

CMRR 测试原理和方法

前言

使用心电图机测量待测者的心电图时，常会因为待测者身上的市电信号干扰，造成心电图上的 50/60 Hz 噪声增加，这可能会影响医生正确判读心电图波形所代表的的心脏疾病。因此如何在市电干扰严重的环境下，正确无误的测量心电图，实在是一个严峻的挑战。

另外，在不同身体位置可能会存在不同的直流电压差，两位置间(例如：左手、右手间)的直流电压差可达 300 mV、甚至 1000 mV。而心电信号的电压范围一般介于 0.5 mV 到 3 mV 之间，因此如何避免这些数百 mV 的 DC 讯号干扰正常心电信号，又是另一种挑战。

医疗测试标准中，共模抑制比 CMRR (Common Mode Rejection Ratio)的测试目的，就是为了确保心电图机在上述的 50/60 Hz 干扰和 DC 偏移的情形下，仍然可以正常的显示心电图，以利医生做正确的判读。接下来将详细介绍 CMRR 测试的原理和方法。

CMRR 测试原理

1. 测试线路:

依据三个心电图机测试标准中所规定的测试线路图，如图 1:

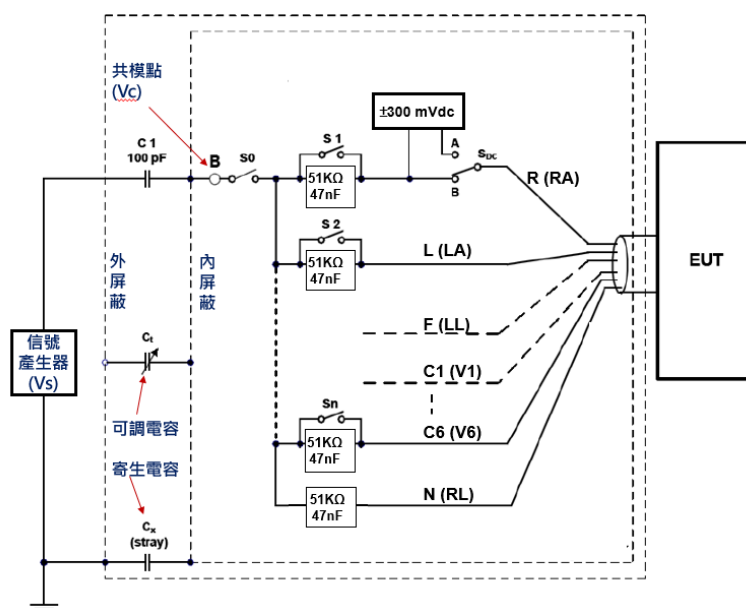


图 1. CMRR 测试线路图

图 1 左侧的“信号产生器”产生市电频率的讯号，其仿真的就是干扰待测者身上的市电讯号，旁边经过一个由 $C_1 \cdot C_t \cdot C_x$ 并联组成的共 200 pF 的线路到 B 点（共模点），这 200 pF 电容模拟的就是人体对地的容抗；图中两个封闭虚线，分别代表标准要求的线路金属内外屏蔽，由于两块金属片之间会有杂散电容 C_x ，并且这个 C_x 电容值会随不同 CMRR 测试设备而不同，因此使用一个可调电容 C_t 使得 $C_x + C_t = 100$ pF，再加上 C_1 得 200pF。由于 $C_1 = 100$ pF，和 $C_x + C_t$ 的 100 pF 刚好形成一半的分压，因此 C_t 调到适当的值之后，B 点电压 V_c 会刚好是信号产生器输出电压 V_s 的一半，也就是 $V_c = 0.5V_s$ 。

之后是 S_0 开关，所有 CMRR 测试 S_0 都是闭合的，只有噪声电平测试时才打开。 S_0 开关之后，所有待测心电图机的电极线都串接一个 51K Ω 并联 47nF 的模拟电极皮肤阻抗线路。除了 N(RL)电极外，由 S_1 到 S_n 开关控制各电极是否串接这个阻抗线路。另外待测电极，图 1 的例子待测电极是 R(RA)电极，可由 S_{DC} 开关控制是否有 ± 300 mV 直流偏置电压的迭加，此 ± 300 mV 便是在仿真人体不同位置间的直流电压差。

2. 测试重点:

CMRR 的测试，除了 IEC60601-2-47 (中国对应标准：YY 0885)移动式心电图机部分要多测两倍电源频率外，所有标准中的测试方法几乎相同，只是测试电压，串接电极皮肤阻抗线路的方式和通过准则有些差异；另外，测试前，待测装置的 50/60 Hz 频率的陷波器(Notch Filter)必须关闭。主要包含了下面 5 个测试的重点：

1) 设置信号源电压 V_s :

