

## 什么是触发

触发是按照需求设置一定的电压幅值、时间、波形变化率等方面的条件，当波形数据流中的某一个波形满足设定条件时，示波器实时捕获该波形和其相邻部分，并显示在屏幕上。

示波器是以图形方式显示变化的电压信号电子测量仪器，通常是一个或多个信号随时间变化的二维图像，被誉为“电子工程师的眼睛”。如果要稳定观察、显示示波器波形，捕获特点信号事件，触发(Trigger)则是关键因素。只有稳定的触发才能有稳定的显示。触发也是发现问题之后定位问题的最重要手段，善于使用触发能轻松定位出您想寻找的信号。

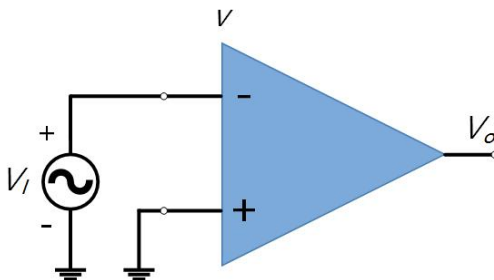
自 20 多年前 RIGOL 诞生以来，RIGOL 示波器也从最初的模拟触发转向全面数字触发，示波器触发功能不断丰富和增强。本文将和大家一起探究示波器的“触发”的来龙去脉。

## 触发的两个关键参数

示波器从诞生开始经历了模拟示波器和数字示波器两个主要阶段。模拟示波器中的触发系统是我们了解触发相关内容很好的起点。那我们从模拟触发基本概念中最主要的比较器电路开始。

### 单限比较器

只有一个参考电平，且参考电平为 GND（0 电平）的简单比较器，被称为单限比较器。如下图所示：



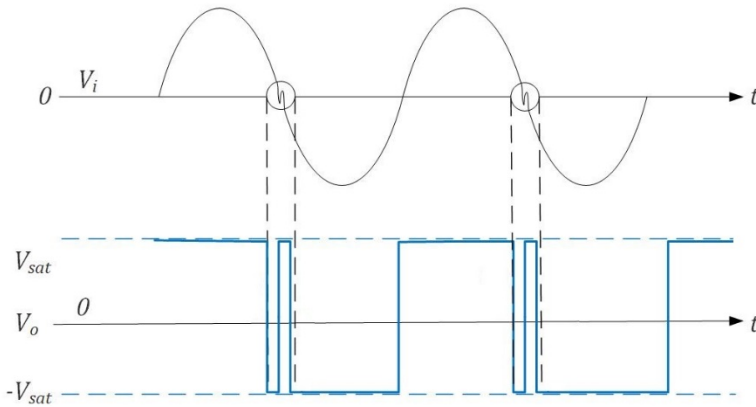
当单限比较器的输入信号( $V_i$ )大于参考电平( $V_t$ ), 则输出信号( $V_o$ )为正“+”, 否则为“-”, 这个参考电平就是触发功能中的关键参数“触发电平”。

$$V_o = -V_{sat} \quad @ V_i < V_t$$

$$V_o = 0 \quad @ V_i = V_t$$

$$V_o = +V_{sat} \quad @ V_i > V_t$$

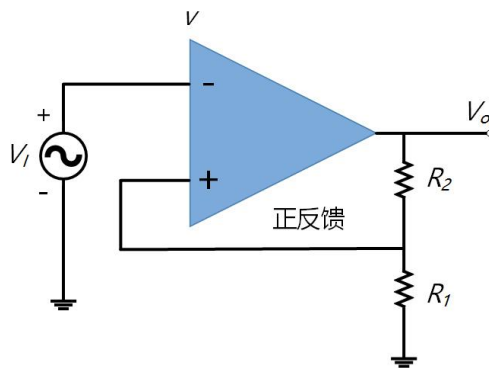
但是由于单限比较器只有一个触发电平作为临界电压, 所以输入信号的波动或噪声产生多次穿越临界电压的情况, 会导致误触发, 使输出产生不正确的转换。



