

电子测量原理

第7章 信号波形测量

- 7.1 概述
- 7.2 CRT显示原理
- 7.3 通用示波器
- 7.4 取样示波器
- 7.5 波形存储及显示技术
- 7.6 示波器的基本测试技术

第1页

电子测量原理

7.1 概述

7.1.1 示波器的分类

根据示波器对信号的处理方式的不同可分为模拟、数字两大类：

- ✦ 1 模拟示波器
——采用模拟方式对时间信号进行处理和显示。
- ✦ 2 数字示波器
——对信号进行数字化处理后再显示。

第2页

电子测量原理

1 模拟示波器

- ◆ 模拟示波器可分为通用示波器、多束示波器、取样示波器、记忆示波器和专用示波器等。
- ◆ 通用示波器采用单束示波管，又可分为单踪、双踪、多踪示波器。
- ◆ 多束示波器采用多束示波管，荧光屏上显示的每个波形都由单独的电子束扫描产生。
- ◆ 取样示波器可以用较低频率的示波器测量高频信号。

第3页

电子测量原理

2 数字示波器

- ◆ 数字示波器将输入信号数字化（时域取样和幅度量化）后，经由D/A转换器再重建波形。
- ◆ 数字示波器具有记忆、存贮被观察信号功能，又称为数字存贮示波器。

第4页

电子测量原理

7.1.2 主要技术指标

1. 频带宽度BW和上升时间 t_r

示波器的频带宽度BW一般指Y通道的频带宽度。

上升时间 t_r 是一个与频带宽度BW相关的参数，表示由于示波器Y通道的频带宽度的限制，反映了示波器Y通道跟随输入信号快速变化的能力。

频带宽度BW与上升时间 t_r 的关系可近似表示为

$$t_r[\mu s] \approx \frac{0.35}{BW[MHz]}, \text{ 或 } t_r[ns] \approx \frac{0.35}{BW[MHz]} \times 10^3$$

第5页

电子测量原理

7.1.2 主要技术指标

2. 扫描速度

扫描速度是指荧光屏上单位时间内光点水平移动的距离，单位为“cm/s”。

荧光屏上通常用间隔1cm的坐标线作为刻度线，因此扫描速度的单位也可表示为“div/s”。

扫描速度的倒数称为“时基因素”，它表示单位距离代表的时间，单位为“t/cm”或“t/div”，时间t可为 μs 、ms或s，在示波器的面板上，通常按“1、2、5”的顺序分成很多档。

第6页

电子测量原理

7.1.2 主要技术指标

◆ 3. 偏转因素

偏转因素指在输入信号作用下，光点在荧光屏上的垂直（Y）方向移动1cm（即1格）所需的电压值，单位为“V/cm”、“mV/cm”（或“V/div”、“mV/div”）。

偏转因素表示了示波器Y通道的放大/衰减能力。偏转因素的倒数称为“（偏转）灵敏度”。

第7页

电子测量原理

7.1.2 主要技术指标

◆ 4. 输入阻抗

当被测信号接入示波器时，输入阻抗 Z_i 形成被测信号的等效负载。输入直流信号：通常为1M欧

◆ 5. 输入方式

即输入耦合方式，一般有直流（DC）、交流（AC）和接地（GND）三种，可通过示波器面板选择。

◆ 6. 触发源选择方式

触发源是指用于提供产生扫描电压的同步信号来源，一般有内触发（INT）、外触发（EXT）、电源触发（LINE）三种。

第8页

电子测量原理

7.2 CRT显示原理

7.2.1 CRT

CRT主要由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成，基本结构如下图所示。

第9页

电子测量原理

1 电子枪

◆ 电子枪的作用是发射电子并形成很细的高速电子束，它由灯丝F、阴极K、栅极 G_1 和 G_2 和阳极 A_1 、 A_2 组成。

◆ 通过调节 G_1 对K的负电位可控制电子束的强弱，从而调节光点的亮度，即进行“辉度”控制。

◆ 调节 A_1 的电位器称为“聚焦”旋钮，通过对它进行调节可调节 G_2 与 A_1 和 A_1 与 A_2 之间的电位；调节 A_2 电位的旋钮称为“辅助聚焦”。

第10页

电子测量原理

1 电子枪

◆ 电子束聚焦的原理是，电子从阴极K发射，经 G_1 、 G_2 、 A_1 、 A_2 聚焦和加速后进入偏转系统。

◆ 电子在电子枪中的运动轨迹如下图所示。

第11页

电子测量原理

2 偏转系统

◆ 示波管的偏转系统由两对相互垂直的平行金属板组成，分别称为垂直偏转板和水平偏转板。

◆ 当有外加电压作用时，偏转板之间形成电场；在偏转电场作用下，电子束打向由X、Y偏转板共同决定的荧光屏上的某个坐标位置。

◆ 为了示波器有较高的测量灵敏度，Y偏转板置于靠近电子枪的部位，而X偏转板在Y的右边。

第12页

电子测量原理

2 偏转系统

◆ 电子束在偏转电场作用下的偏转距离与外加偏转电压成正比:

$$y = \frac{IS}{2bV_a} V_y$$

1为偏转板的长度; S为偏转板中心到屏幕中心的距离; b为偏转板间距; V_a 为阳极 A_2 上的电压。

◆ 示波管的Y轴偏转灵敏度(单位为cm/V): $S_y = \frac{IS}{2bV_a}$

其倒数为示波管的Y轴偏转因数。偏转灵敏度越大,示波管越灵敏。

第13页

电子测量原理

3 荧光屏

◆ 荧光屏将电信号变为光信号,是示波管的波形显示部分。

◆ 在使用示波器时,应避免电子束长时间的停留在荧光屏的一个位置,否则将使荧光屏受损。因此在示波器开启后不使用的时间内,可将“辉度”调暗。

◆ 当电子束停止轰击荧光屏时,光点仍能保持一定的时间,这种现象称为“余辉效应”。

◆ 余晖效应及人眼的视觉残留-动态图形

第14页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

1. 显示随时间变化的图形

(1) U_x 、 U_y 为固定电压时,有下面四种情况:

(a) $U_x=0$ 、 $U_y=0$ 光点出现在荧光屏的中心位置。

(b) $U_x=0$ 、 U_y =常量 光点仅在垂直方向偏移: U_y 为正电压时,光点从荧光屏的中心往垂直方向向上移; U_y 为负电压时,光点从荧光屏的中心往垂直方向下移。

第15页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

1. 显示随时间变化的图形(续)

(c) U_x =常量、 $U_y=0$ 光点仅在水平方向偏移: U_x 为正电压时,光点从荧光屏的中心往水平方向右移; U_x 为负电压时,光点从荧光屏的中心往水平方向左移。

(d) U_x =常量、 U_y =常量 当两对偏转板上同时加固定的正电压时,光点位置应为两电压的矢量合成。

第16页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

1. 显示随时间变化的图形(续)

(2) X、Y偏转板上分别加变化电压,有下面两种情况:

仅在垂直偏转板的两板间加正弦变化的电压,则光点只在荧光屏的垂直方向来回移动,出现一条垂直线段。

第17页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

1. 显示随时间变化的图形(续)

$U_x=kt$ 锯齿波

仅在水平偏转板的两板间加锯齿电压,则光点只在荧光屏的水平方向来回移动,出现一条水平线段。

第18页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

1. 显示随时间变化的图形 (续)

(3) Y偏转板加正弦波信号电压, X偏转板加锯齿波电压, 荧光屏上将显示出被测信号随时间变化的一个周期的波形曲线。

第19页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

2. 显示任意两个变量之间的关系

示波器两个偏转板上都加正弦电压时显示的图形称为李沙育 (Lissajous) 图形, 这种图形在相位和频率测量中常会用到。

若两信号的初相相同, 且在X、Y方向的偏转距离相同, 在荧光屏上画出一条与水平轴呈45度角的直线。

第20页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

2. 显示任意两个变量之间的关系 (续)

若两信号的初相差90度, 且在X、Y方向的偏转距离相同, 在荧光屏上画出的图形为圆。

李沙育图形
相位和频率测量

第21页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

频率比	0°	45°	90°	180°	270°	360°
1/1	0°	45°	90°	180°	270°	360°
1/2	0°	22°30'	45°	90°	135°	180°
1/3	0°	11°15'	22°30'	45°	67°30'	90°
1/4	0°	22°30'	45°	90°	135°	180°
1/5	0°	15°	30°	60°	90°	120°

图8 李沙育图形

第22页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

3. 扫描的概念

✦ 如果在X偏转板上加一个随时间线性变化的电压, 垂直偏转板不加电压, 那么光点在水平方向的偏移距离为 $x = S_x \cdot kt = h_x t [cm/s]$, 比例系数 S_x 称为示波管的X轴偏转灵敏度 cm/V 。

✦ 光点在锯齿波作用下扫动的过程称为“扫描”, 能实现扫描的锯齿波电压称为扫描电压, 光点自左向右的连续扫动称为“扫描正程”, 自荧光屏的右端迅速返回左端起扫点的过程称为“扫描逆程”。

第23页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

4. 同步的概念

(1) $T_x = nT_y$ (n 为正整数): 荧光屏上将稳定显示 n 个周期的被测信号波形。

如果扫描电压周期 T_x 与被测电压周期 T_y 保持 $T_x = nT_y$ 的关系, 则称扫描电压与被测电压“同步”。

第24页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

4. 同步的概念 (续)

(2) $T_x \neq nT_y$ (n 为正整数), 即不满足同步关系时, 显示的波形不稳定。

$T_x = (5/4)T_y$

用被测信号产生同步的触发信号

第25页

电子测量原理

第26页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

5. 连续扫描和触发扫描

✦ 扫描电压是连续的方式称为连续扫描。

✦ 当欲观测脉冲信号, 尤其是占空比很小的脉冲时, 采用连续扫描存在一些问题: 选择扫描周期等于脉冲重复周期时, 难以看清脉冲波形的细节。

不能观测到脉冲细节

第27页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

5. 连续扫描和触发扫描 (续)

✦ 选择扫描周期等于脉冲底宽时, 观测者不易观察波形(暗淡), 而且扫描的同步很难实现。

脉冲得到展宽, 但波形显示暗, 而且基线太亮 $T = T$

第28页

电子测量原理

7.2.2 波形显示的基本原理

5. 连续扫描和触发扫描 (续)

