

第七章 微弱信号处理电路

7.2 心电信号处理电路

心电信号处理电路

- ◆ 心电信号 (electrocardiogram, ECG)
 - 人类最早研究并应用于临床医学的生物电信号之一
 - 比其它生物电信号更易于检测且具有较直观的规律性
- ◆ 微弱信号处理电路
 - 将传感器输出的弱电信号用模拟方法放大并处理为A/D变换器可处理的电平
 - 现代信号处理电路不可或缺的部分
- ◆ 心电信号处理电路（模拟部分）是典型的微弱信号处理电路

心电信号主要特征

- ◆ 微弱性：一般不超过5mV，典型值1mV，最小值20 μ V
- ◆ 低频特性：频谱范围一般为0.03~100Hz
- ◆ 高阻抗特性：可达几十k Ω
- ◆ 存在强大的干扰：
 - (1) 电极极化电压引起直流基线漂移：最大可达300mV
 - (2) 电源工频干扰：50Hz，可达几伏甚至几十伏
 - (3) 肌电干扰：频率几百赫兹以上
 - (4) 临床上还会存在高频电刀干扰

心电信号处理电路指标

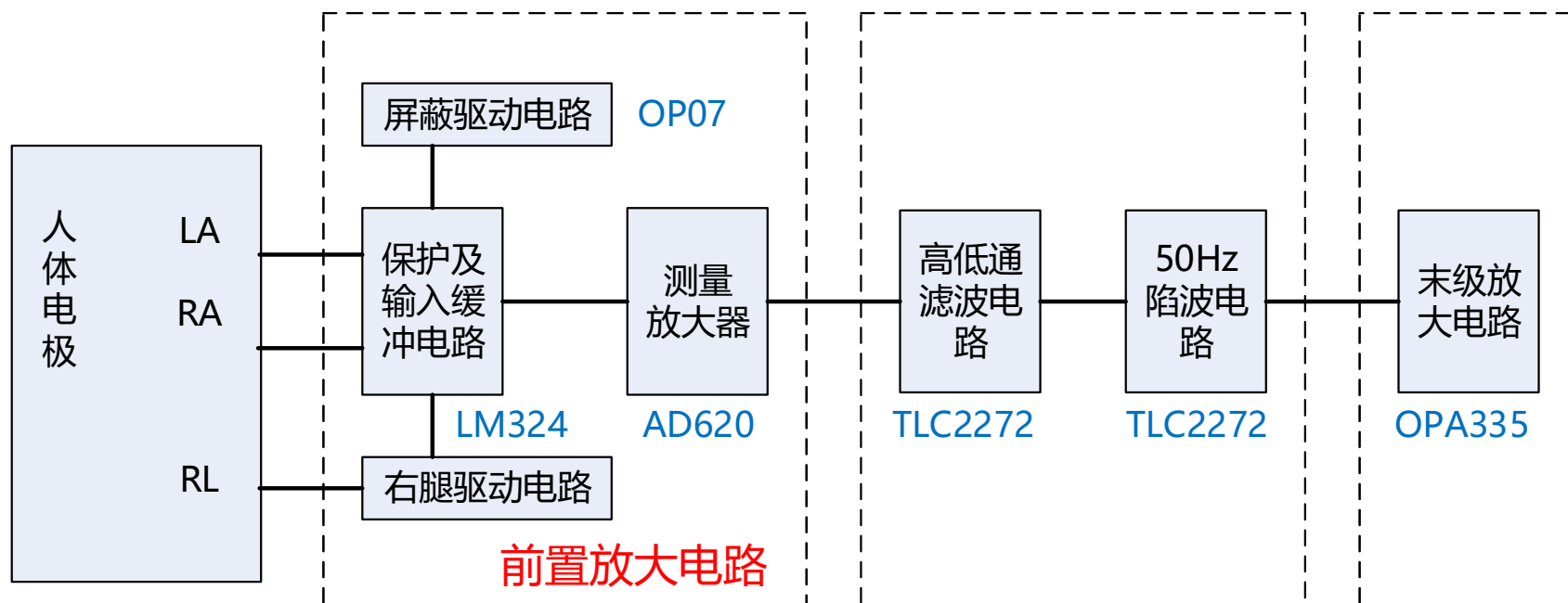
要求:

- (1) 高输入阻抗: 一般要求大于 $5\text{M}\Omega$
- (2) 高共模抑制比: 一般要求达到80dB以上
- (3) 低噪声、低漂移

主要指标:

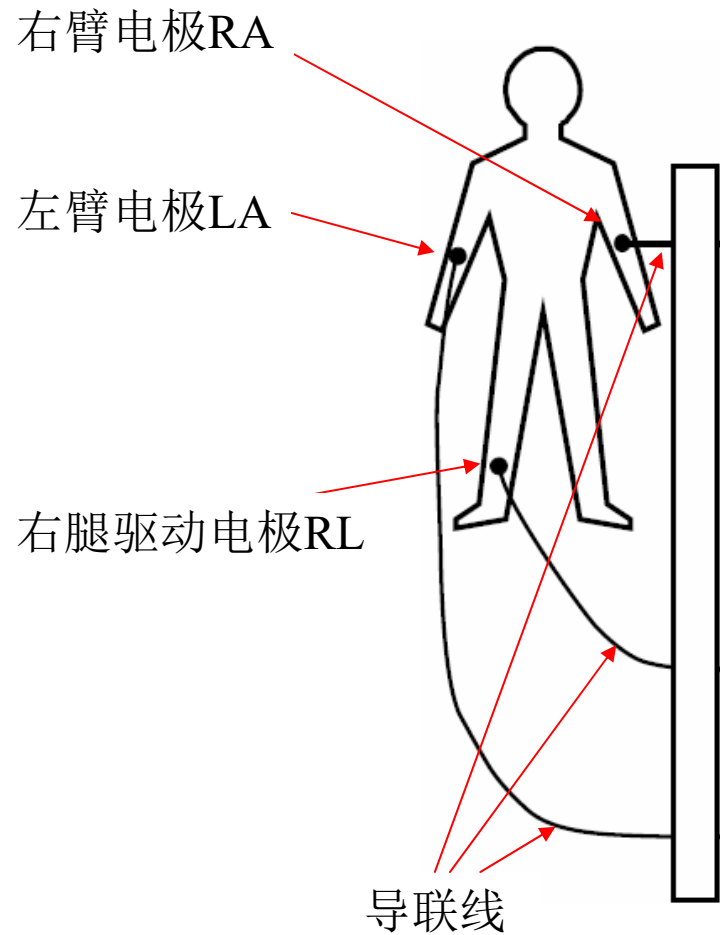
- ◆ 电压放大倍数: 1000, 误差 $\pm 5\%$
- ◆ -3dB低频截止频率: 0.05Hz
- ◆ -3dB高频截止频率: 100Hz, 误差 $\pm 10\text{Hz}$
- ◆ 频带内响应波动: $\pm 3\text{dB}$ 以内(不含 $50\text{Hz} \pm 5\text{Hz}$)
- ◆ 共模抑制比: 大于80dB(含1.5m长的屏蔽导联线, 共模输入电压范围: $\pm 7.5\text{V}$)
- ◆ 差模输入电阻: 大于 $5\text{M}\Omega$

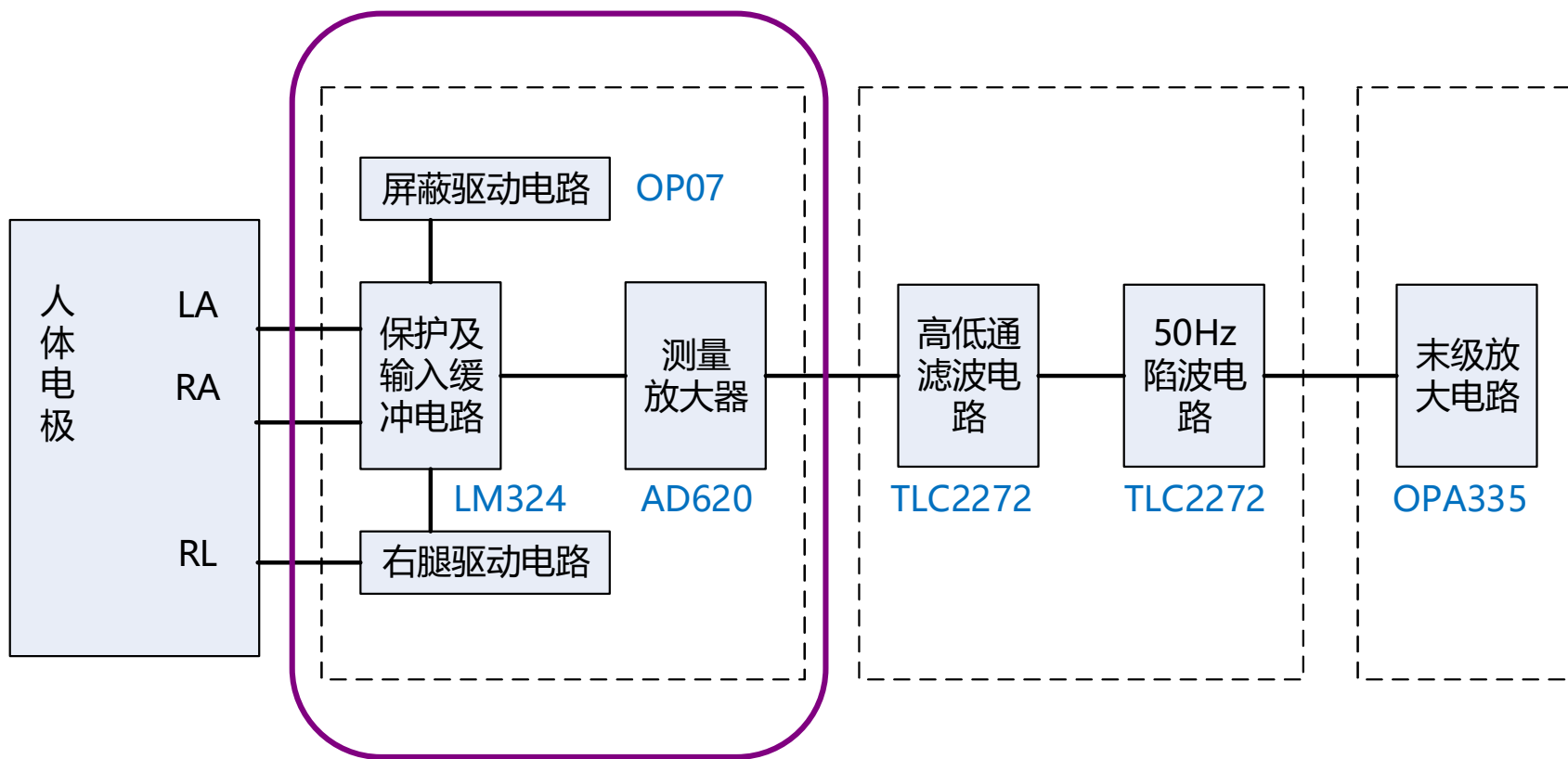
电路结构方案



- ◆ 二级放大方案
 - 前置放大+末级放大
- ◆ 前置放大电路
 - 测量放大器+右腿驱动/屏蔽驱动
- ◆ 高通滤波器
 - 滤除直流基线漂移电压
- ◆ 低通滤波器
 - 滤除100Hz以上高频噪声与干扰
- ◆ 陷波器，即带阻滤波器
 - 滤除50Hz电源工频干扰

