



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



- 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。

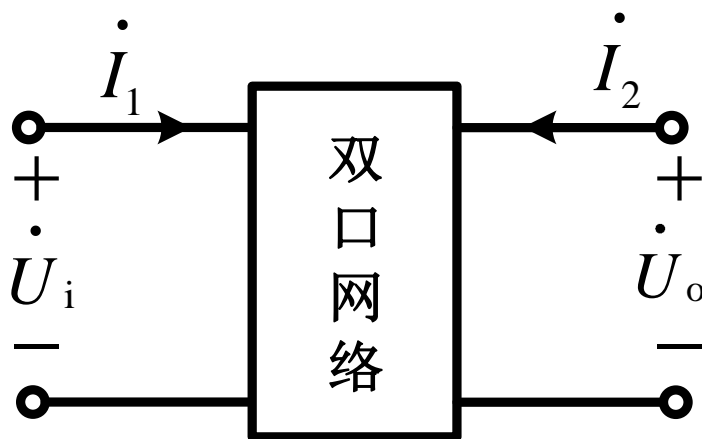


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

实验原理



实验原理—频率特性的定义



传递函数（网络函数）：

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

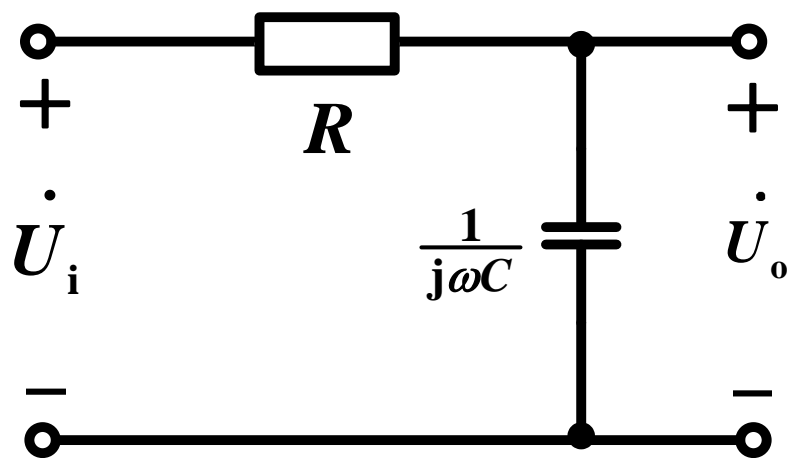
其中： $|H(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right|$ 传递函数的幅值函数

$\varphi(\omega) = \varphi_{u_o} - \varphi_{u_i}$ 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，

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

幅值函数与激励信号频率的变化关系称为幅频特性。

式中，

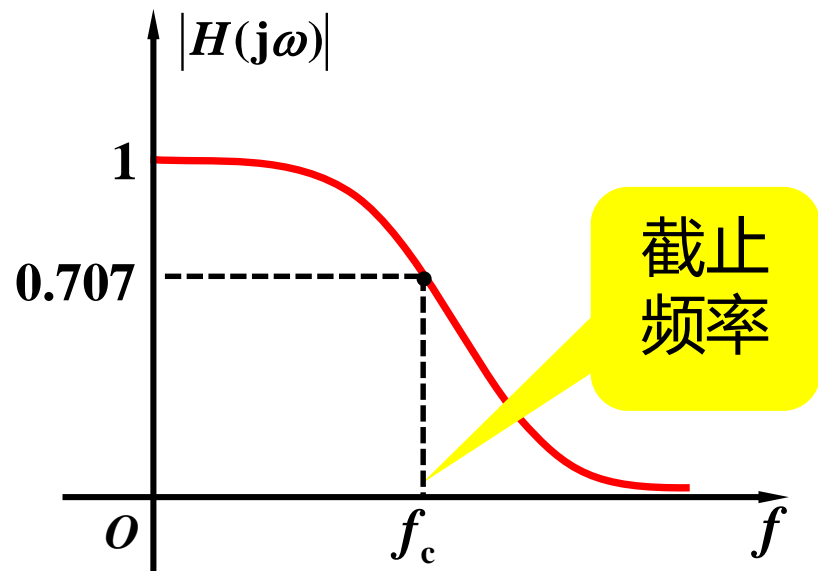
$$\varphi(\omega) = -\operatorname{tg}^{-1}(\omega RC) \quad \text{..... 相位函数}$$

相位函数与激励信号频率的变化关系称为相频特性。

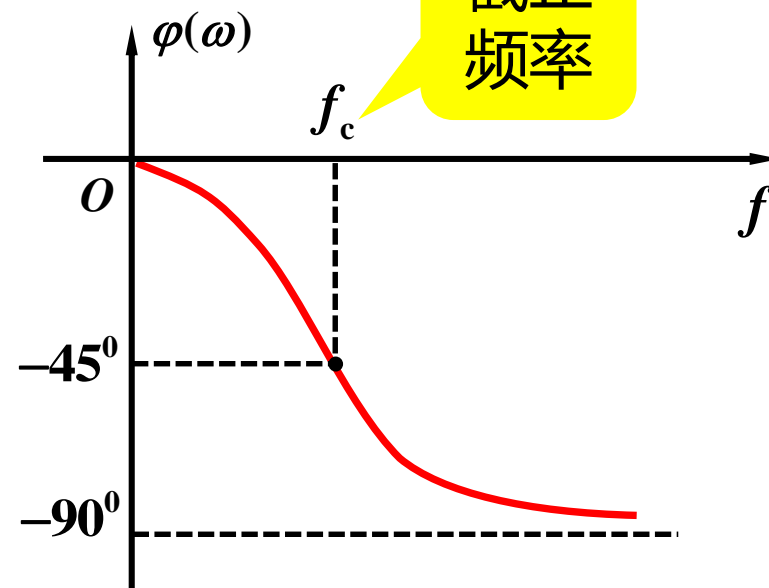


实验原理— RC —阶低通电路

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

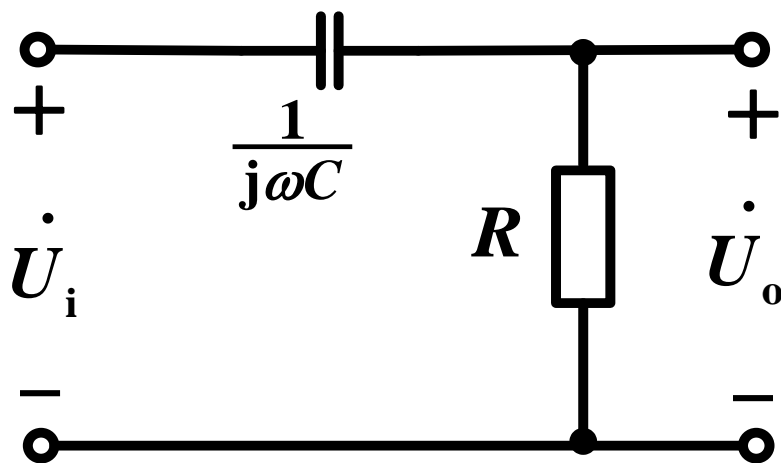
故称此时的频率为截止频率, 用 f_c (ω_c) 表示。

其带宽范围: $0 \sim f_c$ (ω_c)