为解决误触发的问题, 就需要使用迟滞比较器。

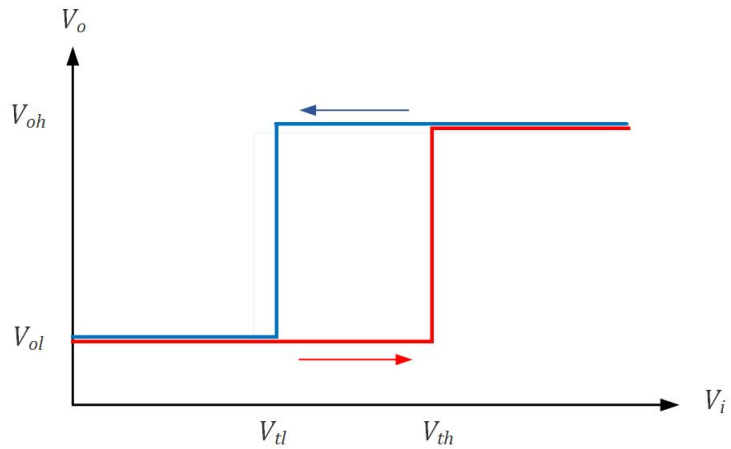
## 迟滞比较器

在单限电压比较器的基础上引入正反馈网络, 就组成了具有双门限值的迟滞比较器, 如下图所示。

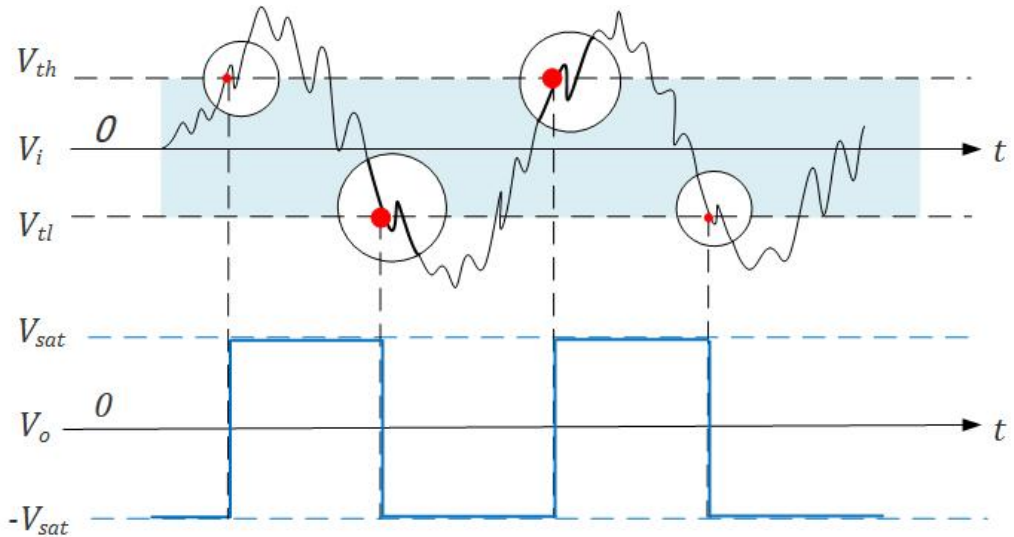


迟滞比较器具有两个参考电平作为触发电平,  $V_{TH}$  和  $V_{TL}$ 。当输入电压高于  $V_{TH}$  时, 比较器输出高电平, 当输入电压低于  $V_{TL}$  时比较器输出低电平, 当输入电压在  $V_{TH}$  和  $V_{TL}$

两者之间时，则保持原来的输出不变。下图就是迟滞比较器的输入输出特征图。



迟滞比较器解决了输入信号的波动或噪声导致误触发的问题。迟滞比较器两个比较电平  $V_{TH}$  和  $V_{TL}$  之间形成“迟滞区间”，由于迟滞区间的存在，输入波形噪声和毛刺导致多次穿越临界电压的情况下，仍能维持输出信号的稳定，如下图所示。



迟滞区间越大对噪声的抑制能力越强，反之则越小。但迟滞区间并不是越大越好，会导致触发迟钝，对信号的变化不敏感。这就是在触发系统中另一个关键参数“触发灵敏度”，触发灵敏度体现了触发对信号噪声的敏感程度。

