棒頭上的頻寬為 500 MHz 的量測系統。同樣地，示波器系統的上升時間應該比計畫量測的訊號上升時間快 3-5 倍。

另外，應一直考慮探棒可能導致的訊號負載。請儘量使用高電阻、低電容探棒。對大多數應用，具有 20 pF 或更低電容的 10 MΩ 探棒應為訊號源負載提供充足的保證。但是，對某些高速數位電路，您可能需要轉向主動式探棒提供較低的尖端電容。

最後，請記住，在進行量測前，必須能夠將探棒連接到電路上。這可能要求選擇時專門考慮探棒頭規格和探棒頭轉接器，以簡單方便地連接電路。

請造訪 tw.tek.com/probe-selector，尋找適合您測試需求的推薦 Tektronix 探棒。

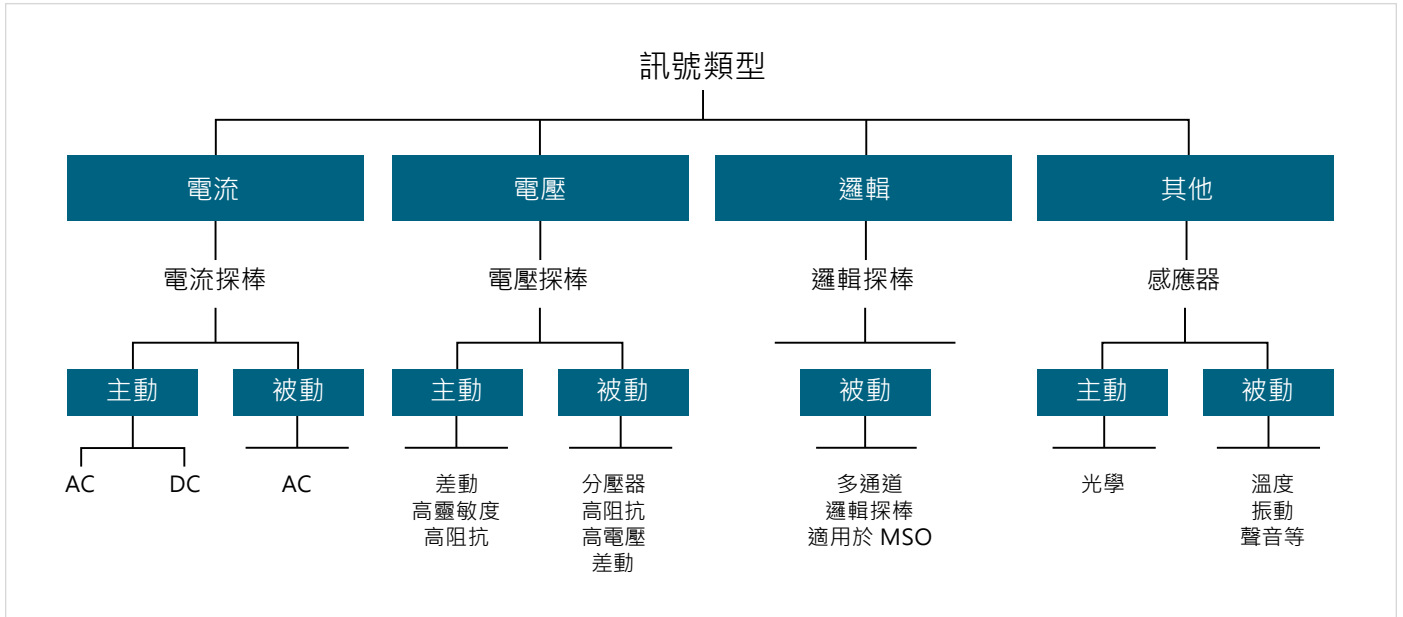


圖 4.1. 根據待測訊號類型劃分的探棒種類。

瞭解訊號源

在選擇探棒時要考慮四個基本訊號源問題，即訊號類型、訊號頻率成分、訊號源阻抗和測試點的實體屬性。下面討論了每個問題。

訊號類型

探棒選擇的第一步是評估要探測的訊號類型。為此，可以將訊號劃分為：

- 電壓訊號
- 電流訊號
- 邏輯訊號
- 其他訊號

電壓訊號是電子裝置量測中最經常遇到的訊號類型，也正因如此，電壓感測探棒是最常用的示波器探棒類型。此外，應該指出，由於示波器在輸入上要求電壓訊號，因此其他類型的示波器探棒在本質上是將感測到的現象轉換成相應電壓訊號的感測器。常見範例是電流探棒，將電流訊號轉換成電壓訊號，以便在示波器上查看訊號。

邏輯訊號實際上是特殊類型的電壓訊號。混合訊號示波器 (MSO) 的邏輯探棒透過將輸入訊號與可調電壓閾值進行比較來確定邏輯位準。產生的高位準和低位準可以顯示在 MSO 上，也可以用於觸發特定的二進位組合。

除電壓訊號、電流訊號和邏輯訊號外，可能還有使用者關心的許多其他訊號類型，如光源、機械源、熱源、聲源和其他來源發出的訊號。可以使用各種變頻器將這些訊號轉換成相應的電壓訊號，以在示波器上進行顯示和量測。

圖 4.1 根據要量測的訊號類型以圖形方式對探棒進行了分類。請注意，在每一類下面，都有各種探棒子類，額外的訊號屬性及示波器要求進一步決定了這些探棒子類。

訊號頻率成分

不管是什麼類型，所有訊號都有頻率成分。DC 訊號的頻率為 0 Hz，純正弦曲線擁有單一的頻率，這一頻率是正弦曲線週期的倒數。所有其他訊號都包含多個頻率，其頻率值取決於訊號波形。例如，對稱方波的基礎頻率 (f_0) 是方波週期的倒數，另外還有其他諧波頻率，這些諧波頻率是基礎頻率的奇數倍 ($3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $7f_0$ 、...)。基礎頻率是波形的基礎，諧波頻率與基礎頻率相結合，增加了結構細節，如波形轉換和轉角。

為使探棒將訊號傳送到示波器、同時保持足夠的訊號完整性，探棒必須擁有足夠的頻寬，以最小的干擾傳送訊號的主要頻率成分。在方波和其他週期訊號中，這一般意味著探棒頻寬必須比訊號的基礎頻率高 3-5 倍。這可以傳送基礎頻率和前幾個諧波，而不會不當地衰減其相對振幅。另外還將傳送較高的諧波，但衰減數量會提高，因為這些更高的諧波超過了探棒的 3-dB 頻寬點。但是，由於至少在一定程度上仍存在更高的諧波，因此在一定程度上會影響波形的結構。

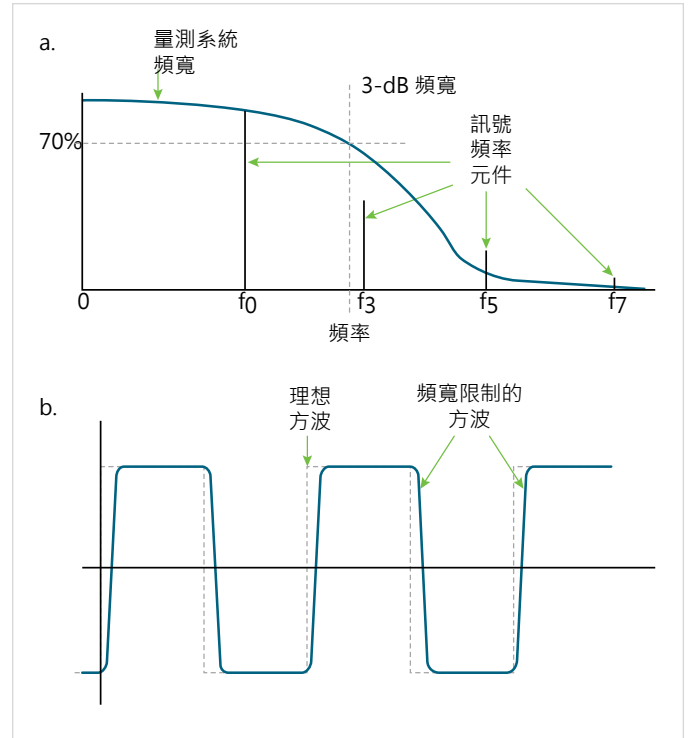


圖 4.2. 在訊號的主要頻率成分超過量測系統頻寬時 (a) 會經歷較高程度的衰減。結果，透過磨圓轉角和拉長轉換，波形細節會遺失 (b)。

限制頻寬的主要影響是降低訊號振幅。訊號的基礎頻率越接近探棒的 3-dB 頻寬，探棒輸出上看到的整體訊號振幅越低。在 3-dB 點上，振幅下降 30%。此外，由於頻寬衰減，擴展到探棒頻寬之上的訊號諧波或其他頻率成分會經歷更高程度的衰減。在較高的頻率成分上衰減程度較高，可以透過銳角變圓及快速波形轉換變慢看出這一點(圖 4.2)。

還應該指出，探棒頭電容也限制著訊號轉換的上升時間。但是，這與訊號源阻抗和訊號源負載有關，我們在後面將對此展開討論。

訊號源阻抗

深入探討訊號源阻抗的下列各項：

1. 探棒的阻抗與訊號源阻抗相結合，產生新的訊號負載阻抗，其在一定程度上會影響訊號振幅和訊號上升時間。
2. 在探棒阻抗明顯高於訊號源阻抗時，探棒對訊號振幅的影響可以忽略不計。
3. 探棒頭電容也稱為輸入電容，影響著訊號的上升時間展寬。這是由於將探棒的輸入電容從10%提高到90%所需的時間導致，其公式如下：

$$tr = 2.2 \times R_{\text{訊號源}} \times C_{\text{探棒}}$$

RC 整合網路始終產生 $2.2RC$ 10% 至 90% 的上升時間。這是從電容器的通用時間常數曲線得出。 2.2 的值是 C 透過 R 從脈衝的 10% 值充電到 90% 振幅值所需的 RC 時間常數的數量。

從上面幾點中，可以明顯看出最好選擇高阻抗、低電容探棒，以最大限度降低訊號源的探棒負載。此外，透過在可能的地方選擇低阻抗訊號測試點，可以進一步降低探棒負載的影響。如需有關訊號源阻抗及其與探棒阻抗相互作用的影響的更多詳細資訊，請參閱標題為「[不同探棒滿足不同需求](#)」一節。

實體連接考慮因素

訊號測試點的位置和形狀也是探棒選擇的主要考慮因素。其是否足夠，剛好將探棒接觸到測試點上、在示波器上觀察訊號？還是必須使探棒連接測試點，以監測訊號，同時進行各種電路調節？對前一種情況，適合採用針式探棒頭；而對後一種情況，則要求某類可收縮的掛鉤探棒頭。

測試點的規格也影響著探棒選擇。標準規格的探棒和配件特別適合探測連接器針腳、電阻器引線和背板。

但為了探測表面封裝電路，我們推薦使用具有為表面封裝應用專門設計的配件的小型探棒。

較新的探棒可能配備MMCX連接器。這些連接器可以焊接到電路板上作為臨時或永久測試點。其可以透過最小化接地引線長度並對待測裝置提供遮蔽來協助保持高訊號完整性。圖 4.3 顯示如何套用具有 MMCX 連接器的探棒。

目標是選擇最適合特定應用的探棒規格、形狀和配件，進而可以迅速、簡便、牢固地將探棒連接到測試點上，以可靠地進行量測。



圖 4.3. 安裝了 MMCX 盒的 TPP1000 1 GHz 10X 探棒，直接連接到電路板上的 MMCX 連接器。

瞭解示波器

示波器問題對探棒選型的影響與訊號源問題一樣重要。若探棒與示波器不符，將損害探棒的示波器端訊號完整性。

頻寬和上升時間

使用者必須瞭解，示波器及其探棒是作為一個量測系統一起工作。因此，使用的示波器頻寬和上升時間規格應大於等於使用的探棒規格，使其足以檢查訊號。

一般來說，探棒和示波器之間的頻寬和上升時間交互非常複雜。由於這種複雜性，大多數示波器製造商對為用於特

定示波器的特定探棒型號中的探棒頭指定了示波器頻寬和上升時間。為保證為計畫檢查的訊號提供足夠的示波器系統頻寬和上升時間，最好遵循示波器製造商的探棒建議。

輸入電阻和電容

所有示波器都有輸入電阻和輸入電容。為最大限度地傳送訊號，示波器的輸入電阻和電容必須與探棒輸出的電阻和電容相符，具體關係如下：

$$R_{\text{示波器}} C_{\text{示波器}} = R_{\text{探棒}} C_{\text{探棒}} = \text{最佳訊號傳送能力}$$

更具體地說，50 Ω 示波器輸入要求 50 Ω 探棒，1 MΩ 示波器輸入要求 1 MΩ 探棒。在使用適當的 50 Ω 轉接器時，1 MΩ 示波器也可以與 50 Ω 探棒一起使用。

探棒與示波器電容也必須相符，這透過選擇為用於特定示波器型號而設計的探棒選型實現。此外，許多探棒都具有補償調節功能，透過補償微小的電容變化，可以精確地比對。在探棒連接到示波器上時，應該完成的第一件事是調節探棒的補償功能。探棒與示波器未能正確配合 (包括透過選擇適當的探棒及進行適當的補償調節)，可能會導致明顯的量測誤差。

靈敏度

示波器的垂直靈敏度範圍決定著訊號振幅量測的整體動態範圍。例如，垂直顯示範圍為 10 格、靈敏度範圍在 1 mV/格 - 10 V/格之間的示波器的實際垂直動態範圍大約是 0.1 mV - 100 V。若計畫量測的各種訊號振幅範圍在 0.05 mV - 150 V 之間，則這一示波器的動態範圍在低端和高端都達不到要求。但是，若透過為要處理的各種訊號選擇適當的探棒，可以彌補這一缺點。

對高振幅訊號，透過使用衰減器探棒，可以向上擴展示波器的動態範圍。例如，10X探棒將示波器的靈敏度範圍有效地向上移10，此示波器的靈敏度範圍將是 1mV/格 -100 V/格。這不僅為 150V 訊號提供足夠

的範圍，而且還提供了 1000V 的頂級示波器顯示範圍。但是，在將任何探棒連接到訊號之前，一定要保證訊號不會超過探棒的最大電壓功能。

注意

請務必遵守探棒的最大指定電壓能力。若將探棒連接到超過其能力的電壓上，可能會導致人身傷害及設備損壞。

對低振幅訊號，透過使用探棒放大器系統，可以將示波器範圍擴展到較低的靈敏度上。這一般是差動放大器，如可以提供 10 μV/ 格的靈敏度。

這些探棒放大器系統專用程度高，是為了與特定的示波器型號相符而設計。因此在選擇示波器時一定要檢查製造商為差動式探棒系統推薦的配件，以滿足小訊號應用要求。

注意

差動式探棒系統通常包含靈敏的裝置，過壓可能會損壞這些裝置，包括靜電放電。為避免損壞探棒系統，請務必遵循製造商的建議，並遵守所有注意事項。

讀數功能

大多數現代示波器在螢幕上提供了垂直靈敏度和位準靈敏度設定 (伏特/格和秒/格) 的讀數。這些示波器通常還提供了探棒感測和讀數處理功能，進而讀數可以正確追蹤使用的探棒類型。例如，若使用 10X 探棒，透過以 10X 係數調節垂直讀數，示波器應適當反映靈敏度。若使用電流探棒，垂直讀數將從伏特/格 變為安培/格，以反映正確的度量單位。