电路结构方案





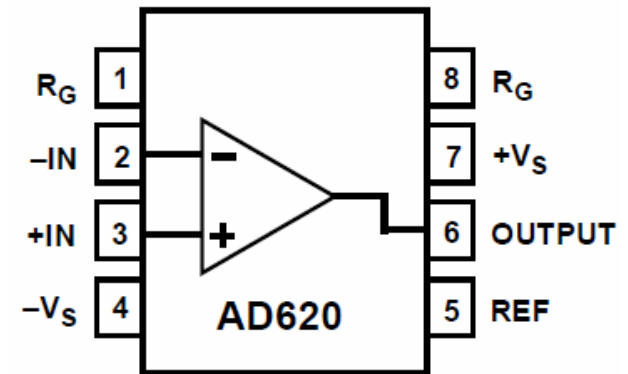
前置放大电路

前置放大器主体

- ◆ 采用AD620单片集成测量放大器
 - 内部已经集成了三运放
 - 只需外接一个电阻，即可精确地设置增益

$$G_d = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_G}$$

- ◆ 当G=100时，增益精度达0.15%

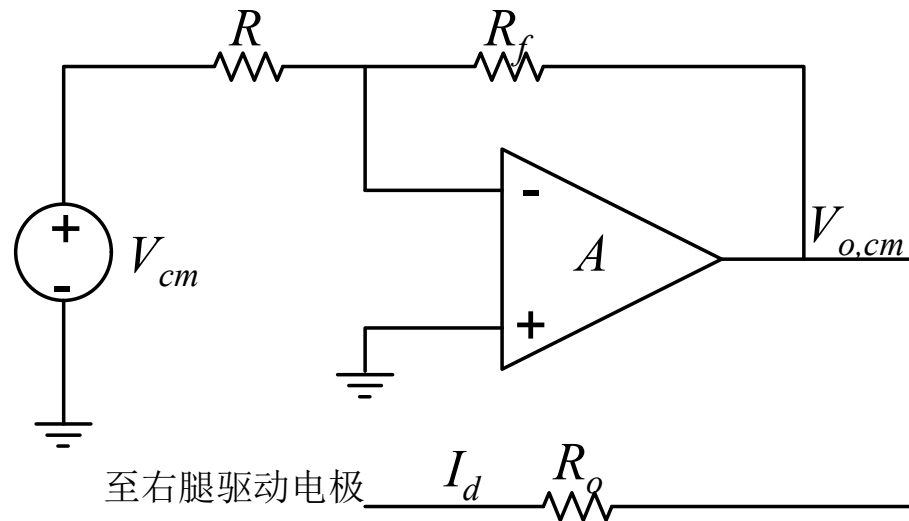


REF: 接参考电位
用户可以自定义单端
输出信号的参考基准

右腿驱动电路

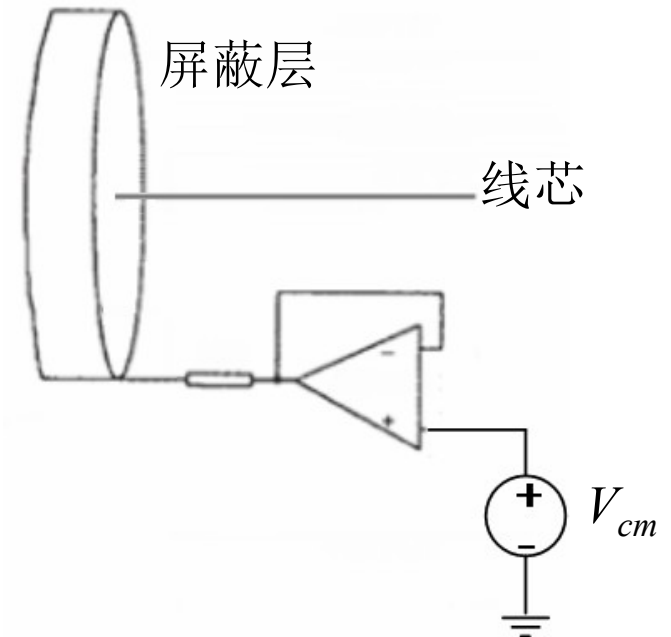
◆ 用于降低人体体表的共模干扰

- V_{cm} : 检测到的心电信号的共模分量, 反映人体体表的共模干扰
- 利用反相放大器将 V_{cm} 适当放大后, 反馈到右腿驱动电极, 与原来的体表电压叠加
- 如果反相放大器的增益大小合适, 原体表电压被反馈电压抵消, 从而降低共模干扰



共模屏蔽驱动电路

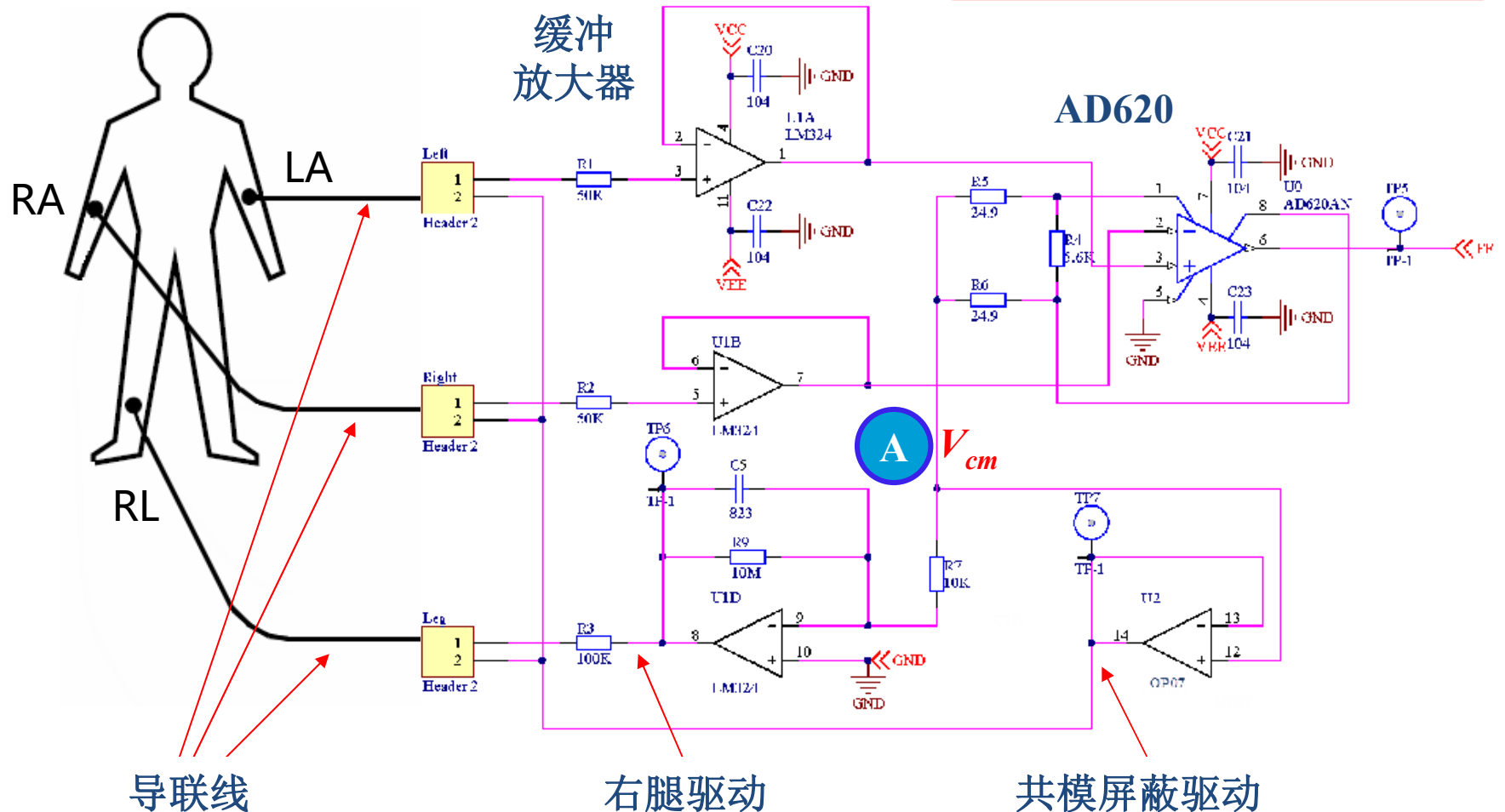
- ◆ 常规做法：导联线的屏蔽层接地
 - 导联线的线芯与屏蔽层之间的分布电容，将影响前置放大器的共模抑制比
- ◆ 共模屏蔽驱动电路：用于减小分布电容的影响
 - 利用同相放大器将 V_{cm} 适当放大后，连接到导联线的屏蔽层
 - 如果同相放大器的增益大小合适，导联线的屏蔽层与线芯之间没有电位差，分布电容几乎没有影响



