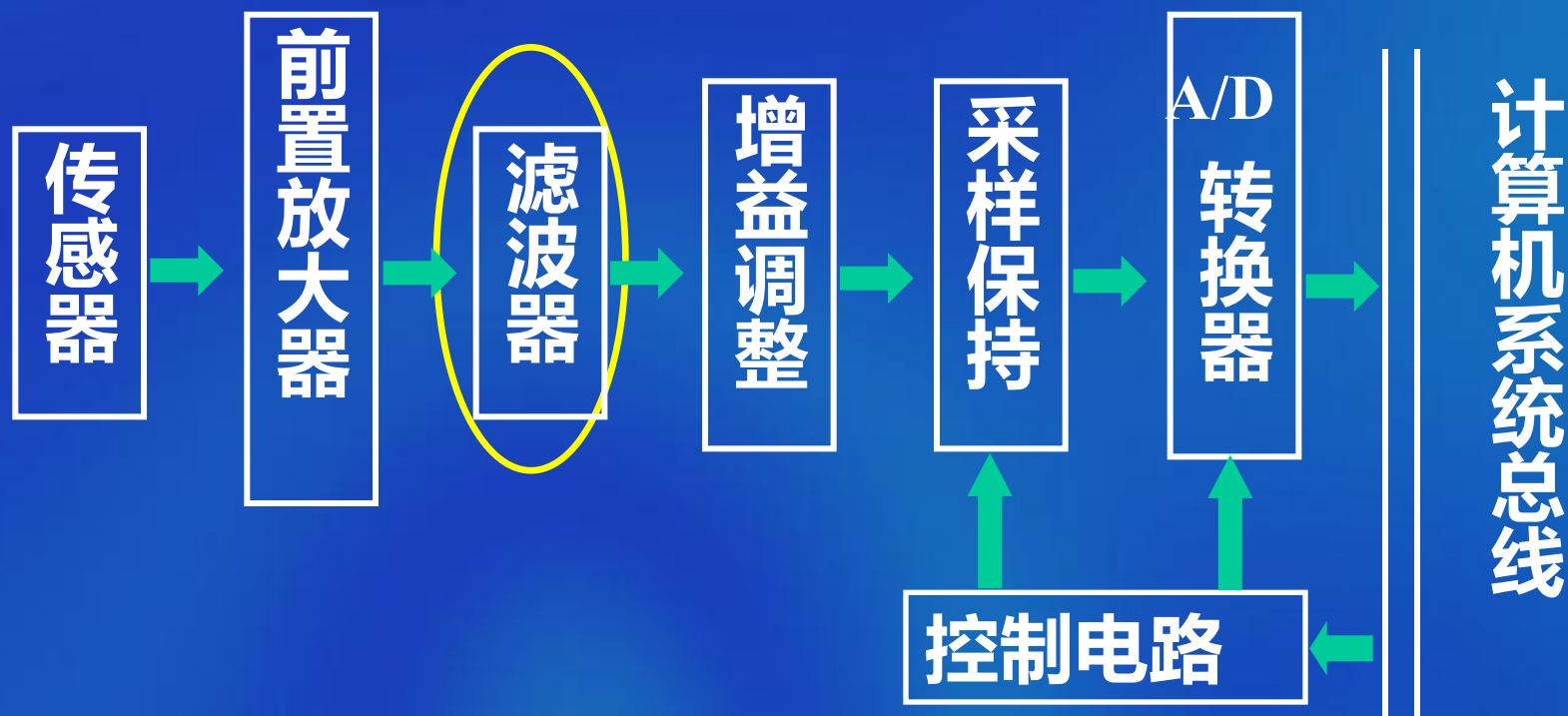
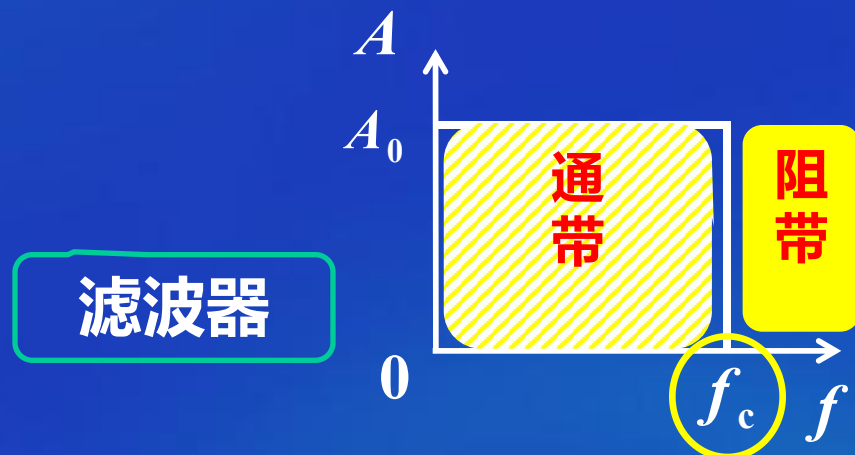


8.3 有源滤波器



8.3.1 滤波器的基础知识



功能：只允许某一部分频率的信号顺利的通过。

通带：能够通过信号的频率范围。

阻带：不能够通过信号的频率范围。

截止频率：通带和阻带之间的分界频率。

滤波器的分类

- a. 根据处理的信号不同 { 模拟滤波器
数字滤波器
- b. 根据使用的滤波元件不同 { RC 型
 LC 型
 RLC 型

c. 根据工作频率不同

低通滤波器

高通滤波器

带通滤波器

带阻滤波器

全通滤波器

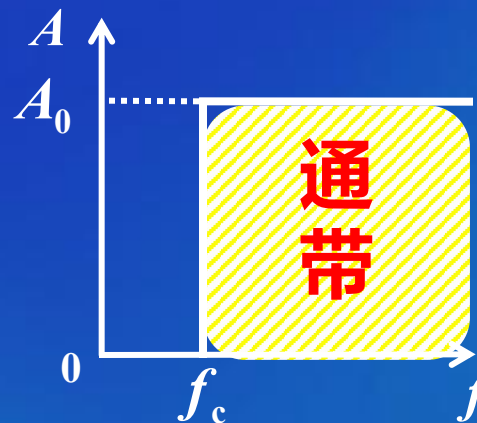
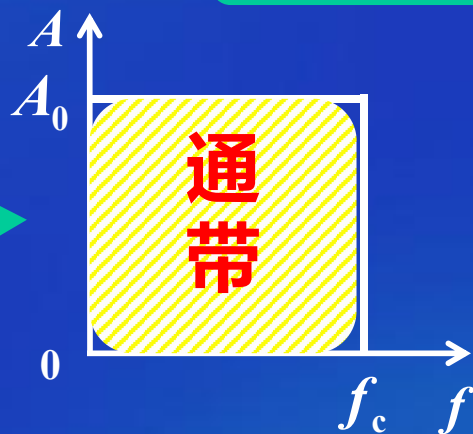
全通滤波器

虽然并不改变输入信号的频率特性，但它会改变输入信号的相位。利用这个特性，全通滤波器可以用做延时器、延迟均衡等。

实际上，常规的滤波器也能改变输入信号的相位，但幅频特性和相频特性很难兼顾，使两者同时满足要求。全通滤波器和其它滤波器组合起来使用，能够很方便的解决这个问题。

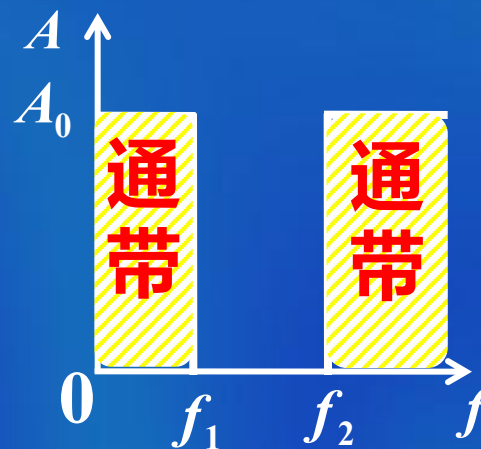
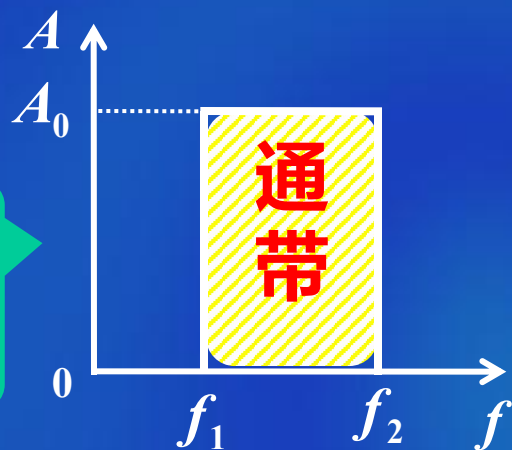
理想滤波器的幅频特性

