



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

电子技术实验

实验三 RC 电路频率特性的研究

信息与计算机实验教学中心

2024年11月14日

实验主要内容



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 01 实验目的
- 02 实验原理
- 03 实验内容、步骤及注意事项
- 04 实验思考题
- 05 实验仪器与设备



实验目的



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 1 掌握RC低通、高通电路和串并联选频电路的频率特性。**
- 2 掌握网络频率特性测试的一般方法。**
- 3 掌握示波器测量同频率正弦信号相位差。**

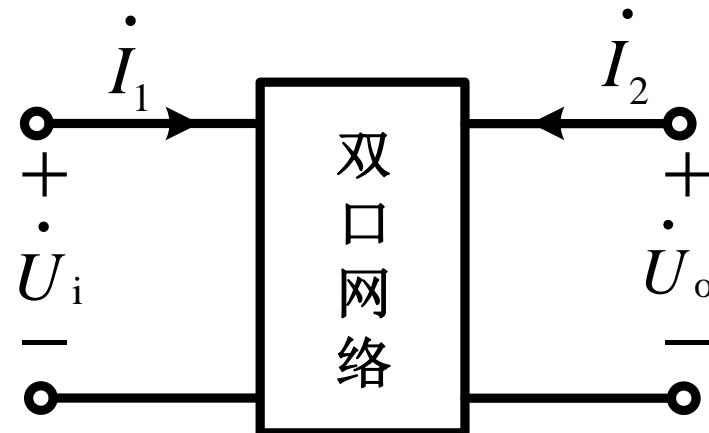


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

实验原理



实验原理—频率特性的定义



传递函数（网络函数）：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega) = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| \angle \varphi_{u_o} - \varphi_{u_i}$$

其中：

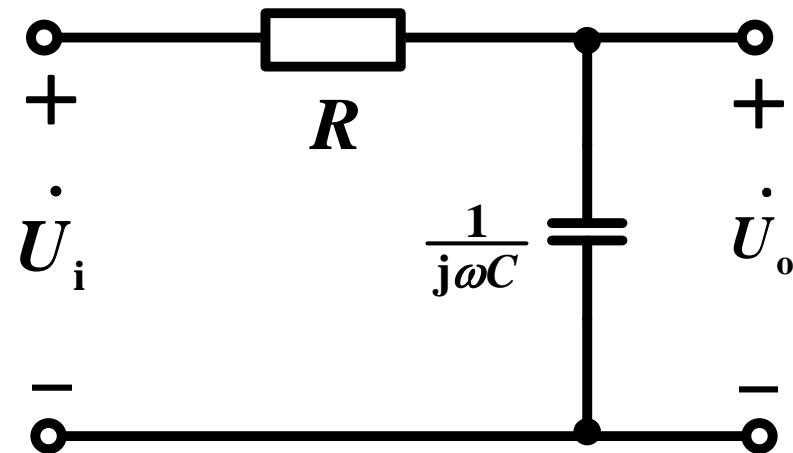
$$|H(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| \quad \dots \dots \dots \text{传递函数的幅值函数}$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_{u_o} - \varphi_{u_i} \quad \dots \dots \dots \text{传递函数的相位函数}$$



实验原理— RC 一阶低通电路

下图为 RC 一阶低通滤波电路（相位滞后电路）的相量模型，取电容 C 两端的电压为输出电压。



其输出电压：

$$\dot{U}_o = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i}{j\omega CR + 1}$$



实验原理—RC一阶低通电路

此电路的电压传递函数（网络函数）：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{j\omega RC + 1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\operatorname{tg}^{-1}(\omega RC) = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$

式中，

$$|H(j\omega)| \triangleq \frac{|\dot{U}_o|}{|\dot{U}_i|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

幅值函数

幅值函数与激励信号频率的变化关系称为幅频特性。

式中，

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{tg}^{-1}(\omega RC)$$

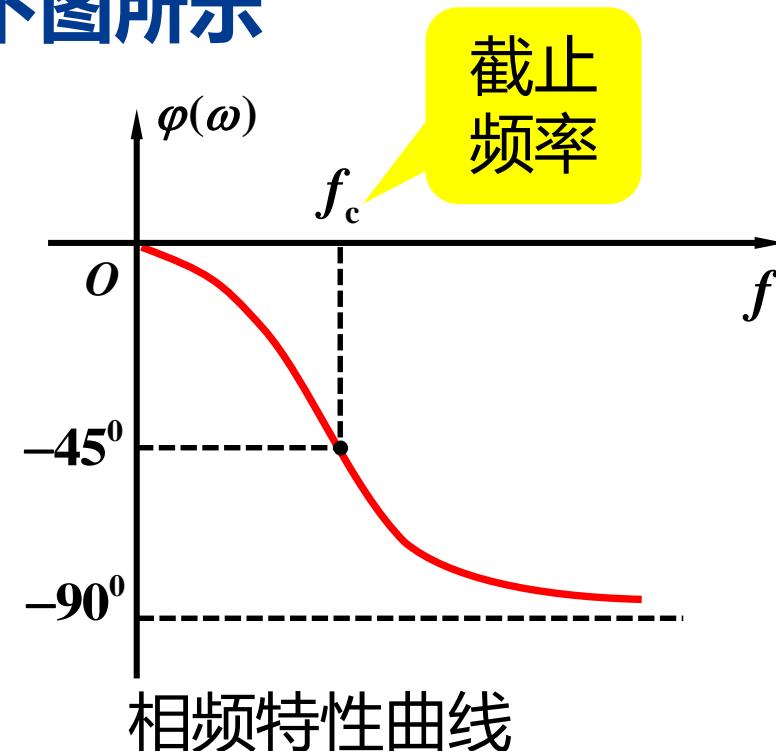
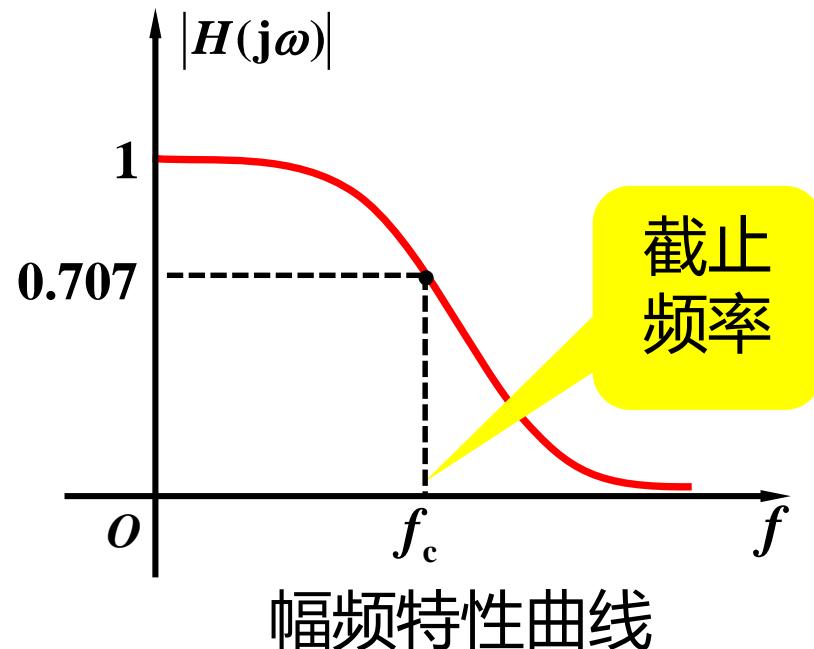
相位函数

相位函数与激励信号频率的变化关系称为相频特性。



实验原理—RC一阶低通电路

■ RC低通电路的频率特性曲线如下图所示



当 $\omega = \frac{1}{RC}$ 时，得到 $|H(j\omega)| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$, $\varphi(\omega) = -45^\circ$

