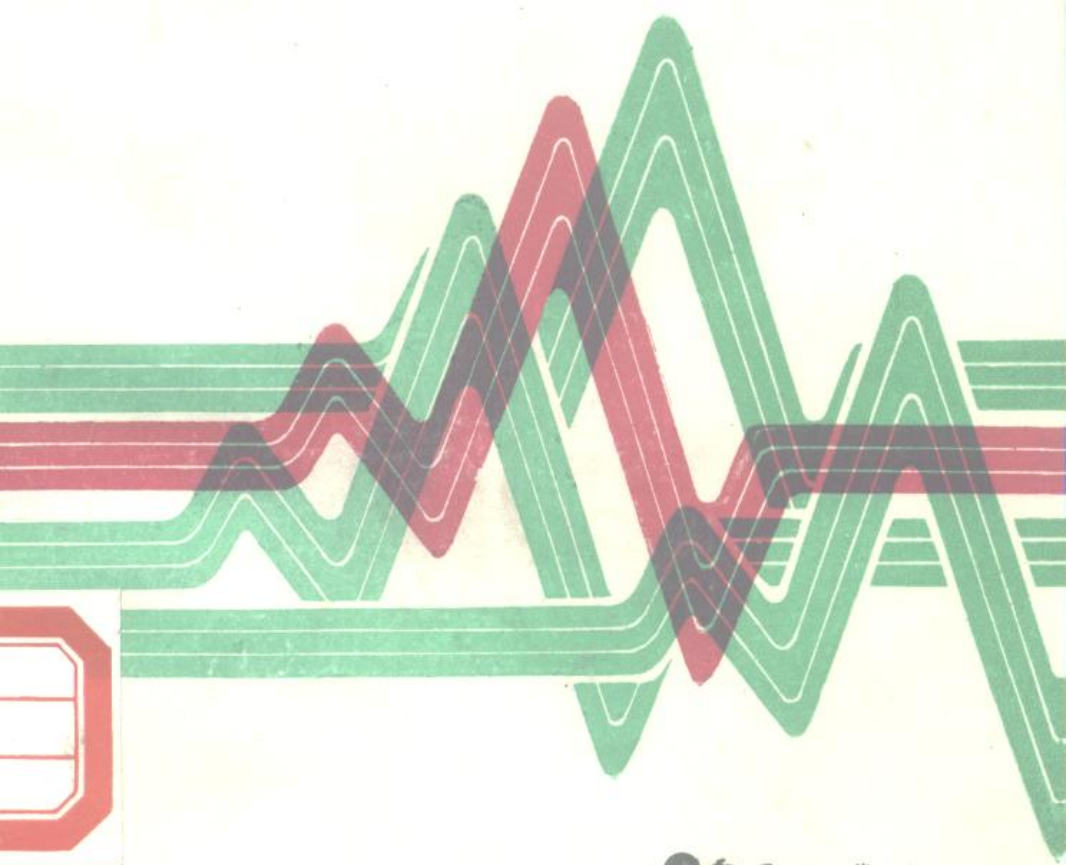


# 现代数字存储 示波器原理与应用

● 李崇德 编著



● 电子工业出版社

79.88  
253

# 现代数字存储示波器 原理与应用

李崇德 编著

---

电子工业出版社

## 内 容 提 要

本书比较全面地介绍了现代数字存储示波器的各种技术问题。

全书包括：基本工作原理；主要技术特性和功能特点；取样定理与有效存储带宽；着重介绍了改善存储带宽的各种取样技术、模/数变换技术和存储波形的显示技术；为了帮助广大专业技术人员应用数字存储示波器，还介绍了应用范围和应用实例；对欲得到数字存储示波器的专业人员提供了选择依据。书后附有典型数字存储示波器的功能和性能。

