

# 示波器基础原理及基本指标

美国力科上海代表处胡为东

**021-52400999**

**13818263752**

**[derek.hu@lecroy.com](mailto:derek.hu@lecroy.com)**

**LeCroy**

# Agenda

---

- ☆ 力科公司及其示波器系列产品简介
- ☆ 什么是示波器
- ☆ 示波器的类型及区别
- ☆ 数字示波器前端输入的主要构成
- ☆ 数字示波器的主要指标及选择指南

# 力科公司简介

## 丰富的高技术产品开发经验



公司总部设在美国纽约.

- § 1964年成立,专业研制高能物理测试仪器.
- § 1970年开始生产电子测试仪器.
- § 1984年开始生产数字示波器.
- § 1995年在NASDAQ股票市场上市.
- § 2002年推出创新的X-Stream I 技术系列示波器.
- § 2008年推出创新的X-Stream II 技术系列示波器.
- § 世界三大数字示波器供应商之一.
- § 世界上唯一一家专业、专注于数字示波器的公司
- § 科学家的测试仪器,在高端应用领域保持领先地位

# 力科全系列示波器产品：为您探索数字世界保驾护航

## 我们创造示波器：

§ 准确地捕获、测量和显示信号

§ 集成硬件和软件结构，缩短测量时间，提供洞察力

§ 满怀信心地查看、调试、验证或检查标准一致性

§ 应用深入的调试和分析工具箱，以数字方式和可视方式提取实用信息

§ 通过量身定制扩展工程师的能力

Signal Complexity ↑



带宽 →

# Lecroy全新第四代 Zi 系列示波器



*WaveMaster8 Zi: 4 – 30 GHz*



*WavePro7 Zi: 1.5 – 6 GHz*

超快速反应能力  
长存储器处理速度提高了**10-100倍**  
深入的调试和验证工具箱  
强大的通用信号测试功能

# WavePro 7 Zi系列

	<b>715Zi</b>	<b>725Zi</b>	<b>735Zi</b>	<b>740Zi</b>	<b>760Zi</b>
带宽	<b>1.5 GHz</b> (500 MHz 1 MW)	<b>2.5 GHz</b> (500 MHz 1 MW)	<b>3.5 GHz</b> (500 MHz 1 MW)	<b>4 GHz</b> (500 MHz 1 MW) (3.5 GHz ProBus50W)	<b>6 GHz</b> (500 MHz 1 MW) (3.5 GHz ProBus50W)
通道数	<b>4</b>				
输入阻抗	<b>1 MW/50W</b>				
输入接口类型	<b>ProBus</b> (1 MW/50W)			<b>ProBus(1 M W/50W)</b> <b>ProLink(50 W)</b>	
采样率 (4ch)	<b>10 GS/s*</b>	<b>20 GS/s</b>			
采样率(2ch)	<b>20 GS/s*</b>	<b>40 GS/s</b>			
采样率(1ch)	<b>20 GS/s*</b>	<b>40 GS/s</b>			
标配存储深度 (4ch)	<b>10 Mpts</b>				
标配存储深度(2ch)	<b>20 Mpts</b>				
最大存储深度 (4ch/2ch)	<b>128/256 Mpts</b>				
显示器尺寸和分辨率	<b>15.3" Widescreen, WXGA, 1280 x 768 pixels</b>				
保修	<b>3 Years</b>				

# WaveMaster 8 Zi系列

	WaveMaster 804Zi	WaveMaster 806Zi	WaveMaster 808Zi	WaveMaster 813Zi	WaveMaster 816Zi	WaveMaster 820Zi	WaveMaster 825Zi	WaveMaster 830Zi
带宽	4 GHz	6 GHz	8 GHz	13 GHz	16 GHz	20 GHz	25 GHz	30 GHz
通道数量	4					4 (全部带宽时为2)		
采样率	40 GS/s, 4ch 使用外部通道复用选项时2ch上为80 GS/s					80 GS/s, 全部带宽时 40 GS/s, 4 ch		
标配存储器	10 Mpts, 4ch 在采用选项时80 GS/s及2ch时为20 Mpts					10 Mpts, 4ch 在全部带宽, 80 GS/s及2ch时为20 Mpts		
最大存储器	256 Mpts, 4ch 在采用选项时80 GS/s及2ch时为512 Mpts					256 Mpts, 4ch 在全部带宽, 80 GS/s及2ch时为512 Mpts		
输入阻抗	50W / 1 MW							
输入类型	4个 -ProLink (50 W) 4个 -ProBus (1 M W/50W)					2个 -2.92 mm (50 W) 4个 -ProLink (50 W) 2个 -ProBus (1 M W/50W)		
显示器尺寸和分辨率	15.3" 宽屏, WXGA, 1280 x 768像素							
保修	3年							

# Agenda

---

- ☆力科公司及其示波器系列产品简介
- ☆什么是示波器
- ☆示波器的类型及区别
- ☆数字示波器前端输入的主要构成
- ☆数字示波器的主要指标及选择指南



# 信号基本概念:

连续信号:  $y=x(t)$

离散信号:  $y=x(nT)$

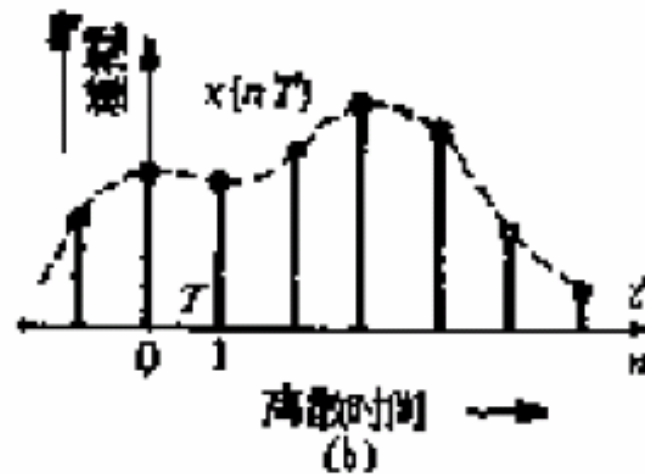
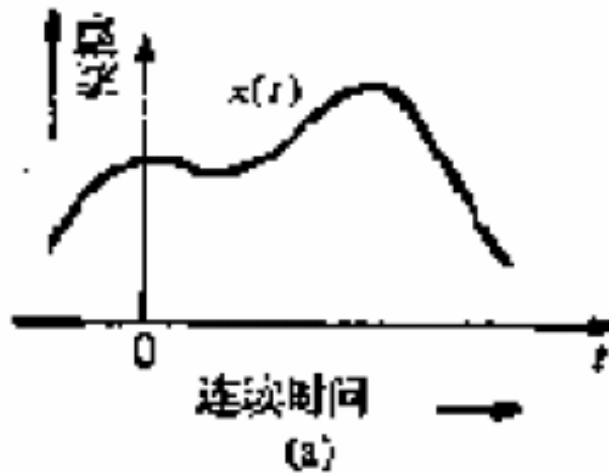
§ 信号:

§ 连续时间信号和离散时间信号

信号是代表一个物理量的函数。

连续时间信号是其定义域包括一个区间内每一点的函数

离散时间信号是其定义域为一个整数集的函数。

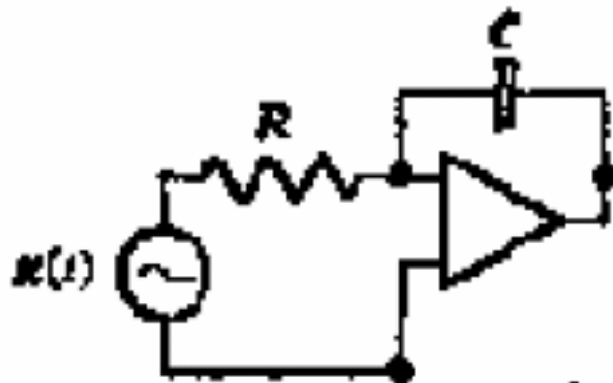


# 模拟信号与数字信号

- § **模拟信号**和**数字信号**在电学里面通常指的是电压信号或者电流信号。
- § 模拟信号是指随时间连续变化的电压信号或者电流信号。
- § **问题：怎样将模拟信号转换为离散信号？**
- § 数字信号是指用二进制码（**0101.....**）表示的信号。
- § **问题：怎样将离散信号（或者模拟信号）转换为数字信号？**
- § **问题：为何要使用数字信号来表示模拟信号？**

# 电压和电流

- § 电压（电位差）：电荷从A点移动到B点的能量变化， $U_{ba}=dW/dt$ ，在我们日常研发过程中所说的电压是以“地（通常是与大地相连，0电平）”为参考的。
- § 电流：单位时间内通过某一导体横截面的电荷大小。
- § 电压和电流都是随着时间而变化的，不同的变化蕴含着不同的信息，因此我们需要了解它们随着时间的变化情况。
- § 示波器就是用来帮助我们测量和观察电压和电流随着时间的变化情况。



示波器经常被认为是...

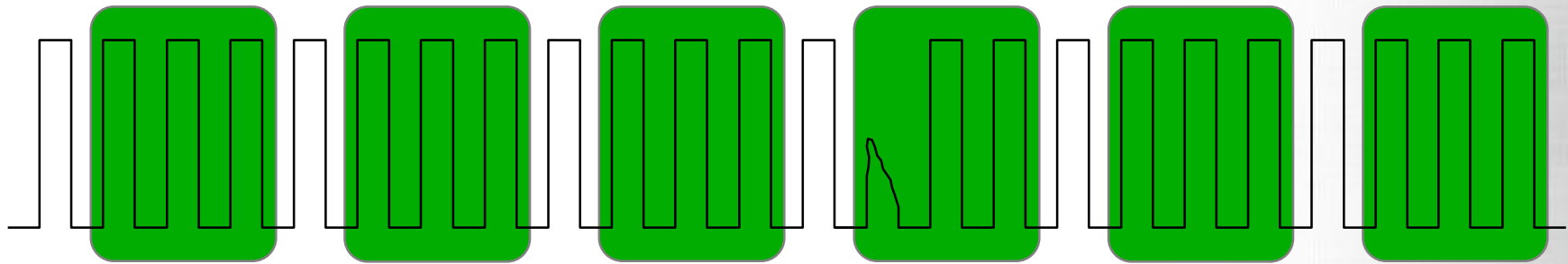
一扇窗户...



