

## CMRR 測試原理和方法

### 前言

使用心電圖機測量待測者的心電圖時，常會因為待測者身上的市電訊號干擾，造成心電圖上的 50/60 Hz 雜訊增加，這可能會影響醫生正確判讀心電圖波形所代表的心臟疾病。因此如何在市電干擾嚴重的環境下，正確無誤的測量心電圖，實在是一個嚴峻的挑戰。

另外，在不同身體位置可能會存在不同的直流電壓差，兩位置間(例如：左手、右手間)的直流電壓差可達 300 mV、甚至 1000 mV。而心電訊號的電壓範圍一般介於 0.5 mV 到 3 mV 之間，因此如何避免這些數百 mV 的 DC 訊號干擾正常心電訊號，又是另一種挑戰。

醫療測試標準中，共模抑制比 CMRR (Common Mode Rejection Ratio) 的測試目的，就是為了確保心電圖機在上述的 50/60 Hz 干擾和 DC 偏移的情形下，仍然可以正常的顯示心電圖，以利醫生做正確的判讀。接下來將詳細介紹 CMRR 測試的原理和方法。

### CMRR 測試原理

#### 1. 測試線路:

依據三個心電圖機測試標準中所規定的測試線路圖，如圖 1:

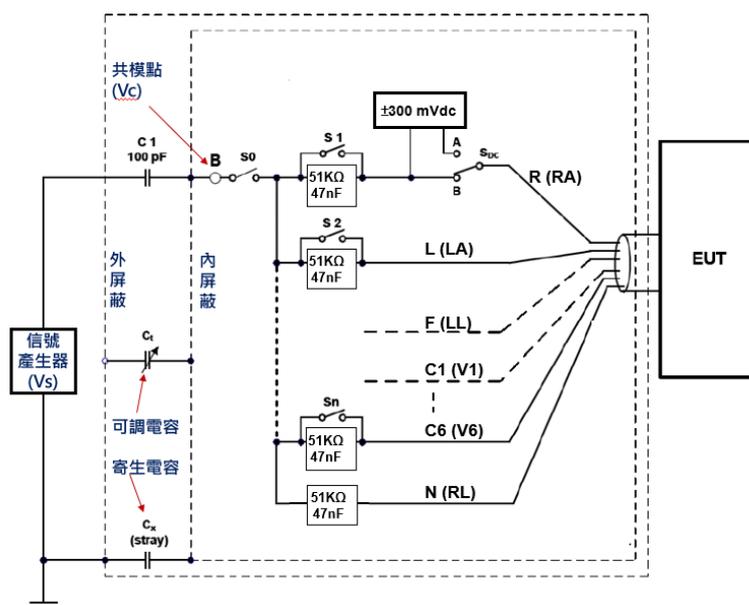


圖 1. CMRR 測試線路圖

圖 1 左側的“信號產生器”產生市電頻率的訊號，其模擬的就是干擾待測者身上的市電訊號，旁邊經過一個由  $C1 \cdot Ct \cdot Cx$  並聯組成的共 200 pF 的線路到 B 點（共模點），這 200 pF 電容模擬的就是人體對地的容抗；圖中兩個封閉虛線，分別代表標準要求的線路金屬內外屏蔽，由於兩塊金屬片之間會有雜散電容  $Cx$ ，並且這個  $Cx$  電容值會隨不同 CMRR 測試設備而不同，因此使用一個可調電容  $Ct$  使得  $Cx+Ct=100$  pF，再加上  $C1$  得 200pF。由於  $C1=100$  pF，和  $Cx+Ct$  的 100 pF 剛好形成一半的分壓，因此  $Ct$  調到適當的值之後，B 點電壓  $Vc$  會剛好是信號產生器輸出電壓  $Vs$  的一半，也就是  $Vc=0.5Vs$ 。

之後是  $S0$  開關，所有 CMRR 測試  $S0$  都是閉合的，只有雜訊電平測試時才打開。 $S0$  開關之後，所有待測心電圖機的電極線都串接一個  $51K\Omega$  並聯  $47nF$  的模擬電極皮膚阻抗線路。除了  $N(RL)$  電極外，由  $S1$  到  $Sn$  開關控制各電極是否串接這個阻抗線路。另外待測電極，圖 1 的例子待測電極是  $R(RA)$  電極，可由  $S_{DC}$  開關控制是否有  $\pm 300$  mV 直流偏置電壓的疊加，此  $\pm 300$  mV 便是在模擬人體不同位置間的直流電壓差。

## 2. 測試重點:

CMRR 的測試，除了 IEC60601-2-47 (中國對應標準：YY 0885) 移動式心電圖機部分要多測兩倍電源頻率外，所有標準中的測試方法幾乎相同，只是測試電壓，串接電極皮膚阻抗線路的方式和通過準則有些差異；另外，測試前，待測裝置的 50/60 Hz 頻率的陷波器(Notch Filter)必須關閉。主要包含了下面 5 個測試的重點:

### 1) 設置信號源電壓 $Vs$ :

心電標準: IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139) 要求  $20$  Vrms 電源頻率信號電壓( $Vs$ )，IEC60601-2-47 (YY 0885) 則要求  $Vs = 8Vp-v$  (2.828Vrms) 電源頻率和  $Vs = 1.422$  Vp-v (0.502Vrms) 兩倍電源頻率。  
腦電標準：IEC60601-2-26 要求  $2$  Vrms 電源頻率信號電壓( $Vs$ )。

### 2) 調整共模電壓 $Vc$ :

在不接任何待測設備電極線的設置下，調整可調電容  $Ct$  直到共模點電壓值( $Vc$ )為電源頻率信號電壓值( $Vs$ )的一半，即  $Vc=0.5Vs$ 。這個步驟主要是確定  $Ct + Cx=100$  pF。

### 3) 平衡測試:

接上待測設備的所有電極線，先做平衡測試，依標準規定設置， $S1$  到  $Sn$  全開或全閉，然後測量心電圖機上所有導聯波形幅度。由於所有電極線設置都相同，故稱為平衡測試。

### 4) 不平衡測試：

依標準規定設置，一次一個開關，逐次開或閉待測電極的  $Sn$  開關，其餘  $Sn$  開關的開閉和待測電極的  $Sn$  開關相反。譬如當  $S1$  開關打開時，其餘  $S2 \sim Sn$  開關閉合， $S1$  開關所連接電極線稱為待測電極線，因為和其他電極線設置不同故稱此測試為不平衡測試。測量所有導聯波形幅度。

## 5) 疊加±300 mV 直流偏置電壓:

在待測電極線上疊加±300 mV 直流偏置電壓，測量所有導聯波形幅度。

所有導聯波形幅度通過的準則: IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139) 不超過 10 mmp-v (1 mVp-v) ·

IEC60601-2-47 (YY 0885) 不超過 4 mVp-v · IEC60601-2-26 不超過 0.1 mVp-v 。

依照上述，那麼多少 dB 的 CMRR 值才能通過標準呢？首先，CMRR dB 值的公式為:

$$\text{CMRR (dB)} = 20 * \log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \text{-----(1)}$$

其中  $V_{out}$  為待測心電圖機上的導聯振幅值， $V_{in}$  為 CMRR 測試儀器的共模電壓  $V_c$ 。以 IEC60601-2-25/27 來說  $V_{out}$  不超過 10 mmp-v (1 mVp-v) ·  $V_{in}$  為共模點的電壓值 10 Vrms，所以通過 IEC60601-2-25/27 所需的 CMRR 值(最大)為：

$$20 * \log\left(\frac{1 \text{ mVp-v}}{10 \text{ Vrms}}\right) = 20 * \log\left(\frac{1 \text{ mVp-v}}{10 * 2\sqrt{2} \text{ Vp-v}}\right) \cong 20 * \log\left(\frac{0.001 \text{ Vp-v}}{28.28 \text{ Vp-v}}\right) \cong -89 \text{ dB}$$

依相同方式推算，IEC60601-2-47 在電源頻率時所需的 CMRR 值為 -60dB，兩倍電源頻率時 CMRR 值為 -45dB；IEC60601-2-26 所需的 CMRR 值則為 -89dB。但由於心電、腦電標準皆需做不平衡測試(上述第 4 項)，此不平衡電路會在差動放大器前產生些微的電壓差，此時原來的共模訊號變成微小的差模訊號，經過差動放大器放大後輸出電壓會比平衡測試時更大些，但仍然要符合標準的要求。

## CMRR 測試方法:

### 1. 測試環境設置

開始測試 CMRR 時，首先要注意的是測試環境；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 2 是使用鯨揚科技的 CMRR 測試儀“CMRR 3.0+”來測試一台 12 導心電圖機的測試系統圖:

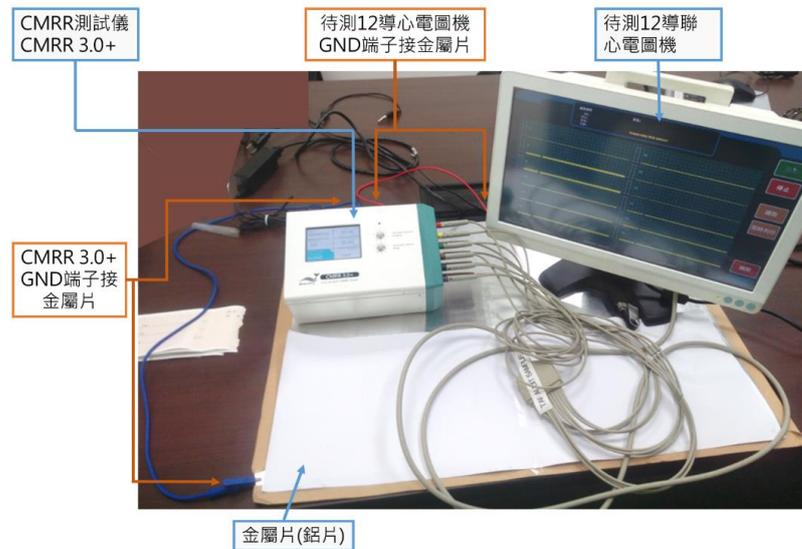


圖 2. CMRR 測試系統圖

測試時，首先需注意 CMRR 3.0+ 及待測設備是否共地。建議做法便是將整個測試系統(包含 CMRR 3.0+ 及待測設備)共地到一片獨立的(不可接其他系統的地或大地)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) 測試系統獨立 (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 CMRR 3.0+ 地線單獨接至金屬板上。