心电标准: IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139)要求 20 Vrms 电源频率信号电压(V_s)，IEC60601-2-47 (YY 0885)则要求 $V_s = 8V_{p-p}$ (2.828Vrms)电源频率和 $V_s = 1.422 V_{p-p}$ (0.502Vrms)两倍电源频率。
脑电标准：IEC60601-2-26 要求 2Vrms 电源频率信号电压(V_s)。

2) 调整共模电压 V_c :

在不接任何待测设备电极线的设置下，调整可调电容 C_t 直到共模点电压值(V_c)为电源频率信号电压值(V_s)的一半，即 $V_c = 0.5V_s$ 。这个步骤主要是确定 $C_t + C_x = 100$ pF。

3) 平衡测试:

接上待测设备的所有电极线，先做平衡测试，依标准规定设置， S_1 到 S_n 全开或全闭，然后测量心电图机上所有导联波形幅度。由于所有电极线设置都相同，故称为平衡测试。

4) 不平衡测试:

依标准规定设置，一次一个开关，逐次开或闭待测电极的 S_n 开关，其余 S_n 开关的开闭和待测电极的 S_n 开关相反。譬如当 S_1 开关打开时，其余 $S_2 \sim S_n$ 开关闭合， S_1 开关所连接电极线称为待测电极线，因为和其他电极线设置不同故称此测试为不平衡测试。测量所有导联波形幅度。

5) 迭加±300 mV 直流偏置电压:

在待测电极在线迭加±300 mV 直流偏置电压，测量所有导联波形幅度。

所有导联波形幅度通过的准则: IEC60601-2-25/27 (YY 0782/1079/1139) 不超过 10 mmp-v (1 mVp-v) ·

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

依照上述，那么多少 dB 的 CMRR 值才能通过标准呢？首先，CMRR dB 值的公式为:

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

其中 V_{out} 为待测心电图机上的导联振幅值 · V_{in} 为 CMRR 测试仪器的共模电压 V_c 。以 IEC60601-2-25/27 来说 V_{out} 不超过 10 mmp-v (1 mVp-v) · V_{in} 为共模点的电压值 10 Vrms，所以通过 IEC60601-2-25/27 所需的 CMRR 值(最大)为：

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

依相同方式推算 IEC60601-2-47 在电源频率时所需的 CMRR 值为-60dB 两倍电源频率时 CMRR 值为-45dB；IEC60601-2-26 所需的 CMRR 值则为-89dB。但由于心电、脑电标准皆需做不平衡测试(上述第 4 项)，此不平衡电路会在差动放大器前产生些微的电压差，此时原来的共模讯号变成微小的差模讯号，经过差动放大器放大后输出电压会比平衡测试时更大些，但仍然要符合标准的要求。

CMRR 测试方法:

1. 测试环境设置

开始测试 CMRR 时，首先要注意的是测试环境；由于环境中的市电频率(50/60 Hz)噪声会透过辐射或大地的回路来干扰测试，因此如何避免这些噪声影响测试结果，是测试前重要的准备工作。图 2 是使用鲸扬科技的 CMRR 测试仪“CMRR 3.0+”来测试一台 12 导心电图机的测试系统图:

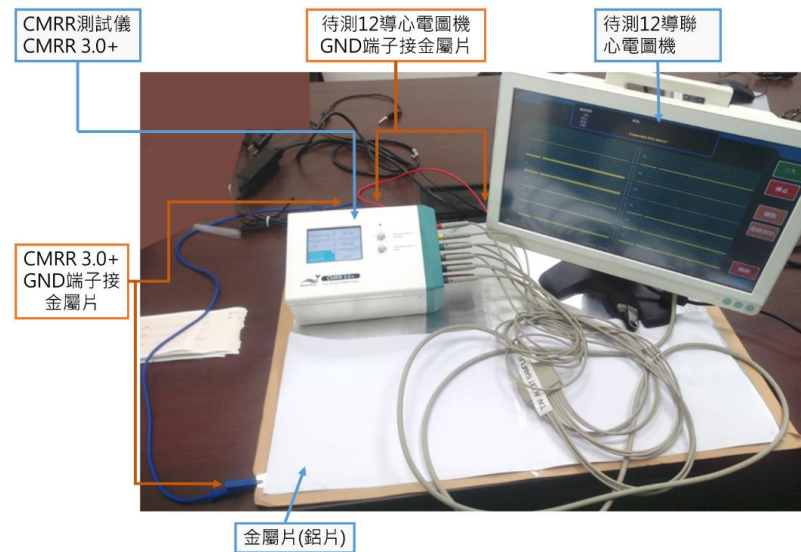


图 2. CMRR 测试系统图

测试时，首先需注意 CMRR 3.0+ 及待测设备是否共地。建议做法便是将整个测试系统(包含 CMRR 3.0+ 及待测设备)共地到一片独立的(不可接其他系统的地或大地)金属板上，此金属板建议大小为 60cm X 100cm(或更大)；此做法有以下三个优点：(1) 整个测试系统共地 (2) 测试系统独立 (3) 金属板会吸收测试系统噪声的能量。若待测设备没有可接出的地线，这时待测设备输入端为浮接(floating)的状态；此时可以让 CMRR 3.0+ 地线单独接至金属板上。

