

# 示波器

## 基本操作与测量实例

---

〔荷兰〕R.V. 埃克 著

詹宏英 译 范懋本 校

国防工业出版社

79.88  
477

# 示 波 器

## 基本操作与测量实例

〔荷兰〕 R.V.埃克 著  
詹宏英 译  
范懋本 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书以荷兰飞利浦公司生产的示波器为对象，全面地讲述了示波器的基本工作原理和使用方法，并给出较多的测量实例。

全书共分七章。前四章为基本原理部分，介绍示波器的基本原理、性能及其功能、专用示波器及其变型，以及示波器的探头。后三章为应用部分，着重讨论测量中容易出现的问题、测量实例，以及示波器的技术条件。书后有习题解答、附录和术语汇编。本书内容较新颖，水平较高，反映了现代示波器的原理和测量技术。

本书可供从事生产和科研的电子技术人员、大专院校有关专业师生，以及从事电子测量的工作人员使用和参考。

Oscilloscopes  
Functional Operation and Measuring Examples  
Rien Van Erk  
McGraw-Hill Book Company 1978

### 示波器

#### 基本操作与测量实例

[荷兰] R.V.埃克 著

詹宏英 译

范懋本 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印装

787×1092 1/32 印张10<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 220千字

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷 印数：0, 001—4,080册

ISBN 7-118-00176-7/TM2 定价：3.40元

## 译 者 的 话

示波器是诞生较早的电子测量仪器之一。除了传统的用途之外,近年来,由于示波器的品种及其功能的发展,它的用途也日新月异。

本书的作者是荷兰飞利浦公司 R. V. 埃克。他认为目前示波器的使用者在操作说明书与实际应用之间仍有距离,原作者为缩小这一距离确实作出了贡献。因此,《美国工业导报》第38期称赞原著为工程技术人员的权威性著作。

本书将示波器的基本原理与实际使用密切结合在一起,力图使工作人员以较快速度得到高精度的测量结果。

本书对普通示波器,存储示波器,取样示波器,数字式延迟时基、TTL信号触发方式、逻辑分析仪等,都有通俗易懂而图文并茂的叙述,并对这些仪器的新用途提供了具体的实验方案。译者深信,它将对我国的示波器生产部门及有关技术人员有一定的参考价值。

在翻译过程中,得到北京电子显示仪器厂郑志同志大力协助,对全书提出了不少宝贵意见,还得到南京工学院李潜生副教授的热情指导,在此一并表示感谢。由于译者水平所限,译文中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

## 序 言

现代示波器不仅用于传统的电气和电子测量领域，而且还在更广阔的范围内得到应用，包括那些过去纯粹采用机械方法工作的地方。从事示波器工作的工程技术人员，除了研究新的装置使现代示波器使用起来更简便、更直观之外，还尽了许多努力，使示波器跟上现代化技术水平（从利用近代大规模集成电路使之更加可靠，直至提供能和最新高速电路器件相适应的装置）。

欲能充分利用一个装置，就需要了解各个基本单元，并知道如何成功地运用它们。鉴于示波器已经迅速地被确认为几乎是标准的测试和测量仪器，因此需要了解它并从中取得最佳结果已经成为当务之急。

本书不仅力图帮助电气专业工程师充分利用示波器，同时还为非专业技术人员提供完整的基础知识。例如，机械工程师可以揭示电气测量与机械方法相结合的许多优点；学生们亦可以从中得到关于示波器操作的基础知识。

人们早已写出许多以示波器为主题的书籍和小册子，但是大都或是叙述电子线路组件，或是收集主要电气现象的实验。本书则力图强调示波器的使用，以便让示波器的各种装置得到最佳应用。

书中以示波器的基本功能，特别是阴极射线管作为讨论的开始，接着介绍便于操作者使用的各种附加装置。对于某些应用所需的特殊设计（诸如存储和取样），亦作了详细的说明。探头在示波器与被测装置之间构成一个基本环节。因

