

新型数字万用表 原理与维修

● 沙占友 沙占为 高俊岭 著



新型数字万用表 原理与维修

沙占友 沙占为 高俊岭 著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书是《数字万用表的原理、使用与维修》一书的续篇,专门介绍各种新型数字万用表的工作原理与维修技术。

全书共五章。第一章是新型数字万用表综述。第二章详细介绍 $3\frac{1}{2}$ 位~ $5\frac{1}{2}$ 位数字电压表及单片数字万用表的电路原理。第三章深入剖析15种新型 $3\frac{1}{2}$ 位、 $3\frac{1}{2}$ 位、 $4\frac{3}{4}$ 位数字万用表的整机电路工作原理,所选型号均为国内现正流行并具有代表性的产品。第四章介绍各种类型数字万用表的调试与检修方法。第五章阐述数字万用表的最新使用技巧。

本书内容丰富,立意新颖,深入浅出,图文并茂,融科学性、系统性、实用性于一体,可供从事电子技术的各类人员阅读,并可作为高等院校应用电子技术、仪器仪表、电子测量等专业的教材。

新型数字万用表原理与维修

沙占友 沙占为 高俊岭 著

责任编辑 魏永昌

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 20.75 插图 19 字数: 50 千字

1994年8月第1版 1997年1月第2次印刷

印数: 10 100-14 100 册 定价: 21.50 元

ISBN 7-5053-2449-7/TN·709

前 言

数字万用表亦称数字多用表或数字繁用表,是目前国内外最常用的一种数字仪表。最近几十年以来,随着电子工业的迅速发展,数字万用表也经历了从电子管、晶体管、中小规模集成电路,直到大规模集成电路和智能化数字万用表的发展史。目前,各种新型数字万用表正在我国迅速推广与普及,并将逐步取代传统的模拟式(即指针式)万用表,成为电子测量及维修工作的必备仪表。

作者曾在 80 年代中期撰写《数字万用表的原理、使用与维修》一书,1988 年由电子工业出版社出版,这是国内第一部专门介绍数字万用表的专著。该书出版后深受广大读者的欢迎,先后经 6 次印刷,总发行量达 8 万余册。进入 90 年代以来,各种新型数字万用表如雨后春笋,竞相问世,并获得广泛应用。最近作者不断收到各地读者来信,希望能介绍各种新型数字万用表的整机电路工作原理、维修技术以及使用技巧。鉴于原书已不能反映上述领域的最新发展,为满足广大读者急需,现将我们在长期从事仪器仪表研究工作中所积累的经验 and 部分科研成果加以总结,并参考国内外集成电路与数字万用表厂家提供的最新资料,撰成此书,定名为《新型数字万用表原理与维修》。以此献给广大的新、老读者。

全书主要由沙占友执笔,李学芝同志撰写了第一章和第四章的主要内容,高俊岭同志撰写了 § 2.7、§ 2.10 和 § 2.11,沙占为同志撰写了 § 5.3~§ 5.10 的内容。欧阳欣、刘之卿、宋毓敏、王颖超、陈曦鹭、张璇同志为本书撰写提供了帮助。

由于作者水平有限,书中的缺点和不妥之处在所难免,欢迎广大读者给予指正。

作 者

第一章 新型数字万用表综述

数字万用表属于新型、通用数字仪表。它是大规模集成电路(LSI)、数显技术乃至计算机技术的结晶。

本章对国内外数字万用表的主要特点、产品分类、发展趋势及使用要点作一综述。

§ 1.1 数字万用表综述

数字万用表亦称数字多用表 DMM (Digital Multimeter)。进入 90 年代以来,随着电子工业的发展与电子技术的进步,采用大规模集成电路制成的各种新型袖珍式(手持式)、台式及智能化数字万用表,正在国内外获得迅速推广与普及,并在电子测量等领域显示出强大的生命力。

数字万用表具有很高的准确度与分辨力,显示清晰直观,功能齐全、性能稳定、测量速率快、过载能力强,耗电节省,便于携带。下面详细介绍数字万用表的主要特点。

1. 采用数字化测量技术

数字万用表采用数字化测量技术,将被测电量均转换成电压信号,并以数字形式(不连续、离散的形式)加以显示。因此,显示结果一目了然,只要仪表不发生跳数现象,测量结果就是唯一的,既保证了读数的客观性与准确性,又符合人们的读数习惯。它克服了模拟式(即指针式)万用表 VOM (Volt-Ohmmeter) 人为的测量误差(例如视差)。

