

ECG 低频响应脉冲测试

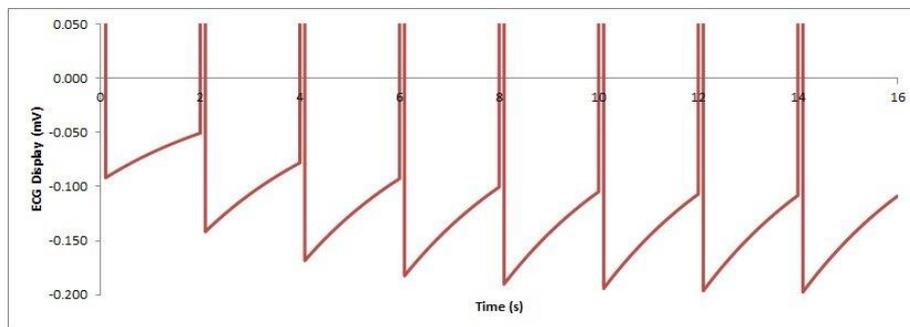
最近 Draeger 的 Derek Qin 提到，在 MEDTEQ [ECG 滤波器文章](#) 的结尾，描述了 3mV/100ms 脉冲波对 0.05Hz 高通滤波器的影响，后脉冲斜率较像是 29 μ V，而非文章中所叙述的 291 μ V。

事实证明 Derek 是正确的，正确的答案是 29 μ V/s，但是这个看似简单的测试，背后却代表着许多信息。

顺带一提，这个错误已经由两种不同的方法来检查：一种是通过 excel 逐步模拟，另一种是采用简单的数学方法来计算指数衰减和导数。两者都有不同误差，且两种误差偶然都达到~291 μ V/s。

但这不仅是罕见的双重错误，与实际测试结果相比，29 μ V/s 是个极低的数值 – 测试限制是 300 μ V/s，但实际结果却又小于 10%？因此，偏差依旧存在于这个问题。实际上，在 10 年后解决此问题时，作者确信是 29 μ V/s，之后回复到 291 μ V/s，最终还是回到 29 μ V/s。这仍然无法解释实际测试结果的差异，或是为何这个测试有这么高的限制。

在讨论了一些想法后，Derek 指出我的原始计算是基于独立的单一单极性脉冲。在一连串脉冲（脉冲序列）的情况下，由于波形向下移动来调适 DC 偏移，导致结果大不相同，相对于 DC 等级会大幅度增加过冲的绝对值，这反而增加了衰减的斜率。仔细查看下图可看出这一点：



以 0.5Hz (30bpm) 重复的 3mV/100ms 脉冲序列不断扩大，可以看到基线附近的影响，而最后一个脉冲的斜率明显不同于第一个脉冲的斜率。

事实证明，在脉冲序列的情况下，结果将取决于：

- (a) 脉冲频率（脉冲重复率）
- (b) 测试运行的时间（序列中的哪个脉冲），以及
- (c) 模拟器的偏移量

显然这并不直观，因此让我们从一个单极性 3mV/100ms 脉冲开始重新进行计算（对于那些对数学不感兴趣的人，请直接跳到结论）：

过冲 (Overshoot)：刚开始的 3mV 正沿无失真地通过高通滤波器，然后根据时间常数 $\tau=2\pi f=3.18s$ 开始衰减。100ms 之后的衰减为 $D = A (1 - \exp(-t/\tau)) = 3mV \times (1 - \exp(-0.1/3.18)) = 0.093mV = 93\mu V$ 。脉冲末尾的 3mV 负沿也通过滤波器。由于波形衰减了 93 μV ，因此该衰减值直接显示为过冲。

斜率 (Slope)：使用过冲作为起始振幅 A，从指数衰减的导数计算出斜率：

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

现在，让我们看一下脉冲序列，首先使用 1Hz 频率（60bpm），该频率已被设为固定。0.05Hz 滤波器的时间常数为 3.18s，因此在直流偏移发生后稳定大约需要 15s 至 20s（15s = 1% 误差，20s = 0.2% 误差）。以 1Hz 重复的 3mV/100ms 脉冲加上 0.3mV 的初始 DC 偏移，最终稳定的 DC 电平最大为 +2.7mV，最小为 -0.3mV 的波形。然后，我们可以使用上述方法重新计算，并使用已确定的值：

过冲 (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)：新的斜率是根据过冲和 -0.3mV (-300 μV) 偏移量（这是稳定波形的最小值）所计算得出的。因此：

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

我们可以发现过冲仅受到轻微影响，但斜率却大不相同。这就解释了为什么实际结果与预测单一脉冲的 29 $\mu V/s$ 有很大不同。

结果明显受到脉冲频率的影响，因为这会影响稳定波形的最大值/最小值。例如，一个 0.5Hz（30bpm）的脉冲序列稳定值范围为 +2.85 / -0.15mV，而 2Hz（120bpm）稳定值范围为 2.4 / -0.6mV。

如果波形不固定，则取决于使用哪个脉冲。工程师可能会随机选择第 5 个脉冲进行测试，然后再次运行测试并选择第 12 个脉冲，最后想不通为何测试结果不同。因此，测试后应先停留 20s 确保测试稳定后，才可确认测试结果的一致性。测试时应至少测试 20 秒，让 ECG 波形稳定下来，才可确保结果一致。

但这还不是全部，ECG 模拟器可能会使用 -50% 的偏移量，这可以有效地加倍模拟器的脉冲波波形范围（如 SECG 所用）。模拟器可以使用 +1.5mV/100ms，-1.5mV/900ms，而非使用 3mV/100ms 及 0mV/900ms 做脉冲波输出。在波形稳定时，该初始偏移会极大地影响结果，甚至可能超过前几个脉冲的 300 $\mu V/s$ 极限。同样，如果允许 20 秒钟的测试，则这种影响会消除。



事实证明，此问题会影响 ECG 滤波器为 0.05Hz 时，所有 ECG 测试中包含直流偏移的测试波形，像是 200/20ms 测试和 CAL20160 波形。我们将会需要更多的工作来模拟这些波形并确定影响的程度，但与此同时，这些测试须持续至少 20 秒稳定，并固定测试频率。

结论

根据以上分析，所有关于 0.05Hz 滤波器的测试应为：

- 允许测试 20 秒，可让待测物波形稳定下来
- 如果未指定测试频率，则以 1Hz 进行测试，或至少以测试报告中包含的测试频率进行重复测试

理想情况下，未来将发行的 ECG 标准版本应包括所有测试的稳定时间和测试频率。

如果以上分析中仍然有错误，请随时告知。

(此篇测试技术应用文章已取得 **MEDTEQ** 同意转载)

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