

## 实验须知

**数字示波器的原理与使用实验不需写实验报告，实验结束后课堂直接交测量数据和计算结果即可。**

### 1. 预习阶段

(1) 认真阅读实验讲义，**并在实验平台上观看预习视频（两个视频分别讲解示波器和任意波形发生器）**。可查阅与实验相关的资料。

(2) 预习后不需要写预习报告，**上课前在实验教学平台完成预习思考题。**

### 2. 实验阶段

(1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。

(2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯、饮料等放在实验台上，不得在实验室内吃东西。

(3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。

(4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。

(5) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好后方可离开。

### 3. 实验成绩，共 100 分。

预习测 15 分，出门测 15 分，操作 70 分。

### 注意事项：

1、注意人身安全。不得用手直接触摸电路中的导电部分。实验中信号源输出电压不得超过 15V。

2、注意仪器的使用安全。连接和取下信号源、示波器的连接电缆线时，按老师指导方法操作，不得粗暴拉拔，损坏电缆。

3、离开之前请将实验台收拾到初始状态。

## 实验: 数字示波器的原理与使用

示波器是一种用途十分广泛的电子测量仪器。它能把肉眼看不见的电信号变换成看得见的图象, 便于人们研究各种电现象的变化过程。目前大量使用的示波器有两种: 模拟示波器和数字示波器。模拟示波器发展较早, 技术也非常成熟, 其优点主要是带宽宽、成本低。但是随着数字技术的飞速发展, 数字示波器拥有了许多模拟示波器不具备的优点: 不仅具有可存储波形、体积小、功耗低、使用方便等优点, 而且还具有强大的信号实时处理分析功能和输入输出功能, 可以与计算机或其他外设相连实现更复杂的数据运算或分析。随着相关技术的进一步发展, 数字示波器的频率范围也越来越高, 其使用范围将更为广泛因此, 学习数字示波器的使用具有重要的意义。

### 实验目的

1. 了解数字示波器的工作原理;
2. 掌握数字示波器的使用方法;
3. 会用数字示波器测量未知信号的参数。

### 实验仪器

1. 示波器 (Oscilloscope): Tektronix TBS1052B
2. 任意波形发生器 (Arbitrary waveform generator, AWG): SIGLENT SDG1032X
3. 1m 同轴线若干 (BNC 接口), 10m 同轴线 1-2 条 (RG174, BNC 接口)
4. BNC-KJK 三通转接头

### 实验原理

数字示波器与模拟示波器不同在于, 信号进入数字示波器后立刻通过高速模数转换器

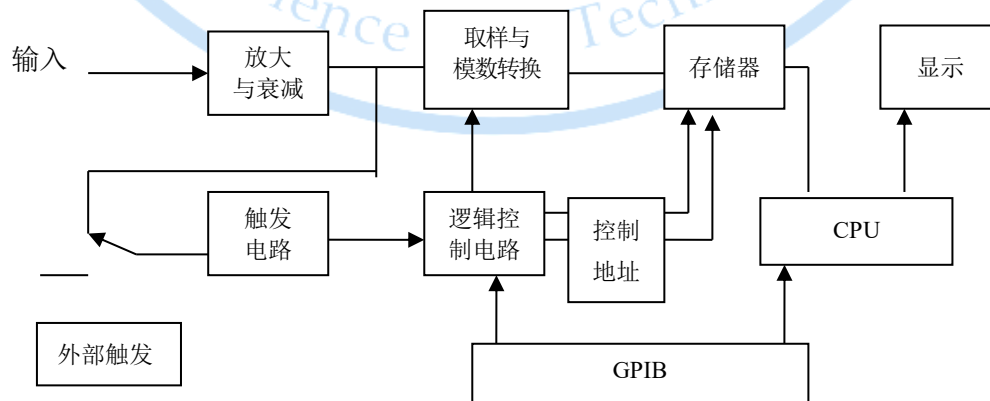


图 1 典型数字示波器原理框图

将模拟信号在前端快速采样，存储其数字化信号，并利用数字信号处理技术对所存储的数据进行实时快速处理，得到信号的波形及其参数，然后由屏幕显示，从而实现显示波形的功能。而且测量精度高，还可以存储和调用显示特定时刻信号。