本书内容新颖，适用广泛，可供从事电量和非电量信号研究的广大读者阅读，也是熟悉传统示波器专业技术人员的必备读物。本书还可供有关专业师生作教学参考。

## 现代数字存储示波器原理与应用

李崇德 编著

责任编辑：魏永昌

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市飞达印刷厂印刷

开本：787×1092毫米1/32 印张：2.875 字数：65千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数：1—8,000册 定价：1.10元

ISBN7-5053-0497-6/TN·178

# 前 言

传统示波器是应用最广泛的常规波形观测工具,但是它难以测量单次或瞬变信号,因而在许多应用中存在着局限性。利用存储示波管存储信号波形的模拟存储示波器(记忆示波器),虽然可以记录和测量单次或瞬变信号,但它的显示面积小,分辨率低,显示和存储时间不长,而且和所有模拟示波器一样不便程控和对波形数据进行数字处理分析。

七十年代随着数字电路,大规模集成电路及微处理器技术的发展,尤其是高速模/数(A/D)变换器及半导体存储器(RAM)的发展,出现了一种新型的数字存储示波器。它是将模拟信号数字化,存储于半导体存储器中,主要用于捕获和存储单次或瞬变信号。这种数字存储示波器由于具有许多独特的优点和功能,所以在电气、电子、机械、材料试验分析、生物医学、国防科研和生产过程等各个科研生产领域中,得到了广泛应用,并成为近年来发展速度最快的新型仪器之一。从发展趋势看,数字存储示波器有可能逐步替代传统模拟示波器。因此,无论是从事电量和非电量信号的研究者,还是已经熟悉传统示波器的广大专业技术人员,都迫切需要了解 and 熟悉现代数字存储示波器。但是,迄今还没有书籍全面介绍它。为了适应这一需要,特撰写了《现代数字存储示波器原理与应用》一书。

本书比较全面地介绍了现代数字存储示波器的各种技术问题。包括基本工作原理,主要技术特性和功能特点,取样

定理与有效存储带宽，着重介绍了改善存储带宽的各种取样技术、模/数变换技术和存储波形的显示技术。为了帮助广大专业技术人员应用数字存储示波器，还介绍了应用范围与应用实例，对欲得到数字存储示波器的专业人员提供了选择依据，并在书后附有典型数字存储示波器功能、性能说明。

在写作本书时，得到了刘凤卯高级工程师的帮助和指导，张顺义、李勋民、项惠芳的关怀和大力支持。任公瑾在审阅本书内容时提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有缺点和错误之处，殷切希望广大读者不吝指正。

作者

一九八七年十二月

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 一、概述 .....           | 1  |
| 二、基本工作原理 .....       | 13 |
| 三、主要技术特性 .....       | 17 |
| 1. 最高数字化速率 .....     | 17 |
| 2. 记录速度 .....        | 18 |
| 3. 测量分辨率 .....       | 18 |
| 4. 存储容量 .....        | 22 |
| 5. 动态范围 .....        | 23 |
| 6. 存储带宽 .....        | 24 |
| 四、取样定理与有效存储带宽 .....  | 25 |
| 五、存储带宽改善技术 .....     | 30 |
| 1. 取样技术 .....        | 30 |
| 2. 内插显示技术 .....      | 33 |
| 3. 模/数变换技术 .....     | 37 |
| 六、功能特点 .....         | 43 |
| 1. 预触发观察 .....       | 43 |
| 2. 多波形存储显示的比较 .....  | 45 |
| 3. 扩展显示与延迟扩展 .....   | 46 |
| 4. 利用波形数据的处理分析 ..... | 47 |
| 5. 峰值检测 .....        | 48 |
| 6. 滚动显示 .....        | 49 |
| 七、应用范围 .....         | 51 |
| 1. 电气工程 .....        | 51 |
| 2. 机械工程 .....        | 52 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 3. 材料试验分析 .....           | 52 |
| 4. 生物医学 .....             | 53 |
| 5. 电子工程 .....             | 54 |
| 6. 国防科研 .....             | 54 |
| 7. 生产过程 .....             | 56 |
| 8. 其它方面 .....             | 56 |
| 八、应用实例 .....              | 57 |
| 九、数字存储示波器的选择依据 .....      | 64 |
| 附录1 分辨率表达表 .....          | 69 |
| 附录2 典型数字存储示波器的功能和性能 ..... | 70 |
| 结束语 .....                 | 79 |
| 主要参考文献 .....              | 80 |

