

輸入阻抗的測試原理與方法

前言

輸入阻抗是影響心電圖機精準度的重要規格，也因此每台心電圖機都必須測試輸入阻抗。本篇會介紹輸入阻抗的原理，並以實例算出心電圖機輸入阻抗的數值；此外，輸入阻抗與 CMRR 也有關聯，在此也會加以說明。

輸入阻抗測試原理

從電路學的角度來看人體組成，可將人體模擬成等效的電阻、電容電路；而輸入阻抗的測試目的，便是當心電圖機透過電極接觸到人體時，可以將最大的電壓耦合心電圖機，進而確保心電圖機的測量精準度。

輸入阻抗測試的原理是將信號源信號直接輸出到心電圖機，然後測量心電圖機上對應導聯波形的電壓 V ，接下來在信號源和心電圖機間經過一組並聯線路($620\text{ K}\Omega$ 並聯 47 nF)，再測量心電圖機上對應導聯波形的電壓 V_i 。在 IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139)中，輸入阻抗的要求為至少 $2.5\text{ M}\Omega$ 。 V_i 和 V 的電壓差異要在 20%以內；而 IEC60601-2-47 (YY 0885)中則要求，輸入阻抗至少要 $10\text{ M}\Omega$ ，因此要求 V_i 和 V 的電壓差異要在 6%以內。



圖 1、測試線路示意圖 (未加並聯線路)， V 是心電圖機上對應導聯波形的電壓

圖 1 為未加測試輸入阻抗並聯線路的示意圖；圖中左側有一測試訊號源，其電壓大小為 V ，在不加並聯線路時，假設心電圖機上對應導聯波形的電壓測量值也是 V 。

下圖為加入並聯線路示意圖。其中間加了 620 K Ω 電阻並聯 4.7 nF 電容的並聯線路，在加入並聯線路後，假設心電圖機上對應導聯波形的電壓測量值變為 V_i 。

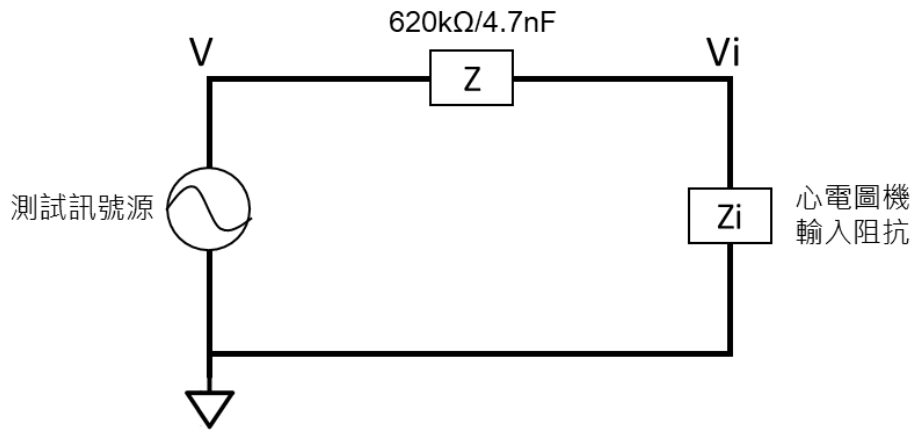


圖 2、測試線路示意圖 (加入並聯線路)， V_i 是心電圖機上對應導聯波形的電壓

依據分壓原理:

$$V_i = \frac{Z_i}{Z + Z_i} * V \rightarrow V_i * (Z + Z_i) = Z_i * V \rightarrow V_i * Z = Z_i * (V - V_i)$$

故可得 Z_i 與 Z 的關係式：

$$Z_i = \frac{V_i}{V - V_i} * Z \text{ ----- (1)}$$

接下來將說明如何從(1)式推得標準要求的 2.5 M Ω 跟 10 M Ω 。在 IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139)中， V_i 和 V 的電壓差要在 20%以內，也就是 $V_i/V \geq 80\% = 0.8$ ，將 $V_i \geq 0.8V$ 代入(1)式中得 $Z_i \geq 4Z$ ， Z 為 620 K Ω 電阻並聯 4.7 nF 電容。