一个典型的数字示波器原理框图如图 1 所示，模拟输入信号先适当地放大或衰减，然后再进行数字化处理。数字化包括“取样”和“量化”两个过程，取样是获得模拟输入信号的离散值，而量化则是使每个取样的离散值经过模数转换（ADC）成二进制数字，最后，数字化的信号在逻辑控制电路的控制下依次写入到 RAM（存储器）中，CPU 从存储器中依次把数字信号读出并在显示屏上显示相应的信号波形。GPIB 为通用接口总线系统，通过它可以程控数字示波器的工作状态，并且使内部存储器和外部存储器交换数据成为可能。

由此可见，数字示波器必须要完成波形的取样、存储和波形的显示，另外为了满足一般应用的需求，几乎所有微机化的数字示波器都提供了波形的测量与处理功能。

## 1. 波形的取样和存储

由于数字系统只能处理离散信号，所以必须对模拟连续波形先进行取样，再进行模数转换。根据 Nyquist 定理，只有采样频率大于要处理信号频率的两倍时，才能在显示端理想地复现该信号。

连续信号离散化通过如图 2 所示的取样方法完成，把模拟波形送到加有反偏的取样门的  $a$  点，在  $c$  点加入等间隔的取样脉冲，则对应时间  $t_n(n=1,2,3,\dots)$ ，取样脉冲打开取样门的一瞬间，在  $b$  点就得到相应的模拟量  $a_n(n=1,2,3,\dots)$ ，这个模拟量就是离散化了的模拟量，把每一个模拟量进行模数转换，就可以得到相应的数字量，如  $a_1 \rightarrow A/D \rightarrow 01H$ ； $a_2 \rightarrow A/D \rightarrow 02H$ ； $a_3 \rightarrow A/D \rightarrow 03H \dots\dots$ 。如果把这些数字量按序存放在存储器中就相当于把一幅模拟波形以数字量存储起来。

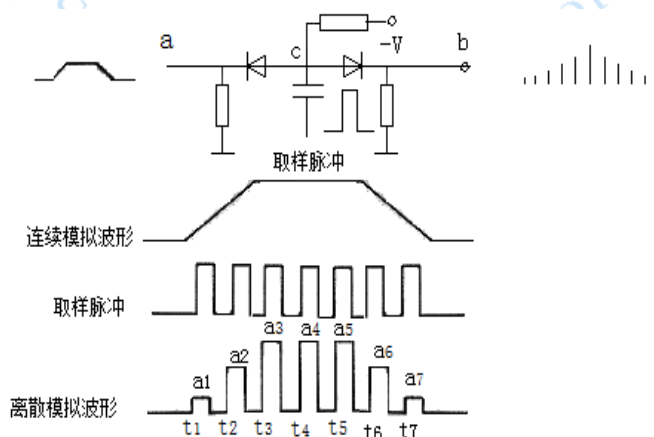


图 2 连续模拟波形的离散化

## 2.波形的显示

数字示波器必须把上面存储器中的波形显示出来以使用户进行观察、处理和测量。存储器中每个单元存储了一个抽样点的信息，在显示屏上显示为一个点，该点 Y 方向的坐标值决定于数字信号值的大小、示波器 Y 方向电压灵敏度设定值、Y 方向整体偏移量，X 方向的坐标值决定于数字信号值在存储器中的位置（即地址）、示波器 X 方向灵敏度的设定值、X 方向的整体偏移量。

为了适应对不同波形的观测、智能化的数字示波器有多种灵活的显示方式：存储显示、双踪显示、插值显示、流动显示等。

存储显示是示波器最基本的显示方式，它显示的波形是由一次触发捕捉到的信号片断，随即稳定地显示在屏幕上。存储显示还有：连续捕捉显示和单次捕捉显示之分，在连续捕捉显示方式下，每满足一次触发条件，屏幕上原来的波形就被新存储的波形更新，而单次捕捉显示只保存并显示一次触发形成的波形。

如果需要显示两个电压波形并保持两个波形在时间上的原有对应关系，可采用交替存储技术以达到双踪显示。这种交替存储技术利用存储器写地址的最低位  $A_0$  来控制通道开关，使取样和模数转换轮流对两通道输入信号进行取样和转换，其存储方式如图 3 所示，当  $A_0$  为 1 时，对通道 1 的信号  $Y_1$  进行采样和转换，并写入技术存储器单元中，读出时，先读偶数地址，再读奇数地址， $Y_1$  和  $Y_2$  信号便在屏幕上交替显示。