高档智能化数字万用表均带微处理器和标准接口,能配计算

机与打印机进行数据处理及自动打印,构成完整的测试系统。

2. 显示位数及显示特点

数字万用表的显示位数通常为 $2\frac{1}{2}$ 位^①、3 位、 $3\frac{1}{2}$ 位、 $3\frac{3}{4}$ 位、 $4\frac{1}{2}$ 位、 $4\frac{3}{4}$ 位、 $5\frac{1}{2}$ 位、 $6\frac{1}{2}$ 位、 $7\frac{1}{2}$ 位、 $8\frac{1}{2}$ 位,共 11 种。

判定数字仪表位数有两条原则:第一,能够显示从 0~9 所有数字的位是整数位;第二,分数位的数值是以最大显示值中最高位的数字为分子,而用满量程时最高位的数字作分母。举例说明,某数字仪表的最大显示值是 ± 1999 (最高位数字为 1),满量程计数值为 2000 (最高位数字为 2)。根据上述原则很容易判定,该数字仪表是由 3 个整数位(个位、十位、百位)和一个 $1/2$ 位(千位,它只能显示 0 或 1)构成的,统称为“ $3\frac{1}{2}$ 位”,读作“三位半”。典型产品有 DT 830A、DT 830C、DT 890B、DT 890 C₊、DT 890 D 等。

$3\frac{3}{4}$ 位(读作三又三分之二位)的最大显示值为 ± 2999 ,其最高位只能显示从 0~2 的数字。这类数字万用表的典型产品有 DT 860 B、DT 950、DT 960 T。在同样情况下它们的量限要比 $3\frac{1}{2}$ 位数字万用表高 50%。荷兰飞利浦 (Philips) 公司最新研制的 93、95、97 型万用示波表中的数字万用表部分,也采用 $3\frac{3}{4}$ 位。

需要指出,目前也有人将 $3\frac{3}{4}$ 位仪表仍然称作 $3\frac{1}{2}$ 位仪表,但必须指明其量限扩展了 50%,以免将二者混淆。

$3\frac{3}{4}$ 位(读作三又四分之三位)的最高位只能显示 0~3 的数字,因此最大显示值为 ± 3999 ,其量限比 $3\frac{1}{2}$ 位提高了一倍。此类数字万用表典型产品有 DT 910、DT 970、3211 B 和 3212 (笔式)。

① $2\frac{1}{2}$ 位 DMM 可配 TSC 806、807 型 $2\frac{1}{2}$ 位 A/D 转换器。

选择 $3\frac{3}{4}$ 位数字万用表进行测量有许多方便之处。例如, 普通 DMM 的次高交流电压档为 200 V 档, 欲测量 220 V 或 380 V 工频电压, 必须选用最高交流电压档(700 V 档或 750 V 档), 其电压分辨力仅为 1 V。相比之下, $3\frac{3}{4}$ 位 DMM 的次高交流电压档设计为 400 V, 最适宜测量工频电源电压, 既不欠量程, 也不超量程, 不仅准确度优于前者, 而且分辨力可提高 10 倍, 达到 0.1 V, 与 $4\frac{1}{2}$ 位 DMM 的 700 V 档分辨力相同。

$4\frac{1}{2}$ 位数字仪表的最大显示值为 ± 19999 , 余者类推。

普及型数字万用表一般属于 $3\frac{1}{2}$ 位。在多功能型数字万用表中, 以 $3\frac{1}{2}$ 位居多, 但也有 $3\frac{2}{3}$ 位和 $3\frac{3}{4}$ 位的。 $4\frac{1}{2}$ 位和 $4\frac{3}{4}$ 位数字万用表分袖珍式、台式两种。 $5\frac{1}{2}$ 位及 $5\frac{1}{2}$ 位以上者均属于台式智能数字万用表。

常见袖珍式数字万用表采用字高为 12.5 mm (0.5 英寸) 的液晶显示器 LCD。为提高观察的清晰度, 最近研制的 DT 830 A、DT 890 C₊、DT 890 D、DT 940 C、DT 1000 型数字万用表均采用字高 18 mm (约折合 $\frac{3}{4}$ 英寸) 的大屏幕 LCD、DT 960 T、DT 970、DT 980、型则采用字高 25 mm (1 英寸) 的超大屏幕 LCD。90 系列万用示波表则采用以场致发光器件作背电源的超大屏幕点阵 LCD。为提高显示亮度, 台式数字万用表大多选用 LED 数码管或者 VFD 荧光数码管。