✦ 触发扫描时, 使扫描脉冲只在被测脉冲到来时才扫描一次; 没有被测脉冲时, 扫描发生器处于等待工作状态。

能较好地观测脉冲

第29页

电子测量原理

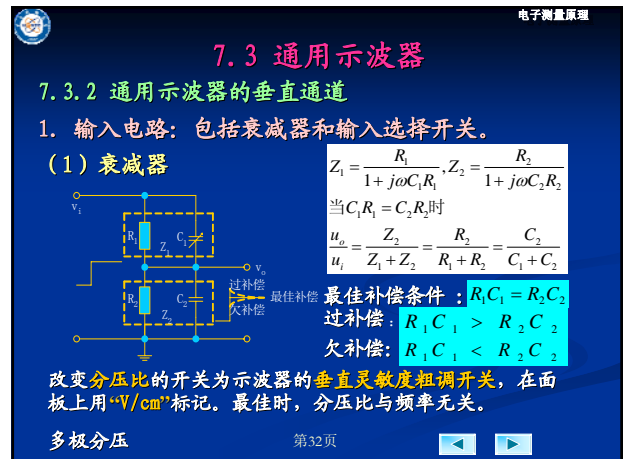
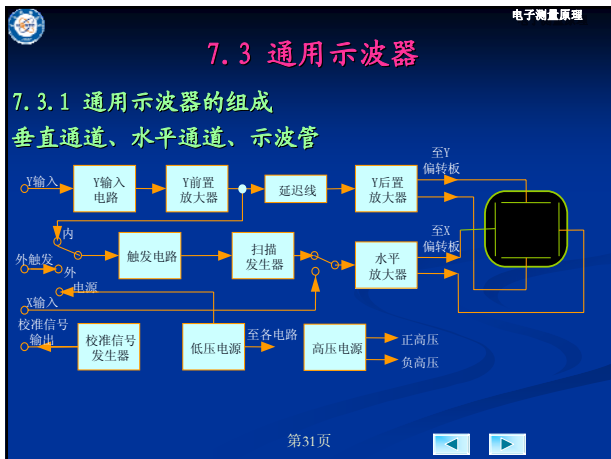
7.2.2 波形显示的基本原理

6. 扫描过程的增辉

为了使回扫产生的波形不在荧光屏上显示, 可以设法在扫描正程期间, 给示波器增辉。降低G1和k级间的压差

若不增辉将产生如图的回扫线

第30页



电子测量原理

7.3 通用示波器

(2) 输入耦合方式

- ✦ 输入耦合方式设有AC、GND、DC三档选择开关。
- ✦ 观察交流信号时，置“AC”档。
- ✦ 确定零电压时，置“GND”档。
- ✦ 观测频率很低的信号或带有直流分量的交流信号时，置“DC”档。

第33页

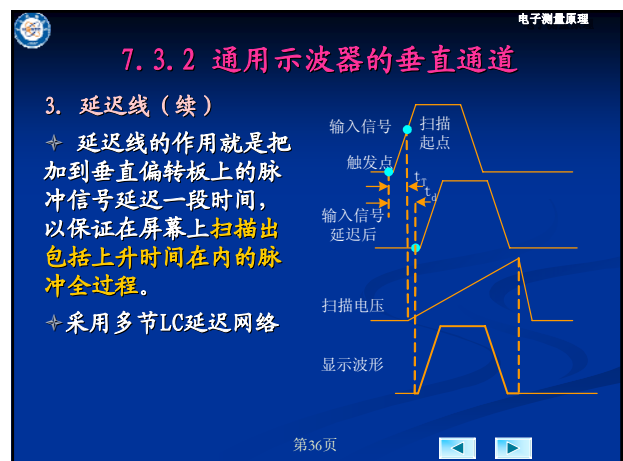
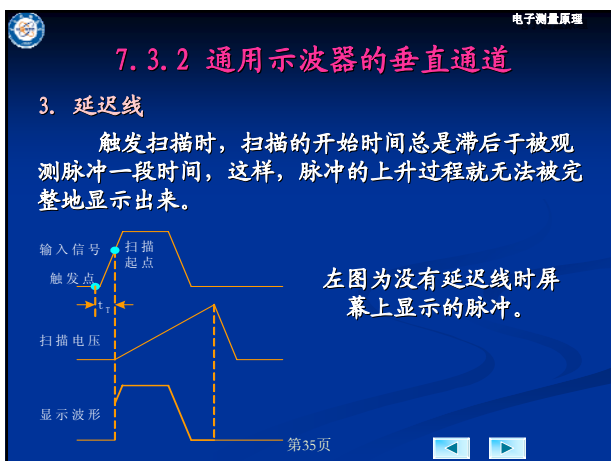
电子测量原理

7.3.2 通用示波器的垂直通道

2. 前置放大器

- ✦ 前置放大器将信号适当放大，从中取出内触发信号，并具有灵敏度微调、校正、Y轴移位、极性反转等控制作用。
- ✦ 若在差分电路的输入端输入不同的直流电位，相应的Y偏转板上的直流电位和波形在Y方向的位置也会改变。
- ✦ 可通过调节“Y轴位移”旋钮，调节直流电位以改变被测波形在屏幕上的位置。

第34页



电子测量原理

7.3.2 通用示波器的垂直通道

4. Y输出放大器

- ✦ Y输出放大器是将延迟线传来的被测信号放大到足够的幅度，用以驱动示波管的垂直偏转系统，使电子束获得Y方向的满偏转。
- ✦ Y输出放大器应具有稳定的增益、较高的输入阻抗、足够宽的频带、较小的谐波失真。
- ✦ Y输出放大器大都采用推挽式放大器，有利于提高共模抑制比。可采用改变负反馈的方法改变放大器的增益（面板上的“×5”或“×10”开关）。

第37页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

水平通道包括触发电路、扫描电路和水平放大器等部分，其主要任务是产生随时间线性变化的扫描电压，再放大到足够的幅度，然后输出到水平偏转板，使光点在荧光屏的水平方向达到满偏转。

第38页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

1. 触发电路

触发电路的作用是为扫描信号发生器提供符合要求的触发脉冲。包括触发源选择、触发耦合方式选择、触发极性选择、触发电平选择和触发放大整形等电路。

第39页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

1. 触发电路（续）

(1) 触发源选择

- ✦ 内触发（INT）：将Y前置放大器输出（延迟线前的被测信号）作为触发信号，适用于观测被测信号。
- ✦ 外触发（EXT）：用外接的、与被测信号有严格同步关系的信号作为触发源，用于比较两个信号的同步关系。
- ✦ 电源触发（LINE）：用50Hz的工频正弦信号作为触发源，适用于观测与50Hz交流有同步关系的信号。