低通



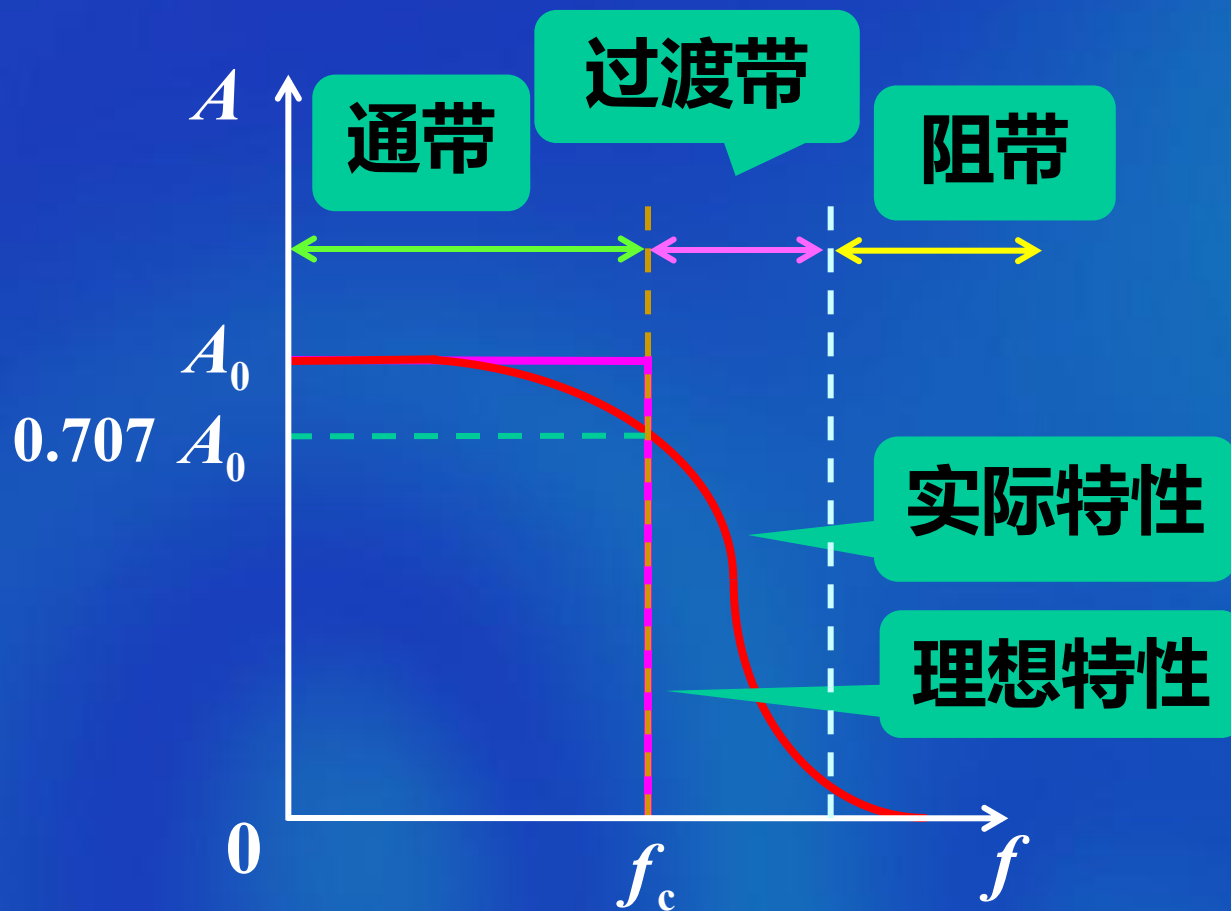
高通

带通



带阻

实际低通滤波器的幅频特性



d. 根据滤波器的阶数分

- 一阶滤波器
- 二阶滤波器
- 高阶滤波器

滤波器的阶数越高，性能越好。

e. 根据采用的元器件不同

- 无源滤波器**
- 有源滤波器**

(a) 无源滤波器

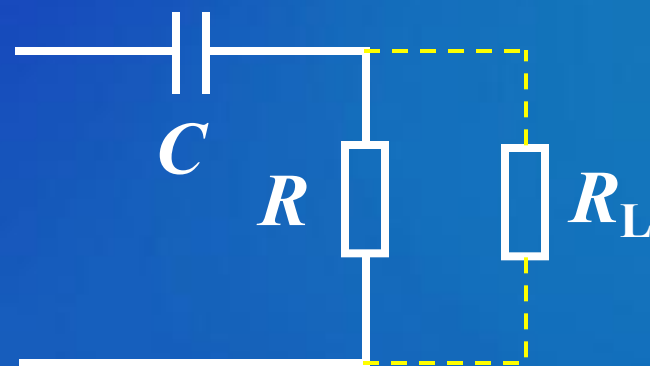
组成：由电阻、电容、电感等无源器件组成。

优点 {

- 电路简单
- 高频性能好
- 工作可靠

缺点 {

- 通带信号有能量损耗
- 负载效应比较明显
- 体积和重量比较大，电感还会引起电磁感应。



无源高通滤波器

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

(b) 有源滤波器：

组成：由电阻、电容和有源器件（如集成运放）组成

优点

电路体积小、重量轻

通带内的信号可以放大

精度高、性能稳定、易于调试

负载效应小

可以多级相联，用低阶来构成高阶滤波器

缺点

通带范围小

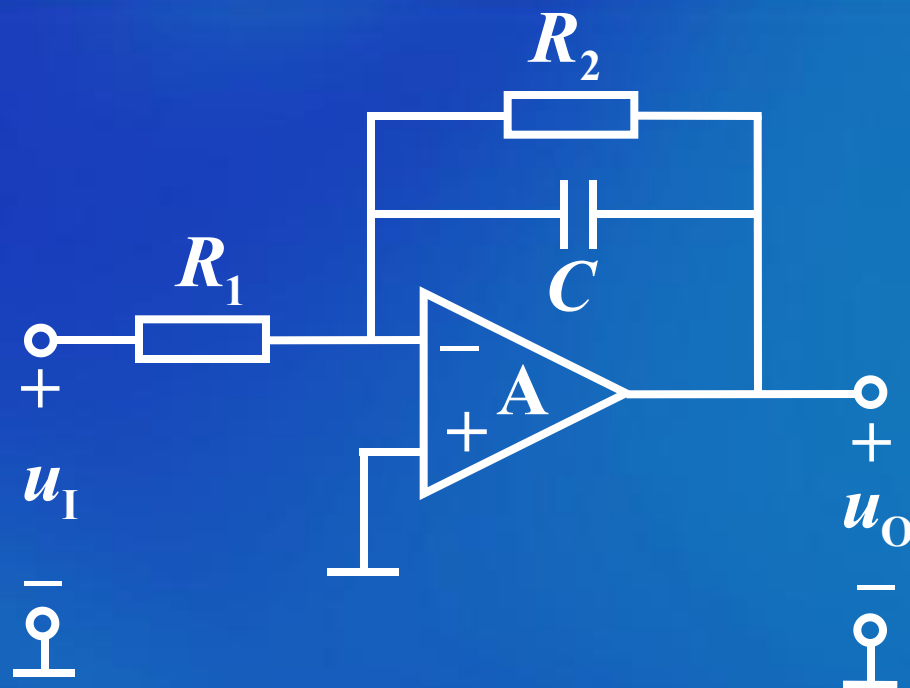
需要直流电源

适用于低频、低压、小功率等场合。

8.3.2 低通有源滤波器

1. 一阶低通有源滤波器

(1) 电路组成



(2) 电路性能分析

a. 电路的传递函数

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$$

令 $s=j\omega$

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$$

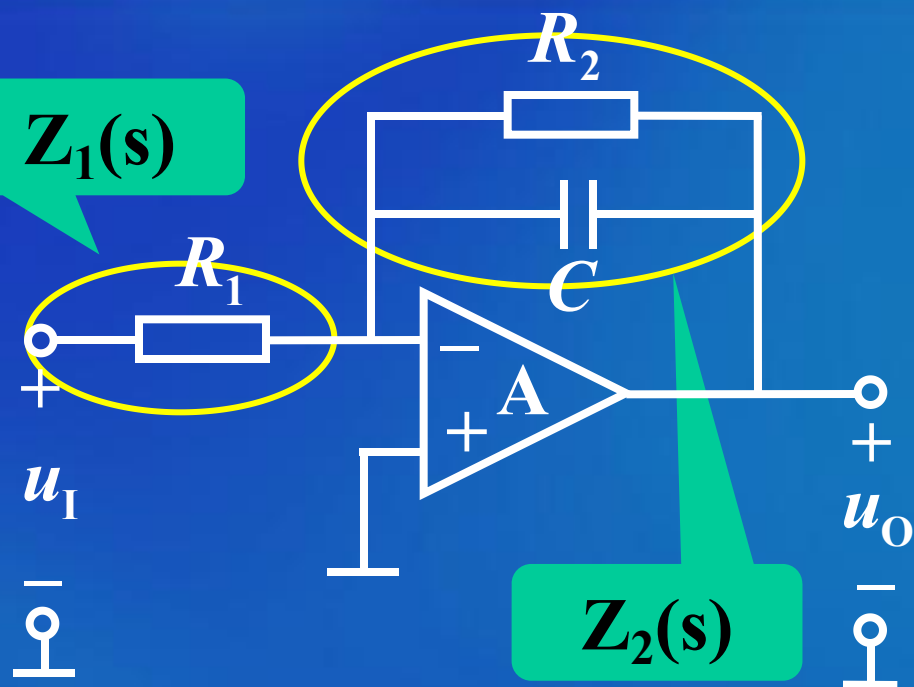
$$= -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