最新一代探棒支援探棒和示波器之間的雙向通訊。例如，TekVPI 探棒介面使用雙向通訊。除了在示波器上提供適當縮放的讀數資訊外，

還可以將錯誤條件從探棒傳送到示波器。比例係數和偏移可以透過示波器的前面板進行控制。補償和相差校正等程序也可以從前面板完成。

為利用這些讀數功能，應使用相容示波器讀數系統的探棒。同時也應遵循製造商與特定示波器一起使用探棒的建議。這對新型示波器尤其重要，其可能具有許多通用探棒或商用探棒未全面支援的進階讀數功能。

選擇適當的探棒

從前面討論的訊號源和示波器問題中可以明顯看出，若沒有一定的幫助，選擇適當的探棒是一個非常麻煩的過程。事實上，由於並沒有一直指定某些關鍵選擇標準，如探棒上升時間和示波器輸入電容，在某些情況下選擇過程可能會變成猜測性的工作。

為避免猜測性的工作，最好選擇在推薦配件清單中包括可以廣泛選擇探棒的轉接器。另外，在遇到新的量測要求時，一定要與示波器製造商核對新推出、可能擴展示波器功能的探棒。

最後，記住對任何給定應用，實際上並沒有「合適」探棒選型，而只有「合適」示波器/探棒組合選項，首先取決於界定的訊號量測要求，包括：

- 訊號類型(電壓、電流、光學介面等等)
- 訊號頻率成分(頻寬問題)
- 訊號上升時間
- 訊號源阻抗(電阻和電容)
- 訊號振幅(最大值、最小值)
- 測試點形狀(含引線的裝置、表面封裝等)

透過考慮上述問題及填寫具體的應用資訊，可以指定能夠滿足所有應用需求的示波器和各種相容探棒。

5. 探棒對量測的影響

為獲得訊號的示波器顯示，必須將訊號的某個部分轉換成示波器的輸入電路，如圖 5.1 所示，其中測試點 (TP) 後面的電路使用訊號源 E_s 和相關電路阻抗 Z_{s1} 和 Z_{s2} 表示，這是 E_s 上的正常負載。在示波器連接到測試點上時，探棒阻抗 Z_p 和示波器輸入阻抗 Z_i 成為訊號源上負載的一部分。

根據阻抗的相對值，在測試點中增加探棒和示波器導致各種負載效應。

本章詳細討論了負載效應及其他探測效應。

訊號源阻抗的影響

訊號源阻抗的值可能會明顯影響任何探棒負載的淨效應。例如，在訊號源阻抗低時，很難注意得到典型高

阻抗 10X 探棒的負載效應。這是因為與低阻抗並聯增加的高阻抗不會明顯改變總阻抗。

但是，在更高的訊號源阻抗時，情況發生明顯變化。例如，考慮圖 4.1 中的訊號源阻抗具有相同的值，且該值等於探棒阻抗和示波器阻抗總和，如圖 5.2 所示。

對相等的 Z 值，在沒有將探棒和示波器連接到測試點時，訊號源負載是 $2Z$ (圖 5.2a)。這導致在未探測的測試點上產生了 $0.5E$ 的訊號振幅。但是，在連接探棒和示波器時 (圖 5.2b)，訊號源上的總負載變成 $1.5Z$ ，測試點上的訊號振幅降低到未探測值的 $2/3$ 。

在後一種情況下，可以採取兩種方法，降低探測對阻抗負載的影響。一種方法是使用阻抗更高的探棒。另一種方法是在阻抗較低的測試點的電路中其他地方探測訊號。例如，陰極、發射器和訊號源的阻抗通常要低於金屬盤、集電極或加蔽線。

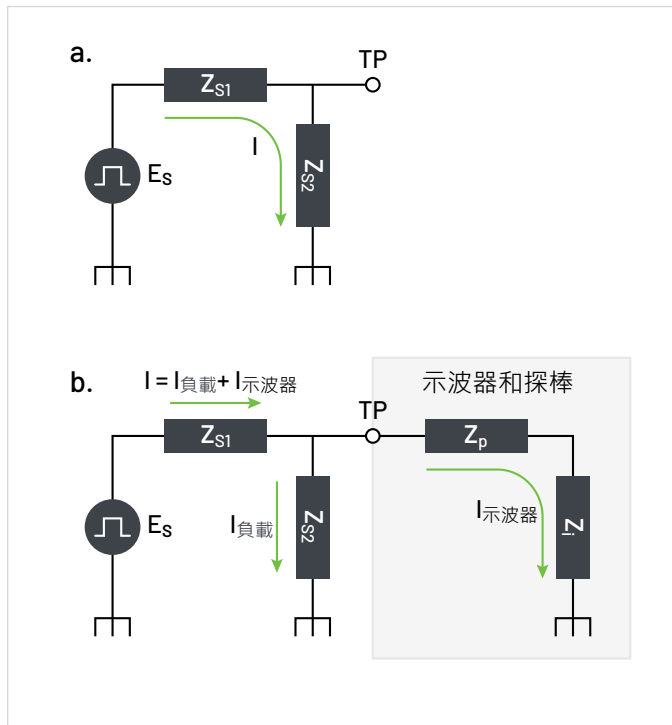


圖 5.1. 在測試點 (TP) 上量測的訊號可以透過訊號源和相關的負載阻抗表示 (a)。探測測試點在訊號源負載上增加了探棒和示波器阻抗，導致量測系統吸收部分電流 (b)。

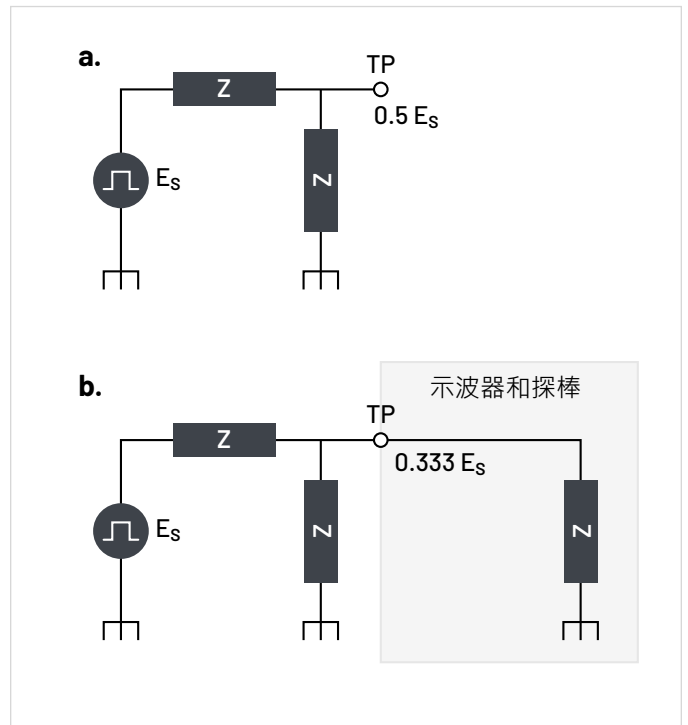


圖 5.2. 訊號源阻抗越高，探測導致的負載越大。在這種情況下，所有阻抗都相等，探測導致測試點上的訊號振幅下降了 30% 以上。

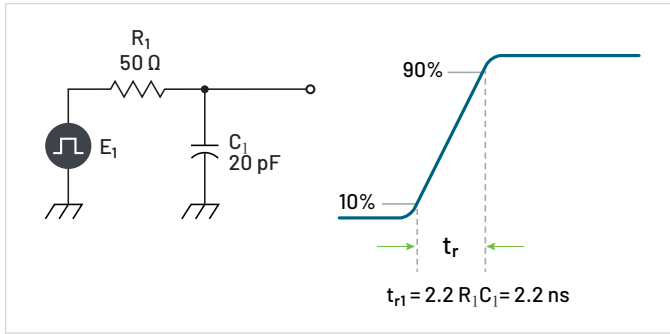


圖 5.3. 脈衝產生器的上升時間由其输出的 RC 特性或源阻抗決定。

電容負載

隨著訊號頻率或轉換速率提高，阻抗的電容成分變成主要因素。結果，電容負載成為主要問題。特別是電容負載會影響快速轉換波形上的上升時間和下降時間及波形中高频成分的振幅。

對上升時間的影響

為說明電容負載，讓我們考慮一下上升時間非常快的脈衝產生器，如圖 4.3 所示，其中理想產生器輸出上的脈衝的上升時間為零 ($t_r = 0$)。但是，訊號源阻抗負載相關的電阻和電容改變了這個零上升時間。

RC 積分網路一直產生 $2.2RC$ 的 10 - 90% 上升時間。這是從電容器的通用時間常數曲線得出。2.2 的值是 C 透過 R 從脈衝的 10% 值充電到 90% 振幅值所需的 RC 時間常數的數量。

在圖 5.3 的情況下，50 Ω 和 20 pF 的訊號源阻抗導致 2.2 ns 的脈衝上升時間。 $2.2RC$ 值是脈衝可以擁有的最快上升時間。

在探測脈衝產生器的輸出時，探棒的輸入電容和電阻加到脈衝產生器的值中，如圖 5.4 所示，其中增加了 10 MΩ 和 11 pF 的典型探棒。由於探棒 10 MΩ 電阻要遠遠大於產生器的 50 Ω 電阻，因此探棒的電阻可以忽略不計。但是，探棒的電容與負荷電容大約持平，直接增加得到 31 pF 的負載電容。這提高了 $2.2RC$ 的值，導致測得的上升時間提高到 3.4 ns，而探測前的上升時間為 2.2 ns。

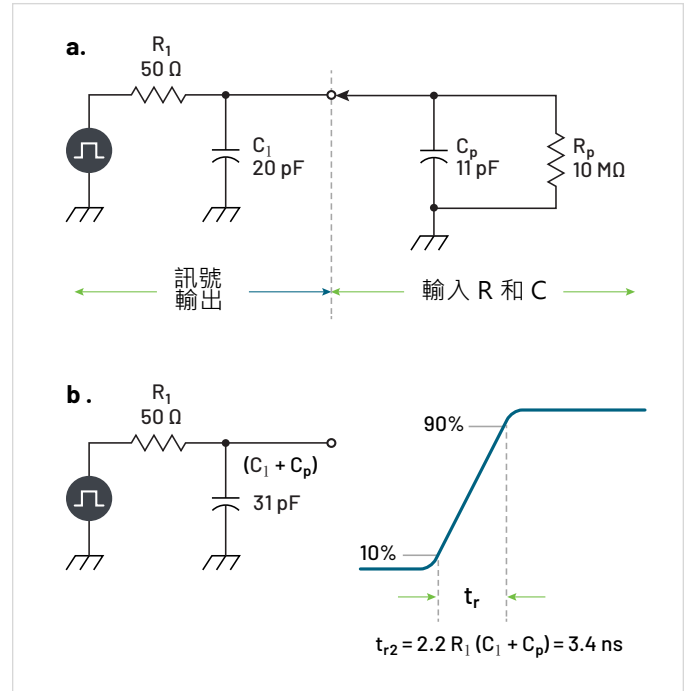


圖 5.4. 探棒增加的電容會增加 RC 值並增加量測的上升時間。

透過使用探棒規定電容與已知或估算源電容之比，可以估計探棒頭電容對上升時間的影響。使用圖 5.4 中的值，可以估算上升時間的百分比變化如下：

$$\frac{C_{\text{探棒頭}}}{C_1} \times 100\% = \frac{11 \text{ pF}}{20 \text{ pF}} \times 100\% = 55\%$$

從上面可以清楚地看出，探棒選擇、尤其是探棒電容的選擇會影響上升時間量測。對被動式探棒，一般來說，衰減比率越大，頭部電容越低。從表 4.1 中可以看出這一點，其中介紹了各種被動式探棒的部分探棒電容範例。

探棒	衰減	頭部電容
P6101B	1X	100 pF
TPP0100	10X	12 pF
TPP0500B	10X	3.9 pF

表 5.1. 探棒頭電容。

在需要較小的頭部電容時，應使用主動式 FET 輸入探棒。根據具體的主動式探棒模型，可以提供小於等於 1 pF 的頭部電容。

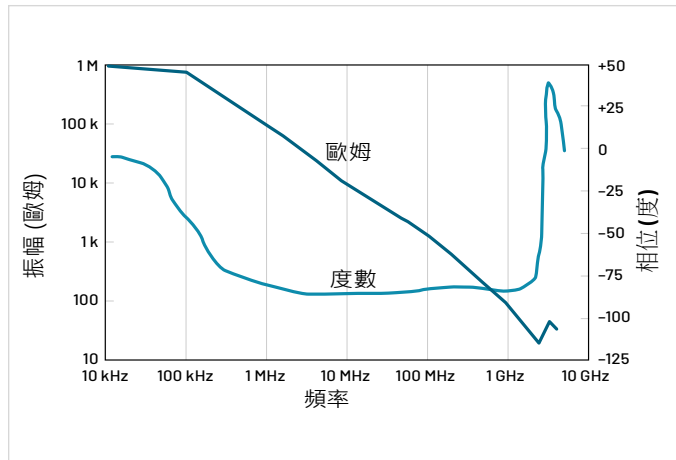


圖 5.5. 主動式探棒典型的輸入阻抗隨頻率變化。

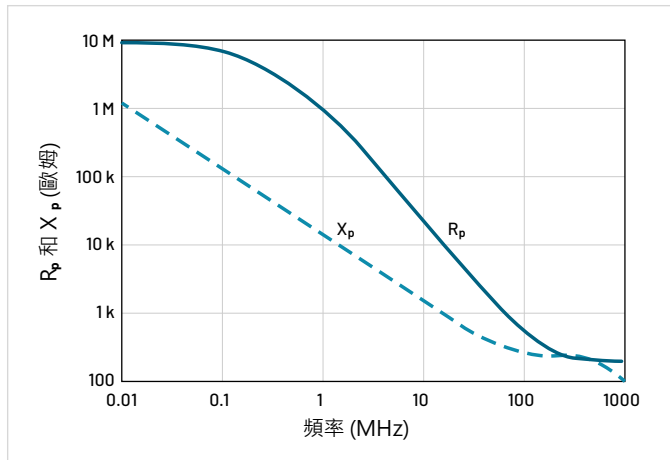


圖 5.6. 典型 10 MΩ 被動式探棒的 Xp 和 Rp 與頻率關係。

對振幅和相位的影響

除影響上升時間外，電容負載還影響著波形中高频成分的振幅和相位。對此，請記住，所有波形都是由正弦曲線成分構成。50 MHz 方波擁有超過 100 MHz 的有效諧波成分。所以不僅要考慮波形基礎頻率上的負載效應，而且要考慮超過基礎頻率幾倍的頻率上的負載效應。

負載取決於探棒頭上的總阻抗。這稱為 Z_p ， Z_p 由電阻成分 R_p 和電抗成分 X_p 組成。電抗成分主要是電容，但在探棒中可以設計電感單元，以部分偏移電容負載。