此，在这些内容中将探头单独列为一章，是很恰当的。至此就结束了本书对示波器基础部分的讨论。

只研究基础知识是毫无意义的。所以为了指导读者尽量减少测量错误，本书还介绍了测量中容易出现的问题。围绕这些问题，本书提供了一整套实例，以说明如何使示波器在其特性范围内得到最高精度和最大分辨力。当然，这些主要是指电气上的应用，并且还为这些实例便于在教室里重复进行列出了足够的细节。

对于打算购买示波器的用户来说，了解示波器的技术条件是非常重要的。通过第七章对简易示波器和高档示波器技术条件的介绍，这个问题就可以迎刃而解了。

此外，书后附有200多个术语汇编及国际单位制电气单位表，这些对于非专业和专业工程师都能提供更多的帮助。

## 目 录

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 第一章 示波器的基本工作原理 .....           | ( 1 )  |
| 1.1 为什么要使信号显象? .....           | ( 1 )  |
| 1.2 示波管 .....                  | ( 2 )  |
| 1.2.1 电子枪 .....                | ( 4 )  |
| 1.2.2 偏转灵敏度 .....              | ( 4 )  |
| 1.2.3 分段式偏转板 .....             | ( 5 )  |
| 1.2.4 后加速系统 .....              | ( 6 )  |
| 1.2.5 荧光屏 .....                | ( 9 )  |
| 1.2.6 照相记录速度的定义 .....          | ( 10 ) |
| 1.3 触发——如何获得稳定的显示 .....        | ( 12 ) |
| 1.4 示波器的主要控制器及其功能 .....        | ( 14 ) |
| 1.5 习题 .....                   | ( 16 ) |
| 第二章 示波器的其他特性及其功能 .....         | ( 20 ) |
| 2.1 交流和直流输入耦合 .....            | ( 20 ) |
| 2.1.1 交流耦合 .....               | ( 20 ) |
| 2.1.2 零位 .....                 | ( 22 ) |
| 2.2 双踪和双线显示 .....              | ( 22 ) |
| 2.3 断续方式或交替方式的选择 .....         | ( 25 ) |
| 2.3.1 扫速低于10ms/div .....       | ( 25 ) |
| 2.3.2 扫速在10至0.1ms/div范围内 ..... | ( 26 ) |
| 2.3.3 扫速高于0.1ms/div .....      | ( 26 ) |
| 2.4 (A-B) 差分方式 .....           | ( 26 ) |
| 2.5 延迟线: 瞬态过程的观察 .....         | ( 28 ) |
| 2.6 触发源的选择 .....               | ( 32 ) |
| 2.7 触发耦合、电平和极性 .....           | ( 34 ) |

|                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| 2.8 自动触发电平控制和触发灵敏度 .....      | ( 38 )        |
| 2.9 时基电路 .....                | ( 40 )        |
| 2.10 触发方式: 自动和单次 .....        | ( 43 )        |
| 2.11 可变释抑期 .....              | ( 45 )        |
| 2.12 时基扩展器 .....              | ( 47 )        |
| 2.13 延迟时基 .....               | ( 49 )        |
| 2.14 主时基加亮和交替时基 .....         | ( 53 )        |
| 2.15 延迟时基的触发 .....            | ( 55 )        |
| 2.16 组合扫描 .....               | ( 58 )        |
| 2.17 双延迟时基 .....              | ( 59 )        |
| 2.18 习题 .....                 | ( 62 )        |
| <b>第三章 专用示波器 及其 变 型</b> ..... | <b>( 66 )</b> |
| 3.1 存储示波器 .....               | ( 66 )        |
| 3.1.1 存储原理 .....              | ( 66 )        |
| 3.1.2 双稳态示波管 .....            | ( 67 )        |
| 3.1.3 可变余辉示波管的结构 .....        | ( 68 )        |
| 3.1.4 可变余辉管的工作方式 .....        | ( 71 )        |
| 3.1.5 电荷转移存储示波管 .....         | ( 80 )        |
| 3.1.6 测量存储示波管的记录速度 .....      | ( 81 )        |
| 3.2 取样示波器 .....               | ( 83 )        |
| 3.2.1 什么是取样? .....            | ( 83 )        |
| 3.2.2 随机取样和顺序取样 .....         | ( 89 )        |
| 3.2.3 取样示波器的某些细节说明 .....      | ( 90 )        |
| 3.2.4 取样示波器的方框图 .....         | ( 95 )        |
| 3.2.5 取样示波器特有的应用 .....        | ( 97 )        |
| 3.3 专用示波器的各种变型 .....          | ( 105 )       |
| 3.3.1 乘法示波器 .....             | ( 105 )       |
| 3.3.2 TV 信号触发 .....           | ( 110 )       |
| 3.3.3 四通道示波器 .....            | ( 113 )       |
| 3.3.4 数字式延迟时基 .....           | ( 116 )       |