# 为什么需要触发？

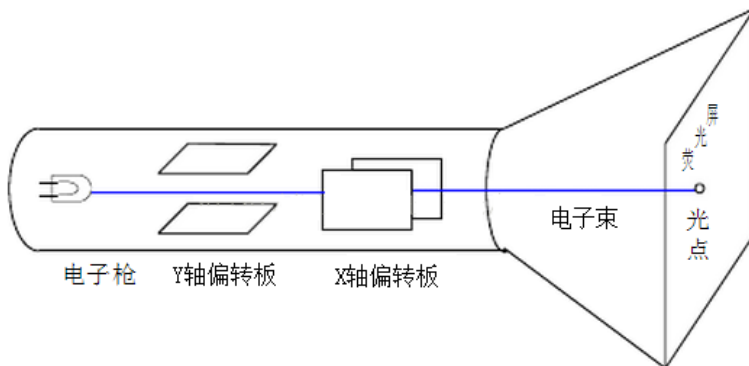
在之前发布的《[数字实时荧光技术](#)》的文章中，我们曾介绍过示波器的显示原理，是通过将波形在屏幕上保持一段时间后再消失，在指定的波形保持时间内，多个捕获周期绘制的波形叠加显示在屏幕上。

然而在实际的测量过程中，我们会发现，将输入信号接入示波器通道后，并不能立即显示稳定的波形。通常需要手动进程触发设置之后，波形才会稳定显示在显示器中。这是为什么呢？

下面我们通过传统的模拟示波器来了解触发在波形观察时的作用。

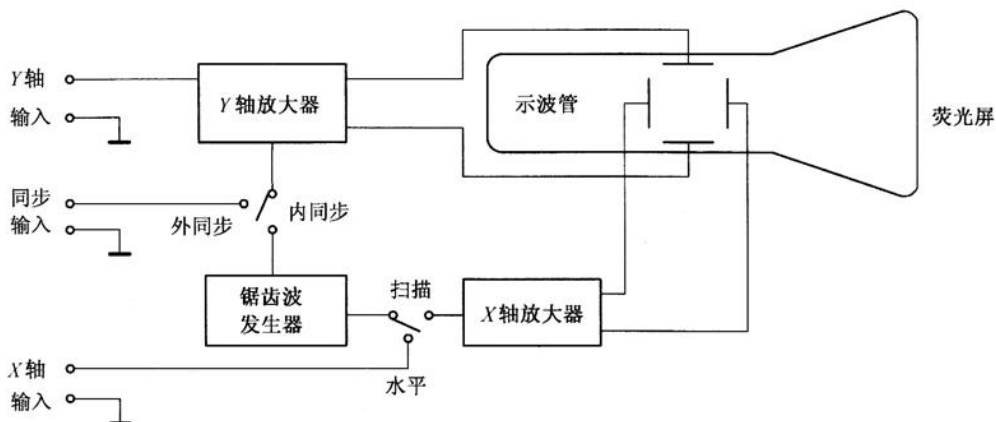
## 模拟示波器工作原理描述

阴极射线管(CRT)简称示波管，是模拟示波器的核心，它的原理图如下。



- 当把输入信号施加到 Y 轴偏转板，而 X 轴偏转板不加电压时，在荧光屏的最左侧纵坐标上就会打出一个亮点，且电压越大亮点位置越高。
- 当把锯齿波信号施加到 X 偏转板，而在 Y 偏转板不加电压时，随着锯齿波电压的升高，光点从屏幕最左边均匀移动到屏幕最右边。当锯齿波归零后重新开始扫描，则光点迅速回到最左边后，从最左边重复向右移动。

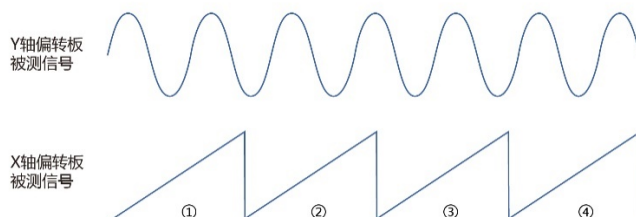
所以模拟示波器的工作方式是在 Y 轴偏转板上施加待测信号，在 X 轴偏转板上施加锯齿波作为扫描信号。工作原理如下图所示。



