



圖 8：各種探棒和探棒配件

探棒

探棒的目標是盡可能以高透明度將電路的訊號傳送至示波器。它不僅只是示波器「配件」，因為它是儀器與被測裝置或電路之間的接觸點。其電氣特性、連接方式以及與示波器和電路的交互作用都對測量有重大影響。

理想的探棒應易於連接、具有可靠且安全的觸點、不會使傳輸訊號降級或失真、具有線性相位特性、無衰減、無限頻寬、高抗擾性，並且不會對訊號來源造成負載。然而，實際上這些特性都不可能實現，而且在某些情況下其實會超過幾乎任何量測情況的需求。實際上，要測量的訊號往往不易觸及，其阻抗可能差異極大，整體設置對雜訊敏感且取決於頻率，頻寬有限，且訊號傳遞的差異會在多個測量通道之間產生些微的時序偏移（偏斜）。

幸好，示波器製造商盡力減少與探棒相關的問題，探棒已變得更容易連接至電路且更加可靠。例如，一手操作示波器另一手拿著探棒向來不是件容易的事。R&S®RTO 系列示波器的主動探棒可讓使用者利用探棒上的按鈕切換示波器功能，而該按鈕可指派給各種功能。該儀器同時具備 R&S®ProbeMeter 整合式電錶，能夠進行比傳統示波器通道更準確的 DC 量測。

兩種基本的探棒類型是電壓探棒和 AC 或 AC/DC 電流探棒。然而，還有許多專用於特定測量的其他類型（圖 8），包括用於分析數位電路邏輯狀態的邏輯探棒。環境探棒可在寬廣的溫度範圍內運作，溫度探棒則可測量元件和電路中可能遭遇高溫之位置的溫度。還有用於探測站晶圓級的探棒、將光訊號轉換成電訊號以便在示波器上檢視光訊號的光學探棒，以及用於測量超高電壓的特殊探棒。



圖 9：主動探棒

被動探棒

被動探棒是最簡單也最便宜的探棒類型，提供大部分必要的量測功能。它們基本上由電線和連接器組成，而需要衰減時，也包含電阻器和電容器。被動探棒中沒有主動式元件，因此無須儀器電源即可運作，具備固有的強固性。

1X（一倍）探棒具有與示波器相同的動態範圍，衰減探棒則將訊號位準衰減 10 倍、100 倍以上，以擴大儀器的量測範圍。用途最廣的探棒類型是 10X 型，因為它造成的負載較低，且電壓範圍較高，是許多儀器隨附的典型「標準」探棒。

連接至示波器 1 Mohm 輸入的 1X 被動高阻抗探棒具有高靈敏度（衰減極小），同樣連接至示波器 1 Mohm 輸入的 10:1 被動式高阻抗探棒提供寬廣的動態範圍，且輸入電阻比 1X 探棒高，電容則較低。連接至示波器 50 ohm 輸入的 10:1 被動式低阻抗探棒在頻率上的阻抗變化極小，但會對來源造成負載，因為其標準阻抗為 500 ohm。

1X 探棒適用於訊號振幅較低的情況，但若訊號混合低振幅和中振幅分量，使用切換式 1X / 10X 探棒相當方便。被動探棒的頻寬通常從小於 100 MHz 到 500 MHz 不等。在遭遇高速（高頻）訊號 50-ohm 的環境下，需要 50-ohm 探棒，其頻寬可達數千兆赫，上升時間為 100 ps，甚至更快。

被動探棒包含低頻調整控制，在探棒連接至示波器時使用。低頻補償使探棒電容與示波器的輸入電容一致。高頻調整控制僅用於約 50 MHz 以上的工作頻率。用於較高頻率的供應商專用被動探棒在出廠前已經過調整，因此只須執行低頻調整。主動探棒不需要這些類型的調整，因為它們的特性和補償在出廠前已經過確認。

主動探棒

主動探棒（圖 9）的優點包括訊號來源負載較低、探棒頭的可調式 DC 偏移可針對疊加於 DC 位準上的小型 AC 訊號實現高解析度，以及儀器自動識別，無須手動調整。主動探棒分為單端和差動版本。主動探棒採用主動式元件，例如輸入電容極低的場效電晶體，具有在寬頻率範圍內維持高輸入阻抗等優點。它們也可以測量阻抗未知的電路，並允許使用較長的地線。由於主動探棒的負載極低，連接至不適合使用被動探棒的高阻抗電路時，就必須使用主動探棒。