圖 3 為平衡測試 CMRR 3.0+ 和心電圖機都沒有接至金屬板的測試結果。可以看到所有導聯輸出的訊號，因為市電頻率(50/60 Hz)雜訊的干擾，會隨時間做不規則變化，也就是無法確定輸出訊號的大小，因而無法得到確定的結果。

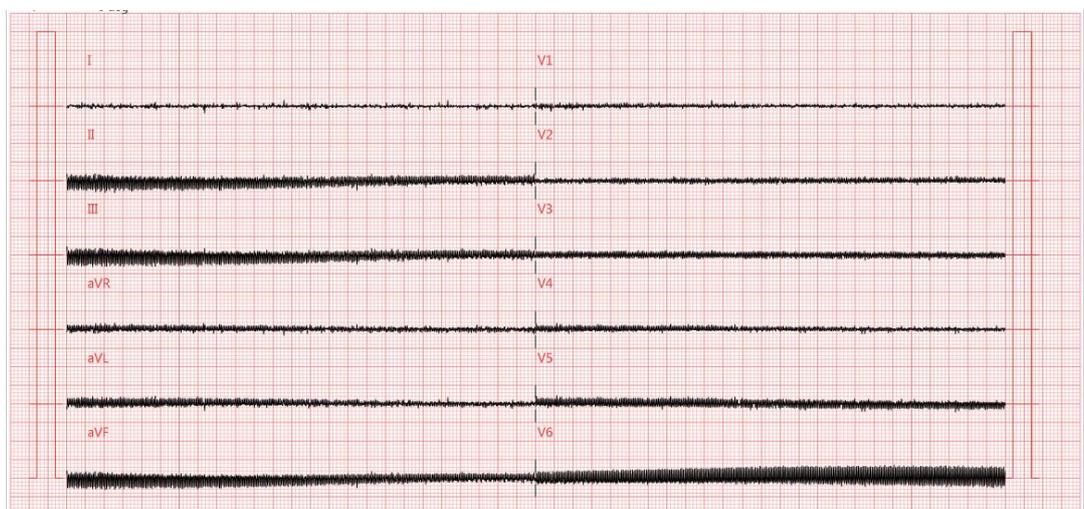


圖 3. 測試系統無共地至金屬板上

## 2. CMRR 測試實例

以下為 IEC60601-2-25/27 的測試實例及其步驟：

1. 關閉待測裝置的 50/60 Hz 頻率的陷波器(Notch Filter)
2. 先不連接所有的電極線到 CMRR 3.0+ 上
3. 設置信號源電壓  $V_s$  · IEC60601-2-25/27 需選擇 Supply Voltage 為 20 Vrms
4. 選擇 Frequency 為 50 或 60 Hz
5. 調整共模電壓  $V_c$ ：調整面板上的 Ct (Adjustable Capacitor) 直到  $V_c$  為~10 Vrms



圖 4. 調整  $V_c$  電壓至  $V_s$  電壓的一半

6. 連接所有電極線到 CMRR 3.0+ 上
7. 平衡測試: 選擇 Electrode with Impedance 為 None (S1 到 Sn 全閉)
8. 調整 DC Offset 為 Off
9. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒 (最大輸出導聯 I ~ 0.1 mm)

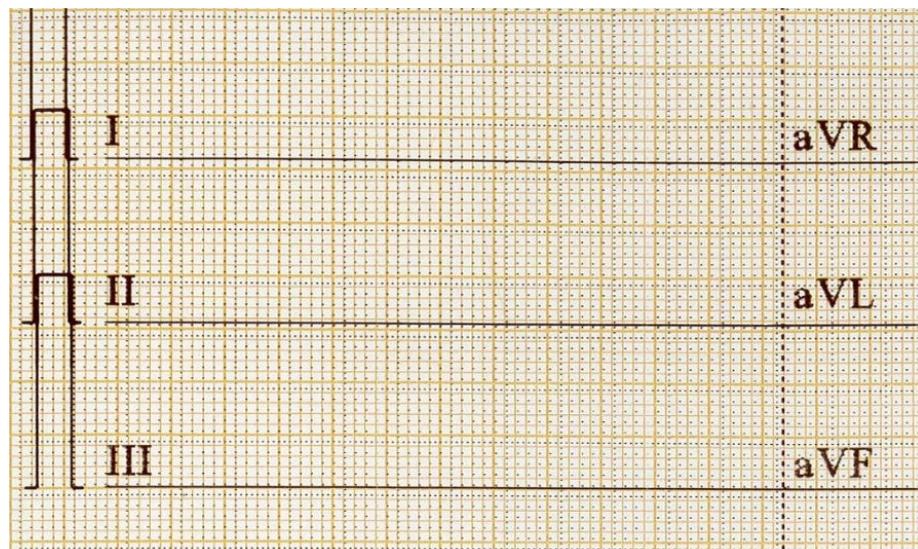


圖 5. 平衡測試結果

10. 不平衡測試: 調整 Electrode with Impedance 為 RA (僅 S1 打開)
11. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒(最大輸出導聯 I = 2 mm)

