

第二章 运算放大器及其线性应用

——2.1 放大电路的基本指标

李泳佳

东南大学电子系国家ASIC工程中心

yongjia.li@outlook.com





2.1 放大电路的基本指标

本节内容

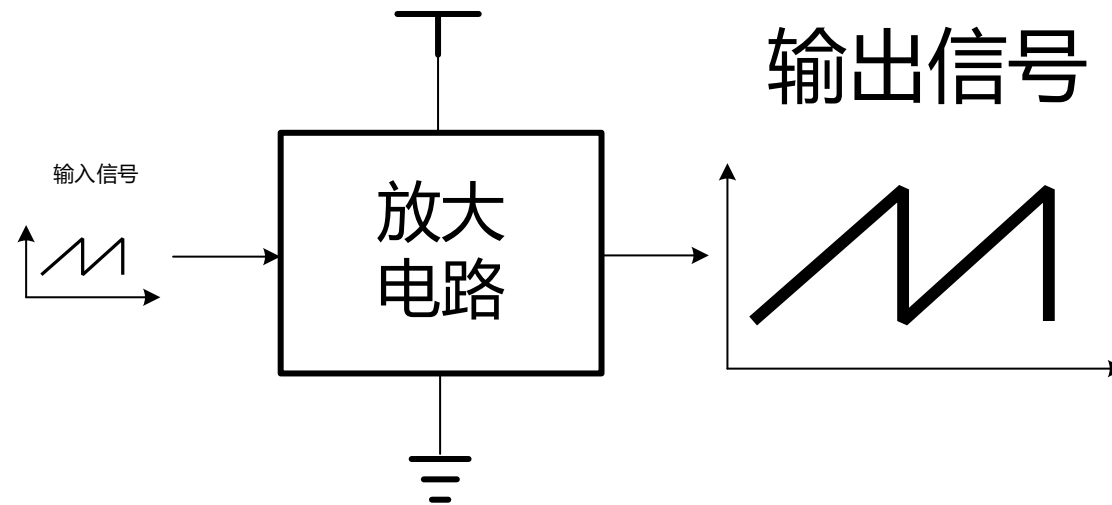
2.1.1 放大电路的基本概念

2.1.2 放大电路的性能指标

2.1.1 放大电路的基本概念

✓ 放大电路：

- **放大器**，以**电流**或者**电压**的形式放大微弱信号
- 能量来自电源，但经过放大电路内部晶体管控制
- 输入信号形状任意，输出信号应该不失真
- 可以是集成的，也可以用分立器件搭建



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 放大倍数:

- **增益**，输出量与输入量的比值
- 输入输出量可以是电压，电流的任意组合
- 从基本的二端口网络入手分析



✓ **电压增益:** $A_v = \frac{v_o}{v_i}$

✓ **电流增益:** $A_i = \frac{i_o}{i_i}$

✓ **跨阻增益:** $A_r = \frac{v_o}{i_i} \quad (\Omega)$

✓ **跨导增益:** $A_g = \frac{i_o}{v_i} \quad (S)$



2.1.2 放大电路的性能指标

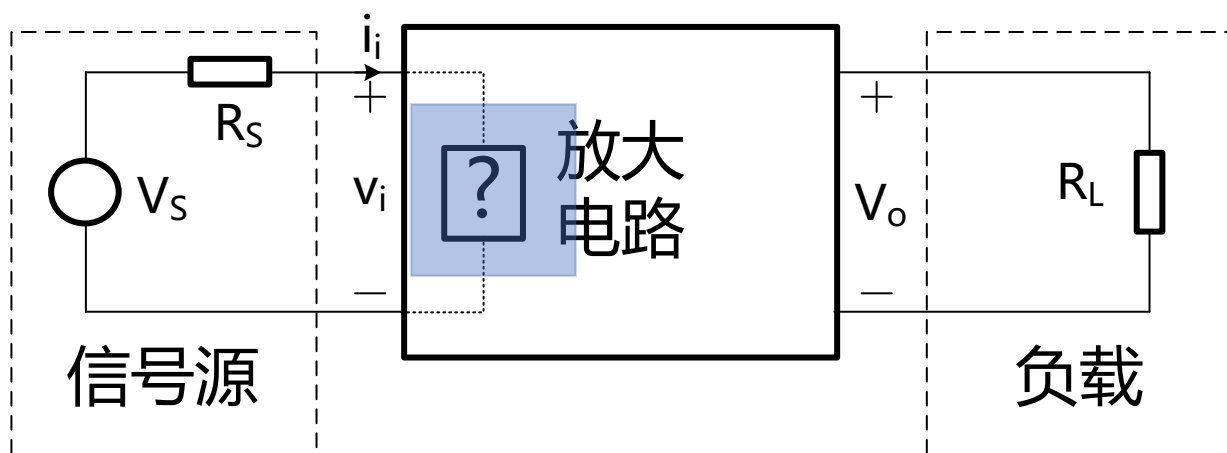
✓ 放大倍数:

- **增益**, 输出量与输入量的比值
- 输入输出量可以是电压, 电流的任意组合
- 两种表达形式: 倍数和分贝 (dB)
 - 假如 $A_v = 1000$, 转换为分贝就是 $20 \times \log_{10} A_v = 60\text{dB}$
 - 本质是对数操作, 可以把乘法变成加减法
 - 很多应用场景数值范围很大, 跨几个数量级
 - 有时候是 $10 \times \log_{10} A$?