前置放大电路

$$R_G = \frac{49.8 \times 5.6}{49.8 + 5.6} = 5.03k\Omega$$

$$G_d|_{\text{前置放大级}} = 1 + \frac{49.4}{5.03} = 10.82$$



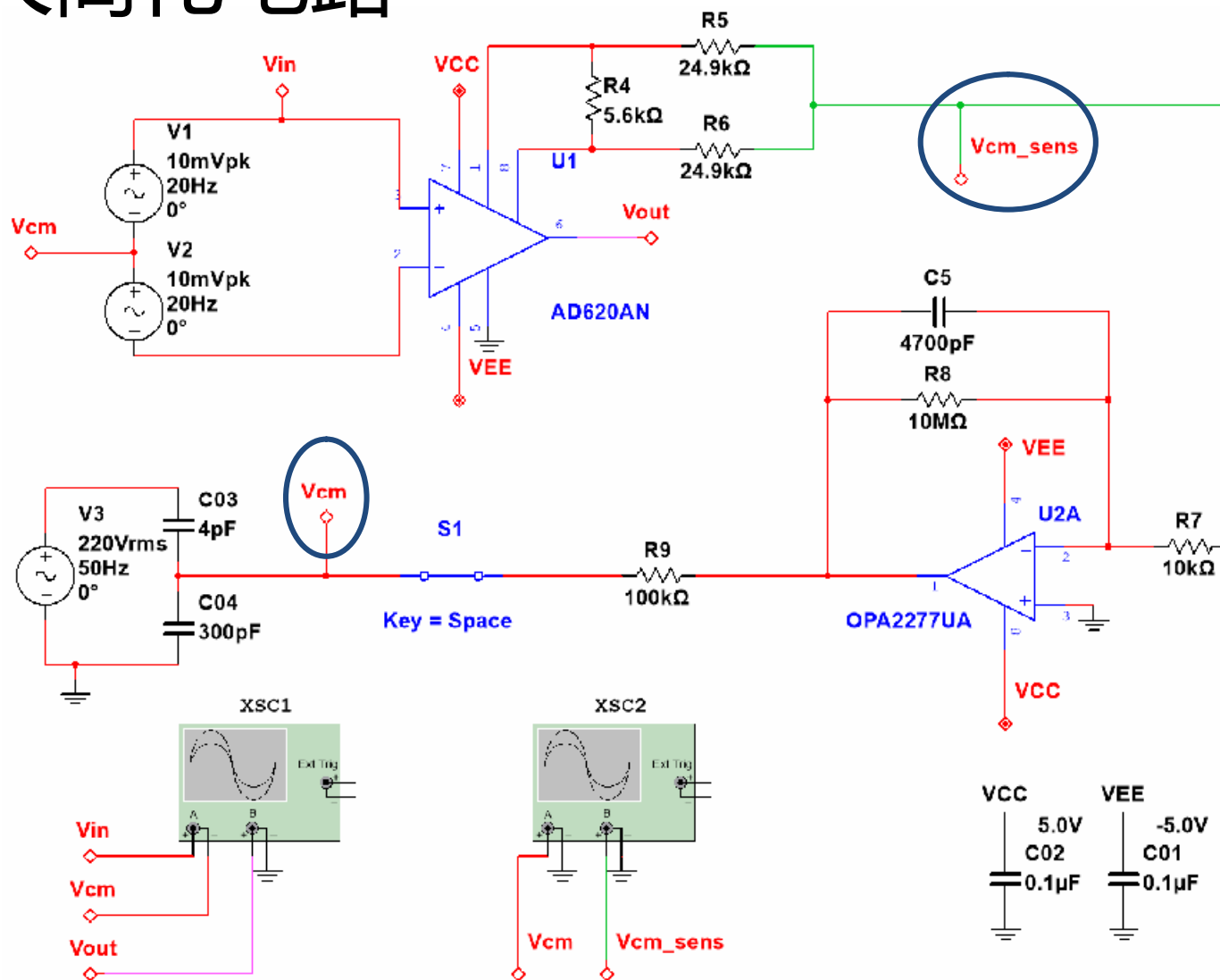
前置放大简化电路

心电信号用峰值为10mV的信号源替代

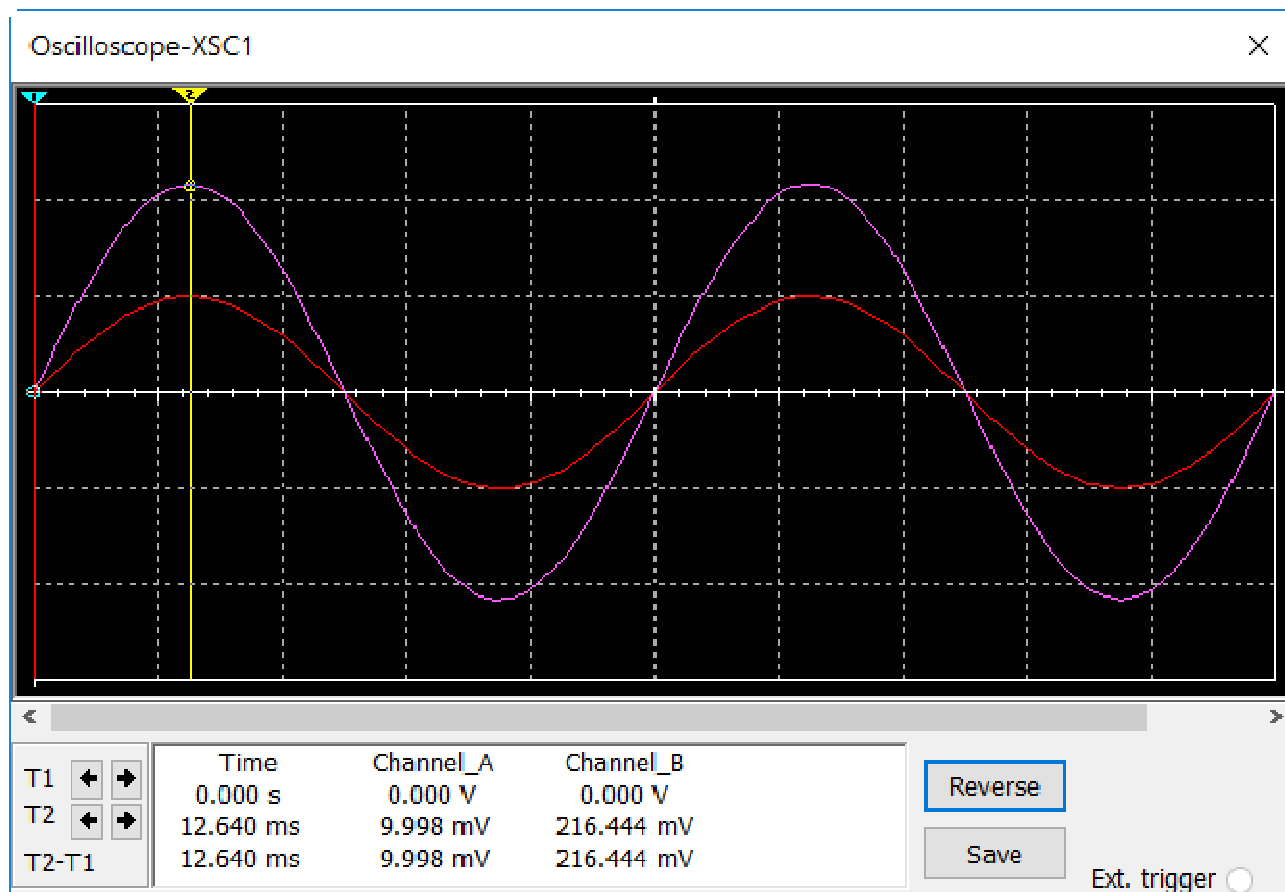
共模干扰电压

$$311 \times \frac{4}{300 + 4} \approx 4.09V$$

比模拟的心电信号大46dB

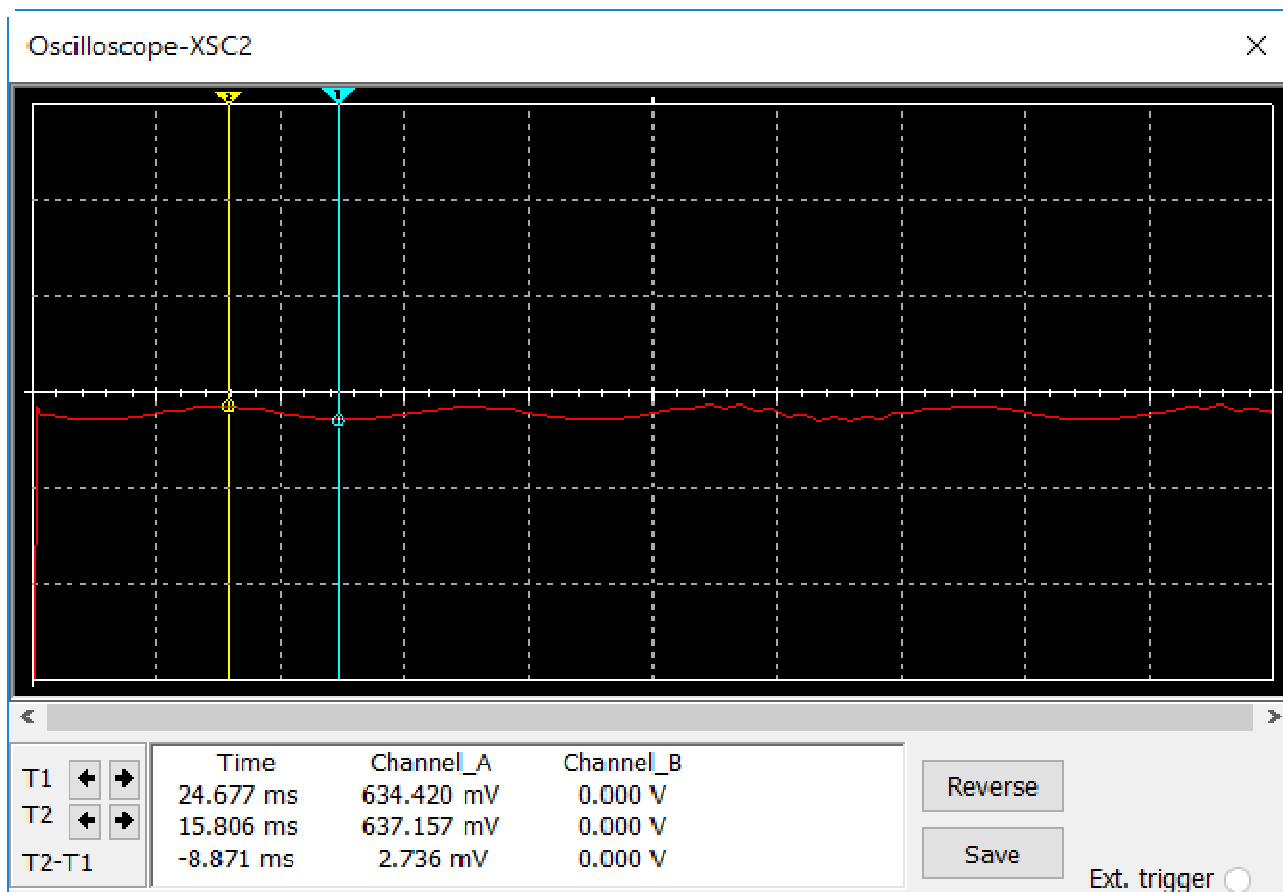


心电信号放大效果

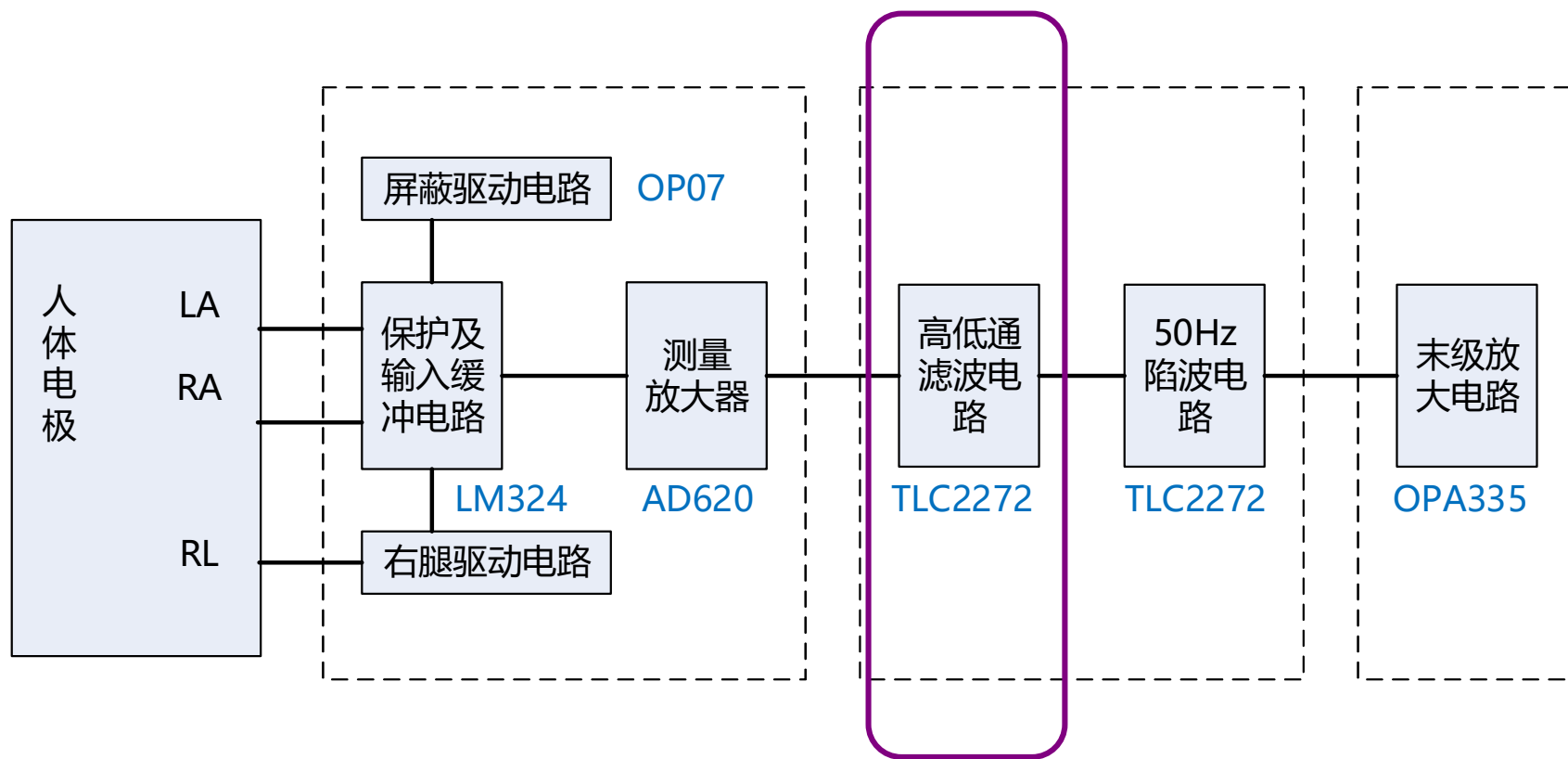


增益: $\frac{216}{20} = 10.8$

输入共模干扰抑制效果



接入右腿驱动电路后，输入共模干扰衰减为 $(636 \pm 1.4)\text{mV}$ ，与 4.09V 的原共模干扰相比，得到了有效抑制



滤波电路

滤波电路要求及结构

滤波电路要求：