第40页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

1. 触发电路（续）

(2) 触发耦合方式

- ✦ “DC”直流耦合：用于接入直流或缓慢变化的触发信号。
- ✦ “AC”交流耦合：用于观察从低频到较高频率的信号。
- ✦ “AC低频抑制”耦合：用于观察含有低频干扰的信号。
- ✦ “HF REJ”高频抑制耦合：用于观测5MHz以上的高频信号。

第41页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

1. 触发电路（续）

(3) 扫描触发方式选择（TRIG MODE）

- ✦ 常态（NORM）触发方式：指有触发源信号并产生了有效的触发脉冲时，荧光屏上才有扫描线。
- ✦ 自动（AUTO）触发方式：有连续扫描锯齿波电压输出，荧光屏上总能显示扫描线。常用
- ✦ 电视（TV）触发方式：是在原有放大、整形电路基础上插入电视同步分离电路实现的，以便对电视信号（如行、场同步信号）进行监测与电视设备维修。

第42页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

1. 触发电路（续）

（4）触发极性选择和触发电平调节

- ✦ 触发极性和触发电平决定触发脉冲产生的时刻，并决定被显示信号的起始点。
- ✦ **触发极性**是指触发点位于触发源信号的上升沿还是下降沿。
- ✦ **触发电平**是指触发脉冲到来时所对应的触发放大器输出电压的瞬时值。

第43页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

（4）触发极性选择和触发电平调节

(a) 正电平、正极性 (b) 正电平、负极性

(c) 负电平、负极性 (d) 负电平、正极性

第44页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

1. 触发电路（续）

（5）放大整形电路

- ✦ 放大整形电路的作用是对触发信号进行放大、整形，以满足**触发信号**的要求。边沿陡峭，极性、幅度适中
- ✦ 整形电路的基本形式是**电压比较器**，当输入的触发源信号与通过“触发极性”和“触发电平”选择的信号之差达到某一设定值时，比较电路翻转，输出**矩形波**，然后经过**微分整形**，变成触发脉冲。

第45页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环（产生锯齿波）

- ✦ 扫描发生器环又叫**时基电路**，常由积分器、扫描闸门及比较释抑电路组成。

第46页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环（续）

- ✦ 闸门电路产生快速上升或下降的**闸门信号**，闸门信号**启动扫描发生器工作**，产生锯齿波电压，同时把闸门信号送到**增辉电路**，以便在**扫描正程加亮扫描的光迹**。
- ✦ 释抑电路（**封锁闸门**）起到了稳定扫描锯齿波的形成、**防止干扰和误触发的作用**，确保**每次扫描**都在触发源信号的同样的起始电平上开始以获得稳定的图象。

第47页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环（续）

常用的闸门电路有**双稳态、施密特触发器和隧道二极管整形电路**。由触发波形产生闸门矩形波

NE555

第48页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环 (续)

(3) 积分器

密勒 (Miller) 积分器是通用示波器中应用最广的一种积分电路。

$$V_o = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{E}{R} dt = \frac{E}{RC} t, \quad t = 0 \sim \tau$$

第49页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环 (续)

(3) 积分器

- 积分器产生的锯齿波电压被送入X放大器中放大, 再加至水平偏转板。
- 荧光屏上单位长度所代表的时间为示波器的**扫描速度** $S = t/x$ (t/cm), x: 光迹在水平方向偏转的距离; t: 偏转x距离所对应的时间。
- 在示波器中通常改变R或C值作为“扫描速度”粗调, 用改变E值作为“扫描速度”微调。

第50页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环 (续)

(4) 比较和释抑电路

- 在比较电路中, 输入电压(锯齿波)与预置的参考电平进行比较, 当输入电压等于预置的参考电平时, 输出端电位产生跳变, 并把它作为控制信号输出。它决定扫描的终止时刻。
- 释抑电路在扫描逆程开始后, 关闭或抑制扫描闸门, 使“抑制”期间扫描电路不再受到同极性触发脉冲的触发。

第51页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环 (续)

(4) 比较和释抑电路

- 比较和释抑电路与扫描门、积分器构成一个闭合的**扫描发生器环**。
- 扫描门的输入接受三个方面的信号: “稳定度”电位器提供的直流电位; 来自释抑电路的释抑信号; 来自触发电路的触发脉冲。

1) 触发扫描过程:

第52页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环 (续)

(4) 比较和释抑电路

第53页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

2. 扫描发生器环 (续)

(4) 比较和释抑电路

2) 连续扫描。

- 在此扫描方式下, 通过“稳定度”调节, 使闸门电路的静态工作电平高于上触发电平 E_1 , 则不论是否有触发脉冲, 扫描闸门都将输出闸门信号。
- 扫描闸门仍然受比较和释抑电路的控制, 以控制扫描正程的结束。

第54页

电子测量原理

7.3.3 通用示波器的水平通道

3. 水平放大器

- ✦ 其基本作用是选择X轴信号，并将其放大到足以使光点在水平方向达到满偏的程度。
- ✦ X放大器的输入端置于“内”时，X放大器放大扫描信号；置于“外”时，水平放大器放大由面板上X输入端直接输入的信号，李沙育图形。

第55页

电子测量原理

7.3.4 通用示波器的其他电路

1. 高、低压电源
—分别用于示波器的高、中压和直流供电。
2. Z轴的增辉与调辉
—增辉：将闸门信号放大，加到示波管G1上，使显示的波形正程加亮。
—调辉：加外调制信号或时标信号，使屏幕显示的波形发生相应地变化。
3. 校准信号发生器
—可产生幅度和频率准确的基准方波信号，为仪器本身提供校准信号源。