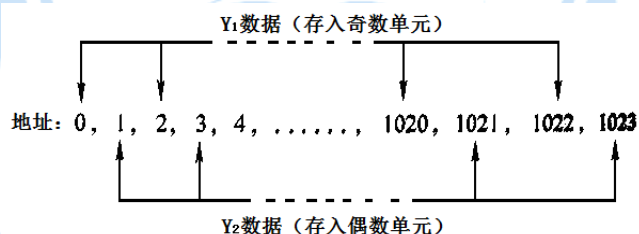


图 3 双踪显示的存储方式

示波器屏幕显示的波形由一些密集的点构成，当被观察的信号在一周期内采样点数较少时会引起视觉上的混淆现象，如图 4 左图所示的正弦波形就很难辨认，一般认为当采样频率低于被测信号频率的 2.5 倍时，点显示就会造成视觉混淆，为了有效地克服视觉的混淆现象，同时又不降低带宽指标，数字滤波器往往采用插值显示，即在波形上两个测试点数据间进行估值。估值方式通常有矢量插值法和正弦插值法两种，矢量插值法是用斜率不同的直线段来连接相邻的点，当被测信号频率为采样频率的  $1/10$  以下时，采用矢量插值可以得到满意的效果；正弦插值法是以正弦规律用曲线连接各数据点的显示方式，它能显示信号频率在采样频率的  $1/2.5$  以下的被测波形，其能力已接近 Nyquist 极限频率。

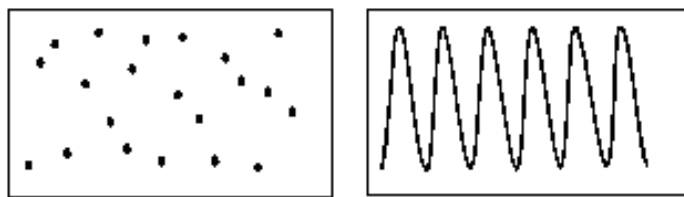


图4 波形的插值显示

### 3. 信号的触发

为了实时稳定地显示信号波形，示波器必须重复地从存储器中读取数据并显示。为使每次显示的曲线和前一次重合，必须采用触发技术。信号的触发也叫整步或同步，一般的触发方式为：输入信号经衰减放大后分送至模数转换器的同时也分送至触发电路，触发电路根据一定的触发条件（如信号电压达到某值并处于上升沿）产生触发信号，控制电路一旦接收到来自触发电路的触发信号，就启动一次数据采集与 RAM 写入循环。

触发决定了示波器何时开始采集数据和显示波形，一旦触发被正确设定，它可以把不稳定的显示或黑屏转换成有意义的波形。示波器在开始收集数据时，先收集足够的数据用来在触发点的左方画出波形。示波器在等待触发条件发生的同时连续地采集数据。当检测到触发后，示波器连续地采集足够的数据以在触发点的右方画出波形。

触发可以从多种信源得到，如输入通道、市电、外部触发等。常见的触发类型有边沿触发、视频触发、脉宽触发、逻辑触发等；常见的触发方式有自动触发、正常触发和单次触发。

在示波器输入为两个不同频率的波形信号时，由于示波器内部触发是以两个被测信号的一个作为触发信号，所以另一被测信号的波形将会不稳定，不利于示波器的使用，在这种时候，我们就需要使用示波器的**外部触发**功能。

外部触发使用外加信号作为触发信号，外加信号从外触发输入端输入。外触发信号与被测信号间应具有周期性的关系（一般外触发信号周期为被测信号周期的公倍数）。由于被测信号没有用作触发信号，所以何时开始扫描与被测信号无关，这样就可以实现两个被测波形同时稳定地显示。

### 4. 用 x 轴时基测时间参数

在实验中或工程技术上都经常用示波器来测量信号的时间参数，如信号的周期或频率，信号波形的宽度、上升时间或下降时间，信号的占空比（宽度/周期）等。如雷达通过测量发射脉冲信号与反射（接收）脉冲信号的时间差来实现测距离，其他无线电测距、声纳测潜艇位置等，都属于这一原理。