2.1.2 放大电路的性能指标


✓ 输入阻抗:

- 放大电路的输入端电压与输入端电流的比值
- 从放大电路输入端看进去的**等效阻抗**: $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$



电阻 

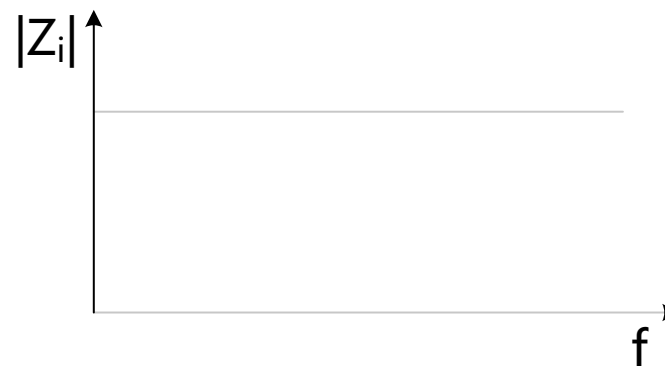
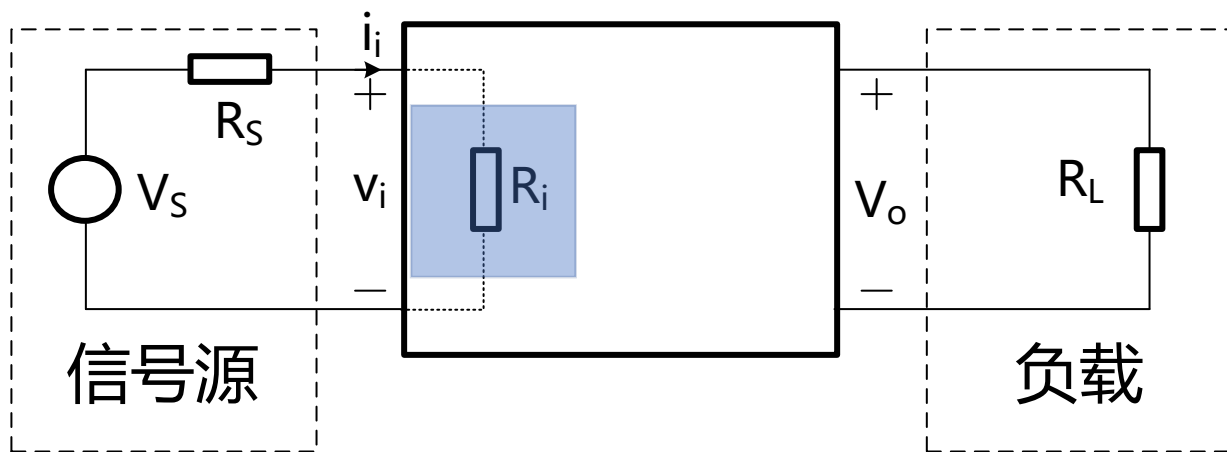
电容 

电感 

2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 输入阻抗:

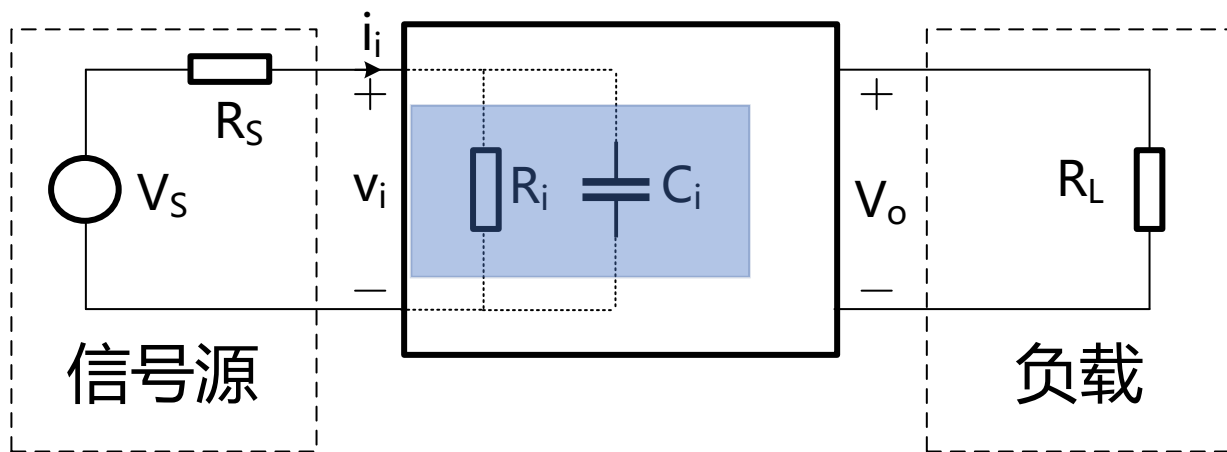
- 放大电路的输入端电压与输入端电流的比值
- 从放大电路输入端看进去的等效阻抗: $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$
- 如果输入阻抗是**电阻**