第56页

电子测量原理

7.3.5 示波器的多波形显示

1. 多线示波

- ✦ 利用**多枪**电子管来实现的。
- ✦ 测试时各通道、各波形之间产生的交叉干扰可以减少或消除，可获得较高的测量准确度。

2. 多踪示波

在单线示波的基础上增加了**电子开关**，利用**分时复用**的原理，分别把多个垂直通道的信号轮流接到Y偏转板上，最终实现多个波形的同时显示。

第57页

电子测量原理

7.3.5 示波器的多波形显示

2. 多踪示波

“Y1”通道 (CH1)、“Y2”通道 (CH2) 和叠加方式 (CH1+CH2) 都只显示一个波形。

第58页

电子测量原理

7.3.5 示波器的多波形显示

2. 多踪示波 (续)

交替方式 (ALT)：适合于观察高频信号。

第59页

电子测量原理

7.3.5 示波器的多波形显示

2. 多踪示波 (续)

断续方式 (CHOP)：适用于被测信号频率较低的情况。电子开关于扫描频率不同步

第60页

电子测量原理

7.3.6 双时基扫描显示

双时基示波器有两个独立的触发和扫描电路，特别适用于在观察一个脉冲序列的同时，仔细观察其中一个或部分脉冲的细节。

第61页

电子测量原理

7.3.6 双时基扫描显示

- 为了同时观测脉冲列的全貌及其中某一部分的细节，设立电子开关，把两套扫描电路的输出交替地接入X放大器。这称为**A延迟B**。
- 把A、B扫描门产生的增辉脉冲叠加起来，形成**合成增辉信号**，用它来给A通道增辉，则A通道所显示的脉冲列中，对应B扫描期间的那个脉冲3被加亮，这称为**B加亮A**。
- 包括上两种方式的，被称为**自动双扫描**。

第62页

电子测量原理

7.4 取样示波器

7.4.1 概述

1. 取样的基本概念

- 取样就是从被测波形上取得样点的过程。
- 取样分为实时取样和非实时取样两种。
- 从一个信号波形中取得所有取样点，来表示一个信号波形的方称为**实时取样**。
- 从被测信号的许多相邻波形上取得样点的方法称为非实时取样，或称为**等效取样**。

第63页

电子测量原理

7.4.1 概述

1. 取样的基本概念

实时取样示意图

第64页

电子测量原理

7.4.1 概述

1. 取样的基本概念

非实时取样示意图

第65页

电子测量原理

7.4.1 概述

2. 取样原理

核心电路取样保持器示意图

- 两个取样脉冲的时间间隔为 $T_s = mT + \Delta t$ ，由于波形包络所经历的时间变长了，故可用**低频示波器显示较高频率的信号**。

第66页

电子测量原理

7.4.1 概述

2. 取样原理 (续)

- 步进间隔 Δt 与信号最高频率 f_h 应满足取样定理

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_h}$$

- 非实时采样只适用于周期性信号。
- 顺序进行的取样称为顺序取样；否则称为随机取样。

第67页

电子测量原理

7.4.1 概述

3 显示原理

- 顺序取样示波器中的水平扫描信号为阶梯波电压，阶梯持续时间，阶梯数对应屏幕上显示的不连续的光点数。

第68页

电子测量原理

7.5 数字存储示波器

1. 数字存储示波器的组成原理

第69页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

1. 数字存储示波器的组成原理 (续)

- 当处于存储工作模式时，其工作过程一般分为存储和显示两个阶段。
- 在存储工作阶段，将模拟信号转换成数字化信号，在逻辑控制电路的控制下依次写入到RAM中。
- 在显示工作阶段，将数字信号从存储器中读出转换成模拟信号，经垂直放大器放大加到CRT的Y偏转板。同时，CPU的读地址计数脉冲加至D/A转换器，得到一个阶梯波扫描电压，驱动CRT的X偏转板。

第70页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

2. 数字存储式波器的工作方式

(1) 数字存储器的功能

— 随机存储器RAM包括信号数据存储器、参考波形存储器、测量数据存储器和显示缓冲存储器四种。

(2) 触发工作方式

- 1) 常态触发 — 同模拟示波器基本一样。
- 2) 预置触发 (延迟触发) — 可观测触发点前后不同段落上的波形。

第71页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

3. 数字存储示波器的显示方式

- (1) 存储显示
— 适于一般信号的观测。
- (2) 抹迹显示
— 适于观测一长串波形中在一定条件下才会发生的瞬态信号。
- (3) 卷动显示
— 适于观测缓变信号中随机出现的突发信号。

第72页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

3. 数字存储示波器的显示方式

(4) 放大显示

——适于观测信号波形细节。

(5) X—Y显示

(a) 滚动显示 (b) 放大显示

第73页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

3. 数字存储示波器的显示方式

(6) 显示的内插

- ✦ 插入技术可以解决点显示中视觉错误的问题。
- ✦ 主要有线性插入和曲线插入两种方式。

第74页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

4. 数字存储示波器的特点

- (1) 波形的采样/存储与波形的显示是独立的 因而可以无闪烁地观测极慢变化信号；对于观测极快信号来说，数字存储示波器可采用低速显示。
- (2) 能长时间地保存信号 便于观察单次出现的瞬变信号。
- (3) 先进的触发功能 不仅能显示触发后的信号，而且能显示触发前的信号。

第75页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

4. 数字存储示波器的特点 (续)

- (4) 测量准确度高 采用了晶振和高分辨率A/D转换器。
- (5) 很强的数据处理能力 内含微处理器，能自动实现多种波形参数的测量与显示；还具有自检与自校等多种自动操作功能。
- (6) 外部数据通信接口 可以很方便地将存储的数据送到计算机或其他的外部设备，进行更复杂的数据运算和分析处理。