新型数字万用表大多增加了标志符^①显示功能, 包括单位符号(例如 mV、V、kV、 μ A、mA、A、 Ω 、k Ω 、M Ω 、nS、kHz、PF、nF、 μ F), 测量项目符号(如 AC、DC、LO Ω 、MEM), 特殊符号(如低电压符号 LO BAT, 读数保持符号 H、自动量程符号 AUTO、10 倍乘符号 $\times 10$ 、蜂鸣器符号 $\cdot$)。DT 960 T、DT 980 的液晶显示器在小数点下边还设有量程标志符, 例如当十位小数

① 标志符 (annunciator) 又可译作标示器。

点下面显示数字 2000 时,表明所对应的量程值为 2000。

为了克服数字仪表不能反映被测电量的变化过程及变化趋势之不足,“数字/模拟条图”双重显示数字万用表、多重显示数字万用表也竞相问世。这类仪表兼有数字仪表和模拟仪表的优点,为用数字万用表完全取代模拟式万用表创造了条件。

3. 准确度高

数字万用表的准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合,它表示测量结果与真值的一致程度,也反映出测量误差的大小。一般讲,准确度愈高,测量误差就愈小,反之亦然。

准确度有两种表达式,分别如下:

$$\text{准确度} = \pm(a\% \text{RDG} + b\% \text{FS}) \quad (1.1.1)$$

$$\text{准确度} = \pm(a\% \text{RDG} + n \text{ 个字}) \quad (1.1.2)$$

式(1.1.1)中, RDG 为读数值(即显示值), FS 表示满度值。括弧内前一项代表 A/D 转换器和功能转换器的综合误差,后一项是由于数字化处理而带来的误差。对于某块 DMM 而言, a 值与所选择的测量项目及量程有关, b 值则基本是固定的,通常要求 $b \leq a/2$ 。

式(1.1.2)中, n 是量化误差反映在末位数字上的变化量。若把 n 个字的误差折合成满量程的百分数,就变成式(1.1.1)。由此可见,上述二式是等价的。

举例说明: DT 890 C₊ 型 3½ 位数字万用表的 DCV 2V 档准确度为 $\pm(0.5\% \text{RDG} + 1 \text{ 字})$ 。其中 1 个字的误差折合满量程的 $1/2000 = 0.05\%$, 故准确度亦可写成 $\pm(0.5\% \text{RDG} + 0.05\% \text{FS})$, FS^① 值取 2000。本书介绍的数字万用表一律用式 (1.1.2) 来表达其准确度。

数字万用表的准确度远优于模拟式万用表。表 1.1.1 列出目

① FS 是英文 Full Scale (满量程)的缩写,国外数字万用表产品说明书中也有的用 RNG (量程)来代替 FS。

前国内外数字万用表典型产品与模拟式万用表在基本量程的准确度比较(不含数字化误差项,仅指综合误差)。由表可见,数字万用表的优良性能是传统的模拟式万用表所望尘莫及的。

表 1.1.1 数字万用表与模拟万用表准确度之比较

基本准确 显示位数	被测量	直流电压 DCV	直流电流 DCA	交流电压 ACV	电 阻 Ω	典 型 产 品*
3 ½ 位		±0.5%	±0.5%	±0.8%	±1.0%	DT 830 A
4 ½ 位		±0.03%	±0.3%	±0.2%	±0.05%	HZ 1942
5 ½ 位		±0.002%	±0.04%	±0.07%	±0.0028%	8840 A
6 ½ 位		±0.0005%	±0.005%	±0.02%	±0.001%	1061 A
7 ½ 位		±0.0002%	±0.005%	±0.01%	±0.0003%	1081
8 ½ 位		±0.00006%	±0.0014%	±0.01%	±0.0002%	HP3458 A
模拟式万用表		±2.5%	±2.5%	±5.0%	±2.5%	500
		±1.0%	±1.0%	±1.5%	±1.0%	MF 18