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 输入阻抗:

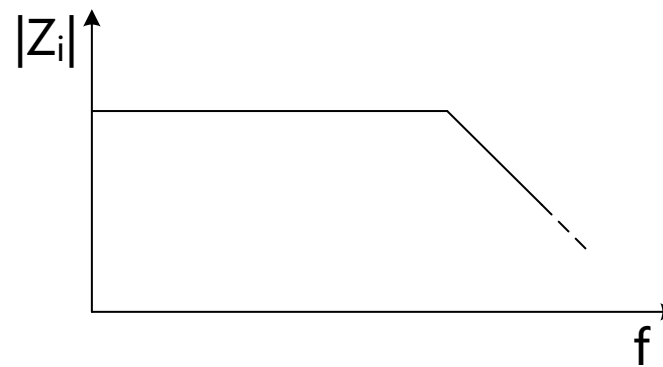
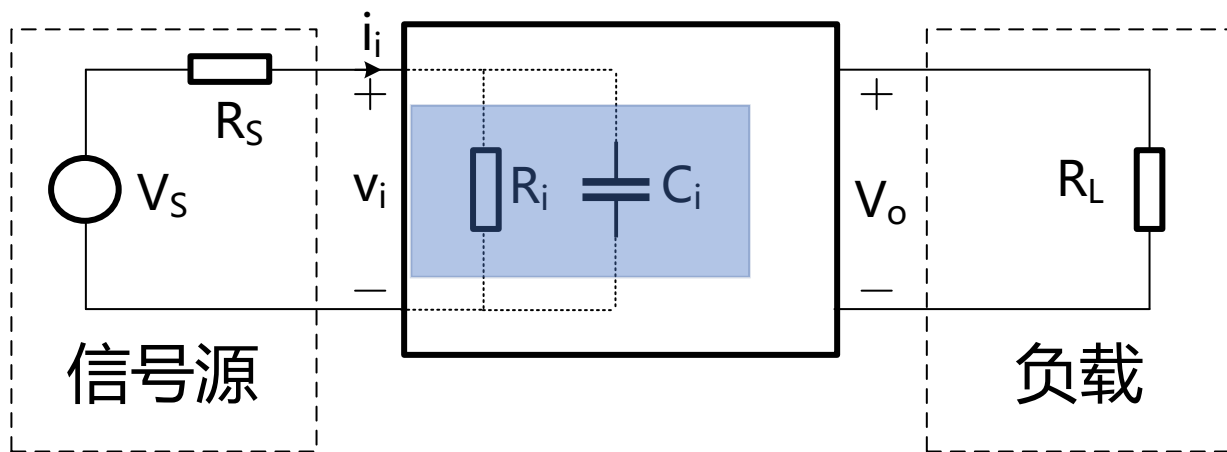
- 放大电路的输入端电压与输入端电流的比值
- 从放大电路输入端看进去的等效阻抗: $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$
- 如果输入阻抗是**电阻与电容的并联**



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 输入阻抗:

- 放大电路的输入端电压与输入端电流的比值
- 从放大电路输入端看进去的等效阻抗: $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$
- 如果输入阻抗是**电阻与电容的并联**，**如何得到阻抗？计算**



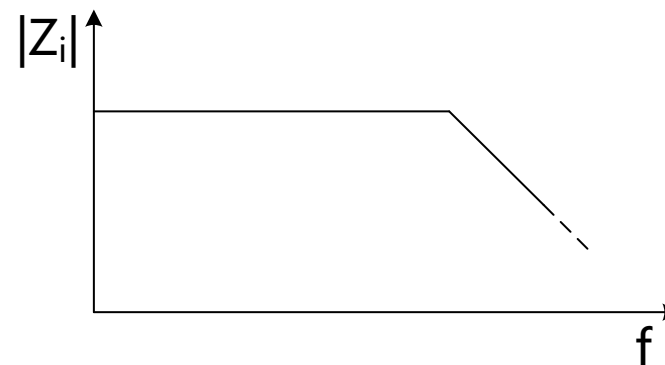
2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 输入阻抗:

- 放大电路的输入端电压与输入端电流的比值
- 从放大电路输入端看进去的等效阻抗: $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$
- 如果输入阻抗是**电阻与电容的并联**，**如何得到阻抗？计算**

- 拉普拉斯变换 $\rightarrow Z_i = \frac{R_i \times \frac{1}{sC_i}}{R_i + \frac{1}{sC_i}} = \frac{R_i}{1 + sR_iC_i}$