设待测信号接 y 轴输入端， $T_y$  是待测信号的周期， $T_x$  是 x 轴扫描信号的周期，N 是一个



扫描周期内所显示的待测信号的波形周期个数。如显示屏上显示 2 个信号波形，扫描信号的周期为 10ms，则待测信号的周期为 5ms。

示波器显示屏显示出以厘米为间隔的分划板，x 轴扫描信号的周期，实际上是以时基单位（时间/cm 或时间/度）来标示的，如水平方向上分划板总宽为 10cm，则  $T_x$ ，由时基（时间/cm）乘上 10cm，如时基为 0.1ms/cm，则扫描信号的周期为 1ms。为此，在实际测量中，

$$T_x = \text{时基单位} \times \text{波形厘米数}$$

式中的波形厘米数，可以是信号一个周期的读数（可测待测信号的周期）、正脉冲（或负脉冲）的信号宽度的读数或待测信号波形的其他参数。

## 5. 用李萨如图形测信号的频率

两个互相垂直的振动（有相同的自变量）的合成李萨如图形。如果将不同的正弦波信号分别输入到 y 轴和 x 轴的输入端，当两个信号的频率满足一定的关系时，在荧光屏上将显示出李萨如图形，可用测量李萨如图形的相位参数或波形的切点数来测量时间参数。

(1) 频率相同而振幅和相位不同时，两正交正弦电压的合成图形。设此两正弦电压分别为：

$$x = A \cos(\omega t)$$

$$y = B \cos(\omega t + \varphi)$$

消去自变量时间 t，得到的轨迹方程为：

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \varphi = \sin^2 \varphi$$

这是一个椭圆方程。当两个正交电压的相位差  $\varphi$  取  $0 \sim 2\pi$  的不同值时，合成的圆形如图 5 所示。

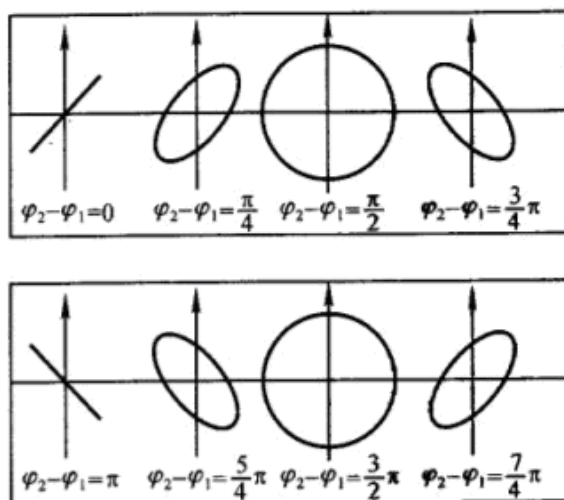


图 5 同频不同相位的李萨如图形

- (2) 两正交正弦电压的相位差一定, 频率比为一个有理数时, 合成的圆形是一条稳定的闭合曲线。

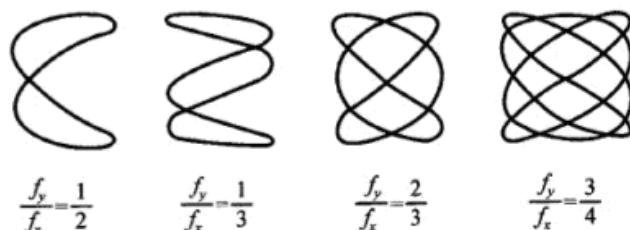


图 6 不同频率比的李萨如图形

图 6 是几种频率比时的图形, 频率比与图形的切点数之间有下列关系:

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{\text{水平切线上的切点数}}{\text{垂直切线上的切点数}}$$

## 6. 波形叠加

当频率不同的两个波形叠加时, 会产生拍的现象。设两信号为:

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega_1 + \varphi_1) \\ x_2 = A_2 \cos(\omega_2 + \varphi_2) \end{cases}$$

为简单起见, 设  $A_1 = A_2 = A$ , 则叠加波形为:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 = A[\cos(\omega_1 + \varphi_1) + \cos(\omega_2 + \varphi_2)] \\ &= 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \end{aligned}$$

当  $\omega_1, \omega_2$  相差不多时, 即

$$|\omega_1 - \omega_2| \ll \omega_1, \omega_2$$

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \approx \omega_1, \omega_2$$

