

跨越界限：如何使用示波器的觸發功能來進行除錯

Douglas J. Beck
安捷倫科技

序言

示波器對電氣工程師來說是很基本的一款儀器，但無法有效運用觸發功能者大有人在。觸發往往被認為很複雜，因此當工程師發現問題時通常會請實驗室裡的專家協助設定觸發。本文旨在協助工程人員瞭解觸發的基本概念，以及有效使用觸發的策略。

什麼是觸發？

沒有一台示波器會擁有無限大的記憶體，因此所有的示波器都必須使用觸發（trigger）。觸發是指使用者所關心，而示波器必須發現的一個事件。換言之，它是使用者在波形中想要找到的某種情況。觸發可能是代表波形中的問題的一個事件，但不必然如此。觸發的例子包括信號緣、突波與數位碼型。

有限的記憶體迫使示波器必須使用觸發。舉例來說，Agilent 90000 系列示波器提供可容納 20 億個取樣的記憶體深度，但即便如此，示波器仍需要靠一些事件來分辨該將哪 20 億個取樣顯示給使用者。20 億個取樣看似龐大，但卻不足以保證示波器的記憶體確實擷取到想要的事件。

示波器的記憶體可以想成是一條輸送帶。每當擷取到新的取樣，便會將它放入記憶體中。當記憶體滿了之後，最早擷取到的取樣就會被捨棄，因此記憶體只會包含最新的取樣。當觸發事件發生時，示波器會擷取足夠的額外取樣，以便將觸發放在要求的記憶體位置（通常在中間），然後將資料顯示給使用者。

重複 vs 單擊

過去示波器最常執行的模式就是重複（repetitive）模式。這表示只要示波器進行過觸發並將資料顯示給使用者之後，就會立即開始尋找下一個觸發事件。而這也是示波器更新波形的速率如此頻繁的原因。

每一台示波器在進行過觸發並將資料顯示給使用者之後，都必須花時間重新預觸（re-arm），此即“遲滯時間”（hold off time）。在這段時間，示波器無法擷取任何的波形，所以遲滯時間愈短，會被遺漏的事件就愈少。舉例來說，如果突波正好出現在遲滯時間，則在示波器螢幕上並不會顯示該突波。如果該突波屬於偶發事件，即使確實出現突波，使用者也可能推斷波形中並未包含突波。因此示波器的遲滯時間愈短，漏掉波形中重要事件的機率就會減少。

上述概念也可以用“波形捕獲率”（update rate）來說明，也就是每秒所擷取到的波形數量。舉例來說，Agilent 7000 系列示波器提供每秒 100,000 個波形的捕獲率。

單擊（Single shot）模式可用來找出單一觸發，而不繼續擷取更多的波形。當使用者想要找到單一事件並檢查事件前後發生的情況時，便可以使用此模式。這對於分析不具重複性，以致每一回都會改變的波形來說尤其重要。

自動觸發 vs 已觸發

如果觸發事件未出現會怎麼樣？這是一個好問題。在此情況下，螢幕上的波形將不會更新。這會有點麻煩，因為使用者可能不知道如何變更觸發，以便在螢幕上顯示波形。舉例來說，如果探棒不慎滑落，示波器可能會停止觸發，但如果螢幕畫面並未更新，信號已經消失的事實就不是很明顯。

為解決這個問題，示波器提供了“自動”（Auto）觸發模式。在此模式下，如果在某段期間內並未發現觸發，示波器將會自動觸發以更新螢幕畫面。通常有一些指標（例如面板上的 LED 指示燈）可以顯示前一次觸發是真正的觸發或自動觸發。因此如果使用者看到“Auto”指標，他們就知道自己設定的觸發並未發生。比方說，如果他們設定的是突波觸發，那麼就可以知道示波器並未偵測到突波。

但回想上一節的內容，當自動觸發發生時，也表示示波器在每次觸發過後重新預觸時會有一段遲滯時間。為完全避掉這段時間，示波器必須變更為“已觸發”（triggered）模式（某些示波器將其稱為“一般”（Normal）模式）。在“已觸發”模式下，除非發現觸發事件，否則示波器永遠不會進行觸發。因此，如果使用者設定突波觸發模式而示波器卻從未觸發，使用者就可以確定突波並未出現（至少示波器有能力偵測）。

