

生物医学电子学实验 1

人体生物电检测仪器的设计（以心电为例）

一. 实验目的

1. 进一步理解人体生物电信号的生理意义。
2. 以心电信号为例，深入理解生物电检测仪器的原理与结构，明确检测仪器各关键模块的性能参数，掌握设计与调试方法。
3. 通过实际搭建完整的心电检测电路与系统，进一步提升硬件、软件设计能力，并锻炼解决实际生物医学工程问题的能力。

二. 实验器材与平台

NI Multisim 仿真软件（最好为 14.0 版本）	1 套
Altium Designer 软件	1 套
标准生理参数信号发生器	1 台
双踪示波器	1 台
直流稳压电源	1 台
模拟信号源	1 台
数字万用表	1 块
单片机开发板（msp430F149 或 stm32F103 等）	1 套
心电电极	若干
仪表放大器芯片	1 片
普通运放、电阻、电容、导线、直流电池等	若干

三. 人体心电检测的基本原理

正常人心脏电活动的起搏点为窦房结，其发出的兴奋按特定途径依次传导至心房和心室，引起整个心脏的兴奋。每个心动周期内，心脏各部分兴奋过程中出现的电变化的方向、途径、次序和时间都有一定的规律。这种生物电变化通过心脏周围的导电组织和体液反映到身体表面，使体表各部位在每一心动周期中也发生有规律的电变化。将测量电极放置在人体表面的特定部位，记录的生物电变化曲线即为临床常规心电图（ECG）。心电图反映心脏兴奋的产生、传导和恢复过程中的生物电变化，其典型波形如图 1，各段对应的生理意义如下：

P 波：左右两心房的去极化过程

QRS 波群：左右两心室的去极化过程

T 波：左右两心室的复极化过程

P-R 间期：P 波起点到 Q 波起点，兴奋由窦房结传导到心室肌细胞的过程

S-T 段：S 波终点到 T 波起点，心室肌细胞复极化的平台期

Q-T 间期：Q 波起点到 T 波终点，心室去极化开始到复极化结束

正常心电信号的幅度通常在 0.1mV~4mV，频带范围通常在 0.1Hz~100Hz。

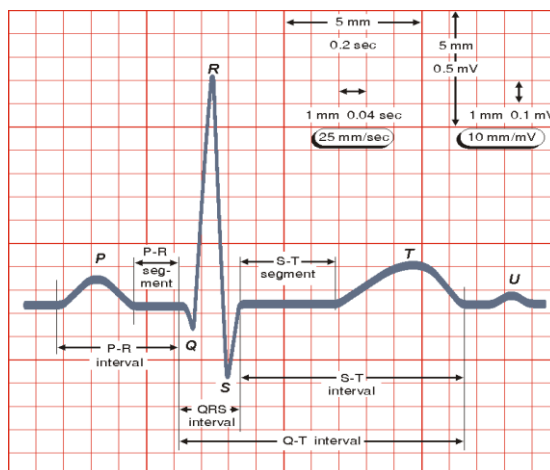


图 1 正常心电波形示意（以 I 导联为例）

常规心电检测仪器使用 6 个肢体导联（I、II、III、aVR、aVL、aVF）和 6 个胸导联（V1~V6）共 12 个导联，其含义如下：

- 1) 标准肢体导联：I、II、III 导联，其电压分别为

$$V_I = V_L - V_R, \quad V_{II} = V_F - V_R, \quad V_{III} = V_F - V_L$$

- 2) 加压肢体导联：aVR、aVL、aVF 导联，其电压分别为

$$aVR = V_R - \frac{V_L + V_F}{2} = \frac{2V_R - V_L - V_F}{2} = \frac{3}{2}(V_R - V_W)$$

$$aVL = V_L - \frac{V_R + V_F}{2} = \frac{2V_L - V_R - V_F}{2} = \frac{3}{2}(V_L - V_W)$$

$$aVF = V_F - \frac{V_R + V_L}{2} = \frac{2V_F - V_R - V_L}{2} = \frac{3}{2}(V_F - V_W)$$

$$V_W = \frac{V_R + V_L + V_F}{3} \text{ 是 Wilson 中心端，其电压保持稳定，可作为基准。}$$

- 3) 标准胸导联：V1~V6，其电压分别为

$$V_i = C_i - V_W$$

C_i 是各个胸电极测得的电压， $i=1\sim6$ 。

上述 12 导联所需电极（图 2）分别包括：

- 1) 肢体电极：

R：右臂电极（红色）

- L: 左臂电极（黄色）
- F: 左腿电极（绿色）
- RF: 右腿电极（黑色），接地或右腿驱动电路

2) 胸电极:

- V1: 胸骨右缘第 4 肋间
- V2: 胸骨左缘第 4 肋间
- V3: V2 与 V4 连线中点
- V4: 左锁骨中线第 5 肋间
- V5: 左腋前线与 V4 处于同一水平线
- V6: 左腋中线与 V4 处于同一水平线

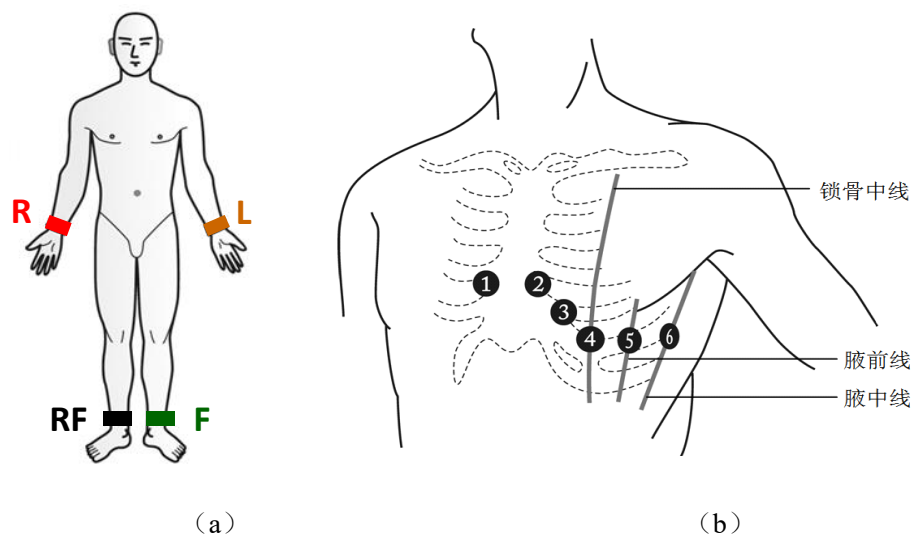


图 2 心电 12 导联的电极固定方式示意：(a) 肢体电极；(b) 胸导联电极

心电检测仪器的 12 导联可分别反映心脏额面、横面不同部位的电活动。各导联轴的方向如图 3，与心脏相关部位的对应关系如表 1。

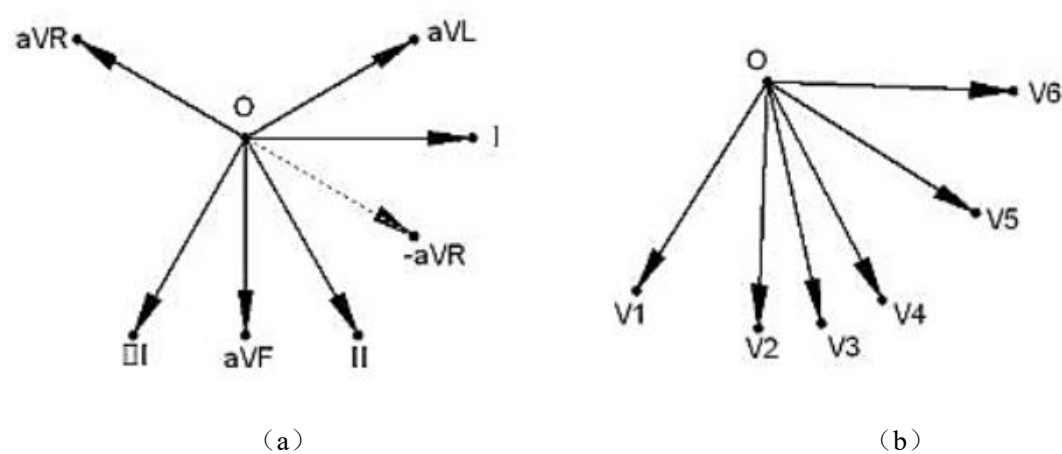


图 3 心电各导联轴的方向：(a) 额面各导联：I、II、III、aVR、aVL、aVF；(b) 横面各导联：V1~V6

表 1 心电各导联与心脏部位的对应关系

导联所在截面	导联名称	导联轴角度	对应的心脏部位
额面	I	0°	左心室高侧壁
	II	60°	心室下壁
	III	120°	心室下壁
	aVR	-150°	心室腔
	aVL	-30°	左心室高侧壁
	aVF	90°	心室下壁
横面	V1	120°	右心室前壁
	V1	90°	右心室前壁
	V3	75°	心室隔膜
	V4	60°	左心室前壁
	V5	30°	左心室侧壁
	V6	0°	左心室侧壁