第76页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

5. 数字存储示波器的主要技术指标

(1) 最高取样速率

- ✦ 指单位时间内**取样的次数**，用每秒钟完成的A/D转换的最高次数来衡量（如20MHz）。
- ✦ 实时取样速率 $f = \frac{N}{t/\text{div}}$ （N为每格的取样数；t/div为扫描一格所用的时间即扫描时间因数）。

(2) 存储带宽(B)

- ✦ 与取样速率密切相关。为了保证波形的分辨率，**存储带宽小于取样速率的4-10倍**。

第77页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

5. 数字存储示波器的主要技术指标 (续)

(3) 分辨率

- ✦ 包括垂直分辨率（**电压分辨率**）和水平分辨率（**时间分辨率**）。
- ✦ 垂直分辨率与A/D转换器的**分辨率**相对应，常以屏幕每格的分级数（级/div）或百分数来表示。
- ✦ 水平分辨率由**存储器的容量**决定，常以屏幕每格含多少个取样点或用百分数来表示。

第78页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

5. 数字存储示波器的主要技术指标 (续)

(4) 存储容量

✦ 由采集存储器 (主存储器) 的最大存储容量来表示。

(5) 读出速度

✦ 读出速度是指将数据从存储器中读出的速度, 常用 (时间)/div 来表示。

第79页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

6. 数字存储示波器的主要部件及要求

(1) 高速A/D转换器

1) 并行比较式ADC

采用直接比较原理, 转换速度快, 有**闪烁式A/D** (Flash A/D) 之称。
8位ad需要255个比较器
几百MHz

第80页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

6. 数字存储示波器的主要部件及要求 (续)

(1) 高速A/D转换器

2) 并串式ADC 8位ad需要30个比较器

第81页

电子测量原理

7.5.2 数字存储示波器

6. 数字存储示波器的主要部件及要求 (续)

(2) 存储器

可将高速采集的数据分路变为低速数据进行存储以降低对存储速度的要求。

第82页

电子测量原理

7.6 示波器的基本测试技术

7.6.1 示波器的选用

- (1) 根据要显示的信号数量, 选择单踪或双踪示波器。
- (2) 根据被测信号的频率特点选择。
- (3) 根据被测信号的重现方式选择 (存储示波器)。
- (4) 根据被测信号是否含有交直流成分选择。
- (5) 根据被测信号的测试重点选择 (双扫描示波器)。

第83页

电子测量原理

7.6.2 示波器的正确使用

3. 通用示波器的面板示意图

- (1) CH₁ (X) 通道1: 垂直输入端。
- (2) CH₂ (Y) 通道2: 垂直输入端。
- (3) VOLTS/DIV 输入衰减器。
- (4) VERT MODE: 垂直方式选择开关 (单踪、叠加)。
- (5) 输入耦合方式: “AC” “DC” “GND”
- (6) SOURCE 触发源选择开关 (内、外、电源)。
- (7) 扫描触发方式 (自动、常态、电视)。
- (8) TIME/DIV 扫描时间选择开关。
- (9) X-Y 方式。

第84页

电子测量原理

7.6.2 示波器的正确使用

3. 通用示波器的面板示意图（续）



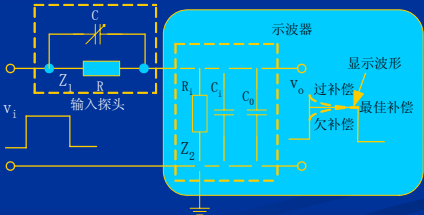
第85页

电子测量原理

7.6.2 示波器的正确使用

4. 探头的正确使用

常见探头为低电容高电阻探头：高频补偿、分压



第86页

电子测量原理

7.6.2 示波器的正确使用

4. 探头的正确使用（续）

- ✦ 低电容探头的应用使输入阻抗大大提高。但是，将使示波器的灵敏度有所下降。
- ✦ 探头和示波器是配套使用的，不能互换，否则将会导致分压比误差增加或高频补偿不当。
- ✦ 低电容高电阻探头的校正方法是以良好的方波电压通过探头加到示波器，微调电容C以达到出现良好的方波。

第87页

电子测量原理

7.6.3 用示波器测量电压

1. 直流电压的测量

(1) 测量原理

利用被测电压在屏幕上呈现的直线偏离时间基线（零电平线）的高度与被测电压的大小成正比的关系进行的。

$$V_{DC} = h \times D_y \times k$$

V_{DC} 为被测直流电压值， h 为被测直流信号线的电压偏离零电平线的高度； D_y 为示波器的垂直灵敏度， k 为探头衰减系数。

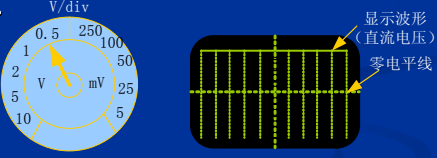
第88页

电子测量原理

7.6.3 用示波器测量电压

1. 直流电压的测量（续）

例7-1 示波器测直流电压及垂直灵敏度开关示意图如图所示， $h=4\text{cm}$ 、 V/cm 、若 $k=10:1$ ，求被测直流电压值。



$$V_{DC} = h \times D_y \times k = 4 \times 0.5 \times 10 = 20 \text{ (V)}$$

第89页

电子测量原理

7.6.3 用示波器测量电压

2. 交流电压的测量

(1) 测量原理

$$V_{P-P} = h \times D_y \times k_y$$

V_{P-P} 为被测交流电压值（峰-峰值）； h 为被测交流电压波峰和波谷的高度或任意两点间的高度； D_y 为示波器的垂直灵敏度； k_y 为探头衰减系数。

(2) 测量方法

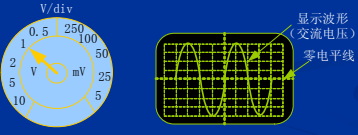
接入待测信号；输入耦合开关置于“AC”；调节扫描速度使波形稳定显示；调节垂直灵敏度开关；读出被测交流电压波峰和波谷的高度；计算被测交流电压的峰-峰值。