在實際狀況中， Z 含有 4.7nF 電容， Z_i 含有電極線的電容，兩者的容抗皆會隨著頻率而變化，也因此標準要求測試 0.67Hz 及 40Hz 兩個頻率；若是以純阻抗來表示輸入阻抗，因此忽略 Z 與 Z_i 的容抗，則輸入阻抗 $Z_i \geq 4Z = 4 * 620 \text{ K}\Omega = 2480 \text{ K}\Omega \sim 2.5 \text{ M}\Omega$ ；此結果與 IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139)要求相符。

IEC60601-2-47 (YY 0885) 則要求 V_i 和 V 的電壓差異要在 6%以內，也就是 $V_i/V \geq 94\% = 0.94$ ，將 $V_i \geq 0.94V$ 代入(1)式中得 $Z_i \geq 15.6Z = 15.6 * 620 \text{ K}\Omega = 9713 \text{ K}\Omega \sim 10 \text{ M}\Omega$ ，此結果與 IEC60601-2-47 (YY 0885)要求的相符。

輸入阻抗測試方法

1. 測試環境設置

開始測試前，需先將測試環境架設好；由於環境中的市電頻率(50/60 Hz)雜訊會透過輻射或大地的迴路來干擾測試，因此如何避免這些雜訊影響測試結果，是測試前重要的準備工作。圖 3 是使用鯨揚科技的單道測試儀“SECG 4.0”來測試一台 12 導心電圖機的測試系統圖。

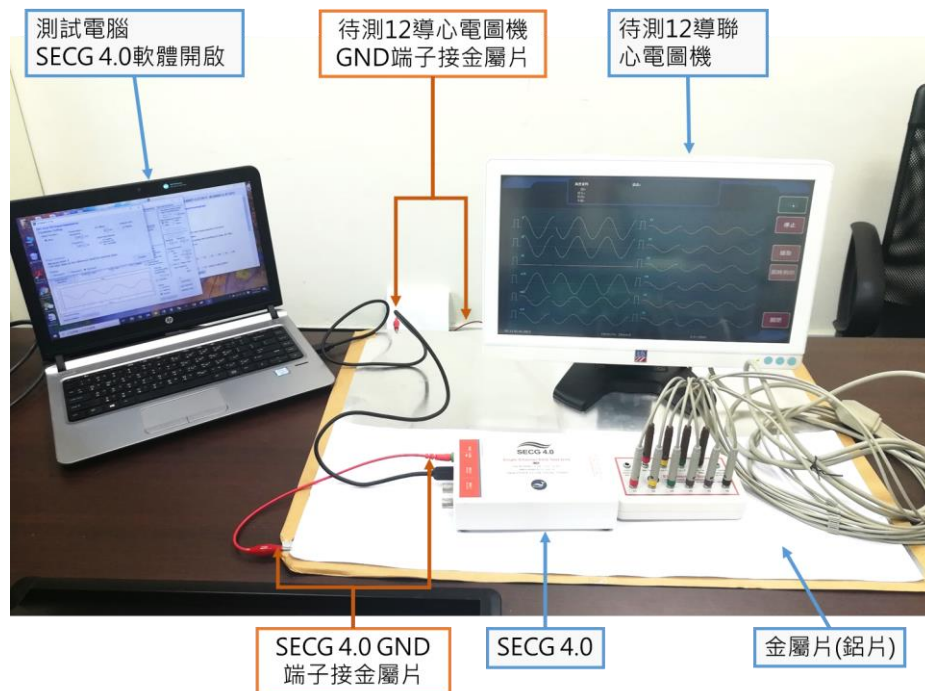


圖 3、測試系統圖

測試時，首先需注意 SECG 4.0 及待測設備是否共地。建議做法便是將整個測試系統(包含 SECG4.0 及待測設備)共地到一片獨立(不可接其他系統的地或大地)的金屬板上，此金屬板建議大小為 60cm X 100cm(或更大)；此做法有以下三個優點：(1) 整個測試系統共地 (2) 測試系統與其他系統地雜訊隔離 (3) 金屬板會吸收測試系統雜訊的能量。若待測設備沒有可接出的地線，這時待測設備輸入端為浮接(floating)的狀態；此時可以讓 SECG 4.0 地線單獨接至金屬板上。