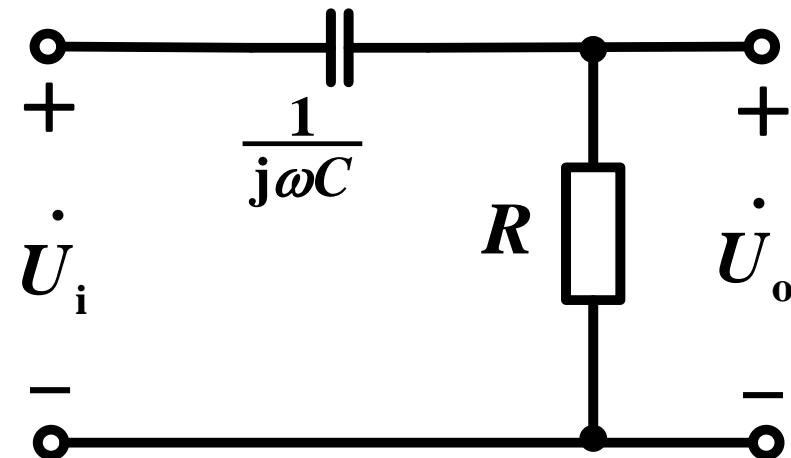
故称此时的频率为截止频率，用 f_c (ω_c) 表示。

其带宽范围：0~ f_c (ω_c)



实验原理— RC 一阶高通电路

下图为 RC 一阶高通滤波电路（相位超前电路）的相量模型，取电阻 R 两端的电压为输出电压。



其输出电压：

$$\dot{U}_o = \frac{R}{R + 1/j\omega RC} \dot{U}_i = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1} \dot{U}_i$$



实验原理—*RC*一阶高通电路

此电路的电压传递函数（网络函数）：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1}(\omega RC) = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$

式中， $|H(j\omega)| \triangleq \frac{|\dot{U}_o|}{|\dot{U}_i|} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$ 幅值函数

幅值函数与激励信号频率的变化关系称为幅频特性。

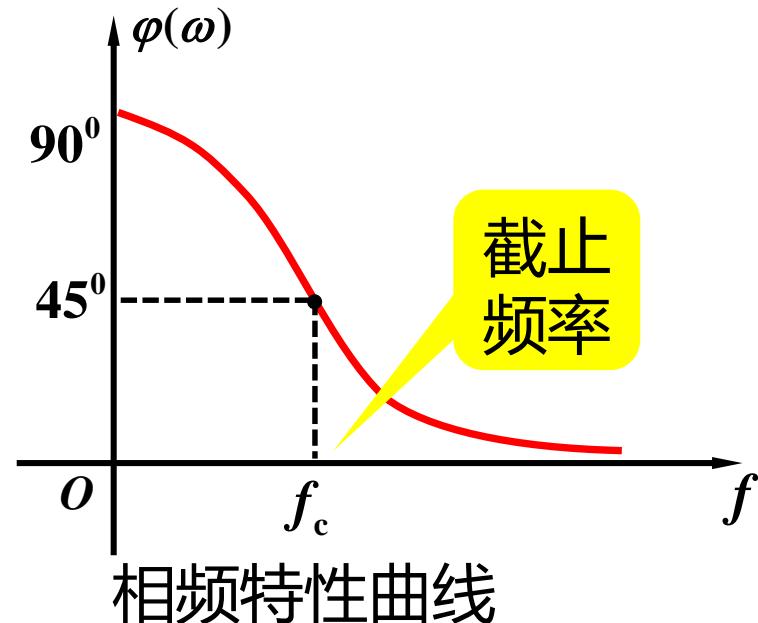
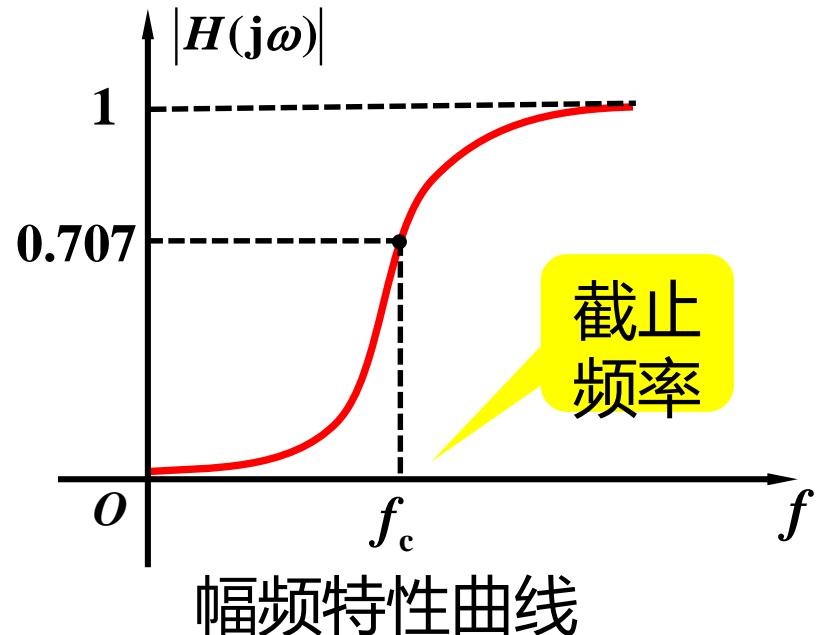
式中， $\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1}(\omega RC)$ 相位函数

相位函数与激励信号频率的变化关系称为相频特性。



实验原理—RC一阶高通电路

■ RC高通电路的频率特性曲线如下图所示



当 $\omega = \frac{1}{RC}$ 时，得到 $|H(j\omega)| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$, $\varphi(\omega) = 45^\circ$,

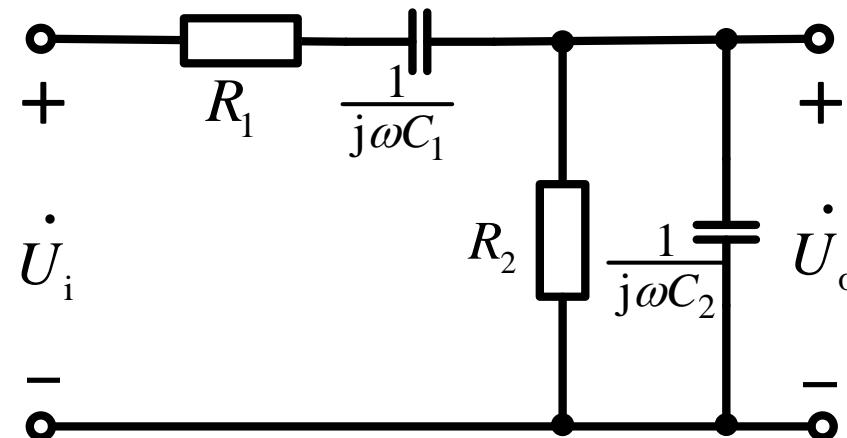
故称此时的频率为截止频率，用 $f_c(\omega_c)$ 表示。

其带宽范围： $f_c(\omega_c) \sim \infty$



实验原理—RC串并联选频电路

下图为 RC 二阶带通滤波电路图的相量模型， \dot{U}_i 为激励相量， \dot{U}_o 为响应相量。电阻 R_2 与电容 C_2 并联的支路两端的电压为输出电压。



此电路的电压传递函数（网络函数）：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}\right) + j\left(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1}\right)}$$



实验原理—RC串并联选频电路

通常取, $R_1 = R_2$, $C_1 = C_2$

式中,

$$|H(j\omega)| \triangleq \frac{|\dot{U}_o|}{|\dot{U}_i|} = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (\omega RC - \frac{1}{\omega RC})^2}} \quad \text{幅值函数}$$