式中 $Z_1(s) = R_1$

$$Z_2(s) = R_2 // \frac{1}{sC} = \frac{R_2}{1 + sR_2C}$$

故

$$A(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + sCR_2}$$



$$A(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + sCR_2}$$

令

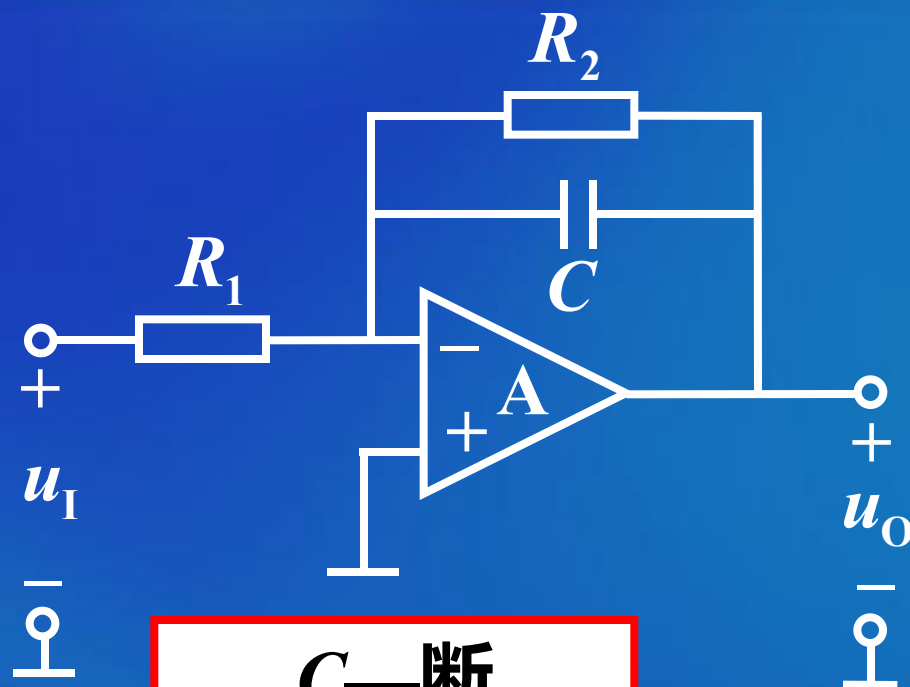
$$A_0 = -R_2/R_1$$

$$\omega_c = 1/(R_2C)$$

A_0 —— 滤波器的通带增益

ω_c —— 滤波器的截止角频率

$$A(s) = A_0 \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$



$$A(s) = A_0 \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

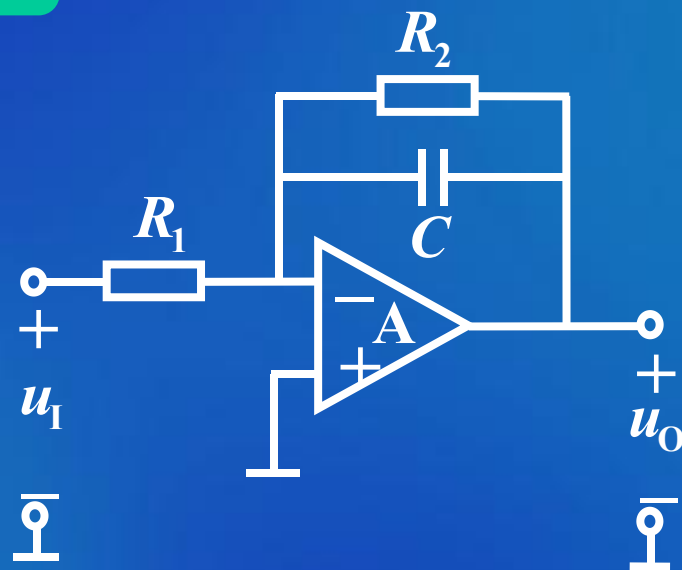
令 $s = j\omega$

b. 滤波器的频率特性

$$A(j\omega) = A_0 \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c}$$

$$= A_0 \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

$$= A_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

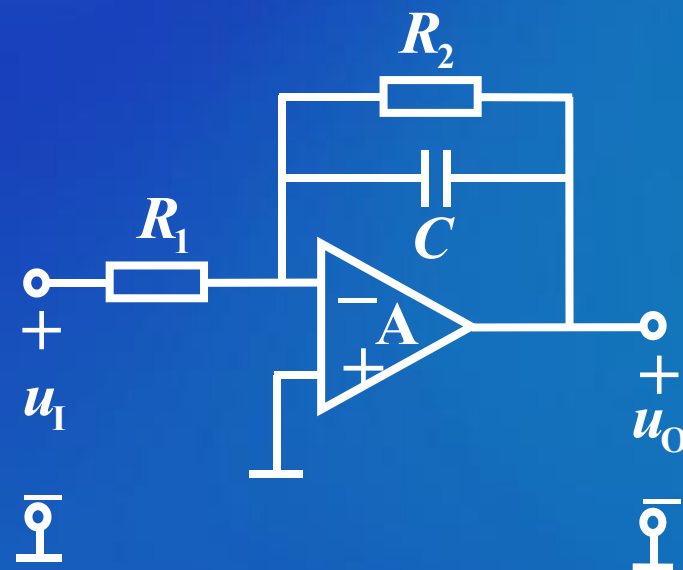


即

$$A(j\omega) = A_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

式中

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

称为滤波器的**截止频率**因电路的频率特性与 **f 的一次方**有关故称之为**一阶** RC 低通有源滤波器

由 $A(j\omega) = A_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$ 得

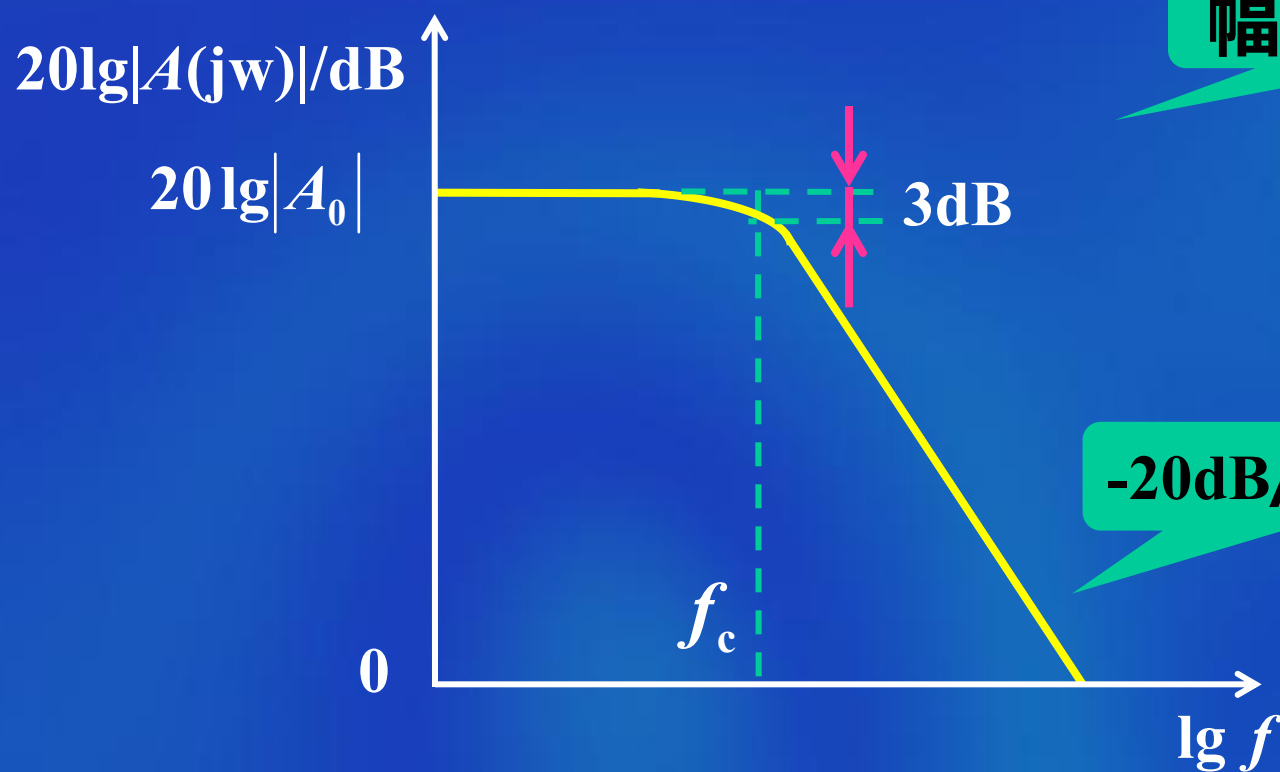
c. 滤波器的幅频特性

$$|A(j\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$

d. 相频特性

$$\varphi(j\omega) = -180^\circ - \arctan \frac{f}{f_c}$$

$$|A(j\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$



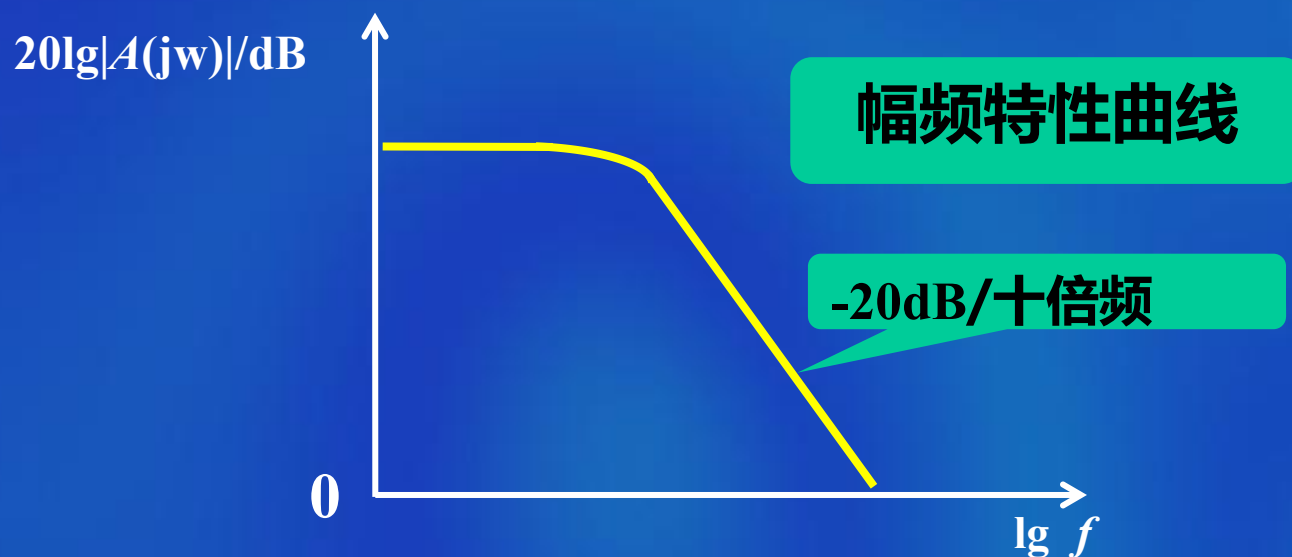
幅频特性曲线