圖中的測試電腦經過變壓器連接至插座上，此時若將電腦直接放置至金屬板上，市電雜訊便會進入測試系統，也因此測試電腦需放置至金屬板外，僅以 USB 連接至 SECG 4.0(或待測設備)上，以免影響測試結果。

2. 輸入阻抗測試實例

以下為 IEC60601-2-25 (YY 0782)的測試實例及其步驟：

- (1) 架設好測試環境後，開啟 SECG 4.0 測試軟體
- (2) 選擇正弦波 (3 mV, 0.67 Hz),
- (3) 輸出訊號至 RA 上，量測導聯 II 輸出電壓為 $V_{ref} = 2.5 \text{ mV}$ ，如圖 4

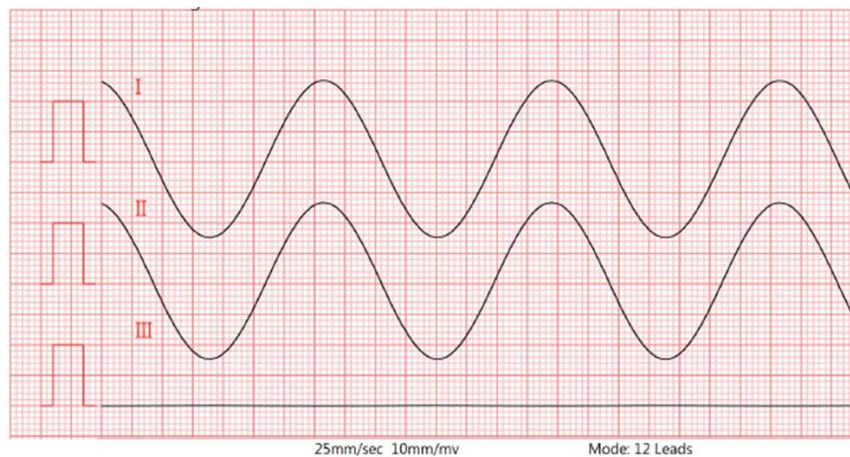


圖 4、導聯 II 波形 (未加 620 k Ω /4.7 nF)

- (4) 加入並聯電路 620 K Ω /4.7 nF
- (5) 設定直流偏壓為 300 mV，然後測量導聯 II 輸出電壓 $V_{pp} = 2.4 \text{ mV}$ (下段詳細說明)，如圖 5

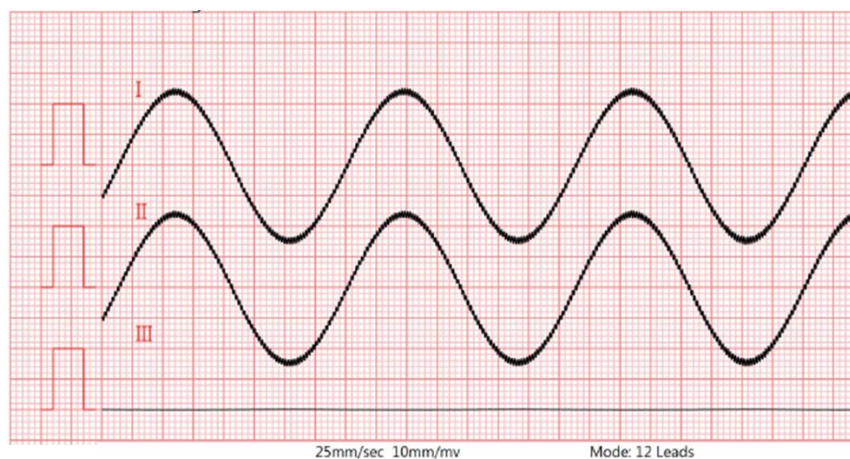


圖 5、導聯 II 波形 (加 620 k Ω /4.7 nF 及 300 mV 直流偏壓)