实验原理— RC —阶高通电路

下图为 RC —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 —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， $|H(j\omega)| \triangleq \frac{\left| \dot{U}_o \right|}{\left| \dot{U}_i \right|} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$ 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。

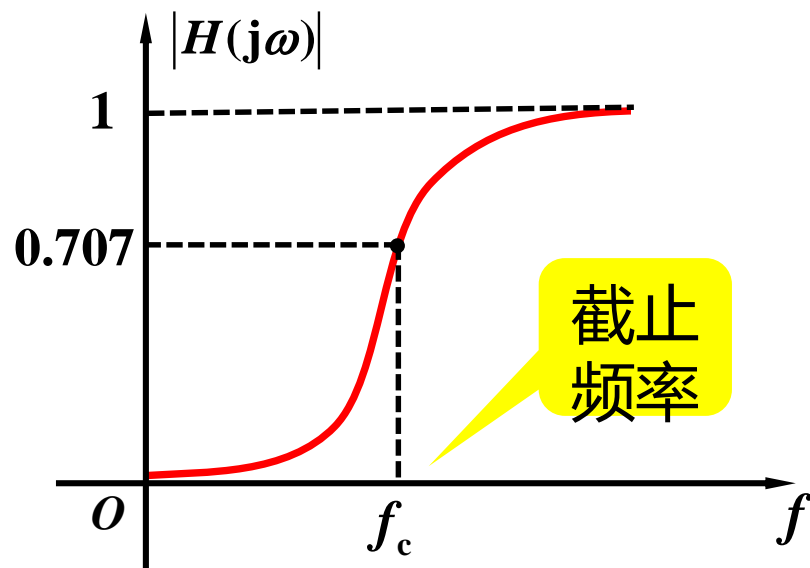
式中， $\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1}(\omega RC)$ 相位函数

相位函数与激励信号频率的变化关系称为相频特性。

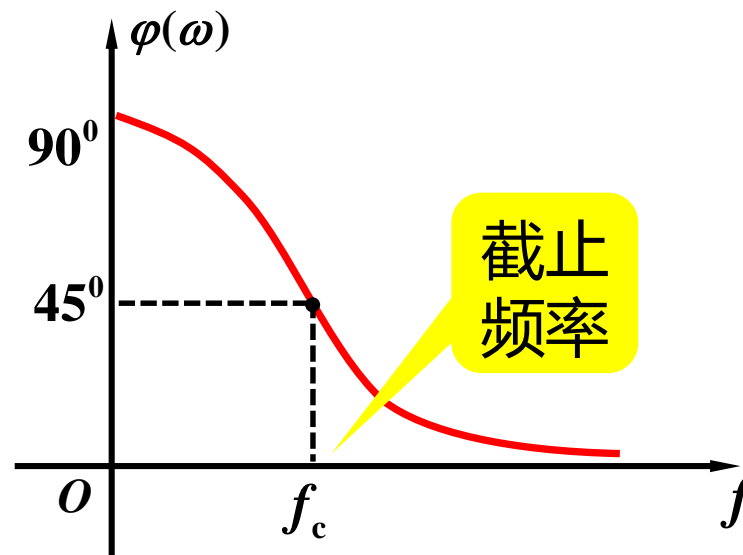


实验原理— RC —一阶高通电路

■ RC 高通电路的频率特性曲线如下图所示



幅频特性曲线



相频特性曲线

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

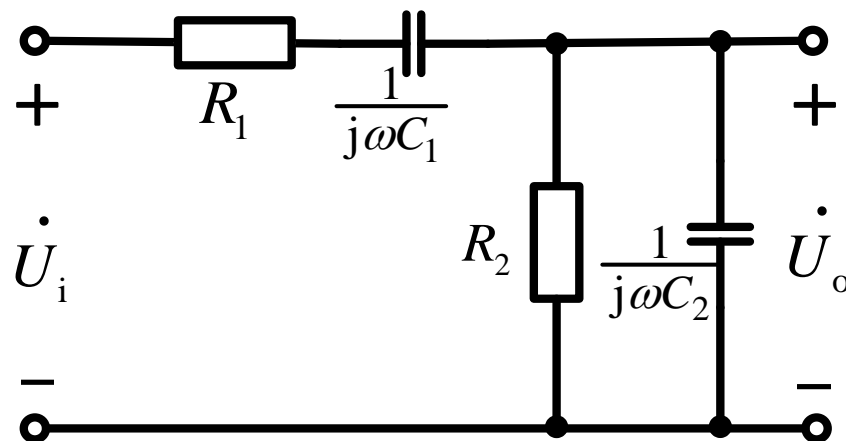
故称此时的频率为截止频率, 用 f_c (ω_c) 表示。

其带宽范围: $f_c(\omega_c) \sim \infty$



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,

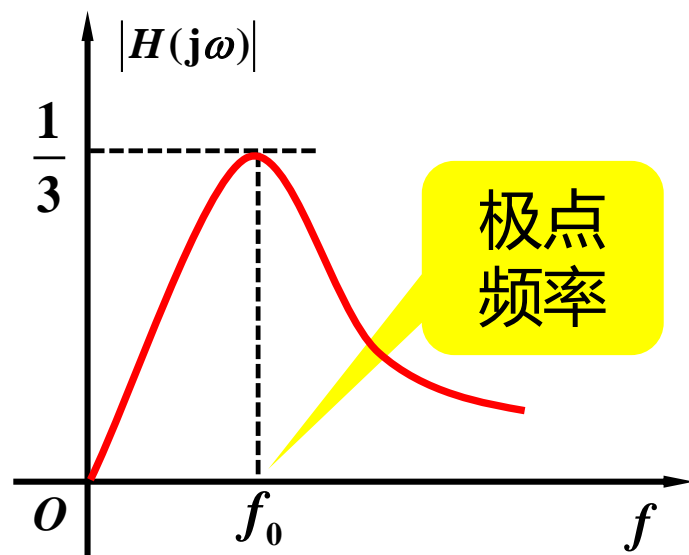
$$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega RC - \frac{1}{\omega RC}}{3}\right) \quad \text{..... 相位函数}$$