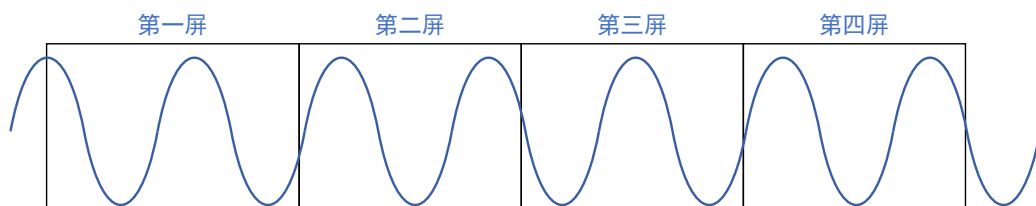
## 支持触发功能前

示波管可以帮助示波器将波形显示屏幕上，但并不能保证将信号波形稳定的在屏幕上显示。

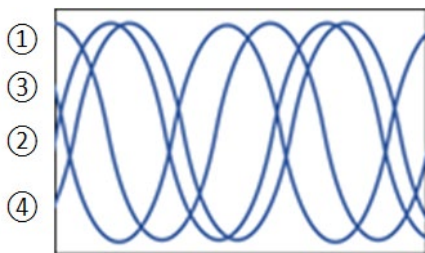
如下图所示，在 X 轴偏转板施加锯齿波作为扫描信号，在 Y 轴偏转板施加输入待测试信号。



如果锯齿波是自动触发，它的触发位置不固定。那么输入波形在示波器中的显示状态如下图所示。



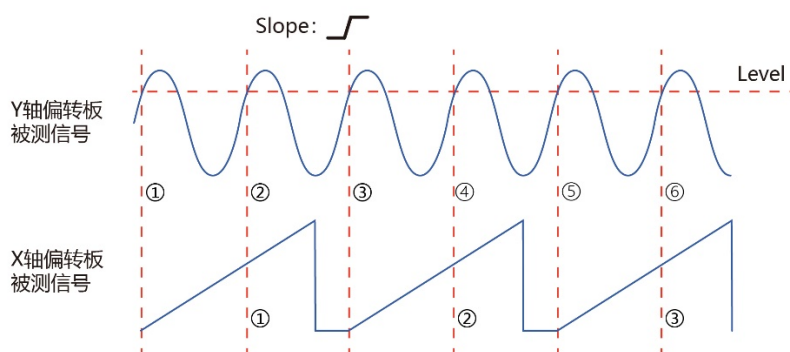
因为每次从屏幕起始的位置，波形的相位不一致，使得观察者在示波器上看到的波形好像是在滚动，且有多条波形重叠，如下图所示。



解决这个问题，就需要使每一屏中显示波形的相位是同步的，这取决于施加在 X 轴偏转板上的锯齿波信号何时开始扫描。为此示波器增加了触发功能。

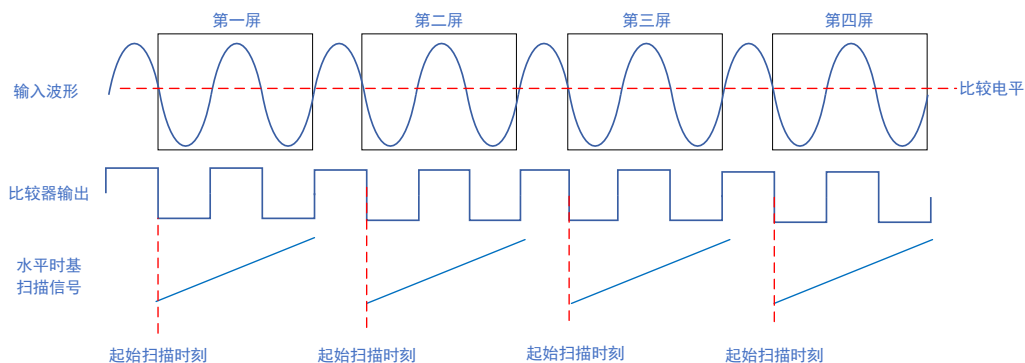
## 支持触发功能后

支持触发功能后，示波器可以设置触发电平，并且可以选择在输入信号的上升/下降沿 (slope) 进行触发。假设设定一个直流触发电平为 **Level1**，并选择在上升沿进行触发，那么触发效果如下图所示。