* DT 830 A 是深圳胜利仪器有限公司产品, HZ 1942 为北京瑞普电 子仪 器厂产品, 8840 A系美国福鲁克(Fluke) 公司产品, 1061 A 和 1081 均为英国迪特朗 (Datron) 公司产品, HP 3458 A 是美国惠普 (HP) 公司产品。500、MF18 均为国产模拟式万用表。

4. 测量范围宽

4½ 位袖珍式多功能数字万用表的测量范围一般为: DCV: 0.01 mV~1000 V; ACV: 0.01 mV~700 V(或 750 V); DCA: 0.1 μA~20 A; ACA: 1 μA~20 A; Ω: 0.01 Ω~20 MΩ(少数表可达 200 MΩ); 电导 S: 0.1 nS~100 nS; 电容 C: 0.1 pF~20 μF; 频率 f: 10 Hz~20 kHz(部分表可达 200 kHz); h_{FE}: 0~1000。可满足常规电子测量之需要。

智能数字万用表的测量范围更宽。例如, 8840 A 型 5½ 位 DMM, 其 Ω 档最小可以测量 0.1 mΩ 的低阻, ACV 档的频率上限可达 100 kHz; 8505 A 型 7½ 位 DMM 的 ACV 档频率上

限高达 1 MHz; BY1970 型 7½ 位 DMM (北京无线电研究所生产), Ω 档可测到 1400.00 MΩ 的高阻。若配以附件,则可大大扩展量程,例如配上 80 K-40 型交直流高压探头,可测 0~40kV 电压 (DC 或 AC 峰值);配以 85 RF 型高频电压探头,频率响应为 20 kHz~700 MHz。

5. 分辨力高

数字仪表在最低电压量程上末位 1 个字所对应的电压值,称

表 1.1.2 数字万用表最高分辨力指标

显示位数	最大显示值	最高分辨力	最高分辨率	备 注
2 ½位	199	1 mV	0.5%	1μV = 10 ⁻⁶ V 1nV = 10 ⁻⁹ V
3 ½位	1999	100 μV	0.05%	
3 ¾位	3999	100 μV	0.025%	
4 ½位	19999	10 μV	0.005%	
4 ¾位	39999	10 μV	0.0025%	
5 ½位	199999	1 μV	0.0005%	
6 ½位	1999999	100 nV	0.00005%	
7 ½位	19999999	10 nV	0.000005%	
8 ½位	199999999	1 nV	0.0000005%	

作仪表的分辨力。它反映出仪表灵敏度的高低。数字仪表的分辨力随着显示位数的增加而提高。

数字万用表具有分辨高之优点,表 1.1.2 列出不同位数 DMM 所能达到的最高分辨力指标。

数字万用表的分辨力指标亦可用分辨率来表示 (参见表 1.1.2)。分辨率是指所能显示的最小数字 (零除外) 与最大数字之比,通常用百分数表示。例如,3½ 位数字万用表可显示的最小数字为 1,最大数字为 1999,故分辨率等于 1/1999≈0.05%。同理可以计算出,3¾ 位、4½ 位、4¾ 位、5½ 位 DMM 的分辨率依次为 0.025%、0.005%、0.0025% 和 0.0005%。

必须指出,分辨力与准确度属于两个不同的概念。前者表征仪表的“灵敏性”,即对微小电量的“识别”能力;后者则反映测量的“准确性”,即测量结果与真值的一致程度。二者无必然的联系,因此不能混为一谈,更不得将分辨力(或分辨率)误认为是一项类似于准确度的指标。

实际上分辨力仅与仪表显示位数有关,而准确度则取决于 A/D 转换器、功能转换器的综合误差以及量化误差。从测量角度看,分辨力是“虚”指标(与测量误差无关),准确度才是“实”指标(它决定测量误差的大小)。因此,任意增加显示位数来提高分辨力的方案是不可取的。原因就在于这样达到的高分辨力指标将失去意义。换言之,从设计数字仪表的角度看,分辨力应受到准确度的制约,有多高的准确度,才有与之相适应的分辨力。

还需要作以下说明:

(1) 针对测量项目的不同,高档智能数字万用表的显示位数也是可变的。例如,8505 A 型 $7\frac{1}{2}$ 位 DMM 在测直流电压时可选择 $7\frac{1}{2}$ 位(或 $6\frac{1}{2}$ 位),以便提高准确度和分辨力;而在测交流电压时只能工作在 $6\frac{1}{2}$ 位或 $5\frac{1}{2}$ 位方式下,这是由于测量对象及对测量的要求不同而定的。比如,220 V 市电本身就不太稳定,一般用 $3\frac{1}{2}$ 位或 $4\frac{1}{2}$ 位 DMM 测量已足够了。倘若改用 $7\frac{1}{2}$ 位仪表就不仅造成浪费,而且导致许多低位数字严重跳数,根本无法观察。

(2) 鉴于上述情况,表 1.1.2 仅给出仪表所能达到的最高分辨力指标,未列出在降低位数使用中的分辨力指标。

6. 测量速率快

数字万用表在每秒钟内对被测电量的测量次数叫作测量速率(亦称抽样速率),单位是“次/s”。它主要取决于 A/D 转换器的转换速率。也有的袖珍式数字万用表用测量周期来表示测量的快慢。完成一次测量过程所用的时间叫测量周期。显见,测量速率

愈高,测量周期就愈短,二者成倒数关系。

注意,测量周期与采样时间不同,后者仅指正向积分的时间。对积分式 A/D 转换器而言,采样时间 T_1 只占测量周期 T 的一部分,有关系式 $T > T_1$ 。

$3\frac{1}{2}$ 位、 $4\frac{1}{2}$ 位数字万用表的测量速率一般为 2~5 次/秒,多数仪表为 2~3 次/秒。 $4\frac{3}{4}$ 位 DMM 可达 20 次/秒。 $5\frac{1}{2}$ 位~ $7\frac{1}{2}$ 位数字万用表一般为几十次/秒以上,有的能达到几百甚至上千次/秒。HP 3458 A 型 $8\frac{1}{2}$ 位 DMM 工作在 $4\frac{1}{2}$ 方式下的最高测量速率可达 10 万次/秒。

测量速率与准确度指标存在着矛盾,通常是准确度愈高,测量速率愈低,二者难以兼顾。解决这一矛盾有两种办法。一种是增设快速测量档,例如 8840 A 型 $5\frac{1}{2}$ 位 DMM 就设有低速 (S)、中速 (M)、快速 (F) 三档,可满足不同用户对测量速率的要求。第二种办法是通过降低显示位数来大幅度提高测量速率,此法应用的比较普遍。以 HP 3458 A 型 $8\frac{1}{2}$ 位 DMM 为例,选择 $5\frac{1}{2}$ 位方式时测量速率可达 5 万次/秒, $4\frac{1}{2}$ 位方式下则高达 10 万次/秒!

7. 输入阻抗很高

测量电压时仪表应具有很高的输入阻抗,这样在测量过程中从被测电路上吸取的电流极小,不会影响被测电路(或信号源)的工作状态,能减小测量误差。

$3\frac{1}{2}$ 位袖珍式数字万用表 DCV 档的输入电阻一般为 $10\text{ M}\Omega$, $5\frac{1}{2}$ 位~ $8\frac{1}{2}$ 位智能数字万用表可大于 $10000\text{ M}\Omega$ 。ACV 档受输入电容的影响,其输入阻抗低于 DCV 档,只适于测量低频或中频电压。测高频电压时需借助于高频探头(仪表配件)。

8. 微功耗

新型数字万用表普遍采用 CMOS 大规模集成电路的 A/D 转换器,整机功耗很低。 $3\frac{1}{2}$ 位、 $4\frac{1}{2}$ 位袖珍式 DMM 的整机功耗仅几十毫瓦,可由 9 V 叠层电池供电。 $5\frac{1}{2}$ 位~ $8\frac{1}{2}$ 位 DMM 的总

功耗一般也只有十至几十瓦。

9. 集成度高

袖珍式数字万用表均采用单片 A/D 转换器, 外围电路比较简单, 只需要少量辅助芯片以及元器件。近年来单片 DMM 专用芯片不断问世, 典型产品有 ICL 7139、ICL 7149、TSC 815、NJU 9207, 使用一片专用 IC 即可构成功能较完善的自动量程式数字万用表, 为简化设计和降低成本创造了有利条件。