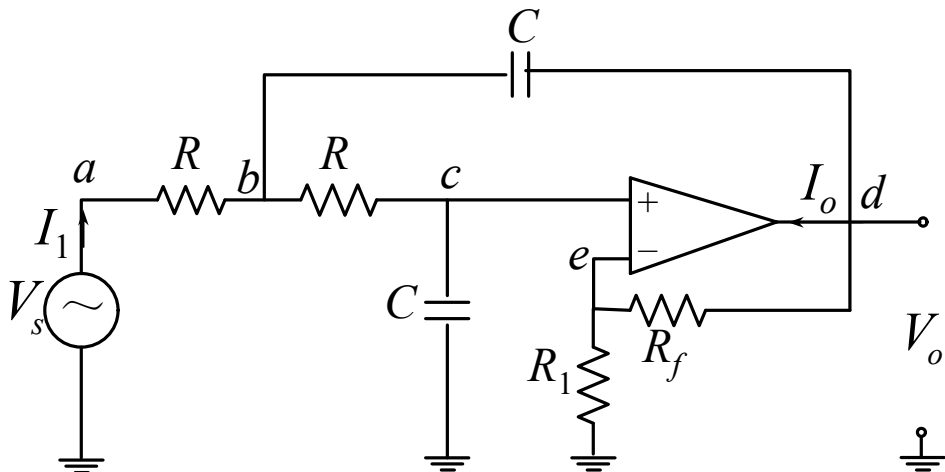
- ◆ -3dB低频截止频率：0.05Hz
- ◆ -3dB高频截止频率：100Hz
- ◆ 带内：幅频特性平坦，且有一定增益
- ◆ 带外：衰减达到80dB/10倍频程

滤波电路结构：

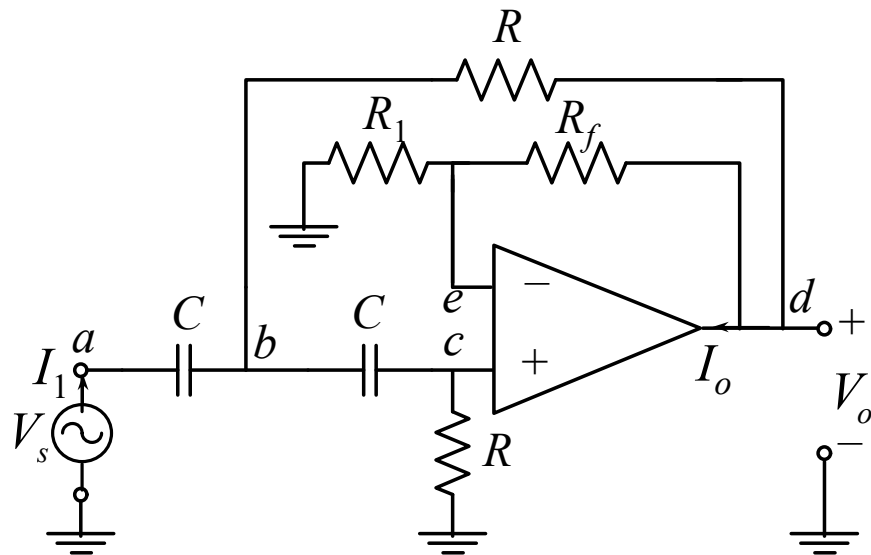
- ◆ 低通滤波器与高通滤波器串联，得到带通滤波特性

滤波电路设计

- ◆ 低通/高通滤波电路设计
- ◆ 根据带内平坦特性要求
 - 二阶有源RC滤波器
- ◆ 根据带外衰减特性要求
 - 2个二阶滤波器级连, 构成四阶滤波器



低通滤波器



高通滤波器

滤波电路设计

指标:

- ◆ 带内电压增益

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

- ◆ 截止频率

$$\omega_n = \frac{1}{RC}$$

$$f_p = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

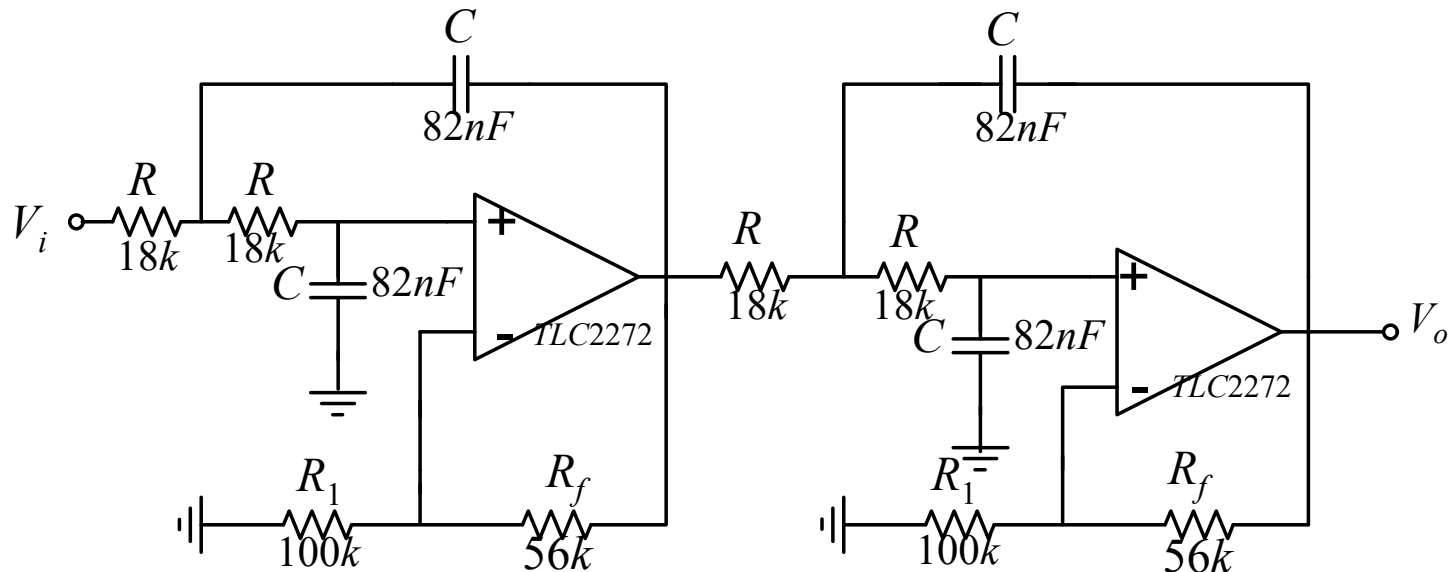
- ◆ 品质因数

$$Q = \frac{1}{3 - A_v}$$

◆ 设计过程:

- ◆ 取 $Q=0.707$ ，以保证带内平坦度，由此求出 A_v
- ◆ 由 A_v 决定 R_f/R_1 ，选取 R_1 ，再定 R_f
- ◆ 选取 C ，由 f_p 决定 R

低通滤波器



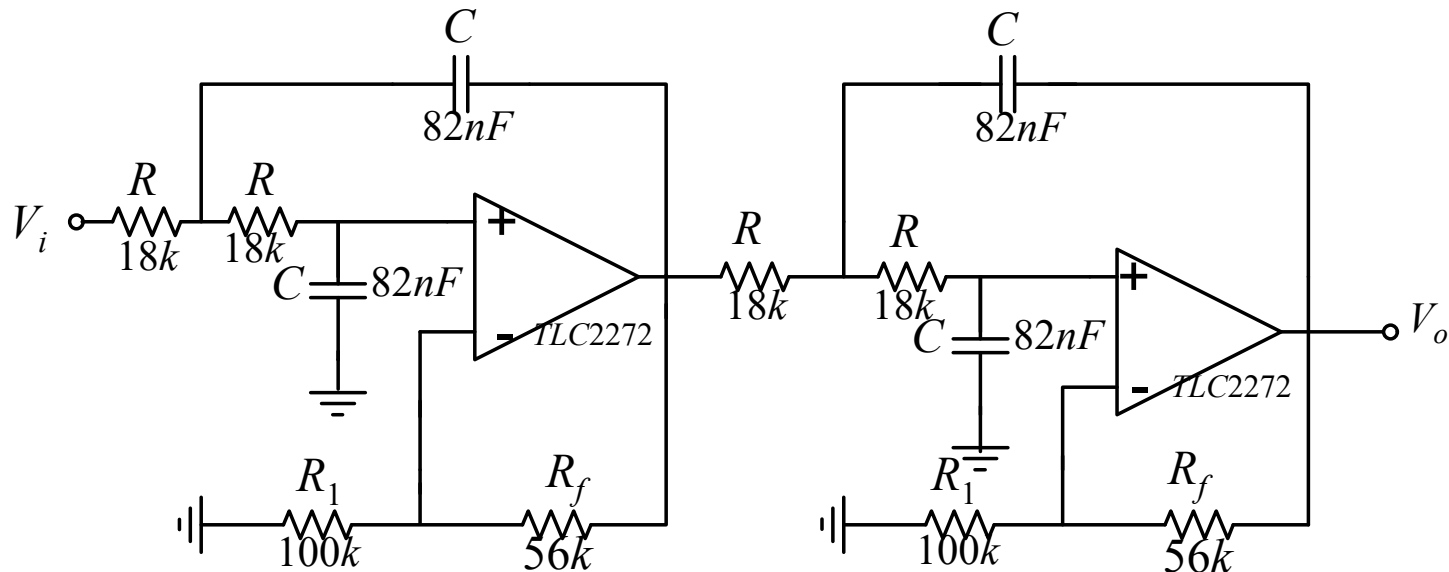
$$Q = \frac{1}{3 - A_v} = 0.707 \rightarrow A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1.586 \rightarrow \frac{R_f}{R_1} = 0.586$$