相位函数与激励信号频率的变化关系称为相频特性。

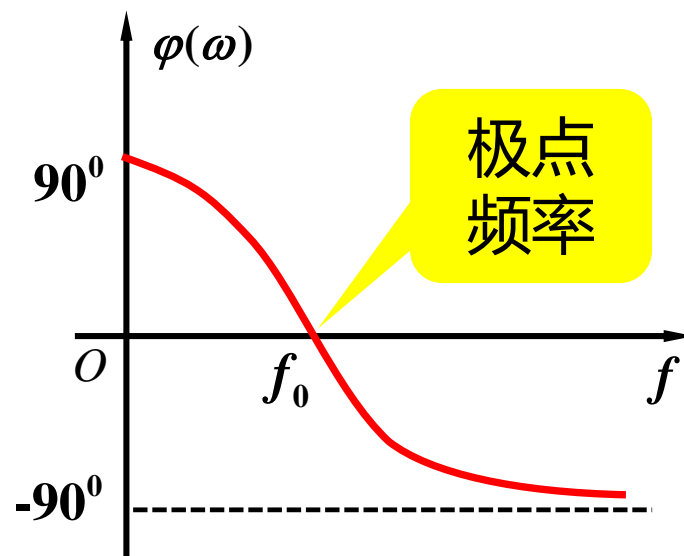


实验原理— RC 串并联选频电路

■ 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

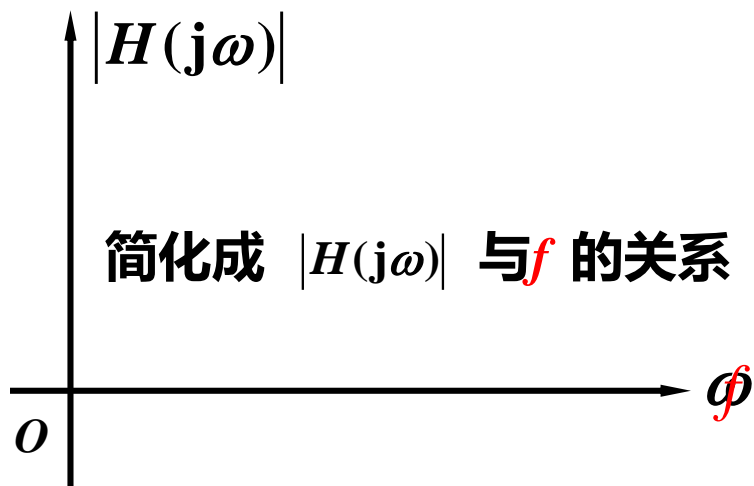
当频率 $\omega = \frac{1}{RC}$ 时, 得到 $|H(j\omega)| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{3}$, $\varphi(\omega) = 0^\circ$

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,

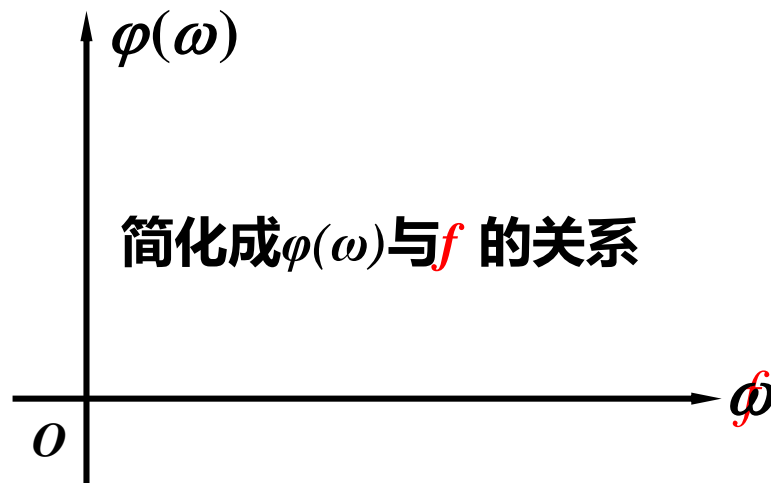


实验原理—频率特性的测量方法

如何用实验的方法测得双口网络的频率特性曲线？



幅频特性曲线



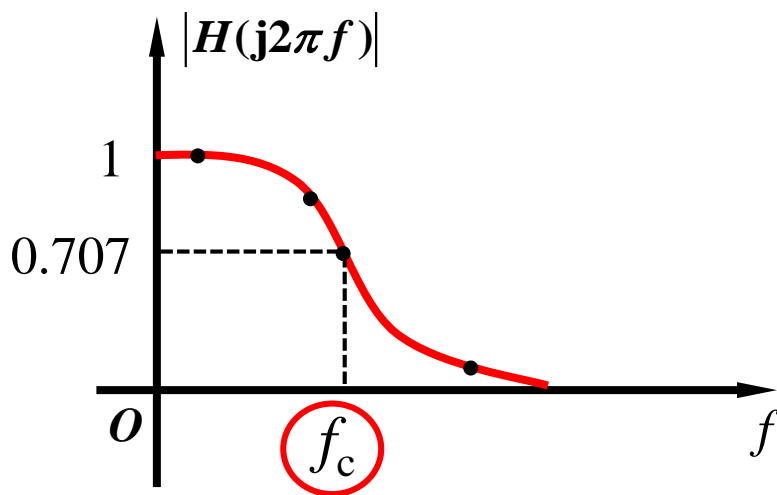
相频特性曲线



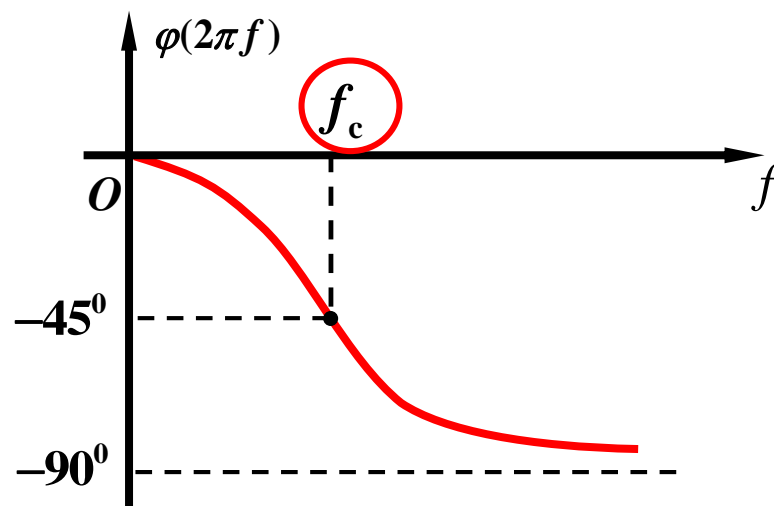
实验原理—频率特性的测量方法

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



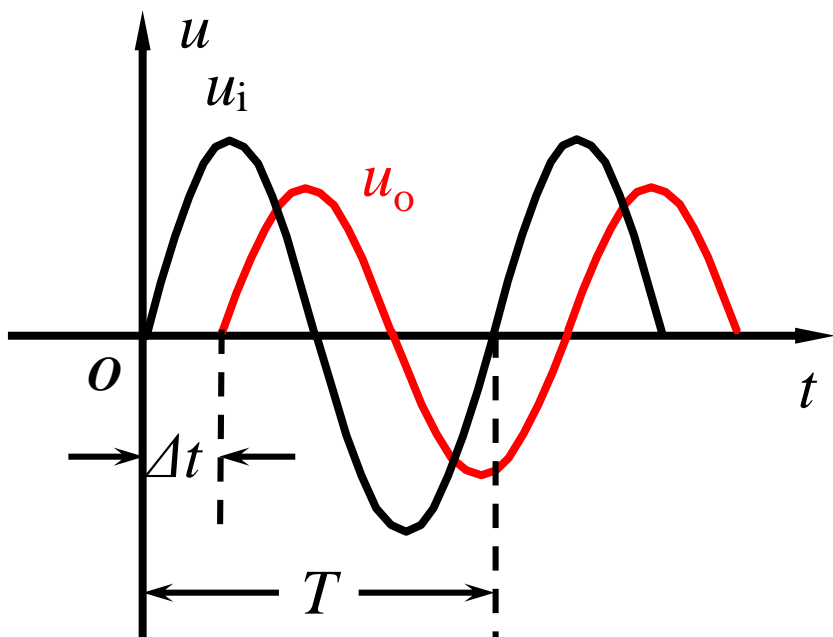
相频特性曲线



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:

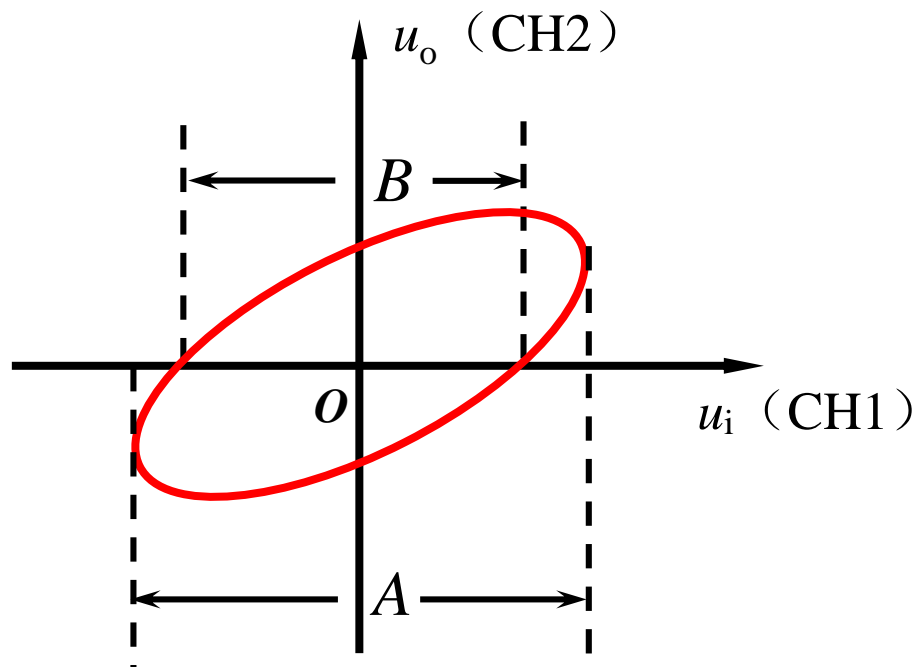
$$\theta = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ$$

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。



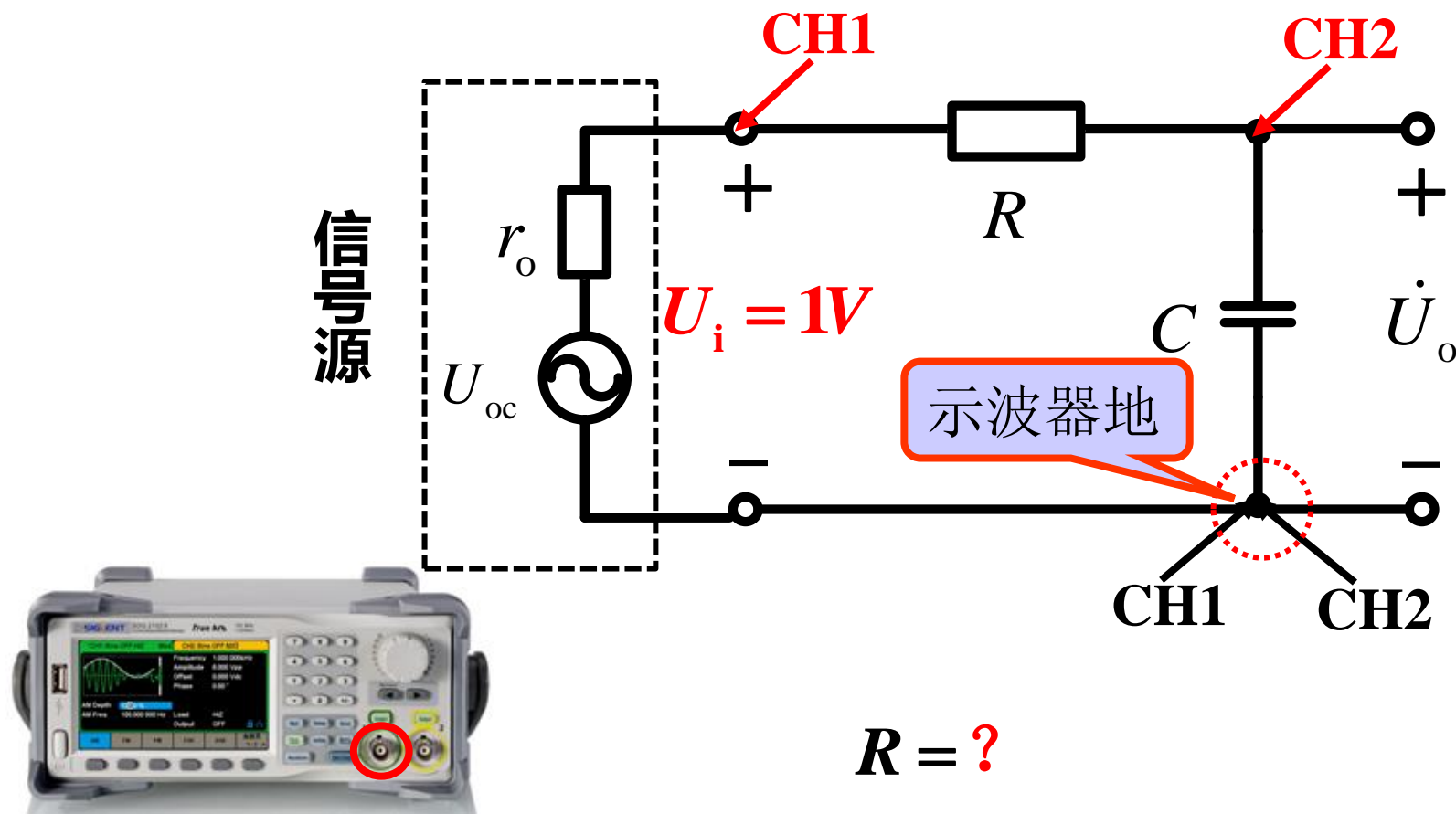
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

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 —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。