幅值函数与激励信号频率的变化关系称为幅频特性。

式中,

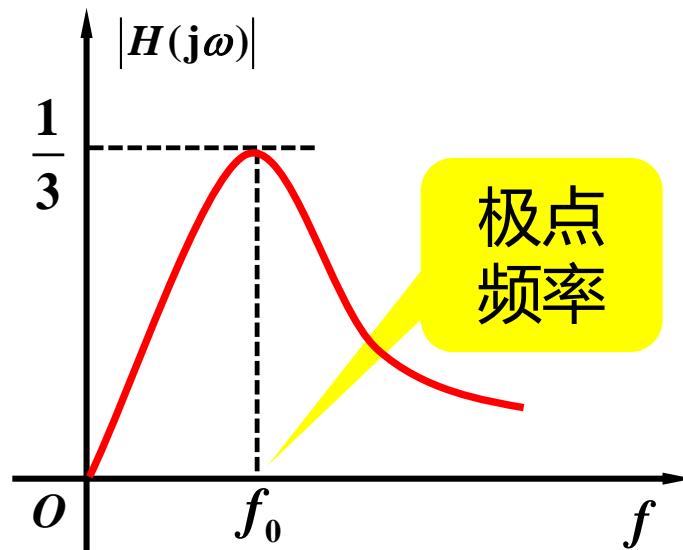
$$\varphi(\omega) = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega RC - \frac{1}{\omega RC}}{3}\right) \quad \text{相位函数}$$

相位函数与激励信号频率的变化关系称为相频特性。

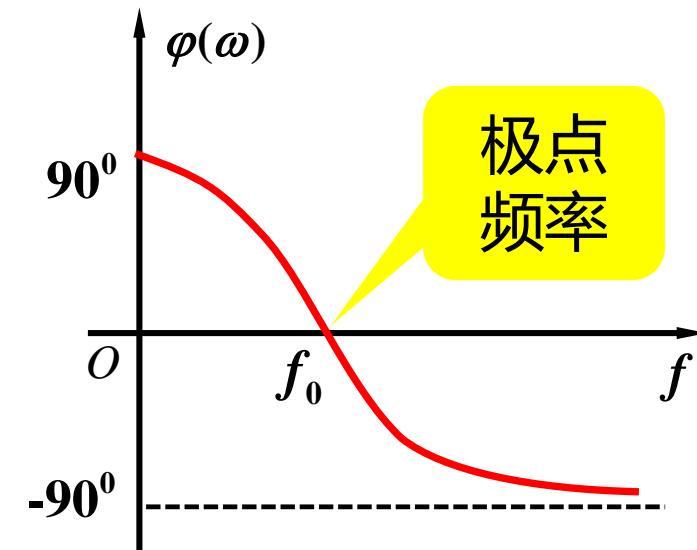


实验原理—RC串并联选频电路

■ RC串并联选频电路的频率特性曲线如下图所示



幅频特性曲线



相频特性曲线

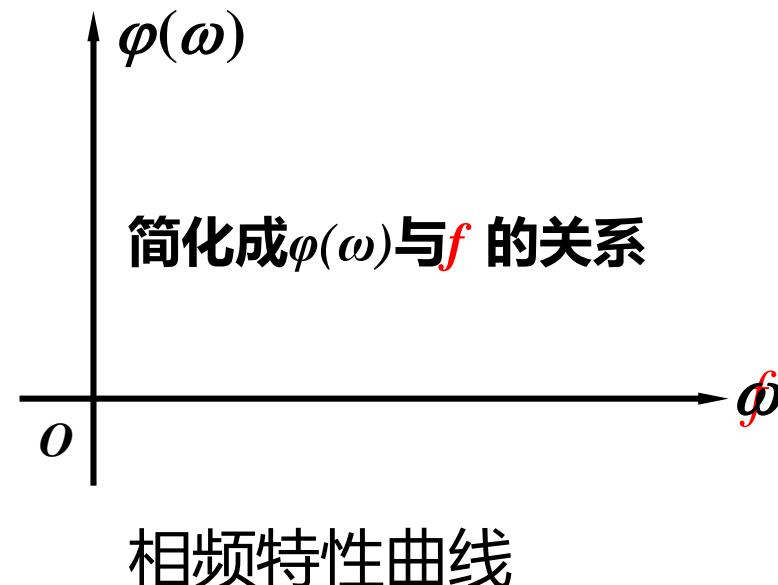
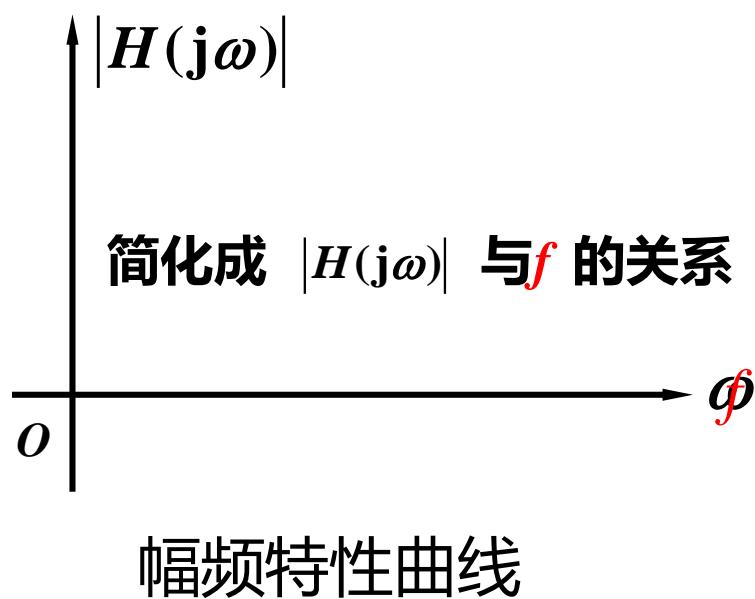
当频率 $\omega = \frac{1}{RC}$ 时，得到 $|H(j\omega)| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{3}, \varphi(\omega) = 0^\circ$