10. 测试功能齐全

数字万用表的测试功能远远超过模拟式万用表。多功能数字万用表不仅可以测量直流电压 (DCV)、交流电压 (ACV)、直流电流 (DCA)、交流电流 (ACA)、电阻 (Ω)、二极管正向压降 (V_F)、晶体管共发射极电流放大系数 (h_{FE}), 还可以测量电容量 (C)、电导 (nS)、温度 (T)、频率 (f), 增设了用以检查线路通断的蜂鸣器档 (BZ)、低功率法测电阻档 ($LO\Omega$), 有的表 (如 DT 810 型) 还能输出 50 Hz 方波信号, 作低频信号源使用。DT 860 D 型数字万用表具有 AC/DC 自动转换功能。DT 880 和 VC 98 型实现了电容档自动转换量程。

新型数字万用表大多增加了下述新颖实用的测试功能: 读数保持 (HOLD)、逻辑测试 (LOGIC)、真有效值测量 (TRMS)、相对值测量 (REL Δ)、自动关机 (AUTO OFF POWER)^① 等。

新型智能数字万用表则更胜一筹, 开创了现代电子测量的先河。尤其是最近开发的 $3\frac{3}{4}$ 位 $\sim 4\frac{3}{4}$ 位智能数字万用表, 将高性能与低成本集于一身, 大多具有以下功能: 液晶条图显示 (LCD Bargraph)、多重显示、最小值/最大值存储 (Min/Max Mode)、峰值保持 (PK HOLD)、数据存储 (MER)、读存储数据 (MEM

① 自动关机又称作自动关断电源或备用模式。

RCL)、复位 (RST)、数据输出 (COMM)、预置 (SET)、设定测量范围的上、下限 (UP $\wedge$ 、UP $\vee$)、自动校准 (AUTO CAL)、功率电平测量 (dB $_{\text{m}}$)、电源电压设定 (S)、快速测量 (FAST)等。

与此同时,各种专用数字仪表亦获得了长足发展,为数字仪表大家族增添了光彩。

11. 过载能力强

数字万用表具有比较完善的保护电路,过载能力强。使用过程中只要不超过规定的极限值,即使出现误操作(例如用电阻档去测 220 V 交流电压),一般也不会损坏表内的大规模集成电路。当然应力求避免误操作,以免由于外围元件(如快速熔丝管、量程转换开关)损坏而影响正常使用。

常用的保护装置有以下几种:

(1) 过流保护装置

① 快速熔丝管 (Fast Fuse)。

② 熔断电阻器,亦称保险电阻器或易熔电阻器。它兼有电阻器与熔断器的双重功能。当电流超过其熔断电流时,就在额定时间内熔断,将电路切断,起到保护作用。熔断电阻器大多属于一次性产品,但也有供多次使用的产品。