## 一、概 述

模拟示波器（指传统通用示波器）长期以来一直是波形测量的主要工具，它能把抽象的各种电信号和非电量信号（通过各种传感器）直观地显示在示波管屏幕上，以便对电信号进行精确的定性和定量分析。这种示波器通常由垂直偏转系统（主要包括垂直放大）、水平偏转系统（主要包括扫描和水平放大）和显示电路等部分组成。

其基本方框图如图1所示。

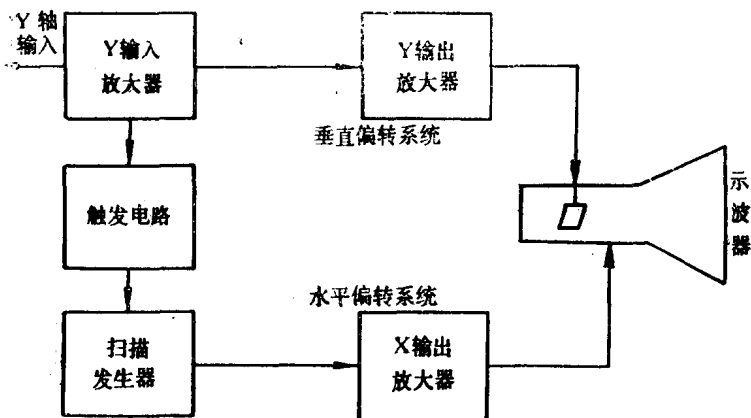


图1 传统示波器基本方框图

当被测信号通过Y轴输入放大器送至Y偏转板，由时基电路产生的电压扫描信号经X轴放大器送至X偏转板时，在触发电路的控制下，能够在示波管的屏幕上稳定地显示出被测信号的波形。

但是，这个基本系统存在的问题是，在慢扫描的情况下，由于磷化物材料的短余辉特性会引起显示的图形发生闪烁光点，而快速的单次信号将过快地扫过屏幕，也难以对被测波形进行分析。所以说，传统模拟示波器只能用于观察和分析重复的周期性信号，对于慢速信号，单次或偶尔重复出现的高速信号，是难以观察和分析的。即使用同步照相方法摄取单次信号，使用起来也很不方便。采用长余辉磷化物材料来改善示波管的余辉时间，这种小小的改进对许多应用来说还是不够的，所以才不得不考虑研制存储示波器。

存储示波器是在传统示波器设计方法的基础上发展起来的，是传统示波器功能的扩展和补充。按照存储方法和原理，存储示波器可分为两类：第一类是CRT（阴极射线管）模拟存储示波器（也称记忆示波器），第二类是数字存储示波器。这一类示波器从广义上说，亦可称为数字示波器。它具有微处理器控制，在屏幕显示波形的同时能够用数字显示各种设定值和测量结果，对波形数据还能进行各种运算处理和分析。并具有程控和遥控能力，通过GB-IB接口还可将数据传输到计算机等外部设备进行分析处理。

### CRT模拟存储示波器

CRT模拟存储示波器是利用特殊的示波管（记忆示波管）存储信号波形的，它的功能主要在于处理模拟信号。这种示波器存储显示信号的基本原理是利用二次电子发射保留屏幕上已显示波形的，它是将正在显示的波形，直接存储于CRT荧光屏内，或将波形存储在屏幕内的一个网栅上，也可先存储在屏幕内的一个网栅上，然后再转移到另一个网栅上去。