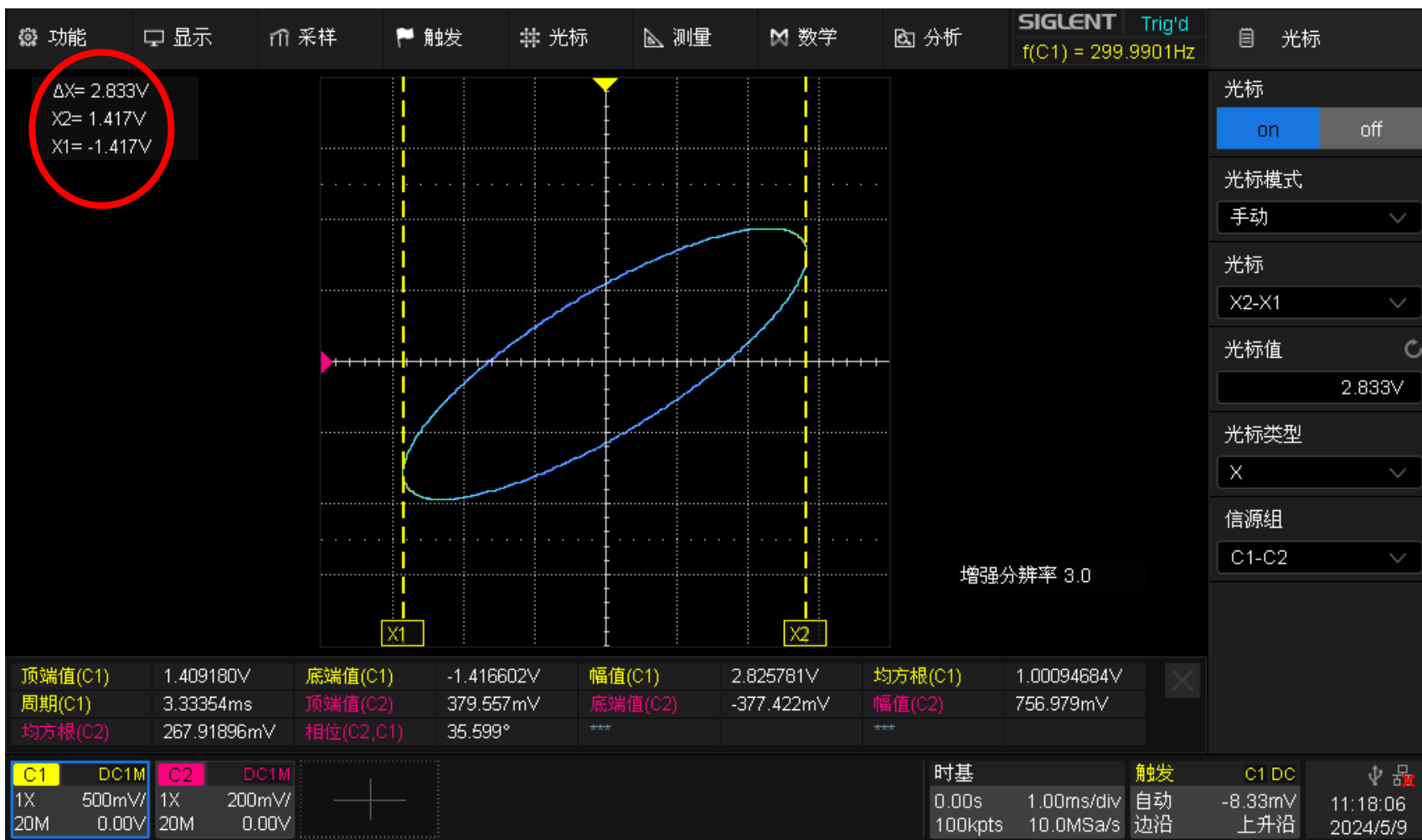
表3-1 $R=?$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ ， $U_i=1\text{V}$