③ 在 A/D 转换器的输入端增加限流保护电阻。

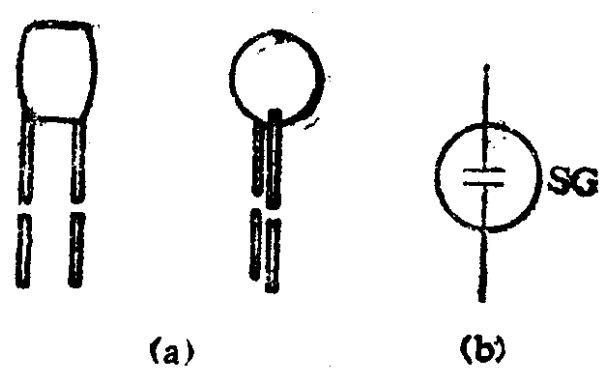
(2) 过压保护装置

① 双向限幅二极管

利用两只反极性并联的硅二极管构成双向限幅电路,可实现过压保护。常用的二极管有 1N 4004 (作输入级过压保护), 1N 4148 (IC 输入端过压保护)。

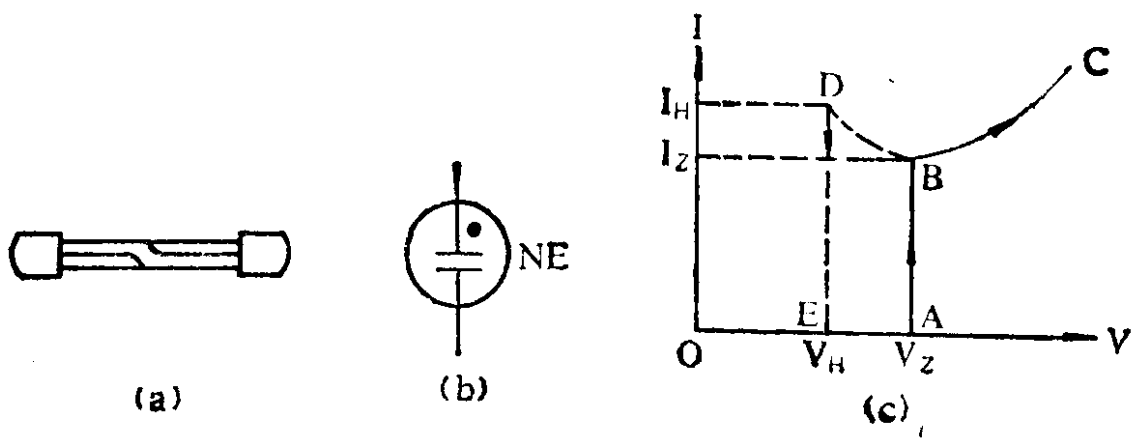
② 火花放电器(亦称火花间隙器), 英文符号为 SG (Spark Gap)。其外形及电路符号如图 1.1.1 所示。它具有两个绝缘电极,当冲击电压超过其击穿电压时,在两极之间迅速发生火花放电现象。放电之后能自行恢复绝缘状态 DT 890 A、DT 890 C、

DT 930 F 型数字万用表就使用了这种保护装置，典型产品为 AG 20，击穿电压 1200 V。



(a) 外形； (b) 电路符号
图 1.1.1 火花放电器

③ 氖管(NE)。它属于辉光放电管，因管内充以惰性气体——氖气而得名。氖管的外形、电路符号及伏安特性见图1.1.2。(c)图中， V_Z 表示着火电压(即起辉电压)， V_H 为熄灭电压，一般 $V_Z > V_H$ 。当外加电压 $V < V_Z$ 时氖管不起辉，电流为零。当 $V = V_Z$ 时，氖管在高压电场的作用下发生电离并产生橙色辉光，电流也从



(a) 外形； (b) 电路符号； (c) 伏安特性
图 1.1.2 氖管的外形、符号及伏安特性

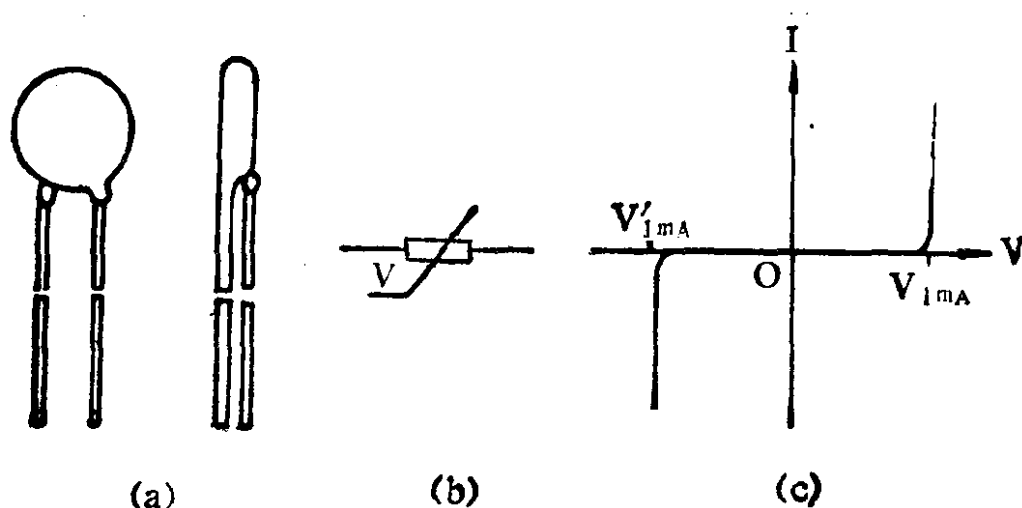
零跳变成 I_Z 。当 $V > V_Z$ 时沿曲线 BC 上升，电流与电压同时

增大,但电流过大会烧毁氖管。当 V 下降到 BD 段时, $V_H < V < V_Z$, 氖管并不熄灭,而是呈现负阻特性,电流随着电压的降低而增大,当 $V = V_H$ 时氖管熄灭,电流从 I_H 降为零,对应于 DE 段。图中的 AB 段为稳压区,可将输入电压限定(钳位)在 V_Z 值,对数字万用表起到过压保护作用。氖管的着火电压通常为 $70 \sim 80 \text{ V}$,使用中必须加几百千欧至几兆欧的限流电阻,避免烧毁氖管。