- (6) 設定直流偏壓為 -300 mV，然後測量導聯 II 輸出電壓 $V_{pp} = 2.4$ mV，如圖 6

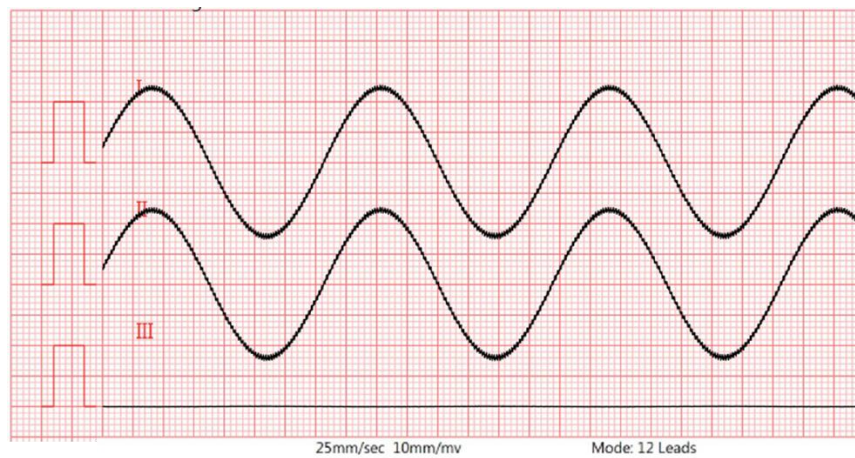


圖 6、導聯 II 波形(加 620 k Ω /4.7 nF 及 -300 mV 直流偏壓)

- (7) 調整輸出頻率為 40Hz (正弦波, 3 mV, 40 Hz)
- (8) 量測導聯 II 輸出電壓為 $V_{ref} = 2.8$ mV，如圖 7

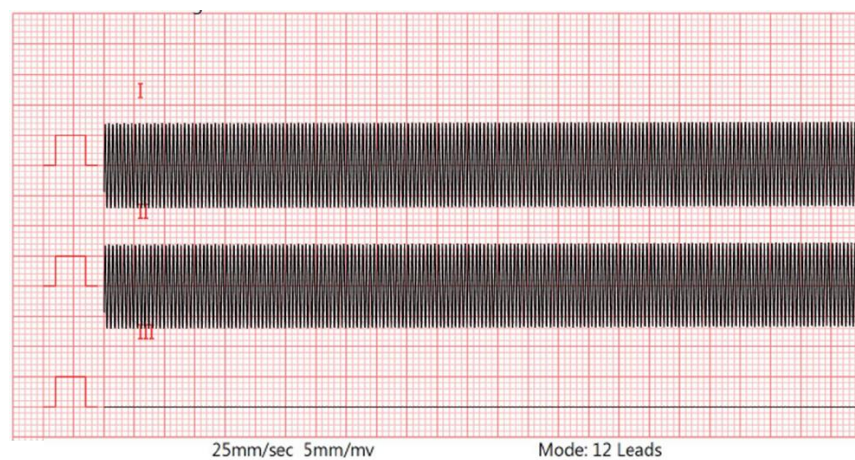


圖 7、導聯 II 波形 (40 Hz, 未加 620 k Ω /4.7 nF)