此时的频率 ω 称为电路极点频率，用 $\omega_0(f_0)$ 表示。输出幅度 U_o 最大，且 U_i 与 U_o 同相位，



实验原理—频率特性的测量方法

如何用实验的方法测得双口网络的频率特性曲线？

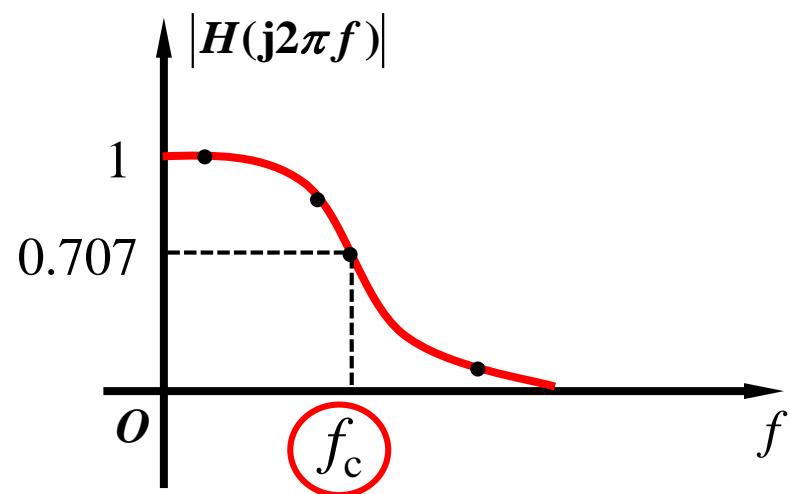




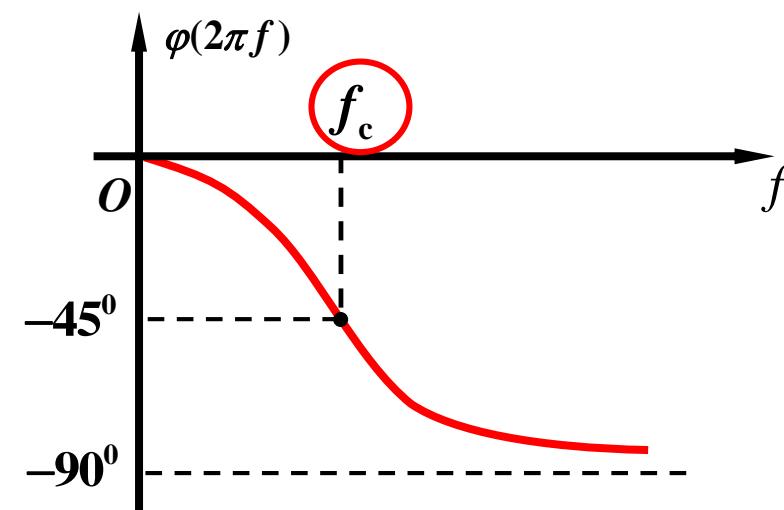
实验原理—频率特性的测量方法

测试方法：点频法测量双口网络的频率特性。

选取一定数量的频率点，改变信号源的频率，在各频率点处测量输入电压、输出电压、相位角的大小，根据测量数据，运用描点法绘出幅频、相频特性曲线。



幅频特性曲线



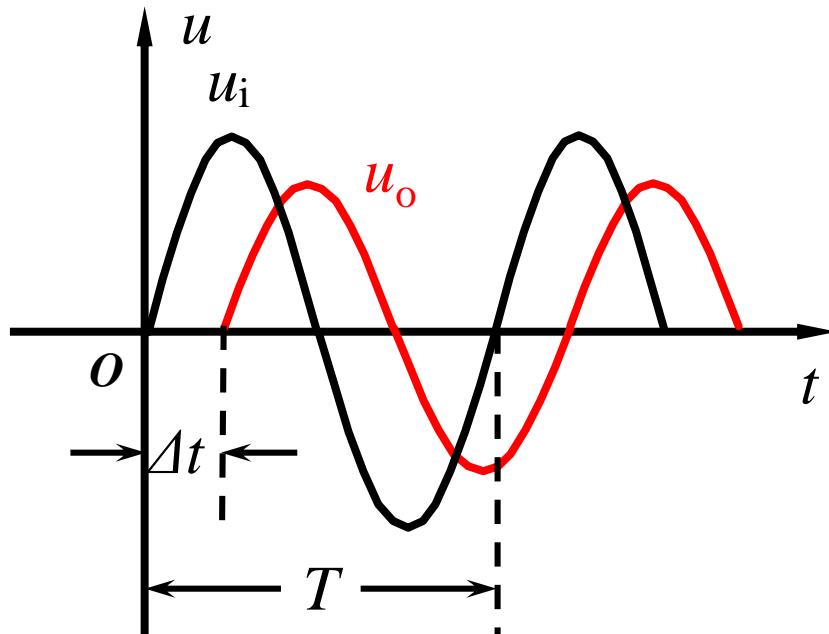
相频特性曲线



实验原理—相位差的测量方法

■ 时域法

根据两个同频率的正弦信号，比较相位差。



相位差角为：

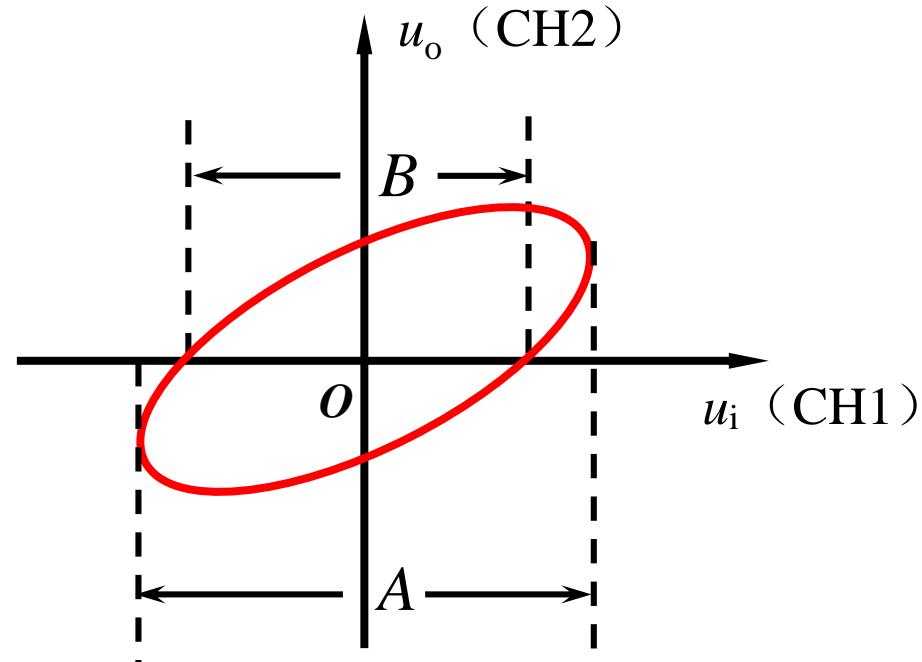
$$\theta = \frac{\Delta t}{T} \times 360^0$$

输出与输入信号之间的相位是超前还是滞后，要判断并在图上标明。



实验原理—相位差的测量方法

■ 李沙育图形法



相位差角为：

$$\theta = \sin^{-1} \frac{B}{A}$$

图中，**A**是李沙育图形在水平方向上的投影，
B是李沙育图形在水平方向上两交点之间的距离。



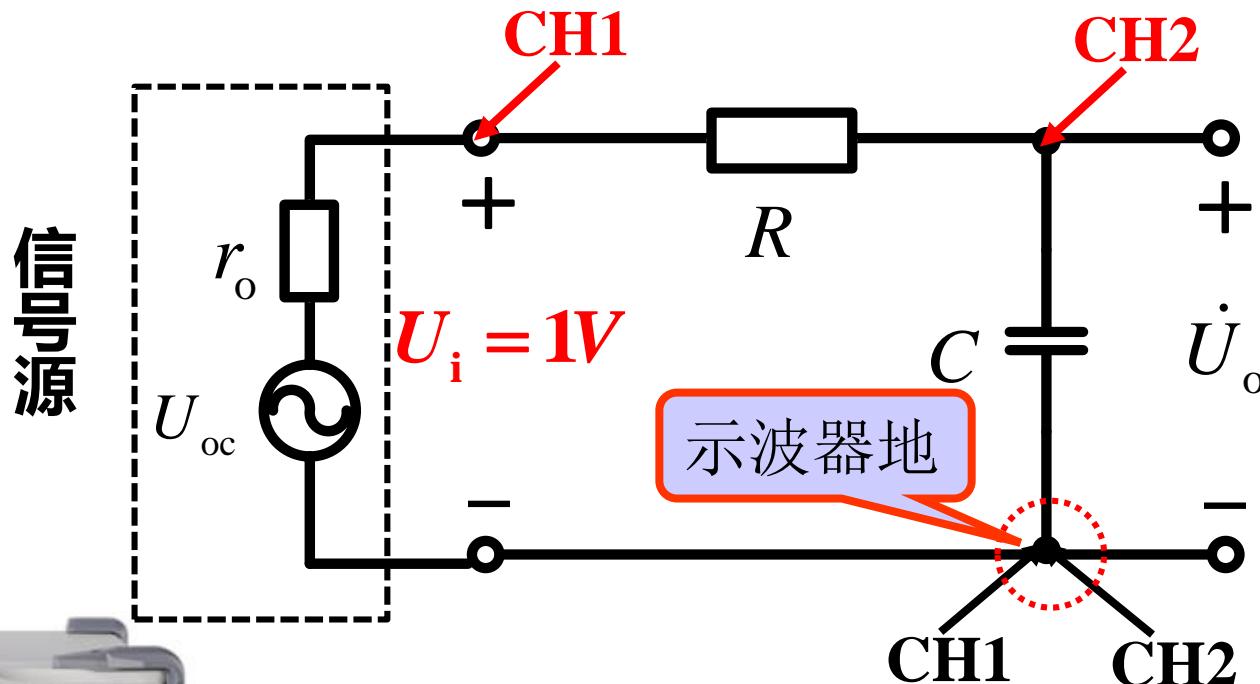
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