一般來說， Z_p 會隨著頻率提高而下降。大多數探棒儀器手冊會編制探棒 R_p 資料，文件中包括顯示 Z_p 與頻率的關係曲線。圖 5.5 是普通主動式探棒的範例。請注意，1 MΩ 阻抗振幅固定在接近 100 kHz。這透過認真設計探棒的相關電阻單元、電容單元和電感單元實現。

圖 5.6 說明探棒曲線的另一個範例。在這種情況下，顯示了典型 10 MΩ 被動式探棒的 R_p 和 X_p 與頻率關係。虛線 (X_p) 說明電容電抗隨頻率變化。

請注意， X_p 在 DC 上開始下降，但 R_p 直到 100 kHz 時才開始明顯衰減（理論電阻不會下降，但是實際電阻（如 R_p ）具有與電阻並聯的寄生電容。這導致 R_p 在非常高的頻率下會如同電容器）。

透過認真設計相關 R、C 和 L 單元，再次可以偏移總負載。

若沒有得到探棒的阻抗曲線，可以使用下述公式估算最壞情況下的負載：

$$X_p = \frac{1}{j\omega C}$$

其中：

X_p = 電容電抗

ω = 角頻率

C = 探棒頭電容

例如，頭部電容為 11 pF 的標準被動式 10 MΩ 探棒的電容電抗 (X_p) 在 50 MHz 時大約為 290 Ω。根據訊號源阻抗，此負載可能會對訊號振幅帶來很大的影響（透過簡單的分路器動作），其甚至可能會影響被探測的電路操作。

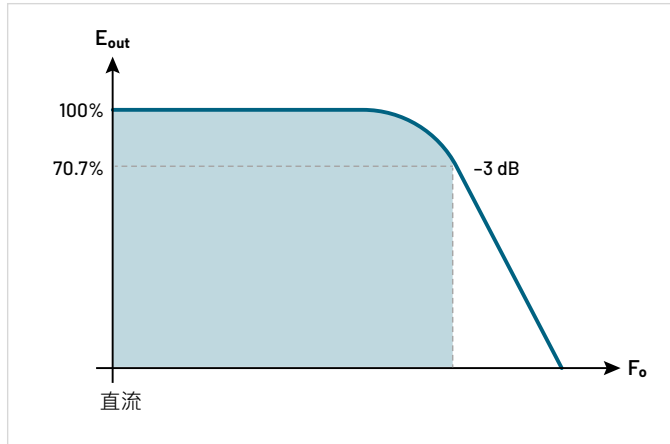


圖 5.7. 頻寬定義為回應曲線中振幅下降 -3 dB 的頻率。

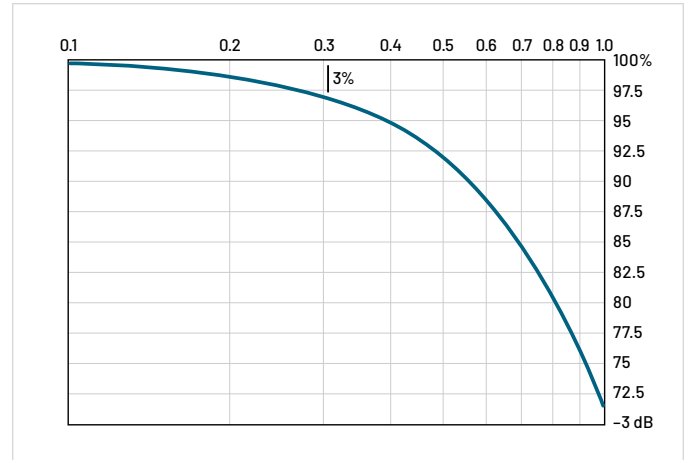


圖 5.8. 頻寬額定下降曲線。為了確保通用示波器的振幅準確度為 $y\%$ ，請將示波器的頻寬乘以相應的 x 值。

頻寬考慮因素

頻寬是同時涉及探棒頻寬和示波器頻寬的量測系統問題。示波器的頻寬應超過要量測的訊號的主要頻率，使用的探棒頻寬應等於或超過示波器的頻寬。

從量測系統角度看，實際問題是探棒頭的頻寬。製造商通常對某些示波器/探棒組合指定探棒頭頻寬。但情況並不是一直如此。結果，您應該知道示波器和探棒的主要頻寬問題，包括各個示波器和探棒的頻寬及綜合在一起的頻寬。

示波器頻寬

頻寬定義為振幅與頻率圖上量測系統比參考位準低 3dB 的點，如圖 5.7 所示，這說明表明 3 dB 點的回應曲線。此曲線適用於具有高斯回應的示波器，即以 $-20\text{ dB}/十倍頻程$ 滾降。此回應是頻寬低於 1 GHz 的通用示波器的典型回應。本入門手冊中的降額指南適用於此類示波器。較高頻寬的示波器通常採用具有更陡峭滾降的輸入濾波器，因此降額對於這些儀器而言並不那麼重要。

值得注意的是，量測系統在其額定頻寬下幅度降低了 3 dB 。這意味著您可以預計頻寬極限上的頻率，振幅量測會有 30% 的誤差。

通常情況下，使用者不會以全部頻寬極限使用示波器。但是，若振幅準確度至關重要，應準備相應地降低示波器的額定頻寬。

例如，考慮一下圖 5.8 中所示的頻寬衰減的擴展圖。這個圖中的位準標度說明獲得好於 30% 的振幅準確度所需的額定值下降係數。若沒有額定值下降係數（係數為 1.0 ）， 100 MHz 示波器在 100 MHz 的振幅誤差將高達 30% 。若您希望振幅量測落在 3% 範圍內，這台示波器的頻寬必須以 0.3 係數下降至 30 MHz 。在頻率超過 30 MHz 時，振幅誤差將超過 3% 。

上面的範例指明了示波器選型的整體經驗法則。對 3% 以內的振幅量測，應選擇指定頻寬比量測的最高頻率波形高 $3-5$ 倍的示波器。

在上升時間或下降時間是主要規格時，可使用下述公式將示波器的頻寬 (BW) 規格轉換成上升時間規格：

$$Tr \approx 0.35/BW$$

或為方便起見：

$$Tr (ns) \approx 350/BW (MHz)$$

與頻寬一樣，應該選擇上升時間比預計量測的最快上升時間快3-5倍的示波器 (請注意，上式中的常數 0.35 假設採用高斯滾降。頻寬 <1 GHz 的示波器通常具有 0.35 值，而頻寬 > 1 GHz 的示波器通常具有 0.40 和 0.45 之間的值)。

探棒頻寬

與其他電路一樣，所有示波器都有頻寬極限。此外，與示波器一樣，探棒的效能一般取決於頻寬。因此，頻寬為 100 MHz 的示波器在 100 MHz 點上的振幅回應低於 3 dB。

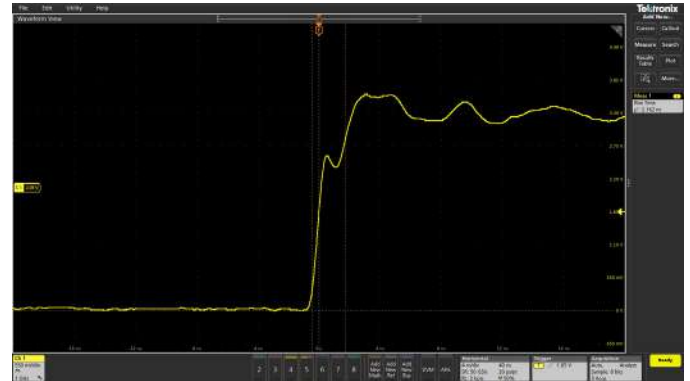
同樣地，探棒頻寬也可以用示波器使用的同一公式表示 ($Tr \approx 0.35/BW$)。此外，對主動式探棒，可以使用下述公式組合示波器和探棒上升時間，獲得近似的探棒/示波器系統的上升時間：

$$Tr_{系統}^2 \approx Tr_{探棒}^2 + Tr_{示波器}^2$$

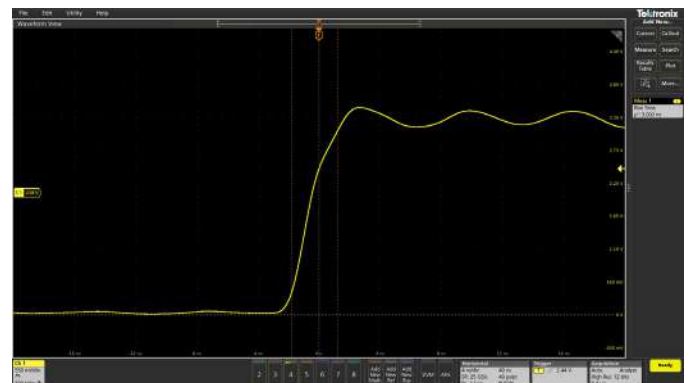
對被動式探棒，這一關係比較複雜，不應使用上面的公式。

一般來說，探棒頻寬應一直等於或超過將使用的示波器的頻寬。若使用的探棒頻寬太低，會限制示波器實現全部量測功能。圖 5.9 進一步說明這一點，其中顯示了使用三種不同頻寬的探棒量測的同一脈衝跳變。

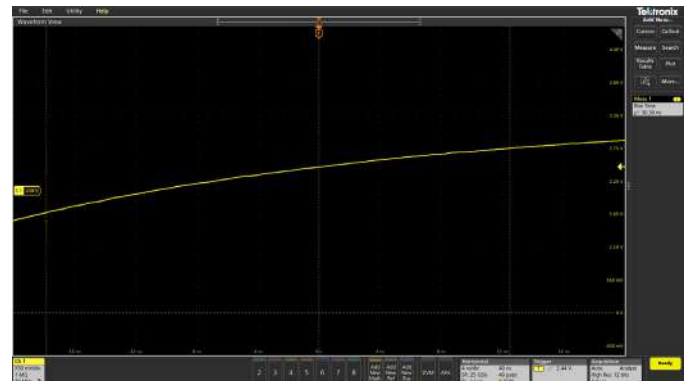
第一次量測 (如圖 5.9a 所示) 是使用具有 10 MΩ 電阻和 3.9 pF 電容的 10X、1 GHz 探棒進行的。請注意，量測的脈衝上升時間為 2.162 ns。這完全在 10 GHz 示波器和 1 GHz 探棒組合的 400 ps 上升時間範圍內。



a.



b.



c.

對三種不同探棒的上升時間的影響：(a) 400 MHz · 10X 探棒；(b) 100 MHz · 10X 探棒；和 (c) 10 MHz · 1X 探棒。所有量測都使用同一台 10 GHz 示波器完成。

現在看一下使用同一示波器、使用 10X，200 MHz 探棒量測同一脈衝時發生的情況，如圖 5.9b 所示，現在測得的上升時間是 3.002 ns。這比以前測得的 2.162 ns 提高了近 30%！

根據預期，在使用頻寬較低的探棒時，觀察到的脈衝上升時間會變得更長。極端範例如圖 5.9c 所示，其中在同一脈衝上使用 1X，20 MHz 探棒。此處上升時間已經從原來的 2.162 ns 下降到 30.30 ns。

其關鍵要點是探棒選擇勢在必行！

為達成任何示波器的最大效能，也是付費購買的效能，請務必要使用製造商推薦的探棒。

到探棒頭的頻寬

一般來說，根據製造商的下述規範和建議應能夠解決探棒頻寬及得到的探棒/示波器系統頻寬。例如，Tektronix 規定了探棒在規定極限內工作的頻寬。這些極限包括整體偏差、上升時間和掃描頻寬。

另外，在與相容的示波器使用時，Tektronix 探棒將示波器的頻寬擴展到探棒頭。例如，在與相容的 100 MHz 示波器使用時，Tektronix 100 MHz 探棒在探棒頭上提供了 100 MHz 的效能 (-3 dB)。

圖 5.10 中的等效電路說明為檢驗到探棒頭的頻寬而使用的業內公認的測試設定。測試訊號源指定的訊號源阻抗為 50 Ω，端接在 50 Ω 電阻中，導致等效的 25 Ω 源端子阻抗。此外，探棒必須使用探棒頭到 BNC 轉接器或同等設備連接到訊號源上。探棒連接的後一種要求保證了最短的接地通路。

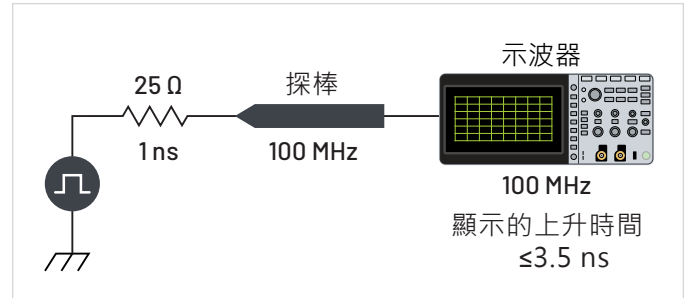


圖 5.10. 測試到探棒頭的頻寬使用的等效電路。對 100 MHz 系統，顯示的上升時間應該為 3.5 ns 或更快。

在使用上面介紹的測試設定時，100 MHz 示波器/探棒組合應導致觀察到的上升時間 <3.5 ns。根據前面討論的頻寬/上升時間關係 ($Tr \approx 0.35/BW$)，此 3.5 ns 上升時間與 100 MHz 頻寬對應。

對包括標準配套探棒的通用示波器，大多數製造商承諾、並在探棒頭上提供了宣稱的示波器頻寬。

但是，要記住探棒頭上的頻寬取決於圖 5.10 中的測試方法。由於實際環境訊號很少是從 25 Ω 訊號源發出的，因此在實際環境中預計回應和頻寬都要在一定程度上低於最優水準，在量測更高的阻抗電路尤其如此。

6. 探棒接地和接地引線影響

在進行參考接地的量測時，必須有兩條到待測電路或待測裝置的連接。一條連接透過探棒完成，探棒感測待測的其他參數的電壓。另一條必須的連接是透過示波器返回接地，連回到待測電路上。為完成量測電流通路，必須實現接地回路。

在待測電路和示波器插入同一個電源插座電路中時，電力電路的公共電位提供了一條接地回路。在這種情況下，無需連接接地引線即可看到訊號。然而，透過電源地的訊號返回路徑是間接且漫長的路徑。因此，不應將其視為乾淨的低電感接地迴路。相反，應在 DUT 處建立接地連接，並設計探棒來建立此連接。

一般來說，在進行任何類型的示波器量測時，應使用最短的接地路徑。這有助於盡可能地減少電感對頻率回應的影響，並減少雜訊的影響。這些影響是本章的主題。

懷疑是應對接地引線問題的第一道防線。務必要對示波器顯示訊號時觀察到的任何雜訊或偏差保持懷疑。雜訊或偏差可能是訊號的一部分，也可能是量測過程的結果。以下各節介紹了接地問題的症狀、確定偏差是否屬於量測過程一部分的指南以及如何減輕對量測的影響的最佳做法。

接地引線長度和頻率回應

接地引線的長度會對探棒的頻率回應產生影響，這可能表現為振鈴和上升時間減慢。

接地路徑，無論是在探棒上還是在電路中，都具有電感，其阻抗會隨著訊號頻率的增加而增加。圖 6.1 顯示了連接到待測裝置的探棒的等效電路。請注意，有一個與接地引線相關的電感 (L)。此接地引線電感隨著引線長度的增加而增加。