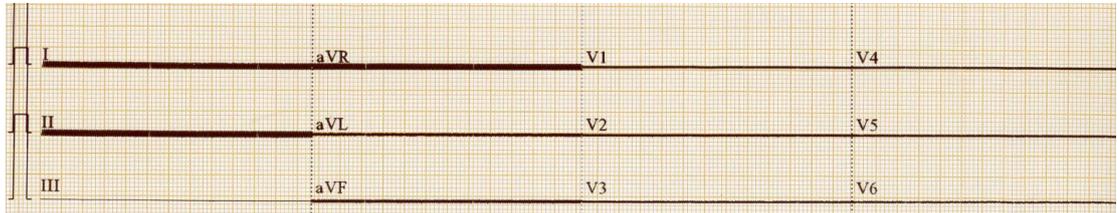


圖 6. RA 不平衡測試結果 (RA 加阻抗)

12. 疊加+300 mV 直流偏置電壓 · 調整 DC Offset 到“+300 RA”
13. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒 (最大輸出導聯 I = 2 mm)

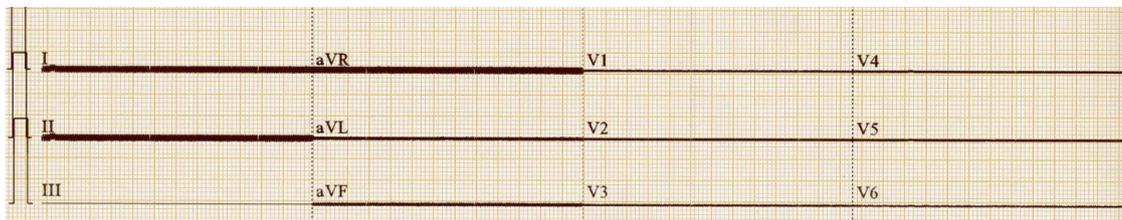


圖 7. RA 不平衡測試疊加+300 mV 直流偏壓

14. 疊加-300 mV 直流偏置電壓 · 調整 DC Offset 到“-300 RA”
15. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒 (最大輸出導聯 I = 2 mm)

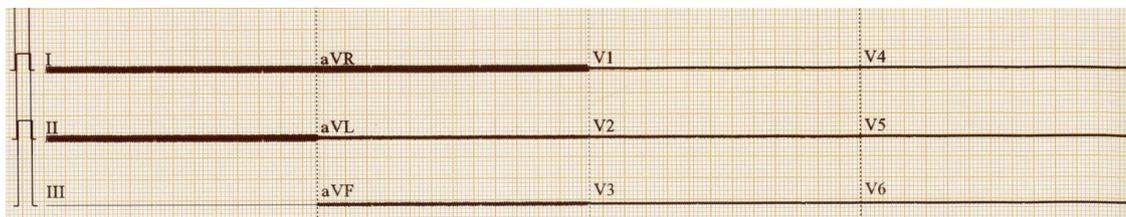


圖 8. RA 不平衡測試疊加-300 mV 直流偏壓

16. 調整 DC Offset 到 Off
17. 調整 Electrode with impedance 到 LA
18. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒 (最大輸出導聯 I = 2.2 mm)

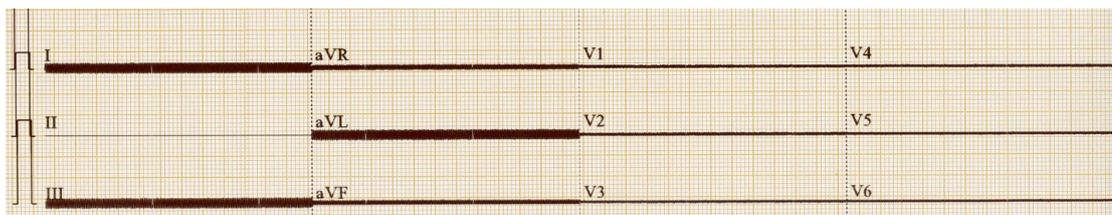


圖 9. LA 不平衡測試結果 (LA 加阻抗)

19. 調整 DC Offset 到“+300 LA”

20. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒 (最大輸出導聯 I = 2.2 mm)

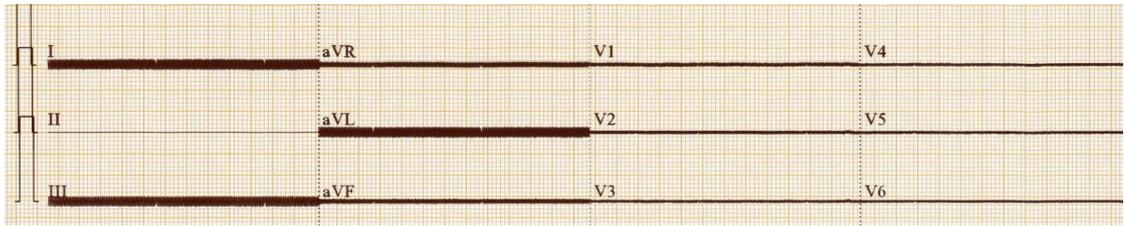


圖 10. LA 不平衡測試疊加+300 mV 直流偏壓

21. 調整 DC Offset 到“-300 LA”  
22. 測量 ECG 上所有導程輸出至少 15 秒 (最大輸出導聯 I = 2.2 mm)