图 3 为平衡测试 CMRR 3.0+ 和心电图机都没有接至金属板的测试结果。可以看到所有导联输出的讯号，因为市电频率(50/60 Hz)噪声的干扰，会随时间做不规则变化，也就是无法确定输出讯号的大小，因而无法得到确定的结果。

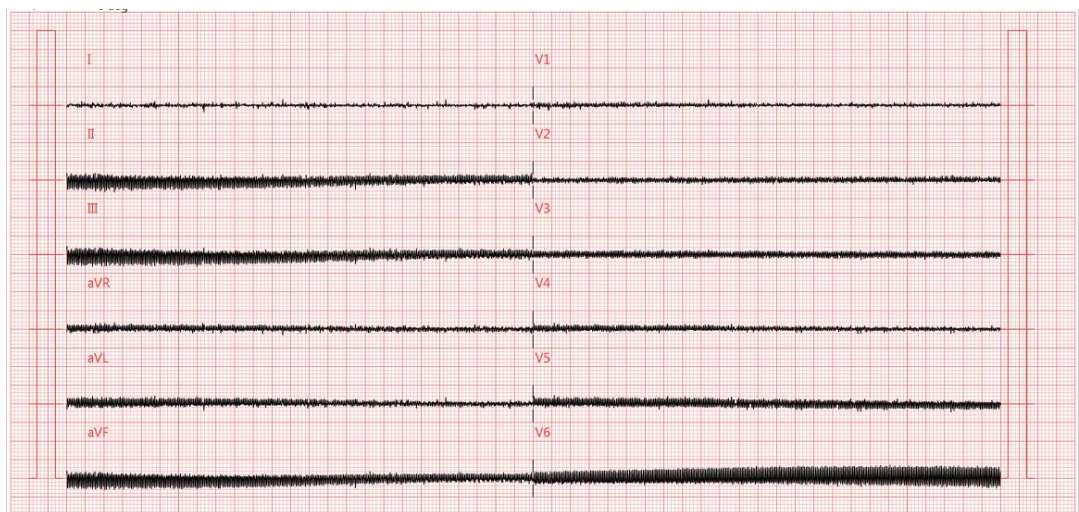


图 3. 测试系统无共地至金属板上

2. CMRR 测试实例

以下为 IEC60601-2-25/27 的测试实例及其步骤：

1. 关闭待测装置的 50/60 Hz 频率的陷波器(Notch Filter)
2. 先不连接所有的电极线到 CMRR 3.0+ 上
3. 设置信号源电压 V_s · IEC60601-2-25/27 需选择 Supply Voltage 为 20 Vrms
4. 选择 Frequency 为 50 或 60 Hz
5. 调整共模电压 V_c ：调整面板上的 C_t (Adjustable Capacitor) 直到 V_c 为~10 Vrms



图 4. 调整 V_c 电压至 V_s 电压的一半

6. 连接所有电极线到 CMRR 3.0+ 上
7. 平衡测试: 选择 Electrode with Impedance 为 None (S1 到 Sn 全闭)
8. 调整 DC Offset 为 Off
9. 测量 ECG 上所有导联输出至少 15 秒 (最大输出导联 I ~ 0.1 mm)

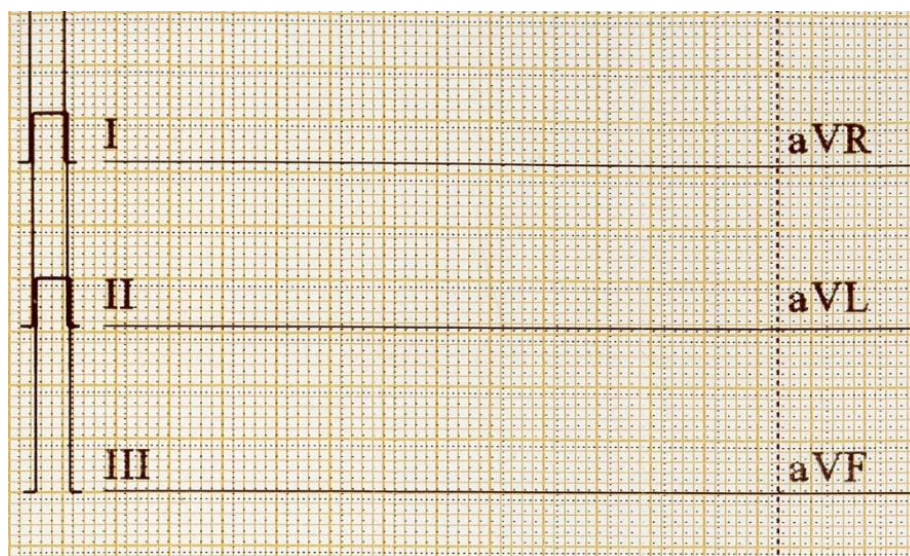


图 5. 平衡测试结果

10. 不平衡测试: 调整 Electrode with Impedance 为 RA (仅 S1 打开)
11. 测量 ECG 上所有导程输出至少 15 秒(最大输出导联 I = 2 mm)