-20dB/十倍频

(3) 一阶滤波器特点

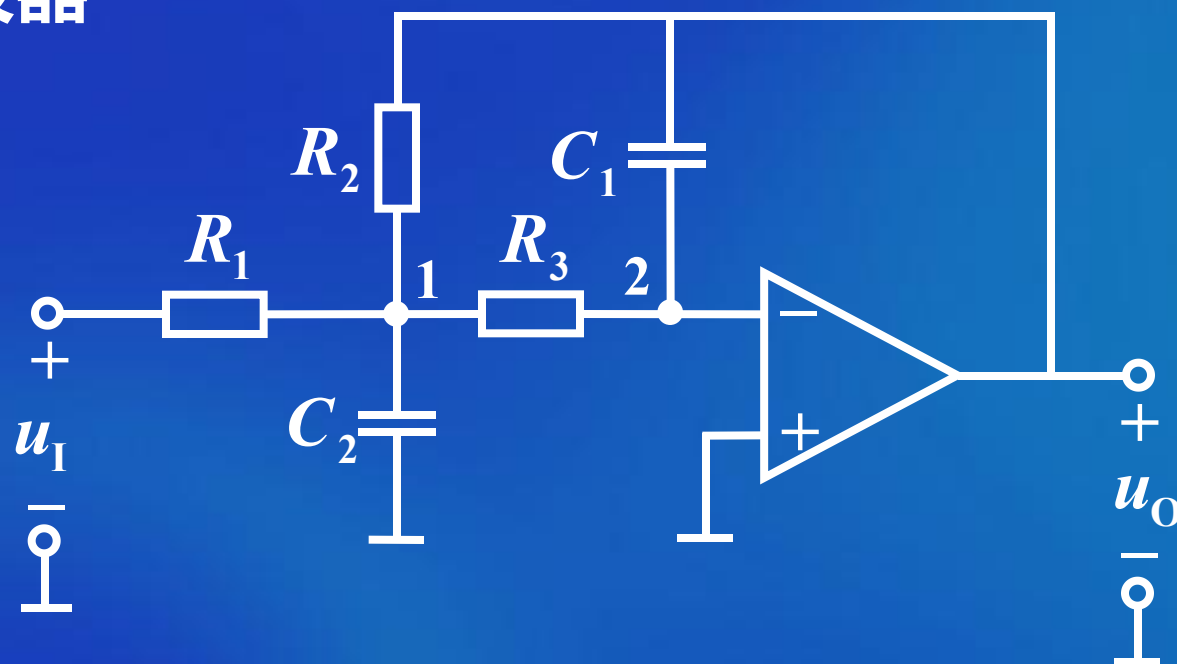
a. 电路简单

b. 过渡带输出的衰减慢，衰减速率20dB /十倍频



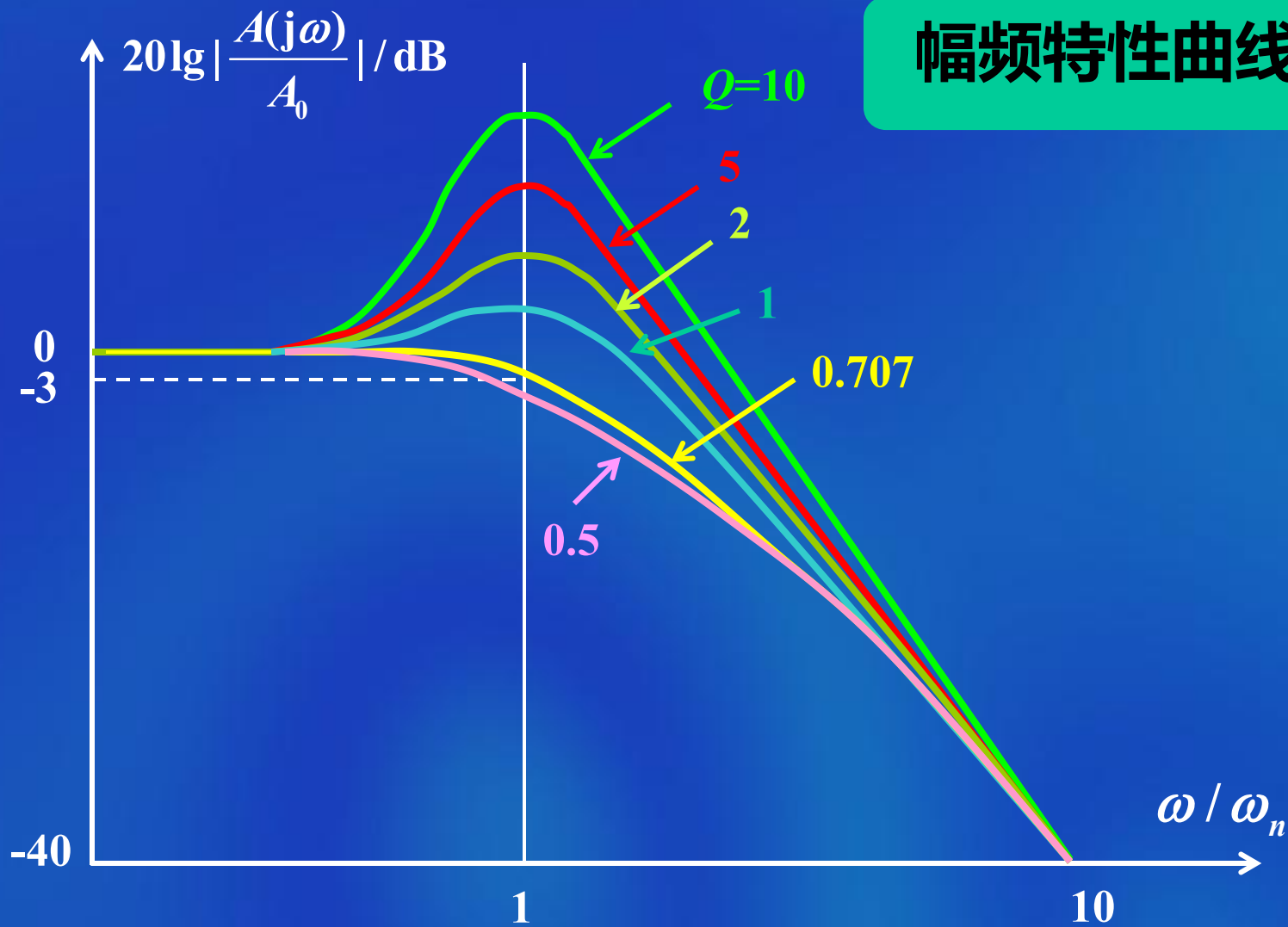
2. 二阶有源低通滤波器

(1) 电路组成



电路分析略

幅频特性曲线



8.3.3 高通有源滤波器

1. 一阶高通有源滤波器

(1) 低通与高通电路的对偶关系



(2) 一阶高通滤波器

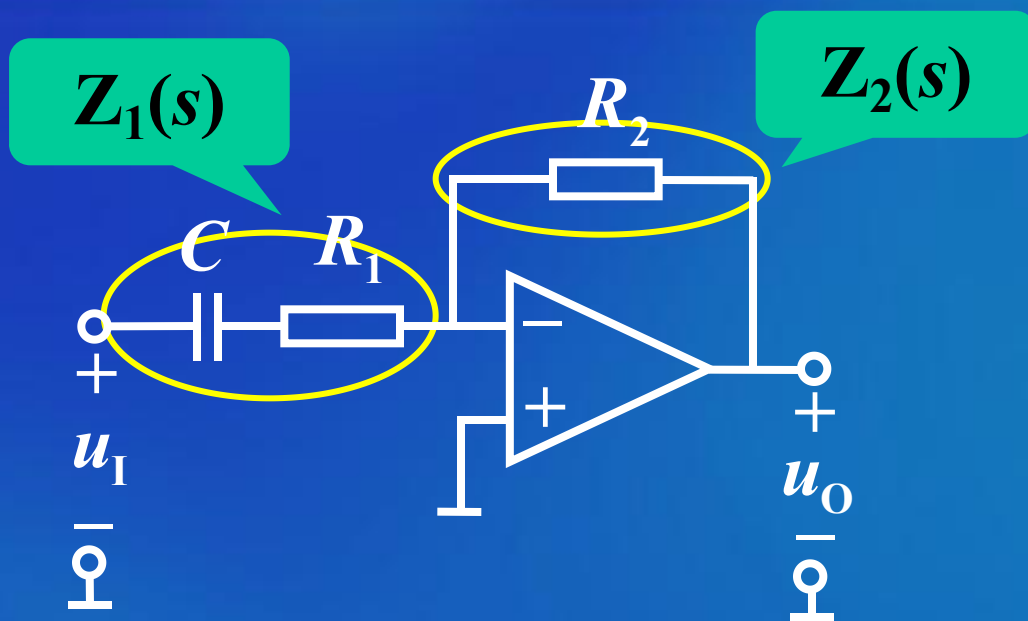
a. 高通滤波电路

b. 电路分析

(a) 传递函数

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$$

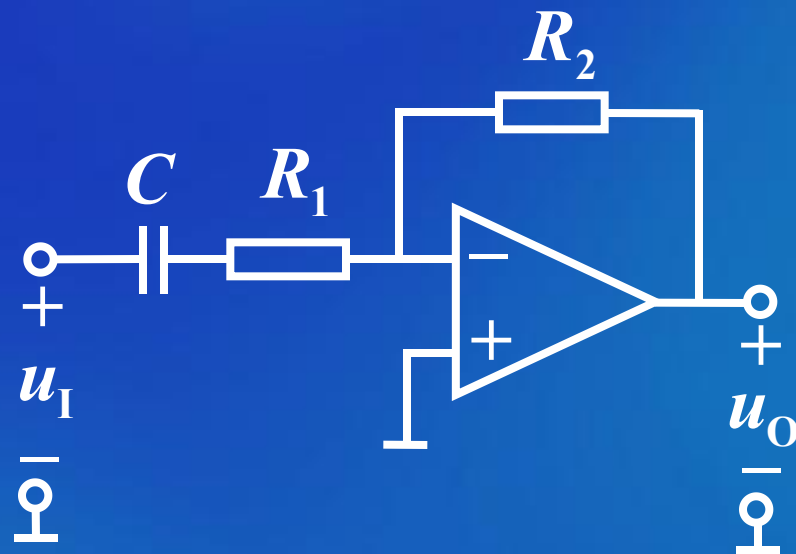
$$= -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$



$$Z_1(s) = R_1 + \frac{1}{sC}$$

$$Z_2(s) = R_2$$

$$\begin{aligned}
 A(s) &= - \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sCR_1}} \\
 &= - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{sCR_1}} \\
 &= - \frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + \frac{1}{CR_1}} \\
 &= A_0 \frac{s}{s + \omega_c}
 \end{aligned}$$



C—短

式中
通带增益

$$A_0 = -R_2/R_1$$

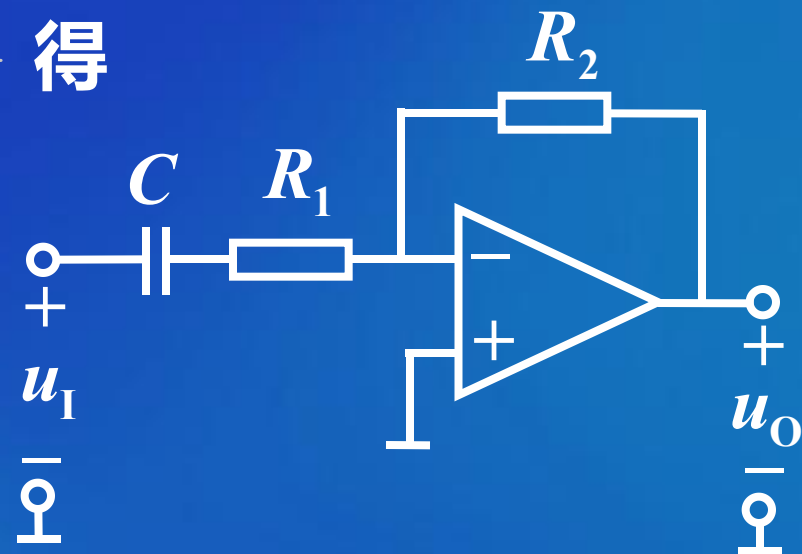
截止角频率 $\omega_c = 1/(R_1C)$

(b) 频率特性

令 $s = j\omega$ 由 $A(s) = A_0 \frac{s}{s + \omega_c}$ 得

滤波器的频率特性

$$\begin{aligned} A(j\omega) &= A_0 \frac{j\omega}{j\omega + \omega_c} \\ &= A_0 \frac{1}{1 + j\frac{\omega_c}{\omega}} \\ &= A_0 \frac{1}{1 - j\frac{f_c}{f}} \end{aligned}$$



滤波器的截止频率

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

(c) 滤波器的幅频特性

由

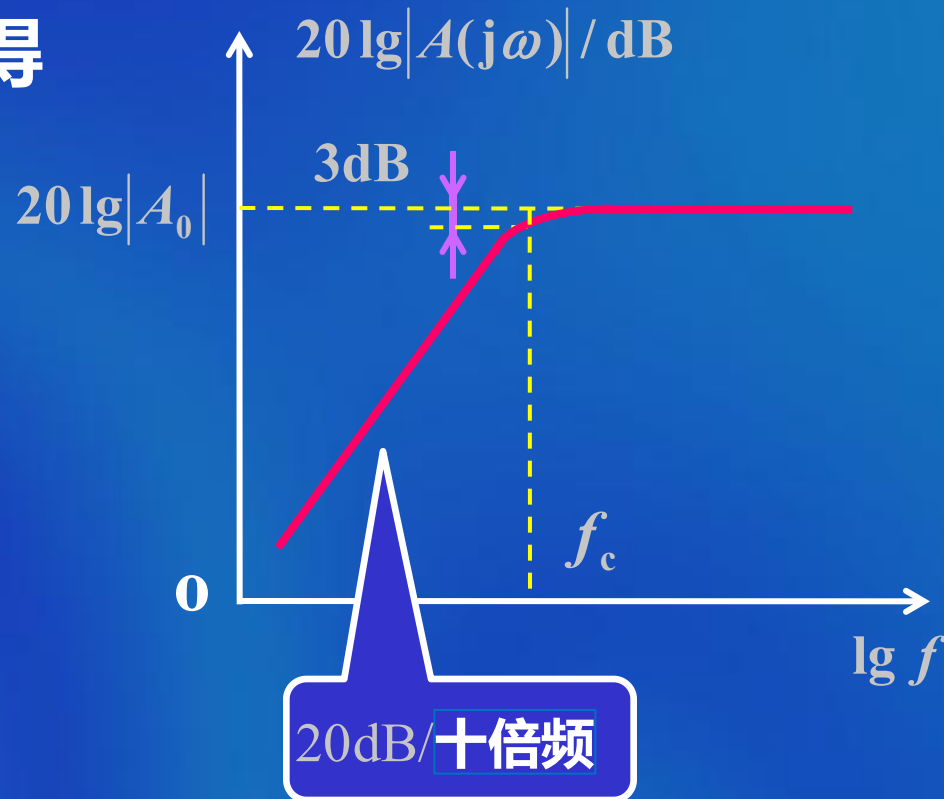
$$A(j\omega) = A_0 \frac{1}{1 - j \frac{f_c}{f}}$$