然而，主動探棒中的整合式緩衝放大器在有限的電壓範圍內運作，而主動探棒的阻抗取決於訊號頻率。此外，雖然可以處理數千伏特，但主動探棒仍屬於主動式裝置，在強固性則比不上被動探棒。

差動探棒

雖然可使用對應各個訊號的個別探棒來探測和測量差動訊號，但最好的方法是使用差動探棒。差動探棒使用內建的差動放大器來減去兩個訊號，因此只佔用一個示波器通道，並且在比單端測量更廣的頻率範圍內提供更高的 CMRR（共模抑制比）性能。差動探棒可用於單端和差動應用。

電流探棒

電流探棒的運作方式是感測電流流過導體時的電磁通量場強度，然後將該通量場轉換成對應的電壓，由示波器進行測量和分析。與示波器的測量和數學功能搭配使用時，電流探棒可讓使用者進行各種功率量測。



高電壓探棒

通用被動探棒的最大電壓通常約為 400V。若在電路中遭遇高達 20 kV 的極高電壓，有專用的探棒可用來安全地進行量測。顯然，在高電壓下進行量測時，安全是首要考量，而這種探棒的纜線長度通常較長，可確保安全。

探棒考量因素

電路負載

探棒附加至電路最基本也最重要的特性是負載，分為電阻性、電容性和電感性負載。電阻性負載具有衰減振幅、改變 DC 偏移和改變電路偏壓的效應。如果探棒的輸入電阻與被測訊號的輸入電阻相同，則電阻性負載很重要，因為電路中的電流會有一部分進入探棒。這進而降低了電路與探棒相接處的電壓。這可能會致使故障電路正常運作，但更常見的情況是導致電路異常。為了減少電阻性負載的影響，通常應使用電阻比被測電路的電阻大 10 倍的探棒。

電容性負載會降低上升時間的速度、減少頻寬並增加傳遞延遲，由探棒頭的電容所造成。它帶來與頻率相關的量測誤差，是進行延遲和上升時間量測時最大的問題。電容性負載是在高頻下做為低通濾波器的探棒電容所造成，它將高頻資訊分流至地面，並大幅降低高頻下的探棒輸入阻抗。因此，具有低電容探棒頭的探棒非常理想。

電感性負載使量測訊號失真，由探棒頭到探棒地線形成的迴路電感所產生。地線中的電感性負載加上探棒頭的電感所造成的訊號振鈴可透過有效接地來緩解，使振鈴頻率超出儀器頻寬的頻率。地線長度應儘可能短，以縮減迴路大小，將電感最小化。降低電感將使量測波形上的振鈴最小化。

非交錯 ADC 的優點

在探棒之後，ADC 是測量訊號通過的第一個主要示波器元件，其對該訊號的作用決定其後的處理元件的執行效果。示波器的 ADC 通常由多個並聯交錯的轉換器組成，共同構成整體裝置。然而，使用單一 ADC 的替代方案具有明顯的優點，這也是 Rohde & Schwarz RTO 系列所採用的主因。

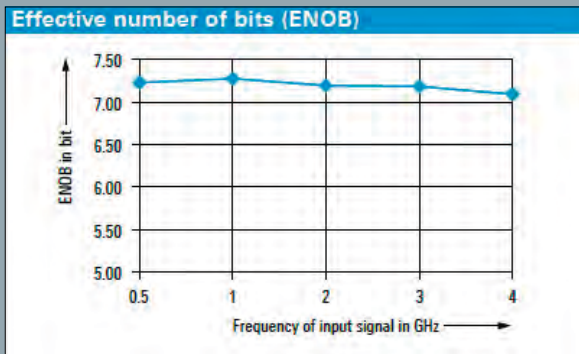
即使只有幾個轉換器核心交錯，其雜訊、相位和頻率響應特性也必須儘可能相近。此外，測量間隔為幾十皮秒時，交錯時序極為重要，分配給各個轉換器的取樣時脈也必須在裝置的整個頻率範圍內具有非常精確的相位特性，這非易事。ADC 內各個轉換器的時序各不相同，因此，如果五個轉換器交錯，將有五個略微不同的取樣時脈，其結果在頻域中顯示為基頻的分量。