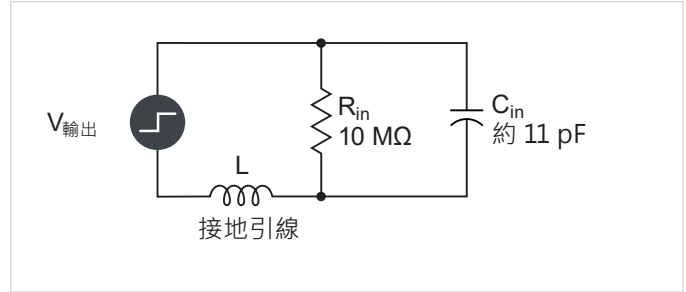


圖 6.1. 連接到 DUT 上電壓源的典型被動探棒的等效電路。

接地引線電抗元件 L 和 C_{in} 形成串聯諧振電路，僅用 R_{in} 進行阻尼。當這個串聯諧振電路受到脈衝衝擊時，就會出現振鈴。不僅會出現振鈴，而且過多的接地引線電感將限制 C_{in} 的充電電流，進而限制脈衝的上升時間。

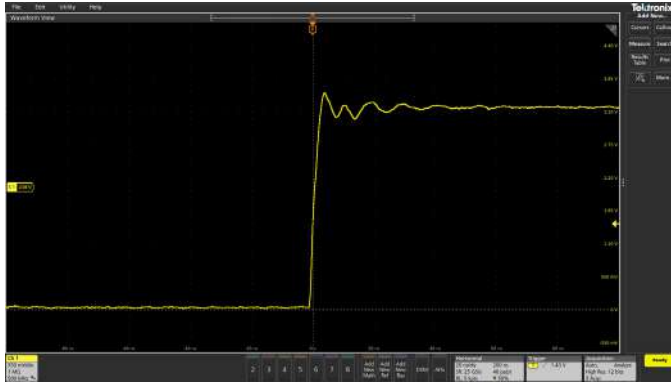
如果電感保持足夠低，則可以盡可能地減少其對量測的影響。為了看到由接地不良引起的振鈴或其他異常，必須滿足兩個條件：

1. 示波器系統頻寬必須夠高，以便「看到」探棒頭處訊號的高頻內容。
2. 探棒頭的輸入訊號必須包含足夠的高頻資訊 (快速上升時間)，以引起振鈴或偏差。

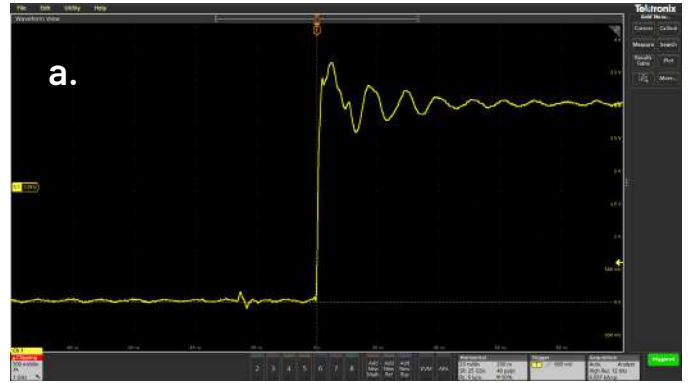
無需深入研究數學公式，帶有 6 吋接地引線的 11 pF 被動探棒在受到快速脈衝激勵時將以大約 140 MHz 的頻率響起。對於 100 MHz 示波器，這種振鈴遠高於示波器的頻寬，可能根本看不到。但是，如果使用更快的示波器 (例如 200 MHz)，接地引線引起的振鈴將完全在示波器的頻寬內，並且在脈衝顯示上很明顯。

圖 6.2 說明了接地引線所引起的振鈴。在圖 6.2a 中，使用相符的示波器/探棒組合來取得快速轉換。使用的接地引線是標準 6.5 吋探棒接地夾，並將其連接到測試點附近的公共端。

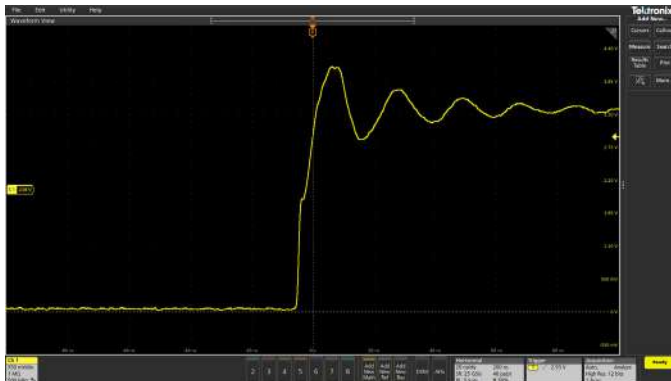
在圖 6.2b 中，擷取了相同的脈衝轉換。然而，這一次，探棒的標準接地引線延長了 25 吋的夾子引線。例如，可以進行這種接地引線延伸，以避免每次在大型系統中探測



a. 6.5 吋探棒接地夾。



a.

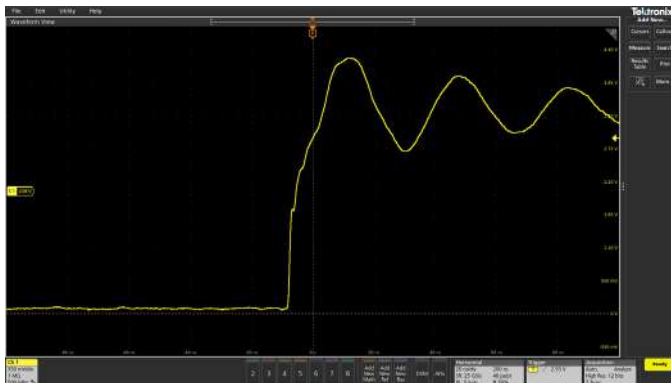


b. 25 吋探棒接地端。



b.

圖 6.3. 由於使用 12.5 吋探棒接地引線 (a) · 快速步驟 (1.5 ns Tr) 會產生偏差。這些偏差可以透過移動探棒電纜或將手放在電纜上來改變 (b)。



c. 示波器底盤上的 25 吋夾子。

圖 6.2. 接地引線的長度和位置會顯著影響量測。

不同點時都必須移動接地夾。不幸的是，這種做法會增加接地路徑中的電感，並可能導致嚴重的振鈴，如圖所示。

圖 6.2c 說明延長接地迴路的另一種變化的結果。在這種情況下，探棒的接地引線根本沒有連接。相反，一條單獨的 25 吋導線從示波器底盤的公共電路中延

伸出來，有效地延長了接地路徑，甚至比圖 6.2b 中使用的 25 吋探棒夾引線還要長。這導致較低頻率的振鈴，如圖 6.2c 所示。

從這些範例可以清楚看出，接地引線長度會對量測品質產生重大的影響。

長接地引線的位置和環境也可能影響訊號路徑的電容特性，進而影響量測品質。圖 6.3 顯示了使用 12.5 吋長接地引線的探棒在 10 GHz 示波器上出現振鈴和偏差的範例。此步進訊號具有非常快速的 1.5 ns 上升時間，因此具有足夠的高頻分量，可在探棒接地電路內引起振鈴。

圖 6.3 中的兩種波形顯示都是使用相同的示波器和探棒來擷取相同的步進波形時所獲得。但請注意，圖 6.3a 和 6.3b 之間的偏差略有不同。圖 6.3b 中的差異是由於稍微重新定位探棒電纜並將手放在部分探棒電纜上而引起。

這導致探棒接地電路的電容和高頻終端特性發生微小變化，進而導致偏差發生變化。

確定偏差來源

探棒接地引線可能會在快速轉換的波形上導致偏差，意識到這一點非常重要。同樣重要的是要認識到，波形上看到的偏差可能只是波形的一部分，而不是由於探棒接地方法引起。

為區分這兩種情況，可以移動探棒纜線。若將手放在探棒上或移動纜線導致偏差發生變化，則偏差是由探棒接地系統導致。正確接地 (端接) 的探棒 對纜線位置或接觸根本不敏感。

如果您在脈衝顯示器上看到振鈴，請嘗試縮短接地引線的長度。較短的接地引線具有較小的電感，並且會導致較高頻率的振鈴。如果您在脈衝顯示器上看到振鈴頻率變化，您就會知道其與接地引線有關。進一步縮短接地引線應該會使振鈴頻率超出示波器的頻寬，進而最大限度地減少其對量測的影響。如果改變接地引線長度時振鈴沒有變化，則振鈴可能來自待測電路。

接地技術不良導致的雜訊

雜訊是可以在示波器波形顯示器上顯示的另一類訊號失真。與振鈴和偏差一樣，雜訊可能實際上是探棒頭上的訊號的一部分，也可能是因為不正確的接地技術而導致的訊號。其區別在於，雜訊一般來自外部來源，其外觀和監測的訊號速度無關。換句話說，接地不良可能會導致顯示在任何速度的任何訊號上的雜訊。

透過探測技術可以在訊號上表示雜訊的主要機制有兩種。一種是接地迴路雜訊注入機制，另一種是透過探棒纜線或探棒接地引線實現的電感檢拾機制。

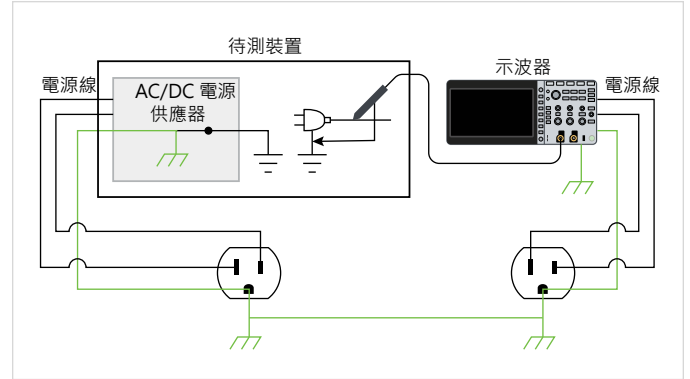


圖 6.4. 在兩個不同電源插座上，示波器、探棒和測試電路完整的接地電路或接地迴路。

接地迴路雜訊注入

在示波器公共電位和測試電路電源線接地及探棒接地引線和纜線之間存在接地迴路時，接地迴路中不想要的電流流動可能會導致在接地系統中注入雜訊。正常情況下，所有這些點為零伏特，或應該為零伏特，將不會有接地電流流動。但是，若示波器和測試電路位於不同的大樓系統接地上，在一個大樓接地系統上可能有小的電壓差或雜訊。圖 6.4 顯示了這種情況下的接地連接。注意：

- 此系統中任何接地點的電位差都會導致電流在接地迴路中流動。
- 接地迴路中的電流在探棒接地導體上產生電壓降。
- 這個雜訊電壓將注入到示波器中，與探棒頭的訊號形成串聯。
- 結果，可以看到感興趣的訊號上疊加了雜訊，或感興趣的訊號可能會疊加在雜訊上。

在接地迴路雜訊注入中，雜訊通常是線路頻率雜訊 (50 或 60 Hz)。但通常情況下，雜訊可能會採用尖峰形式或突發形式，這是大樓設備導致，如空調、開關等。

警告！

切勿透過破壞電源插頭上的安全三線接地系統來將示波器與地面隔離。這可能會導致金屬表面帶電至危險電壓等級。

您可以採取各種措施，避免或最大限度地降低接地迴路雜訊問題。第一種方法是對示波器和待測電路使用相同的電源電路，以最大限度地降低接地迴路。此外，探棒及其纜線應遠離潛在的雜訊源。特別是，切勿將探棒纜線與設備電力纜線並排或交叉。

如果接地迴路雜訊問題仍存在，您可以使用差動式電壓探棒來減少對量測的影響，或者更好的是，使用光隔離探棒來抑制共模雜訊。

感應的雜訊

透過感應到探棒纜線中，雜訊可以進入公共接地系統，特別是在使用帶有長纜線的探棒時。接近電源線或其他承載電流的導線可能會在探棒的外部纜線屏蔽層中引起電流流動。透過大樓系統公共接地會形成電路。為最大限度地降低這個潛在的雜訊來源，在可能時應使用纜線較短的探棒，同時一直要使探棒纜線遠離可能的干擾源。

雜訊還可以直接感應到探棒接地引線中，這是典型的探棒接地引線導致的結果，在連接到測試電路時，其表現為單圈迴路天線。這個接地引線天線特別容易受到邏輯電路或其他快速變化的訊號導致的電磁干擾影響。若探棒接地引線的位置與待測電路板上的特定區域太近，如時脈線，接地引線可能會撿拾訊號，並與探棒頭上的訊號混合在一起。

確定雜訊源

在訊號的示波器顯示幕上看到雜訊時，問題是：這個雜訊是作為探棒針上訊號的一部分發生？還是感應到探棒接地引線中？

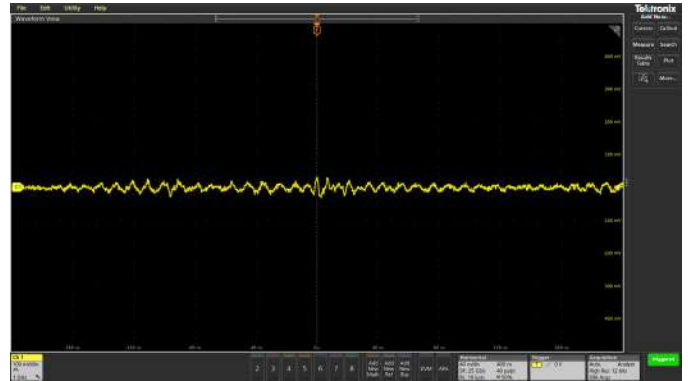


圖 6.5. 因將接地引線與探棒頭短路而在探棒迴路中產生電路板感應雜訊的範例。

為回答這個問題，可以試著移動探棒接地引線。若雜訊訊號位準變化，則雜訊是感應到接地引線中的訊號。

識別雜訊來源的另一個非常有效的方法是將探棒從電路上斷開，將探棒接地引線夾到探棒頭上。然後沿著電路來回移動這只探棒頭/接地引線迴路天線。這個迴路天線將撿拾電路中強烈輻射的雜訊區域。圖 6.5 說明透過將探棒接地引線連接到探棒頭上進行搜尋，可以在邏輯電路板上找到有哪些雜訊來源。

為最大限度地降低感應到探棒接地中的雜訊，應使接地引線遠離待測電路板上的雜訊來源。此外，縮短接地引線可以降低撿拾的雜訊數量。

接地最佳實作

一般來說，最短的接地路徑會產生最佳的量測結果。最終的接地系統是一個電路 PCB (印刷電路板) 到探棒頭轉接器，如圖 6.6 所示。PCB 轉接器可讓您將探棒頭直接插入電路測試點，轉接器的外筒與探棒頭的接地環形成直接且短的接地接觸。

對關鍵振幅和時序量測，建議電路板設計中對已建立的測試點包括 ECB/探棒頭轉接器。這不僅清楚地表明測試點位置，而且保證了可以最好地連接測試點，實現最可靠的示波器量測。