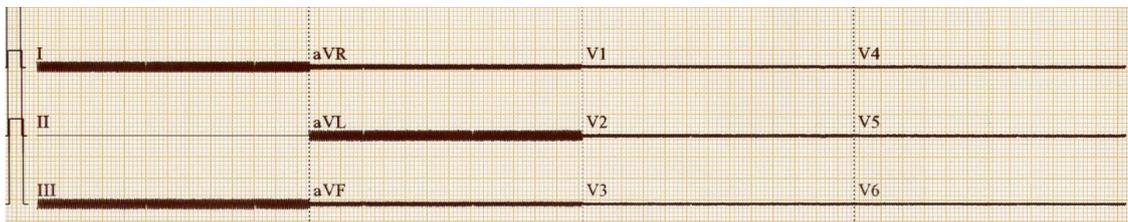


圖 11. LA 不平衡測試疊加-300 mV 直流偏壓

23. 重覆步驟 10~15，但依次調整 Electrode with impedance 到 LL/V1~V6

依據上述實例測得的結果，尋找幅值最大的導聯。圖 5 平衡測試最大振幅的導聯 I 波形的幅度為~0.1 mm，在 20 mm/mV 的增益下電壓  $V_{out} = 0.1 / 20 = 0.005 \text{ mV}$ ，代入(1)式中得 CMRR 值為：

$$20 * \log\left(\frac{0.005 \text{ mV}_{p-v}}{10 \text{ V}_{rms}}\right) = 20 * \log\left(\frac{5 * 10^{-6} \text{ V}_{p-v}}{28.28 \text{ V}_{p-v}}\right) \cong -135 \text{ dB}$$

但是實際上導聯 I 的輸出幾乎是一條直線，測量出的幅值應該不是正確的輸入 10 Vrms 的反應值，CMRR 應該更優於-135 dB，這在後面“高於標準的 CMRR 測試”章節中會再詳細討論。

用同樣的方法測量圖 6 中 RA 不平衡測試最大振幅的導聯 I 波形，得幅度為 2 mm，在 20 mm/mV 的增益下電壓  $V_{out} = 2 / 20 = 0.1 \text{ mV}_{p-v}$ ，代入(1)式中得 CMRR 值為：

$$20 * \log\left(\frac{0.1 \text{ mV}_{p-v}}{10 \text{ V}_{rms}}\right) \cong 20 * \log\left(\frac{1 * 10^{-4} \text{ V}_{p-v}}{28.28 \text{ V}_{p-v}}\right) \cong -109 \text{ dB}$$

比較圖 5 和圖 6 的測量結果可以觀察到，不平衡測試的波形幅度一般會比平衡測試的波形幅度來得大；這是由於不平衡電路會產生些微的電壓差，此時原來的共模訊號變成微小的差模訊號，經過差動放大器放大後輸出電壓會比平衡測試時更大些。因此 CMRR 值變得較差。

圖 7 和圖 8 分別為不平衡測試時，疊加±300 mV 直流偏置電壓的測試結果。最大幅值都發生在導聯 I，由於兩者導聯 I 都相等於沒有疊加 DC 的幅值，因此 CMRR 值皆為-109 dB。這是由於待測設備疊加±300 mV 直流偏壓時仍在差動放大器的線性工作區間內的緣故。

圖 9 至圖 11 為 LA 不平衡測試結果，最大幅值都發生在導聯 I，且導聯 I 幅值皆為 2.2 mm @20mm/mV，Vout = 0.11 mV，因此 CMRR 值如下：

- 圖 9-11：導聯 I 幅值 2.2 mm @20mm/mV，Vout = 0.11 mV

$$20 * \log\left(\frac{0.11 \text{ mV}_{p-v}}{10 \text{ V}_{rms}}\right) \cong 20 * \log\left(\frac{11 * 10^{-5} \text{ V}_{p-v}}{28.28 \text{ V}_{p-v}}\right) \cong -108.2 \text{ dB}$$

接者繼續測試其他導聯線(LL/V1~V6)，若是所有測試，其導聯振幅皆不大於 2.2 mm (0.11 mVp-v)，則可以說此心電圖機的 CMRR 值約為 108 dB。

## 其他注意事項

- 關閉陷波器 (Notch Filter)

CMRR 測試頻率為市電頻率，若在此時開啟市電頻率的陷波器，測試電壓會被陷波器濾除；這時測試結果並不是差動放大器的 CMRR 值，而是陷波器及 CMRR 的綜合結果。為了確保差動放大器可以達到心電標準的要求，因此，標準明確描述測試 CMRR 時需將陷波器關閉。