這些頻率分量通常比滿刻度低 40 或 50 dB (但仍清晰可見) 且會定期出現，所以無法與雜訊一樣被平均化。其原因為時序、振幅不符，或兩者皆是。由於它們存在於頻域和時域中，可能看起來像雜訊，因為隨著時間推移，不同頻率下的多個諧波看起來像隨機訊號。

因此，有些示波器製造商使用大量轉換器，因為它們共同產生看起來像雜訊的結果，這可在一定程度上被識別和緩解。然而，輸入至示波器的寬頻資料訊號與來自這些轉換器的假性內容混合，會產生更多假性內容。簡言之，示波器的整體雜訊位準 (雜訊加失真) 限制了可從 ADC 獲得的有效位元數。多轉換器交錯是雜訊位準的主要因素，最明顯的處理方式是使用單一而非多個 ADC。

(續下頁)

(承上頁)



R&S®RTO 示波器中的 A/D 轉換器具有一致的高 ENOB，可確保訊號細節準確呈現以及極高的動態範圍。

因此，Rohde & Schwarz 在 R&S®RTO 系列中選擇此方法。該裝置是一款單一快閃轉換器，具有 8 位元解析度，取樣率為 10 GS/s，ENOB 為 7 (共 8 個)。結果是系統雜訊底線下降約 6 dB，改善訊號雜訊比和動態範圍，因此可輕易辨識極小的電壓。

此外，可以更準確地測定通道功率、總諧波失真、相鄰通道功率等頻域量測，因為頻譜不會被示波器產生的雜訊干擾。客製化 ASIC 利用此性能，大幅提高儀器從原始整數 ADC 樣本到測量波形的速度。例如，假設有 4000 萬個樣本波形，典型示波器可能需要數分鐘才能完成擷取，而 R&S®RTO 在幾分之一秒內即可執行此操作。

接地

進行示波器測量時必須做正確的接地，以達到準確度並確保操作人員的安全，尤其是在使用高電壓的情況下。儀器必須透過電源線接地，不得在「保護接地」中斷連接的情況下運作。如果 DUT 的訊號接地透過不同位置的電源接地而形成接地迴路，可能導致不需要的低頻交流聲。常見做法是讓訊號接地與電源接地絕緣，並與靠近訊號接腳的訊號接地建立連接。

探棒選擇過程

選擇正確的 (電壓) 探棒時，有兩個最具決定性的因素：擷取無失真波形所需的頻寬以及使電路負載最小化的理想最小阻抗。指定的示波器頻寬僅適用於 50-ohm 輸入阻抗和有限的電壓輸入範圍。儀器頻寬必須至少是待測最高脈衝頻率的五倍，以保持諧波和波形完整性。

指定的 DC 阻抗對於 AC 測量的價值不大。過頻時，阻抗下降，以被動探棒最為明顯。試著讓輸入阻抗至少是最高訊號頻率下之來源阻抗的 10 倍，在主動或被動探棒之間抉擇很簡單。然而，這可能將選擇範圍限制在一或兩個最接近滿足測量設置需求的探棒型號。必須使用主動探棒才能充分利用微波區的示波器頻寬。

請記住，10x 被動探棒的低頻阻抗最高，被動探棒通常不會帶有 DC 偏移或產生雜訊。主動探棒在數百千赫茲的頻率下提供恆定的阻抗，在高達數百 MHz 的頻率下提供最高的阻抗。低阻抗探棒提供高達 1 GHz 的恆定阻抗，雖然在某頻率下的阻抗可能是理想的，但恆定但較低的阻抗可避免諧波訊號失真。

簡言之，就頻率分量高於 100 MHz 的訊號而言，建議使用主動探棒，而低輸入電容會導致較高的共振頻率。與主動探棒的連接必須儘可能地短，以確保高可用頻寬。此外，如果地面看起來不平穩，則可能需要差動探棒。

就被動探棒而言，使用建議用於特定儀器的型號很重要，即使探棒的頻寬規格高於必須的頻寬也一樣。低輸入電容會導致更高的共振頻率。地線應盡可能短，使地線電感最小化。測量陡峭邊緣上升時間時要注意，因為共振頻率可能遠低於系統頻寬。探棒的阻抗應大約是電路測試點阻抗的十倍，以免電路負載過高。