$$|A(j\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + (f_c/f)^2}}$$

$$\varphi(j\omega) = -180^\circ + \arctan \frac{f_c}{f}$$

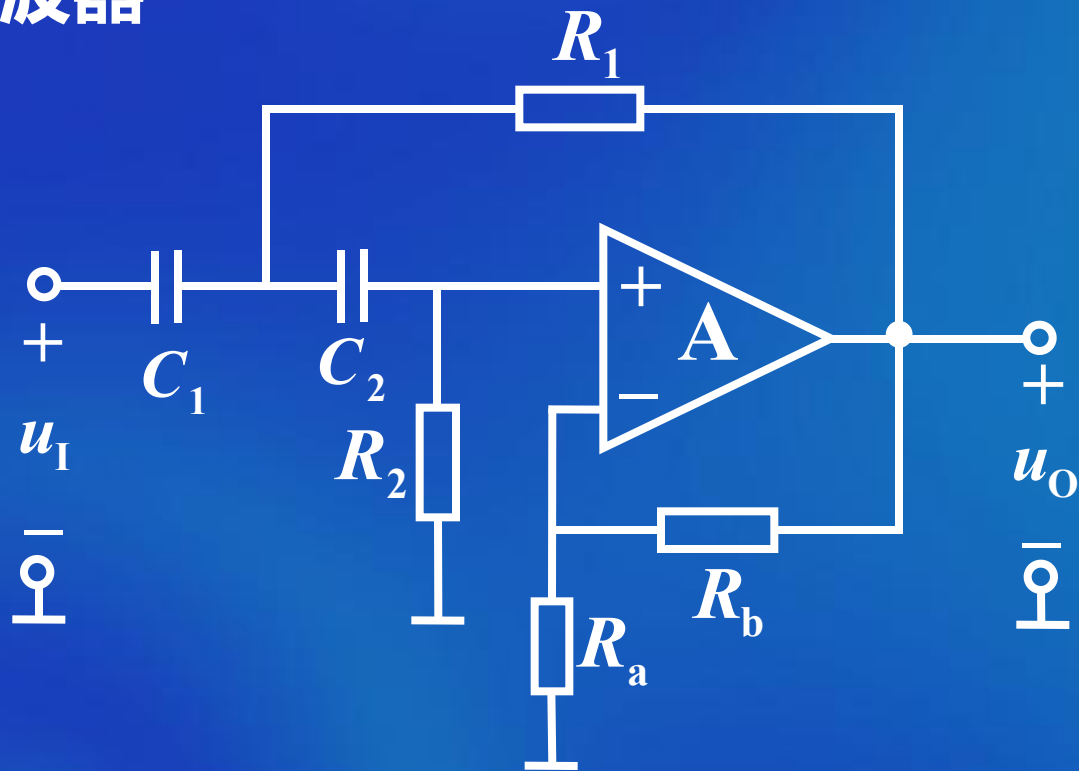
得

幅频特性曲线



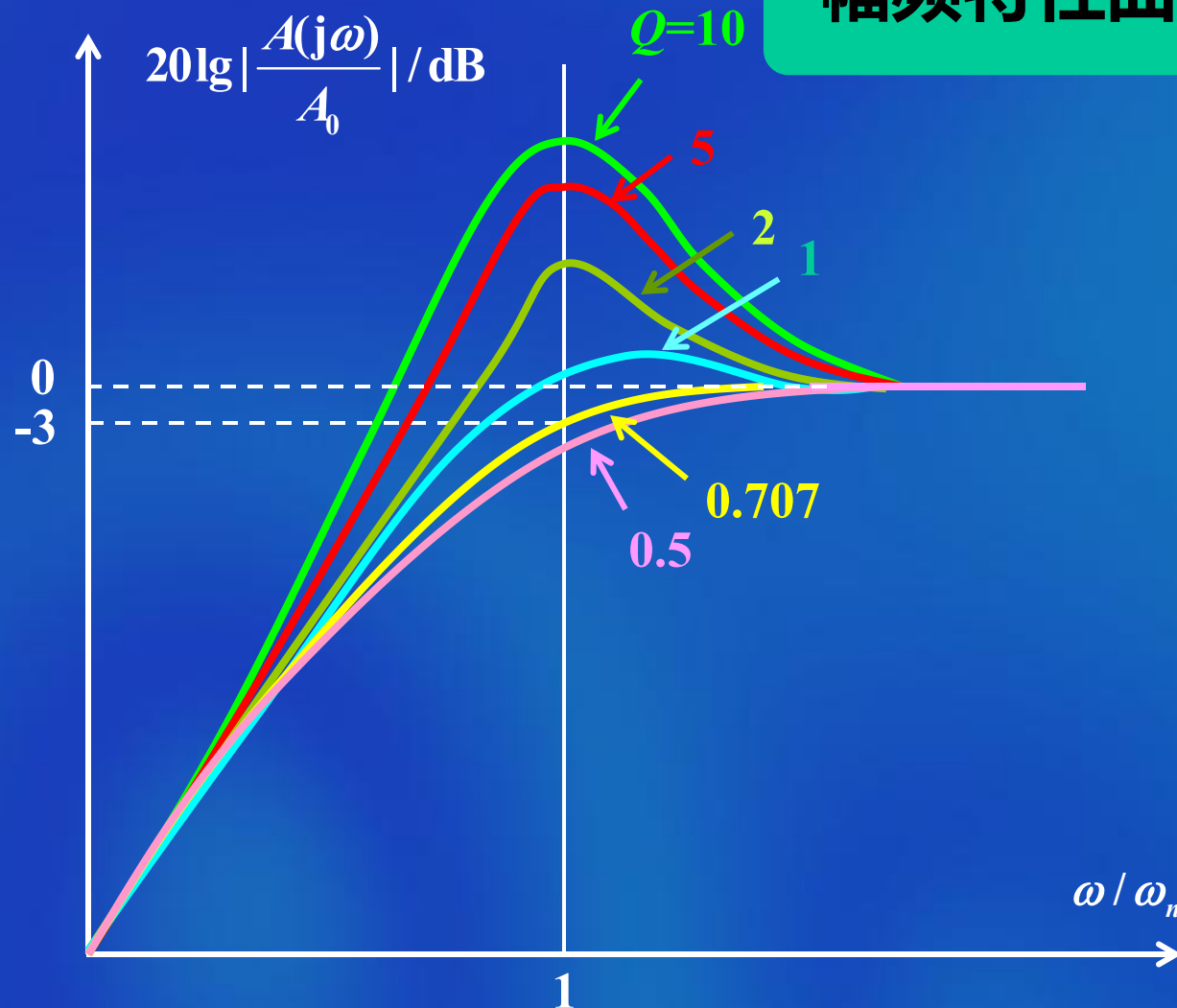
2. 二阶高通有源滤波器

(1) 电路组成

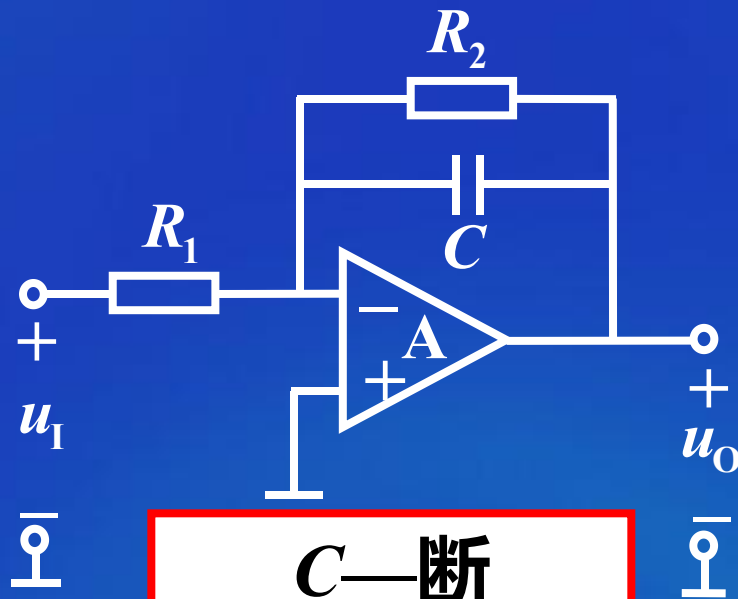


电路分析略

幅频特性曲线



一阶低通

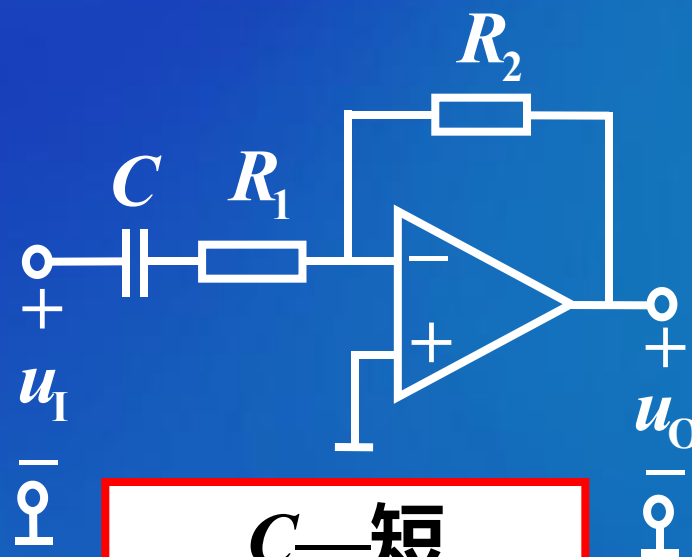


C—断

$$A_0 = -R_2 / R_1$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

一阶高通



C—短

$$A_0 = -R_2 / R_1$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

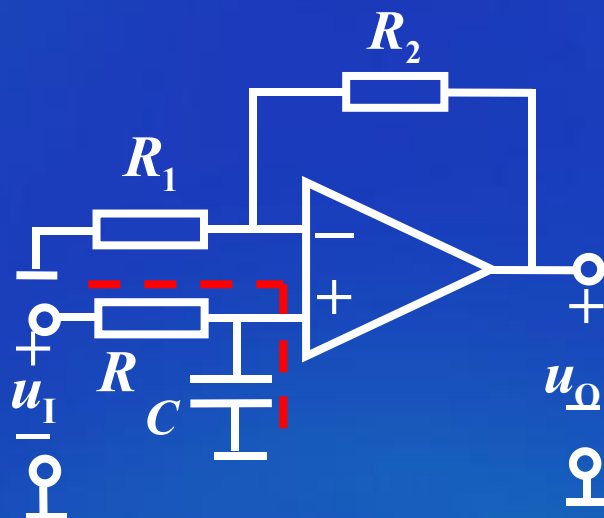
高短低断

电路

通带
增益

截止
频率

一阶低通