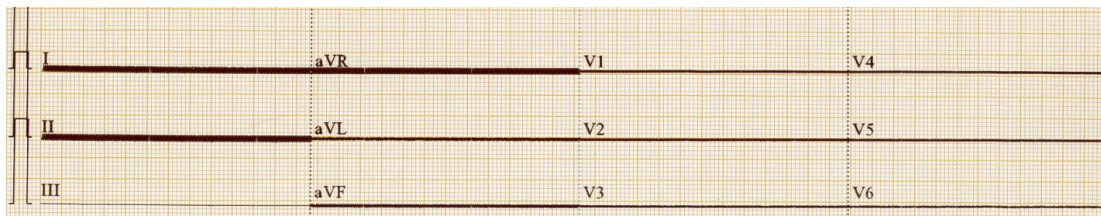


图 6. RA 不平衡测试结果 (RA 加阻抗)

12. 迭加+300 mV 直流偏置电压 · 调整 DC Offset 到"+300 RA"
13. 测量 ECG 上所有导程输出至少 15 秒 (最大输出导联 I = 2 mm)

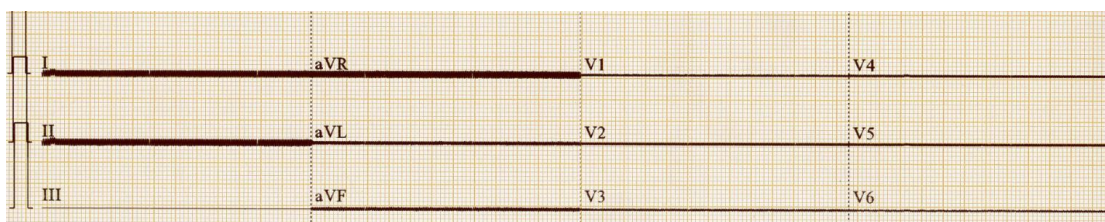


图 7. RA 不平衡测试迭加+300 mV 直流偏压

14. 迭加-300 mV 直流偏置电压 · 调整 DC Offset 到"-300 RA"
15. 测量 ECG 上所有导程输出至少 15 秒 (最大输出导联 I = 2 mm)

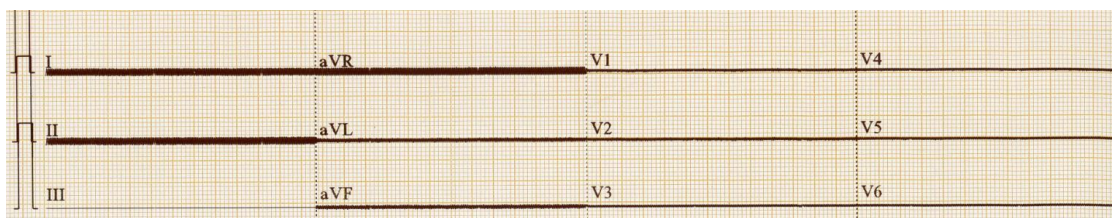


图 8. RA 不平衡测试迭加-300 mV 直流偏压

16. 调整 DC Offset 到 Off
17. 调整 Electrode with impedance 到 LA
18. 测量 ECG 上所有导程输出至少 15 秒 (最大输出导联 I = 2.2 mm)

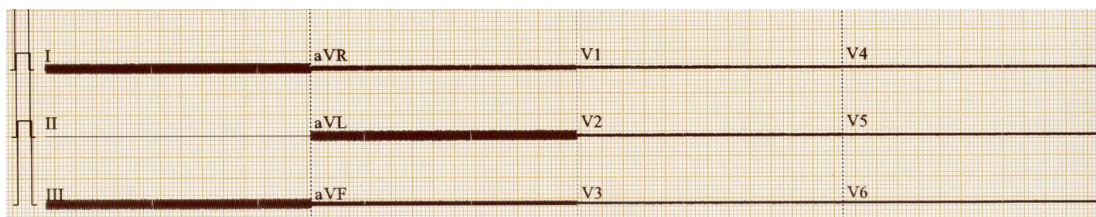


图 9. LA 不平衡测试结果 (LA 加阻抗)

19. 调整 DC Offset 到"+300 LA"

20. 测量 ECG 上所有导程输出至少 15 秒 (最大输出导联 I = 2.2 mm)