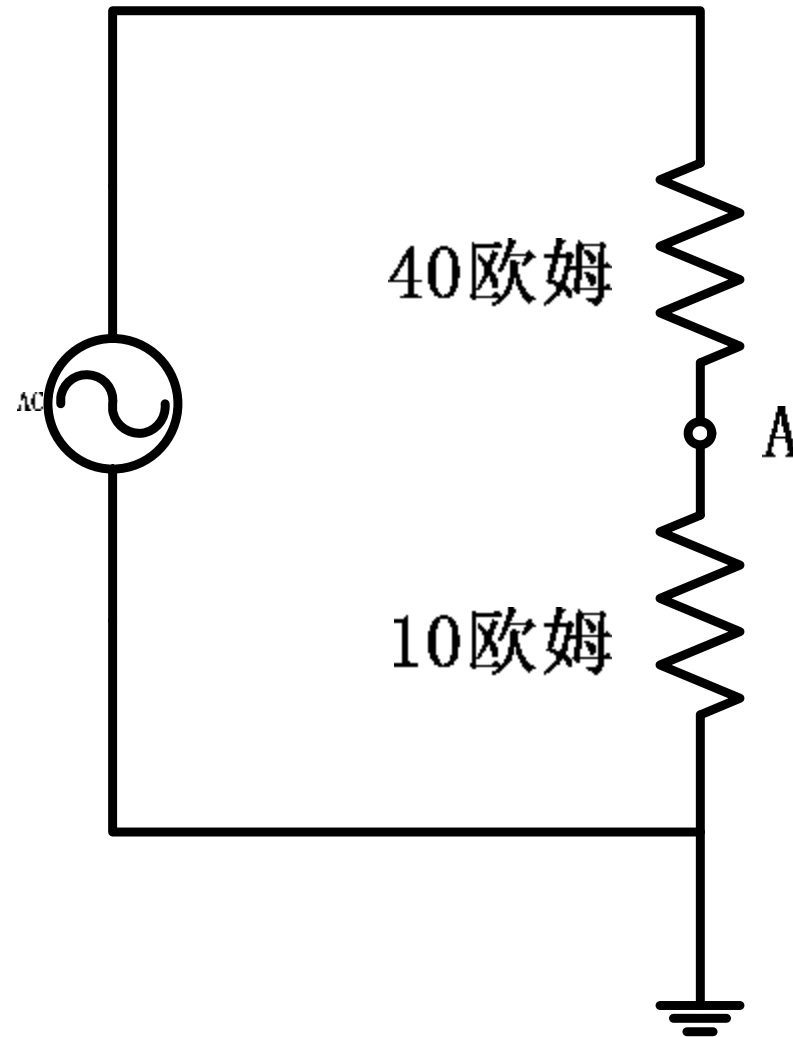
... 进入微观电子世界

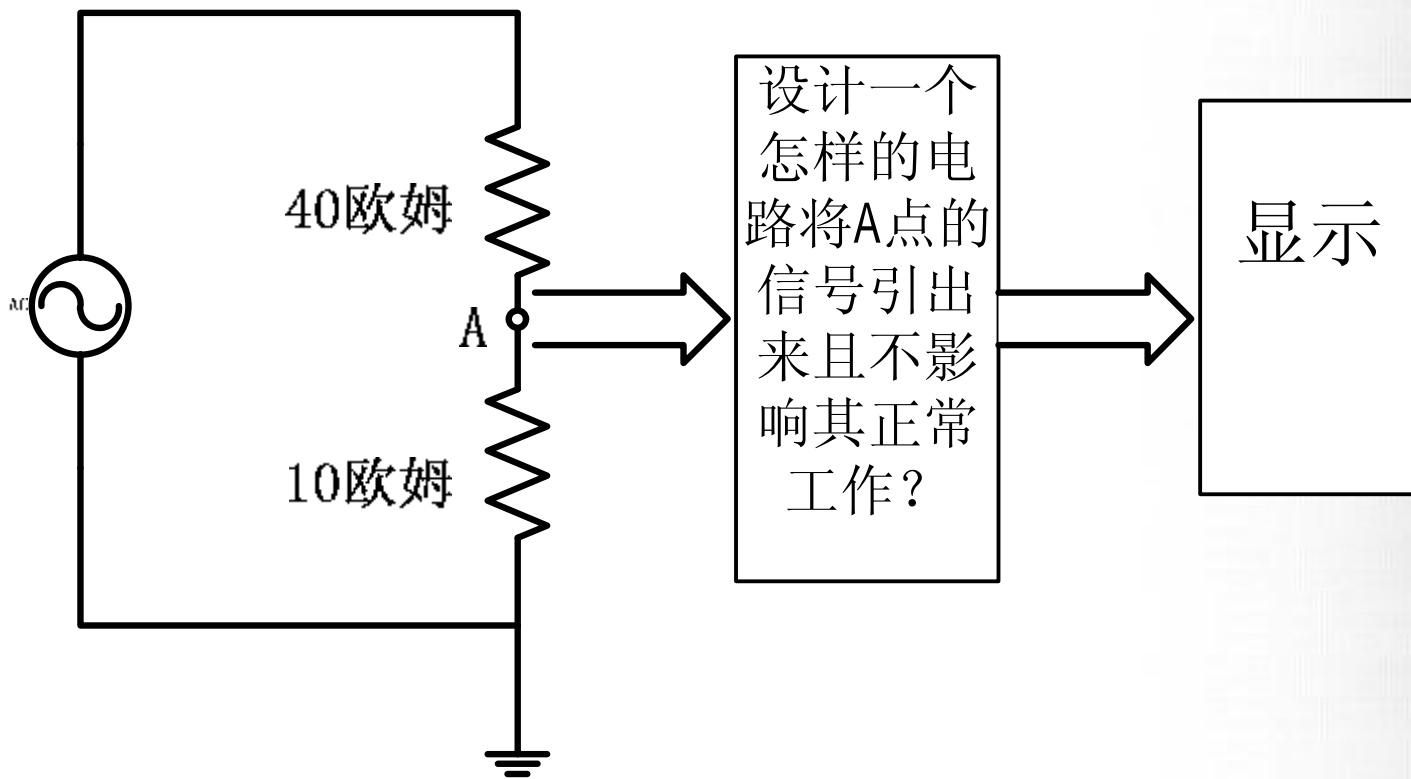
## 示波器获取波形图像

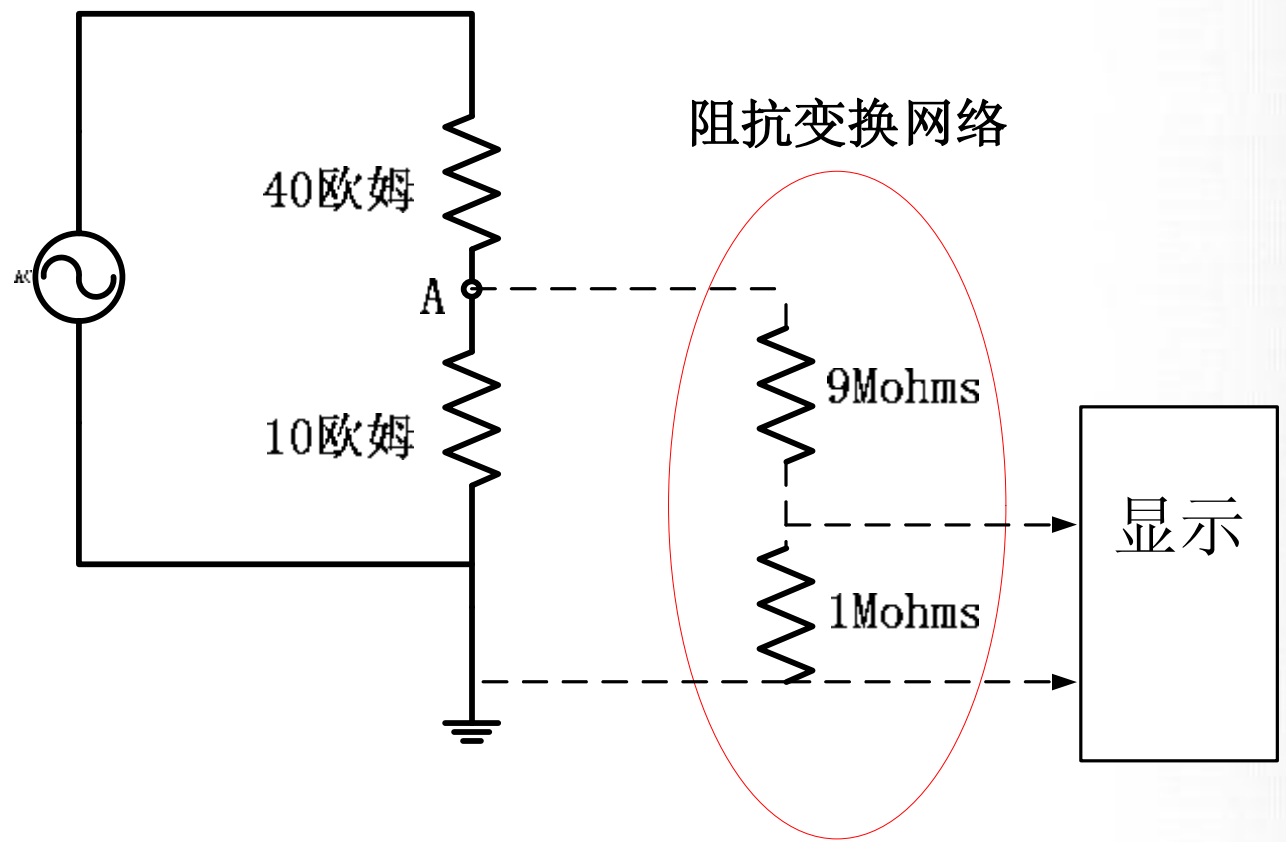
- § 示波器的基本功能就是将肉眼无法识别的电子信号转换成可观测的波形图形
- § 示波器获取连续信号的片断图形, 然后创造波形显示.



怎样将**A**点的电压波形送到示波器进行处理和显示呢？





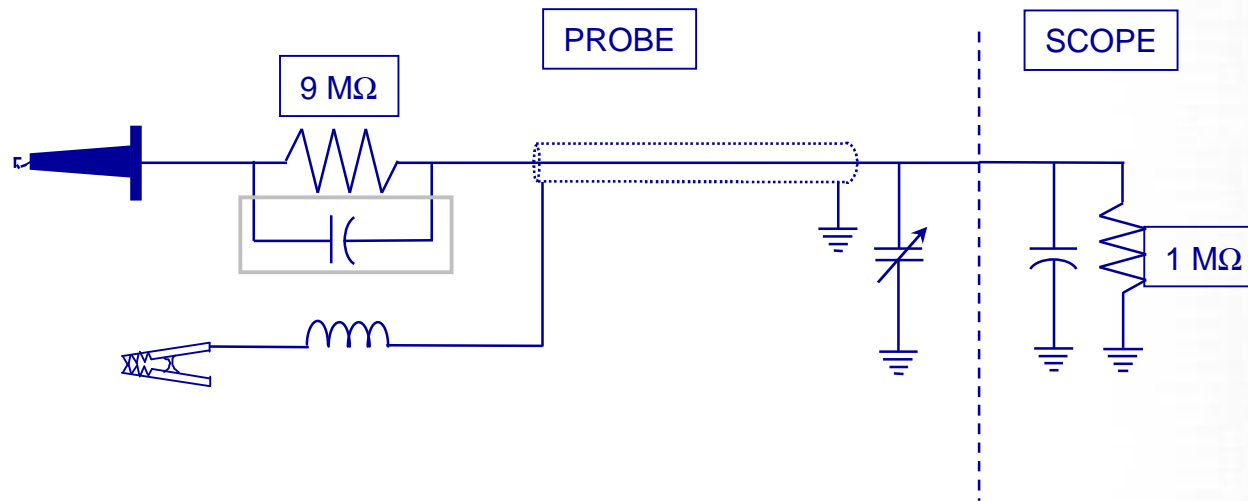


阻抗变换网络

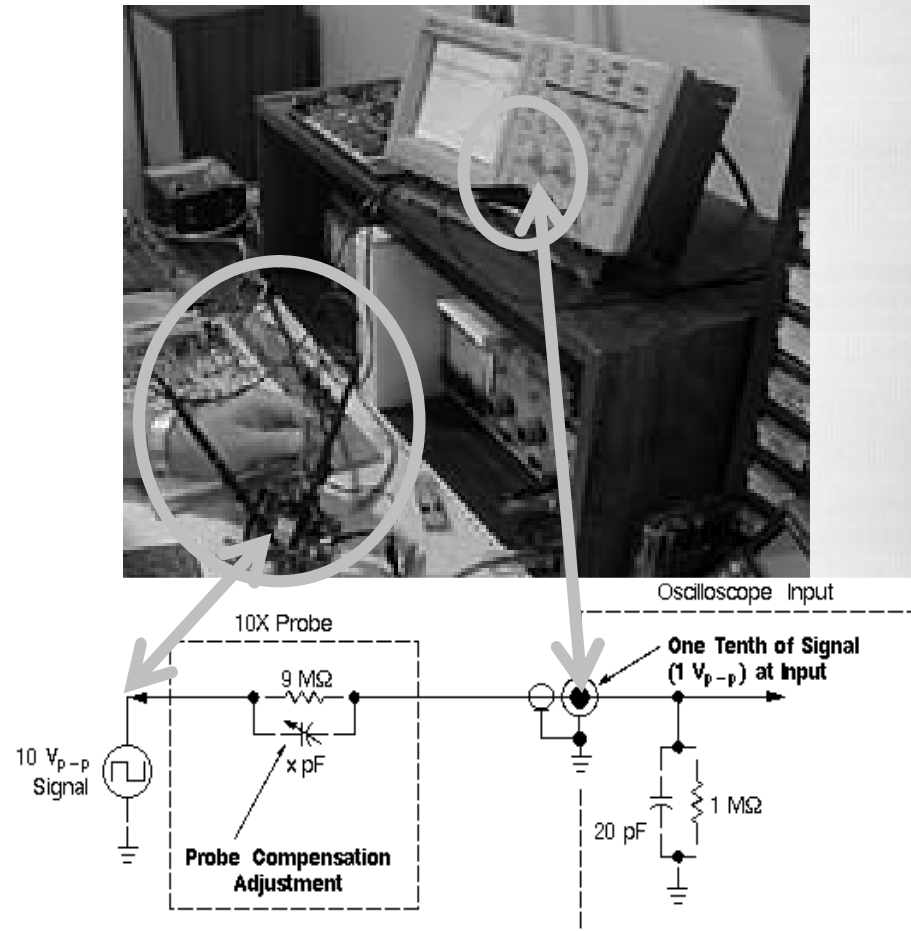
示波器的  
无源探头  
系统



# 无源探头的基本构造



# 所有示波器都需要探头



# Agenda

---

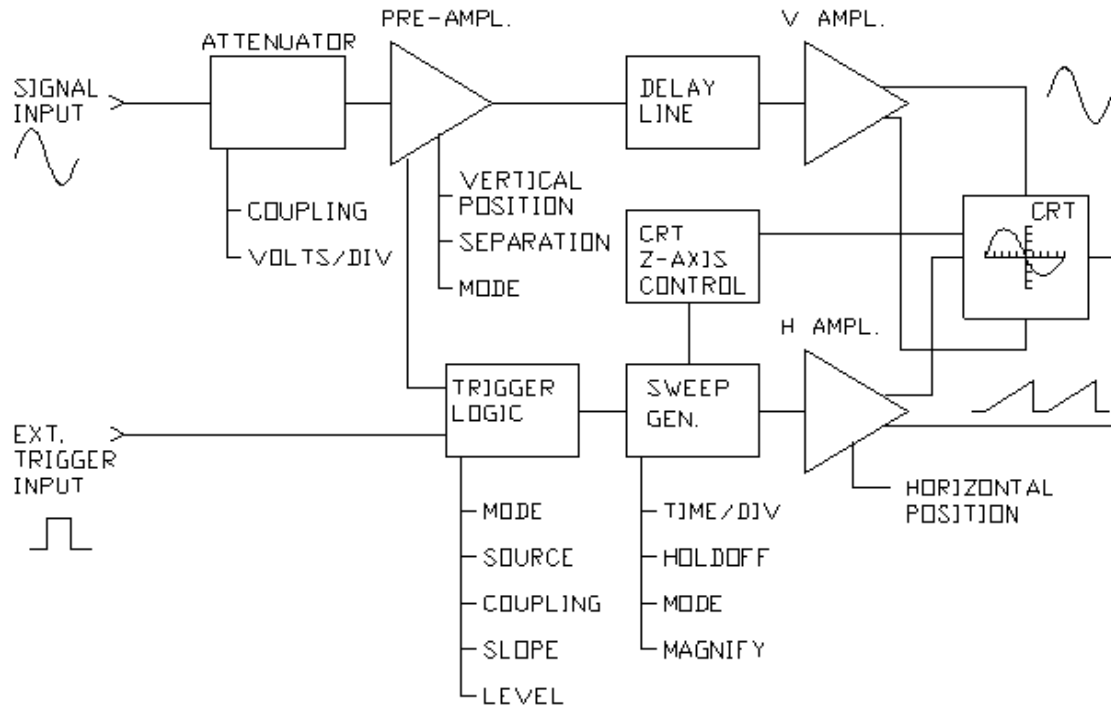
- ☆力科公司及其示波器系列产品简介
- ☆什么是示波器
- ☆示波器的类型及区别
- ☆数字示波器前端输入的主要构成
- ☆数字示波器的主要指标及选择指南

# 示波器主要分类

---

- § 模拟示波器
- § 数字示波器
- § 采样示波器

# 模拟示波器的基本原理简图



**Block Diagram Of A Typical Analog Oscilloscope**

模拟示波器：

实时显示  
波形真实  
结构简单  
不够灵活

最长扫描时间受到CMT荧光

余辉时间的限制

数字示波器：

可扩充功能多  
自动参数测量  
触发方式多  
存储方式多

处理能力强

波形不能实时显示

§Analog oscilloscopes write to the CRT in real time. A 100 ns sweep is written in 100 ns. The beam must move at a speed of 1,000,000 m/sec to cover 10 cm in 100 ns