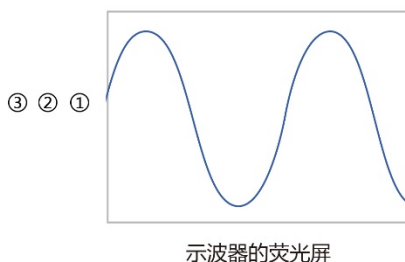


从上图也可以看出 X 轴锯齿波周期决定了示波器横轴水平时基的大小。当锯齿波周期越长，则水平时基(time/div)越大，在屏幕上显示的波形周期数越多。

通过设置触发条件，可以实现每一屏中显示波形的相位同步，如下图所示。



最后叠加在同一屏上，波形就可以稳定显示了，效果如下图所示。



## 触发的实现

下面我们再来看一下数字示波器中触发功能是如何实现的。

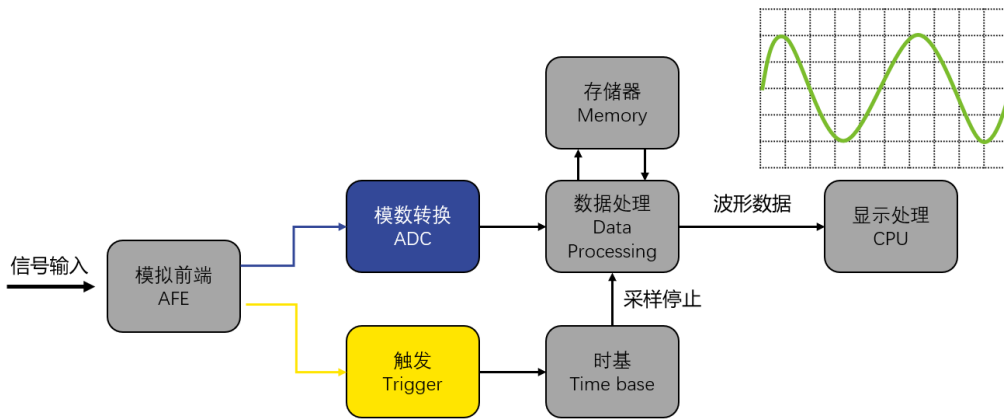
数字示波器主要由以下几个部分组成：

- **AFE 模拟前端电路**：主要包括衰减器和放大器，用于信号调理；
- **ADC 模数转换器**：将探测的模拟信号转换为数字域处理信号；
- **Trigger 触发单元**：将捕获用户设置的触发事件；
- **Time base 时基**：控制采样时间，触发位置处理；
- **波形数据处理**：完成数字波形的采样，获取，存储和数据处理；
- **显示处理**：完成波形绘制，波形相关的运算，分析等功能。

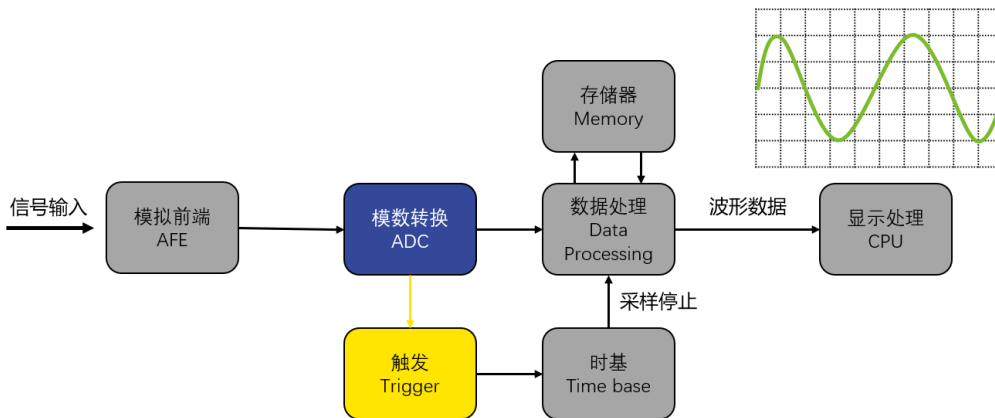
数字示波器的触发也存在模拟触发和数字触发两类，数字触发与模拟触发最主要的差异在于触发数据的来源不同：