圖 6.3 中的波形再次使用相同的示波器和探棒來擷取。只是這一次，6 吋的探棒接地線被移除，並且透過 PCB 到

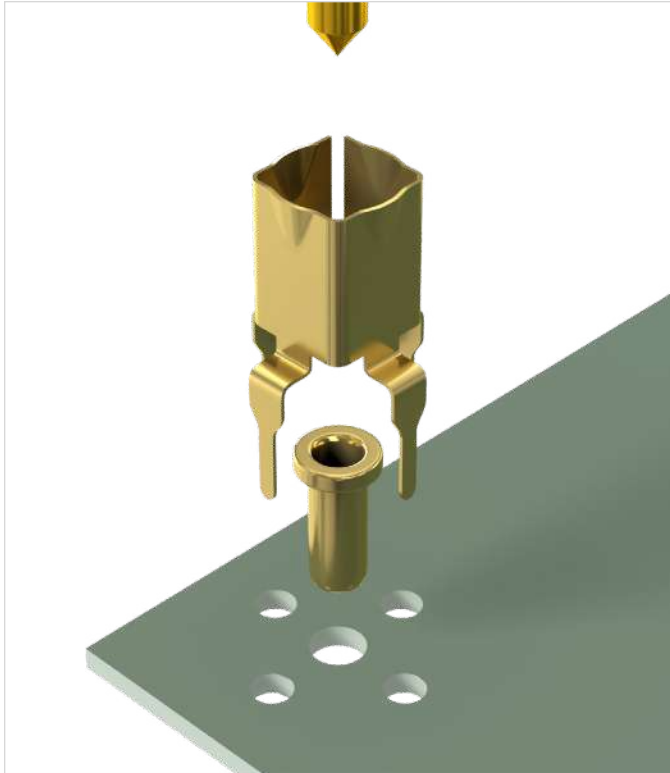


圖 6.6. PCB 至探棒頭轉接器。



圖 6.8. 接地彈簧可用於透過被動探棒探測低電壓訊號。其提供的接地路徑比接地引線短得多。

探棒頭轉接器安裝來獲取步進訊號。結果顯示的無像差步進波形如圖 6.7 所示。消除了探棒的接地引線以及將探棒直接端接在 PCB 至探棒頭轉接器中，幾乎消除了波形顯示中的所有偏差。現在的顯示是測試點處步進波形的準確描繪。

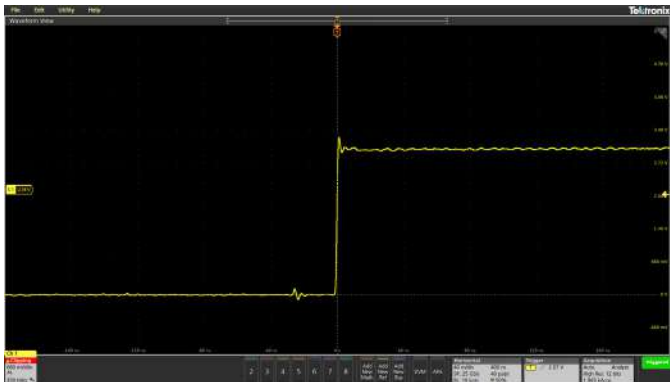


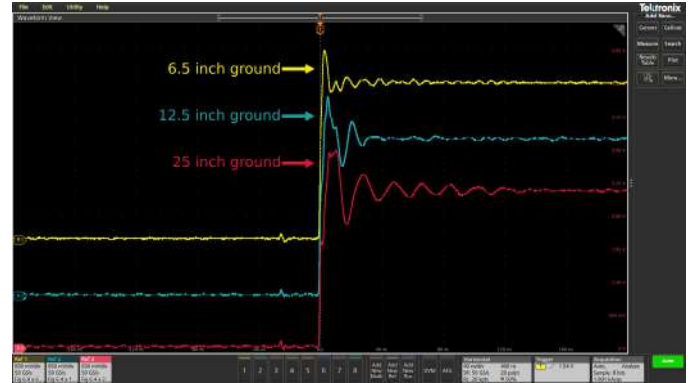
圖 6.7. 透過 PCB 到探棒頭轉接器所獲得的 1.5 ns 上升時間步進波形。

提供短接地路徑的另一種選擇是使用 MMCX 連接器和相容探棒，例如 TPP1000 1 GHz 10X 被動式探棒。MMCX 連接器是射頻應用中常用的高頻寬同軸連接器。這使得其非常適合用作測試點，並且可以永久安裝或臨時焊接到定位 (圖 4.3 顯示了使用 MMCX 連接器的範例)。

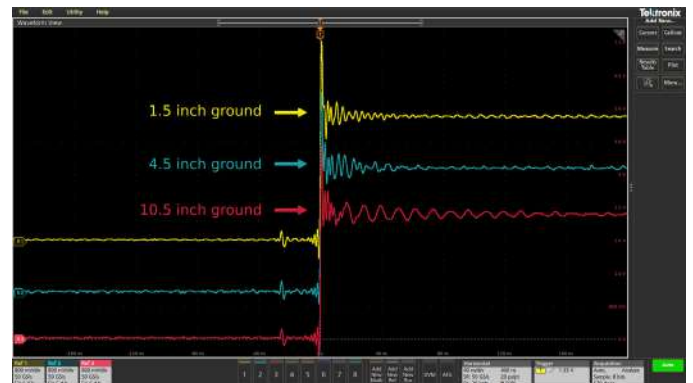
不幸的是，永久安裝的測試點對於許多通用量測情況來說並不實用。最常見的方法是使用夾在待測電路接地點上的短接地線，而不是使用轉接器。這要方便得多，因為其允許您在待測電路中快速地將探棒從一點移動到另一點。大多數探棒製造商隨探棒提供的短接地線（通常為 6 吋或 150 公釐）可為許多量測提供足夠的結果，特別是當您量測低於 100 MHz 的訊號或您可以容忍量測中出現一些正常振鈴時。

對於低於 30 Vrms 的高頻訊號，可以使用接地彈簧來縮短接地路徑。這些彈簧連接到被動探棒的接地筒。彈簧可以彎曲以適應連接點，並且可以輕鬆探測表面貼裝元件，例如圖 6.8 中所示的 0402 封裝電容器。

另一種選擇是使用主動 FET 探棒。FET 探棒由於具有高輸入阻抗和極低的尖端電容（通常小於 1 pF），可以減少被動式探棒經常遇到的接地引線問題。如圖 6.9 所示。



a. 被動式探棒。



b. FET 探棒。

圖 6.9. 被動式探棒與主動式探棒的接地引線效應範例。被動探棒上使用的 6.5 吋、12.5 吋和 25 吋接地引線對波形的影響 (a)。使用 1.5 吋、4.5 吋和 10.5 吋接地引線以及主動式 FET 探棒 (b) 取得相同的波形。

7. 差動式量測

嚴格來說，所有的量測都是差動式量測。標準的示波器量測是將探棒連接到訊號點、探棒地線連接到電路接地，實際上是量測測試點與接地之間的訊號差異。依此，其有兩條訊號線，即接地訊號線和測試訊號線。

但在實務上，差動式量測是指量測的兩條電壓大於零的訊號線。這要求使用某種差動放大器，以備能夠以代數方式將兩條訊號線 (雙端訊號源) 加總到參考接地的一條訊號線中 (單端訊號)，然後再輸入到示波器中，如圖 7.7 所示。差動訊號可以由作為探測系統一部分的特殊放大器產生，或若示波器支援波形數學運算，即可在個別的示波器通道上擷取各條訊號線，再以代數方式將兩條通道相減。包含差動放大器的偵測系統稱為差動式電壓探棒。無論哪一種狀況，共模訊號互斥都是差動式量測品質的重要因素。

瞭解差模訊號和共模訊號

理想的差動放大器會放大兩個輸入之間的「差模」訊號 (V_{DM})，並完全排斥兩個輸入的共模電壓 (V_{CM})。輸出電壓計算公式如下：

$$V_o = A_v(V_{+in} - V_{-in})$$

其中：

A_v = 放大器的增益

V_o = 參考接地輸出訊號

感興趣的電壓或差動訊號稱為差動電壓或差模訊號，其表示為： V_{DM} ，其中：

$$\text{上面公式中的 } V_{DM} = (V_{+in} - V_{-in})$$

請注意共模電壓 V_{CM} 並不是上述公式的一部分，這是因為理想的差動放大器會抑制所有共模成分，而不管其振幅或頻率是多少。

圖 7.8 提供了使用差動放大器量測反相器電路中上方 MOSFET 裝置的閘極驅動裝置的範例。

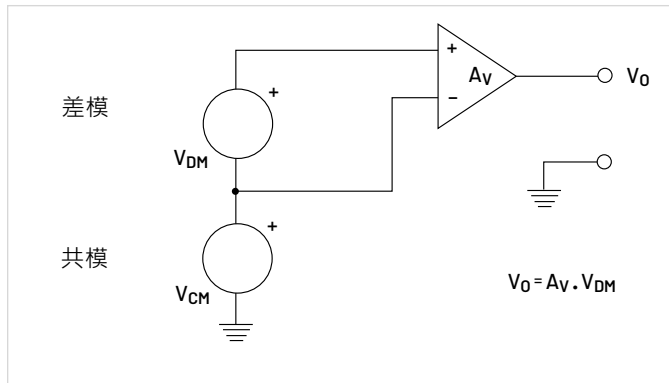


圖 7.7. 差動放大器有兩條訊號線，將其電壓差以對地線參考的單一訊號輸出。

在 MOSFET 開關時，源極電壓從正供電軌道擺到負供電軌道。變壓器允許閘極訊號參考訊號源。差動放大器允許示波器以足夠的解析度量測真正的 V_{GS} 訊號 (幾伏特擺幅)，如 2V/格，同時抑制接地訊號源的幾百伏特轉換。

在實際環境中，差動放大器並不允抑制所有共模訊號。少量的共模電壓會在輸出中表現為錯誤訊號，而不能從希望的差動訊號中將這種共模錯誤訊號分開。

差動放大器能夠最大限度地縮小不希望的共模訊號的能力，稱為共模抑制比，或簡寫為 **CMRR**。**CMRR** 的真正定義是「差模增益除以參考輸入的共模增益」：

$$CMRR = \frac{A_{DM}}{A_{CM}}$$

在評估時，可以在沒有輸入訊號的情況下評估 **CMRR** 效能。然後，**CMRR** 會變成明顯的 V_{DM} ，可在共模輸入導致的輸出上看到這個 V_{DM} 。這可用比率表示，如 10,000:1，也可以用 dB 表示：

$$dB = 20 \log (A_{DM}/A_{CM})$$

例如，10,000:1 的 **CMRR** 等於 80 dB。為查看其重要意義，假設您需要在音訊放大器的輸出阻尼電阻器中量測電壓，如圖 7.9 所示。在全負載下，透過過阻尼器的電壓 (V_{DM}) 應達到 35 mV，輸出擺幅 (V_{CM}) 為 80 Vp-p。使用的差動放大器在 1 kHz 時的 **CMRR** 規格為 10,000:1。

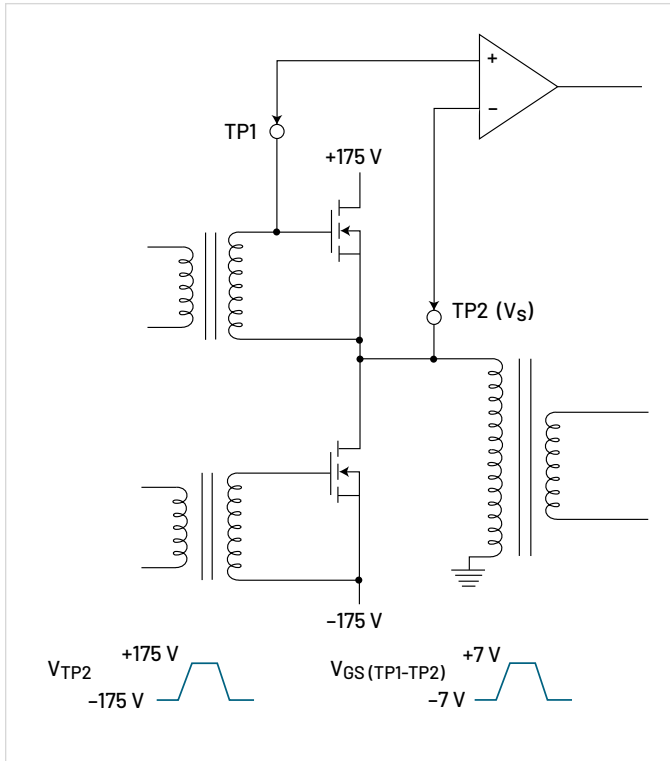


圖 7.8. 用來量測反相器電橋中上方電晶體的閘極 - 源極電壓的差動放大器。請注意，在量測期間源電位變化了350V。

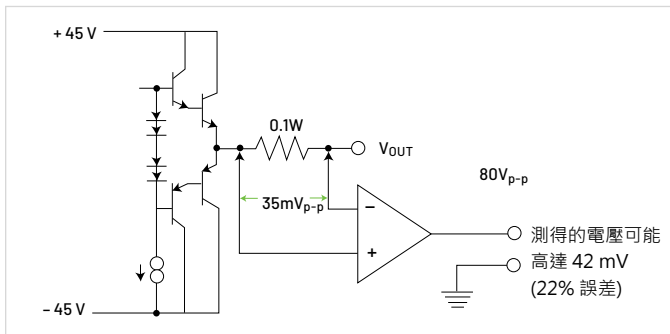


圖 7.9. CMRR 為10,000:1 的差動放大器的共模誤差。

在使用 1 kHz 正弦波將放大器驅動到全功率時，千分之十的共模訊號將在差動放大器的輸出上錯誤地顯示為 V_{DM} ，其將是 $80\text{ V}/10,000$ 或 8 mV 。8 mV 的殘餘共模訊號在實際 35 mV 訊號中代表著高達 22% 的誤差！

必須指出，CMRR規格並不是一個絕對值，並沒有指明誤差的極性或相位度數。因此，不能簡單地從顯示的波形中減去誤差。

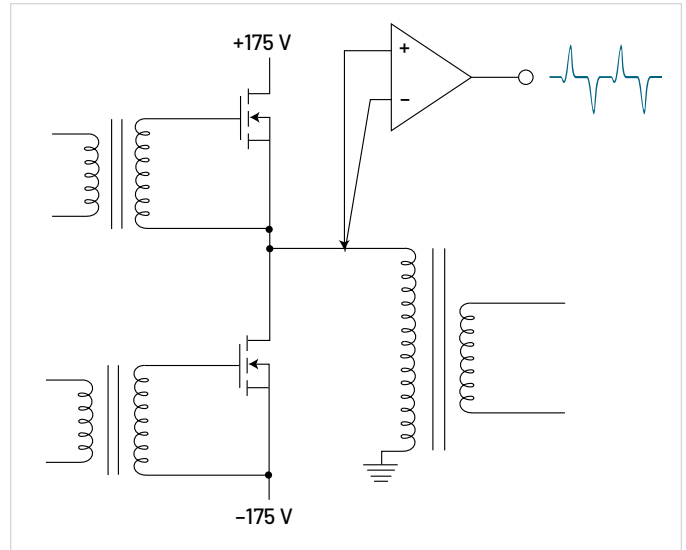


圖 7.10. 充分進行共模抑制的經驗性測試。兩個輸入都從同一點驅動。殘餘共模訊號顯示在輸出上。這一測試不能抓住差動訊號源阻抗的影響。

此外，CMRR一般在 DC 最高 (最好)，隨著 V_{CM} 頻率提高，CMRR會下降。某些差動放大器會作為頻率的函數繪製CMRR規格；其他差動放大器則只在一些關鍵頻率上提供CMRR規範。不管是哪種情況，在比較差動放大器或探棒時，都要保證 CMRR 比較處在相同的頻率上。