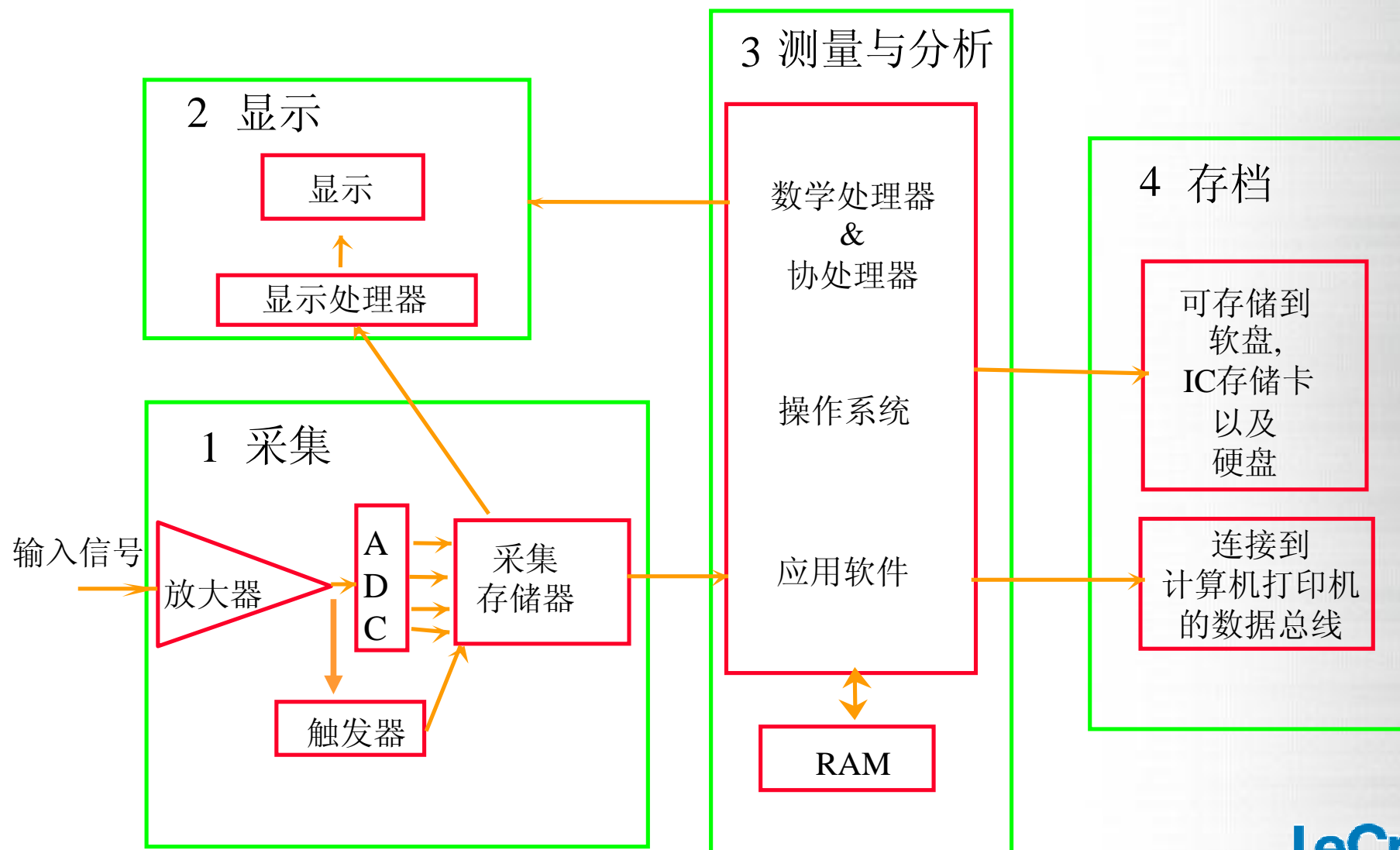
§The maximum writing speed to the cathode ray tube (CRT) limits the fastest sweep time

§The persistence of the CRT phosphor determines the longest sweep time

§Since the analog oscilloscope has no means to store a waveform it cannot capture a waveform for additional measurements or analysis

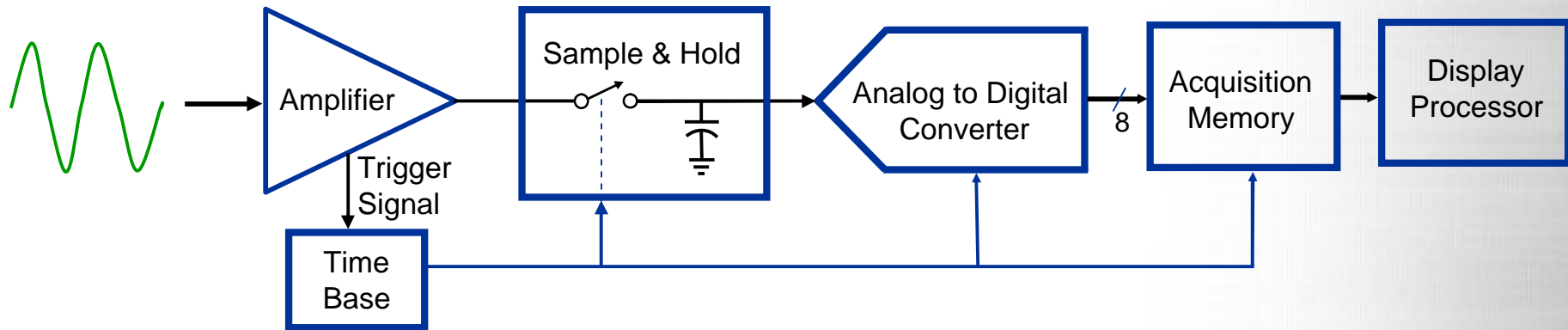
# 一般数字示波器工作原理简图

与模拟示波器架构的不同之处

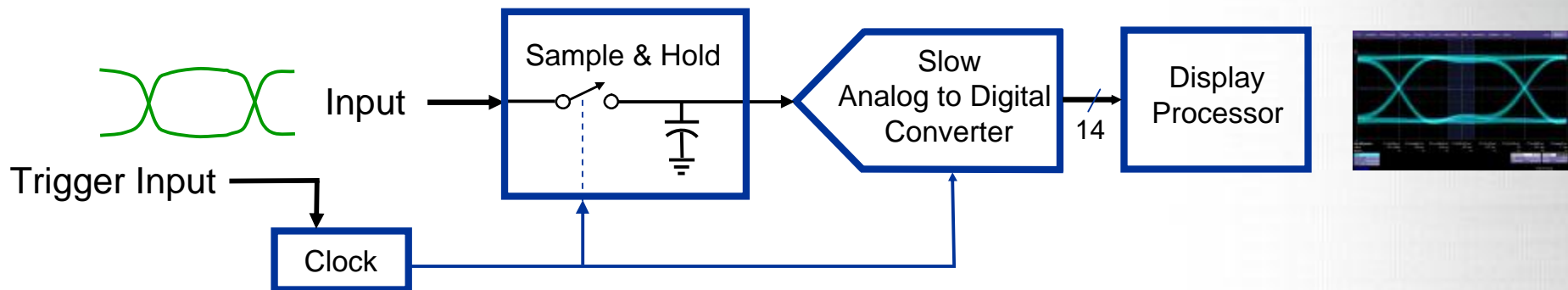


# 采样示波器和实时示波器工作原理简图对比

## Real Time Oscilloscope



## Sampling Oscilloscope



# Agenda

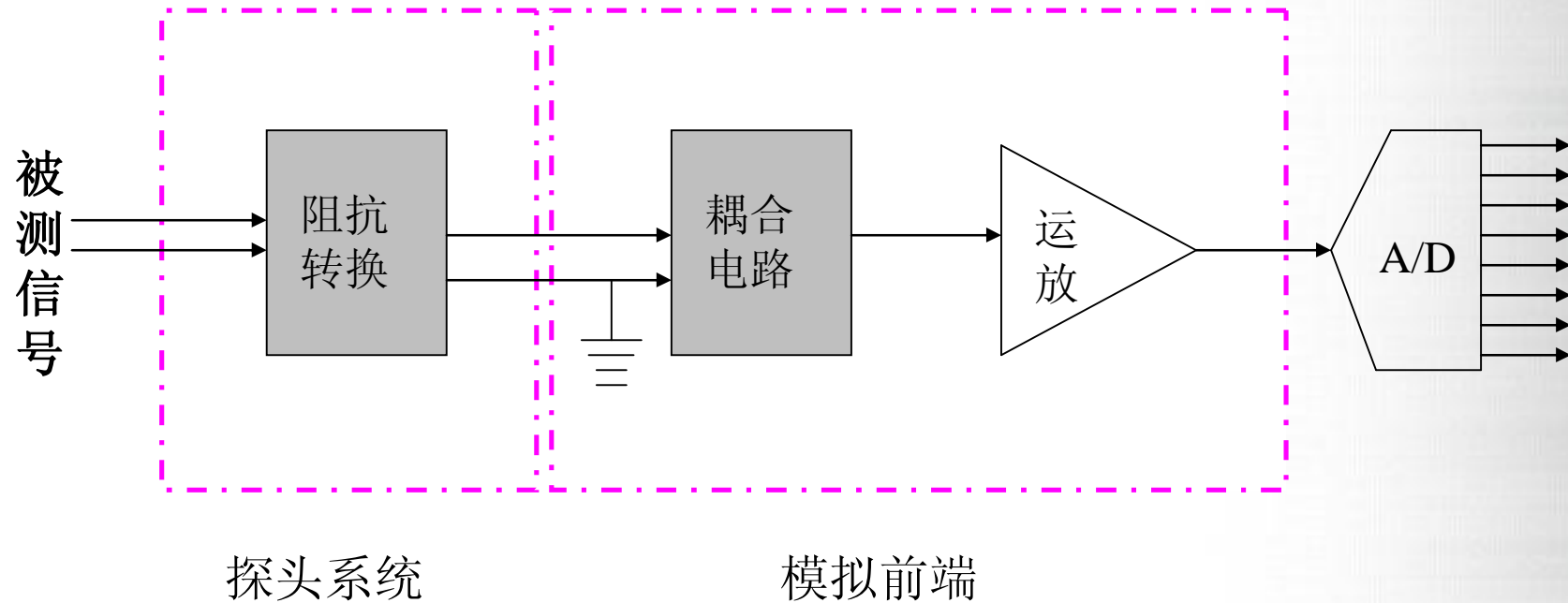
---

- ☆力科公司及其示波器系列产品简介
- ☆什么是示波器
- ☆示波器的类型及区别
- ☆实时数字示波器前端输入的主要构成
- ☆数字示波器的主要指标及选择指南



# 实时数字示波器的信号输入系统

被测信号通过探头前端到达探头主体，进入阻抗转换电路，以衰减成合适比例的输入信号，送入示波器前端，通过耦合电路，到达前置放大器。

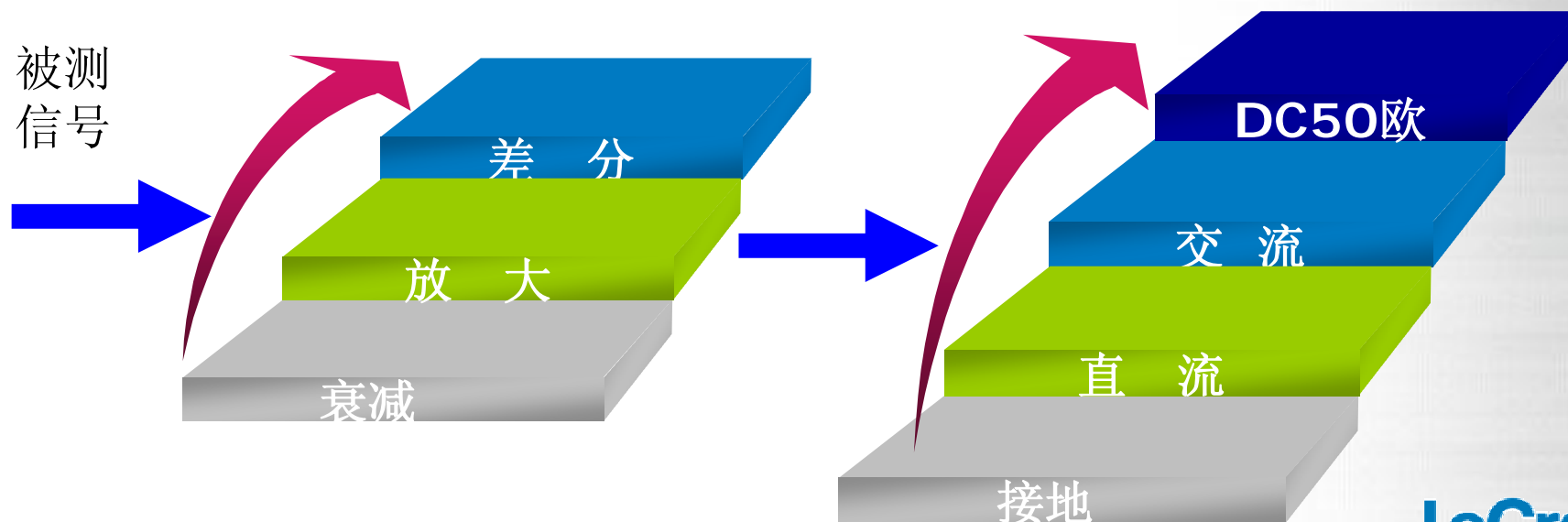


# 实时数字示波器的阻抗变换与耦合

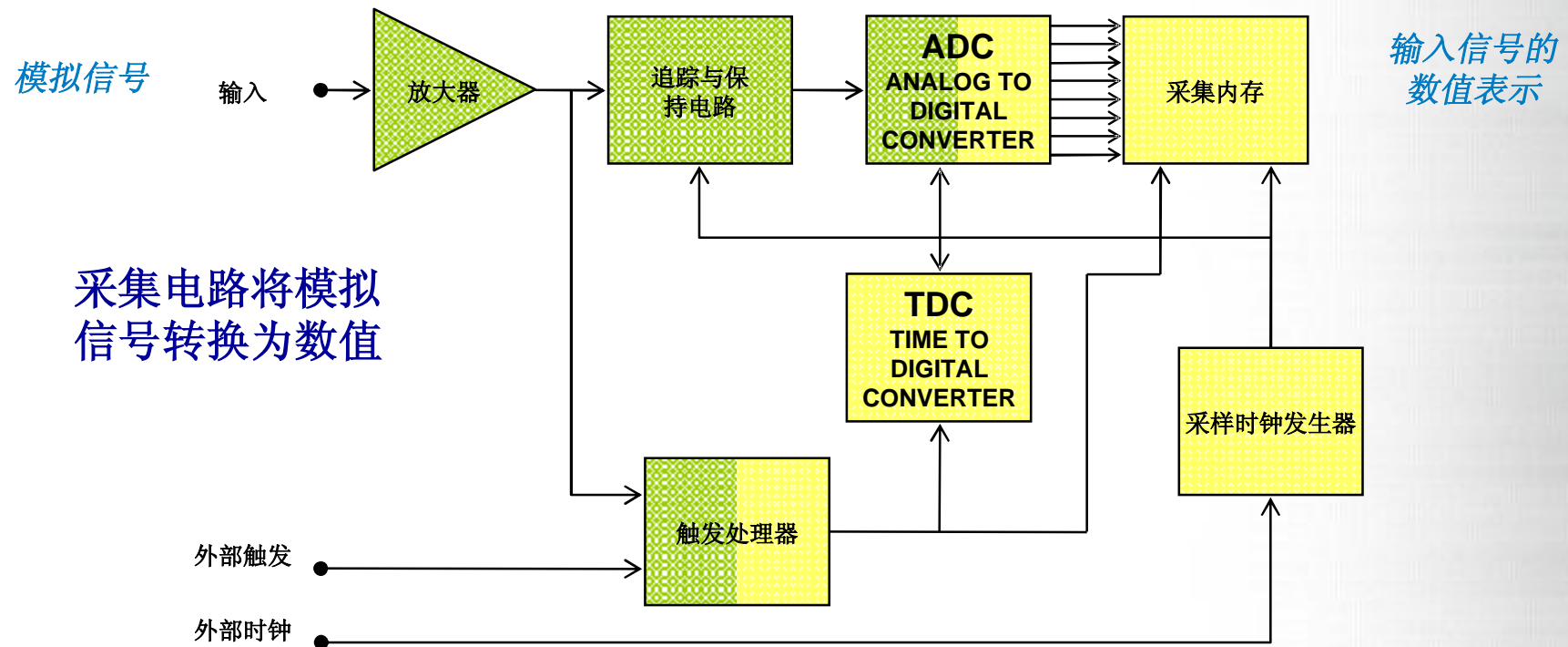
要把被测信号引入示波器进行不失真的测量，则要求测量电路接入被测电路后，尽可能少的影响被测信号；同时把被测信号变换成适合示波器输入电路的信号，这就需要通过一个阻抗变换网络来完成。