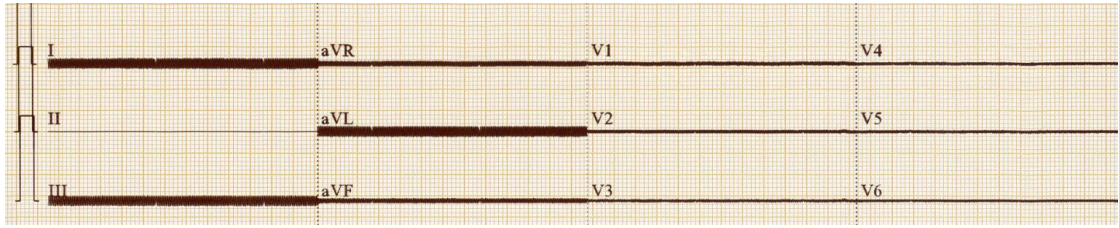


图 10. LA 不平衡测试迭加+300 mV 直流偏压

21. 调整 DC Offset 到“-300 LA”
22. 测量 ECG 上所有导程输出至少 15 秒 (最大输出导联 I = 2.2 mm)

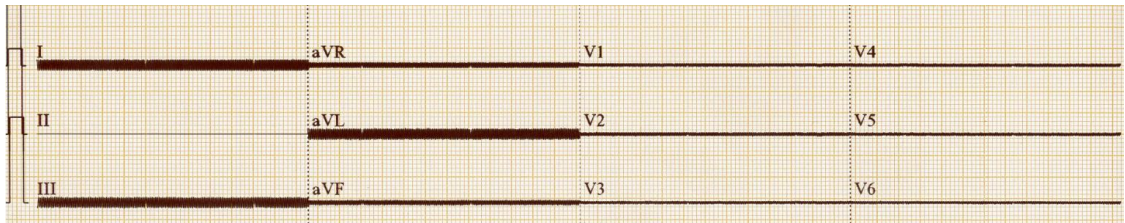


图 11. LA 不平衡测试迭加-300 mV 直流偏压

23. 重复步骤 10~15，但依次调整 Electrode with impedance 到 LL/V1~V6

依据上述实例测得的结果，寻找幅值最大的导联。图 5 平衡测试最大振幅的导联 I 波形的幅度为~0.1 mm, 在 20 mm/mV 的增益下电压 $V_{out} = 0.1 / 20 = 0.005 \text{ mV}$, 代入(1)式中得 CMRR 值为:

$$20 * \log\left(\frac{0.005 \text{ mVp} - v}{10 \text{ Vrms}}\right) = 20 * \log\left(\frac{5 * 10^{-6} \text{ Vp} - v}{28.28 \text{ Vp} - v}\right) \cong -135 \text{ dB}$$

但是实际上导联 I 的输出几乎是一条直线，测量出的幅值应该不是正确的输入 10 Vrms 的反应值，CMRR 应该更优于-135 dB，这在后面“高于标准的 CMRR 测试”章节中会再详细讨论。

用同样的方法测量图 6 中 RA 不平衡测试最大振幅的导联 I 波形，得幅度为 2 mm, 在 20 mm/mV 的增益下电压 $V_{out} = 2 / 20 = 0.1 \text{ mVp-v}$, 代入(1)式中得 CMRR 值为:

$$20 * \log\left(\frac{0.1 \text{ mVp} - v}{10 \text{ Vrms}}\right) \cong 20 * \log\left(\frac{1 * 10^{-4} \text{ Vp} - v}{28.28 \text{ Vp} - v}\right) \cong -109 \text{ dB}$$

比较图 5 和图 6 的测量结果可以观察到，不平衡测试的波形幅度一般会比平衡测试的波形幅度来得大；这是由于不平衡电路会产生些微的电压差，此时原来的共模讯号变成微小的差模讯号，经过差动放大器放大后输出电压会比平衡测试时更大些。因此 CMRR 值变得较差。

图 7 和图 8 分别为不平衡测试时，迭加 ± 300 mV 直流偏置电压的测试结果。最大幅值都发生在导联 I，由于两者导联 I 都相等于没有迭加 DC 的幅值，因此 CMRR 值皆为 -109 dB。这是由于待测设备迭加 ± 300 mV 直流偏压时仍在差动放大器的线性工作区间内的缘故。

图 9 至图 11 为 LA 不平衡测试结果，最大幅值都发生在导联 I，且导联 I 幅值皆为 2.2 mm @20mm/mV， $V_{out} = 0.11$ mV，因此 CMRR 值如下：

- 图 9-11：导联 I 幅值 2.2 mm @20mm/mV， $V_{out} = 0.11$ mV

$$20 * \log\left(\frac{0.11 \text{ mVp} - v}{10 \text{ Vrms}}\right) \cong 20 * \log\left(\frac{11 * 10^{-5} \text{ Vp} - v}{28.28 \text{ Vp} - v}\right) \cong -108.2 \text{ dB}$$

接着继续测试其他导联线(LL/V1~V6)，若是所有测试，其导联振幅皆不大于 2.2 mm (0.11 mVp-v)，则可以说此心电图机的 CMRR 值约为 108 dB。

其他注意事项

● 关闭陷波器 (Notch Filter)