CRT模拟存储示波器主要有三种基本存储方式，它们是：双稳态存储方式、可变余辉存储方式和作为前两种方式配合使用的快速转移存储方式。

在一个典型的双稳态CRT存储器中（见图2(a)），存储过程有两个稳定状态，当写入电子枪产生的高能电子束，轰击示波管屏幕内表面沉积的特别透明金属镀层（存储媒介）时，将形成电荷图形。然后，用读出电子枪（泛射电子枪）产生的连续低速电子流，向屏幕发射低能电子云，使屏幕显示所记录的波形。设计时控制这些低能电子云的能量，使得屏幕上只有原来产生正电荷图形的部分能发出可见荧光，而低能电子云的能量又不足以使屏幕上其它部分磷光膜发光。

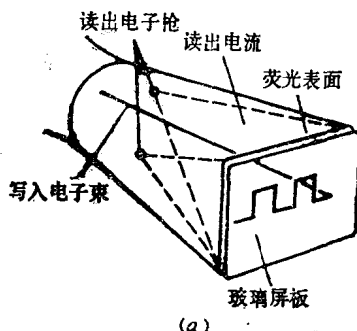


图2a 双稳态存储CRT。其存储媒介是特制的荧光表面。

双稳态存储方式形成的存储波形可持续数小时或者更长，最适合于存储频率50Hz以下的信号，但它的存储波形对比度差。应用范围包括，对精密换能器的测量、对交流电动机使用中半导体开关元件导通情况的观察、对继电器工作特性的观察和对语音衰减的分析等。

可变余辉存储方式的波形存储原理与双稳态存储方式十

分相似，它采用了靠近CRT荧光屏的两种类型的特制网栅（见图2(b)）。收集网栅的作用是将读出电子枪的电子推向存储靶，并从存储靶那里收集二次发射电子。存储靶紧靠荧光屏，靶层由绝缘度很高的材料构成，以便长期保存电荷图形。写入电子束就把信号信息存储在该靶层上，由于二次电子的发射，靶层上形成电荷图形的部分比靶的其余部分电位高，它允许泛射枪低速电子流穿过靶栅，并在高压加速下打在荧光屏上，显示出原来写入信号的轨迹，而其它低电位部分就没有低速电子流通过。

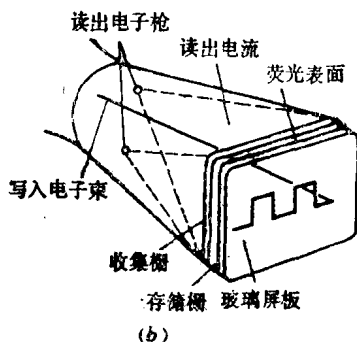


图2b 可变余辉存储CRT。它采用特制的网栅，以存储信号。  
这种CRT对抑制闪烁及随机信号噪声特别有用。

在采用可变余辉存储方式时，读出电子枪用连续低速电子流覆盖存储靶，但这些电子在一个波形写入靶之前不会接触荧光屏。由于读出电子没有轰击荧光屏，所以它的存储波形对比度比采用双稳态存储方式要高。这种高对比度的显示，对观察缓慢的周期性的高速信号特别有用。

可变余辉存储方式具有较快的写入速度，它可以进行比

双稳态存储方式更高频率的存储。而且由于可变余辉的综合作用可以抑制闪烁，使得低频测量变得较为容易和精确。可变余辉特性还可以使操作者同时观察同样信号的重复情况，以便测定其幅度或相位的变化。其它的应用范围还包括：对机械设备中可靠性性能的测量和振动的测量、对数据通信和雷达信号的观察、对邻近设备扫迹干扰的测量和对仪器的校准等。

快速转移存储方式是为提高CRT模拟存储示波器的记录速度而研制的。它的波形存储与可变余辉存储方式是一样的，只是在可变余辉存储CRT上附加了第三个存储网栅（见图2(c)）。最靠近电子枪的是收集栅，第二个（中间存储栅）网栅则充当高速靶。在快速存储方式时，首先把波形信息存储于高速靶栅上，然后再把存储信息转移到绝缘性能特别好的双稳靶栅上，以便更好地保存记录波形。