## VII

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 3.3.5 TTL 信号触发 .....                   | (120) |
| 3.3.6 逻辑分析仪 .....                      | (124) |
| 3.3.7 插件式示波器 .....                     | (130) |
| 3.4 习题 .....                           | (133) |
| 第四章 示波器探头 .....                        | (135) |
| 4.1 引言 .....                           | (135) |
| 4.2 无源电压探头 .....                       | (135) |
| 4.3 有源电压探头 (FET 探头) .....              | (145) |
| 4.4 电流探头 .....                         | (150) |
| 4.5 逻辑触发探头 .....                       | (152) |
| 4.6 习题 .....                           | (153) |
| 第五章 测量中容易出现的问题 .....                   | (155) |
| 5.1 引言 .....                           | (155) |
| 5.2 脉冲的定义 .....                        | (155) |
| 5.3 带宽与上升时间 ( $B\tau_r = 0.35$ ) ..... | (158) |
| 5.4 上升时间的计算 .....                      | (161) |
| 5.5 脉冲测量时电缆的终端匹配问题 .....               | (164) |
| 5.6 探头调整错误的后果 .....                    | (169) |
| 5.7 示波器上限频率对测量的影响 .....                | (171) |
| 5.8 脉冲测量的定时误差 .....                    | (174) |
| 5.9 信号中的交流声 .....                      | (179) |
| 5.10 X-Y 测量中的交流、直流输入耦合问题 .....         | (181) |
| 5.11 电视接收机的浮地测量 .....                  | (183) |
| 5.12 习题 .....                          | (185) |
| 第六章 测量实例 .....                         | (187) |
| 6.1 基本实验 .....                         | (187) |
| 6.1.1 直流测量中的负载效应 .....                 | (187) |
| 6.1.2 交流测量中的负载效应 .....                 | (190) |

|                    |                                            |         |
|--------------------|--------------------------------------------|---------|
| 6.1.3              | 用交流和直流耦合输入进行测量.....                        | ( 193 ) |
| 6.1.4              | 精确的相位测量 (双踪) .....                         | ( 197 ) |
| 6.1.5              | 纳秒量级脉冲和上升时间的测量.....                        | ( 203 ) |
| 6.1.6              | 时域反射计 (TDR) .....                          | ( 212 ) |
| 6.1.7              | 调频 (FM) 信号的精确测量 .....                      | ( 216 ) |
| 6.1.8              | 利用组合触发进行精确的时间测量.....                       | ( 221 ) |
| 6.2                | X-Y 测量.....                                | ( 224 ) |
| 6.2.1              | 高保真度放大器的交叉失真.....                          | ( 224 ) |
| 6.2.2              | 调幅 (AM) 信号的调制深度.....                       | ( 226 ) |
| 6.2.3              | 施密特触发器滞后间隙的显示.....                         | ( 230 ) |
| 6.2.4              | 示波器用作晶体管特性图示仪.....                         | ( 233 ) |
| 6.2.5              | X-Y-Y 测量 .....                             | ( 236 ) |
| 6.3                | 乘法器的应用.....                                | ( 238 ) |
| 6.3.1              | 引言.....                                    | ( 238 ) |
| 6.3.2              | 正、负功率的定义: $\text{EICOS} \varphi = 0$ ..... | ( 238 ) |
| 6.3.3              | 开关晶体管的瞬态响应功率.....                          | ( 244 ) |
| 6.3.4              | 二极管恢复期间的功率损耗.....                          | ( 247 ) |
| 6.4                | 存储示波器的应用 .....                             | ( 252 ) |
| 6.4.1              | 显示滤波器的带通曲线.....                            | ( 252 ) |
| 6.4.2              | 测量继电器触点的跳动时间.....                          | ( 254 ) |
| 6.4.3              | 测量照相机快门的曝光时间.....                          | ( 257 ) |
| 第七章 示波器的技术条件 ..... |                                            | ( 260 ) |
| 7.1                | 引言 .....                                   | ( 260 ) |
| 7.2                | 飞利浦PM3226型示波器的一般资料 .....                   | ( 260 ) |
| 7.2.1              | 引言 .....                                   | ( 260 ) |
| 7.2.2              | 技术数据 .....                                 | ( 260 ) |
| 7.3                | 飞利浦PM3240型示波器的一般资料 .....                   | ( 266 ) |
| 7.3.1              | 引言 .....                                   | ( 266 ) |
| 7.3.2              | 特性.....                                    | ( 267 ) |
| 7.4                | 技术条件的注释 .....                              | ( 275 ) |