对于差分信号的测量，需要把差分信号不失真的变换为单端信号来进行测试。

耦合是指连接方式，即前一级电路到后一级电路之间的连接方式。



# 实时数字示波器的基本采集电路



- § 放大器与衰减器调节输入信号的幅度,使幅度在ADC的输入范围内
- § Track & Hold部分以采样频率对输入信号取样,采样频率在示波器的timebase时基中可以进行调节
- § ADC把电压转换为数值化的采样点保存到采集内存中

# Agenda

---

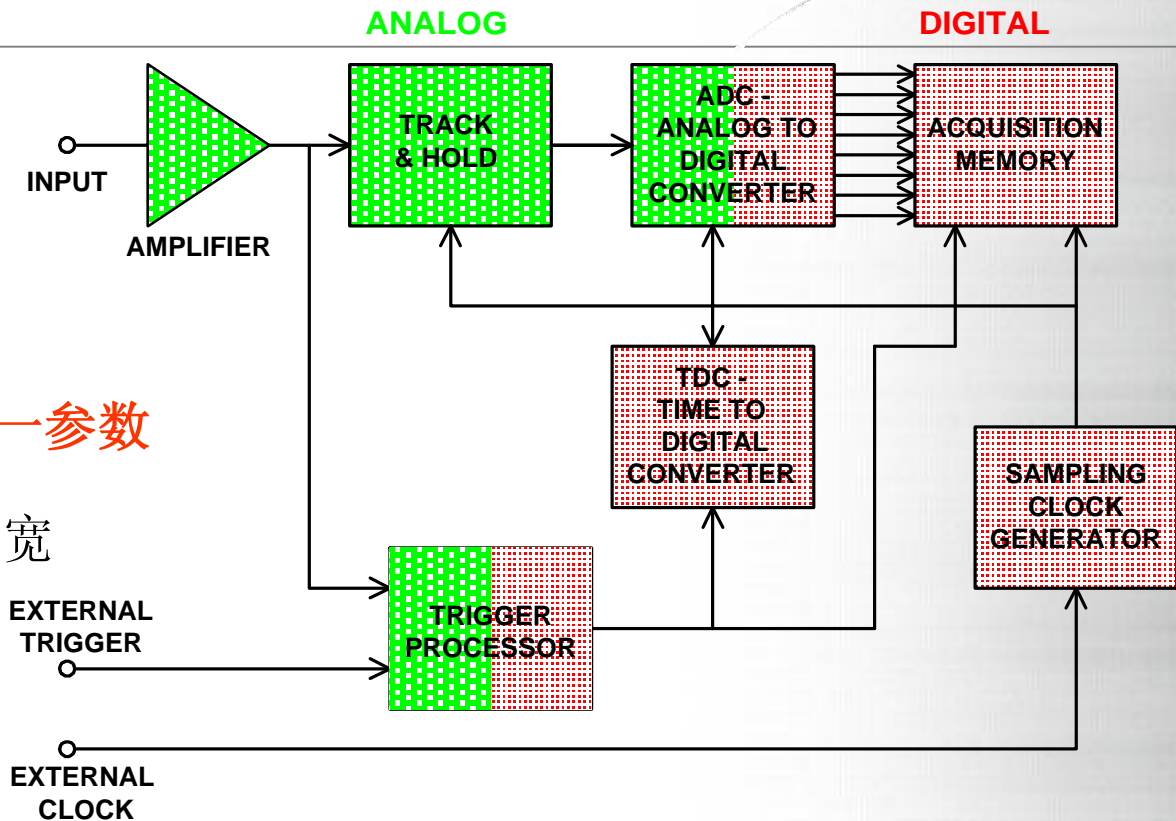
- ☆力科公司及其示波器系列产品简介
- ☆什么是示波器
- ☆示波器的类型及区别
- ☆数字示波器的主要构成部分
- ☆**数字示波器的主要指标及选择指南**

# 实时数字示波器的基本指标

---

- § 模拟带宽
- § 数字带宽
- § 触发带宽
- § 上升时间
- § 采样率
- § 存储深度
- § 波形捕获率
- § 显示刷新率

# 模拟带宽、数字带宽、触发带宽



## 模拟带宽是选择示波器的第一参数

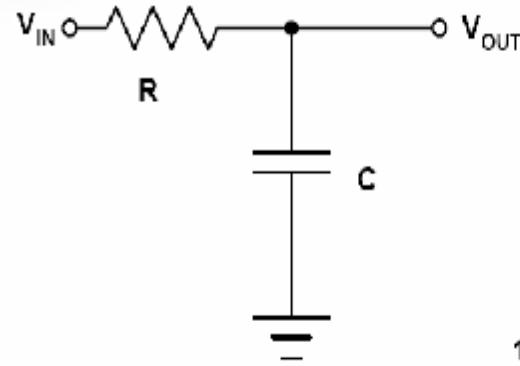
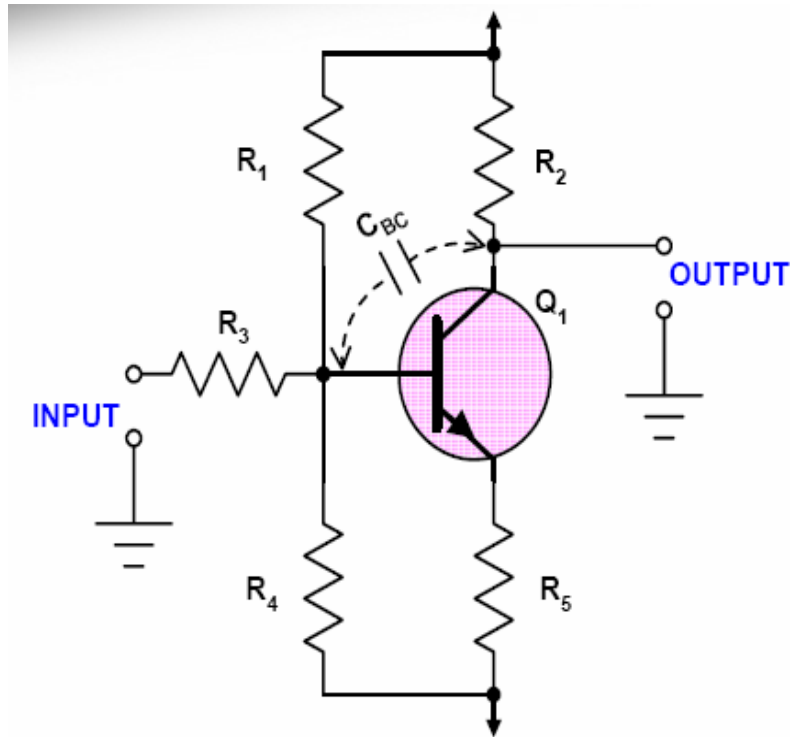
通常所说的数字示波器的带宽也就是模拟带宽。

§ 模拟带宽主要由输入端的模拟电路决定，包括前端放大器、采样保持电路、ADC电路等，最主要的决定因素是前端放大器的模拟带宽。

§ 触发带宽主要有放大器和触发电路决定

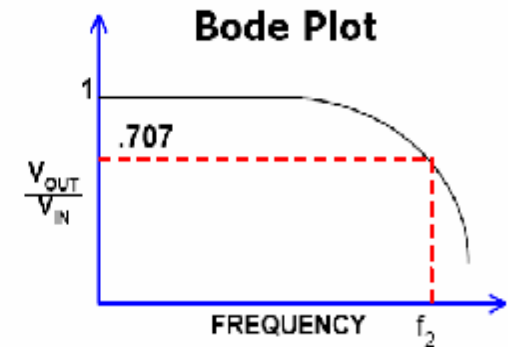
t 数字带宽主要由采样率和采集存储深度决定

# 模拟带宽



$$\left| \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi RCf)^2}}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_2)^2}}$$

Where:  $f_2 = 1/(2\pi RC)$

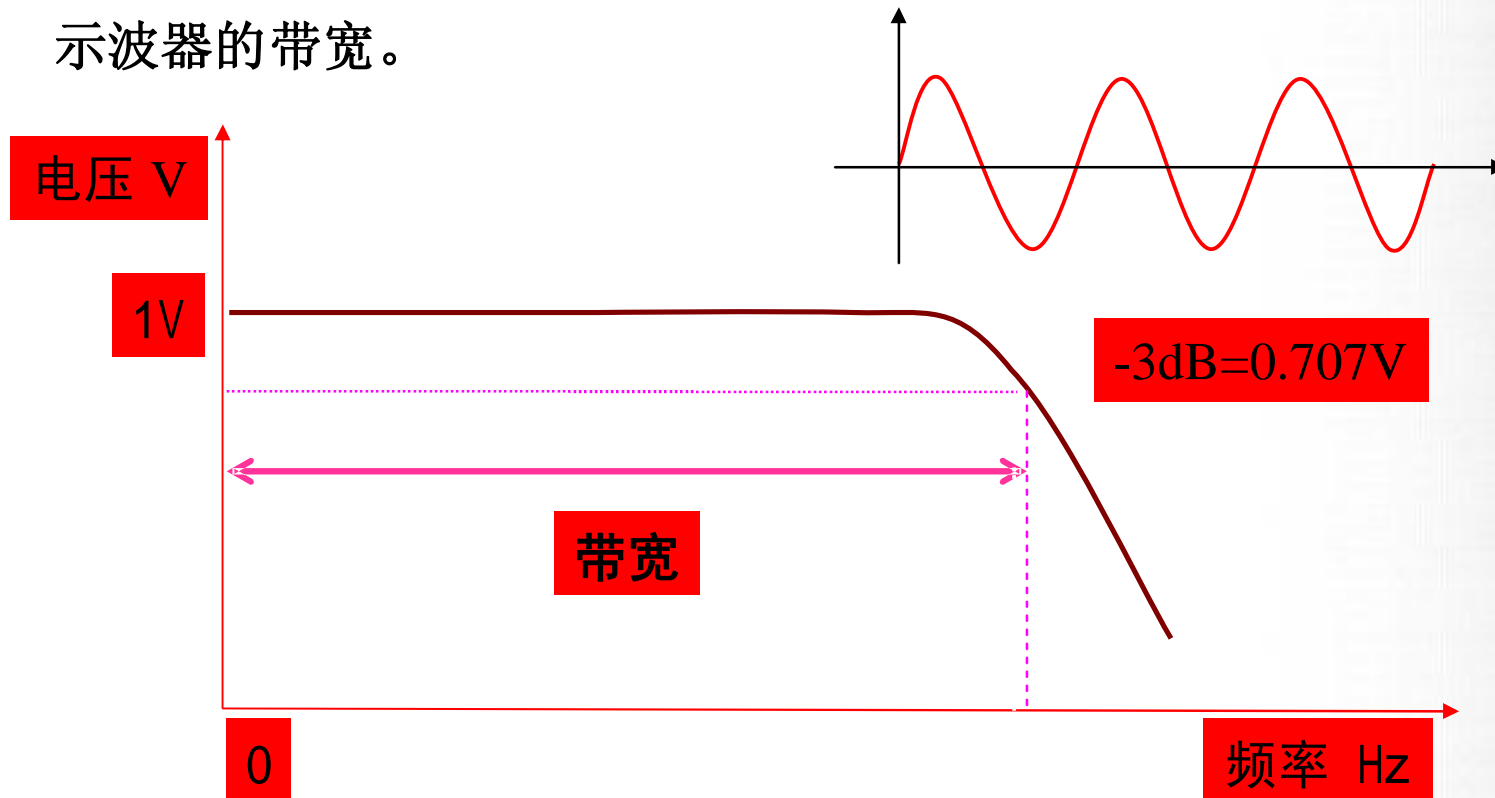


带宽就是输出降低到输入的70.7%时的频率

# 如何测量示波器带宽？

## 带宽 = 正弦波 -3 dB 点

带宽定义：示波器输入标准正弦波信号，不断提高信号频率，输入信号幅度会被不断衰减；频率越高，衰减幅度越大；当频率提高到某个值，输入信号刚好被衰减3dB时所对应的频率点，即为示波器的带宽。