以下為心電圖機不平衡測試時，有無開啟陷波器比較。

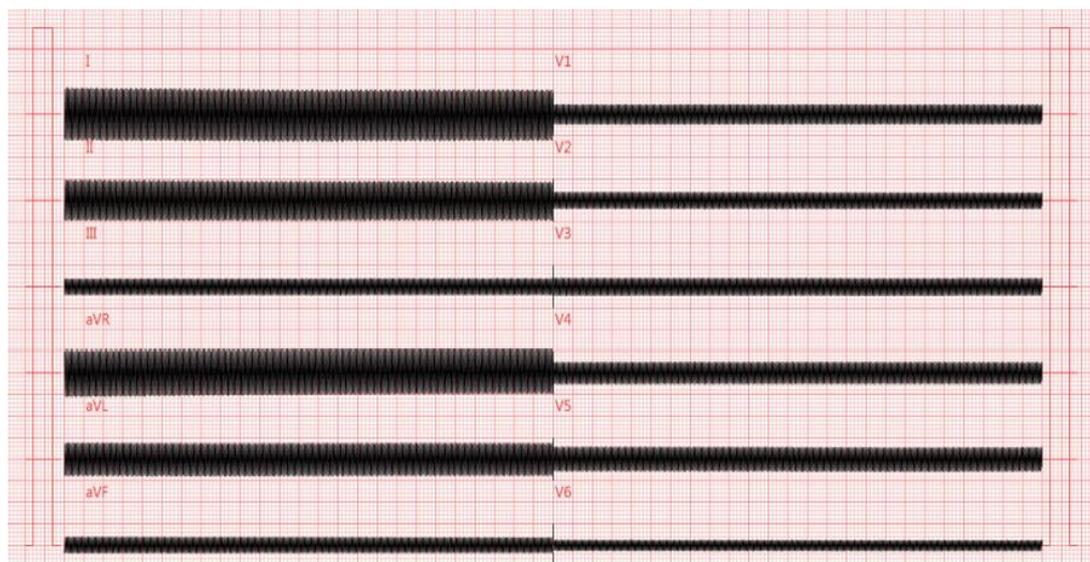


圖 12. 不平衡測試 (關閉陷波器)