常見的觸發模式

信號緣

信號緣（edge）觸發是所有觸發中最常見的一種。它這麼常被使用的原因是所有的波形都包含信號緣，因此如果觸發位準設定正確，這項觸發就能發生作用。當然，這項優點也是最大的缺點，因為在大多數的波形上它觸發的次數非常地頻繁，就跟使用自動觸發差不多。

突波/脈衝寬度/逾時

雖然使用信號緣觸發就能發現許多問題，但有時候工程人員還是得使用較複雜的觸發。其中最簡單的一種觸發就是脈衝（pulse），它是以在臨界位準之上（正脈衝）或之下（負脈衝）的一個時間範圍來界定。突波（glitch）是最常見的脈衝觸發，可在脈衝比最小寬度來得短時進行觸發。這是違反條件（violation）觸發的一個例子，因為每當示波器觸發，就表示出現了問題。

具有最大時間值的脈衝寬度（pulse width）觸發令人困惑的一點是，觸發何時會發生。在某些情況下，使用者可能希望只要一超過該時間值，示波器就進行觸發。此稱為“逾時”

（time out）觸發，因為示波器不需等到出現完整的脈衝才觸發。換言之，即使第 2 次轉態從未發生，逾時觸發也會執行。

反之，所謂的“脈衝”觸發會等到第二次轉態發生才進行。以正脈衝來說，當超過最大時間值時，觸發會等到下降緣出現才開始執行。這表示觸發可以在時間限制點之後很久才發生，也因此逾時觸發會比脈衝寬度觸發更常被使用。因為不合直覺，所以當使用者使用脈衝觸發時可以選擇逾時或脈衝結束（end of pulse）。如果選擇逾時選項，該觸發就完全等於逾時觸發。

脈衝寬度觸發另一個讓人困惑的地方是，它們並非永遠是違反條件。突波很明顯是一個違反條件，但長脈衝卻可能是合法的事件。因此脈衝寬度是否為一個違反條件，必須取決於它的定義。

上升時間與下降時間

下一種違反條件觸發是上升時間與下降時間觸發，它們會找尋上升或下降速度太快或太慢的信號緣。這類觸發是由高/低兩種觸發位準來界定，信號在這兩個位準之間還有最小和最大時間值的限制。

上升與下降時間觸發令人困惑的地方是，觸發電壓臨界值與自動量測的電壓臨界值是分開的。舉例來說，在量測信號的上升時間時，期望上升時間觸發以相同的時間值來執行是很自然的事。在許多情況下，量測臨界值會預設成信號的 10%到 90%電壓範圍。由於觸發臨界值是分開的，所以使用者很容易不小心設定了不同的臨界值，例如 5%到 95%。這時候使用者可能會感到很困惑，因為量測所顯示的上升時間值並不能使示波器觸發。

設定與保持時間

另一種違反條件觸發是設定與保持時間（Setup & Hold）。當然，這項觸發必須同時具有資料信號和時脈信號，而且還需要有設定時間、保持時間或以上兩者。每當示波器偵測到違反設定與保持時間的條件就會進行觸發。

最窄脈衝

突波是一個過窄的脈衝，而最窄脈衝（runt）則是一個非常短的脈衝。最窄脈衝是以三個電壓位準來定義。如果信號越過兩個臨界值（同一個方向），然後重新越過前兩個臨界值的其中一個而未越過第三個，最窄脈衝觸發便會發生。假設這三個臨界值是 1V、2V 和 3V，如果信號從 0V 升到 2.3V，然後降回 0V，那它就是最窄脈衝，因為它越過 1V，升至 2V 以上然後再往 2V 下降。這項觸發最讓人困惑的地方，在於三個臨界位準的定義。一般來說，10%、50%和 90%的設定是合理的，但為什麼需要三個臨界位準而不是兩個，並不是那麼容易理解。

時窗

有一種進階觸發叫做時窗（Window），它使用兩個電壓臨界值及最多兩個時間值。時窗觸發可以是每當信號進入或離開電壓範圍就執行這麼簡單，或者也可以使用時間範圍來指定在電壓範圍之內（或之外）所花的最短和最長時間。這提供了執行各種不同觸發的彈性。