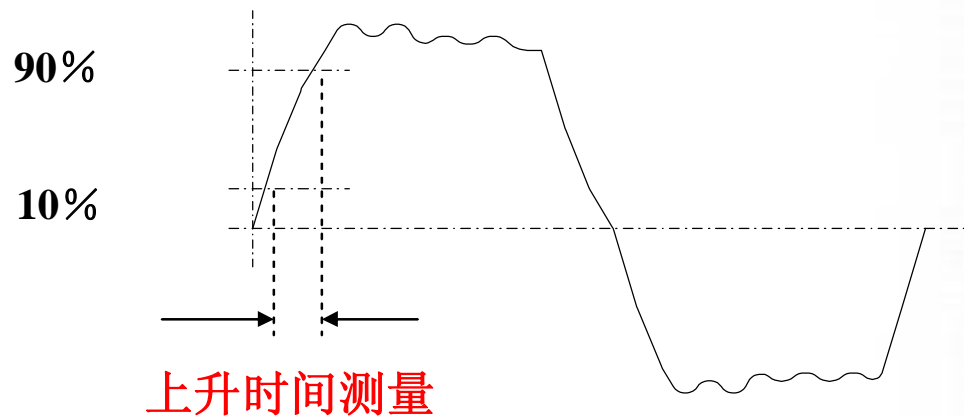




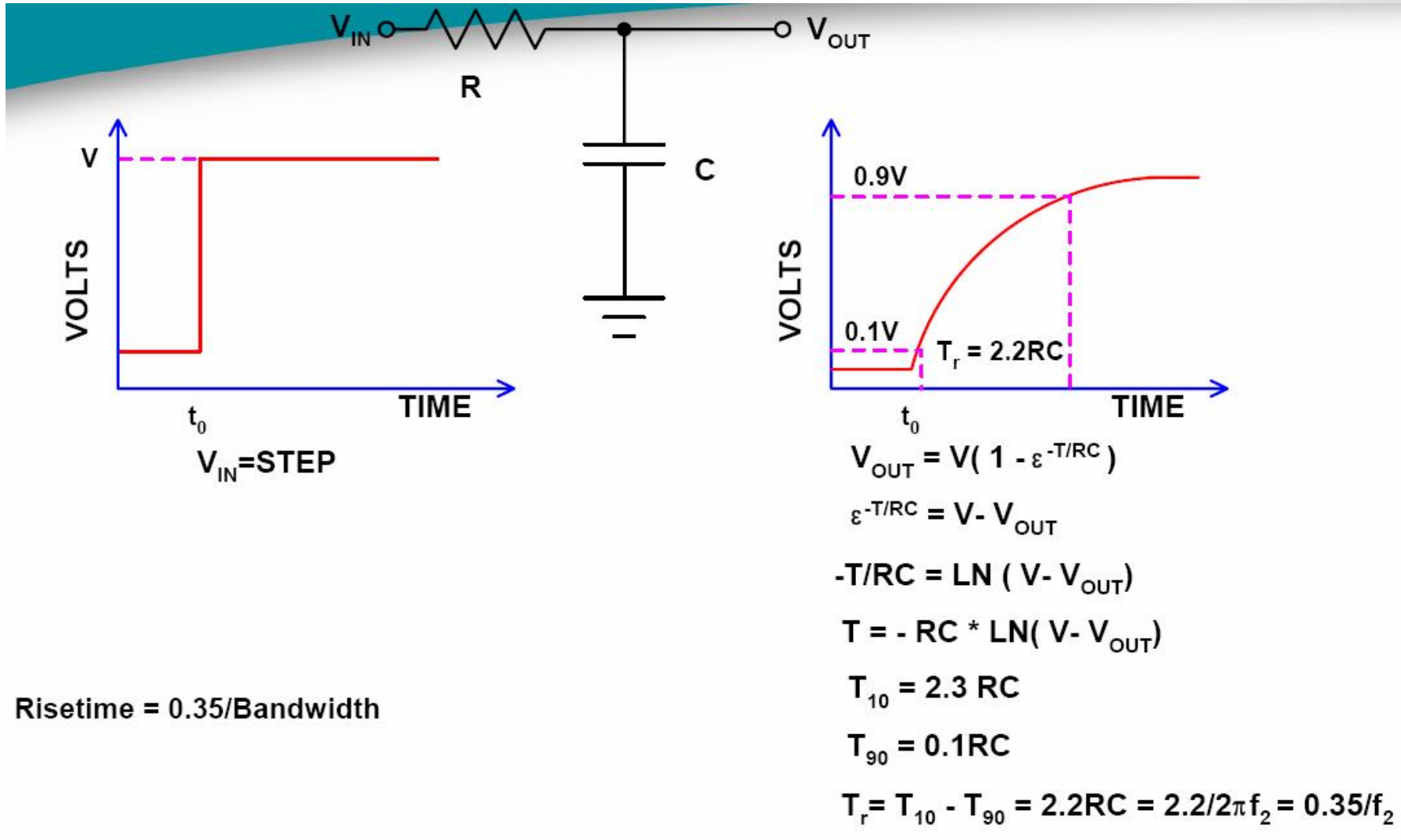
# 什么是上升时间？

- 理想的方波和脉冲波的电压是有突然变化的波形，陡变有一定时间这取决于系统带宽及其他电路参数。
- 波形从一种电压变至另一种电压的时间称为上升时间

上升时间通常在过渡的10%至90%处

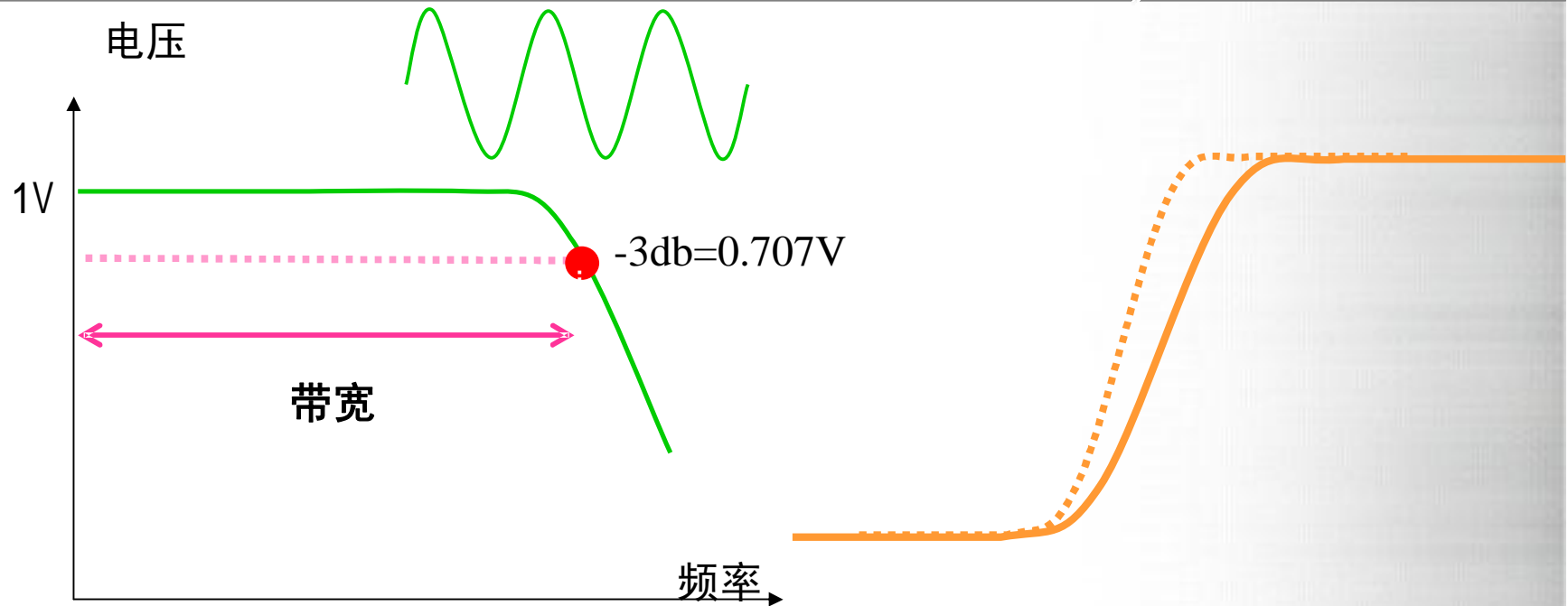


# 带宽与上升时间



Risetime = 0.35/Bandwidth

# 示波器上升时间、探头上升时间以及信号上升时间的关系



- $tr_{scope} (ns) = 350 / \text{bandwidth} (MHz)$
- $\text{Measured risetime} (tr)^2 = (tr_{signal})^2 + (tr_{scope})^2 + (tr_{probe})^2$

$$BW_{(DISPLAYED)} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{BW_{(示波器)}}\right)^2 + \left(\frac{1}{BW_{(探头)}}\right)^2 + \left(\frac{1}{BW_{(源)}}\right)^2}}$$