第90页

7.6.3 用示波器测量电压

2. 交流电压的测量 (续)

例7-2 示波器正弦电压如图所示, $h=8\text{cm}$ 、 V/cm 、若 $K=1$ ：1, 求被测正弦信号的峰-峰值和有效值。



正弦信号的峰-峰值为 $V_{p-p} = h \times D_y \times k = 8 \times 1 \times 1 = 8\text{V}$

正弦信号的有效值为 $V = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{V_{p-p}}{2\sqrt{2}} = \frac{8}{2\sqrt{2}} = 2.3\text{V}$

第91页

7.6.4 用示波器测量时间和频率

1. 测量周期和频率

(1) 测量原理

✦ 被测交流信号的周期 $T = xD_x / k_x$ (x 为被测交流信号的一个周期在荧光屏水平方向所占距离; D_x 为示波器的扫描速度; k_x 为X轴扩展倍率。

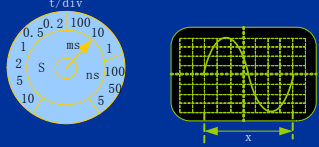
✦ 周期的倒数即为频率。

第92页

7.6.4 用示波器测量时间和频率

1. 测量周期和频率 (续)

例7-3 荧光屏上的波形如图所示, 信号一周周期7cm, 扫描速度开关置于“10ms/cm”位置, 扫描扩展置于“拉出 $\times 10$ ”位置, 求被测信号的周期。



$T = xD_x / k_x = \frac{7 \times 10}{10} = 7\text{ms}$

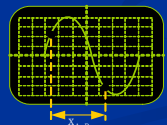
第93页

7.6.4 用示波器测量时间和频率

2. 测量时间间隔

(1) 测量同一信号中任意两点A与B的时间间隔的测量方法如下图。

A与B的时间间隔 $T_{A-B} = x_{A-B} \cdot D_x$ (x_{A-B} 为A与B的时间间隔在荧光屏水平方向所占距离, D_x 为示波器的扫描速度)

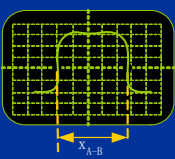


第94页

7.6.4 用示波器测量时间和频率

2. 测量时间间隔 (续)

(2) 若A、B两点分别为脉冲波前后沿的中点, 则所测时间间隔为脉冲宽度, 如下图示。

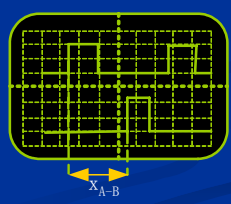


第95页

7.6.4 用示波器测量时间和频率

2. 测量时间间隔 (续)

(3) 采用双踪示波器可测量两个信号的时间差。将B脉冲的起点左移1格, 读出两被测信号起始点时间的水平距离。



第96页

电子测量原理

7.6.5 用示波器测量相位

1. 用双踪示波法测量相位
 - ✦ 将欲测量的两个信号A和B分别接到示波器的两个输入通道。**同频率**
 - ✦ 利用荧光屏上的坐标测出信号的一个周期在水平方向上所占的长度 x_T 。
 - ✦ 再测量两波形上**对应点之间的水平距离** x ，则两信号的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{x}{x_T} \times 360^\circ$$

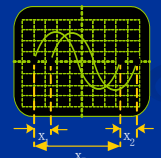
第97页

电子测量原理

7.6.5 用示波器测量相位

1. 用双踪示波法测量相位（续）

用这种方法测相位差时应该注意，只能用其中一个波形去触发另一路信号。



第98页

电子测量原理

7.6.5 用示波器测量相位

2. 用李沙育图形法测量频率或相位
 - (1) 测量频率
 - ✦ 示波器工作于**X-Y方式**下，将频率已知的信号与频率未知的信号加到示波器的两个输入端，调节已知信号的频率，使荧光屏上得到**李沙育图形**，由此可测出被测信号的频率。
 - ✦ N_H 和 N_V 分别为水平线、垂直线与李沙育图形的**交点数**； f_y 、 f_x 分别为示波器Y和X信号的**频率**。李沙育图形存在关系：

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_H}{N_V}$$

第99页

电子测量原理

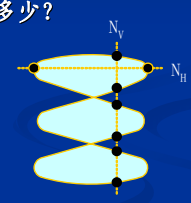
7.6.5 用示波器测量相位

2. 用李沙育图形法测量频率或相位（续）

例7-4 如图所示的李沙育图形，已知X信号频率为6MHz，问Y信号的频率是多少？

$$f_y = f_x \frac{N_H}{N_V} = 6\text{MHz} \times \frac{2}{6} = 2\text{MHz}$$

或

$$f_y = f_x \frac{N_H}{N_V} = 6\text{MHz} \times \frac{1}{3} = 2\text{MHz}$$


第100页

电子测量原理

7.6.5 用示波器测量相位

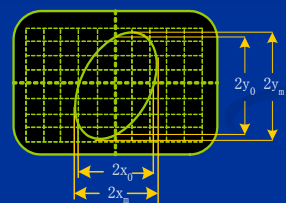
2. 用李沙育图形法测量频率或相位（续）
 - (2) 测量相位差
 - ✦ 把比较相位差的两个频率、同幅度的正弦信号分别送入示波器的Y通道和X通道，使示波器工作在X-Y方式，这时示波器的屏幕上会显示出椭圆波形，
 - ✦ 由椭圆上的坐标可求得两信号的**相位差**为