- 模拟触发的数据来自模拟前端，因此触发单元处理的是模拟信号；
- 而数字触发的数据来自模数转换器 **ADC**，触发单元处理的是经过 **ADC** 量化处理后的数字信号。

模拟触发和数字触发由于数据来源和类型不同，因此处理原理也就有差异。其基本的原理框图如下：



数字示波器-模拟触发

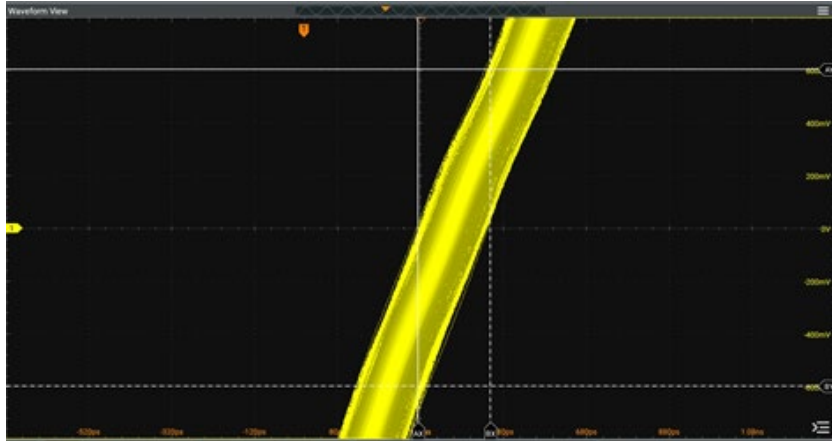


数字示波器-数字触发

## 模拟触发

模拟触发有一些不足之处，其中触发动抖动是影响触发稳定度的重要因素。下图是一个模拟触发系统触发波形的典型效果，从图中我们可以看到，由于信号触发位置不固定，存在触发动抖动。





模拟触发系统触发波形

造成模拟触发系统存在抖动的的原因，主要有以下 3 个因素：

- 路径误差

在“数字示波器-模拟触发”框图中，可以看到被测信号经过了采样和触发两条路径，路径上的噪声干扰和延迟抖动存在差异。因此 ADC 得到的数据和触发单元得到的数据存在差异；