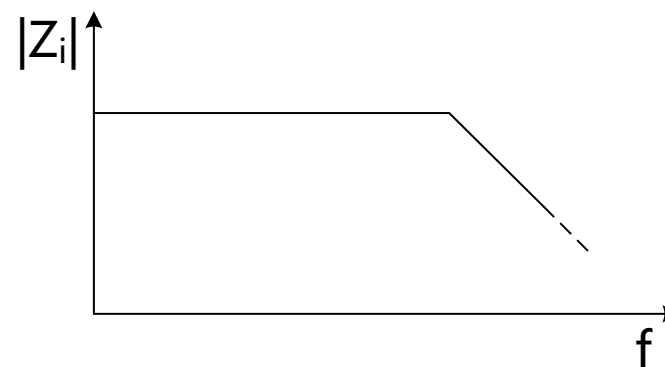
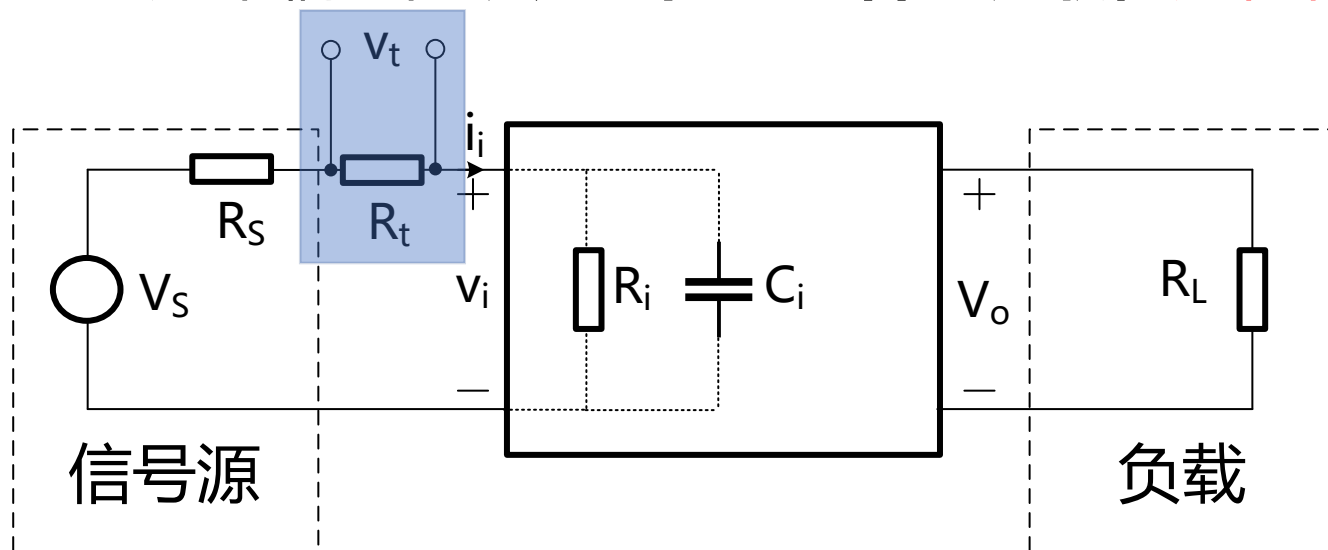
$\rightarrow |Z_i| = \frac{R_i}{1 + 2\pi f R_i C_i}$



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 输入阻抗:

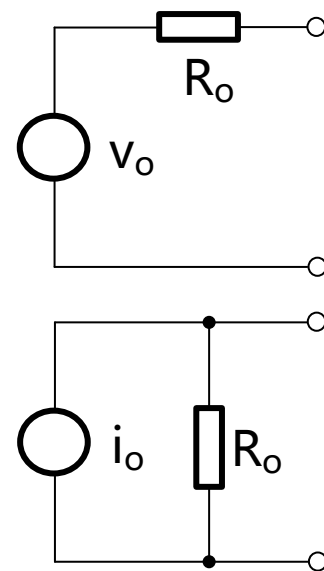
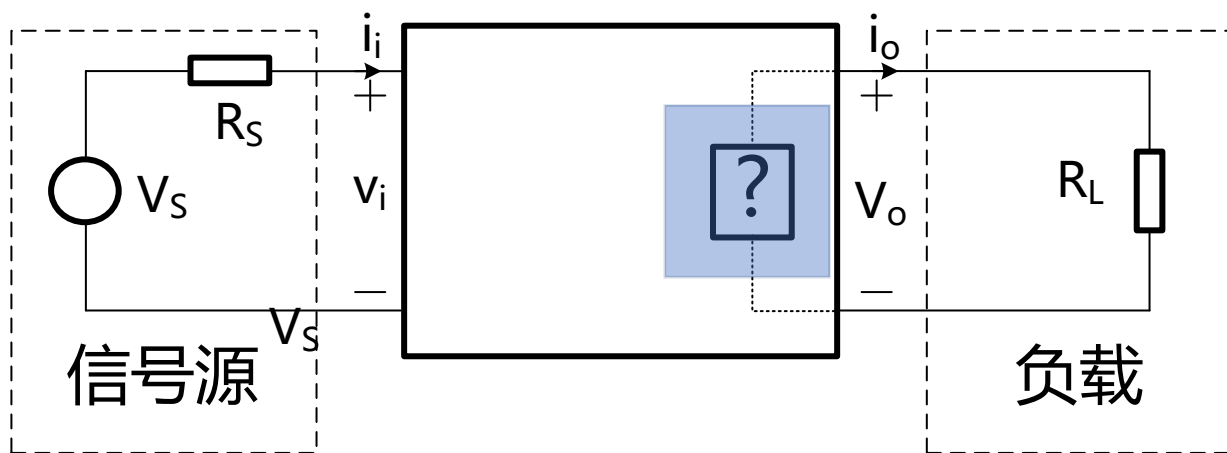
- 放大电路的输入端电压与输入端电流的比值
- 从放大电路输入端看进去的等效阻抗: $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$
- 如果输入阻抗是**电阻与电容的并联**，**如何得到阻抗？测试**