实验内容、步骤及注意事项



实验内容—RC一阶低通电路频率特性的测试

RC 低通电路实验电路图



$$R = ?$$

$$C = 0.1\mu F$$





实验内容—RC一阶低通电路频率特性的测试

- ◆ 当上截止频率 $f_c = 800\text{Hz}$ 时，电容 $C=0.1\mu\text{F}$ ，自选电阻 $R=?$ 的数值。
- ◆ 输入正弦信号，有效值 $U_i = 1\text{V}$ ，**改变信号源的频率**，用毫伏表观察输出端电压的变化，用示波器的李沙育法观测输入 U_i 和输出 U_o 的相位差的变化。
- ◆ 记录输入 U_i 和输出 U_o 的有效值；当输出电压 $U_o=0.707\text{V}$ 时，记录输入信号频率 f_c 的大小；用李沙育法测量相位差角，即记录 A 和 B 的数值，完成表格 3-1。

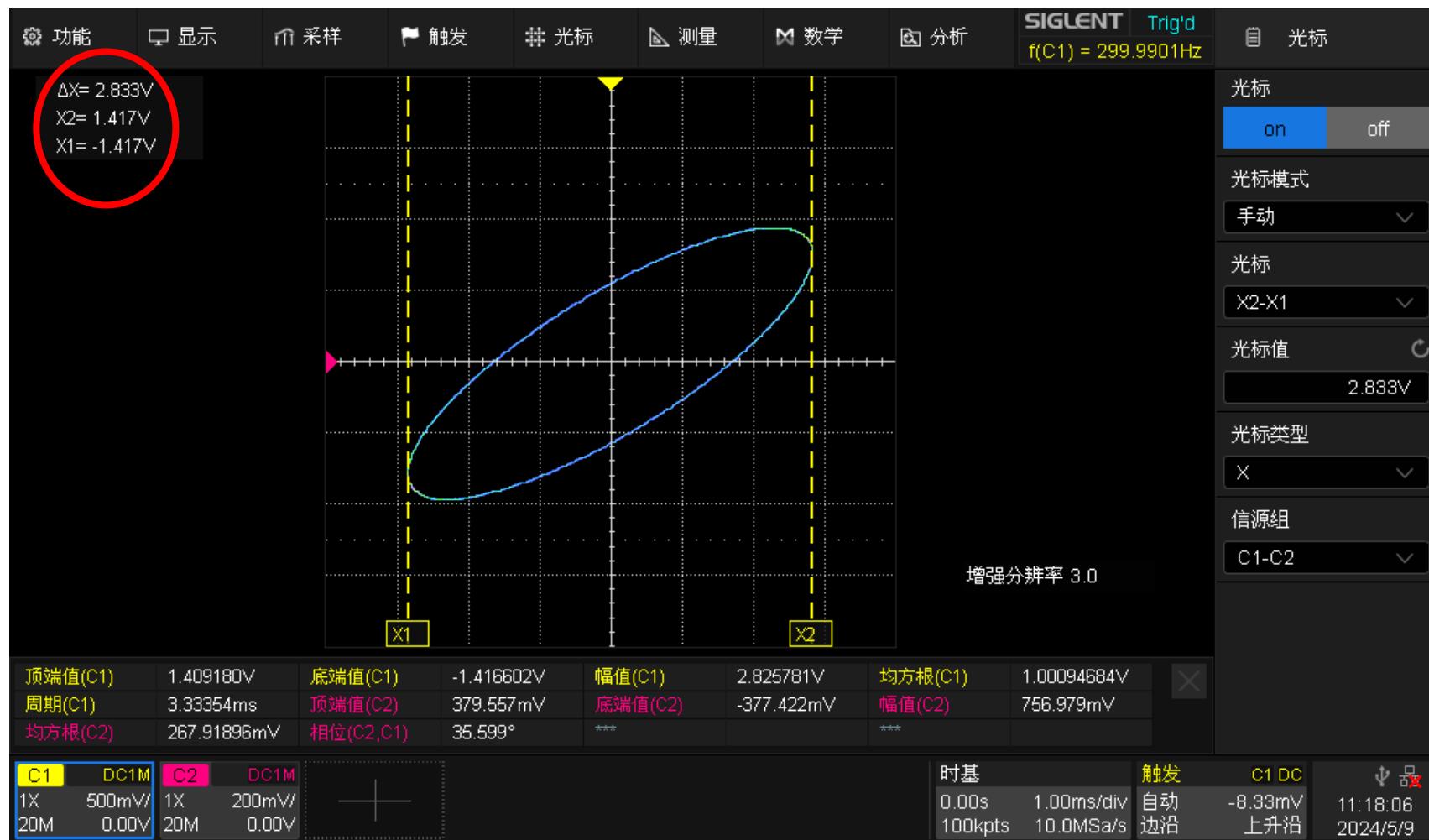
表3-1 $R=?$, $C=0.1\mu\text{F}$, $U_i=1\text{V}$

频率 (Hz)	100	200	500	700	$f_c = ?$	1k	$2f_c$	$5f_c$	$10f_c$
$U_i(\text{V})$?	?	?	?	1V	?	?	?	?
$U_o(\text{V})$?	?	?	?	0.707	?	?	?	?
$B(\text{V})$									
$A(\text{V})$									
$\varphi(f)$									