四. 实验基本要求

设计实现单导联（一般为 I 导联）心电检测仪器，基本结构如图 4，仪器应达到如下性能指标：

- A. 输出心电波形幅度（以 R 波峰值计）：1~2.5V；
- B. 输入阻抗：≥2.5M；
- C. 共模抑制比：≥60dB；
- D. 频带：0.1Hz~100Hz。

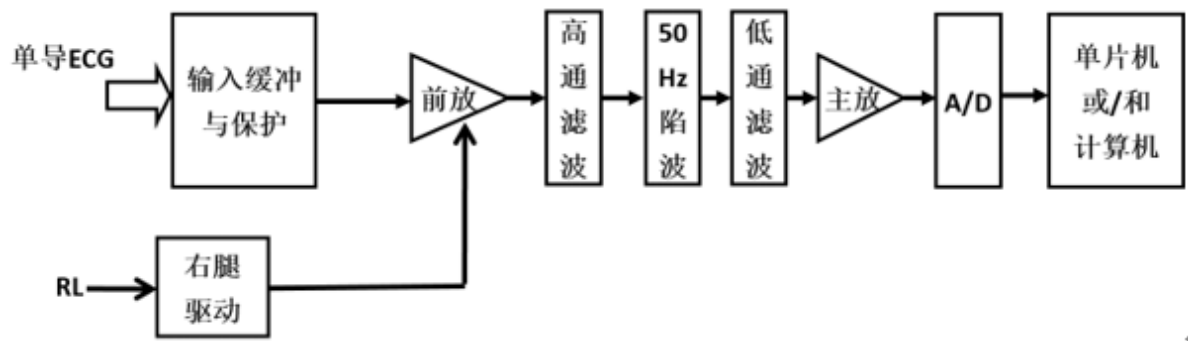


图 4 单导联心电检测仪器的基本结构示意图（未画出电源供电及隔离模块）

五. 实验内容

包括 Multisim 仿真和现场实验两项，每项又包括必做和选做两部分。

（一）Multisim 仿真

1. 在 Multisim 软件平台上搭建心电检测系统的模拟电路，需包括输入缓冲与保护电路、前级放大电路、右腿驱动电路、滤波电路（低通滤波、高通滤波和 50Hz 陷波）及主放大电路等，其中前级放大电路建议采用集成式仪表放大器芯片，高通、低通滤波电路建议采用有源巴特沃斯滤波器。
2. 在 Multisim 软件平台上测试上述电路的如下性能指标，需写明检测方法，记录必要的原始数据及波形图：
 - A. 通带增益及输出信号幅度（以 R 波峰值计）；
 - B. 输入阻抗；
 - C. 共模抑制比；
 - D. 通频带及上下限截止频率；
 - E. 陷波深度及品质因数。
- 3.（选做）隔离级设计：在 Multisim 中采用集成光耦芯片（ISO100 或 HCNR200 或其他类型），设计并调试隔离级电路，评价该电路能否实现信号的无失真传输。**注意：采用光耦隔离时，必须确保前后级电路没有电气连接。**

（二）现场实验

1. **必做内容：心电检测模拟电路的调试，鼓励采用国产仪表放大器、运放等关键器件实现。**
 - 1) 基于 Multisim 仿真设计的电路原理图，采用 Altium Designer 软件设计电路板图，制作并焊接 PCB 绿板。建议前级放大电路采用集成式仪表放大器芯片，高通滤波电路和低通滤波电路采用有源巴特沃斯滤波器，50Hz 陷波电路使用精密电阻、电容，主放大电路的放大倍数可调节。
 - 2) 分别以标准心电信号发生器和实际人体的 I 导联心电为输入信号，在示波器上观测上述电路的输出波形，并记录；比较两种情况下输出波形的差异，并分析原因。
 - 3) 实际测试上述电路的如下性能指标，需写明检测方法，记录必要的原始数据及波形图，并评价你所搭建的电路能否达到预期要求：
 - A. 通带增益及输出信号幅度（以 R 波峰值计）；
 - B. 输入阻抗；
 - C. 共模抑制比；
 - D. 通频带及上下限截止频率；
 - E. 陷波深度及品质因数。
2. **选做内容：共 4 项，建议至少完成其中 1 项。**
 - 1) **单片机采集：**以单片机为核心（实验室提供 msp430F149 和 stm32F103 等单片机开发系统及仿真器），编程实现模拟电路输出信号的实时采集，实时解算并显示心率。可采用单片机自带的 A/D 转换模块，要求采样率不低于 200Hz，转换分辨率不低于 12 位。
 - 2) **上位机处理：**将单片机采集到的心电信号，通过串口（或蓝牙无线接口）上传到 PC，并编写 PC 界面程序，实现心电信号的显示、存储、心率解算等功能。有兴趣的同学可实现心电信号的数