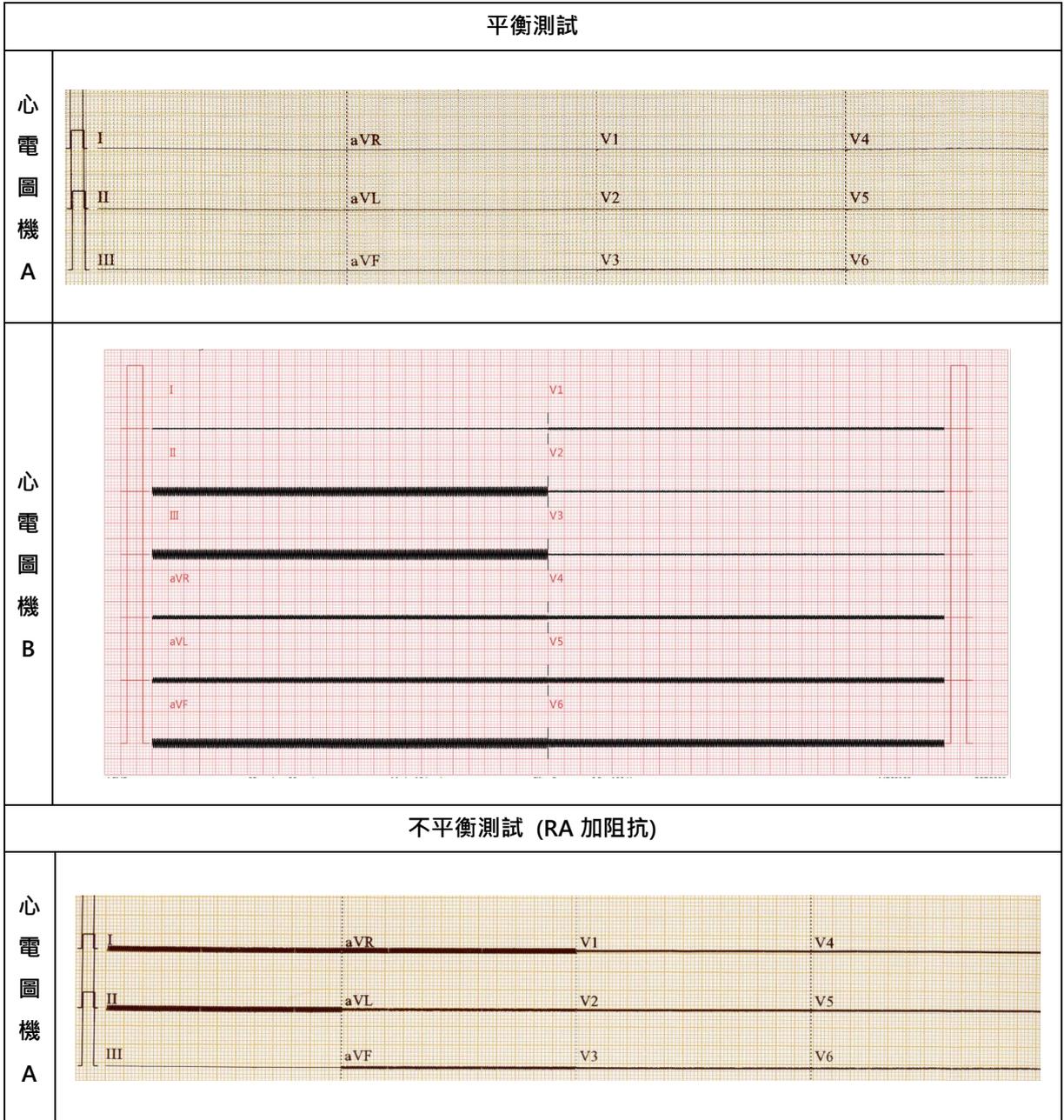


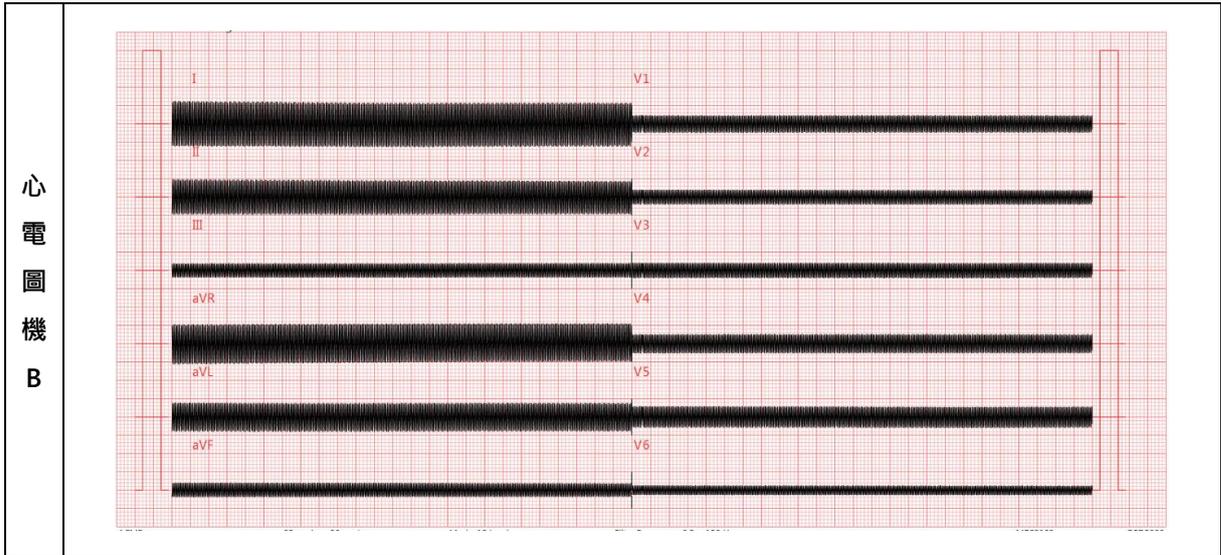
圖 13：不平衡測試 (開啟陷波器)

由上圖可知，不平衡測試時開啟陷波器，陷波器會將大多數的 50/60 Hz 測試訊號濾除，因此導聯波形幅度變得很小，不能反應差動放大器的 CMRR 值，也因此無法測得差動放大器真正的 CMRR 值。

● 不同心電圖機的 CMRR 測試結果

不同的心電圖機，因為使用的元件和線路的設計不同，CMRR 的測試結果也會不同。在公式(1)中、CMRR 值主要是由心電圖機的心電圖上測量各導聯波形的振幅  $V_{out}$  和 CMRR 測試儀器的輸出訊號振幅  $V_{in}$  兩個主要參數的比值再取  $20\text{Log}$  計算出來的，其中  $V_{in}$  值在標準中已有規定，因此 CMRR 值的決定主要在待測心電設備的硬體設計，因此若是測試結果 CMRR 值不符合標準所需，就必須重新檢視心電設備的硬體設計。以下為使用相同 CMRR 測試儀器 (鯨揚科技的 CMRR 3.0+) 及測試環境設置下，不同心電圖機的測試結果。





由上面的兩台心電圖機測試的結果可以看出，雖然使用的是相同的測試儀器及測試環境設置，因待測心電圖不同，其導聯波形幅值  $V_{out}$  也會不同，計算後的 CMRR 值自然也會不同。

● 高於標準的 CMRR 測試

有些心電圖機製造商會要求其製造的心電圖機有更高於標準的 CMRR 規格 (譬如 140 dB)，如此在一些市電干擾嚴重的環境中，仍可以正確無誤的測量心電圖。要達成這個目標，除了要能精確的測量心電圖顯示的最小電壓 ( $V_{out}$ ) 外，可能還需要將 CMRR 測試儀器的測試電壓 ( $V_{in}$ ) 提高，才能測到更高的 CMRR 值。