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 输出阻抗:

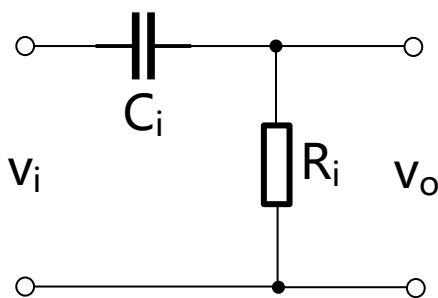
- 从放大电路**输出端**看进去的**等效阻抗**: $Z_o = \frac{v_o}{i_o}$
- 类似于信号源内阻, 注意区分电压源和电流源对内阻的要求



2.1.2 放大电路的性能指标

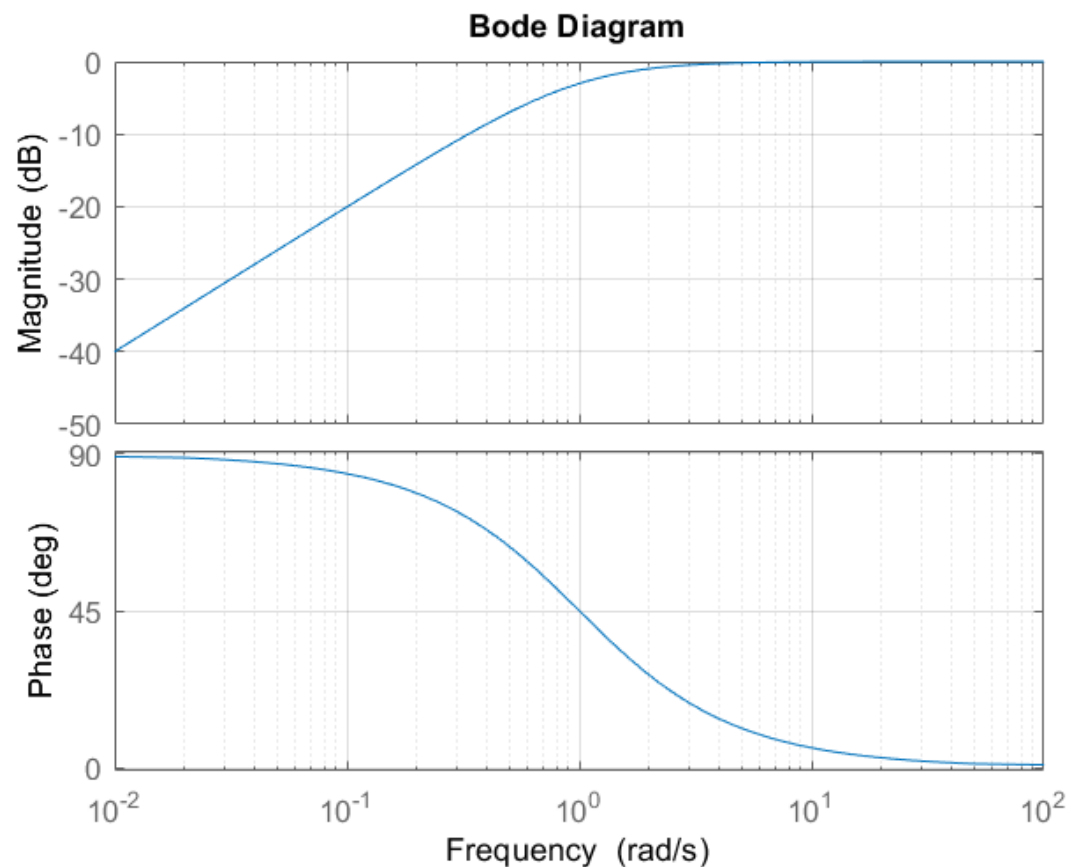
✓ 高通滤波:

- $t_{f_{HPF}} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{sC_i R_i}{1+sC_i R_i}$
- 幅频 (倍数) , 相频 (度数)
- 截止频率处增益为通频带的0.707倍



% MATLAB code:

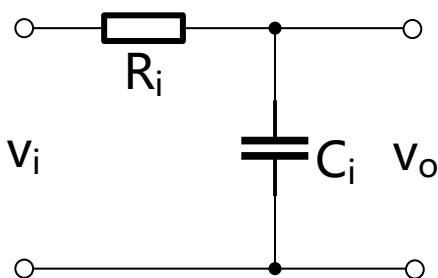
```
clc
clear all
num = [1 0];
den = [1 1];
hpf = tf(num, den)
bode(hpf)
grid on;
```



2.1.2 放大电路的性能指标

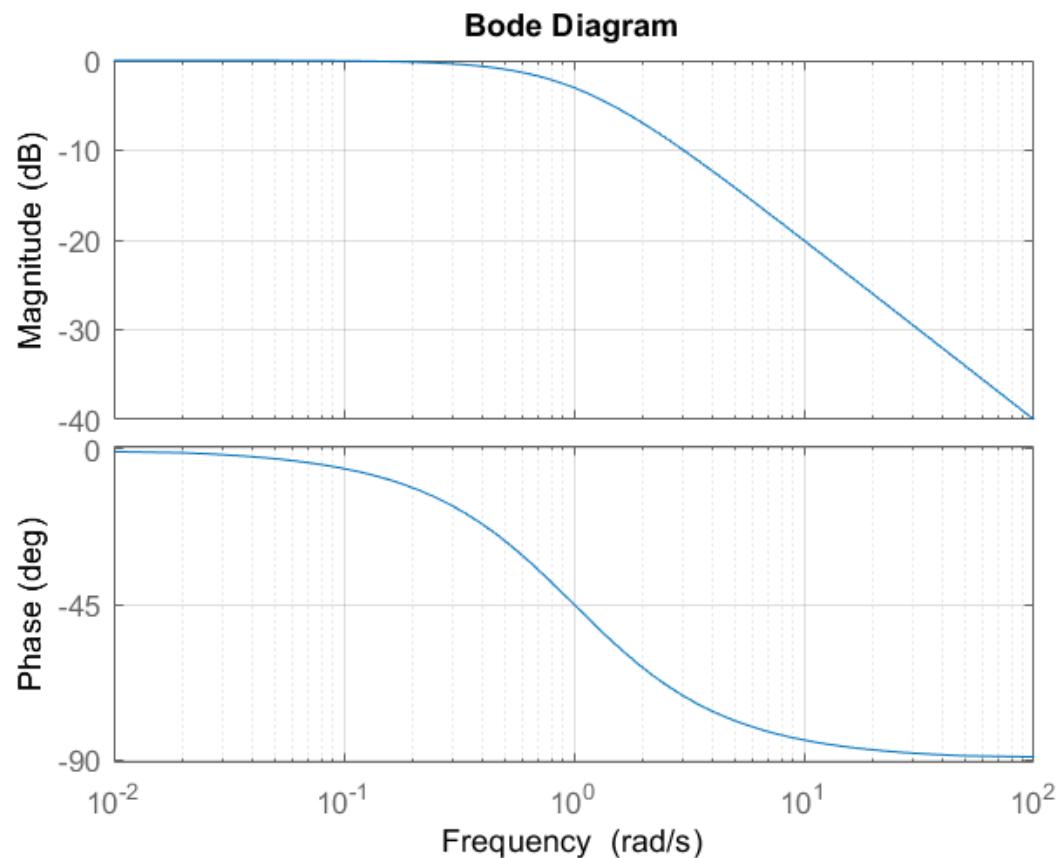
✓ 低通滤波:

- $t f_{LPF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1+sC_iR_i}$
- 幅频 (倍数) , 相频 (度数)
- 截止频率处增益为通频带的0.707倍



% MATLAB code:

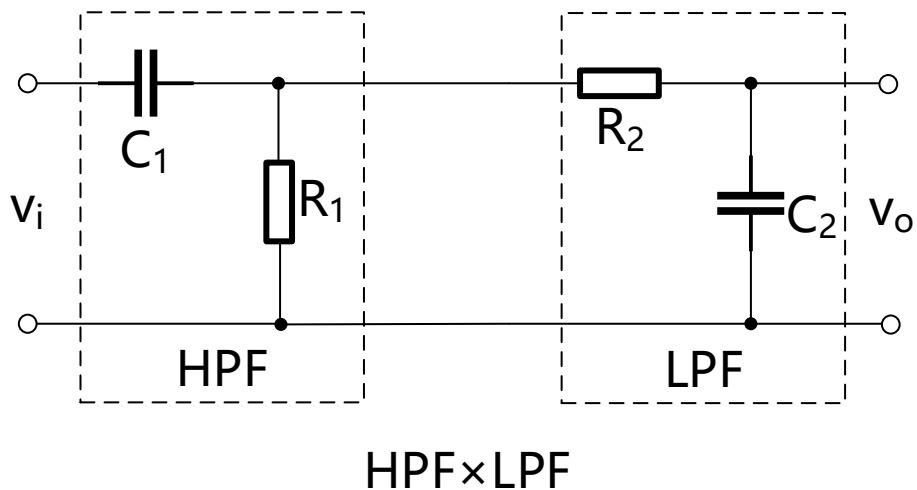
```
clc
clear all
num = [1];
den = [1 1];
lpf = tf(num, den)
bode(lpf)
grid on;
```