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 —阶低通电路频率特性的测试

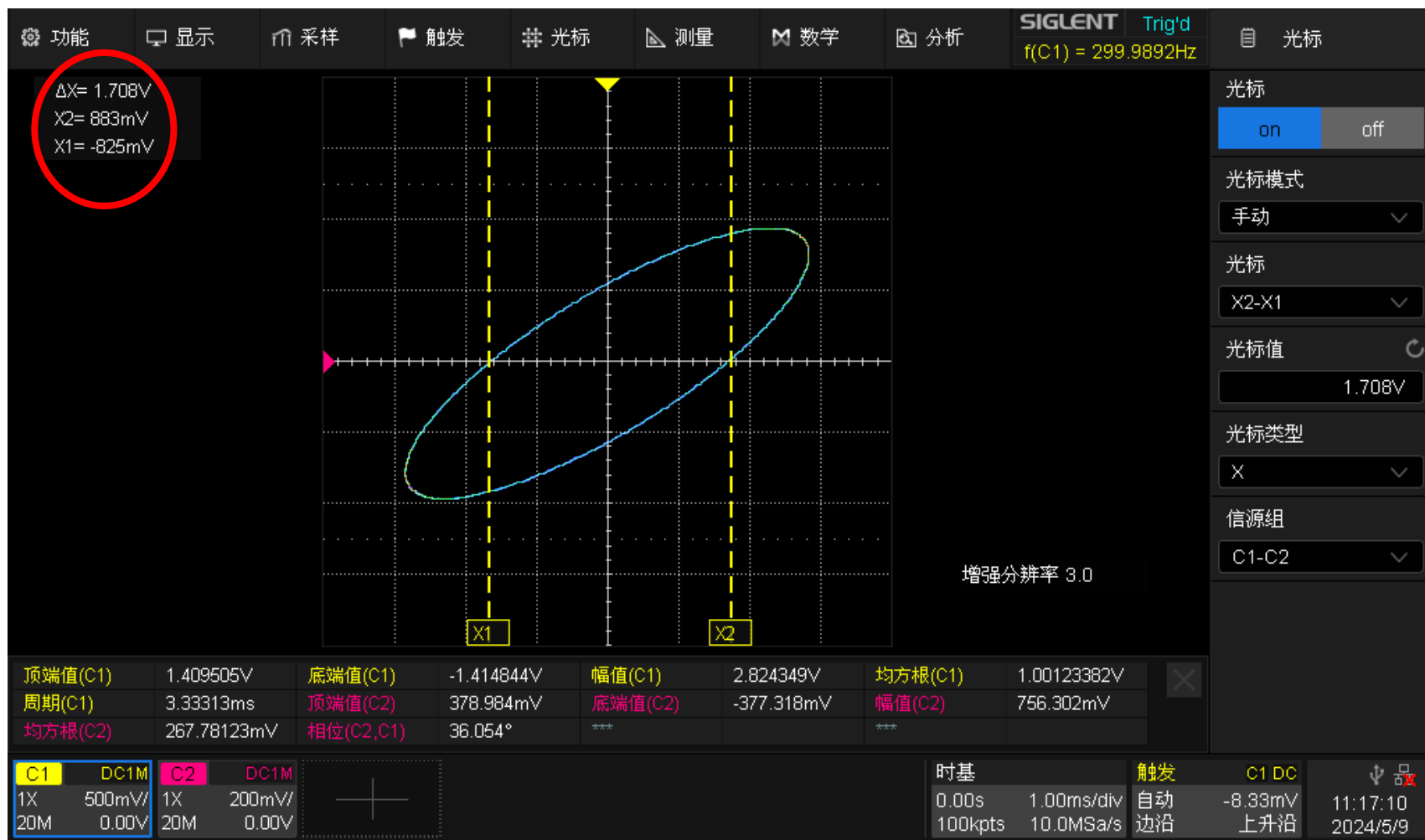
李沙如图形法测量相位角





实验内容— RC 一阶低通电路频率特性的测试

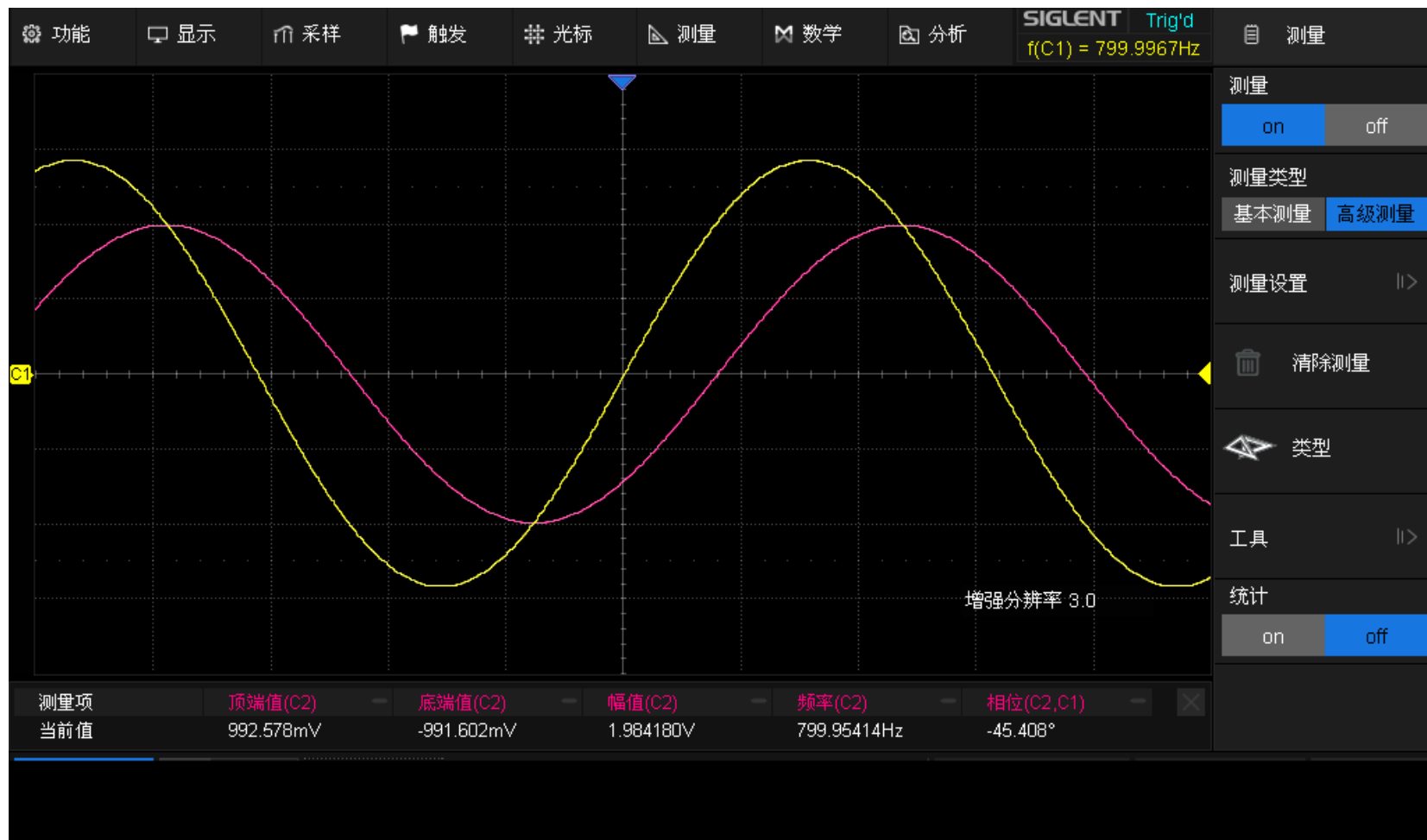
李沙如图形法测量相位角





实验内容— RC —阶低通电路频率特性的测试

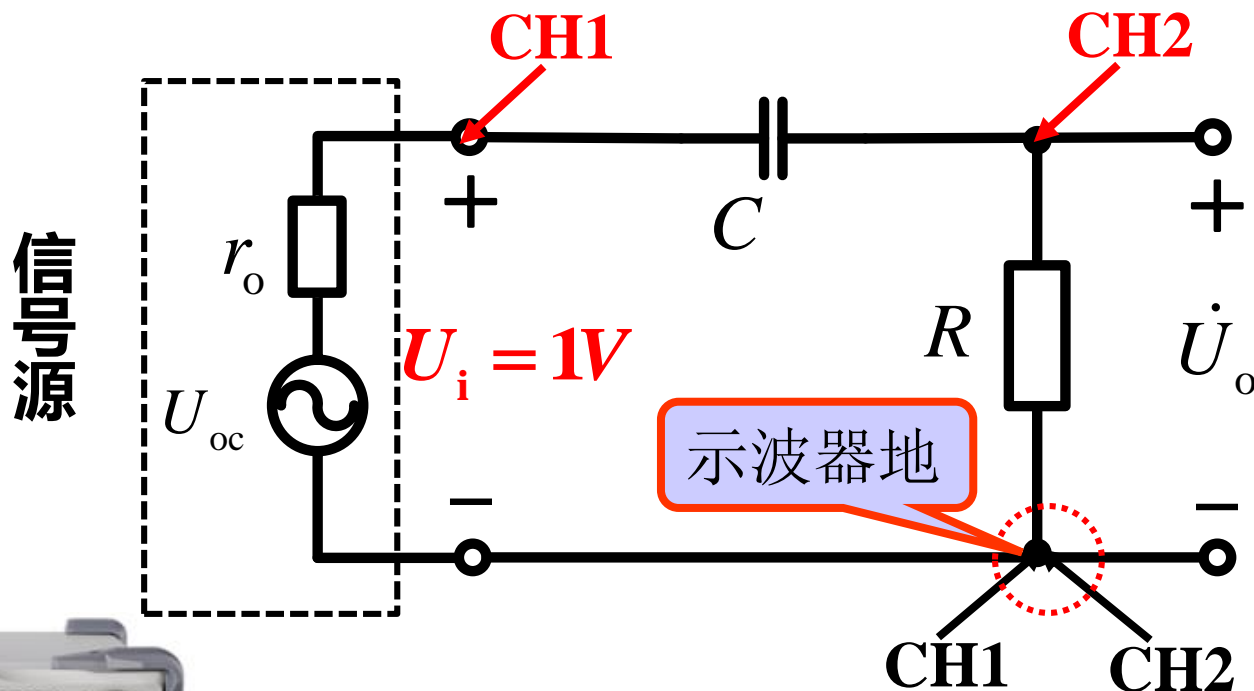
- ◆ 观测并画出输入信号频率为 f_c 时的输入、输出电压波形图，在图上标明其超前、滞后的相位关系。