实验内容—RC一阶低通电路频率特性的测试

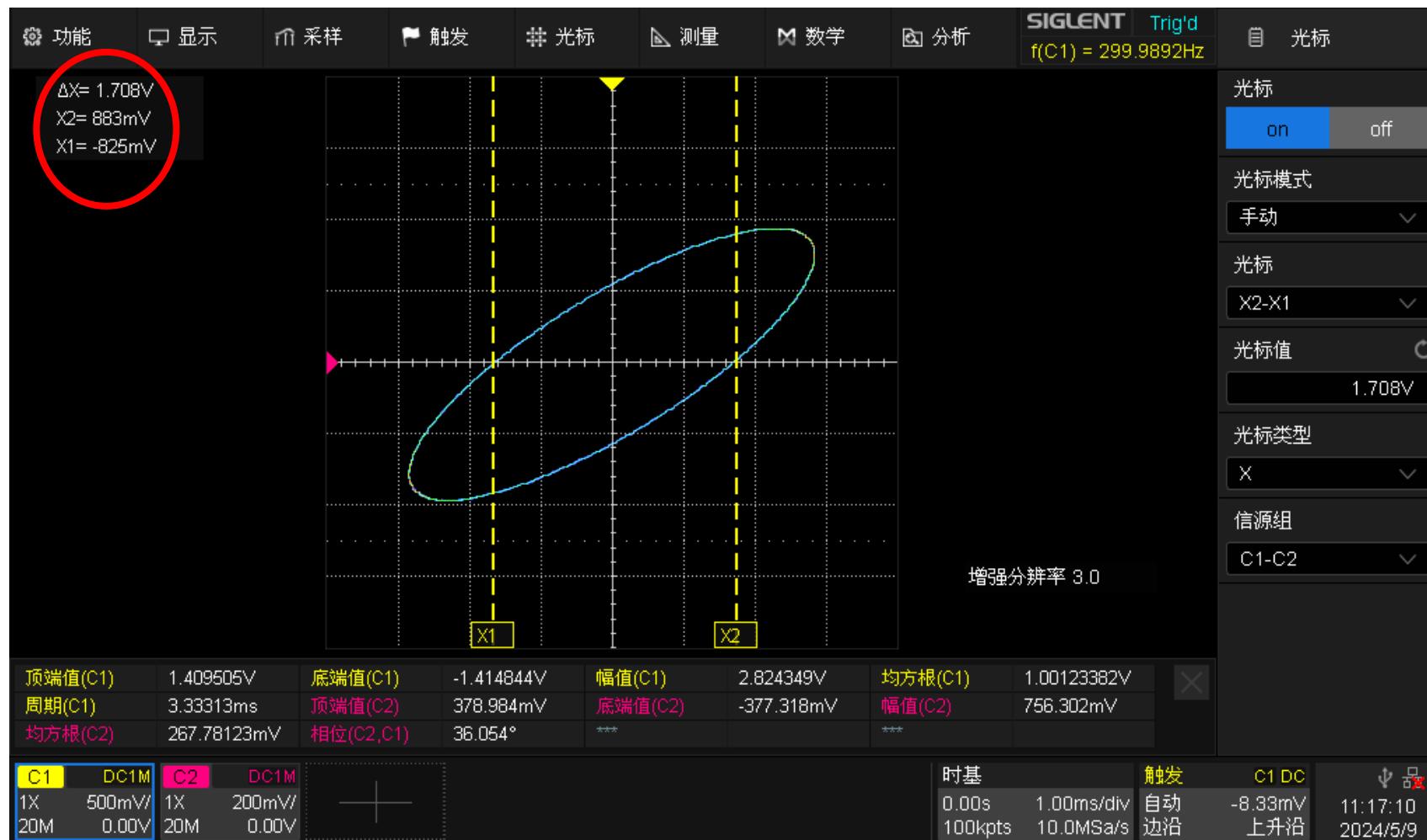
■ 李沙如图形法测量相位角





实验内容—RC一阶低通电路频率特性的测试

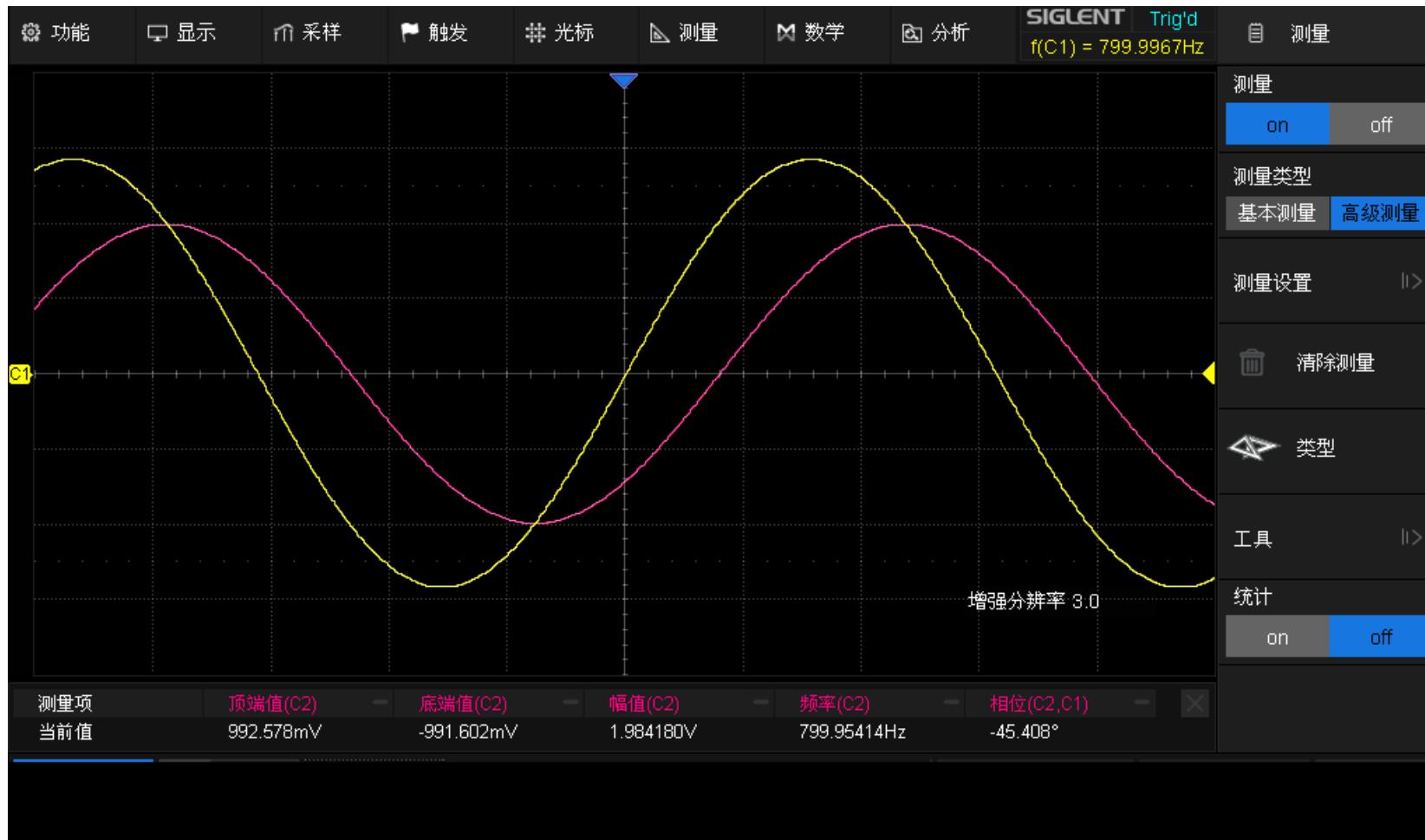
■ 李沙如图形法测量相位角





实验内容—RC一阶低通电路频率特性的测试

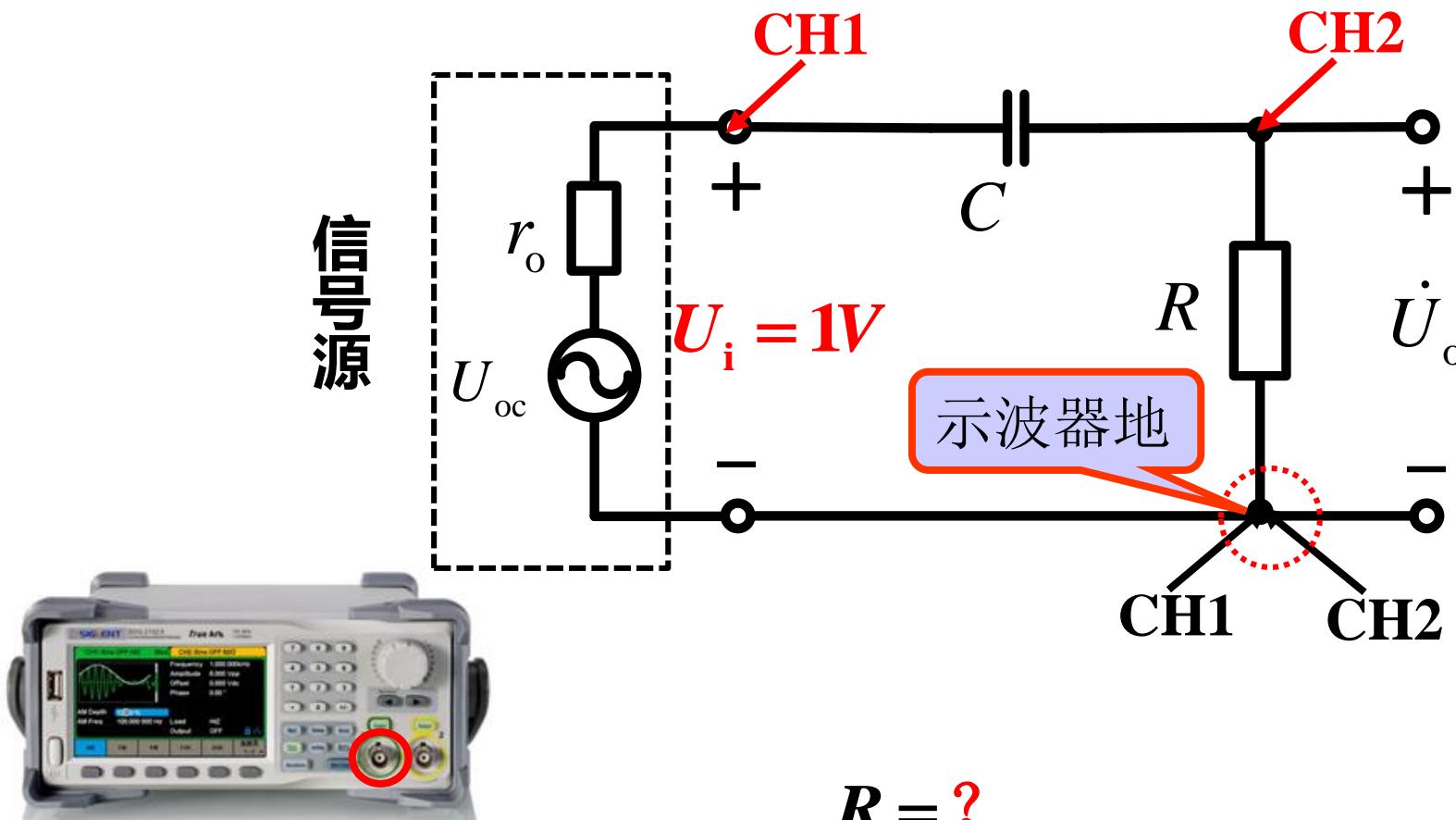
- ◆ 观测并画出输入信号频率为 f_C 时的输入、输出电压波形图，在图上标明其超前、滞后的相位关系。