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 带通滤波:

- 高通滤波级联低通滤波

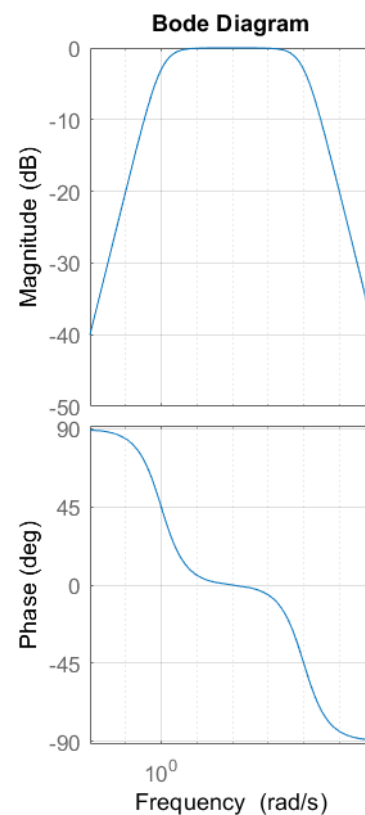
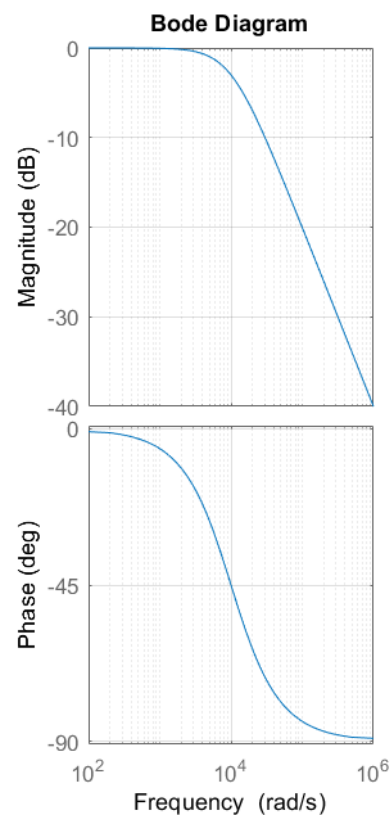
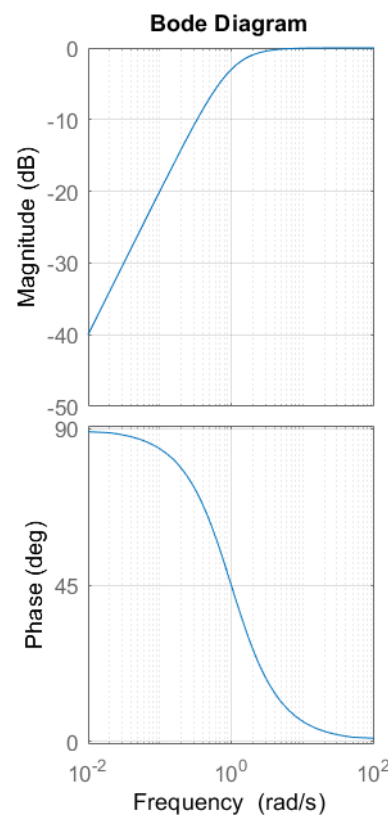


% MATLAB code:

```
clc
clear all
% hpf
num1 = [1 0];
den1 = [1 1];
% lpf
num2 = [1];
den2 = [1e-4 1];
```

```
hpf = tf(num1, den1);
lpf = tf(num2, den2);
bpf = hpf*lpf;
```

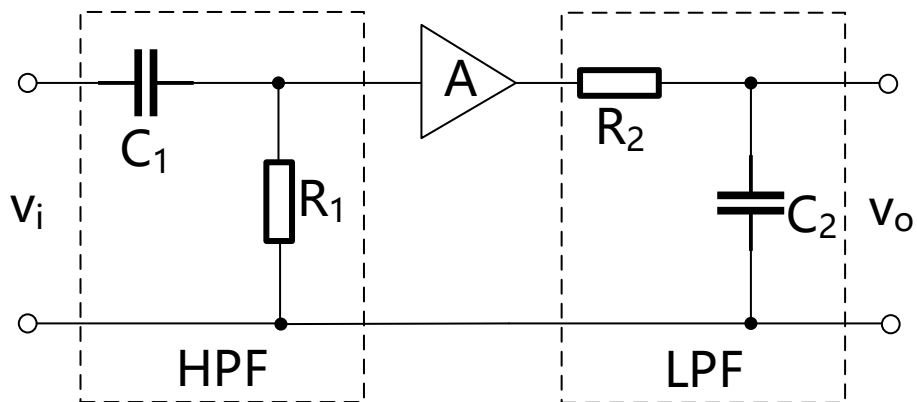
```
subplot(1,3,1)
bode(hpf)
grid on;
subplot(1,3,2)
bode(lpf)
grid on;
subplot(1,3,3)
bode(bpf)
grid on;
```