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



$$R = ?$$

$$C = 0.1\mu F$$



实验内容— RC —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。

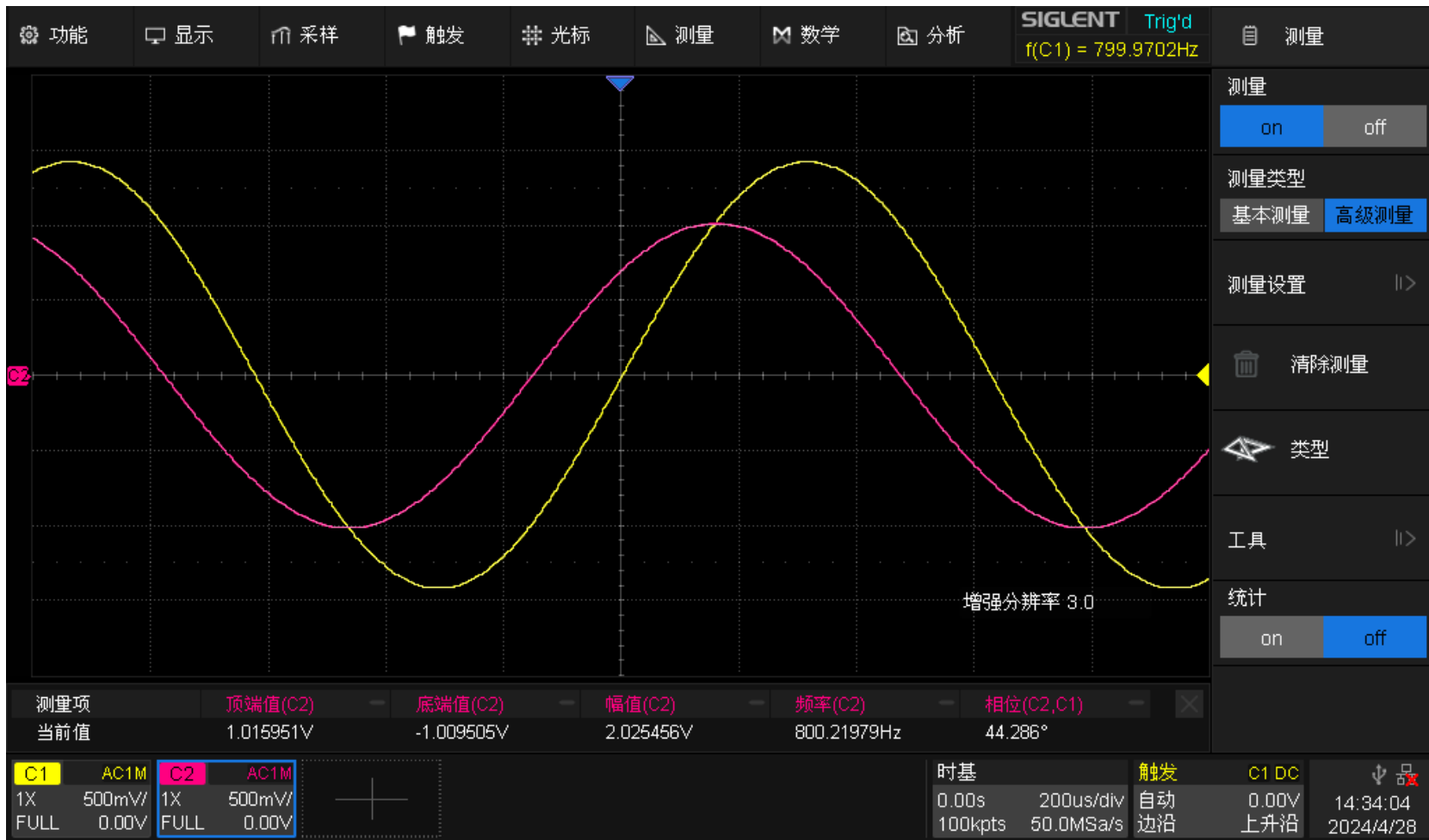
表3-2 $R=?$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ ， $U_i=1\text{V}$

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

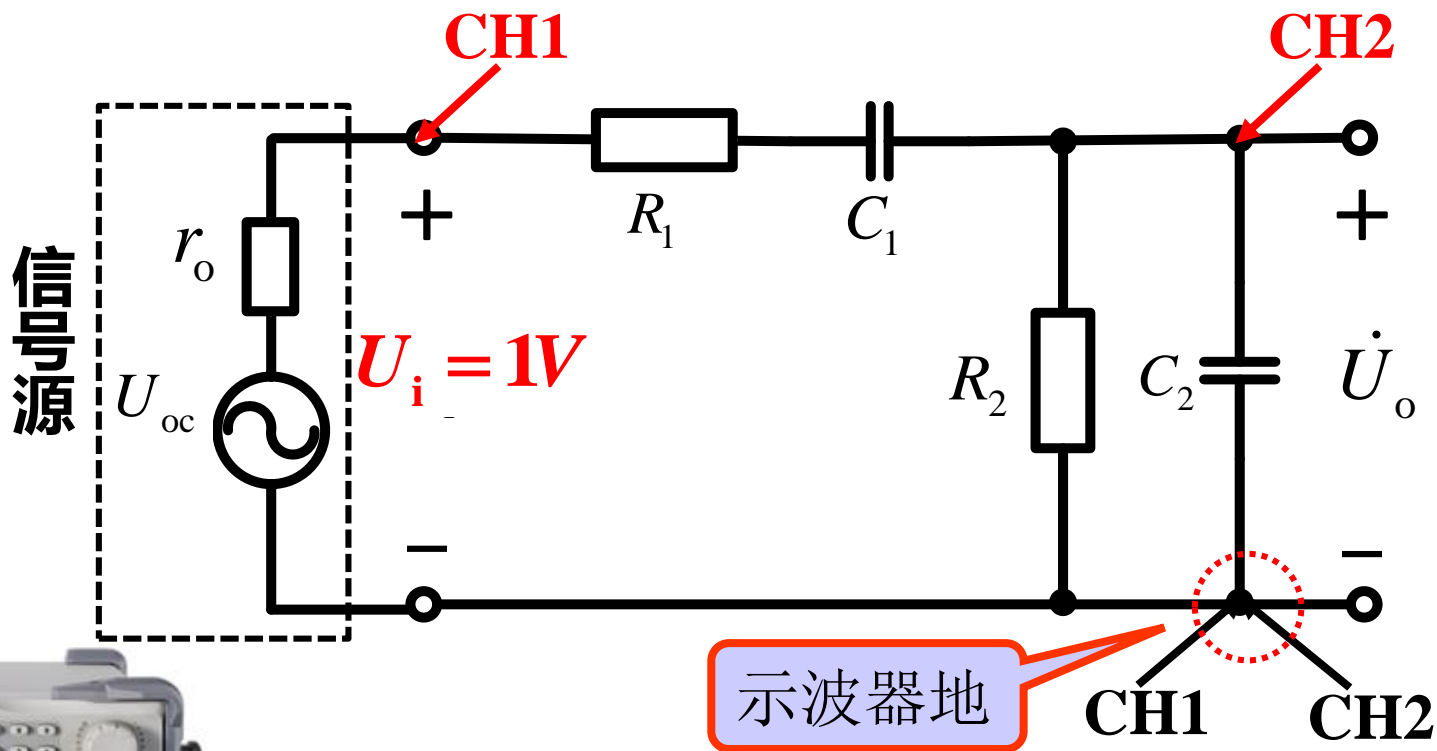
- ◆ 观测并画出输入信号频率为 f_c 时的输入、输出电压波形图，在图上标明其超前、滞后的相位关系。