实验内容—RC一阶高通电路频率特性的测试

RC 高通电路实验电路图



$$C = 0.1\mu F$$





实验内容—RC一阶高通电路频率特性的测试

- ◆ 当下截止频率 $f_c = 800\text{Hz}$ 时，电容 $C=0.1\mu\text{F}$ ，自选电阻 $R=?$ 的数值。
- ◆ 输入正弦信号，有效值 $U_i = 1\text{V}$ ，**改变信号源的频率**，用毫伏表观察输出端电压的变化，用示波器的李沙育法观测输入 U_i 和输出 U_o 的相位差的变化。
- ◆ 记录输入 U_i 和输出 U_o 的有效值；当输出电压 $U_o=0.707\text{V}$ 时，记录输入信号频率 f_c 的大小；用李沙育法测量相位差角，即记录 A 和 B 的数值，完成表格 3-2。

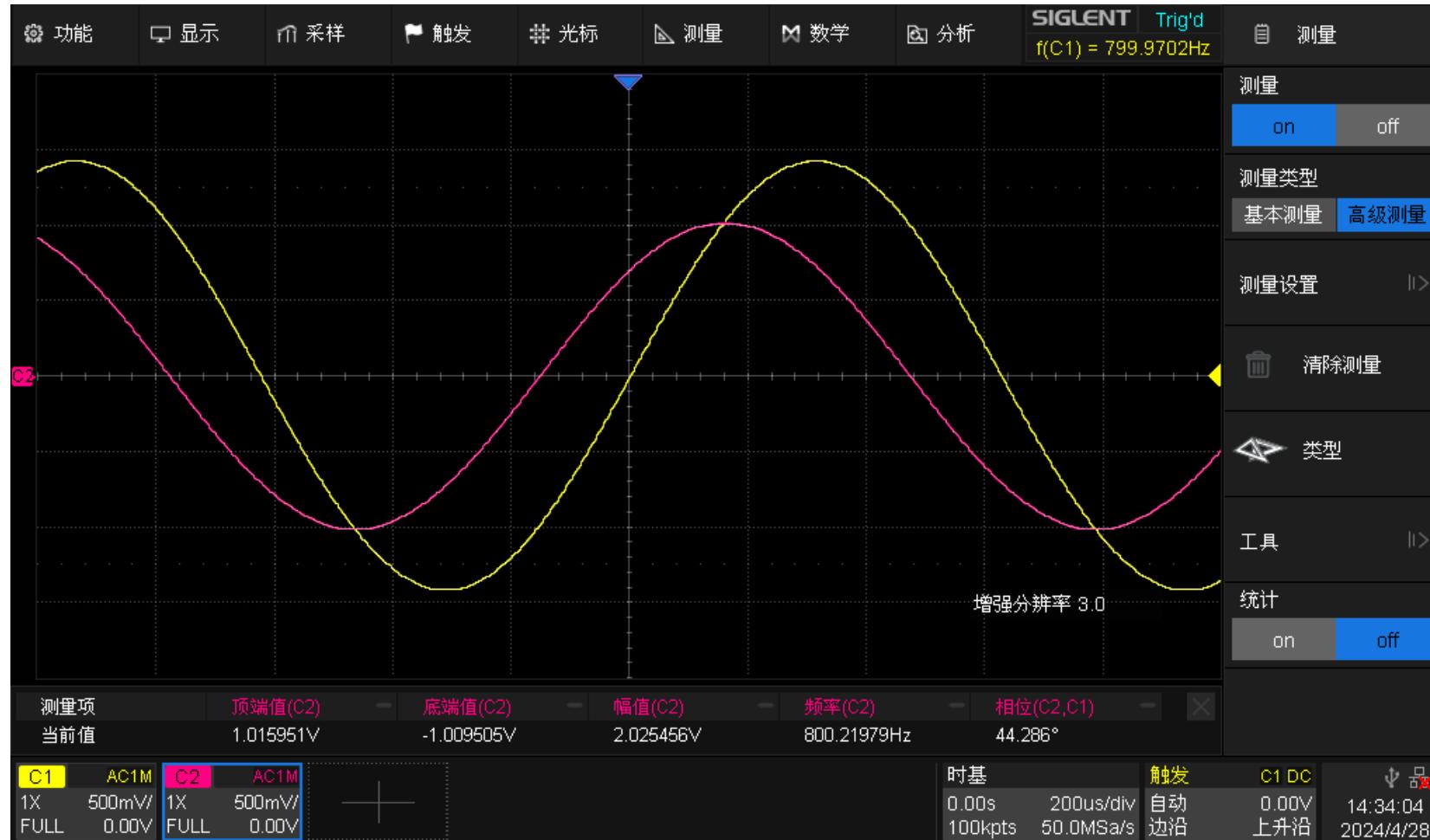
表3-2 $R=?$, $C=0.1\mu\text{F}$, $U_i=1\text{V}$

频率 (Hz)	100	200	500	700	$f_c = ?$	1k	$2f_c$	$5f_c$	$10f_c$
$U_i(\text{V})$?	?	?	?	1V	?	?	?	?
$U_o(\text{V})$?	?	?	?	0.707	?	?	?	?
$B(\text{V})$									
$A(\text{V})$									
$\varphi(f)$									