序列觸發

序列觸發是指先找到一個事件，然後在示波器觸發之前搜尋另一個事件。舉例來說，使用者可以利用序列觸發來找尋一個信號緣，接著再找尋另一個信號的脈衝。圖 1 是 Agilent 90000 系列示波器的序列觸發範例。請注意圖中在通道 1 的信號緣後面接著通道 2 的脈衝。

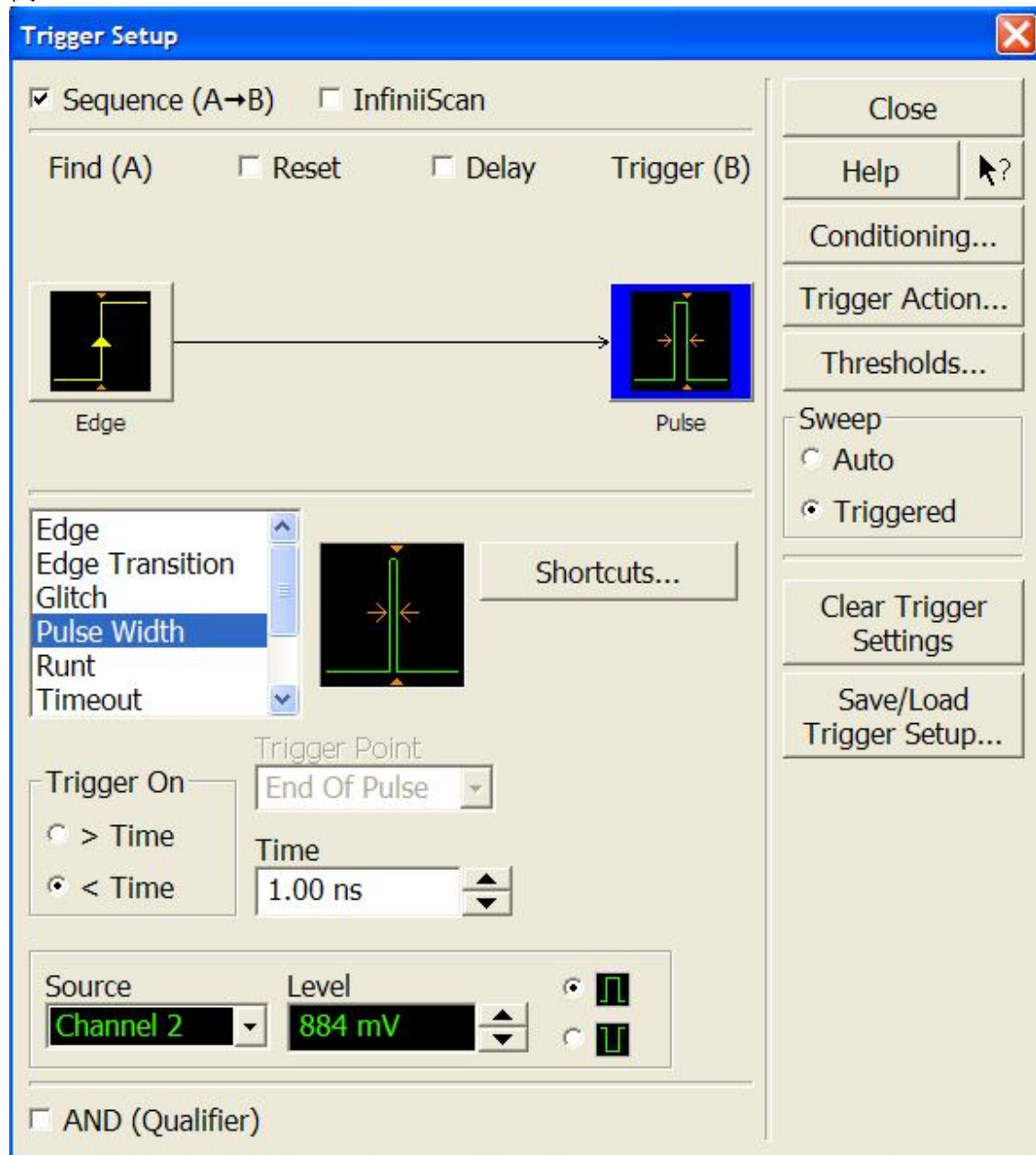


圖 1. 序列觸發

軟體觸發

示波器最常使用的觸發是硬體觸發。在此情況下，即使最罕見的觸發事件也能捕捉得到，因為觸發會採即時處理的方式。但也有些事件太過複雜，而無法利用硬體來捕捉。爲了在這些事件上觸發，可以一併使用軟體觸發（例如安捷倫 Infiniium 示波器的 InfiniiScan 技術）與硬體觸發。每當發生硬體觸發事件時，軟體就會搜尋該事件的擷取軌跡，一旦發現軌跡，示波器就會進行觸發。這種觸發方式雖然強大，卻無法即時進行，對經常發生的事件而言並不成問題，但對偶發事件來說問題可大了。在這種情況下，軟體觸發很可能會漏掉大部分的偶發事件，而示波器也需要花很長的時間來進行觸發。即便如此，就算花幾分鐘的時間，讓示波器自動發現事件也比根本未發現所要的事件好得多。

觸發策略

觸發以顯示波形

這顯然是最簡單的情況，因為使用的是自動觸發。設定此觸發最容易的方法，就是按下示波器面板上的“Autoscale”鍵，這是在示波器上顯示波形最快的方法。在許多情況下，這已足以瞭解實際發生的事。

觸發以除錯類比問題

如果簡單的觸發無法顯示問題，下一種方法就是找尋簡單的類比問題。在此情況下可嘗試的觸發模式包括突波、最窄脈衝、上升時間與下降時間，它們可涵蓋最常見的類比問題。或者您也可以使用設定與保持時間觸發，以確定設定與保持時間問題並非主要肇因。

此時示波器必須使用標準的重複模式來執行。（在大多數的示波器上，這就叫做“Run”）。

有些類比問題只能使用軟體觸發來偵測，例如非單調性信號緣（non-monotonic edges）。這時必須確定硬體觸發所設定的信號緣和斜率與軟體觸發的相同。當硬體觸發設定錯誤時，可能會讓使用者誤以爲觸發並未發生。