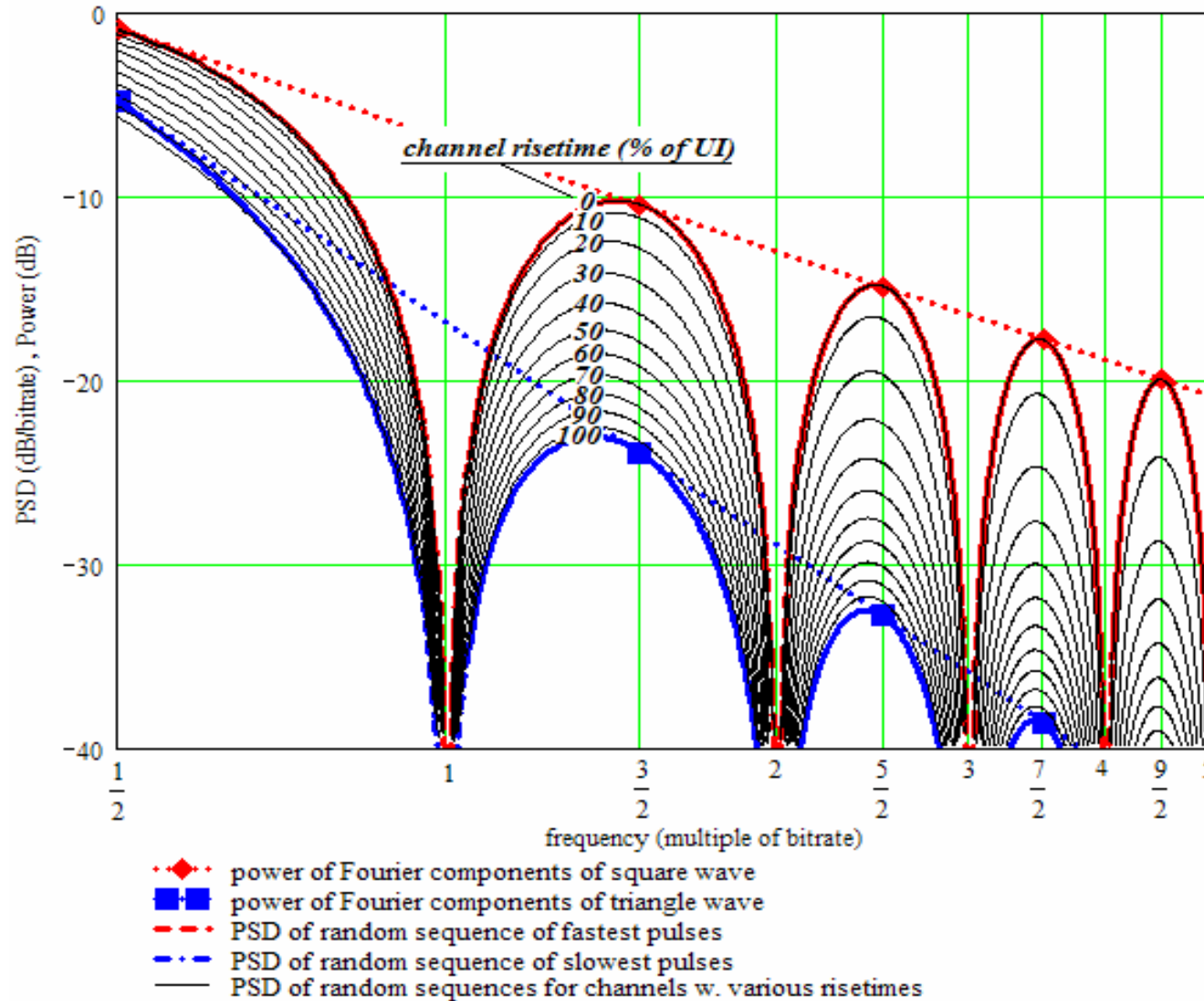
\* 此常量针对一极模型。对于更高带宽的仪器来说，此常量可以高到0.45。

- ▶ 由以上公式可以看出，示波器及探头的带宽越宽，则对测量带宽影响越小，也就是说测量带宽越接近信号带宽

## 需要多高的带宽？

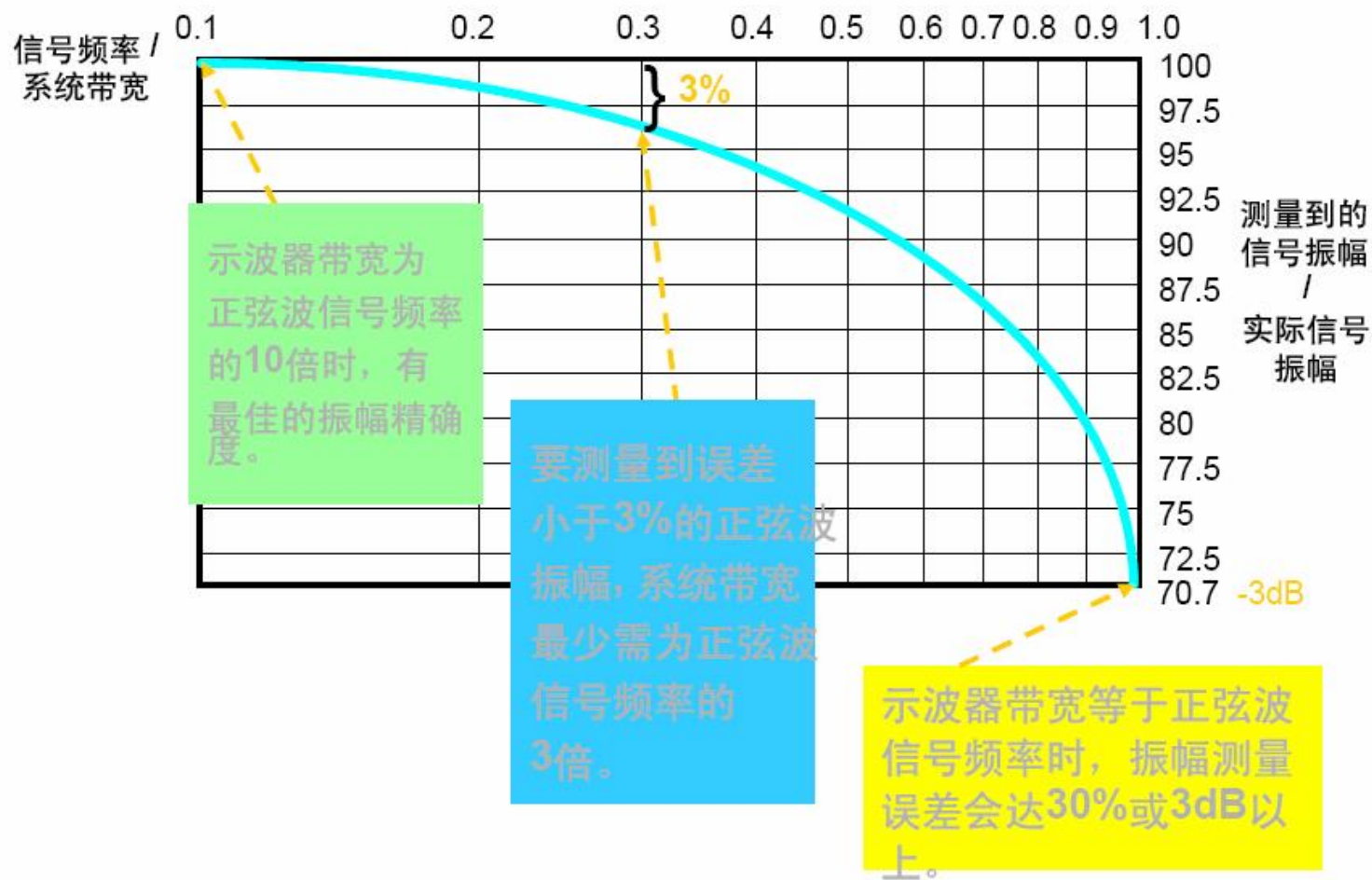
- § 首先取决于您需要测试的信号类型及您希望的测试准确度。
- § 最重要的因素是对上升时间和幅值测量的准确度要求。
- § 对串行信号而言，数据比特率和上升时间是最重要的两个因素。有一个粗略的评估准则是：示波器的带宽  $> 1.8 \times$  信号比特率。在这个准则下，如果被测信号的上升时间  $> 20\%UI$ ，那么1.8关系的带宽能捕获信号能量的99%。但是如果被测信号的上升时间更加陡峭，则需要更高的带宽，业界通常以示波器的带宽  $\geq 2.5 \times$  信号比特率为基本带宽选择参考。

# PSD vs Risetime and Bitrate



This graph shows the Power Spectral Density of the frequency content of a serial data signal as a function of the risetime of the signal. Fast risetimes (0-10 % of a UI) have more high frequency content. Note the horizontal axis is in multiples of the bit rate. Peaks are at odd multiples of half the bit rate.

# 系统带宽 vs. 正弦波幅度精度



# 典型逻辑电平的测量精度要求

电平逻辑	典型信号上升时间	计算出的信号带宽 = $\frac{0.35^*}{t_{rise}}$	测量系统带宽 针对 3% 滚降错误	测量系统带宽 针对 1.5% 滚降错误
TTL	5 ns	70 MHz	231 MHz	350 MHz
CMOS	1.5 ns	230 MHz	767 MHz	1.15 GHz
ECL	500 ps	700 MHz	2.33 GHz	3.5 GHz
GaAs	200 ps	1.75 GHz	5.8 GHz	8.75 GHz

$$t_{rise(displayed)} = \sqrt{(t_{rise(scope)})^2 + (t_{rise(probe)})^2 + (t_{rise(source)})^2}$$

# 波形上升时间与测量精度的关系

信号上升时间仪表上升时间之比

上升时间测量精度%

**1:1**

**41%**

**2:1**

**22%**

**3:1**

**12%**

**4:1**

**5%**

**5:1**

**2%**

**7:1**

**1%**

**10:1**

**0.5%**



# 带宽选择实例

已知条件：示波器主机1GHz，探头配置1.5GHz，被测信号200MHz  
(上升时间500ps)。

$$\text{示波器上升时间} = 0.35/1\text{GHz} = 350\text{ps}$$

$$\text{探头上升时间} = 0.35/1.5\text{GHz} = 233\text{ps}$$

$$\text{整个测量系统上升时间} = \sqrt{350^2+233^2} = 420\text{ps}$$

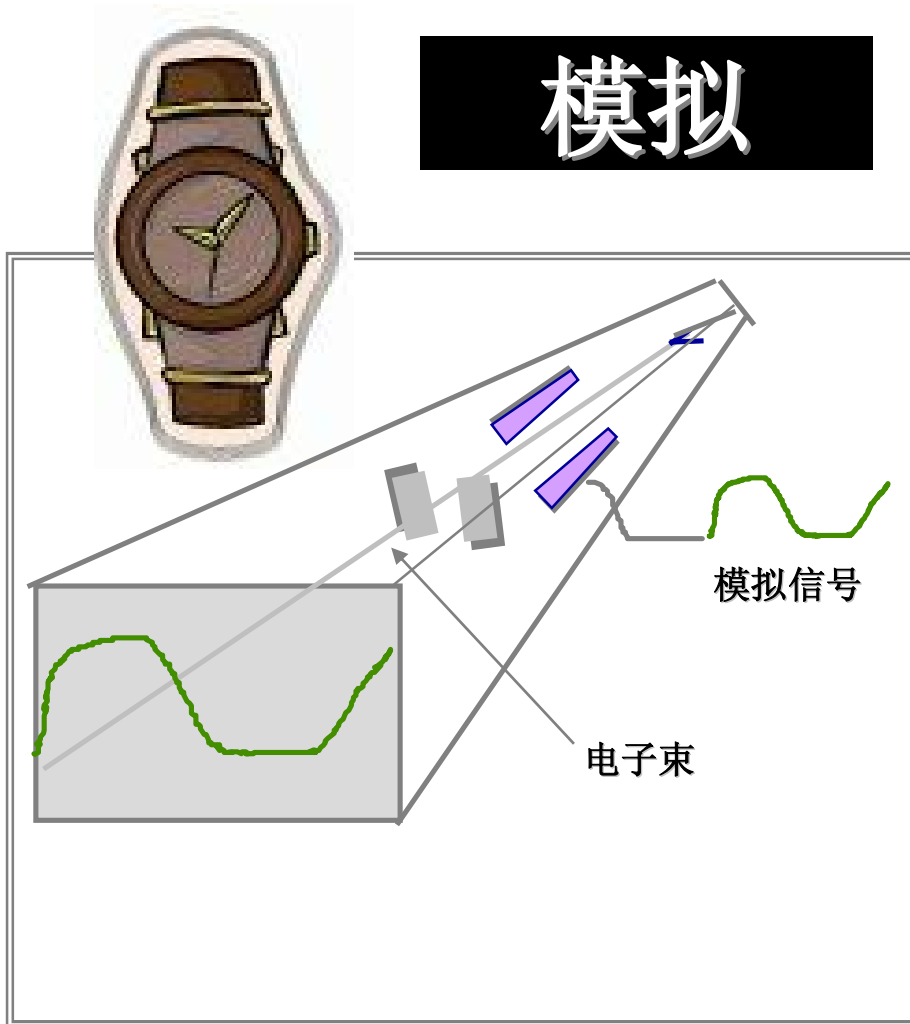
$$\text{整个测量系统实际带宽} = 0.35/420 = 833\text{MHz}$$

$$\text{实测信号所得上升时间} = \sqrt{420^2+500^2} = 653\text{ps}$$

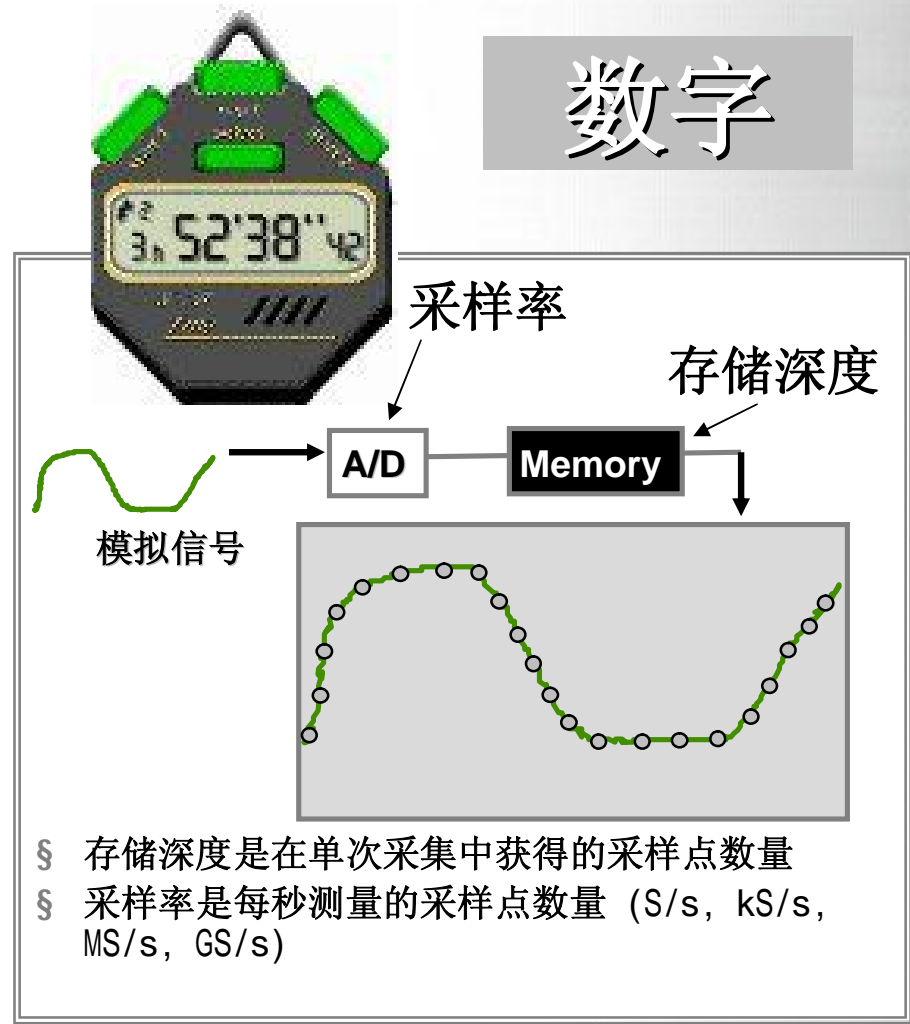
$$\text{实际测量误差} = (653 - 500) / 500 = 30.6\%$$