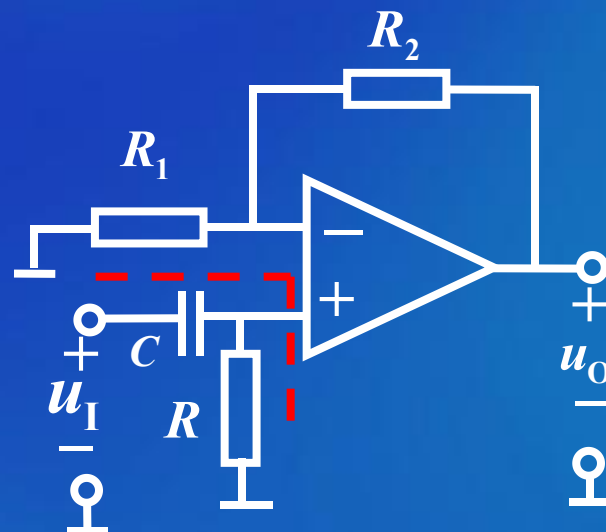


C—断

$$A_0 = 1 + R_2 / R_1$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

一阶高通



C—短

$$A_0 = 1 + R_2 / R_1$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

高短低断

电路

通带

增益

截止

频率

上页

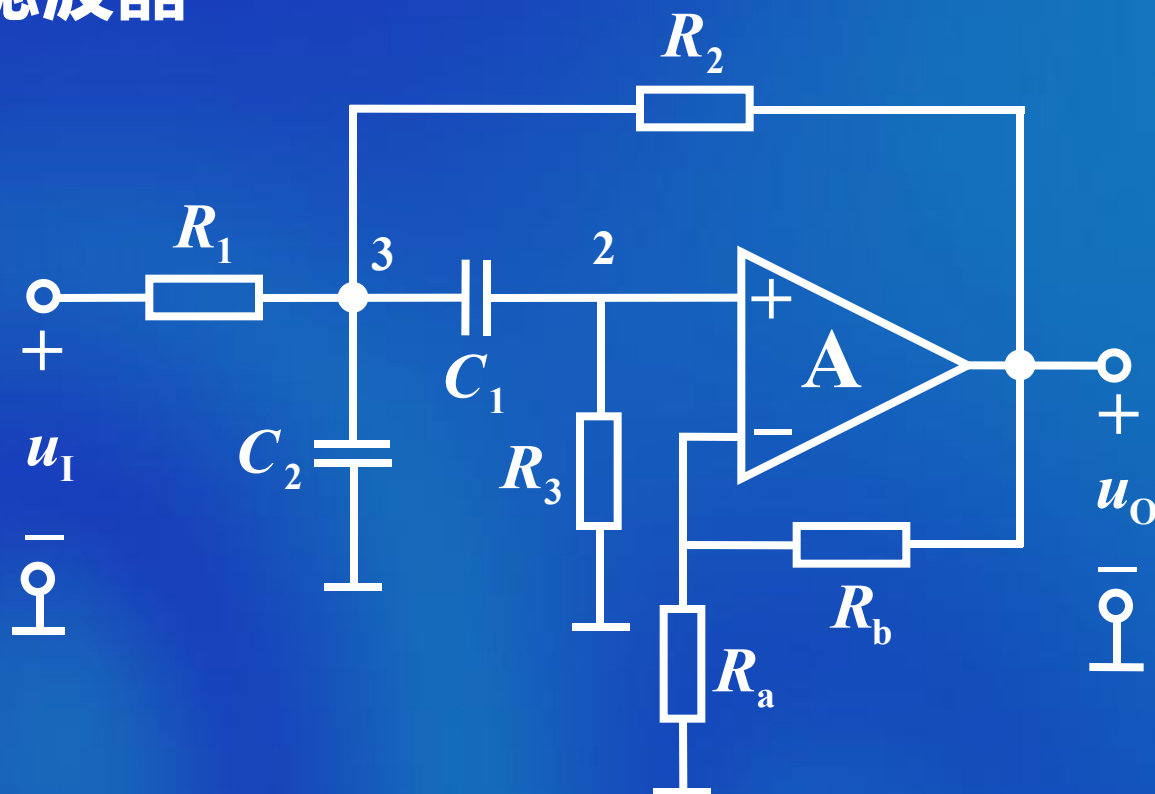
下页

后退

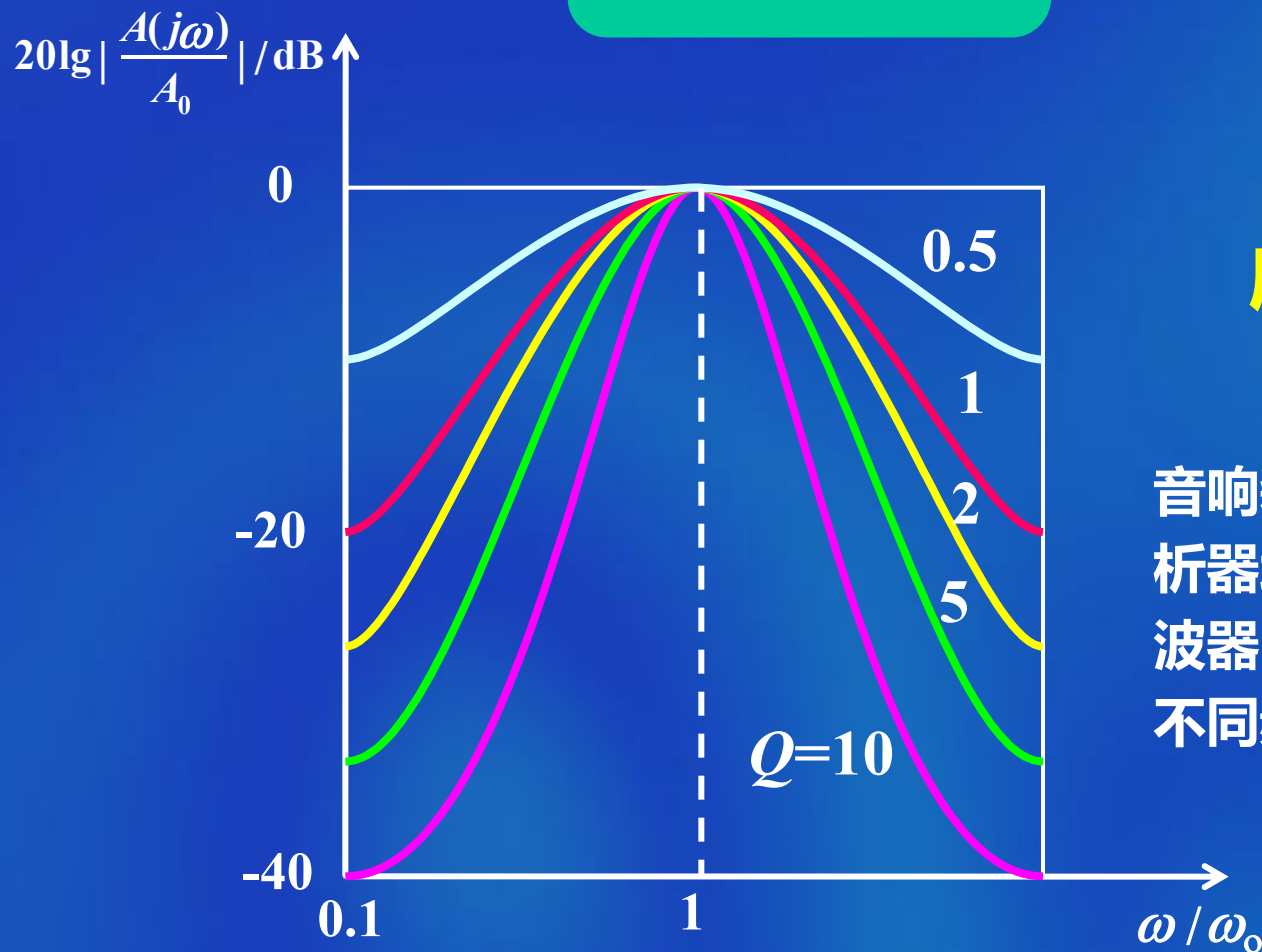
8.3.4 带通和带阻有源滤波器

1. 二阶带通有源滤波器

(1) 电路组成



带通滤波器的幅频特性

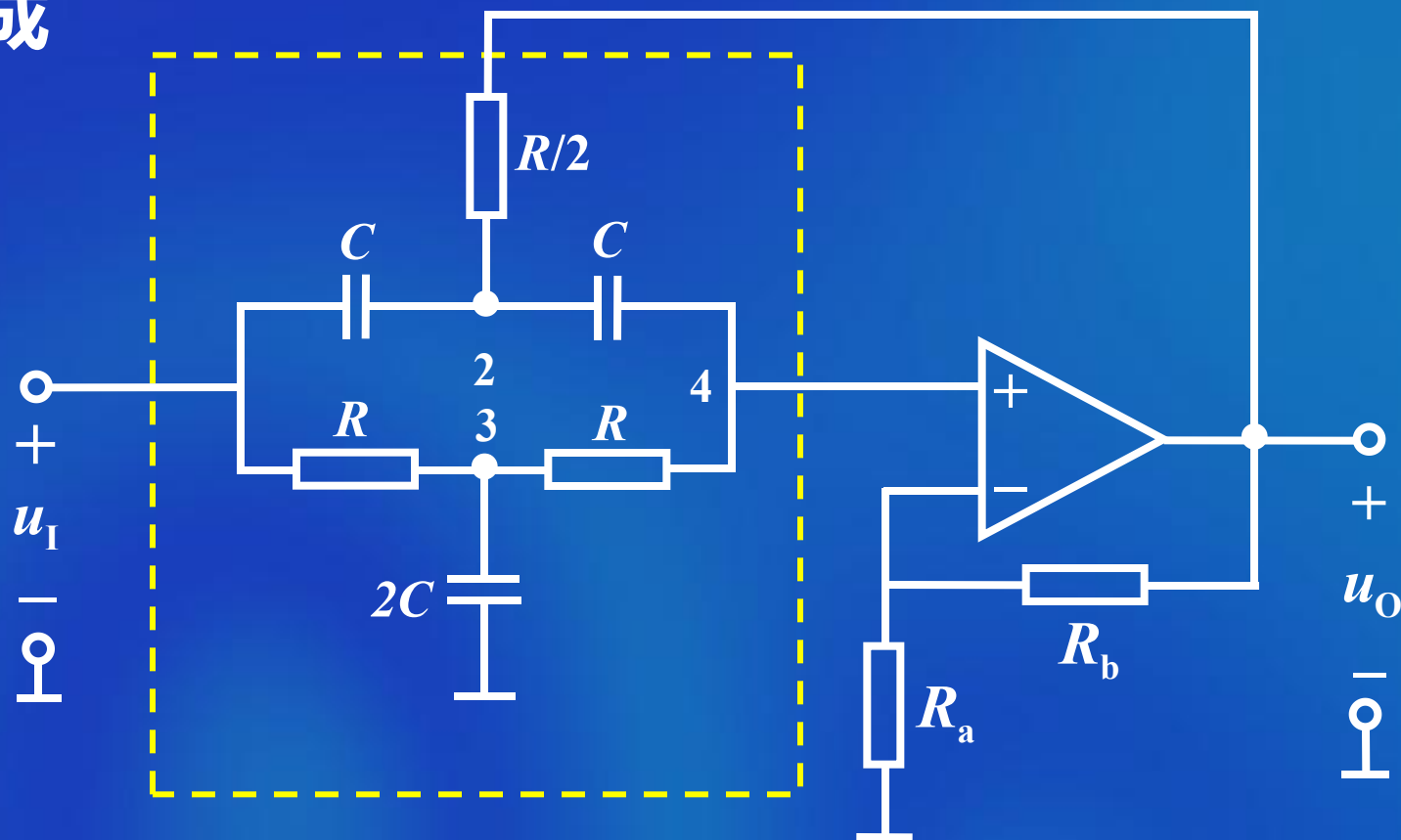


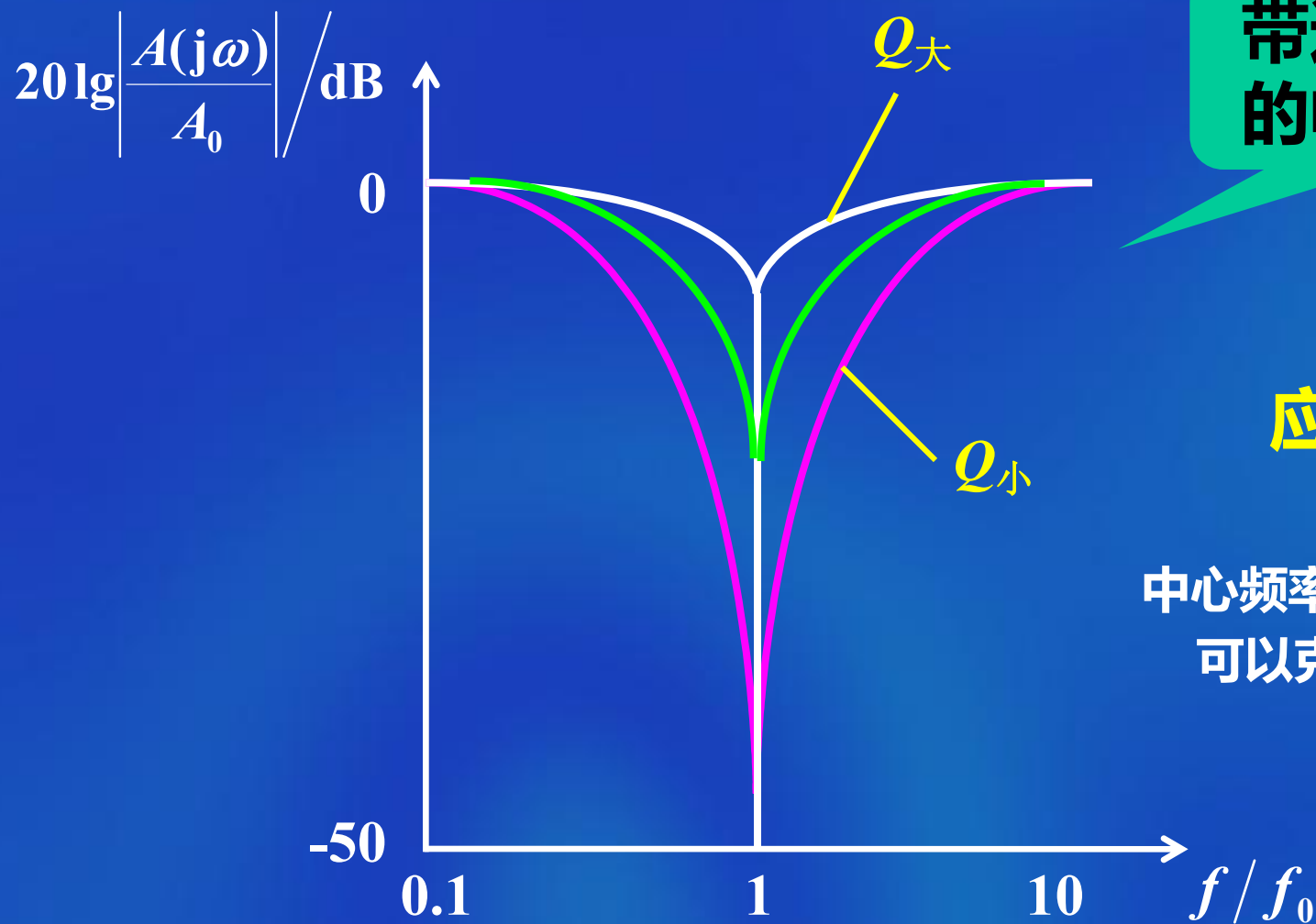
应用？

音响装置的频谱分析器均使用带通滤波器，以选出各个不同频段的信号

2. 二阶带阻有源滤波器

(1) 电路组成





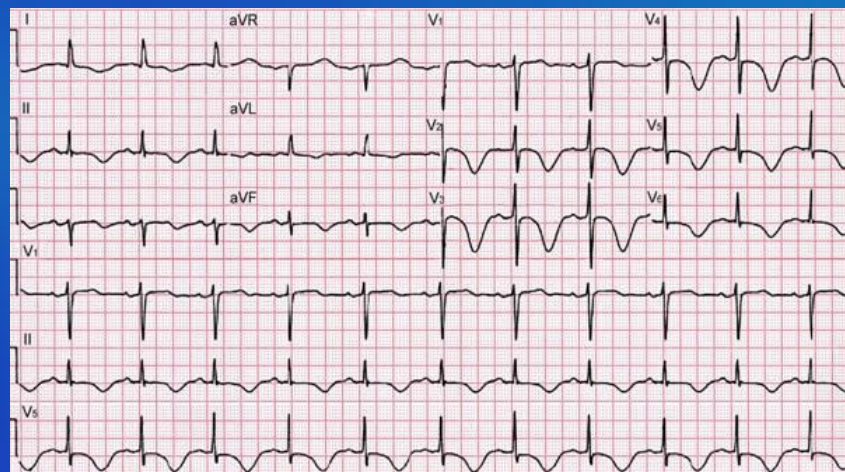
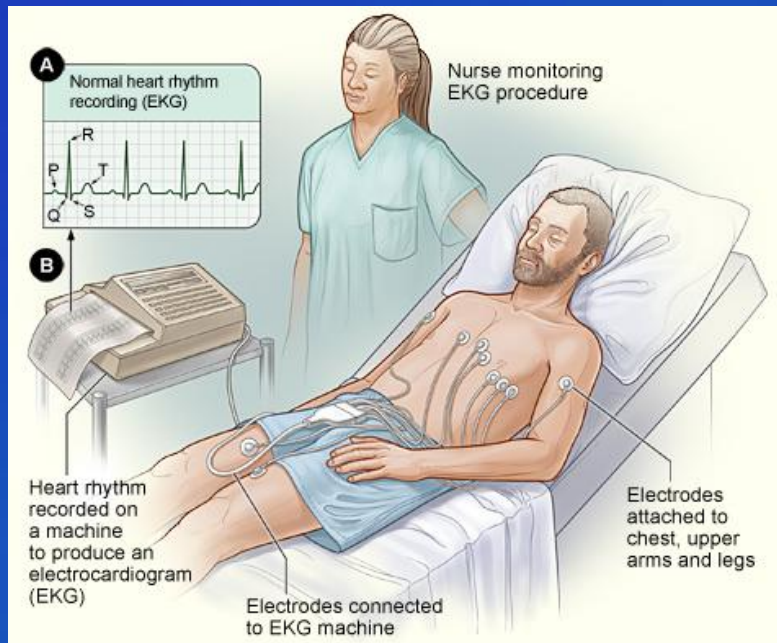
带通滤波器的幅频特性