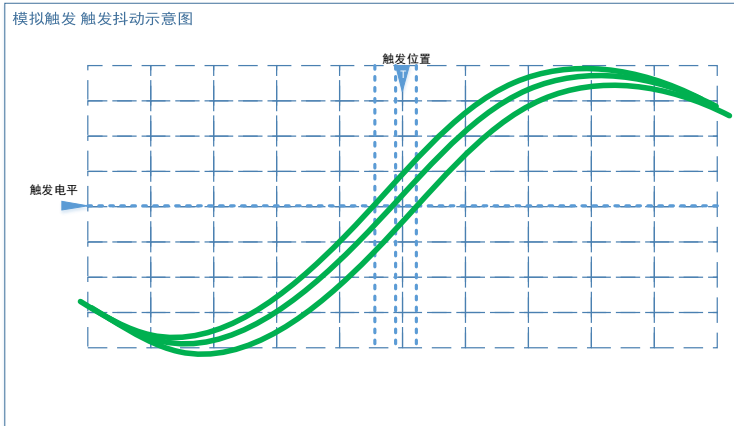
- 量化误差

由于 ADC 模数转换器固有的量化误差和采样失真，会使得 ADC 转换后的数据和真实数据存在偏差；

- 比较器误差

在模拟触发中，信号与比较器比较门限进行比较，由于模拟器件的特性，无法给出精确的边沿时刻。

因此，模拟触发输出的触发信号无法精确地指示 ADC 采样后的数据的触发位置，最终在显示波形时，表现为波形触发位置抖动。如下图所示。



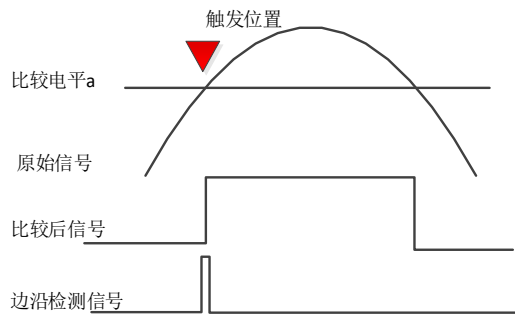
模拟触发-触发抖动示意图

## 数字触发

与模拟触发不同，数字触发的触发数据直接使用 ADC 采样后的数据，因此，采样和触发单元处理的是相同的数据。数字触发技术使用数字信号处理方法进行触发比较和位置测定，可以精确地捕获触发事件，并输出精细的触发位置。下面介绍几种常见的数字触发技术。

## 边沿触发

边沿触发是指，当触发单元检测到跳变沿（上升沿、下降沿、任意沿）时触发，原理图如下。



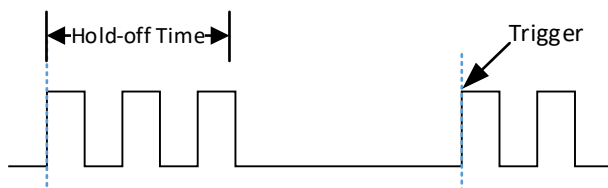
边沿触发

边沿触发是示波器触发功能中最常用、最实用、最简单的一种触发类型。

## 触发释抑 (hold-off)

触发释抑：是在前一次触发之后的一段时间之内，触发系统不相应触发事件；这段时间称为释抑时间 (Hold-off Time)。释抑时间后，再开始触发事件的判决。

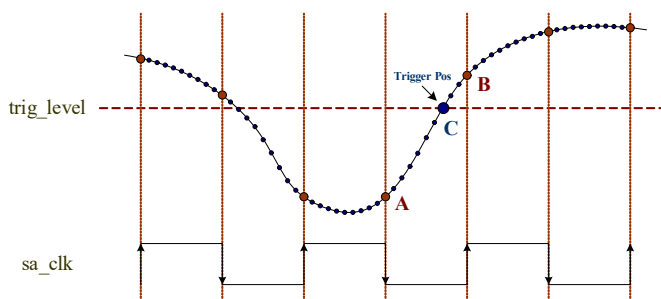
触发释抑一般应用在复杂的脉冲串、协议触发、调幅信号的场景中。根据实际的信号规律，设置对应的释抑时间，使得波形能稳定触发并显示。



## 精细触发

当采样点数比屏幕的像素个数少时，需要对原始数据进行插值。为了更精确地查找触发位置位于个插值点，需要对插值后的数据进行阈值比较和触发位置处理，这个过程我们称之为精细触发。

如下图所示，在 ADC 原始采样点进行插值运算，使得在触发电平  $\text{Trig\_level}$  前后两个原始点 A 和 B 之间，再进行一次触发比较找到更准确的触发点 C。



精细触发

若 ADC 采样率为  $10\text{GSa/s}$ ，采样点间隔  $100\text{ps}$ ；当插值倍数为 100 倍时，则等效采样率提升 100 倍，触发分辨率也就提升 100 倍，触发系统能以  $1\text{ps}$  分辨率进行触发处理。