還要注意，CMRR規格假設共模成分是正弦曲線，而實際情況通常並不是這樣。例如，圖 7.8 中的反相器的共模訊號是一個 30 kHz 方波。由於方波包含著頻率遠遠高於 30 kHz 的能量，因此 CMRR 可能會要差於 30 kHz 點上指定的值。

在共模成分不是正弦曲線時，經驗測試是確定 CMRR 誤差成分最快捷的方式 (請參見圖 7.10)。暫時將輸入引線連接到訊號源上。示波器現在只顯示共模誤差。現在可以確定誤差訊號振幅是否明顯。記住，並沒有指定 V_{CM} 和 V_{DM} 之間的相位差。因此，從差動式量測結果中減去顯示的共模誤差並不能準確地抵消誤差項。

圖7.10所示的測試可準確地確定實際量測環境中的共模抑制誤差程度。但是，有一種效應無法使用這種測試解決。

在兩個輸入都連接到同一點時，放大器看到的驅動阻抗沒有差異。這種情況產生了最好的 **CMRR** 效能，但在差動放大器的兩個輸入從明顯不同的訊號源阻抗驅動時，**CMRR** 將會劣化。

差動式量測誤差降至最低

將差動放大器或探棒連接到訊號源上一般是最大的誤差來源。為保持輸入相符，兩條通路應盡可能完全相同。對兩個輸入，任何線纜的長度都應該相同。

若對每條訊號線使用單獨的探棒，則應該採用相同的型號和纜線長度。在使用大的共模電壓量測低頻訊號時，要避免使用衰減探棒。在高增益上，之所以不能使用衰減探棒，因為不可能精確地平衡其衰減。

單獨的輸入線纜會成為變壓器線圈。穿過迴路的任何 **AC** 磁場會對放大器輸入表現為差動，完整地加總到輸出中！為最大限度地降低這種影響，常用方法是將 **+** 和 **-** 輸入纜線絞合在一個線對中。這降低了線路頻率和其他雜訊撿拾。透過將輸入導線絞合在一起，如圖 7.11 所示，任何感應的電壓一般都會位於 **VCM** 通路中，並透過差動放大器進行抑制。

透過將兩條輸入導線編碼到一個鐵素體芯上，可以改進容易受到過高共模訊號影響的高頻量測。這衰減了兩個輸入共用的高頻訊號。由於差動訊號以兩個方向穿過磁芯，因此其不受任何影響。

大多數差動放大器的輸入連接器是外殼接地的 **BNC** 連接器。在使用探棒或同軸纜線輸入連接時，一直有一個如何處理接地的問題。由於量測應用不同，因此並沒有一成不變的硬性規定。

在量測低頻率的低位準訊號時，最好只在放大器一端連接接地，而在輸入端都不要連接。

這為感應到屏蔽中的任何電流提供了一條回路，但不會產生可能擾亂量測或待測裝置的接地迴路。

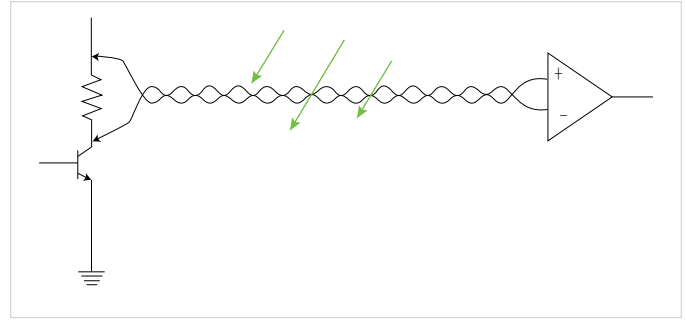


圖 7.11. 將兩條輸入線絞合在一起，迴路面積非常小，進而可以降低透過迴路的場。任何感應的電壓一般都會位於透過差動放大器抑制的 **VCM** 通路內。

在較高的頻率上，探棒輸入電容及導線電感構成了可能會振鈴的串聯「諧振」電路。在單端量測中，透過使用最短的地線，可以最大限度地降低這種效應。這降低了電感，可以有效地提高諧振頻率，其可望超過放大器的頻寬。差動式量測在兩隻探棒頭之間進行，量測中沒有接地的概念。但是，若振鈴是由於共模成分快速上升產生，則使用短地線可以降低諧振電路中的電感，進而降低振鈴成分。在某些情況下，透過連接地線，也可以降低快速差動訊號導致的振鈴，當共模訊號源在高頻上擁有非常低的到阻抗時，可以採用這種方法，即使用電容器避開振鈴。否則，連接地線可能會使情況變得更糟！若發生這種情況，應試著在輸入端將探棒一起接地，這可以降低透過屏蔽的有效電感。

當然，將探棒接地連接到電路上可能會產生接地迴路。在量測頻率更高的訊號時，這通常不會導致問題。在量測高頻率時，最好嘗試有地線時及沒有地線時進行量測；然後使用提供最佳結果的設定。

在將探棒地線連接到電路上時，記住要將其連接到接地！在使用差動放大器時，很容易會忘了接地連接在哪裡，因為差動放大器可以探測電路中的任何地方，而沒有損壞風險。

8. 量測低振幅訊號

量測低振幅訊號面臨了一系列獨特的挑戰。最主要的挑戰是雜訊和足夠的量測靈敏度問題。

降低雜訊

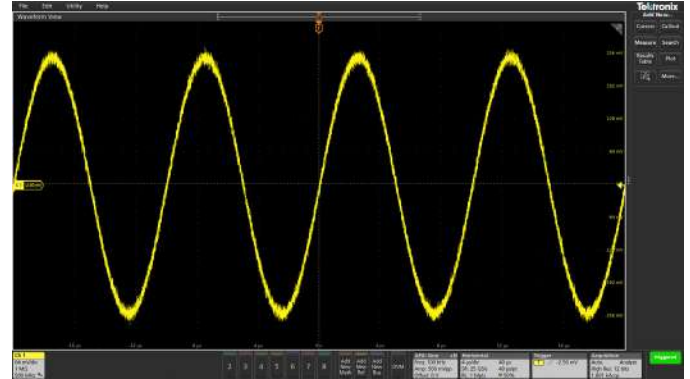
在量測幾百毫伏特以上的訊號時可以忽略不計的環境雜訊，在量測幾十毫伏特以下的訊號時不能再忽略不計。結果，為降低量測系統撿拾的雜訊，必須最大限度地減少接地迴路，並使地線盡可能短。在極限情況下，可能必須使用電源線濾波器和屏蔽室，以對振幅非常低的訊號進行無雜訊量測。

但是，在進入極端條件前，應考慮將訊號平均作為解決雜訊問題的一種簡單、經濟的解決方案。若試圖量測重複的訊號，且試圖消除隨機的雜訊，訊號平均可以有效改善擷取的訊號的 SNR (訊號雜訊比)。圖 8.1 說明其中一個範例。

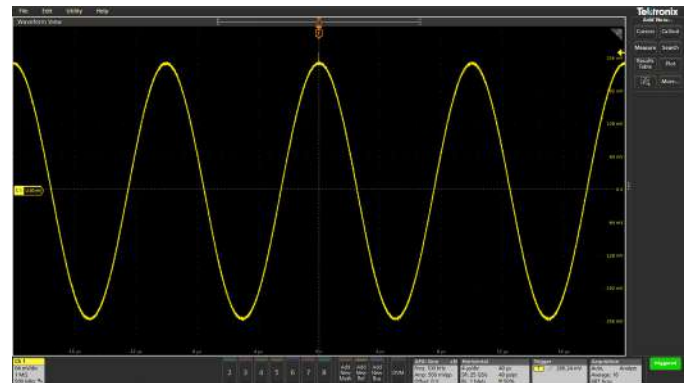
訊號平均是大多數數位示波器標準配備的功能。其運作方式是對多次擷取的重複波形求和，然後從多次擷取中計算得出平均波形。由於隨機雜訊的長期平均值為零，因此訊號平均過程降低了重複訊號上的隨機雜訊。改進的程度用 SNR 表示。在理想情況下，訊號平均功能每兩次平均的功率會使 SNR 改進 3 dB。因此，平均兩次波形擷取 (21) 可以使 SNR 改進 3 dB，平均四次波形擷取 (22) 可以使 SNR 改進 6 dB，平均八次 (23) 可以使 SNR 改進 9 dB，依此類推。

提高量測靈敏度

示波器的量測靈敏度是其輸入電路的函數。輸入電路放大或衰減輸入訊號，以便在示波器螢幕上以校準的振幅顯示訊號。可以透過示波器的垂直靈敏度設定，選擇顯示訊號所需的放大或衰減量，垂直靈敏度設定以每格伏特數 (V/div) 進行調節。



a.



b.

圖 8.1. 透過訊號平均 (b) 可以清除有雜訊的 (a)。

為顯示和量測小訊號，示波器輸入必須有足夠增益或靈敏度，至少要提高幾格的訊號顯示高度。例如，為兩格高顯示 20 mV 峰值訊號，示波器要求 10 mV/格的垂直靈敏度。同樣為兩格顯示 10 mV 訊號，需要以更高的靈敏度設定 5 mV/格。請注意，每格伏特數設定低會導致靈敏度高，反之亦然。

量測小訊號除要求充足的示波器靈敏度外，還需要充足的探棒。一般來說，這不是大多數示波器作為標準配件提供的普通探棒。標準配套探棒通常是 10X 探棒，以係數 10 降低示波器靈敏度。換句話說，在使用 10X 探棒時，5 mV/格示波器設定會變成 50 mV/格。結果，為使示波器保持最高的訊號量測靈敏度，必須使用非衰減的 1X 探棒。

但是，正如前幾章討論的那樣，要注意1X被動式探棒的頻寬較低，輸入阻抗較低，頭部電容一般較高。因此您要額外注意量測的小訊號的頻寬限制及探棒可能導致的訊號源負載。若任何一項表明出現問題，則較好的方法是利用1X主動式探棒提供高得多的頻寬和低得多的負載。

在小訊號振幅低於示波器的靈敏度範圍的情況下，必須使用某種形式的前置放大技術。由於非常小的訊號很容易受到雜訊影響，因此通常使用差動前置放大技術。差動前置放大技術透過共模抑制，在一定程度上實現了抗雜訊能力，另外可以放大小訊號，從而使其落在示波器的靈敏度範圍內。

在使用為示波器設計的差動前置放大器時，可以實現10 mV/格等級的靈敏度。

這些專門設計的前置放大器擁有相應的功能，允許在最小5 mV的訊號上進行可用的示波器量測，甚至可以在雜訊高的環境中進行量測！

但要記住，全面利用差動放大器要求使用一套匹配的優質被動式探棒。未能使用匹配的探棒會損害差動前置放大器的共模雜訊抑制功能。

另外，在需要進行單端量測、而不是差動式量測的情況下，負訊號探棒可以連接到測試電路接地上。這在本質上是在訊號線和訊號接地之間進行的一種差動式量測。但在這樣做時，會喪失共模雜訊抑制功能，因為訊號線和接地沒有共同的雜訊。

最後要注意，一直要遵守製造商推薦的連接和使用所有探棒和探棒放大器的程序。特別是在使用主動式探棒時，要特別注意可能會損壞對電壓靈敏的探棒裝置的過壓問題。

9. 如何處理探測的影響

從上面的範例和討論中我們可以看出，訊號源阻抗、探棒和示波器構成了一個互動系統。為實現最優的量測結果，必須盡可能地使示波器/探棒對訊號源的影響達到最小。

整體規則如下：

- 務必根據示波器製造商的建議使示波器和探棒相符。
- 保證示波器/探棒對要量測的訊號擁有足夠的頻寬或上升時間功能。一般來說，應該選擇上升時間規格比計畫量測的最快上升時間快 3-5 倍的示波器/探棒組合。
- 保持接地導線盡可能短且直。接地迴路過高可能會導致脈衝上發生振鈴。
- 選擇在量測功能及與測試點機械連接上最能滿足應用需求的探棒。
- 最後，要瞭解探棒負載可能給被探測電路造成的影響。請記住，隨著訊號頻率的增加，探棒電容的影響更大。在許多情況下，透過選擇探棒，可以控制或最大限度地降低負載。

下面概括了不同類型探棒需要注意的一些探棒負載考慮因素。

被動式探棒

1X 被動式探棒的電阻一般低於 10X 被動式探棒，其電容一般高於 10X 被動式探棒。結果，1X 探棒更容易導致負載，在可能的地方，在通用探測中應使用 10X 探棒。

分壓器 (Z_0) 探棒

這些探棒的頭部電容非常低，但電阻負載相對較高。一般用於 50 Ω 環境中要求阻抗相符的應用中。但是，由於其非常高的頻寬/上升時間功能，分壓器探棒通常用於其他高速定時量測環境中。對振幅量測，應考慮探棒輸入電阻低的影響。

主動式探棒

主動式探棒可以同時實現兩種優勢，即超低電阻負載及超低頭部電容。其缺點在於，主動式探棒的動態範圍一般較低。但是，若量測落在主動式探棒的範圍內，在許多情況下主動式探棒都是最佳之選。

10. 瞭解探棒規格

在前面幾章中，我們已經討論了大多數主要探棒規格，包括探棒類型或探棒對量測的影響。

本章彙總了所有主要探棒規格參數和術語，讓您方便參考。

下面規格清單是按英文字母順序排列；所有這些規格並非適用所有的探棒。例如，插入阻抗規格僅適用於電流探棒；其他如頻寬的規格則是通用規格，適用於所有的探棒。

偏差 (Aberrations, 通用)

偏差是輸入訊號預計回應或理想回應的任何振幅偏差。在實作中，在快速波形轉換之間通常會立即發生偏差，其表現為所謂的「振鈴」。

偏差作為最終脈衝回應位準 \pm 百分比進行量測或指定 (圖 10.1)。這一規格可能還包括偏差的時間窗口，例如：

在前 30 ns 內，偏差不應超過峰值的 $\pm 3\%$ 或 5% 。

在脈衝量測上看到偏差過多時，在認為偏差是探棒故障來源時，一定要考慮所有可能的來源。例如，偏差實際上是訊號源的一部分嗎？還是探棒接地技術導致？

觀察到的偏差最常見的來源之一，是疏於檢查及正確調節電壓探棒的補償功能。嚴重過度補償的探棒會在脈衝邊緣之後立即導致明顯的峰值 (圖 10.2)。

準確度 (Accuracy, 通用)

對電壓感測探棒，準確度一般是指探棒對直流訊號的衰減。探棒準確度的計算和量測一般應包括示波器的輸入電阻。因此，只有在與擁有假設輸入電阻的示波器一起使用探棒時，探棒準確度規格才是正確的或適用的。準確度規格範例如下：