$$R_1 = 100k\Omega$$

$$\rightarrow R_f = 58.6k\Omega$$

$$R_f = 56k\Omega$$

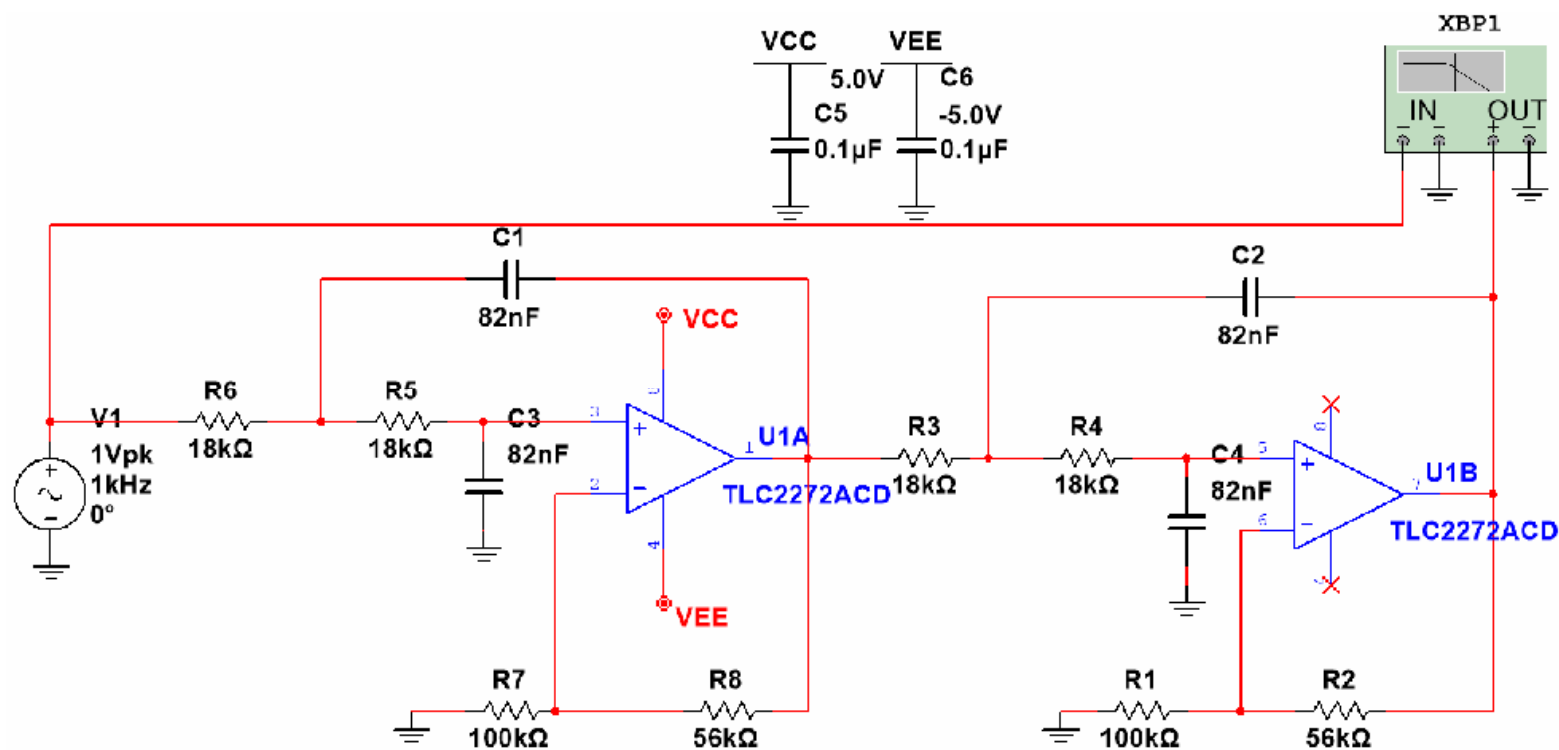
低通滤波器



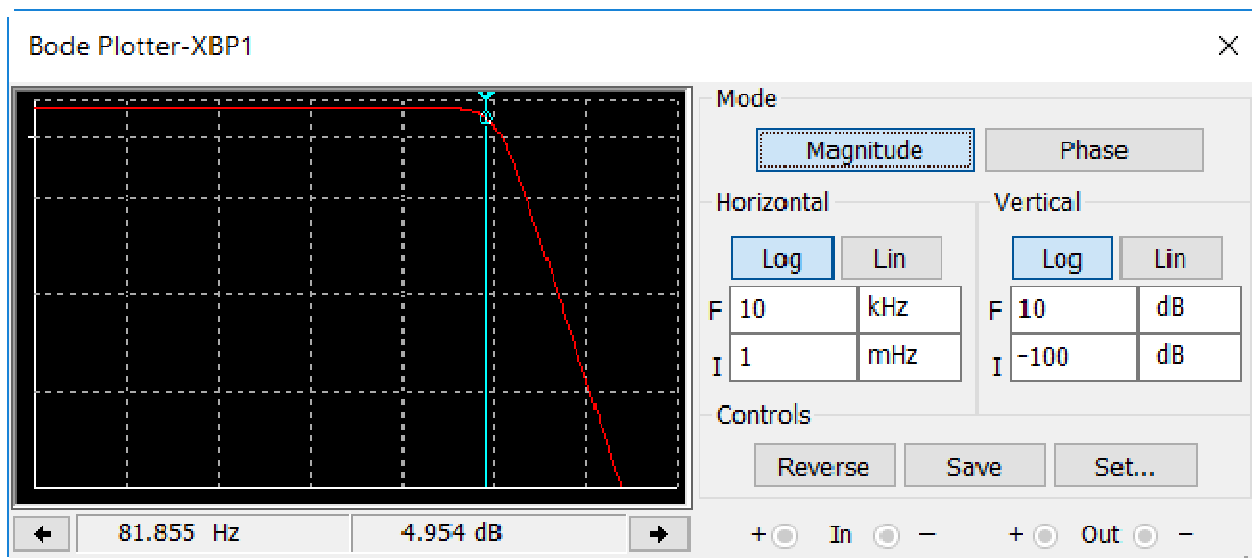
$$f_p = \frac{1}{2\pi RC} = 100Hz$$

$$C = 82nF \rightarrow R = 19.4k\Omega \quad R = 18k\Omega$$

低通滤波器仿真



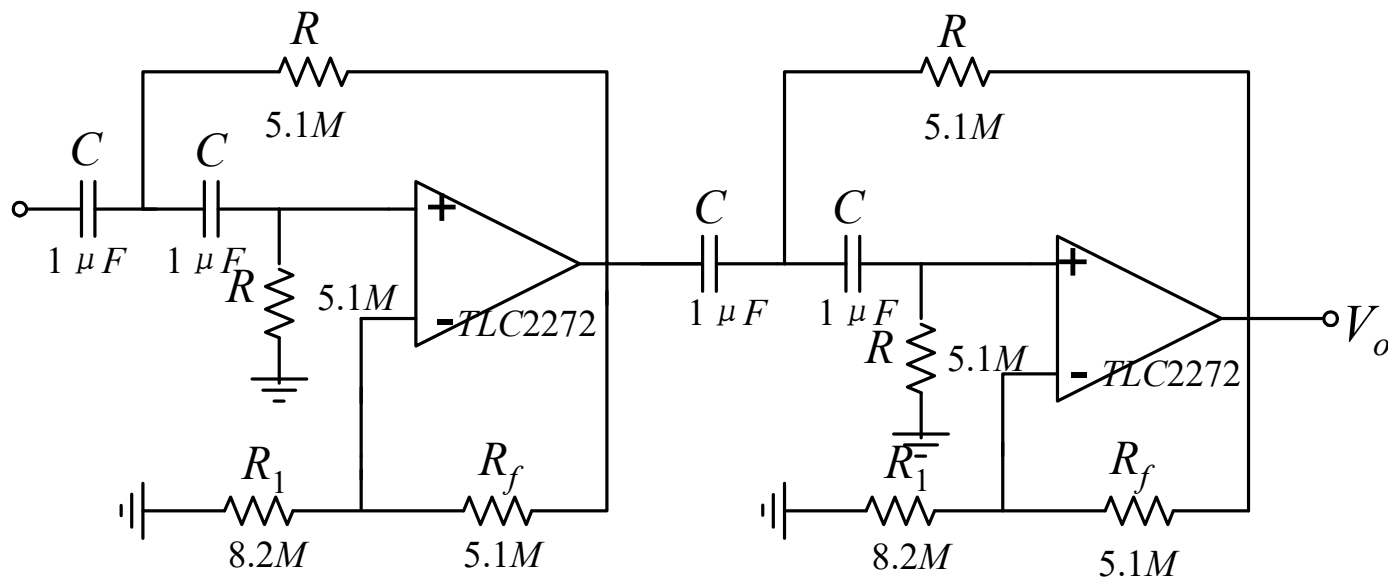
低通滤波器仿真



带内增益: 7.7dB

截止频率: 84Hz

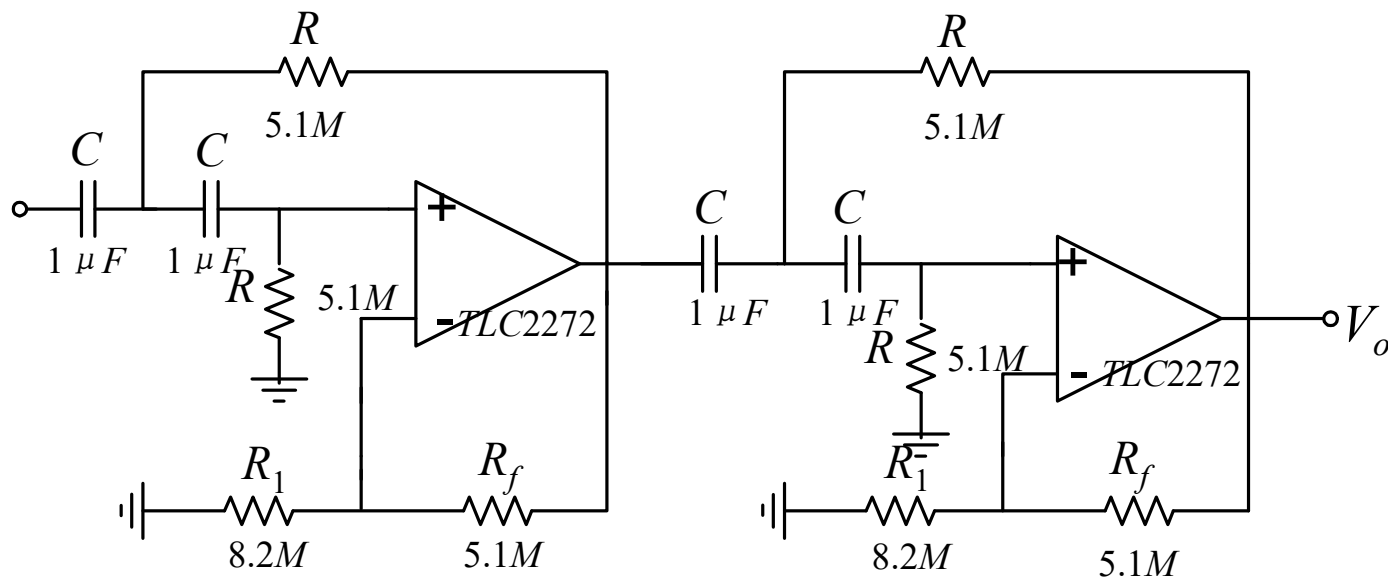
高通滤波器



$$Q = \frac{1}{3 - A_v} = 0.707 \rightarrow A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1.586 \rightarrow \frac{R_f}{R_1} = 0.586$$

$$\boxed{R_1 = 8.2M\Omega} \rightarrow R_f = 4.8M\Omega \quad \boxed{R_f = 5.1M\Omega}$$

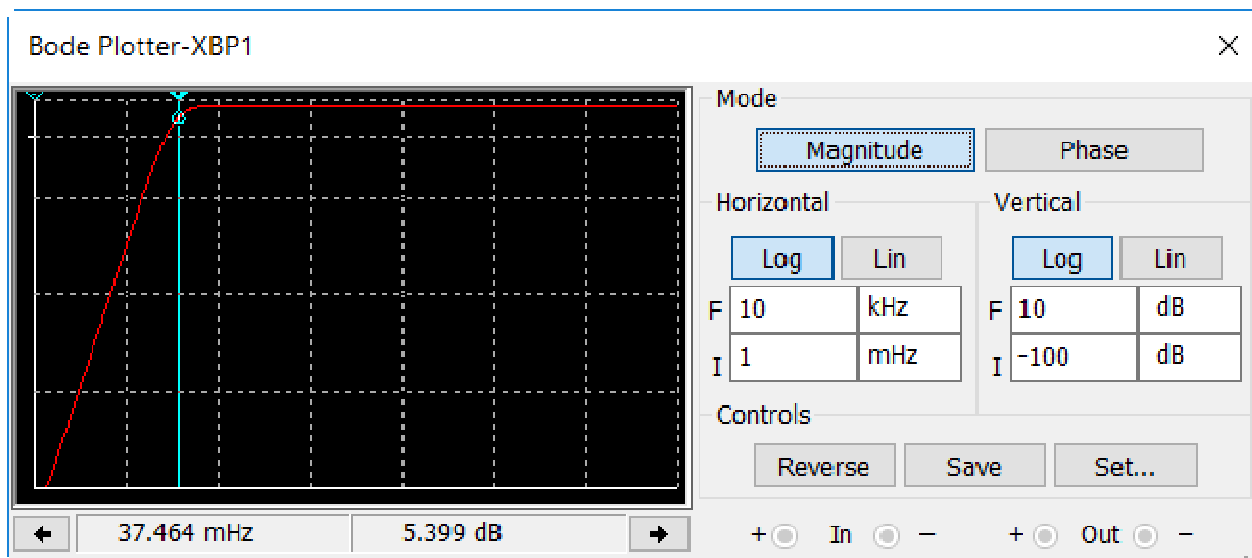
高通滤波器



$$f_p = \frac{1}{2\pi RC} = 0.03Hz$$

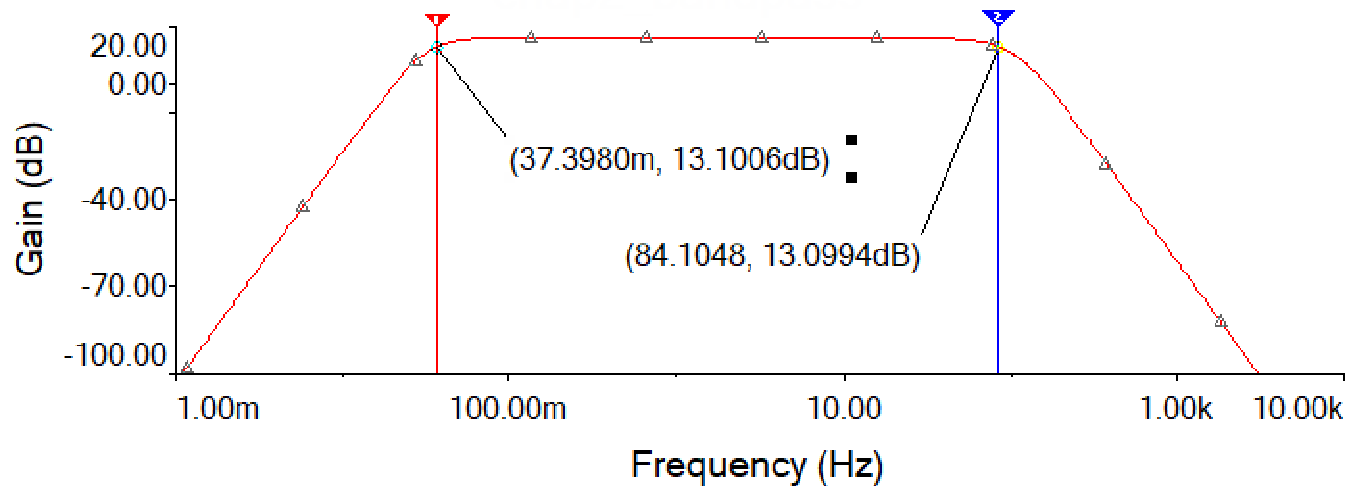
$$C = 1\mu F \rightarrow R = 5.3M\Omega \quad R = 5.1M\Omega$$