- (9) 加入並聯電路 620 K Ω /4.7 nF

(10) 設定直流偏壓為 300 mV，然後測量導聯 II 輸出電壓 $V_{pp} = 2.5$ mV，如圖 8

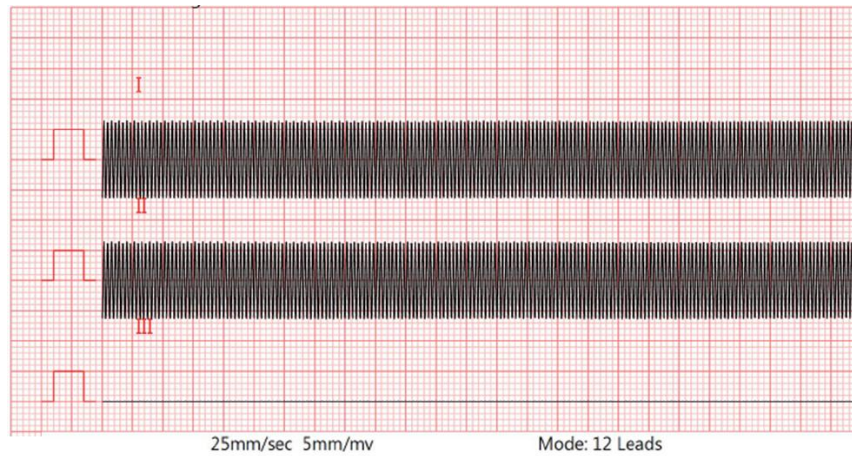


圖 8、導聯 II 波形 (40 Hz, 加 620 k Ω /4.7 nF 及 300 mV 直流偏壓)

(11) 設定直流偏壓為 -300 mV，然後測量導聯 II 輸出電壓 $V_{pp} = 2.5$ mV

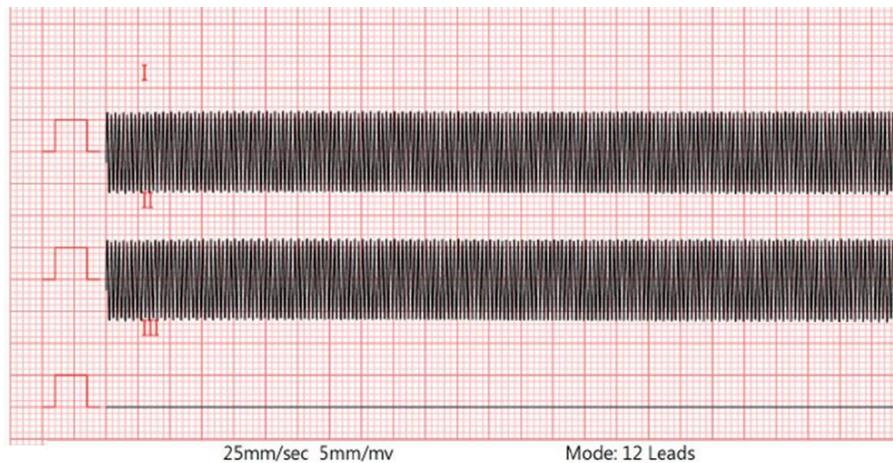


圖 9、導聯 II 波形 (40 Hz, 加 620 k Ω /4.7 nF 及 -300 mV 直流偏壓)

(12) 重複步驟 3 至步驟 11，但依次調整輸出電極為 LA/LL/V1~V6，對應的量測導聯為導聯 I/II/III/V1~V6

3. 計算心電圖機的輸入阻抗

由圖 4 到圖 9，可以算出不同頻率時心電圖機輸入阻抗的估計值。

(1) 在 0.67Hz 時：

圖 4 為待測心電圖機在 3 mV, 0.67 Hz 正弦波的測試結果，取其導聯 II 為 $V_{ref} = 2.5$ mV。圖 5、圖 6 分別為加入並聯電路及 +300mV、-300mV 的測試結果，導聯 II 為 $V_{pp} = 2.4$ mV。

若仔細觀測圖 5 的波形，可以看到 0.67 Hz 正弦波上有一個 60 Hz 的干擾雜訊，這是由於加入 620 K $\Omega/4.7$ nF 並聯電路後造成心電圖機不平衡的輸入，因而環境的 60 Hz 雜訊被心電圖機引入，放大顯示出來，要減小外界環境的 60 Hz 干擾雜訊必須確實接上金屬片，或增加心電圖機的 CMRR 值，這點會在後面再詳細討論。

若是雜訊無法完全消除，Vpp 值的計算就必須避開雜訊的影響，圖 10 中需要取上下雜訊的平均值後再計算 Vpp 值，因此 Vpp = 2.4 mV，而不是 2.55 mV。相同的方法用在圖 8 的 40 Hz 信號上。