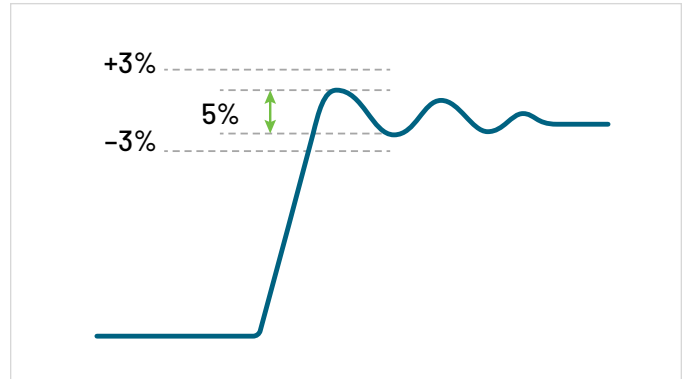


圖 10.1. 相對於 100% 脈衝高度量測偏差的範例。

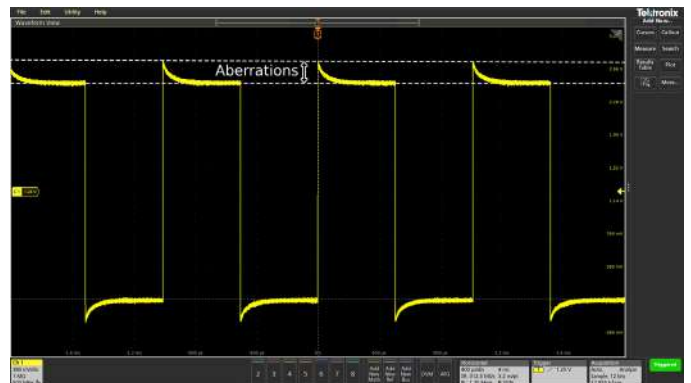


圖 10.2. 過分補償探棒導致的偏差。

在 3% 範圍內 10X (對 1 M Ω \pm 2% 的示波器輸入)

對電流感測探棒，準確度規格是指電流到電壓轉換的準確度。這取決於電流變壓器線圈比及終端電阻的值和準確度。使用專用放大器的電流探棒的輸出在安培/格中直接校準，準確度規格用電流/格設定值百分比的衰減器準確度指定。

安培秒乘積 (Amp-Second Product, 電流探棒)

對電流探棒，安培秒乘積規定了電流變壓器磁芯的能量處理功能。若平均電流和脈寬的乘積超過額定安培秒乘積，磁芯會飽和。這種磁芯飽和會導致在飽和過程中發生的波形部分被削掉或被抑制。若沒有超過安培秒乘積，則探棒的訊號電壓輸出將呈線性，並保證量測準確度。

衰減係數 (Attenuation Factor · 通用)

所有探棒都有一個衰減係數，某些探棒可能會有可以選擇的衰減係數。典型的衰減係數是1X、10X和100X。

衰減係數是探棒使訊號振幅下降的程度。1X 探棒不會降低或衰減訊號，而 10X 探棒則會將訊號降低到探棒頭振幅的1/10。探棒衰減係數允許擴展示波器的量測範圍。例如，100X 探棒允許量測振幅高出 100 倍的訊號。

1X、10X、100X這些名稱源於以前示波器不會自動感測探棒衰減及相應地調節標度係數。例如，10X名稱提醒您所有振幅量測結果都需要乘以 10。許多新型示波器上的讀數系統會自動感測探棒衰減係數，並相應地調節刻度係數讀數。

電壓探棒衰減係數使用電阻電壓分路器技術實現。結果，探棒的衰減係數越高，輸入電阻一般也越高。另外，分路器效應會分隔探棒電容，衰減係數越高，有效表示的探棒頭電容越低。

頻寬 (Bandwidth · 通用)

所有探棒都有頻寬。10 MHz 探棒有10 MHz的頻寬，100 MHz 探棒有100 MHz 的頻寬。探棒的頻寬是指探棒回應導致輸出振幅下降到70.7% (-3 dB) 的頻率，如圖 10.3 所示。

還應指出，某些探棒還有低頻頻寬限制。例如，這適用於 AC 電流探棒。由於其設計，AC 電流探棒不能傳送 DC 或低頻訊號，因此，必須使用兩個值指定其頻寬，一個值用於低頻，另一個值用於高頻。

對示波器量測，真正擔心的問題是示波器和探棒的綜合頻寬。這種系統效能最終決定著量測功能。

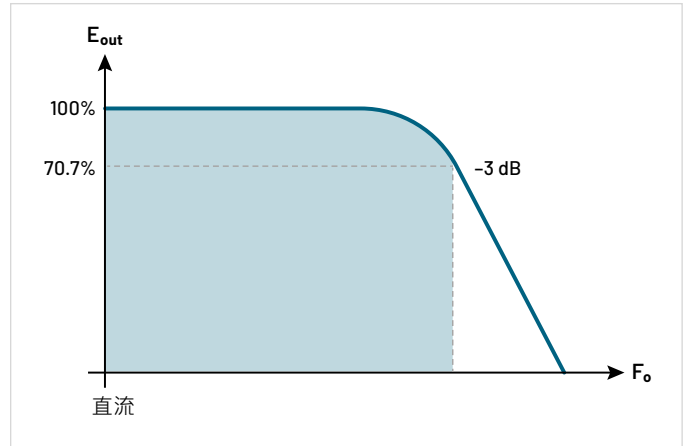


圖 10.3. 頻寬是正弦波的振幅下降 70.7% (-3 dB) 的回應曲線中的頻率。

遺憾的是，將探棒連接到示波器上會導致頻寬效能出現一定程度的下降。例如，結合使用 100MHz 通用探棒和 100MHz 示波器時，會導致量測系統的頻寬效能略低於 100MHz。為避免整體系統頻寬效能不確定性，Tektronix 指定被動式電壓探棒，以在與指定的示波器型號使用時在探棒頭上提供規定的量測系統頻寬。

在選擇示波器和示波器探棒時，要認識到頻寬在許多方面影響著量測準確度。

在振幅量測中，隨著正弦波頻率接近頻寬極限，正弦波的振幅會變得日益衰減。在頻寬極限上，正弦波的振幅會作為實際振幅的 70.7% 進行量測。因此，為實現最大的振幅量測準確度，必須選擇頻寬比計畫量測的最高頻率波形高幾倍的示波器和探棒。

這同樣適用於量測波形上升時間和下降時間。波形轉換(如脈衝和方波邊緣)是由高頻成分組成。頻寬極限使這些高頻成分發生衰減，導致顯示的轉換慢於實際轉換速度。為精確地量測上升時間和下降時間，使用的量測系統必須使用擁有充足的頻寬，可以保持構成波形上升時間和下降時間的高頻率。最常見的情況下，這使用量測系統的上升時間指明，上升時間一般應該比要量測的上升時間快 4-5 倍。

電容 (Capacitance · 通用)

一般來說，探棒電容規格是指探棒頭上的電容。這是探棒在待測 電路測試點或待測裝置上的電容。

探棒頭電容 (圖 10.4) 非常重要，因為這會影響著量測脈衝的方式。低頭部電容最大限度地降低了進行上升時間量測的誤差。此外，若脈衝的時長低於探棒RC時間常數的五倍，會影響脈衝的振幅。

探棒還對示波器輸入表示電容，這只探棒電容應與示波器電容相符合。對 10X 和 100X 探棒，這一電容稱為補償範圍，不同於頭部電容。對探棒配合，示波器的輸入電容應位於探棒的補償範圍內。

CMRR (差動式探棒)

共模抑制比 (CMRR) 是指差動式探棒在差動式量測中抑制兩個測試點共用的任何訊號的能力。這是差動式探棒和放大器的一個關鍵規格，其公式為：

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

其中：

A_d = 差動訊號的電壓增益

A_c = 共模訊號的電壓增益

在理想情況下， A_d 應該很大，而 A_c 則應該等於 0，因此 CMRR 無窮大。在實作中，10,000:1 的 CMRR 已視為非常好的結果。這意味著將抑制 5 V 的共模輸入訊號，使其在輸出上顯示為 0.5 毫伏特。這種抑制對存在雜訊時量測差動訊號非常重要。

由於 CMRR 隨著頻率提高而下降，因此指定 CMRR 的頻率與 CMRR 值一樣重要。在高頻上 CMRR 高的差動式探棒要好於在低頻上相同 CMRR 的差動式探棒。

光隔離探棒是一類特殊探棒，具有極高的 CMRR，透過探棒頭和示波器之間的電流隔離來達成。

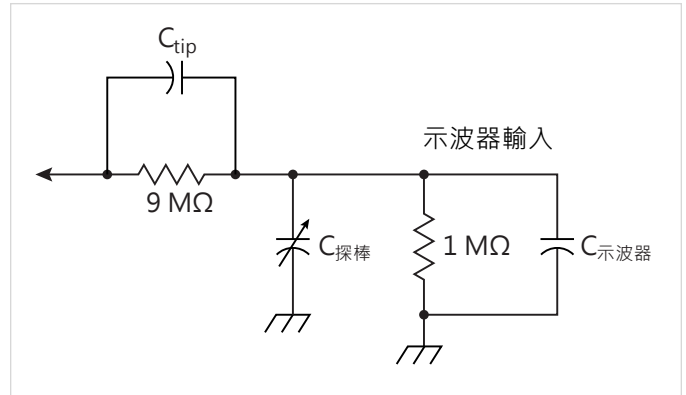


圖 10.4. 10X 探棒的電路模型顯示了探棒頭電容、補償電容和示波器輸入電容。這是一個模型，實際的探棒電路可能會有所不同。

衰退時間常數 (Decay Time Constant · 電流探棒)

衰退時間常數規格表明了電流探棒支援脈衝的能力。此時間常數是次級電感 (探棒線圈) 除以終端電阻。衰退時間常數有時稱為探棒 L/R 比。

L/R 比越大，在振幅沒有明顯衰退或下落的情況下可以表示的電流脈衝越長。L/R 比越小，在脈衝實際完成前，將看到長時間的脈衝衰落到零。

直流 (Direct Current · 電流探棒)

直流 (DC) 降低了電流探棒線圈磁芯的導磁率。導磁率下降導致線圈電感和 L/R 時間常數下降，進而會降低低頻的耦合效能，及導致低頻電流量測回應遺失。某些 AC 電流探棒提供了電流抵償選項，這些選項可清空 DC 的效應。

頻率電流額定值下降 (Frequency Derating · 電流探棒)

電流探棒規格應包括振幅與頻率額定值下降關係曲線，這一曲線將磁芯飽和與提高的頻率關聯起來。頻率提高對磁芯飽和的影響在於，當波形頻率或振幅提高時，平均電流為零安培的波形振幅峰值會被削掉。

插入阻抗 (Insertion Impedance · 電流探棒)

插入阻抗是從電流探棒的線圈 (二級) 轉換到待測的攜帶電流的導線 (primary) 中的阻抗。一般來說，電流探棒反射的阻抗值可以位於幾毫歐範圍內，對阻抗為 $25\ \Omega$ 及以上的電路影響不大。

輸入電容 (Input Capacitance · 通用)

探棒頭上量測的探棒電容。

輸入電阻 (Input Resistance · 通用)

探棒的輸入電阻是在零赫茲 (DC) 時探棒置於測試點上的阻抗。

最大額定輸入電流 (Maximum Input Current Rating · 電流探棒)

最大額定輸入電流探棒可以接受、同時仍能實現規定效能的總電流 (DC 加峰值 AC)。在 AC 電流量測中，必須根據頻率降低峰到峰額定值，以計算最大總輸入電流。

最大額定峰值脈衝電流 (Maximum Peak Pulse Current Rating · 電流探棒)

不應超過這一額定值，此值考慮了磁芯飽和及可能損壞設備的次級電壓積累。最大額定峰值脈衝電流通常規定為安培秒乘積。

最大額定電壓 (Maximum Voltage Rating · 通用)

應避免接近探棒最大額定值的電壓。最大額定電壓取決於探棒機身或量測點上探棒裝置的額定擊穿電壓。

傳播延遲 (Propagation Delay · 通用)

每只探棒都提供隨訊號頻率變化的部分數量很小的時延或相位位移。傳播延遲是探棒裝置及訊號透過這些裝置從探棒頭傳送到示波器連接器所需時間的函數。

通常情況下，最明顯的位移是由探棒纜線導致。例如，42 吋的專用探棒纜線段擁有 5 ns 的訊號延遲。對 1 MHz 訊號，5 ns 延遲會導致相位位移兩度。纜線越長，導致的相應訊號延遲越長。

通常只有在兩個以上的波形之間進行比較量測時，傳播延遲才會成為問題。例如，在量測兩個波形之間的時間差時，應使用比對的探棒擷取波形，以使得每個訊號透過探棒時經歷相同的傳播延遲。

另一個範例是組合使用電壓探棒和電流探棒進行功率量測。由於電壓探棒和電流探棒採用的結構明顯不同，因此其傳播延遲也不同。這些延遲是否影響功率量測，取決於待測波形的頻率。對 Hz 訊號和 kHz 訊號，延遲差異一般並不明顯。但對 MHz 訊號，延遲差異會產生明顯的影響。

上升時間 (Rise Time · 通用)

探棒對步進函數 10 - 90% 的回應，表明了探棒可以從頭部到示波器輸入傳送的快速量測轉換。為在脈衝上精確地量測上升時間和下降時間，量測系統的上升時間 (示波器和探棒之和) 應比要量測的快速測試轉換快 3-5 倍。

正切雜訊 (Tangential Noise · 主動式探棒)

正切雜訊是在主動式探棒中指定探棒產生的雜訊的一種方法。正切雜訊係數大約是 RMS 雜訊的兩倍。

溫度範圍 (Temperature Range · 通用)