应用？

中心频率设置为50Hz，
可以克服工频干扰

实际应用举例

心电检测



基本要求

- 心电检测中，测量的信号为mV级，需要进行信号放大，要求放大倍数 > 30 ；
- 信号的频率范围大致在0.1-110Hz之间，为了消除高频干扰，需要设计滤波电路；
- 人体为大阻抗信号源，需要设计的放大器是高输入阻抗，高共模抑制比的放大电路。

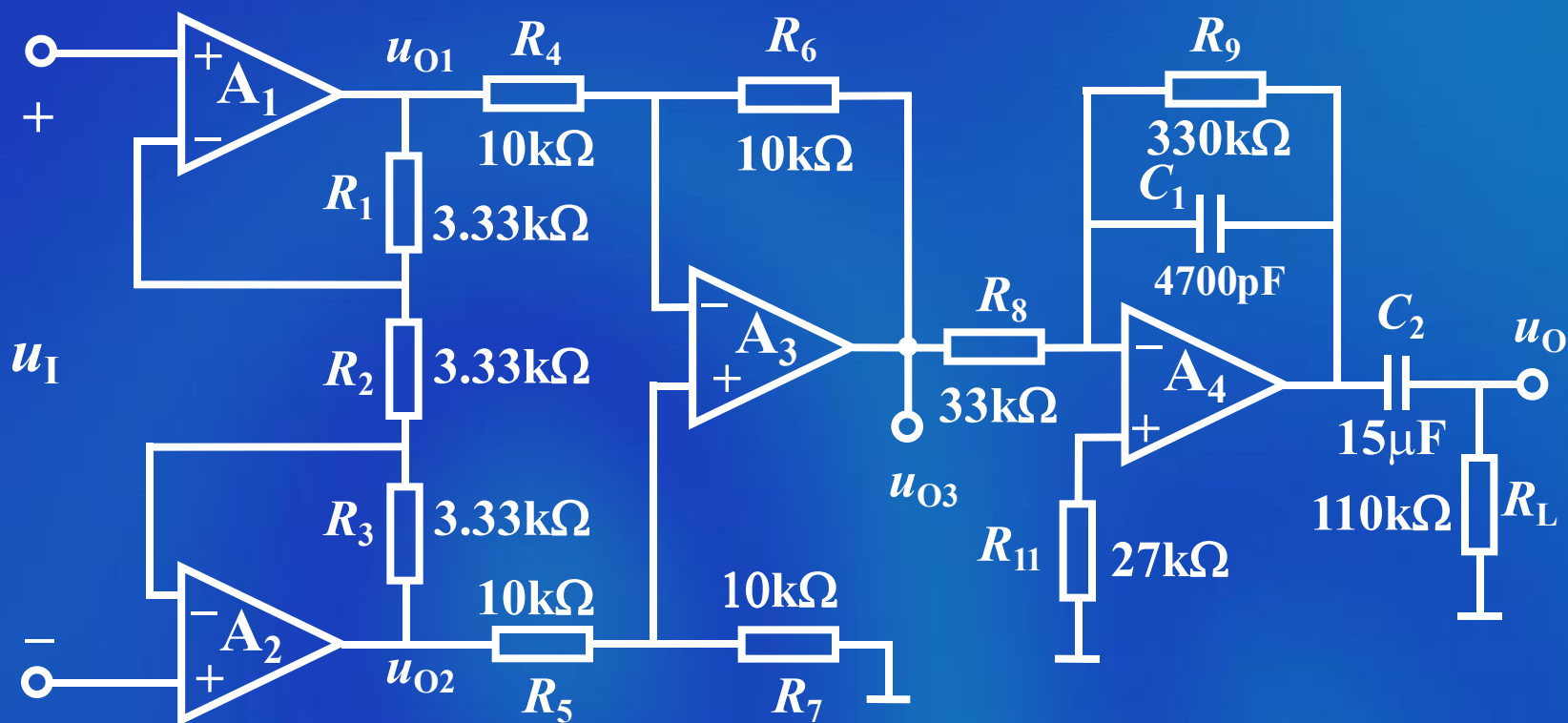
如何运用我们学习过的知识解决此问题？

练习题

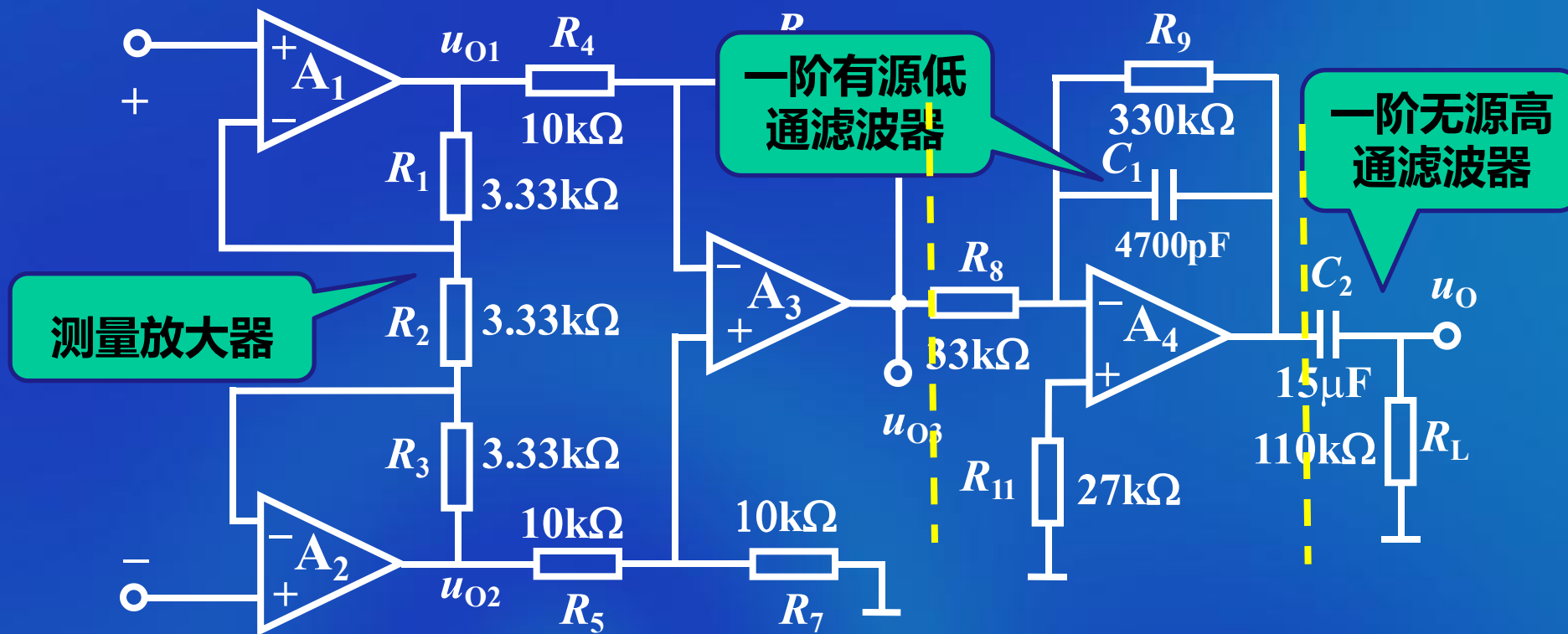
例1 在图示电路中，设各运放都具有理想特性。试求：

(a) $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{o3} / \dot{U}_i$

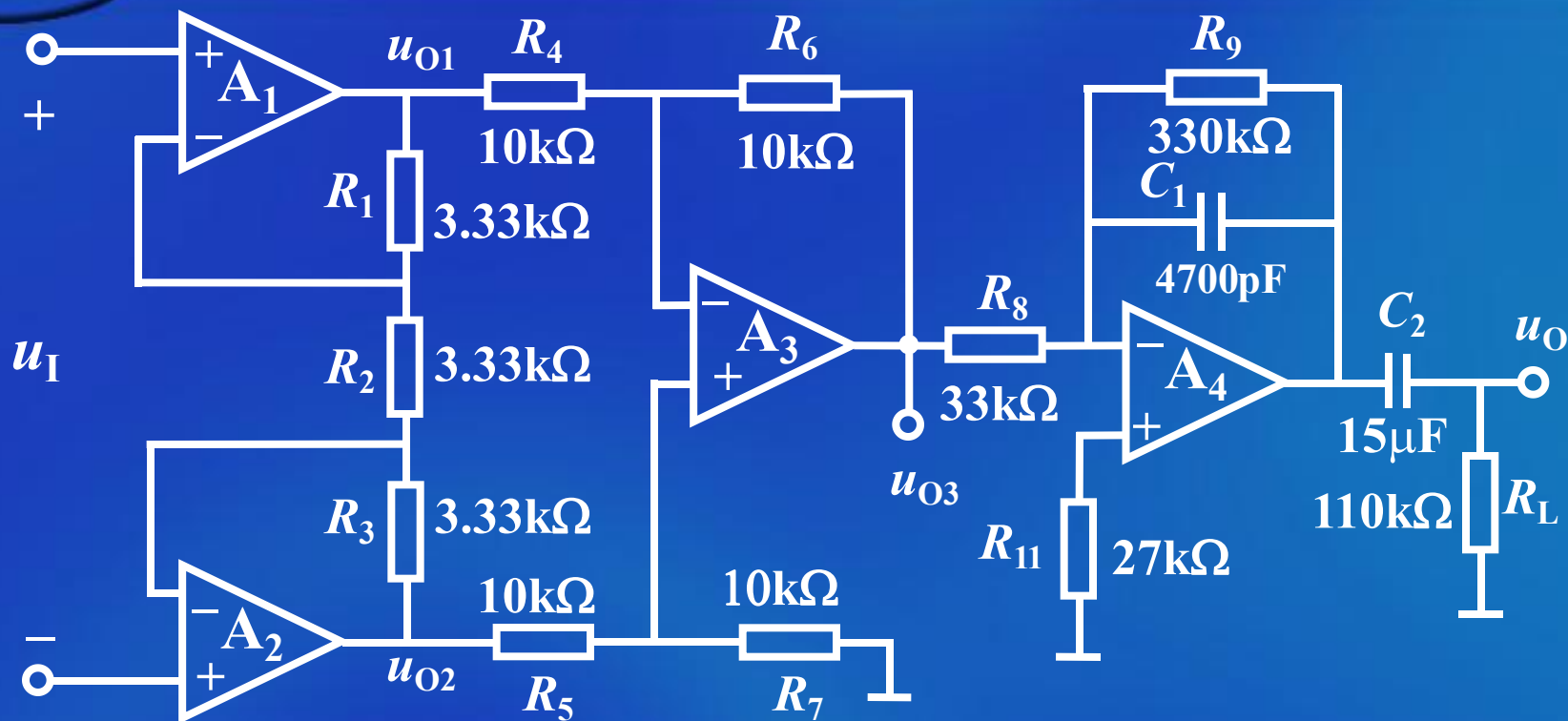
(b) 电路的中频电压放大倍数 $A_{um} = U_o / U_i$



(c) 整个电路的上、下限截止频率 f_H 和 f_L 之值。

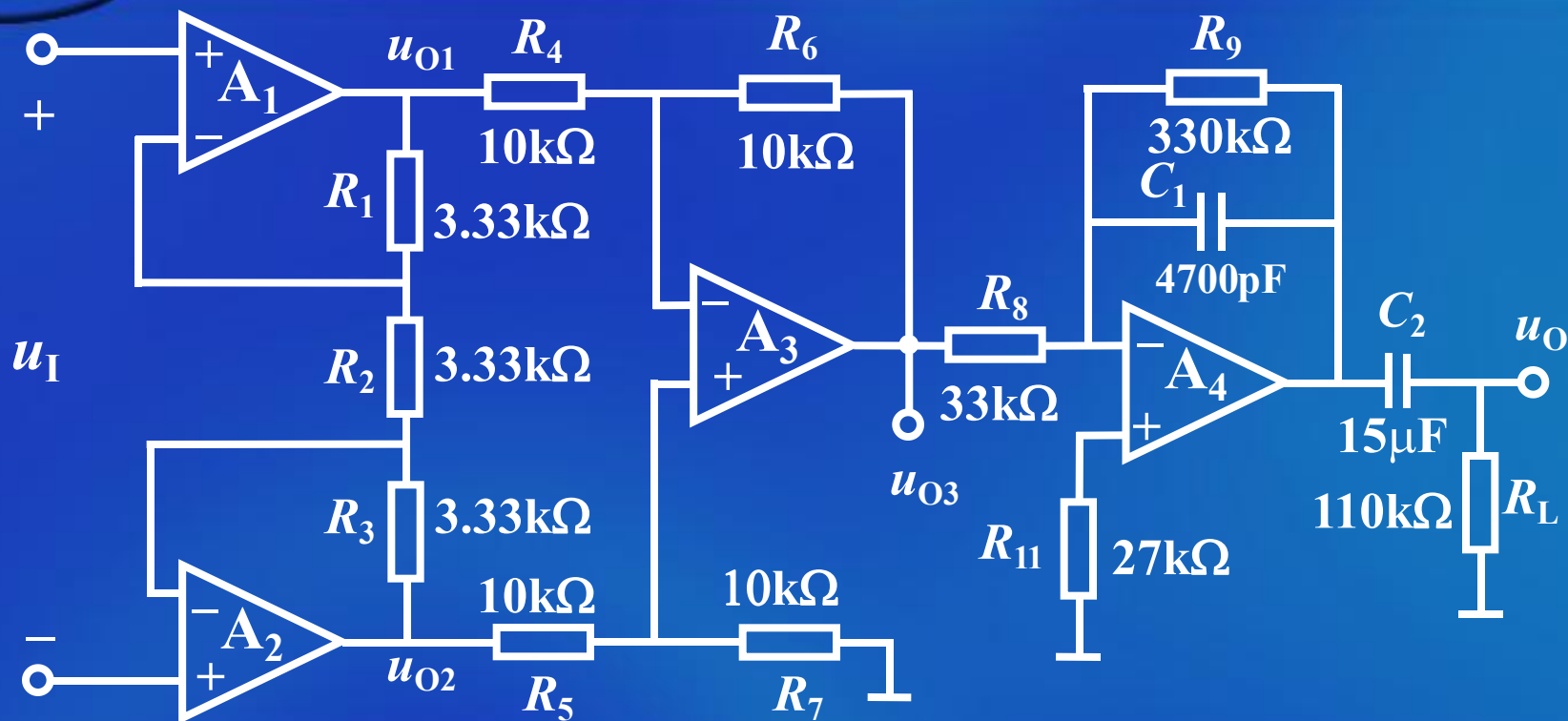


解 由图可知，运放 $A_1 \sim A_3$ 构成三运放测量放大器，运放 A_4 构成一阶低通滤波器，电容器 C_2 和负载 R_L 构成高通滤波器。



(a) 写出 u_{O3} 与 u_i 的关系

$$\begin{aligned}
 u_{O3} &= \left(1 + \frac{R_6}{R_4}\right) \times \frac{R_7}{R_5 + R_7} u_{O2} - \frac{R_4}{R_3} u_{O1} \\
 &= -(u_{O1} - u_{O2}) = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} u_i = -3u_i