利用氖管的负阻特性,还可制成简易锯齿波发生器、脉冲发生器等。

④ 压敏电阻器。压敏电阻器是电压灵敏电阻器 VSR (Voltage-Sensitive Resistor) 的简称,是一种新型过压保护元件。

压敏电阻器是以氧化锌 (ZnO) 为主要材料制成的金属氧化物半导体陶瓷元件。其电阻值随端电压而变化。压敏电阻器的工作电压范围很宽 ($6 \sim 3000 \text{ V}$, 分成多种规格), 对过电压脉冲响应快(响应时间仅几至几十纳秒),耐冲击电流能力强(通流量指标可达 $100 \text{ A} \sim 20 \text{ kA}$),漏电流小(低于几至几十微安),工作稳定可靠。其电阻温度系数 $\alpha_t < 0.05\% / ^\circ\text{C}$ 。

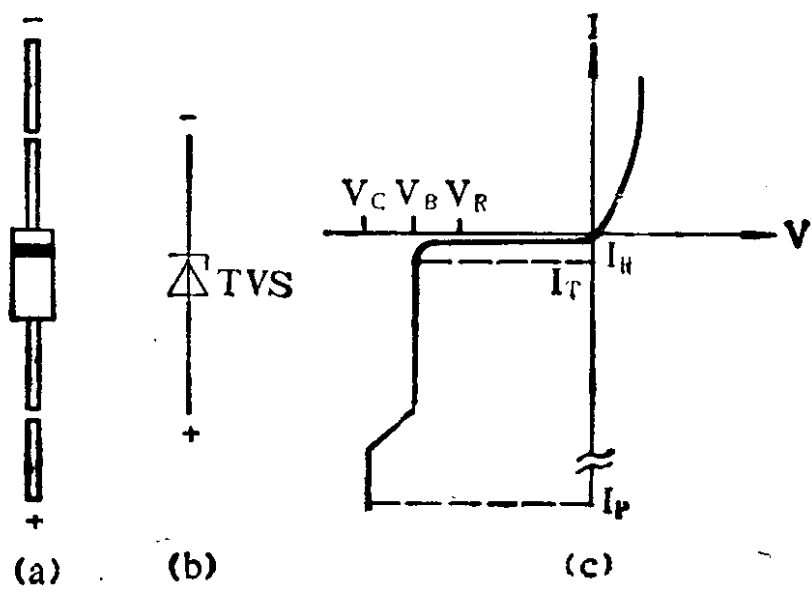


(a) 外形; (b) 电路符号; (c) 伏安特性

图 1.1.3 压敏电阻器

压敏电阻器的外形、图形符号及伏安特性如图 1.1.3 所示。其伏安特性具有对称性，在正、反向伏安特性中都能起到稳压作用，元件本身没有极性。因此，压敏电阻还可作为小电流($<1\text{ mA}$)的双向限幅器或稳压器。常见的压敏电阻器的标称电压有 18、22、24、27、33、39、47、56、82、100、120、150、200、216、240、250、273、283、360、470、850、900、1100、1500、1800、3000 V 等规格。(c) 图中的 $V_{1\text{mA}}$ 、 $V'_{1\text{mA}}$ 分别表示通过 1 mA 、 -1 mA 直流电流时元件的电压值。

⑤ 瞬态电压抑制器 TVS (Transient Voltage Suppressor)。其外形与硅整流二极管相似，电路符号则与稳压二极管相同，参见图 1.1.4。TVS 的伏安特性如图 1.1.4 (c)所示。图中的 V_B 、 I_T 分别为反向击穿电压和测试电流， V_R 是导通前加于器件上的最大额定反向电压， I_R 为最大反向漏电流。 V_C 是在 1 ms 时间内器件可承受的最大峰值电压。有关系式： $V_C > V_B > V_R$ 。 I_P 是瞬时脉冲峰值电流。因 I_P 、 I_T 、 I_R 分别属于安培、毫安、微安这三



(a) 外形；(b) 电路符号；(c) 伏安特性

图 1.1.4 瞬态电压抑制器