# 采样率和存储深度

## 模拟



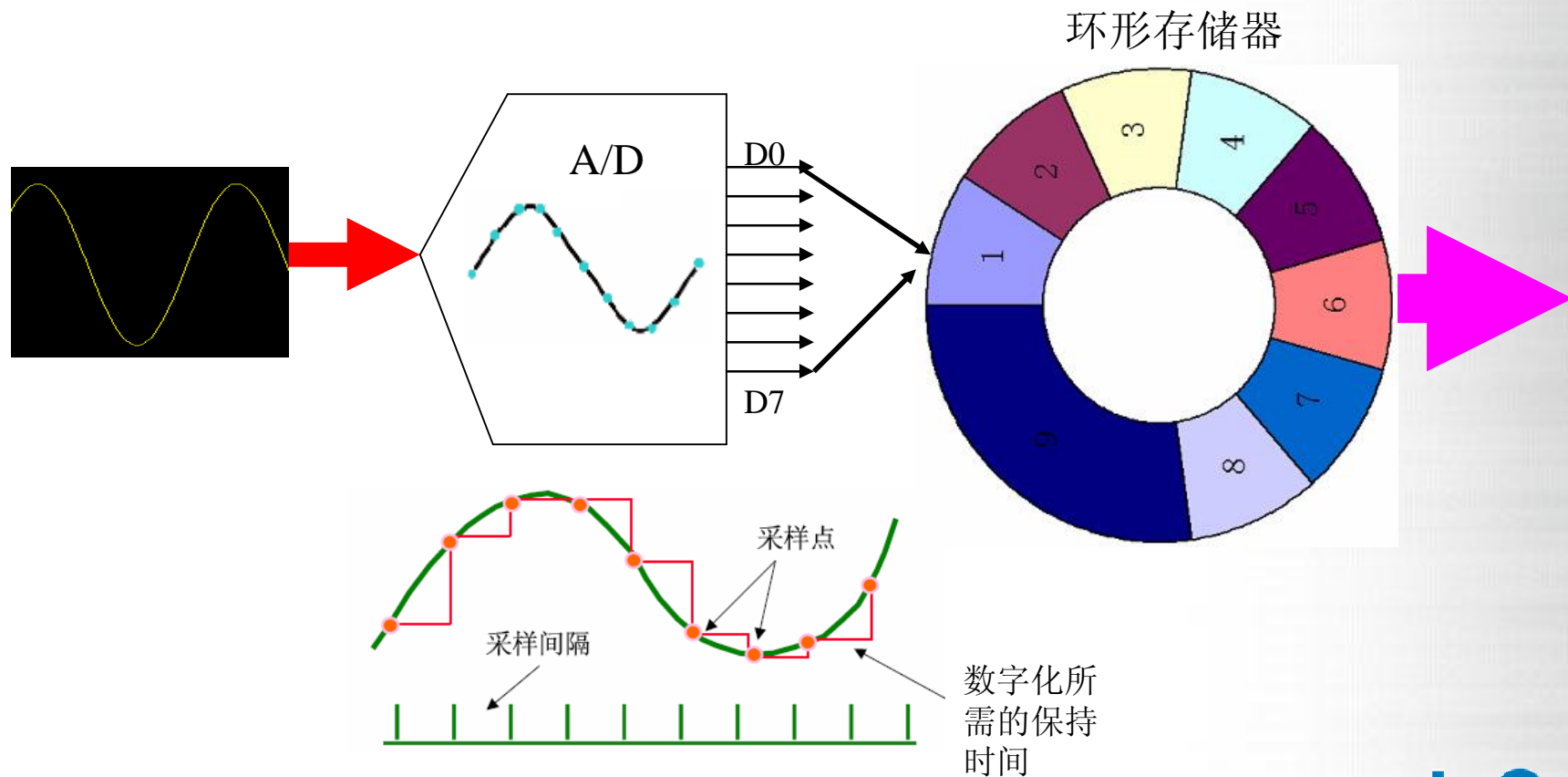
## 数字



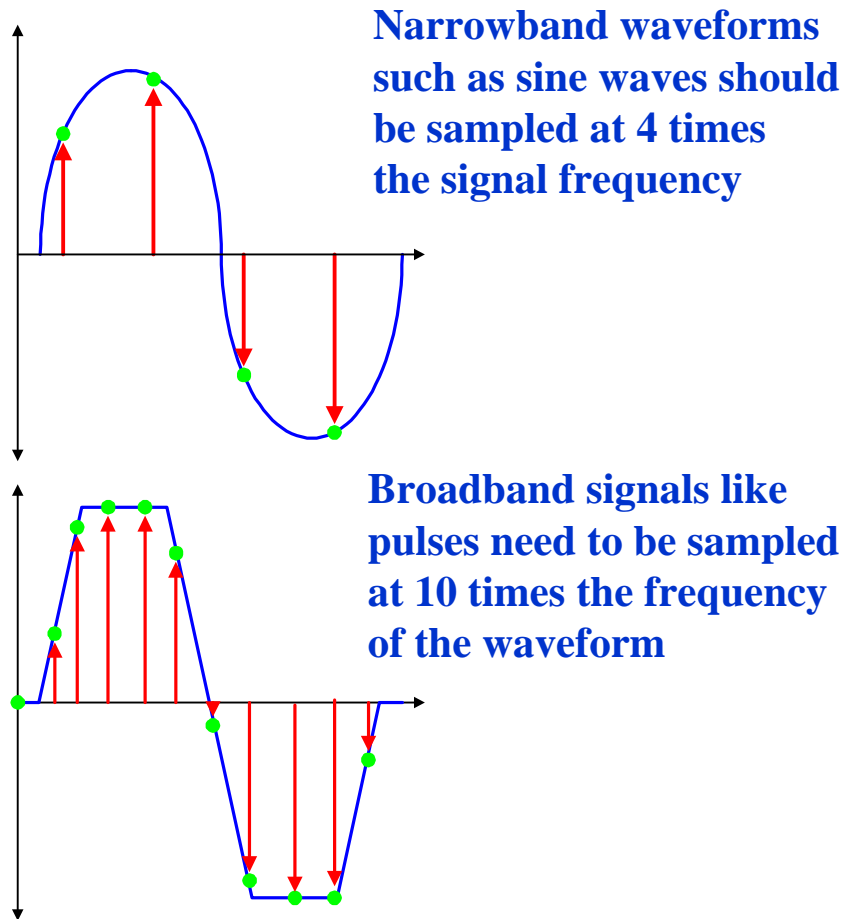
# 采样与存储原理

采样：通过测量等时间间隔波形的电压幅值，并把该电压大小转换为8位二进制代码表示的数字信息。

存储：把采样所得的数字信息依序存储到高速环形存储器里。

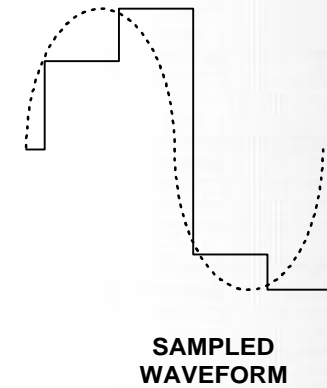
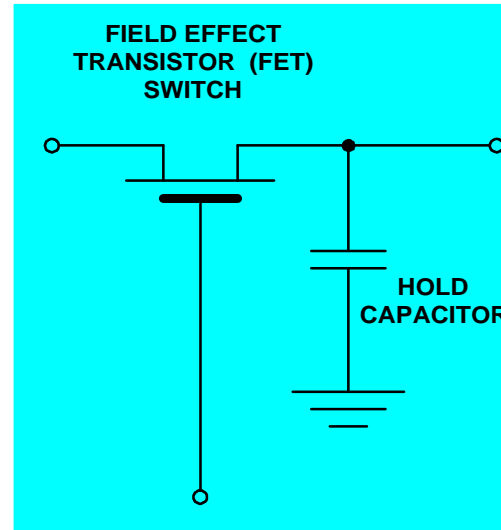
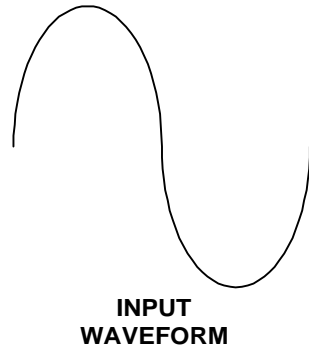


# 奈奎斯特采样基本原理



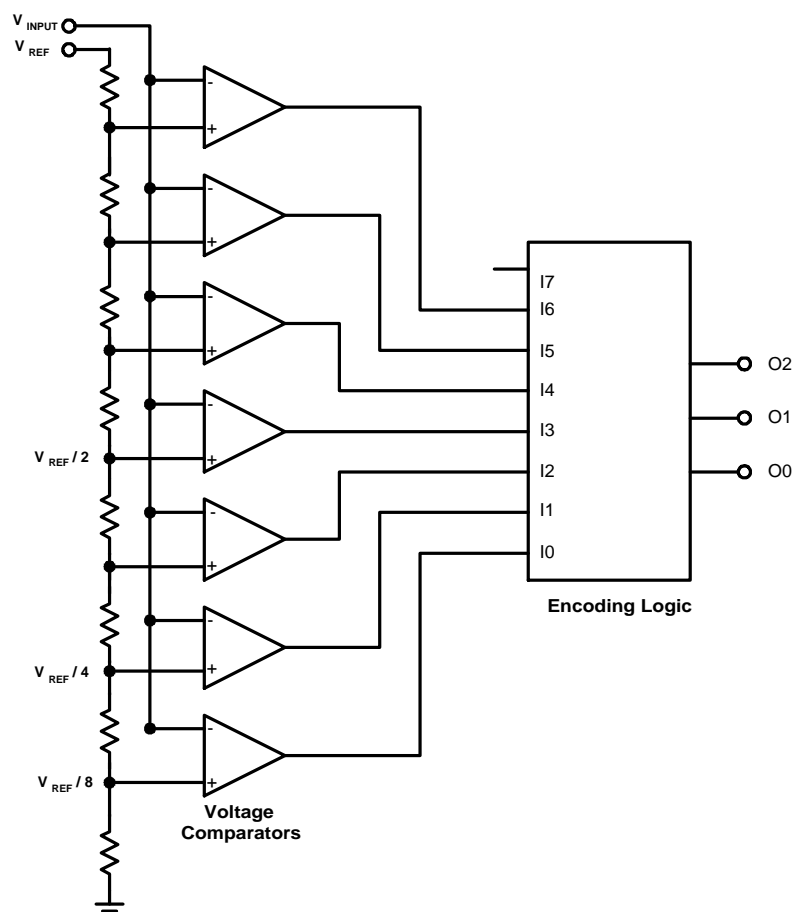
- § 以被测信号的最高频率成分的两倍采样信号确保不会使信号失真.
- § 这个频率被称为奈奎斯特频率
- § 这表明数字化波形中能测到的最高频率是采样率一半 - 这就是理论上的波形的数字带宽
- § 更多的实际测量中限制为采样率的1/4或1/10, 决定于被测波形的特征
- § 过采样确保波形的高保真 - 更多的采样点通常会更好!

# 采样过程



- § 经过放大器的输入波形加到快速电子开关
- § 每个采样周期内开关暂时关闭使保持电容被充电到采样电压值
- § 摸数转换器在下一个周期前将每个采样点的电平转换为一个数字值

# 数字化基础

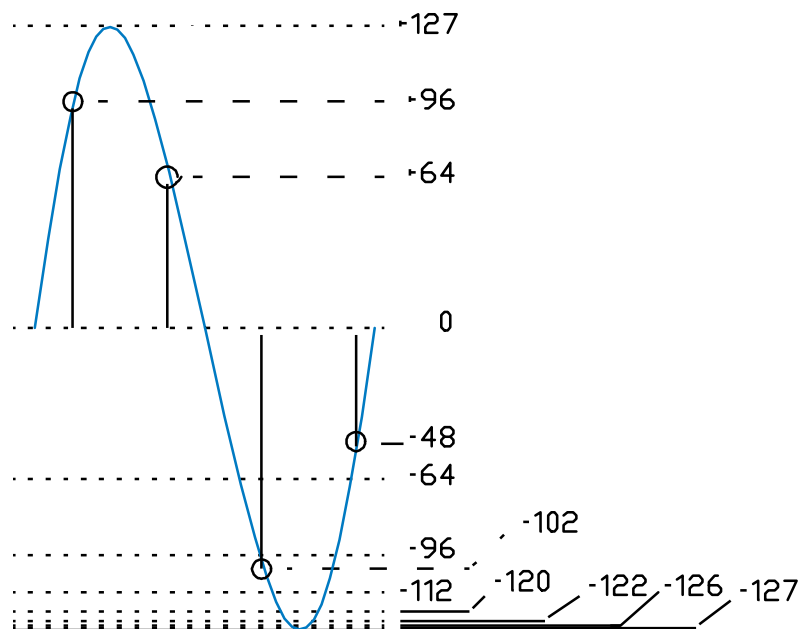


§ 所有的力科示波器都采用了并行的模数转换器(ADC)

§ 垂直精度是8位或者说是1/256

一个3位的ADC表示了数字化的典型工作原理.每个采样值和不用权重的参考值进行比较.比较器的输出解码为带符号的二进制数值

# 数字化基础



Decimal	Signed Binary
+127	11111111
+1	10000001
0	10000000
-1	01111111
-128	00000000

N比特垂直精度的数字化仪将一个模拟电压转换为N比特的数字

§	# Bits	resolution
§	8	255:1
§	N	$(2^n - 1):1$

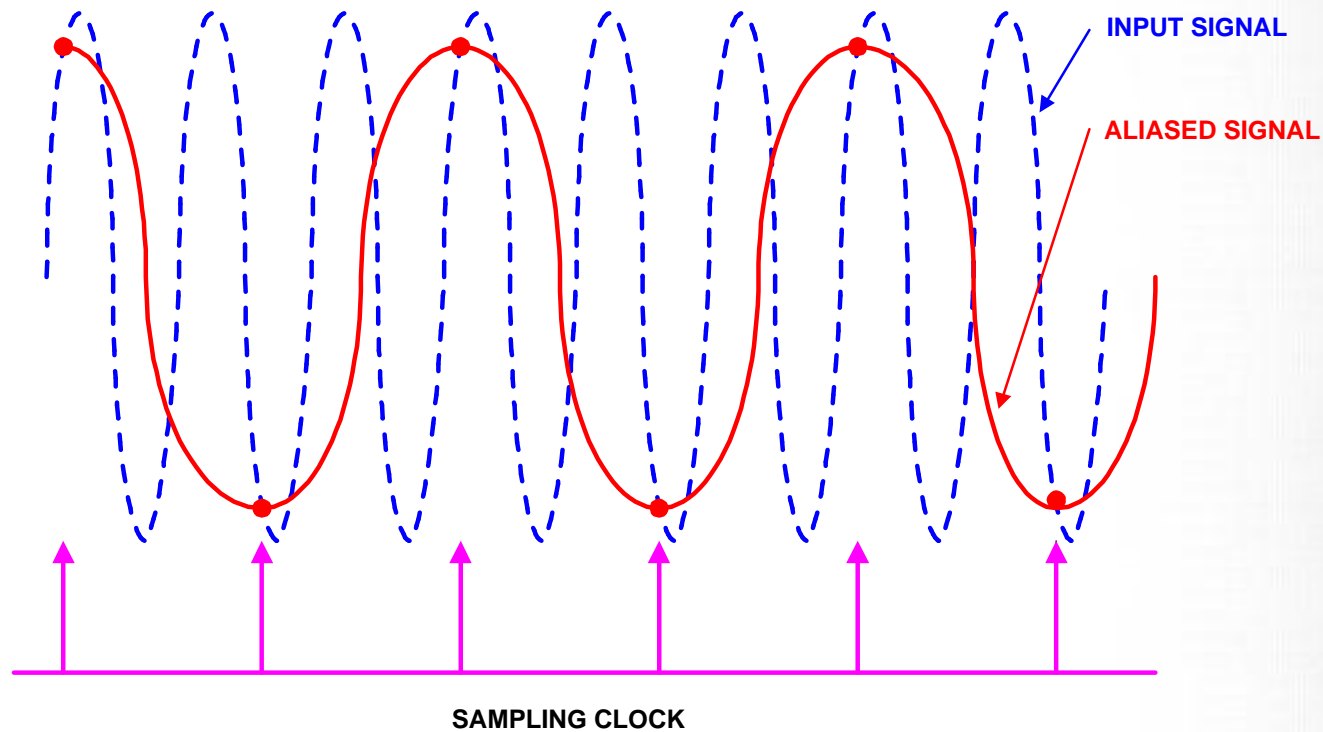
数字化的输出采用带符号的二进制格式

采用带符号的二进制, 屏幕顶部产生的代码是 +127, 屏幕中间是 0, 屏幕底部是 -128

二进制代码根据垂直增益和偏置量化后转换为电压值

数字化的精度可以通过信号处理方式如平均或加强分辨率(数字滤波)的方式增强

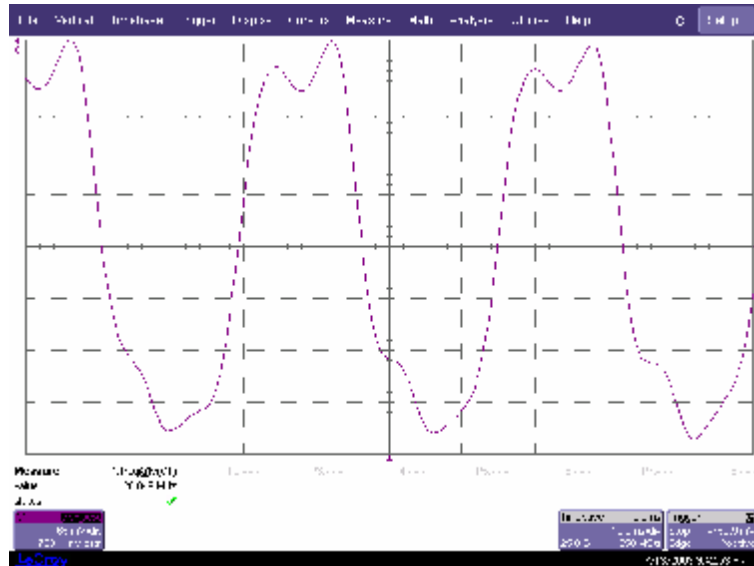
# 采样率太低会导致混叠



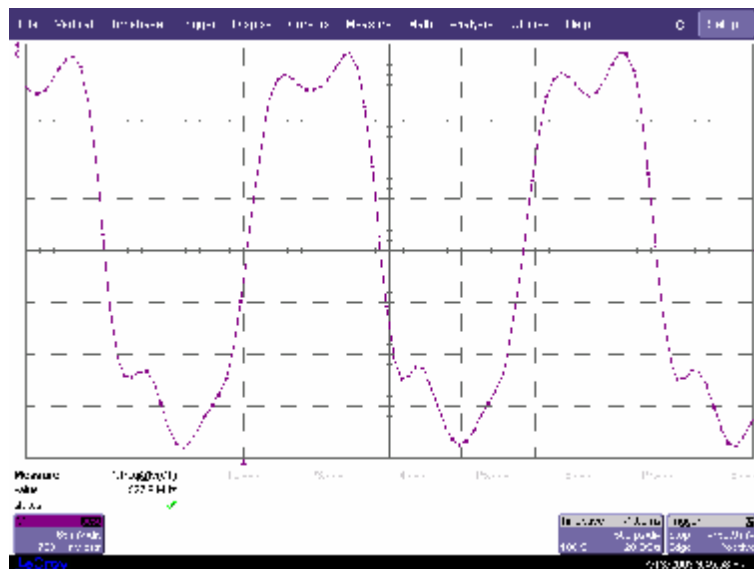
- § 如果一个信号一个周期采样少于两个点，采样出的信号频率低于实际频率。这种现象叫混叠。
- § 混叠信号会出现触发不稳或在水平轴移动。