## X

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| 7.5 标准环境条件 .....               | ( 281 ) |
| 7.5.1 引言.....                  | ( 281 ) |
| 7.5.2 定义.....                  | ( 282 ) |
| 7.6 射频干扰的限制.....               | ( 289 ) |
| 7.6.1 工业、科学、医学射频设备的分类.....     | ( 289 ) |
| 7.6.2 德国对于工业、科学、医学射频设备的限制..... | ( 292 ) |
| 习题解答.....                      | ( 293 ) |
| 附录A 示波器的术语汇编 .....             | ( 296 ) |
| 附录B 标号、符号和单位表 .....            | ( 320 ) |

000000

# 第一章 示波器的基本工作原理

## 1.1 为什么要使信号显象？

一个电信号的特性可以用各种仪器来测量。例如，计数器能测量一个信号的频率或周期，交流电压表能测量信号的有效值。虽然这些仪器是非常有用的，而且比示波器精确得多，但是这些仪器的应用主要局限于对信号的某一种参数进行测量。借助示波器，人们不仅可以显示感兴趣的信号，而且还能观察信号中是否包含很多其他仪器无法表示的各种特性（例如，是信号叠加在直流电平上，还是测试点的信号出现噪声或相关的高频振荡）。因为示波器可以准确地重现信号波形，所以它是一种很有价值的仪器。

图1.1示出能描绘以时间为函数的信号波形记录仪。如

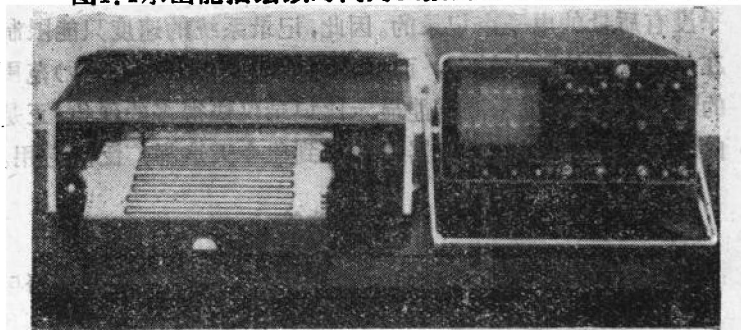


图 1.1 用记录仪或示波器测量信号波形

8810706

果描笔能准确地随着信号移动，而记录纸能以固定的速度传送时，记录仪就能描绘出信号的复制波形。示波器也是以同样方式工作的：在垂直方向上光点随着信号移动，与此同时在水平方向上光点以一个固定的速度移动着。当记录纸的传送速度不能保持一定时，记录仪上的波形就要失真。同样，当示波器的斜波电压（随时间线性增加的电压）不是良好的线性时，示波器显示的波形也会失真。记录仪与示波器的相似之处仅限于这一点。

在记录仪中，只要记录纸沿着描笔系统传送，记录仪就能描绘出图形来；而示波器有一个能在一定时间间隔内记录一小段信号的荧光屏。为了得到稳定的显示，示波器就要对信号进行逐段的多次描绘，并且每一次总是准确地覆盖前一次的。于是，人眼就能观察到一幅稳定的波形图，这里假设信号是按时重复出现的。关于获得稳定图象的方法，将在本章的后面进行讨论。