字滤波、特征提取、心律失常判别等功能，形成完整的心电检测仪器（系统）。

- 3) **直流电池供电：**设计供电及稳压电路，使整个模拟电路均采用直流电池供电（碱性电池或锂电池等），可脱离稳压电源等调试设备独立工作，有利于确保安全性、提高便携性。选择本项内容的同学，需估测系统功耗。
- 4) **隔离级设计：**如仪器采用工频市电供电，模拟电路需引入隔离级，与人体接触的部分采用直流电池等浮地电源供电，与后级工频市电电源完全隔离，以确保安全。

有兴趣且学有余力的同学，也可尝试设计人体其他生物电信号的检测仪器（系统），其性能指标不得低于心电检测仪器的要求。

六. 实验报告要求：需包括（但不限于）

1. 完成的实验内容及详细的系统框图。
2. 各模块的设计方案：**Multisim** 仿真需给出电路原理图、核心元器件的主要参数，现场实验还需给出 PCB 电路板图。
3. **实验结果（重点）：**
 - 1) **Multisim 仿真**
 - A. 给出各级电路的仿真结果，需附上必要的波形图；
 - B. 针对通带增益、输入阻抗、共模抑制比、上下限截止频率、陷波深度及品质因数等重要参数，说明具体的检测和计算方法，给出测试结果，并附上原始数据。
 - 2) **现场实验**
 - A. 分别以标准心电信号发生器和实际人体 I 导联心电为输入信号，给出示波器显示的心电波形，如完成了选做内容 2，还需给出上位机显示的心电波形；
 - B. 针对通带增益、输入阻抗、共模抑制比、上下限截止频率、陷波深度及品质因数，以及系统功耗（如采用直流电池供电）等重要参数，说明具体的检测和计算方法，给出测试结果，并附上原始数据。
4. **分析与讨论（重点，需回答的思考题见第七部分）。**
5. 实验总结、体会、意见与建议。
6. 小组分工与合作情况。
7. 附元器件清单目录。
8. 附单片机及上位机程序清单（如完成了选做内容 1 和/或 2）。

七. 思考题

1. 设计实现的心电检测系统（包括 **Multisim** 仿真和现场实验）是否达到了预期性能指标？如没有达到，请详细分析具体原因；如达到了，请说明进一步改进或优化的具体措施。

2. 如何检测心电检测系统的输入阻抗、共模抑制比、上下限截止频率、陷波品质因数等指标？测试输入阻抗和共模抑制比时，输入信号的频率应如何选择？
3. 哪些因素会影响心电检测系统的共模抑制性能？
4. 结合实验结果，分析右腿驱动电路的作用和性能。
5. 50Hz 陷波电路为什么使用精密电阻、精密电容？如电阻、电容精度不高，对电路输出有何影响？你所设计的 50Hz 陷波电路性能如何？如性能不理想，可能是什么原因？
6. 心电检测系统对 A/D 模块的性能有哪些具体要求？
7. 现场实验中，采用人体 I 导联心电与标准心电信号发生器为输入时，输出波形有何差别？请分析主要原因。
8. 现场实验中，如完成了选做任务 2，请评价上位机程序能否实时检测心率等特征指标。
9. 现场实验中，如完成了选做任务 3，请说明系统功耗的检测方法，并给出测试结果。
10. 实验中你们还遇到了哪些关键问题，是如何解决的？

八. 现场实验的注意事项

1. 心电等人体生物电信号比较微弱，需尽可能减少周围环境的电磁干扰。设计模拟电路时，PCB 电路板的数量不宜太多，印刷导线（特别是电源线和地线）不宜太细，并需尽可能避免飞线，PCB 电路板可采取敷铜等措施降低干扰。

为便于调试，PCB 电路板上相邻 2 个模块之间（如前级放大与滤波之间，滤波与主放大之间等）建议布置 2 脚单排插针：如断开则可分级调试，避免后级对前级的影响；如接通（可采用短路子连接）则可联调。

2. 现场实验选做内容 1：需考虑单片机 A/D 转换模块的极性，单极性 A/D 模块无法直接采集心电信号的负电压，实验中需充分考虑修正方法；同时需考虑 A/D 模块的基准电压，合理调节模拟电路的放大倍数，如放大倍数能自适应调节更好。

3. 现场实验选做内容 3：如运放需正负电源供电，应采用正电源稳压与负电源稳压两种芯片（如 LM7805 和 LM7905，请注意两者引脚排列的区别）。