2.1.2 放大电路的性能指标

✓ 通频带:

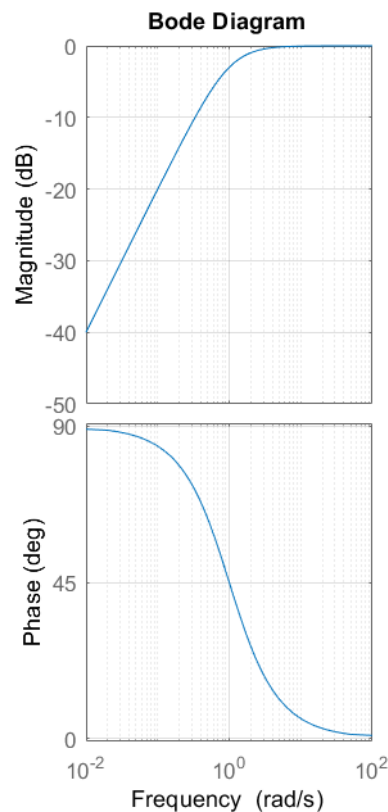
- 加入放大器，增益为A
- 表征放大器工作带宽



% MATLAB code:

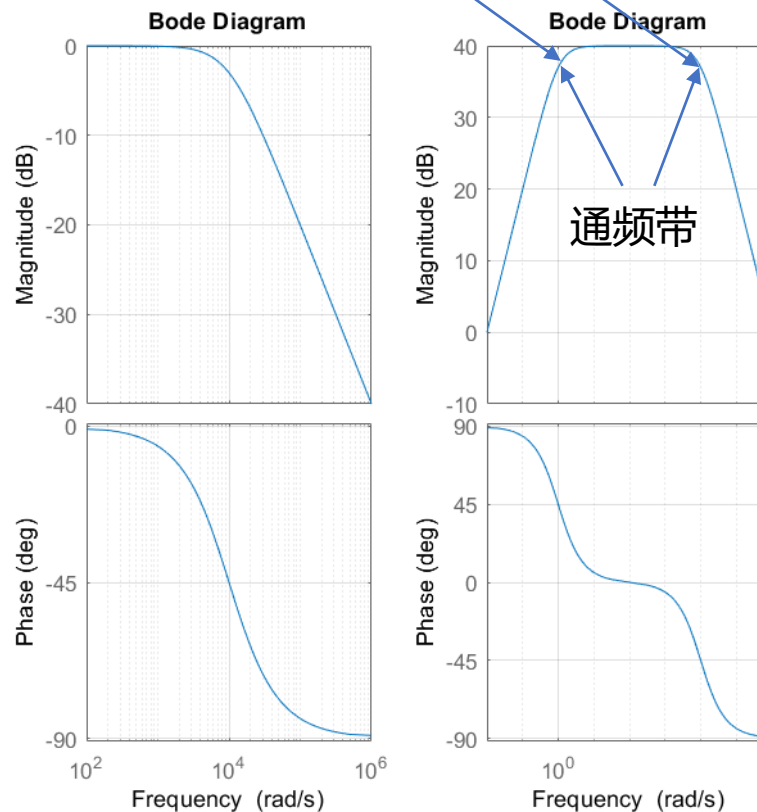
```
clc
clear all
% hpf
num1 = [1 0];
den1 = [1 1];
% lpf
num2 = [1];
den2 = [1e-4 1];
hpf = tf(num1, den1);
lpf = tf(num2, den2);
A = 100;
bpf = A*hpf*lpf;

subplot(1,3,1)
bode(hpf)
grid on;
subplot(1,3,2)
bode(lpf)
grid on;
subplot(1,3,3)
bode(bpf)
grid on;
```



上限截止频率 (低通)

下限截止频率 (高通)



通频带

2.1.2 放大电路的性能指标

- ✓ **非线性失真 (Distortion) :**
 - 非线性难以避免，放大之后都会有不同程度的失真
- ✓ **最大输出幅度 (Swing) :**
 - 非线性失真不超过指标情况下的最大输出摆幅
- ✓ **共模抑制比 (CMRR)**
- ✓ **电源抑制比 (PSRR)**
- ✓ **最大输出功率 (P_{\max})**
- ✓ **效率 (η)**
- ✓ **压摆率 (Slew Rate)、噪声 (Noise)、失配 (Offset) . . .**