此时有

$$x = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\omega_1 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

此叠加波形的频率与原来两振动频率几乎相等, 而振幅随时间的变化由

$\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)$  决定, 由于振幅所涉及的是绝对值, 故其变化周期即  $\left|\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right)\right|$  的周期,

故振幅变化率为:  $f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} = f_1 - f_2 = \Delta f$

即两频率之差, 这一现象称为拍,  $\Delta f$  称为拍频, 其波形图如图 8 所示。当两波形的振幅不等时, 也有拍现象, 此时合振幅仍有时大时小的变化, 但不会达到零。

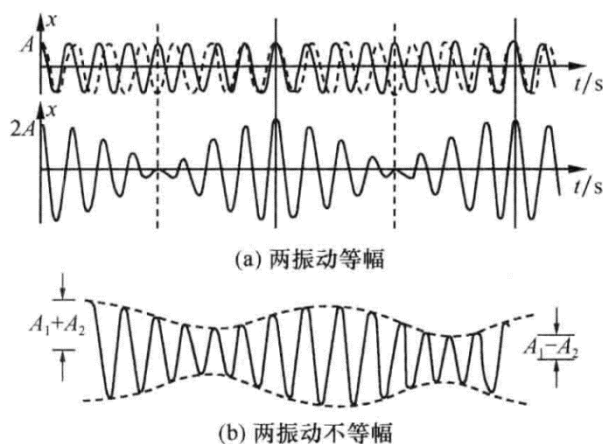


图 8 拍的波形图

## 7. 脉冲波、上升时间与脉冲宽度

脉冲波是指一种间断的持续时间极短的突然发生的电信号。凡是断续出现的电压或电流可称为脉冲电压或脉冲电流。

在控制领域中，上升时间是指响应曲线从零时刻到首次达到稳态值的时间。脉冲信号的上升时间是指脉冲瞬时值最初到达规定下限和规定上限的两瞬时之间的间隔。除另有规定之外，下限和上限分别定为脉冲峰值幅度的 10% 和 90%。

脉宽是脉冲宽度的缩写，不同的领域，脉冲宽度有不同的含义。本实验中，脉冲宽度指的是脉冲峰值降低至一半时所对应的两个时刻差称为脉冲宽度。如下图所示。

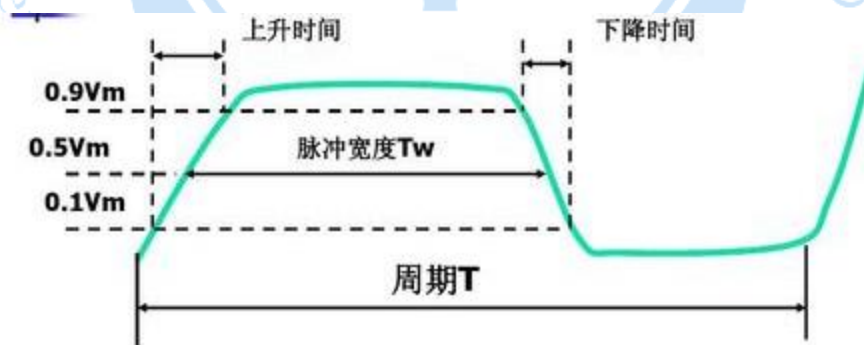


图 7 脉冲信号部分参数概念图

## 8. TDR(Time Domain Reflectometry) 时域反射技术测量反射信号延迟原理

TDR 是在时域上测量反射信号的电压。基本原理是信号在同轴线内传输时，如果信号在同轴线末端感受到的阻抗不一致，将会导致信号反射，反射信号的电压大小取决于阻抗不匹配程度。



实验中待测同轴线末端时开路状态，即处于高阻状态，与输入端 50 欧姆状态严重不匹配，因此可以反射信号。

使用任意波形发生器产生脉冲信号，在示波器上测量反射信号，可以测到反射信号的电压大小与该反射信号与输入信号的延迟时间，那么可得脉冲信号在同轴线内往返传输所需的时间，并可计算出信号在该材料的同轴线内的传输速度。

## 实验内容

### 一、实验内容一：用 x 轴的时基测信号的时间参数 (Y-t)

1. 使用从**显示屏读数**、**示波器光标**、**示波器测量功能**三种方法，测量示波器自备方波输出信号的周期（时基分别为  $100\mu\text{s}/\text{cm}$ ， $250\mu\text{s}/\text{cm}$ ， $500\mu\text{s}/\text{cm}$ ）。哪种时基测出的数据更准确？为什么？