高通滤波器仿真

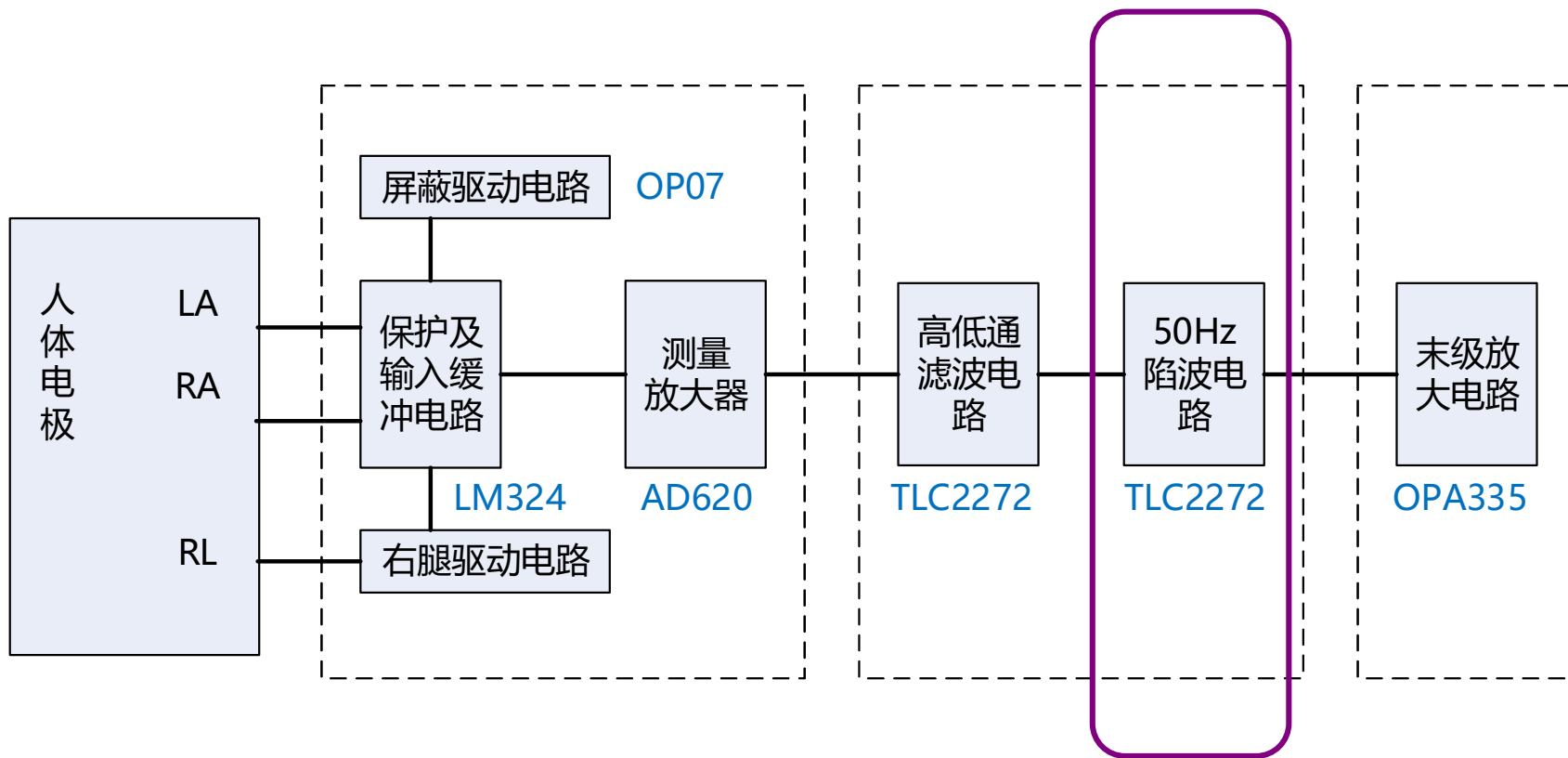


带内增益: 8.4dB
截止频率: 0.04Hz

带通滤波器



带内增益: 16.1dB
低频截止频率: 0.04Hz
高频截止频率: 84Hz



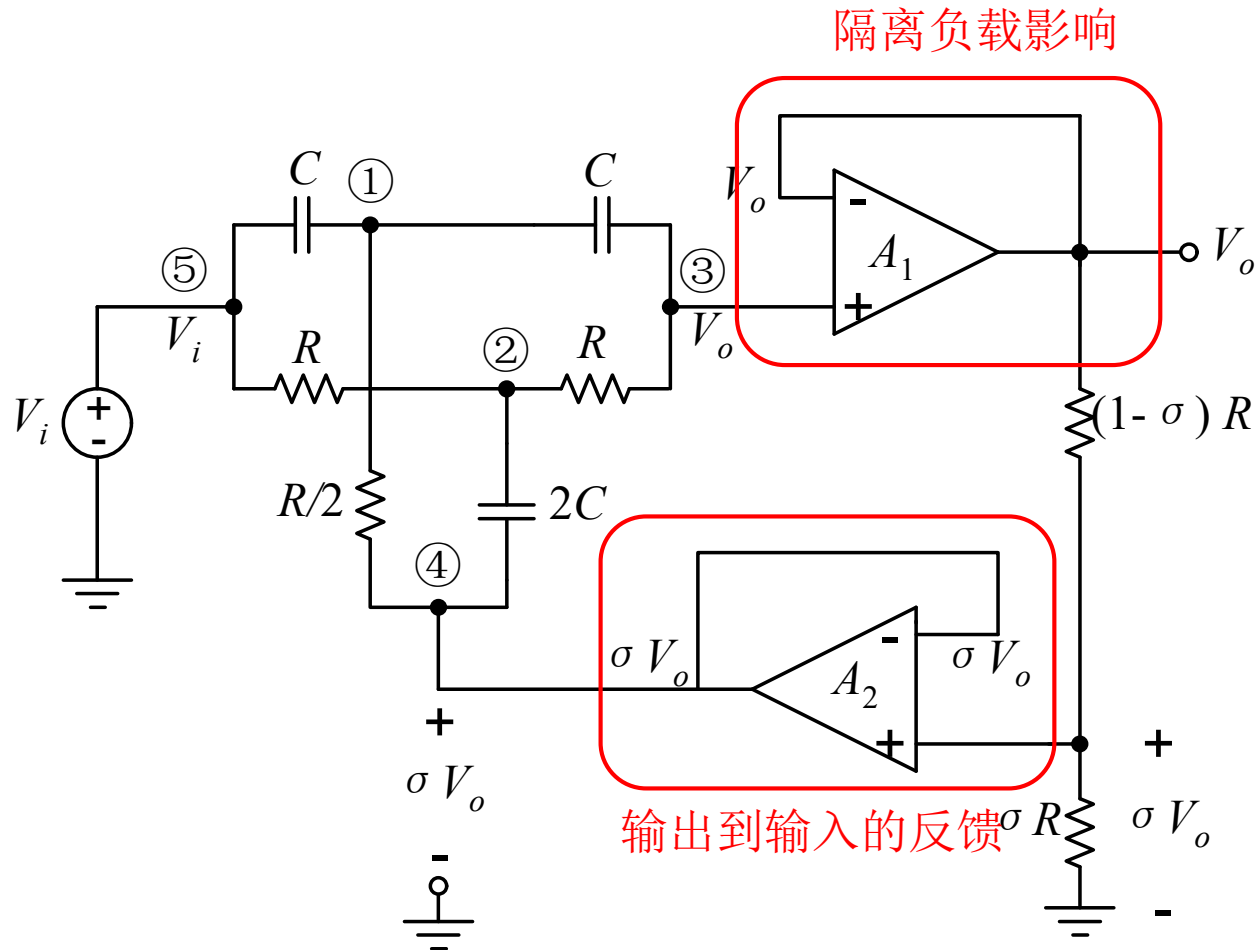
陷波电路

陷波电路

- ◆ 用于滤除50Hz的电源线干扰
- ◆ 起滤波作用的两个T形网络：
 - 由C-C-R/2组成的高通滤波器
 - 由R-R-2C构成的低通滤波器
 - 两个滤波器并联，截止频率相同
- ◆ 频率响应

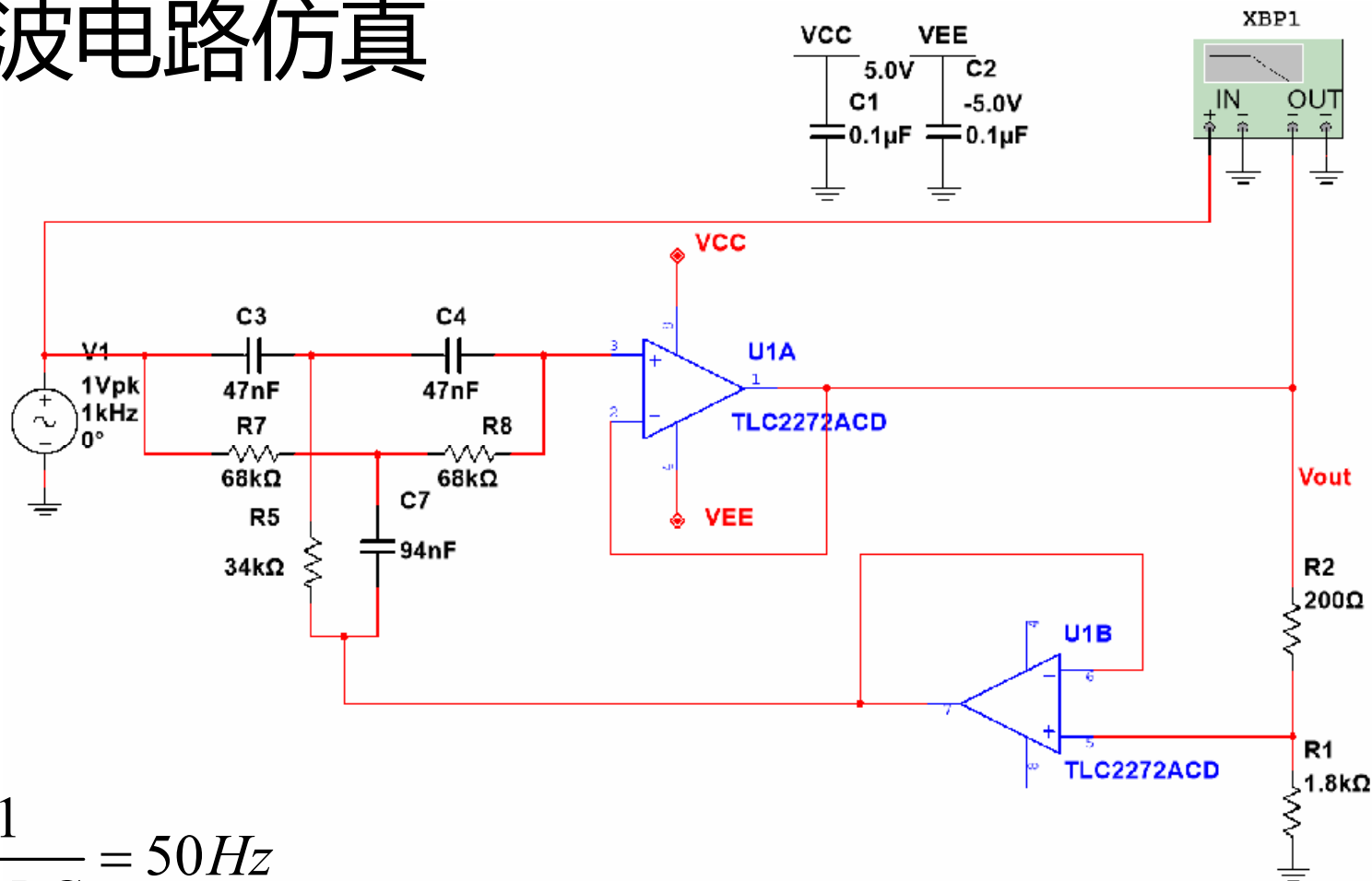
$$H(j\omega) = \frac{-\omega^2 R^2 C^2 + 1}{-\omega^2 R^2 C^2 + 4j\omega RC(1 - \sigma) + 1} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j4\omega\omega_0(1 - \sigma)}$$
$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