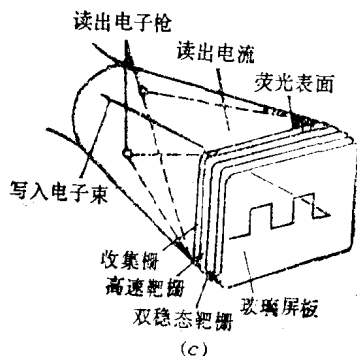


图2c 快速转移存储CRT。它采用三个特制的网栅——一个收集栅、两个存储栅，以获得三种CRT存储方式的最高写入速率。

这种快速转移存储方式，由于综合了上述两种存储方式的优点，所以高速靶栅具有较高的存储记录速度，而双稳靶

栅具有较好的波形保存能力。

由于存储观察时间与存储写入速度成反比，所以很难设计一个转移存储时间快的高速靶和观察时间长的观察靶。要获得最快的速度，必须使高速靶和观察靶均以中间色调方式工作。这样，一旦高速靶的电荷被转移到观察靶，扫迹余辉的持续时间将足够完成一次测量。

一般说来，快速转移存储方式不适用于扫描速度慢于  $100\mu\text{s}/\text{div}$  的信号。鉴于这个原因，采用快速转移存储技术的示波器，同时也提供惯用的双稳态存储方式和可变余辉存储分式。

快速转移存储方式的应用范围包括，寻找开关噪声或开关接点振动之类的故障、对快速逻辑序列的顺序和信号上升时间的检验。除此以外，还可用于那些需要存储具有极高写入速度的其它测试信号，如激光反应和高能研究等。

上面介绍的CRT模拟存储示波器不仅解决了对缓慢出现的信号和单次或偶尔重复出现的高速信号捕捉测量的难题，而且对存储信号具有宽的频率响应，所以，这类仪器在测量中的应用是必不可少的。

### 数字存储示波器

CRT模拟存储示波器虽然适于观察缓慢信号和单次或偶尔重复出现的高速信号，但由于它的屏幕显示面积小，存储波形显示对比度差，信号分辨率低，存储与显示时间不长，而且和所有模拟示波器一样，不便对仪器进行程序控制，数字信息分析和数字运算处理。因而在各种不同的应用中，仍然存在着许多局限性。例如，如何自动地选取示波器

显示的波形，以便更详细地分析波形数据的细节，或者在屏幕上同时显示不同时间发生的几个波形，以便进行波形的比较呢？还有，如何把一个已经存储下来的单次波形中我们最感兴趣的部分加以扩展，以便对其进行更细致的分析呢？上述这些只是人们常常碰到的难题中的几个例子，使用传统示波器或CRT模拟存储示波器都是无法解决的。

自七十年代以来，随着数字电路，大规模集成电路及微处理器技术的迅速发展，尤其是高速模/数（A/D）变换器及半导体存储器（RAM）的发展，出现了一种新型的数字存储示波器。它与CRT模拟存储示波器不同，不是用CRT存储器存储信号波形，而是用A/D变换器把模拟波形转换成数字信号，然后存储于半导体存储器RAM中。当需要时，可将RAM中存储内容调出，通过相应的数/模（D/A）变换器再恢复为模拟波形显示在示波管屏幕上。应用这种数字存储示波器，能够有效地捕获、存储和重现各种慢速信号和单次随机瞬态信号，并能够很容易地解决上述测试中碰到的难题。

数字存储示波器有以下优点，

### 1. 使用简单

数字存储示波器的操作几乎同传统示波器一样。若要转为存储方式，只要按一按钮。如果用CRT模拟存储示波器，则因为存储介质是在示波管显示屏幕后的充电栅网上或直接在荧光屏上，要获得清晰的光迹就必须调整记忆电平、控制辉度等，操作繁琐。与此相比数字存储示波器就简单多了。而且存储波形还可扩展、压缩和移动。