以圖 5 為例，測到的  $V_{out} = 0.01 \text{ mV}$  (0.2 mm)，假設這台心電圖機最小可以測量導聯波幅就是到 0.2 mm，也就是 0.01 mV (20 mm/mV 增益的設置下)，針對  $V_c = 10 \text{ Vrms}$  的心電標準要求，最優只能測到 -129 dB 的 CMRR 值，因此若要測到更高的 CMRR 值，勢必要增加 CMRR 測試儀器的輸出電壓  $V_s$ 。

圖 14 是將 CMRR3.0+ 的  $V_s$  設置到 70.71 Vrms (200 Vp-p)，則  $V_c = V_s/2 = 35.35 \text{ Vrms}$  (100 Vp-p)，此時測量到的導聯 I 的幅值仍是 0.2 mm，因此 CMRR 值就可以測到 140 dB，計算如下：

$$20 * \log\left(\frac{0.01 \text{ mV}_{p-v}}{35.35 \text{ Vrms}}\right) \cong 20 * \log\left(\frac{1 * 10^{-5} \text{ V}_{p-v}}{100 \text{ V}_{p-v}}\right) \cong -140 \text{ dB}$$

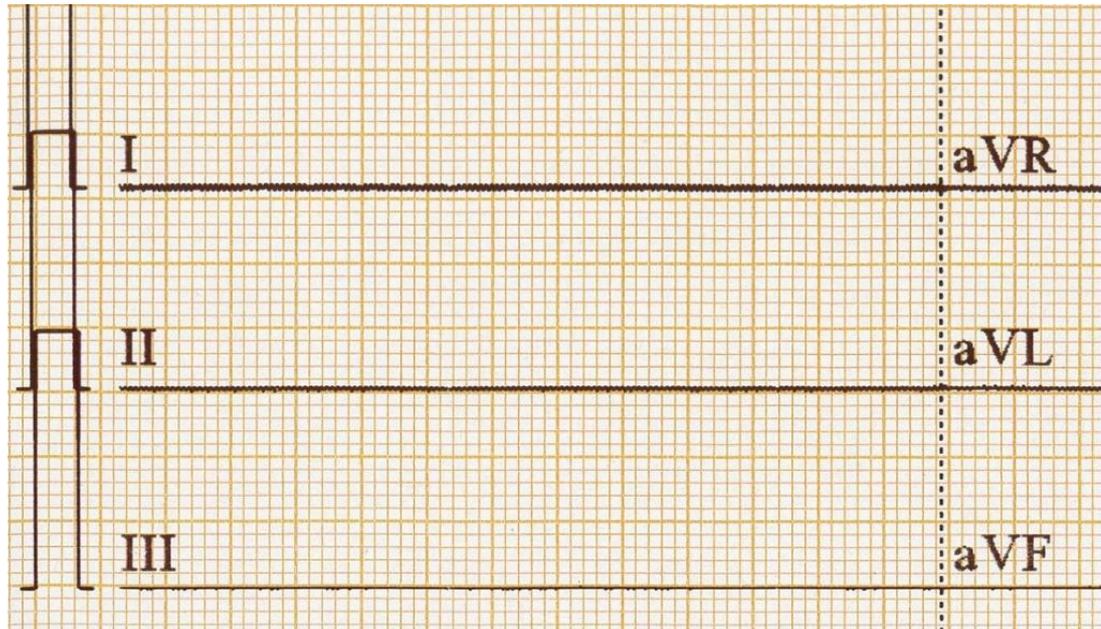


圖 14：平衡測試 ( $V_s = 70.71 \text{ Vrms}$ )

CMRR3.0+測試儀器有這樣超過標準所需電壓的輸出功能，可協助心電圖機製造商測試更高於標準 CMRR 規格的心電圖機。

## 結語

心電圖設備中 CMRR 的規格是抑制 50/60 Hz 市電訊號干擾很重要的一項功能，而 50/60 Hz 干擾或大或小無處不在，因此能夠確保顯示正確的心電圖波形，足夠的 CMRR 值實是一個重要因素。至於要如何正確地測量心電圖機的 CMRR 值，則又是另一項要注意的事項。

心電圖標準中都有明確的說明測試線路和步驟，因此依據標準的需求設計一台測試儀器來測試心電圖機的 CMRR 值是必需的。但由於標準線路中的高電壓電源 ( $20 \text{ Vrms} = 58 \text{ Vp-v}$ )，低電源輸出容抗 (200 pF)，內外屏蔽的要求，每個項目都考驗著測試儀器的製造難度。CMRR3.0+ 就是逐一克服這些挑戰，完成可以符合各類心電和腦電設備 CMRR 測試的要求。另外，如前一節所述，在心電圖機最小可以測量導聯波幅到 0.2 mm，也就是 0.01 mV 的條件下，可測到 -140 dB 的 CMRR 值。



參考資料:

1. IEC 醫療專用標準 IEC60601-2-25:2011, IEC60601-2-27:2011, IEC60601-2-47:2012, IEC60601-2-26:2012。
2. 中國心電標準 YY0782-2010 · YY1079-2008 · YY0885-2013 · YY1139-2013。
3. 鯨揚科技(WhaleTeq) “CMRR3.0+” 使用手冊。

Contact WhaleTeq  
+886 (2) 2596 0701  
[service@whaleteq.com](mailto:service@whaleteq.com)