CMRR 测试频率为市电频率，若在此时开启市电频率的陷波器，测试电压会被陷波器滤除；这时测试结果并不是差动放大器的 CMRR 值，而是陷波器及 CMRR 的综合结果。为了确保差动放大器可以达到心电标准的要求，因此，标准明确描述测试 CMRR 时需将陷波器关闭。

以下为心电图机不平衡测试时，有无开启陷波器比较。

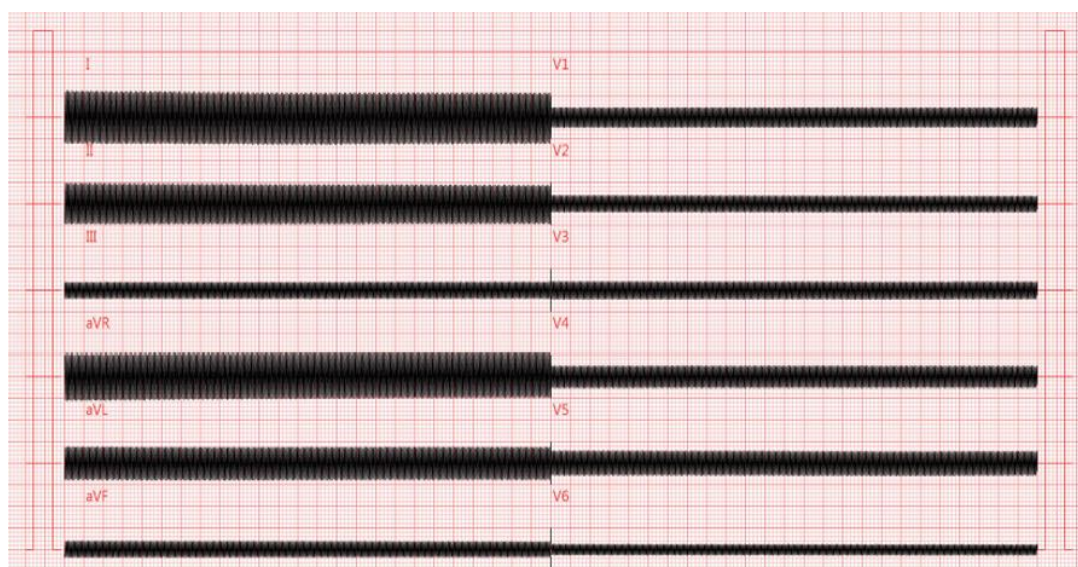


图 12. 不平衡测试 (关闭陷波器)

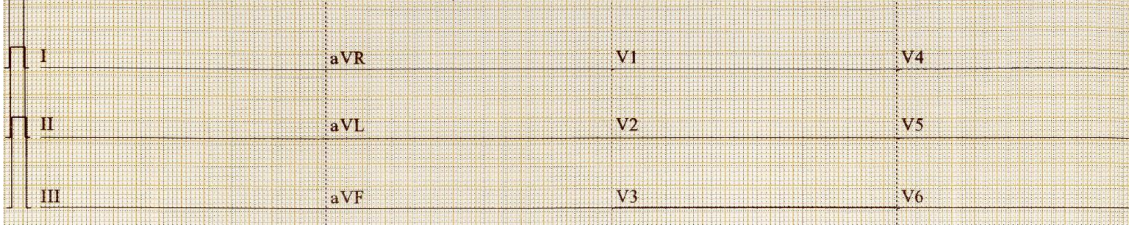
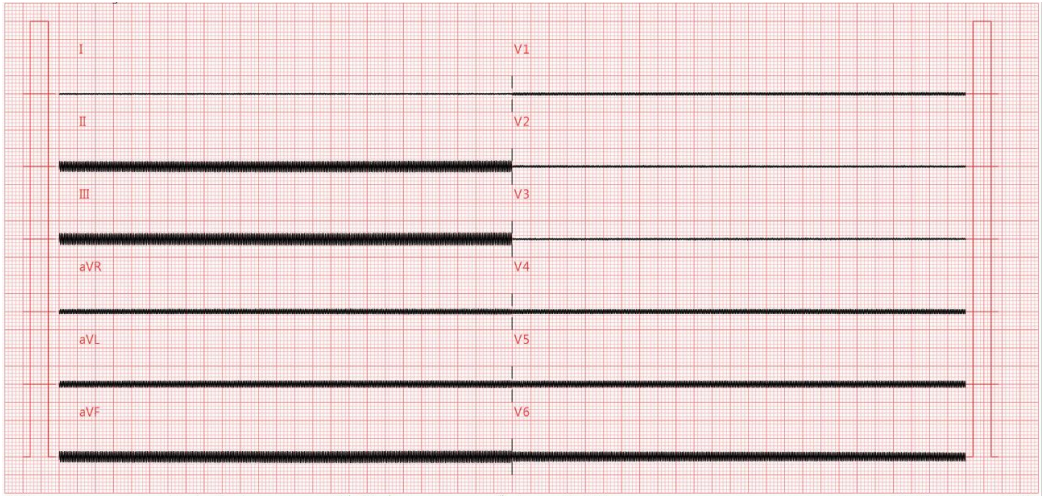
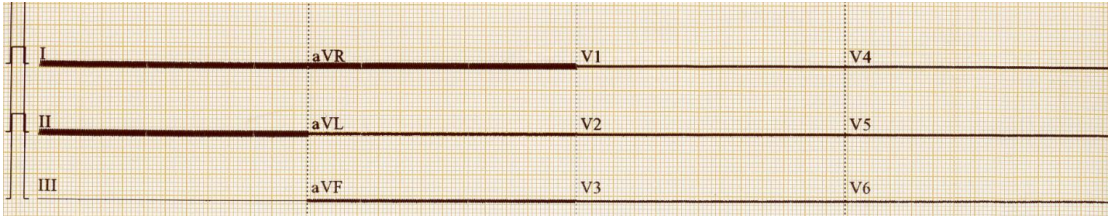