2. 使用**示波器光标**、**示波器测量功能**两种方法，选择任意波形发生器输出非对称方波接输入（占空比设为 70%，选择合适的幅度和量程），信号频率分别为 500Hz、5kHz，选择示波器合适的时基，分别测量各频率时的周期和正波的宽度。求出频率和占空比，并与任意波形发生器设置的频率、占空比进行比较。

3. 使用示波器的数学功能进行波形叠加。

（1）选择任意波形发生器的两个输出信号为正弦波，频率相等（均为 1kHz），相位差分别调节为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ ，使用示波器的数学功能进行波形叠加，观察并画出叠加后得到的波形；

（2）选择任意波形发生器的两个输出信号为正弦波，频率分别为 1kHz 和 1.5kHz，调节相位差分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ ，振幅分别为等幅和不等幅，采用**外部触发**使波形稳定下来，使用示波器的**数学功能**进行波形叠加，观察并画出叠加后得到的波形。

4. 脉冲信号参数测量（选做）

测量任意波形发生器的输出为 1kHz 脉冲波，脉冲宽度为  $200\mu\text{s}$ ，改变上升沿分别为  $16.8\text{ns}$ 、 $2\mu\text{s}$ 、 $20\mu\text{s}$ ，选择示波器合适的时基，观察并比较上升沿波形。选择合适的时基并使用示波器光标、示波器测量功能两种方法测量**上升沿为  $2\mu\text{s}$  时**的上升时间及脉冲宽度，并与任意波

形发生器设置的上升时间、脉冲宽度进行比较。（要求波形上升沿占屏幕宽度不小于 50%）

#### 5. 利用 TDR（时域反射）测量信号在同轴线内传输的时间（选做）

示波器 CH1 连接 BNC-KJK 三通转接头，使用任意波形发生器产生一个脉冲信号，选择合适的信号频率，将脉冲宽度设置为最窄（可选  $f=1\text{MHz}$ ,  $V_{pp}=4\text{V}$ , pulse width=32.6ns, rise/fall time=16.8ns），输出信号接入 BNC 三通接头的一个接口，示波器上可观察到输入脉冲波形。

将待测同轴线接入另一接口，选择合适的时基，可观察到反射脉冲信号。通过示波器光标功能，测量反射信号相对于输入信号的延迟时间，计算信号在同轴线内传输的速度。

## 二、实验内容二：观察李萨如图形（X-Y）

### 1. 探究不同参数对李萨如图形的影响

本地任意波形发生器 Output1、Output2 均产生  $1\text{kHz}$ ,  $V_{pp}=4\text{V}$  的正弦波，Output1 相位设为  $90^\circ$ ，Output2 相位设为  $0^\circ$ ，分别送入示波器 CH1、CH2 通道。示波器显示方式为“XY”。将李萨如图形调整至面板中央，图形大小合适。

- （1）调节时基分别为  $25\mu\text{s}/\text{cm}$ ,  $50\mu\text{s}/\text{cm}$ ,  $500\mu\text{s}/\text{cm}$ ,  $10\text{ms}/\text{cm}$ ，观察现象并记录波形。
- （2）调节 Output1 的幅值， $V_{pp}$  分别为  $2\text{V}$ ,  $4\text{V}$ ,  $8\text{V}$ ，观察现象并记录波形。
- （3）调节 Output1 相位分别为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ，观察李萨如图形变化并记录波形。
- （4）Output1 相位设为  $0^\circ$ ，调节 Output1 频率分别为  $1.5\text{kHz}$ 、 $2\text{kHz}$ ，观察并记录波形。

### 2. 用李萨如图形测未知信号源正弦波的频率（选做）

公用任意波形发生器产生待测正弦波，接示波器 CH1（x 轴输入）。本地任意波形发生器产生可调正弦波，送入示波器 CH2（y 轴输入）。调节本地信号频率，使示波器屏上显示稳定清晰的李萨如图形，使 X/Y 轴切点数之比为： $2/3$  或  $3/4$  等。记录李萨如图形的 X 轴、Y 轴切点个数，记录本地信号源正弦波频率  $f_y$ ，计算公用信号源产生的正弦波频率  $f_x$ 。