如果您注意到某個波形在示波器上顯示的時間非常短暫，可以考慮使用軟體觸發的範圍（zone）模式來進行觸發。使用範圍觸發時可以將某個格線範圍指定爲“必須交會”（must intersect），那麼除非波形越過該範圍，否則示波器將不會觸發。您也可以設定“不可交會”（must not intersect）的範圍，以排除不想查看的波形部分。

這時不妨將示波器設爲已觸發（triggered）模式，讓示波器只要未發現事件就不觸發。這也表示此特殊問題並未發生，可以排除它成爲問題原因的可能性，因此算是一個消去（elimination）的過程。

觸發以除錯軟體或 FPGA 問題

在前面兩種情況中，示波器希望對特定的類比問題進行觸發。但很多時候（例如要除錯軟體或 FPGA 問題時）針對問題進行觸發並不是主要的目的，反而追蹤波形以發現邏輯，而非類比問題，才更重要。

此時設定示波器使用深度記憶體，並在單擊模式下運作至為重要（在安捷倫的示波器上，需按“Single”鍵而非“Run”鍵）。深度記憶體可讓您擷取儲存最大數量的波形，並提供您捕捉到問題的最佳機會。大多數的示波器只要轉動 Time per Division 旋鈕就會自動設定記憶體深度，但您也可以利用手動的方式來設定。在安捷倫 Infiniium 示波器中，可於“Acquisition”功能表下找到該設定值。

觸發事件必須設定為在您想要的範圍內所發生的已知事件。最常見的選項包括脈衝、數位碼型和串列觸發。其中以脈衝觸發最為簡單，因為它僅指定脈衝的長度。碼型和串列觸發則比較特殊，因為可以讓使用者指定值。舉例來說，常見的串列觸發是對一個特定位址的寫入（write）操作。當找到想要的事件時，必須追蹤軌跡直到發現問題的來源。以串列匯流排來說，開啓資料的串列解碼會很有幫助。這麼做不只可以顯示類比波形，還能將波形當作封包解譯，在資料的追蹤上會變得更為容易。

結語

觸發是示波器很強大的一項功能，但使用者通常必須跨越一些簡單的界限。關鍵在於瞭解使用者是要找尋類比問題或追蹤邏輯問題。示波器在這兩個部分都可提供優異的功能，端視使用者是否運用正確的策略。