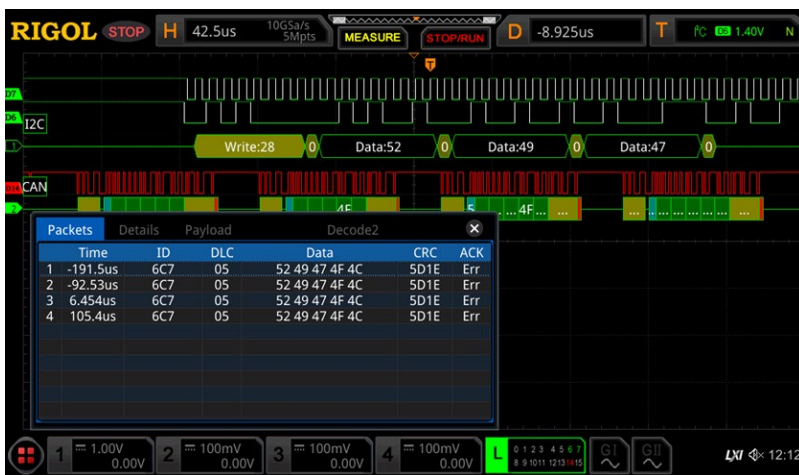


精细触发图

## 总线触发/协议触发

当我们使用示波器测量总线和协议信号时。如果使用软件进行数据的解码和解析，会因为软件操作的非实时性，导致丢失很多触发事件。

协议触发是利用硬件/FPGA 进行实时处理。触发系统对实时数据进行解码和解析，对协议相关数据和特性进行触发。常见的有 RS232、I2C、SPI、CAN、LIN、I2S 总线等。下图为 I2C 总线触发的一个实例。



I2C 总线触发

## 区域触发

区域触发，也称为模板触发，是基于一般触发功能的基础上，再对采集数据进行区域比较判决，判断波形与检测区域是否满足“相交”或“不相交”条件，判决条件满足后才将波形显示到屏幕上。



区域触发

区域触发能实现更直观的触发类型，提升捕获触发事件的概率。

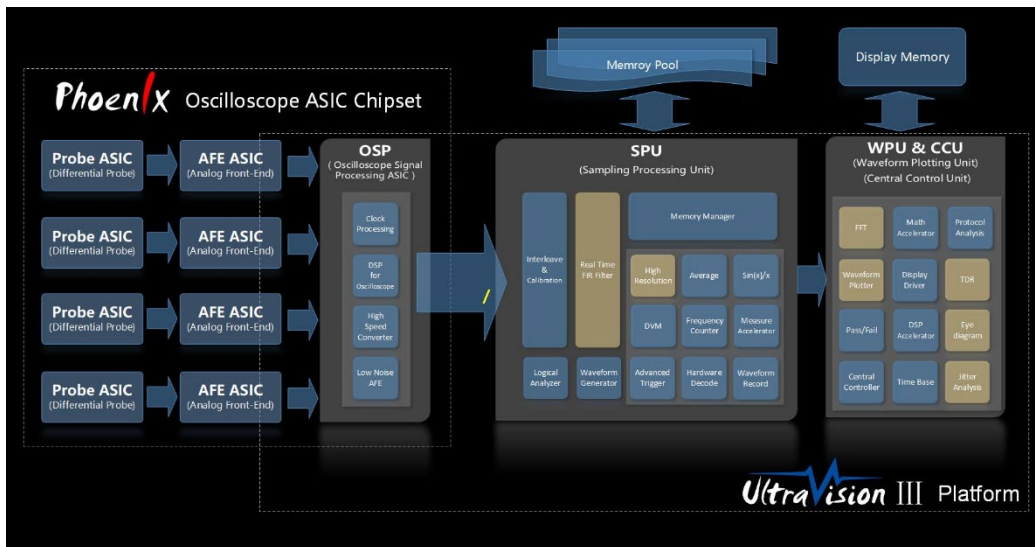
## 总结

正如同之前的分析，模拟触发系统存在触发类型单一，无法实现复杂的触发调节的缺点。而数字触发系统基于数学信号处理，避免了模拟器件受温度等因素的影响，具有触发精确等优点。能够实现基于复杂事件条件的触发，并支持多种触发类型。

RIGOL 最新生产的 DS70000 示波器搭载了我国第一款突破核心技术的高端示波器芯片组 Phoenix“凤凰座”芯片组和全新的 UltraVisionIII 平台，实现了诸多从 0 到 1 的突破。



RIGOL 自主研发并产业化的“凤凰座”示波器芯片组



UltraVisionIII平台框图