但是，图形记录仪与示波器之间有一个很大的区别。记录仪的记录系统有一定质量，而示波器荧光屏上的图形是用几乎没有质量的电子束记录的。因此，记录系统的速度只能限制在每秒几次的瞬态过程，而电子束能显示纳秒( $10^{-9}$ 秒)范围的瞬态过程，所以示波器能显示比记录仪快得多的现象，正是由于这一重要原因，示波器才能得到象今天这样广泛的应用。

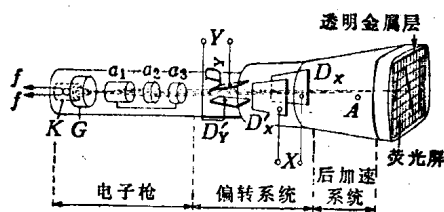
## 1.2 示波管

示波器的核心是示波管 $\ominus$  (CRT)，因为它实现了将电

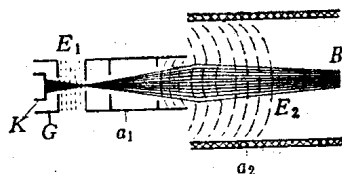
---

$\ominus$  示波管即为阴极射线管的简称。——译注

信号转换为可见图象的基本功能，所以它是仪器的输出装置（或者称为显示部分）。示波管是一个在形状上与电视（TV）显象管相似的真空管，如图 1.2 所示。管子狭长部分中的电极装置叫做电子枪。它提供可控的电子源，并将这些电子聚焦成电子束，使聚焦点（光点）落在荧光屏上。电子束在轰击屏幕的荧光层使之发光之前，在偏转系统中首先受到垂直和水平方向的偏转。根据图 1.2，示波管的工作原理最好分成几个基本组成部分，下面将依次地对每一部分进行讨论。



(a)



(b)

图 1.2 示波管的结构

(a) 示波管的各个基本组成部分；

(b) 聚焦系统，即电子透镜的分解详图。

$f$ ——灯丝；

$G$ ——控制栅极；

$D_Y, D'_Y$ ——垂直偏转板；

$A$ ——后加速电极；

$B$ ——电子束。

$K$ ——阴极（发射电子）；

$a_1, a_2, a_3$ ——聚焦阳极；

$D_X, D'_X$ ——水平偏转板；

$E_1, E_2$ ——等位面；

### 1.2.1 电子枪

电子枪中的电子是由加热阴极 $K$ 而产生、发射出去的。这些电子在电子枪内形成电子束，其强度是由阴极 $K$ 和控制栅极 $G$ 之间的电压进行控制的。假若 $K$ 、 $G$ 之间的电压使电子束不能到达荧光屏，示波管的状态就称为消隐。由阴极发射的电子，利用控制栅极 $G$ 和阳极 $a_1$ 之间产生的静电场进行第一次聚焦。从第一个焦点（即交叉点）起一直到进入阳极 $a_1$ 和 $a_2$ 之间的第二个静电场时，电子束是发散的。阳极 $a_2$ 是主聚焦电极；调节该电极的电位就可以使电子束在示波管屏幕上形成清晰的光点。借助示波管的轴向静电场，使电子产生从阴极至荧光屏的加速度。该电场是由阴极和相连接的 $a_1$ 、 $a_2$ 电极之间的电位差形成的，通常约为 $2\text{kV}$ 。

### 1.2.2 偏转灵敏度

在电子枪和荧光屏之间装两对偏转板。其排列正好使得每一对偏转板间的电场互相垂直。在每一对偏转板间电场的作用下，电子束朝着两板间为正电位的一方偏转。由于另一对偏转板具有相同的作用，所以有可能使电子束朝两个方向偏转，即荧光屏上的 $X$ 与 $Y$ 坐标方向。在常态工作时， $X$ 方向的偏转是由示波器内部产生的，是以从左向右重复扫描的形式贯穿整个屏幕的，而待测信号则产生 $Y$ 方向的偏转。