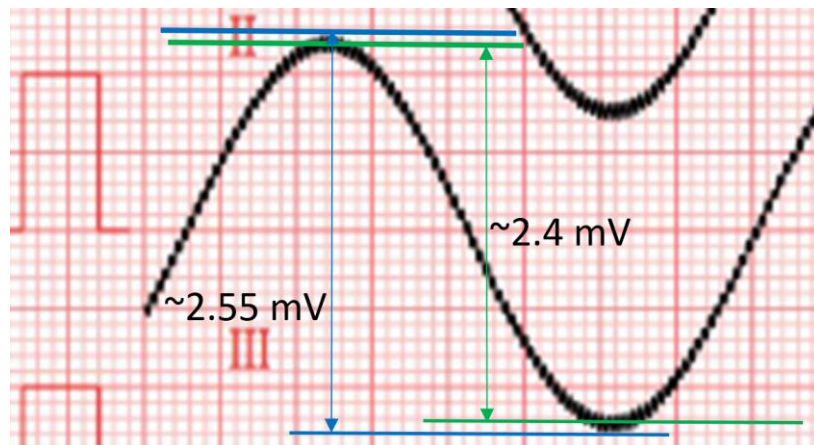


圖 10、加並聯電路產生的 60 Hz 干擾雜訊，
需要取上下雜訊的平均值後再計算 Vpp 值

由(1)式

$$Z_i = \frac{V_i}{V - V_i} * Z = \frac{2.4}{2.5 - 2.4} * 620k\Omega = 14880k\Omega = 14.88M\Omega$$

輸入阻抗約為 14.88M Ω

(2) 在 40Hz 時：

圖 7 為待測心電圖機在 3 mV, 40 Hz 正弦波的測試結果，取其導聯 II 電壓為 Vref=2.8 mV。圖 8、圖 9 分別為加入並聯電路及 +300 mV、-300 mV 的測試結果，其導聯 II 為 Vpp=2.5 mV。

由(1)式

$$Z_i = \frac{V_i}{V - V_i} * Z = \frac{2.5}{2.8 - 2.5} * 620k\Omega = 5166k\Omega = 5.16M\Omega$$

輸入阻抗約為 5.16M Ω

輸入阻抗與 CMRR 的關聯

CMRR (共模抑制比, Common Mode Rejection Ratio) 為抑制 50/60 Hz 環境雜訊的能力。在 CMRR 不平衡測試中, 會加入 51 K Ω 並聯 47 nF 來模擬電極皮膚阻抗線路, 且在加入此並聯電路後 CMRR 測試結果仍需符合標準要求; 620 K Ω /4.7 nF 並聯電路的加入會和 CMRR 不平衡測試結果相似, 因此心電圖機的 CMRR 值越優, 加入 620 K Ω /4.7 nF 並聯電路測試輸入阻抗時 50/60 Hz 雜訊的干擾越小。

在 CMRR 不平衡測試中, 加入並聯阻抗後差異越小, 代表心電圖機抑制 50/60 Hz 環境雜訊越好; 在輸入阻抗測試中, 加入並聯阻抗後差異越小代表心電圖機輸入阻抗越大, 越能完整地將測試信號耦合輸入心電圖機。因此, CMRR 不平衡測試時值越優, 測試輸入阻抗時受到的干擾越小。

結語

心電圖設備中輸入阻抗的規格, 影響到實際測試人體時的電壓精準度, 心電圖機的輸入阻抗越高測試時所受的人體影響越小; 此外, 相同心電設備在不同頻率其輸入阻抗會不同, 因此標準會在不同頻率下測試輸入阻抗。另外, CMRR 與輸入阻抗的相關聯, 也造成輸入阻抗較好, CMRR 通常也較好。

SECG 4.0 是一台可以完全符合各類心電標準要求的性能測試儀器 (CMRR 和系統雜訊除外), 除了標準訊號源外還包含了 620 K Ω /4.7 nF 並聯電路和 ± 300 mV 直流電壓的疊加線路, 使得輸入阻抗的測試更方便和準確。

參考資料:

1. IEC 醫療專用標準 IEC60601-2-25:2011, IEC60601-2-27:2011, IEC60601-2-47:2012。
2. 中國心電標準 YY0782-2010, YY1079-2008, YY0885-2013, YY1139-2013。
3. 鯨揚科技 Application Note: "CMRR 測試原理和方法"。