由於感應到線圈磁屏蔽層中的能量導致的加熱效應，電流探棒有一個最大工作溫度。溫度提高會導致損耗提高。因此，電流探棒有一個最大振幅與頻率額定值下降關係曲線。

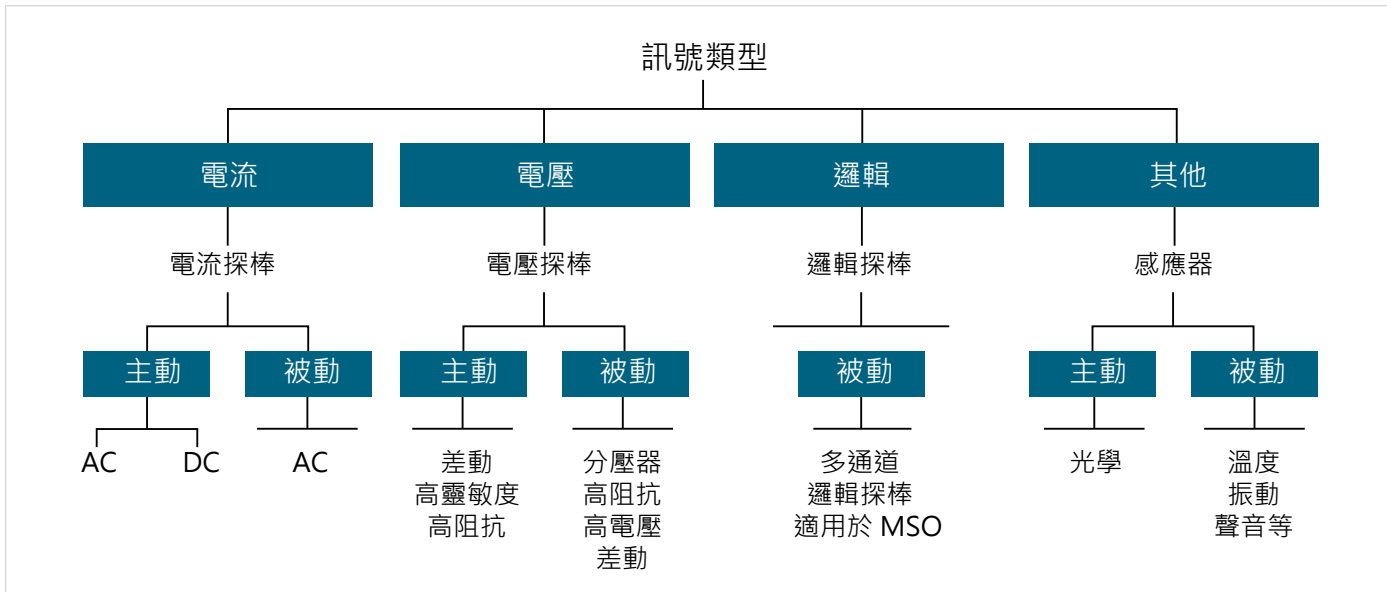
衰減器電壓探棒 (即 10X、100X 等) 可能會因溫度變化而導致準確度變化。

臨界值電壓 (Threshold Voltage, 邏輯)

邏輯探棒量測和分析訊號的方式不同於其他示波器探棒。邏輯探棒不量測類比細節，而是檢測邏輯臨界值位準。在您使用邏輯探棒將混合訊號示波器連接到數位電路上時，您只關心訊號的邏輯狀態。這時只有兩種關心的邏輯位準。在輸入超出臨界值電壓 (V_{th}) 時，位準稱為「高」或「1」；相反地，低於 V_{th} 的位準則為「低」或「0」。在對輸入取樣時，混合訊號示波

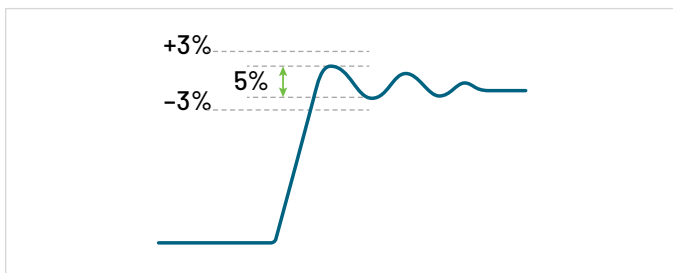
器會儲存一個「1」或一個「0」，具體視相對於電壓臨界值的訊號位準而定。

邏輯探棒能夠一次擷取大量的訊號，正是這一點使其不同於其他示波器探棒。這些數位擷取探棒連接到待測裝置，在探棒內部補償器上，輸入電壓與臨界值電壓 (V_{th}) 對比，判斷訊號的邏輯狀態 (1 或 0)。臨界值由使用者設定，範圍從 TTL 位準到 CMOS、ECL，以及使用者自訂臨界值。



11. 詞彙表

偏差 (aberrations) — 偏離理想或標準波形的任何波形；通常與波形或脈衝平坦的頂部和底部相關。訊號可能會出現訊號源的電路條件引起的偏差，量測系統也可能會在訊號上引起偏差。在涉及偏差的任何量測中，非常重要的一點是確定偏差是訊號的實際組成部分，還是量測流程導致的結果。一般來說，以偏離平坦回應的百分比變化量指定偏差。



主動式探棒 (active probe) — 作為探棒訊號調節網路的一部分，包含電晶體或其他主動式設備的探棒。

衰減 (attenuation) — 降低訊號振幅的過程。

衰減器探棒 (attenuator probe) — 透過衰減訊號有效地乘以示波器的標度係數的探棒。例如，10X 探棒有效地將示波器顯示乘以係數 10。這些探棒透過衰減到探棒頭上的訊號來實現倍乘；這樣，透過 10X 探棒可

以將100V 峰值訊號衰減到 10V 峰值，然後透過將示波器的標度係數乘以 10，這一訊號將在示波器上顯示為 100V 峰值訊號。

頻寬 (bandwidth · BW) — 網路或電路傳送、從中頻振幅下降的振幅不超過 3-dB 的連續頻帶。

電容 (capacitance) — 儲存電子電荷的一種電子現象。

共模抑制比 (common-mode rejection ration ; CMRR) — 差動式探棒在差動式量測中抑制兩個測試點共用的任何訊號的能力。這是差動式探棒和放大器的一個關鍵規格，其公式為：

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

其中：

- A_d = 差動訊號的電壓增益
- A_c = 共模訊號的電壓增益

電流探棒 (current probe) — 感測導線中的電流及將感測到的電流轉換成相應的電壓訊號，以由示波器進行的量測的一種裝置。

額定值下降 (derate) — 元件或系統的額定值根據一或多個工作變數而下降；例如，振幅量測準確度額定值可能會根據待測訊號的頻率而下降。

差動式探棒 (differential probe) — 使用差動放大器減去兩個訊號、導致示波器的一條通道量測一個差動訊號的探棒。

差動訊號 (differential signals) — 相互參考、而不是參考接地的訊號。

分散式單元 (distributed elements) (L、R、C) — 分散在整個導線長度上的電阻和電抗；與集總裝置值相比，分散式單元值一般較小。

場效應電晶體 (field-effect transistor) (FET) — 控制電壓的裝置，其中閘極終端上的電壓控制著流經裝置的電流數量。

浮動量測 (floating measurements) — 在兩點之間進行的量測，這兩個點都沒有處在接地電位上。

接地 (grounding) — 由於探棒必須從訊號源吸收一定的電流以進行量測，因此電流必須有一條返回通路。這條返回通路由連接到電路接地或公共點的探棒地線提供。

霍爾效應 (Hall Effect) — 產生一個電位，這個電位與沿著傳導材料流動的電流及在使用磁場時以直角應用到電流上的外部磁場垂直。

諧波 (harmonics) — 方波、鋸齒波形和其他週期性非正弦曲線波形都包含著頻率成分，這些頻率成分由波形的基礎頻率 (1/週期) 及稱為諧波頻率、是基礎頻率整數倍 (1x、2x、3x...) 的頻率組成；波形第二個諧波的頻率是基礎頻率的兩倍；第三個諧波頻率是基礎頻率的三倍，依此類推。

阻抗 (impedance) — 阻止或限制交流訊號流動的過程。阻抗用 Ω 表示，由電阻成分 (R) 和電抗成分 (X) 組成，其中電抗成分可以是電容 (X_C)，也可以是電感 (X_L)。阻抗 (Z) 以複數形式表示：

$$Z = R + jX$$

或用振幅和相位表示，其中振幅 (M) 是：

$$M = \sqrt{R^2 + X^2}$$

相位 θ 是：

$$\theta = \arctan \left(\frac{X}{R} \right)$$

電感 (inductance) — 電路的一種特點，其中電路本身或相鄰電路中的電流變化引起電動勢。

抖動 (jitter) — 數位訊號有效時點較理想時間位置的短期變化。

線性相位 (linear phase) — 網路的一種特點，其中應用的正弦波的相位隨著正弦波頻率提高而發生線性位移；線性相位移動的網路會保持非正弦曲線波形中的相對相位關係，這樣在波形中沒有與相位相關的失真。

負載 (load) — 置於訊號源上的阻抗；開路處於「無負載」狀態。

載入 (loading) — 應用到電源上的負載從電源中吸收電流的過程。

邏輯探棒 (logic probe) — 用於比較閾值電壓以確定邏輯狀態 (1 或 0) 以在示波器或混合訊號示波器 (MSO) 上進行分析的裝置。

低電容探棒 (low-capacitance probe) — 具有超低輸入電容的被動式探棒。

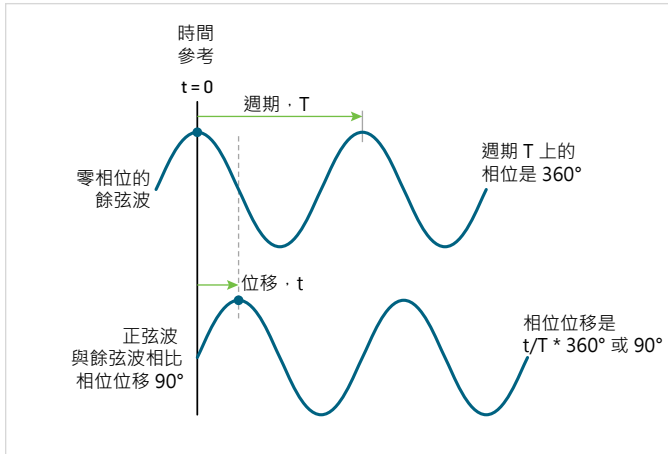
MOSFET — 金屬氧化物半導體場效應電晶體，是兩種主要 FET 類型中的一種。

雜訊 (noise) — 可以顯示在示波器波形顯示器上的一種訊號失真。

光學探棒 (optical probe) — 感測光功率，並轉換成相應電壓訊號，以透過示波器量測的一種設備。

被動式探棒 (passive probe) — 其網路僅由電阻單元 (R)、電感單元 (L) 或電容單元 (C) 組成的探棒；沒有包含任何主動式裝置的探棒。

相位 (phase) — 表達波形與時間有關的位置或相對於參考點或波形的波形成分的一種方式。例如，根據定義，餘弦波的相位為零，正弦波與餘弦波相比相位位移為 90 度。



探棒 (probe) — 測試點或訊號源和示波器之間進行實體和電子連接的裝置。

探棒功率 (probe power) — 從某種電源 (示波器、探棒放大器或待測電路) 提供給探棒的功率。要求功率的探棒一般帶有某種形式的主動式電子裝置，因此稱為主動式探棒。

電抗 (reactance) — 透過根據訊號頻率限制電流流動、以對交流訊號作出反應的阻抗單元。電容器 (C) 使用下述公式對交流訊號表示電容電抗，其單位為 Ω ：

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

其中：

- X_C = 電容電抗，單位為 Ω
- ω = 角頻率，單位為每秒弧度
- C = 電容，單位為法拉

電感器 (L) 使用下述公式對交流訊號表示電感電抗，其單位為 Ω ：

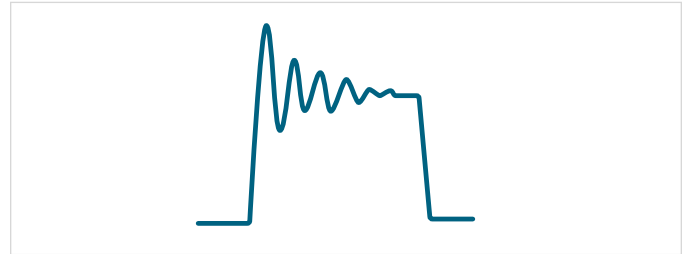
$$X_L = j\omega L$$

其中：

- X_L = 電感電抗，單位為 Ω
- ω = 角頻率，單位為每秒弧度
- L = 電感，單位為亨利

讀數 (readout) — 示波器螢幕上提供的字母數字資訊，提供了波形標度資訊、量測結果或其他資訊。

振鈴 (ringing) — 電路諧振時導致的振盪；一般來說，在脈衝上看到的阻尼正弦曲線變化稱為振鈴。



上升時間 (rise time, T_r) — 在脈衝的上升轉換中，上升時間是脈衝從 10% 的振幅上升到 90% 的振幅所需的時間。

屏蔽 (shielding) — 在電路和外部雜訊源之間放一個接地傳導材料層的做法，以使得屏蔽材料能夠截獲雜訊訊號，並將這些訊號從電路中傳導出去。

訊號平均 (signal averaging) — 對多次擷取的重複波形進行加總、並從多次擷取中計算平均波形的過程。

訊號完整性 (signal fidelity) — 探棒頭上發生的訊號在示波器輸入進行重複。

單端訊號 (single-ended signals) — 參考接地的訊號。

SNR (signal-to-noise ratio ; 訊號雜訊比) — 訊號振幅與雜訊振幅之比，通常使用下述公式表示，單位為 dB：

$$SNR = 20 \log \left(\frac{V_{\text{訊號}}}{V_{\text{雜訊}}} \right)$$

電源 (source) — 訊號電壓或電流的起始點或單元；另外也是 FET (場效應電晶體) 中的單元之一。

電源阻抗 (source impedance) — 在向回查看電源時看到的阻抗。

時域反射儀 (time domain reflectometry, TDR) — 一種量測技術，其中對傳輸通路應用快速脈衝，然後分析脈衝反射，確定傳輸通路中不連續點 (故障或不相符) 的位置和類型。

Tektronix 聯絡方式：

澳洲 1 800 709 465
奧地利* 00800 2255 4835
巴爾幹半島、以色列、南非及其他 ISE 國家 +41 52 675 3777
比利時* 00800 2255 4835
巴西 +55 (11) 3759 7627
加拿大 1 (800) 833 9200
中東歐及波羅的海諸國 +41 52 675 3777
中歐與希臘 +41 52 675 3777
丹麥 +45 80 88 1401
芬蘭 +41 52 675 3777
法國* 00800 2255 4835
德國* 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
印度 000 800 650 1835
印尼 007 803 601 5249
義大利 00800 2255 4835
日本 81 (3) 67143010
盧森堡 +41 52 675 3777
馬來西亞 1 800 22 55835
墨西哥、中/南美洲和加勒比海諸國 52 (55) 88 69 35 25
中東、亞洲及北非 +41 52 675 3777
荷蘭* 00800 2255 4835
紐西蘭 0800 800 238
挪威 800 16098
中國 400 820 5835
菲律賓 1 800 1601 0077
波蘭 +41 52 675 3777
葡萄牙 80 08 12370
南韓 +82 2 565 1455
俄羅斯及獨立國協 +7 (495) 6647564
新加坡 800 6011 473
南非 +41 52 675 3777
西班牙* 00800 2255 4835
瑞典* 00800 2255 4835
瑞士* 00800 2255 4835
台灣 886 (2) 2656 6688
泰國 1 800 011 931
英國/愛爾蘭* 00800 2255 4835
美國 1 800 833 9200
越南 12060128

* 歐洲免費電話。若無法使用，
請致電：+41 52 675 3777
最後更新日 2022 年 2 月

Tektronix 台灣分公司

太克科技股份有限公司

114 台北市內湖堤頂大道二段 89 號 3 樓

電話：(02) 2656-6688 傳真：(02) 2799-8558

太克網站：tw.tek.com



Copyright © Tektronix, Inc. 版權所有。Tektronix 產品受到已經簽發及正在申請的美國和國外專利的保護。本文中的資訊代替以前出版的所有資料。技術規格和價格如有變更，恕不另行通知。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc 的註冊商標。本文提到的所有其他商標均為各自公司的服務標誌、商標或註冊商標。

2024 年 6 月

60T-6053-17

Tektronix®