偏转灵敏度（ $DS$ ）定义为两偏转板间每伏偏转电压使光点在荧光屏上偏转的厘米数。根据图1.2和1.3（a）可以得到：

$$DS = \frac{Y}{V_i} = \frac{i \cdot L}{2 \cdot d \cdot V} \quad \text{cm/V}$$

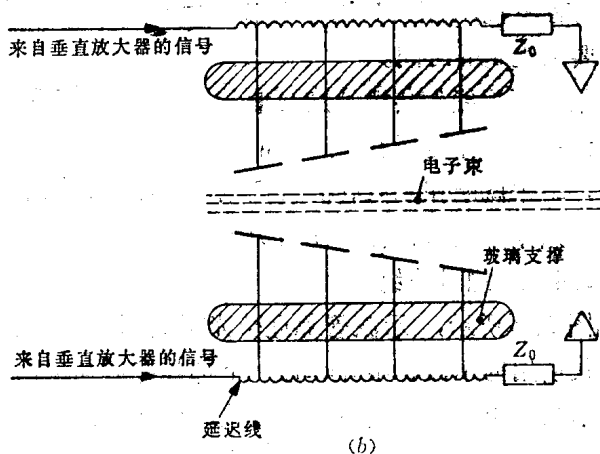
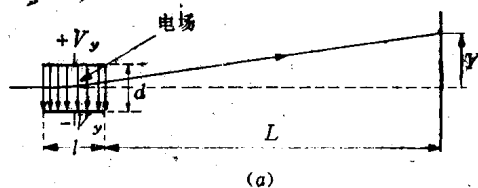


图 1.3 示波管的偏转系统

- (a) 电场使电子束朝着带正电荷的偏转板偏转；  
 (b) 分段式偏转板。

式中  $V_s$  —— 电子由阴极经电子枪直至偏转板所经过的电位差 (例如,  $V_s = 2\text{kV}$ )。

### 1.2.3 分段式偏转板

在高频示波器中, 垂直偏转板可以做成分段式的 [见图 1.3 (b)]。下面将分段说明采用这种类型示波管的目的。



当使用普通示波管时,电子束中的电子在沿偏转途径飞行的时间里,可能在偏转板中停留的时间太长,从而使高频信号产生瞬态过程。因此,电子束的偏转效果就要比输入信号所予期的低,或者说低于低频信号的偏转效果。

当采用分段式偏转板时,每段偏转板有一个驱动比量,从而使高频信号获得正常的偏转量。在这种情况下,偏转板间的分布电容和外接线圈在一起构成延迟线。在终端,延迟线和其特性阻抗 $Z_0$ 相接。这样一来,电信号经过延迟线传输到终端要用较长的时间。

如果使延迟线的传播速度与偏转板间电子束飞行的速度匹配一致,让每个电子在每一段偏转板中受到信号的同一相位作用,结果就能在示波管的带宽范围(已经扩展了的)内对所有的频率都具有同样的偏转灵敏度。

#### 1.2.4 后加速系统

如图 1.2 所示,示波管靠近荧光屏的部分是后加速区域。现代所用的示波管中并非每一个都具有后加速作用,这与加到示波管上的最高扫描频率有关。对示波管而言,它意味着需要显示的最快记录速度。当时间因数低于  $0.1\mu\text{s}/\text{div}$  时,就无需后加速作用,这时  $10\text{MHz}$  正弦波在每一格内显示一个周期。在这种情况下,管内从偏转板到荧光屏几乎都覆盖着导电的石墨涂层,石墨层与  $0\text{V}$  电位的  $a_1$ 、 $a_2$  相连接。因为电子经过阳极  $a_2$  之后不再受加速力作用,所以这种管子称为单加速管。为了提高记录速度,单加速管的阳极  $a_1$  和  $a_2$  电位可能增高到  $4\text{kV}$ 。但是,从偏转灵敏度 (DS) 的关系式可以看出,  $V_s$  从  $2\text{kV}$  增高到  $4\text{kV}$  就会使偏转灵敏度按比例地降低。