实验内容—RC一阶高通电路频率特性的测试

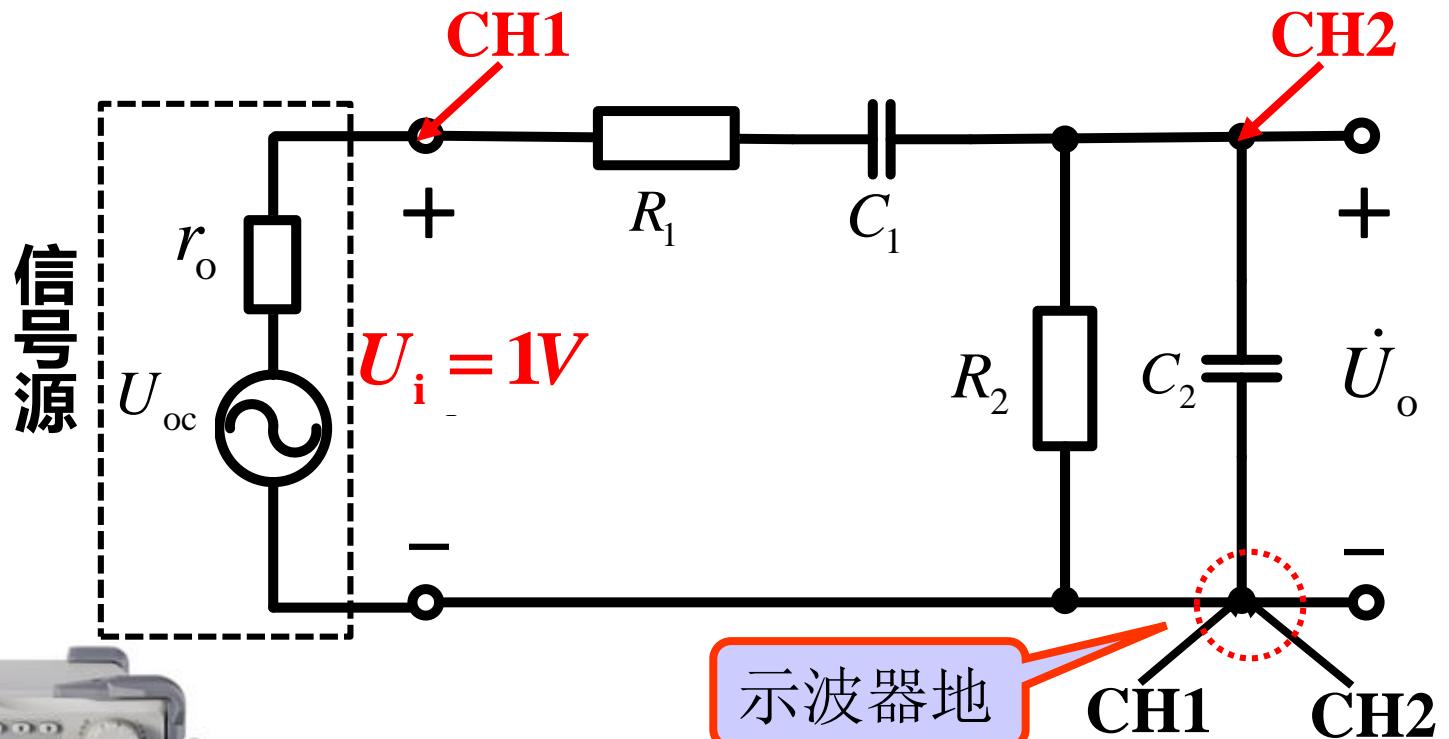
- ◆ 观测并画出输入信号频率为 f_C 时的输入、输出电压波形图，在图上标明其超前、滞后的相位关系。





实验内容—RC串并联选频电路频率特性的测试

RC 串并联选频电路实验电路图



$$R_1 = R_2 = ?$$

$$C_1 = C_2 = 0.1\mu\text{F}$$





实验内容—RC串并联选频电路频率特性的测试

- ◆ 当极点频率 $f_0 = 800\text{Hz}$ 时, 电容 $C_1 = C_2 = 0.1\mu\text{F}$, 自选电阻 $R_1 = R_2 = ?$ 的数值。
- ◆ 输入正弦信号, 有效值为 $U_i = 1\text{V}$, 改变信号源的频率, 用毫伏表观察输出端电压的变化, 用示波器的李沙育法观测输入 U_i 和输出 U_o 的相位差的变化。
- ◆ 记录输入 U_i 和输出 U_o 的有效值; 记录当输出端电压达到最大值时输入信号频率 f_0 的大小; 用李沙育法测量相位差角, 即记录 A 和 B 的数值; 完成表格3-3。

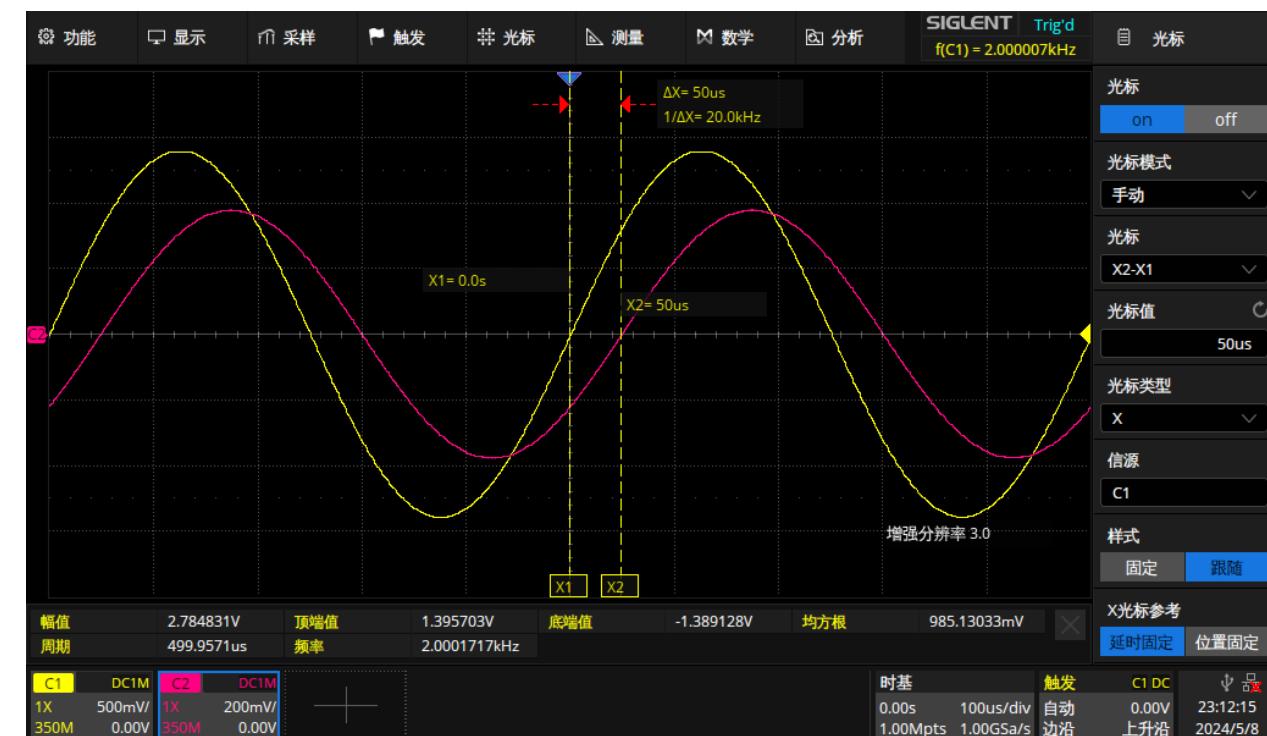
表3-3 $R_1 = R_2 = ?, C_1 = C_2 = 0.1\mu\text{F}, U_i = 1\text{V}$

频率 (Hz)	100	200	500	700	$f_0 = ?$	1k	$2f_0$	$5f_0$	$10f_0$
$U_i(\text{V})$?	?	?	?	1V	?	?	?	?
$U_o(\text{V})$?	?	?	?	最大值	?	?	?	?
$B(\text{V})$									
$A(\text{V})$									
$\varphi(f)$									



实验内容—RC串并联选频电路频率特性的测试

- ◆ 观测并画出当输入信号频率大于和小于 f_0 时的输入、输出电压波形图（2组），在图上标明其超前、滞后的相位关系。



实验注意事项



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1. 在实验测量过程中，由于信号源内阻的影响，对于不同的频率，在测量输出电压的同时要记录对应输入电压的大小。
2. 尽量合理的选择测试点，在截止频率附近多测量几个点，而曲线变化比较平坦的部分可以少取测试点。

实验思考题



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1. 两个不同频率的正弦信号能否测量其相位差，为什么？
2. 理论证明李沙育法相位角公式： $\theta = \sin^{-1} \frac{B}{A}$
3. 用不同幅度的输入信号测试本次实验中电路的幅频特性，测量的结果会发生变化吗？为什么？

下次实验112实验室：

分组2 集成运算放大器的应用
分组1 门电路测试与应用