陷波电路



双T结构陷波器

陷波电路仿真



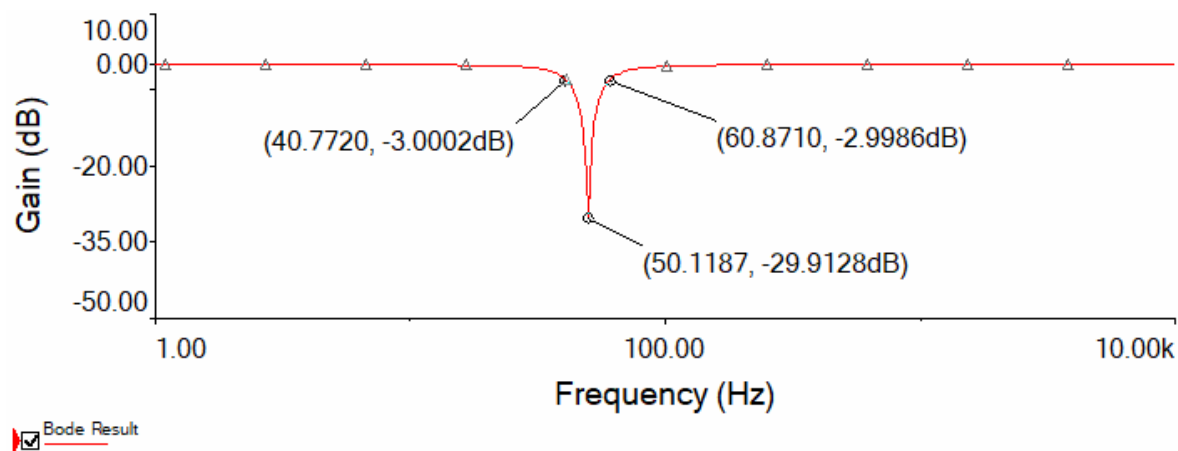
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 50Hz$$

$$C = 47nF \rightarrow R = 67.7k\Omega \quad R = 68k\Omega$$

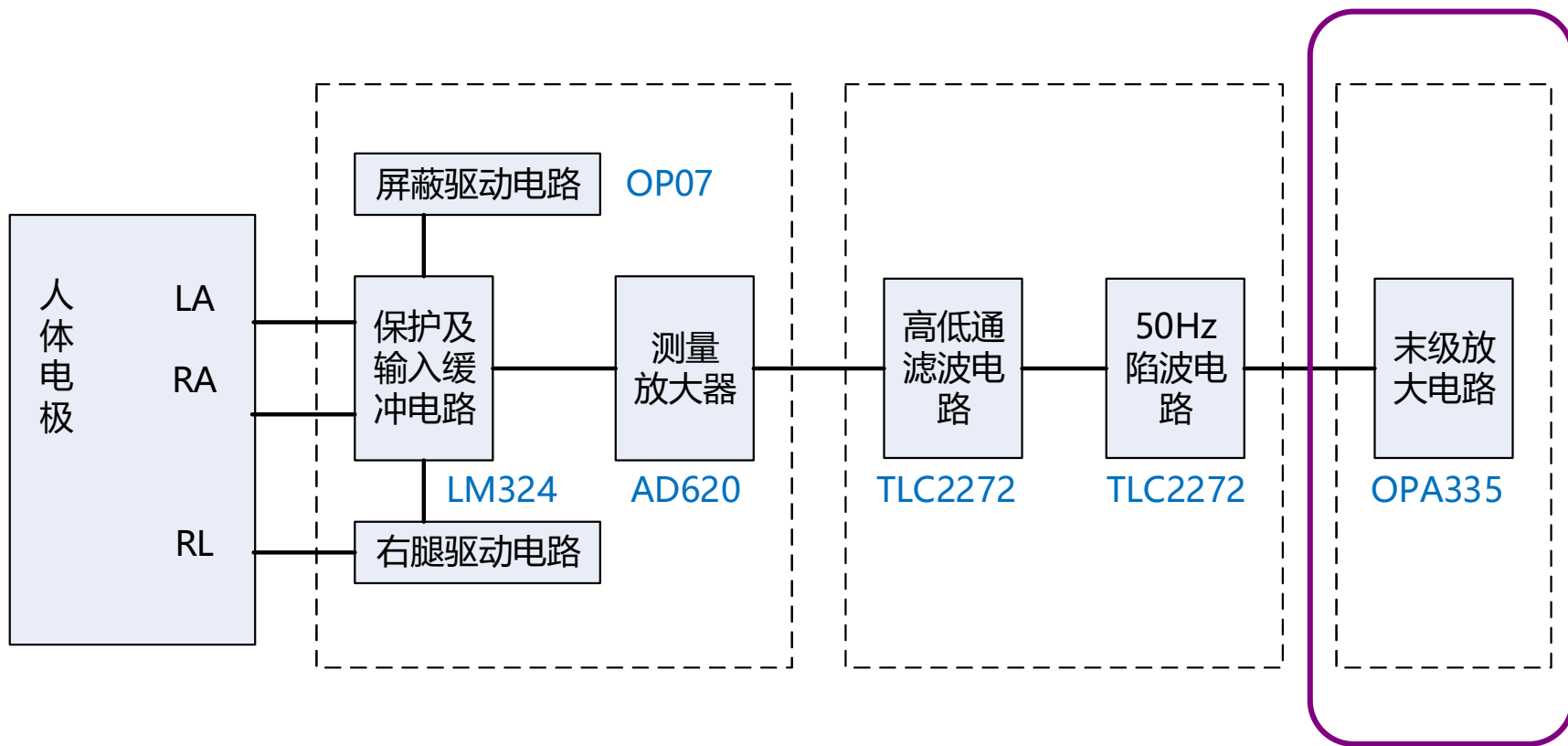
$$\sigma = 0.9$$

$$\rightarrow R_1 = 1.8k\Omega, R_2 = 200\Omega$$

陷波电路仿真



频率为50Hz时，插入损耗>20dB



末级放大电路

末级放大电路

增益要求:

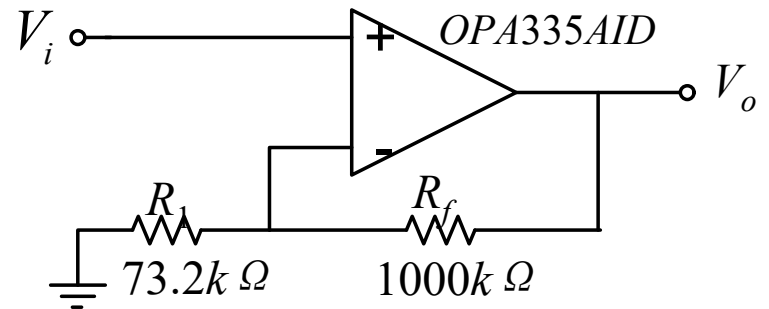
$$60 - 20.7 - 16.1 = 23.2(dB) = 14.5$$

- ◆ 采用同相放大器

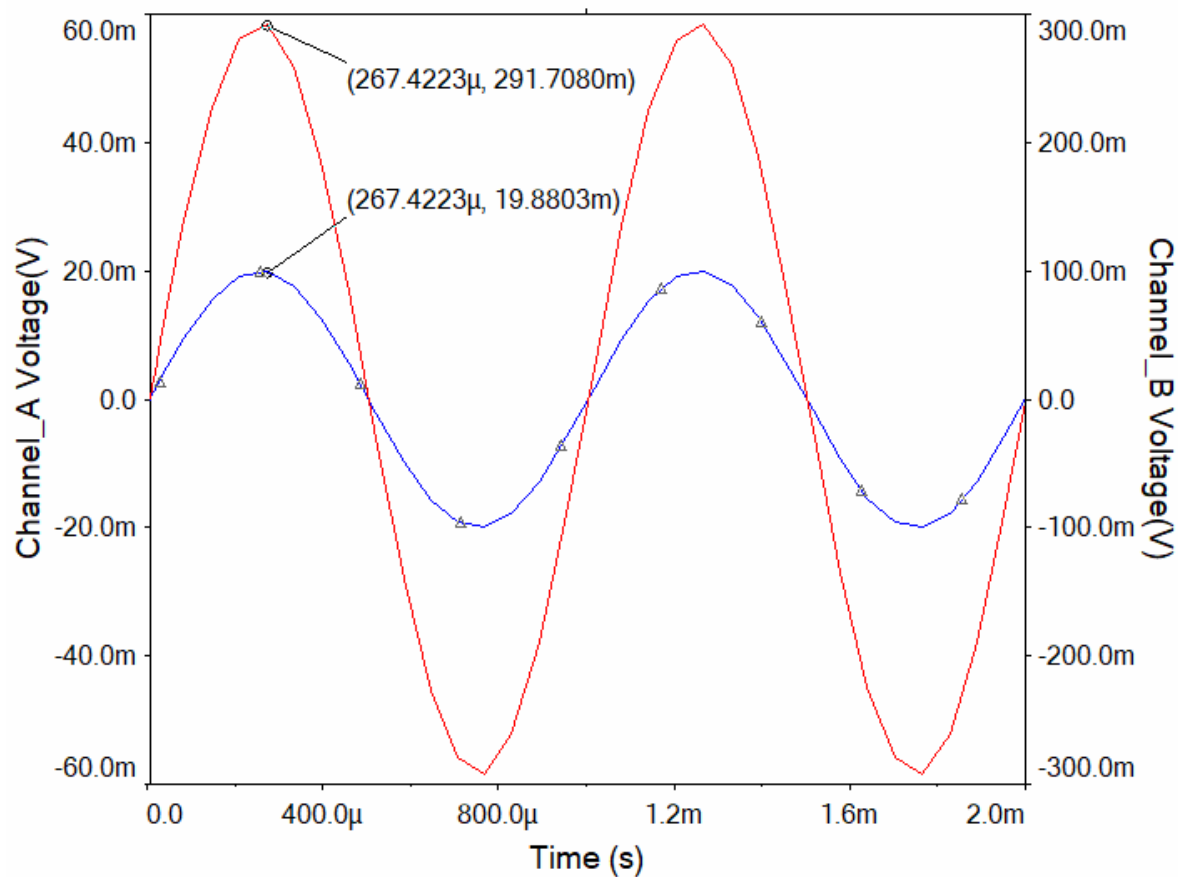
$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$R_f = 1M\Omega, \quad R_1 = 73.2k\Omega$$

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 14.7$$



末级放大电路仿真



增益: $\frac{292}{20} = 14.6$