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{y_0}{y_m} \text{ 或 } \Delta\varphi = \arcsin \frac{x_0}{x_m}$$

第101页

电子测量原理

7.6.5 用示波器测量相位

2. 用李沙育图形法测量频率或相位（续）
 - (2) 测量相位差
 

第102页

电子测量原理

7.7 时域测量技术

- 电子测量的对象可分为**信号特性**和**系统特性**两类
- 同一物理信号和系统特性可以在时间和频率两个域内描述，因此有**时域**和**频域**两种测试方法。
- 频率测量研究的是被测对象的复数频率特性，即信号的**频谱**和系统的**传递函数**。
- 时域测量研究的是被测对象的**幅度-时间特性**，即**信号波形**和系统的**脉冲响应**或**阶跃响应**。

时域中的重复脉冲 频域中的脉冲串频谱

第103页

电子测量原理

7.7.1 信号的时域测量

信号的时域测量是对以**时间**作为**自变量**的**电参量**的测量，即**信号幅度随时间变化的规律**。

1. 脉冲信号参数的时域测试

理想脉冲 实际脉冲

第104页

电子测量原理

(1) 脉冲参数的定义

参数名称	符号	定 义
脉冲幅度	A	脉冲底值和顶值之间的差值。
脉冲的预冲	S_d	$S_d = \frac{d}{A} \times 100\%$
脉冲的上冲（或称前过冲）	S_b	$S_b = \frac{b}{A} \times 100\%$
脉冲的下冲（或称后过冲）	S_f	$S_f = \frac{f}{A} \times 100\%$
衰减振荡（或称阻尼振荡）幅度	S_c	$S_c = \frac{c}{A} \times 100\%$
脉冲平顶倾斜	S_e	$S_e = \frac{e}{A} \times 100\%$
脉冲顶部不平坦度	S_W	$S_W = \frac{A_W}{A} \times 100\%$

与幅度有关的参数

第105页

电子测量原理

与时间有关的脉冲参数的定义

脉冲上升时间（或前过渡时间）	t_r	脉冲幅度由10%上升到90%的一段过渡时间。
脉冲下降时间（或称后过渡时间）	t_f	脉冲幅度由90%下降到10%的一段过渡时间。
脉冲宽度	τ	在脉冲幅度为50%的两点之间的时间。
脉冲周期	T	指一个脉冲波形上的任意一点到相邻脉冲波形上的对应点之间的时间。
脉冲宽度占有率	S_e	$S_e = \frac{\tau}{T} \times 100\%$ ，指脉冲宽度与周期之比。

与时间有关的参数

第106页

电子测量原理

(2) 脉冲参数的测量方法

使用示波器对脉冲波形进行测量，从荧光屏直接读波形刻度，然后再根据公式计算得到各参数值。

1) 测量方法

将被测脉冲直接加到示波器垂直通道Y的输入端，波形的垂直方向表示与幅度有关的参数，水平方向表示与时间有关参数。

- ① 确定出脉冲的顶值和底值（即幅值的100%和0%的基线位置）。
- ② 测量幅度： $A = S_y \times K \times H$
- ③ 其它与幅度有关参数测量：从波形上读出响应的刻度值，再比上幅度的刻度值即可。
- ④ 上升时间测量：确定波形幅度为10%和90%的位置，然后读刻度，再乘以水平扫描时基因素。

第107页

电子测量原理

2. 调幅信号的时域测试

◆ 调幅系数： $m = \frac{\text{调制信号振幅}}{\text{载波信号振幅}} = \frac{E_m}{E_c}$

1) 直线扫描法：

加到示波器Y轴输入端，测出a、b长度，则：

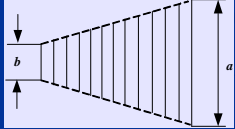
$$m = \frac{a-b}{a+b} \times 100\%$$

第108页

电子测量原理

◆ 2) 梯形图法

示波器工作于X-Y方式，将调幅波、调制信号分别加至示波器X和Y轴输入端，测出 a 、 b 长度计算。




第109页

电子测量原理

7.7.2 线性系统的时域测量

◆ 1. 线性系统的描述

- ① n 阶线性微分方程;
- ② 对微分方程进行拉普拉斯变换，可得到系统的传递函数;
- ③ 给系统输入扫频正弦信号，测量对应输出信号的幅值和相位，可得系统的频率特性;
- ④ 给系统输入单位脉冲信号，得到时域中的脉冲响应函数。



第110页

电子测量原理

• 卷积定理

◆ 对于线性时不变系统，系统的输出 $y(t)$ 等于输入信号 $x(t)$ 与系统脉冲响应 $h(t)$ 的卷积，即

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

脉冲响应——输入单位脉冲信号时对应的系统输出。

阶跃响应——输入单位阶跃信号时对应的系统的输出

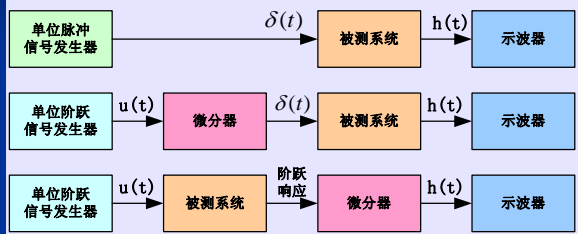
脉冲响应的积分为阶跃响应

阶跃响应的微分就是脉冲响应

第111页

电子测量原理

系统脉冲响应的直接测量方法



第112页