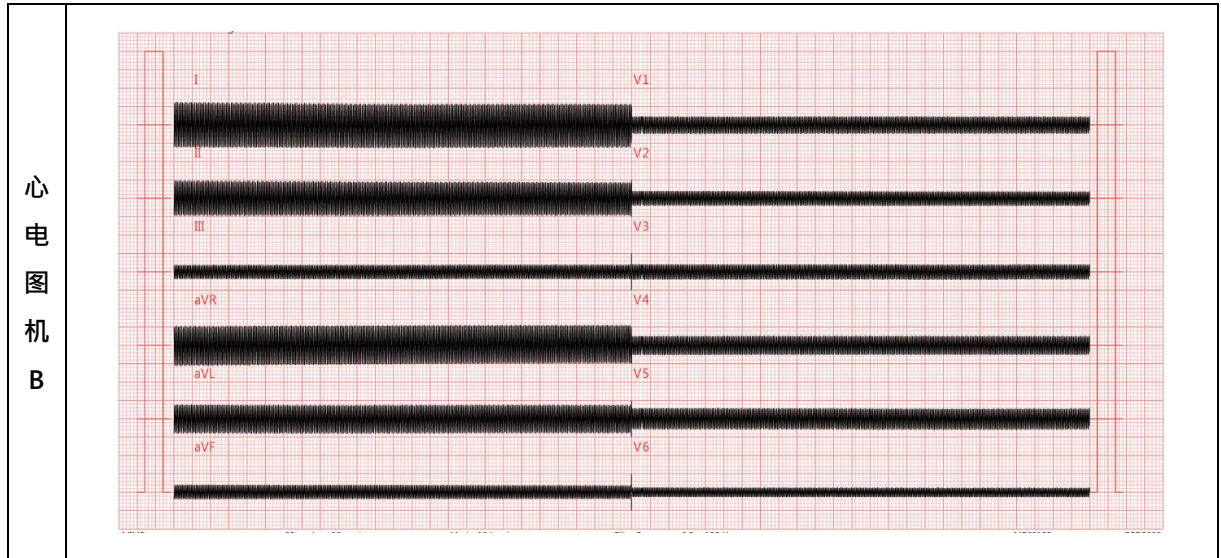
图 13：不平衡测试 (开启陷波器)

由上图可知，不平衡测试时开启陷波器，陷波器会将大多数的 50/60 Hz 测试讯号滤除，因此导联波形幅度变得很小，不能反应差动放大器的 CMRR 值，也因此无法测得差动放大器真正的 CMRR 值。

● 不同心电图机的 CMRR 测试结果

不同的心电图机，因为使用的组件和线路的设计不同，CMRR 的测试结果也会不同。在公式(1)中、CMRR 值主要是由心电图机的心电图上测量各导联波形的振幅 V_{out} 和 CMRR 测试仪器的输出讯号振幅 V_{in} 两个主要参数的比值再取 $20\log$ 计算出来的，其中 V_{in} 值在标准中已有规定，因此 CMRR 值的决定主要在待测心电设备的硬件设计，因此若是测试结果 CMRR 值不符合标准所需，就必须重新检视心电设备的硬件设计。以下为使用相同 CMRR 测试仪器 (鲸扬科技的 CMRR 3.0+) 及测试环境设置下，不同心电图机的测试结果。

平衡测试	
心电图机 A	
心电图机 B	
不平衡测试 (RA 加阻抗)	
心电图机 A	



由上面的两台心电图机测试的结果可以看出，虽然使用的是相同的测试仪器及测试环境设置，因待测心电图不同，其导联波形幅值 V_{out} 也会不同，计算后的 CMRR 值自然也会不同。

● 高于标准的 CMRR 测试

有些心电图机制造商会要求其制造的心电图机有高于标准的 CMRR 规格（譬如 140 dB），如此在一些市电干扰严重的环境中，仍可以正确无误的测量心电图。要达成这个目标，除了要能精确的测量心电图显示的最小电压(V_{out})外，可能还需要将 CMRR 测试仪器的测试电压(V_{in})提高，才能测到更高的 CMRR 值。