## 2. 信号处理与显示分离

模拟示波器的设计示波管直接影响着示波器的主要指标,而数字存储示波器的示波管只起显示作用,其性能的好坏(包括速度和精度)完全取决于进行信号处理的模/数(A/D)变换器和半导体存储器。在这种示波器中,由于信号的处理与显示是分开的;可以高速捕获,低速显示。采用大屏幕显示光迹明亮清晰;采用彩色显示,可以很好地分辨各种信息;也可用液晶、发光二极管等各种平面显示器件显示,大大减小了仪器的体积。

## 3. 具有多种触发功能

有预触发、后触发、窗口触发和数字组合触发。尤其是预触发,这是数字存储示波器的一个重要特点,因为传统示波器只能观测触发点以后的波形,而在科学研究、工程技术中往往需要观测分析触发点以前的波形,因此利用数字存储示波器的预置触发功能(见图3),可以方便地显示触发点以前不同时刻的波形。这种预触发特性,特别有利于分析故障产生的原因。另外,窗口触发和数字组合触发在数字电路、计算机的调试中十分有用。

## 4. 观察慢速信号时无闪烁现象

慢速信号使用传统示波器观测时光迹存在闪烁现象。在数字存储示波器中,由于存储器的写入和读出是不相关的,写入存储器的时间可以很慢,而从存储器中读出信号是以固定的频率进行的,所以显示时,光迹无闪烁现象。

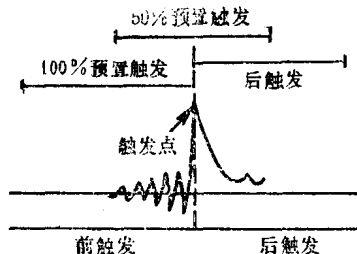


图3 预置触发

## 5. 存储时间无限长

数字存储示波器是将模拟信号经模/数变换器转换成数字信号存储于半导体存储器中，只要仪器不停电存储信号就可长期保持，需要时可随时取出进行显示且质量不会变差。若采用CMOS存储器，则耗电很小，在机内装一电池，即可实现关机后仍能存储信号的功能。

CRT模拟存储示波器是利用特殊的示波管作为存储器件，以电荷的形式存储记录波形，它的存储波形在较短时间内出现模糊和变暗现象，所以波形存储时间和显示时间是有限的。它的存储时间因存储技术不同而异，一般从几十秒至几十分钟，最长也不过数天。另外，数字存储示波器与CRT模拟存储示波器或传统示波器相比较，它的模拟输出还可以用标准笔记录仪作廉价的永久性存储数据硬拷贝。而后者只能使用昂贵的胶片照相作长期保存。

## 6. 多波形比较分析

数字存储示波器能够存储多个波形，并能够在屏幕上同时显示不同时间或相同时间发生的几个波形，因而能够方便

地将已存储下来的波形与更新波形进行比较分析。对于实时/存储示波器,还可将存储波形同实时波形进行对比。

## 7. 多种灵活的显示方式

由于被测信号是多种多样和复杂的,因此需要有多种灵活的显示方式:

### (1) 存储显示

它可稳定、不闪烁地显示所存储的瞬变信号,同时显示的波形还可扩展和移动,便于对瞬变波形进行仔细分析和研究。

### (2) 滚动显示

这是数字存储示波器特有的工作方式,主要用于连续观察低速变化信号和低重复频率信号,并可检测数据流中随机出现的偶发信号

### (3) 自动抹迹

当一个触发脉冲到来,触发存储该瞬变信号并进行显示,其显示观察时间可以控制在给定范围,当观察时间过后再有触发脉冲到来,则又能重新存储新的信号。

## 8. 测量精度高

传统示波器的扫描速度由锯齿波扫描信号决定,而数字存储示波器的扫描速度由取样的时钟间隔和扫线上单位长度所具有的取样点数来决定。由于使用晶振时钟,所以具有很高的测时精度。采用高分辨率的A/D变换器也使幅度测量精度大大提高。另外,现代数字存储示波器普遍采用电压时间光标数字测量,能够减少输入放大器和示波管的线性对精度的