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



$$R_1 = R_2 = ?$$

$$C_1 = C_2 = 0.1\mu F$$





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。

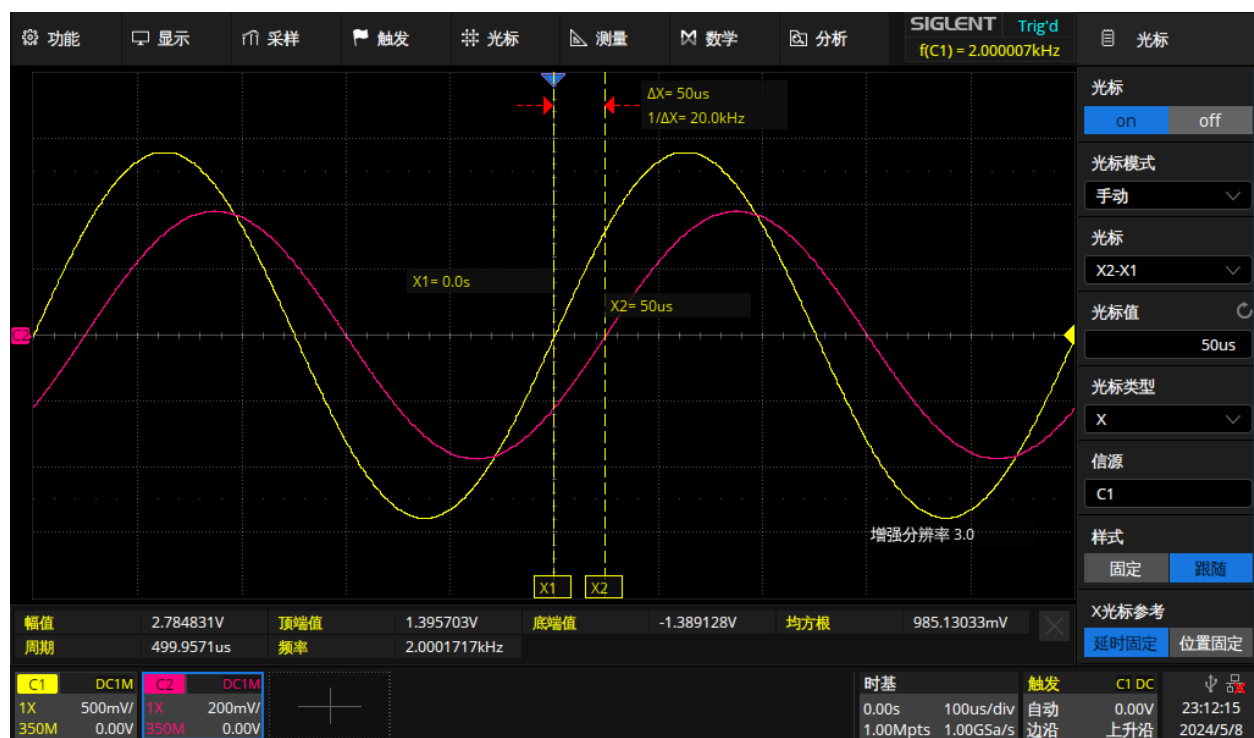
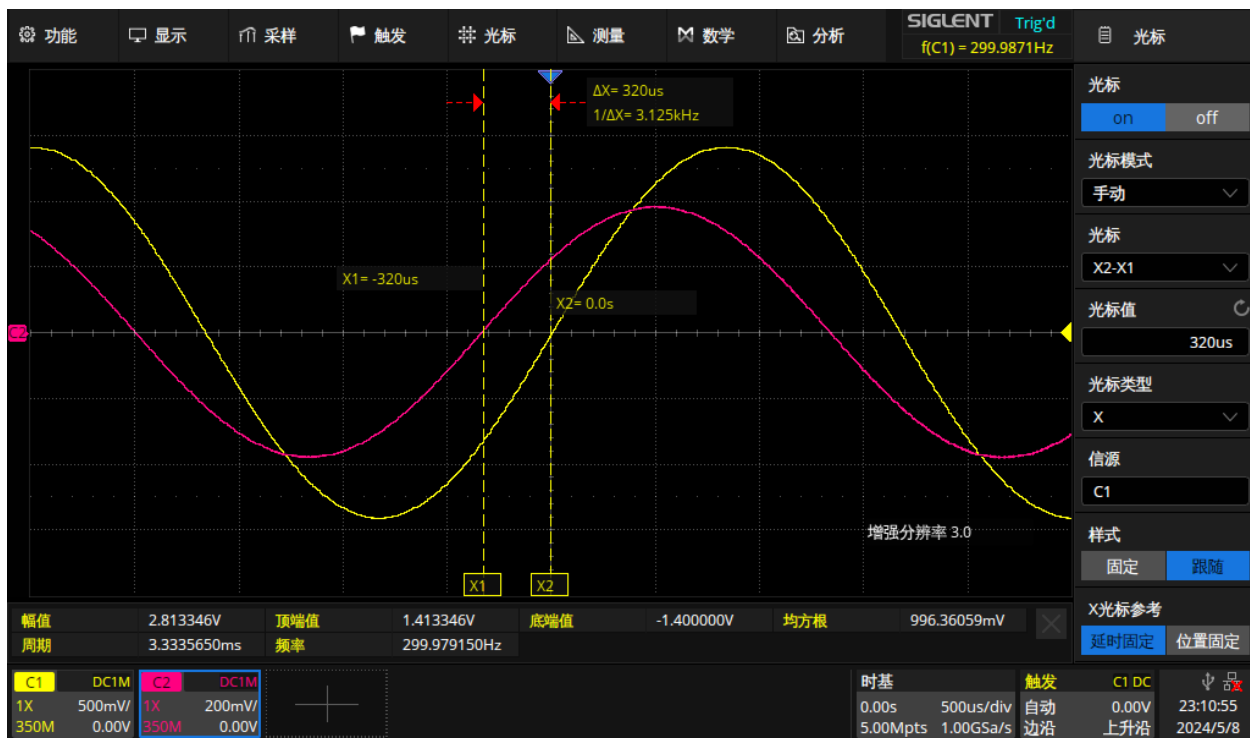
表3-3 $R_1 = R_2 = ?$ ， $C_1 = C_2 = 0.1\mu\text{F}$ ， $U_i = 1\text{V}$

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。



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。

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