以图 5 为例，测到的 $V_{out} = 0.01 \text{ mV}$ (0.2 mm)，假设这台心电图机最小可以测量导联波幅就是到 0.2 mm，也就是 0.01 mV (20 mm/mV 增益的设置下)，针对 $V_c = 10 \text{ Vrms}$ 的心电标准要求，最优只能测到 -129 dB 的 CMRR 值，因此若要测到更高的 CMRR 值，势必要增加 CMRR 测试仪器的输出电压 V_s 。

图 14 是将 CMRR3.0+ 的 V_s 设置到 70.71 Vrms (200 Vp-p)，则 $V_c = V_s/2 = 35.35 \text{ Vrms}$ (100 Vp-p)，此时测量到的导联 I 的幅值仍是 0.2 mm，因此 CMRR 值就可以测到 140 dB，计算如下：

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

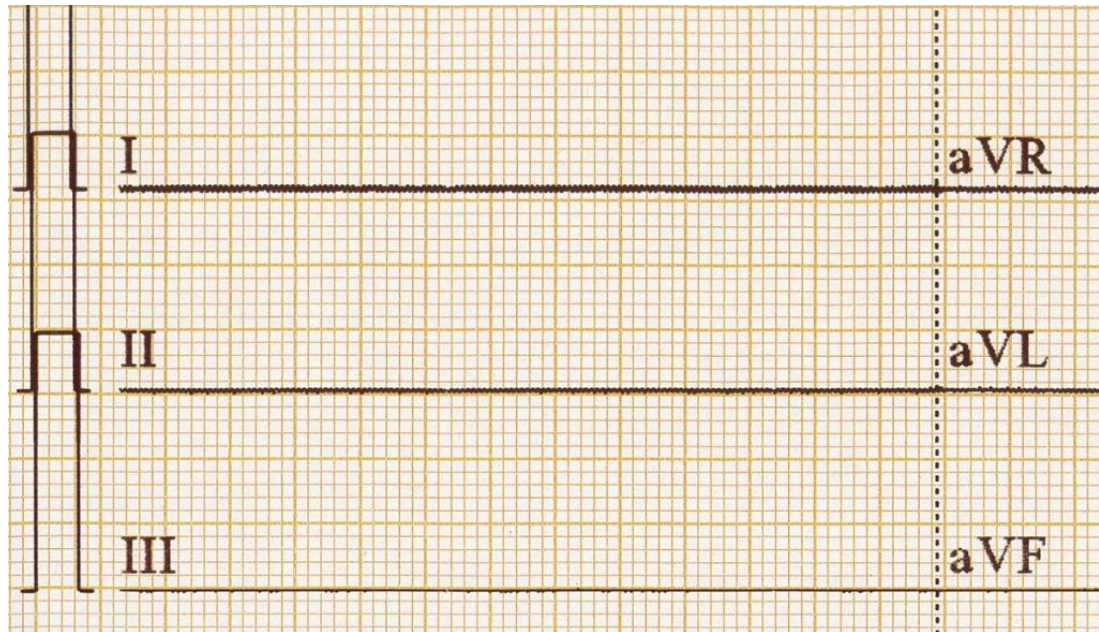


图 14：平衡测试 ($V_s = 70.71 \text{ Vrms}$)

CMRR3.0+测试仪器有这样超过标准所需电压的输出功能，可协助心电图机制造商测试更高于标准 CMRR 规格的心电图机。

结语

心电图设备中 CMRR 的规格是抑制 50/60 Hz 市电干扰很重要的一项功能，而 50/60 Hz 干扰或大或小无处不在，因此能够确保显示正确的心电图波形，足够的 CMRR 值实是一个重要因素。至于要如何正确地测量心电图机的 CMRR 值，则又是另一项要注意的事项。

心电图标准中都有明确的说明测试线路和步骤，因此依据标准的需求设计一台测试仪器来测试心电图机的 CMRR 值是必需的。但由于标准线路中的高电压电源($20 \text{ Vrms} = 58 \text{ Vp-v}$)，低电源输出容抗 (200 pF)，内外屏蔽的要求，每个项目都考验着测试仪器的制造难度。CMRR3.0+就是逐一克服这些挑战，完成可以符合各类心电和脑电设备 CMRR 测试的要求。另外，如前一节所述，在心电图机最小可以测量导联波幅到 0.2 mm ，也就是 0.01 mV 的条件下，可测到 -140 dB 的 CMRR 值。



参考数据:

1. IEC 医疗专用标准 IEC60601-2-25:2011, IEC60601-2-27:2011, IEC60601-2-47:2012, IEC60601-2-26:2012。
2. 中国心电标准 YY0782-2010 · YY1079-2008 · YY0885-2013 · YY1139-2013。
3. 鲸扬科技(WhaleTeq) “CMRR3.0+” 使用手册。

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