

ECG 低頻響應脈衝測試

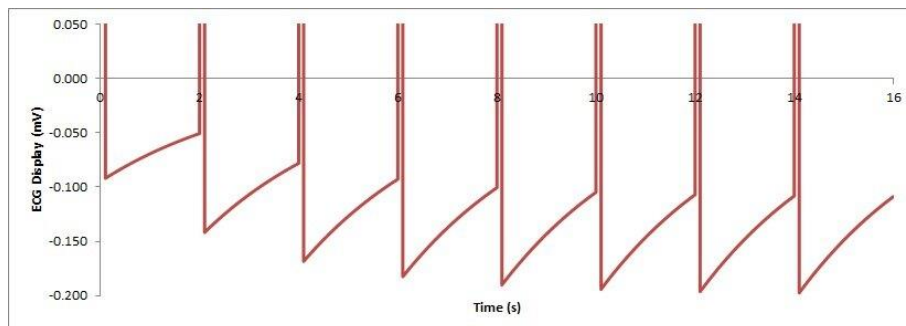
最近 Draeger 的 Derek Qin 提到，在 MEDTEQ [ECG 濾波器文章](#)的結尾，描述了 3mV/100ms 脈衝波對 0.05Hz 高通濾波器的影響，後脈衝斜率較像是 29 μ V，而非文章中所敘述的 291 μ V。

事實證明 Derek 是正確的，正確的答案是 29 μ V/s，但是這個看似簡單的測試，背後卻代表著許多資訊。

順帶一提，這個錯誤已經由兩種不同的方法來檢查：一種是通過 excel 逐步模擬，另一種是採用簡單的數學方法來計算指數衰減和導數。兩者都有不同誤差，且兩種誤差偶然都達到 $\sim$ 291 μ V/s。

但這不僅是罕見的雙重錯誤，與實際測試結果相比，29 μ V/s 是個極低的數值 – 測試限制是 300 μ V/s，但實際結果卻又小於 10%？因此，偏差依舊存在於這個問題。實際上，在 10 年後解決此問題時，作者確信是 29 μ V/s，之後回復到 291 μ V/s，最終還是回到 29 μ V/s。這仍然無法解釋實際測試結果的差異，或是為何這個測試有這麼高的限制。

在討論了一些想法後，Derek 指出我的原始計算是基於獨立的單一單極性脈衝。在一連串脈衝（脈衝序列）的情況下，由於波形向下移動來調適 DC 偏移，導致結果大不相同，相對於 DC 等級會大幅度增加過衝的絕對值，這反而增加了衰減的斜率。仔細查看下圖可看出這一點：



以 0.5Hz (30bpm) 重複的 3mV/100ms 脈衝序列不斷擴大，可以看到基線附近的影響，而最後一個脈衝的斜率明顯不同於第一個脈衝的斜率。

事實證明，在脈衝序列的情況下，結果將取決於：

- (a) 脈衝頻率（脈衝重複率）
- (b) 測試運行的時間（序列中的哪個脈衝），以及
- (c) 模擬器的偏移量

顯然這並不直觀，因此讓我們從一個單極性 3mV/100ms 脈沖開始重新進行計算（對於那些對數學不感興趣的人，請直接跳到結論）：

過衝 (Overshoot)：剛開始的 3mV 正沿無失真地通過高通濾波器，然後根據時間常數 $\tau=2\pi f=3.18s$ 開始衰減。100ms 之後的衰減為 $D = A (1 - \exp(-t/\tau)) = 3mV \times (1 - \exp(-0.1/3.18)) = 0.093mV = 93\mu V$ 。脈衝末尾的 3mV 負沿也通過濾波器。由於波形衰減了 93 μV ，因此該衰減值直接顯示為過衝。

斜率 (Slope)：使用過衝作為起始振幅 A，從指數衰減的導數計算出斜率：

$$S = -A/\tau = -92.87\mu V / 3.183s = +29\mu V/s$$

現在，讓我們看一下脈衝序列，首先使用 1Hz 頻率（60bpm），該頻率已被設為固定。0.05Hz 濾波器的時間常數為 3.18s，因此在直流偏移發生後穩定大約需要 15s 至 20s（15s = 1% 誤差，20s = 0.2% 誤差）。以 1Hz 重複的 3mV/100ms 脈衝加上 0.3mV 的初始 DC 偏移，最終穩定的 DC 電平最大為 +2.7mV，最小為 -0.3mV 的波形。然後，我們可以使用上述方法重新計算，並使用已確定的值：

$$\text{過衝 (Overshoot) : } D = A (1 - \exp(-t/\tau)) = 2.7mV \times (1 - \exp(-0.1/3.18)) = 0.0825mV = 83.5\mu V$$

斜率 (Slope)：新的斜率是根據過衝和 -0.3mV（-300 μV ）偏移量（這是穩定波形的最小值）所計算得出的。因此：

$$S = -A/\tau = -(-300-83.5)\mu V / 3.183s = +121\mu V/s.$$

我們可以發現過衝僅受到輕微影響，但斜率卻大不相同。這就解釋了為什麼實際結果與預測單一脈衝的 29 $\mu V/s$ 有很大不同。

結果明顯受到脈衝頻率的影響，因為這會影響穩定波形的最大值/最小值。例如，一個 0.5Hz（30bpm）的脈衝序列穩定值範圍為 +2.85 / -0.15mV，而 2Hz（120bpm）穩定值範圍為 2.4 / -0.6mV。

如果波形不固定，則取決於使用哪個脈衝。工程師可能會隨機選擇第 5 個脈衝進行測試，然後再次運行測試並選擇第 12 個脈衝，最後想不通為何測試結果不同。因此，測試後應先停留 20s 確保測試穩定後，才可確認測試結果的一致性。測試時應至少測試 20 秒，讓 ECG 波形穩定下來，才可確保結果一致。

但這還不是全部，ECG 模擬器可能會使用 -50% 的偏移量，這可以有效地加倍模擬器的脈衝波波形範圍（如 SECG 所用）。模擬器可以使用 +1.5mV/100ms，-1.5mV/900ms，而非使用 3mV/100ms 及 0mV/900ms 做脈衝波輸出。在波形穩定時，該初始偏移會極大地影響結果，甚至可能超過前幾個脈衝的 300 $\mu V/s$ 極限。同樣，如果允許 20 秒鐘的測試，則這種影響會消除。

事實證明，此問題會影響 ECG 濾波器為 0.05Hz 時，所有 ECG 測試中包含直流偏移的測試波形，像是 200/20ms 測試和 CAL20160 波形。我們將會需要更多的工作來模擬這些波形並確定影響的程度，但與此同時，這些測試須持續至少 20 秒穩定，並固定測試頻率。

結論

根據以上分析，所有關於 0.05Hz 濾波器的測試應為：

- 允許測試 20 秒，可讓待測物波形穩定下來
- 如果未指定測試頻率，則以 1Hz 進行測試，或至少以測試報告中包含的測試頻率進行重複測試

理想情況下，未來將發行的 ECG 標準版本應包括所有測試的穩定時間和測試頻率。

如果以上分析中仍然有錯誤，請隨時告知。

(此篇測試技術應用文章已取得 MEDTEQ 同意轉載)

Contact WhaleTeq
+886 (2) 2596 0701
service@whaleteq.com