# 哪个测量结果是正确的？



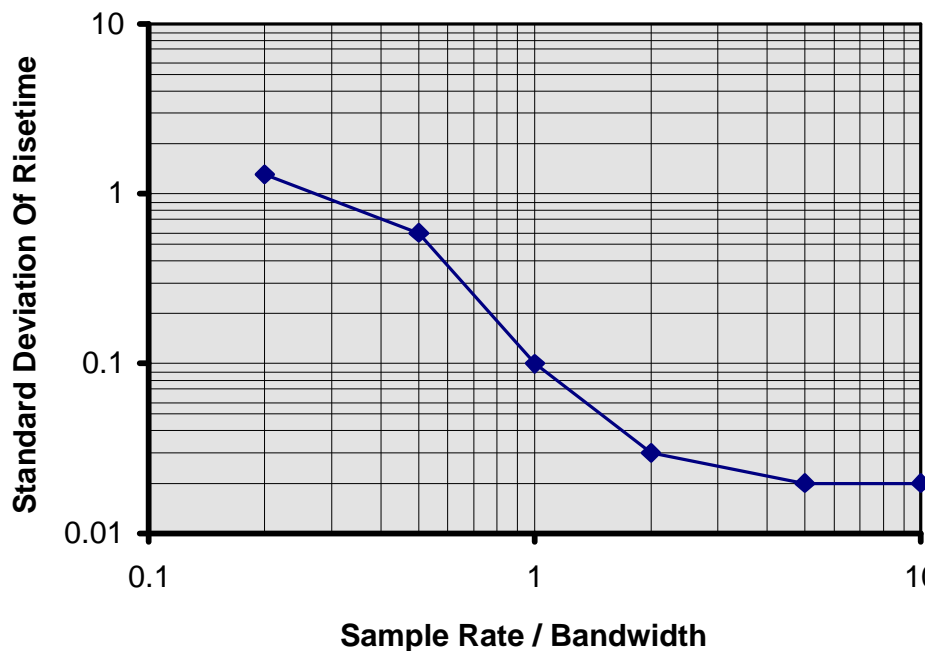
Clock  
Sampled at  
250 MS/s



Clock  
Sampled at  
20 GS/s

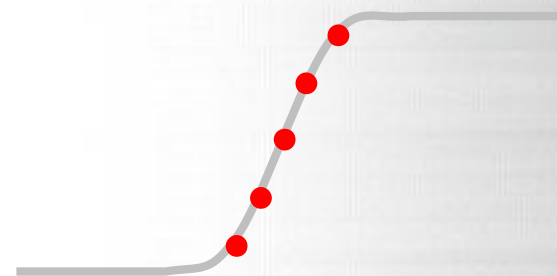
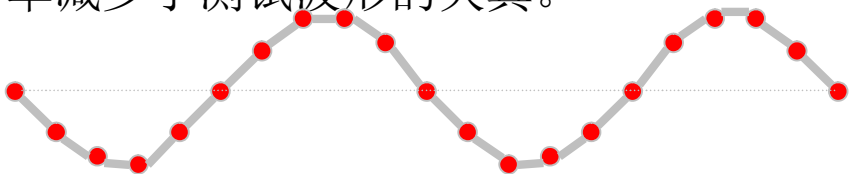
- § 这两个波形看起来是一致的，但测量出的频率却大不相同
- § 判断波形失真的线索：
  - § 上一个波形没有和触发点相对齐。
  - § 上一个波形测出的频率近似为下面波形的频率减去两倍采样率
- § 经验：Always keep an eye on the sampling rate!

# 为什么需用高采样？



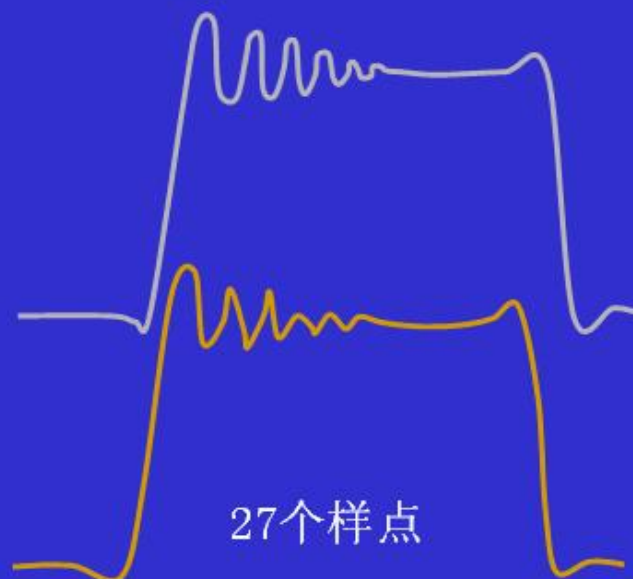
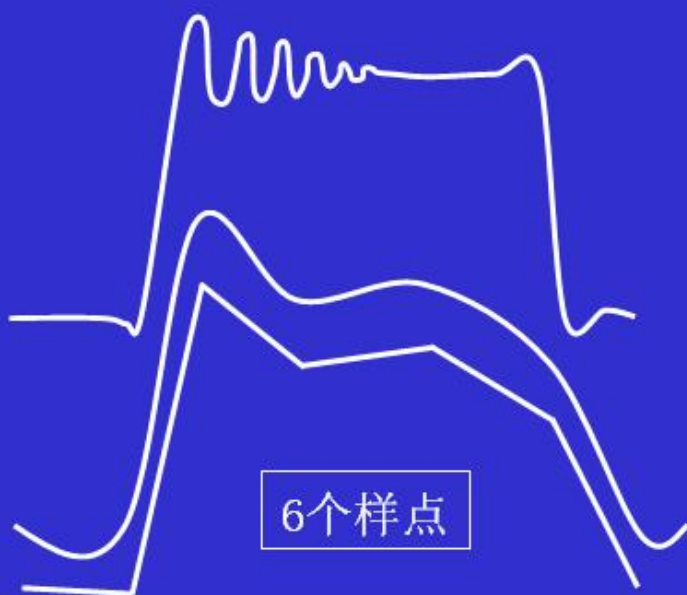
Sample Rate	Time/Point	Sample Rate / Bandwidth	Average Rise Time	Stand Devia
200 MS/s	5 ns	0.2	4.7 ns	1.3
500 MS/s	2 ns	0.5	2.3 ns	0.61
1 GS/s	1 ns	1.0	1.6 ns	0.1
2 GS/s	0.5 ns	2.0	1.27 ns	0.03
5 GS/s	0.2 ns	5.0	1.16 ns	0.02
10 GS/s	0.1 ns	10.0	1.15 ns	0.02

- § 超过带宽5倍以上的采样率可保证好的测量精度
- § 测试脉冲波, 需在上升沿采样大于5个点
- § 高采样率减少了测试波形的失真。



## 取样速率的影响

- 取样速率决定捕获信号的时间分辨率。
  - 时间分辨率越高，可以查看的波形细节越多，但可以捕获的时间窗口会下降。



# 存储深度

示波器通过采样把模拟信号变换为数字信号，每一个采样点用八位的二进制数表示，即一个字节。

示波器显示窗口一次性可显示的最大波形采样点数即为示波器的存储深度；也可理解为一个波形记录的最大采样点数。

在存储深度一定的情况下，存储速度越快，存储时间就越短，他们之间是一个反比关系。存储速度等效于采样率，存储时间等效于采样时间，采样时间由示波器的显示窗口所代表的时间决定，所以

$$\text{存储深度} = \text{采样率} \times \text{采样时间} \quad (\text{距离} = \text{速度} \times \text{时间})$$

提高示波器的存储深度可以间接提高示波器的采样率：当要测量较长时间的波形时，由于存储深度是固定的，所以只能降低采样率来达到，但这样势必造成波形质量的下降；如果增大存储深度，则可以以更高的采样率来测量，以获取不失真的波形。

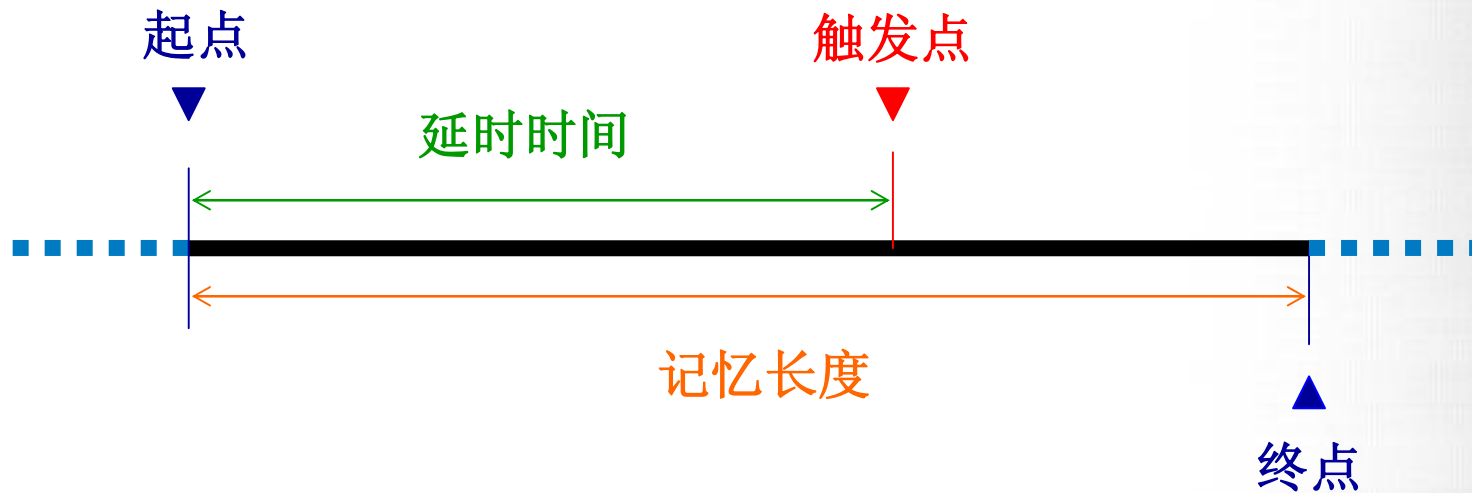
# 波形存储原理

§ 示波器的存储由两个方面来完成：

§ 触发信号和延时的设定确定了示波器存储的起点；

§ 示波器的存储深度决定了数据存储的终点。

§ 记录时间 = 记录长度 / 采样率



# 采样、存储深度及带宽选择实例

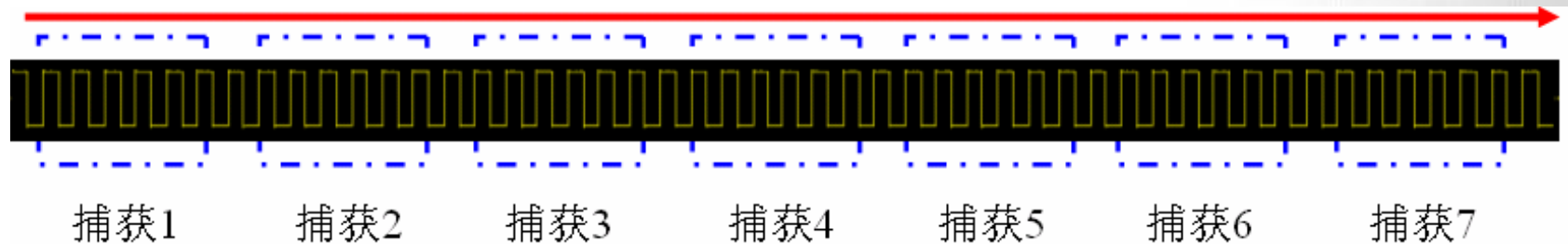
已知条件：希望获取2ms的波形，被测信号为500MHz的差分信号，选择合适的示波器带宽、存储深度和采样率。

- 1 示波器带宽选择为被测信号5-10倍，具体值取6倍，即3GHz；探头带宽最好大于示波器带宽，选择3.5GHz；示波器测量系统带宽为2.28GHz：
- 2 信号周期2ns，上升时间估算为周期的10%，即200ps。要保证波形不失真，上升沿至少有4个采样点，即采样点间距50ps，采样率为20GS/s。
- 3 在20GS/s的采样率下，获取2ms的波形，则所需存储深度为：  
存储深度 = 采样率 × 采样时间 = 20GS/s × 2ms = 40M
- 4 根据计算结果，选择和计算结果指标尽量相近的示波器如下：  
**WP7300：3GHz示波器，20GS/s@2Ch；10GS/s@4Ch；48Mpts@2Ch，24M@4Ch**

## 波形捕获率和显示刷新率

- § 波形捕获率是指示波器每秒捕获到的波形数量，也就是每秒发生的总的触发数量。
- § 显示刷新率是指每秒钟将捕获到的波形写进显示存储器并显示的总次数。

波形捕获率不等于显示刷新率，通常情况下波形捕获量快于显示刷新率如下图所示示波器捕获到很多组数据，但是能够显示到示波器屏幕上的可能只有其中的几组。



# Any Questions

---





# 感谢您的参与

美国力科公司上海代表处

胡为东

[derek.hu@lecroy.com](mailto:derek.hu@lecroy.com)

**021-52400999**

**13818263752**

上海市长宁区江苏路369号兆丰世贸大厦23楼I座

**LeCroy**