 \end{aligned}$$



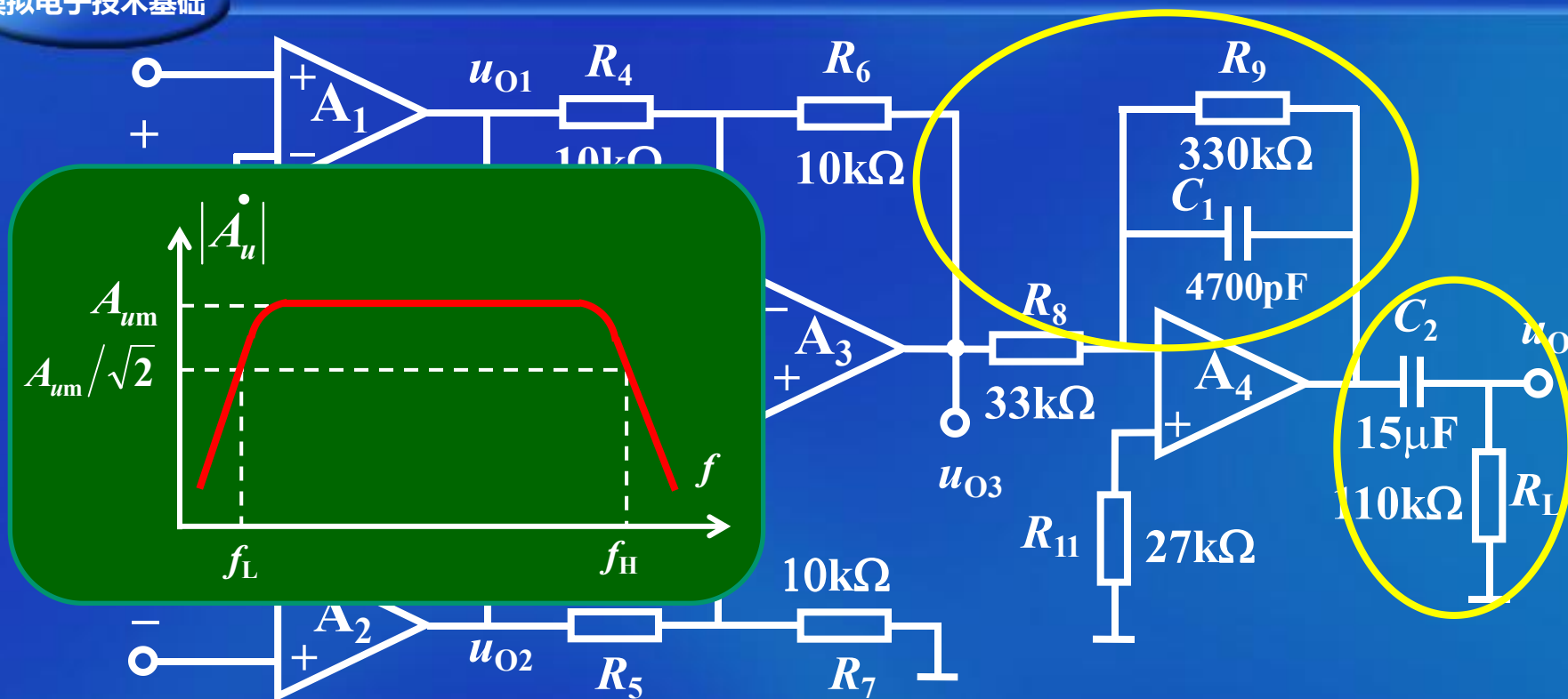
所以, $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{o3} / \dot{U}_i = -3$

中频增益 (通带增益)

(b) 电路的中频电压放大倍数

将 C_1 开路, C_2 短路

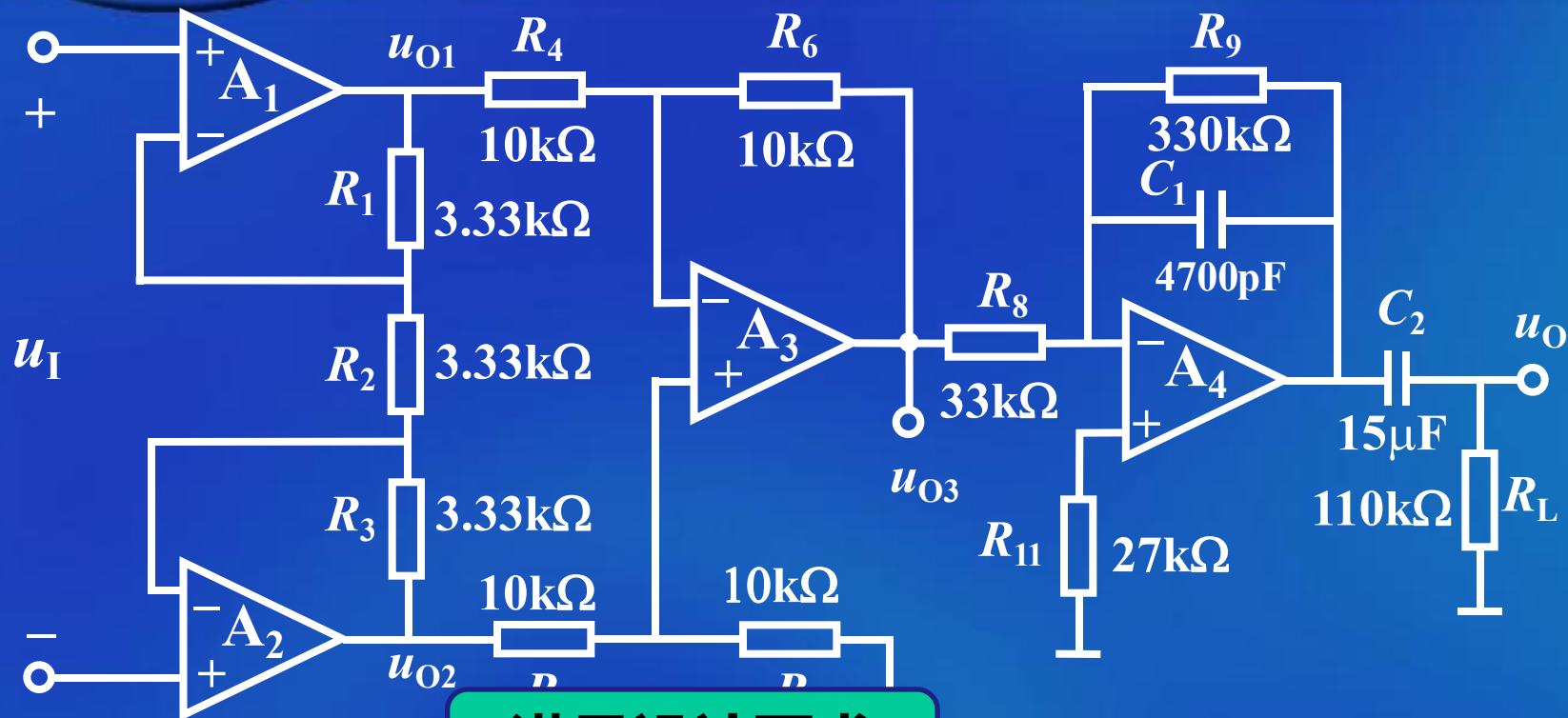
$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o3}}{\dot{U}_i} \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{o3}} = \dot{A}_{u1} \left(-\frac{R_9}{R_8} \right) = -3 \times \left(-\frac{330}{33} \right) = 30$$



(c) 整个电路的上、下限截止频率分别为

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_9 C_1} \approx 102.6\text{Hz}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_L C_2} \approx 0.095\text{Hz}$$



满足设计要求

放大倍数 > 30

信号的频率范围大致在 0.1-110Hz

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 30 \quad f_H = \frac{1}{2\pi R_9 C_1} \approx 102.6\text{Hz} \quad f_L = \frac{1}{2\pi R_L C_2} \approx 0.095\text{Hz}$$