要求：公用任意波形发生器已调好，请勿自行调节。根据切点位置，手绘李萨如图形。注意：观察李萨如图形时，通过本地任意波形发生器的频率微调旋钮，在使李萨如图形尽可能稳定时，再读 y 轴和 x 轴的切点数。

### 3. 探究频率差对李萨如图形的影响（选做）

本地任意波形发生器 Output1、Output2 分别产生 1kHz 和 2kHz 的正弦波， $V_{pp}=4V$ ，相位  $0^\circ$ ，分别送入示波器 CH1、CH2 通道。示波器显示方式为“XY”。将李萨如图形调整至面板中央，图形大小合适。

保持 Output2 频率不变，分别在 999.9-999.0 和 1000.1~1001.0Hz 范围内缓慢改变 Output1 频率，观察并描述李萨如图形的变化和运动规律，试分析产生的原因。

### 注意事项

- 1 注意人身安全。不得用手直接触摸电路中的导电部分。实验中信号源输出电压不得超过 15V。
- 2 注意仪器的使用安全。连接和取下信号源、示波器的连接电缆线时，按老师指导方法操作，不得粗暴拉拔，损坏电缆。
- 3 离开之前请将实验台收拾到初始状态，清空仪器设置内容。

## 附录：数据记录参考表格（单独打印，课上填写并提交）

（物理量单位请自行选择）

## 1.1 示波器自备方波周期测量（必做）

时基			
直接测量	波形厘米数		
	周期 (ms)		
用光标测量 (ms)			
用测量功能测量 (ms)			

## 1.2 测量任意波形发生器的非对称方波（必做）

频率								
时基								
测量量	周期 (ms)	正频宽 (ms)	频率 (Hz)	正占 空比	周期 (ms)	正频宽 (ms)	频率 (Hz)	正占 空比
用光标测量								
用测量功能测量								

## 1.3.1 测量两个 1kHz 的正弦波的波形叠加（必做）

相位差 $0^\circ$	相位差 $90^\circ$	相位差 $180^\circ$

## 1.3.2 测量 1kHz 和 1.5kHz 的正弦波的波形叠加 (必做)

等幅，相位差 $0^\circ$	等幅，相位差 $90^\circ$	等幅，相位差 $180^\circ$
不等幅，相位差 $0^\circ$	不等幅，相位差 $90^\circ$	不等幅，相位差 $180^\circ$

1.4 时间测量 (选做): 任意波形发生器的输出 1kHz 脉冲波, , 改变上升沿分别为 16.8 ns、2  $\mu$ s、20  $\mu$ s, 观察并比较上升沿波形。(要求波形上升沿占屏幕宽度不小于 50%)

上升沿: 16.8 ns	上升沿: 2 $\mu$ s	上升沿: 20 $\mu$ s
时基选择:	时基选择:	时基选择:

上升沿为 2  $\mu$ s 时:

测量量	上升时间( $\mu$ s)	脉冲宽度( $\mu$ s)
时基		
AWG 设置值		
用光标测量		
用测量功能测量		



## 1.5 利用 TDR 测量信号在同轴线内的传输时间 (选做)

输入信号频率	脉冲宽度	待测同轴线长度	反射信号延迟时间

请计算信号在同轴线内传输速度，结果表示为真空光速的百分比形式 (299792458 m/s)

## 2.1 探究不同参数对李萨如图形的影响 (必做)

时基调节: 25 $\mu\text{s}/\text{cm}$	时基调节: 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$	时基调节: 500 $\mu\text{s}/\text{cm}$
时基调节: 10 ms/cm	Vpp 调节: 2 V	Vpp 调节: 4 V
Vpp 调节: 8 V	相位调节: 0°	相位调节: 45°

相位调节：90°	相位调节：135°	相位调节：180°
频率调节：1.5 kHz	频率调节：2 kHz	

2.2 用李萨如图形测未知信号源正弦波的频率：手绘李萨如图形，计算未知频率。(选做)

2.3 探究频率差对李萨如图形的影响 (选做)

描述在 999.9-999.0 和 1000.1~1001.0Hz 范围内缓慢改变 Output1 频率时，李萨如图形变化和运动规律。并解释上述现象的原因：