

数字万用表的 原理、使用与维修

沙占友 沙占为 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书重点介绍 $3\frac{1}{2}$ 位数字万用表的原理、使用与维修技术。主要包括：直流数字电压表的原理，数字万用表的特点、原理、使用、调试、维修以及它的各种扩展用途，共 31 个典型实例，均为作者实践经验的积累。本书内容深入浅出，通俗易懂，实用性强，适用于从事电子技术的各类人员，也可作高等学校电子仪器专业的教学参考书。

数字万用表的原理、使用与维修

沙占友 沙占为 编著

责任编辑：魏永昌

*

电子工业出版社出版(北京万寿路)

北京体育学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张：8.5 插页：3 字数：255 千字

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数15000册 定价：2.70元

ISBN7-5053-0318-X/TN·137

目 录

第一章	数字万用表概述	(1)
§ 1-1	数字万用表概述	(1)
§ 1-2	几种常见的 A/D 转换器简介	(6)
§ 1-3	数字万用表的特点	(10)
第二章	数字电压表的原理	(21)
§ 2-1	单片3 $\frac{1}{2}$ 位双积分式 A/D 转换器	(21)
§ 2-2	典型3 $\frac{1}{2}$ 位数字电压表原理	(26)
§ 2-3	其它3 $\frac{1}{2}$ 位数字电压表原理	(49)
§ 2-4	4 $\frac{1}{2}$ 位数字电压表原理	(58)
第三章	数字万用表的原理	(67)
§ 3-1	3 $\frac{1}{2}$ 位数字万用表基本原理	(67)
§ 3-2	DT-830 型、DT-890 型数字万用表的性能和使用方法	(83)
§ 3-3	DT-830型数字万用表电路分析	(71)
第四章	数字万用表的维修与调试	(114)
§ 4-1	使用数字万用表的注意事项	(114)
§ 4-2	检修数字万用表的方法和要点	(123)
§ 4-3	直流 200mV 基本量程的功能检查	(129)
§ 4-4	DT-830型数字万用表故障修理	(135)
§ 4-5	数字万用表的调试方法	(143)
第五章	数字万用表的扩展使用	(150)
§ 5-1	数字万用表兼作信号发生器	(150)
§ 5-2	辅加信号发生器	(156)
§ 5-3	提高直流电压档的分辨力	(159)
§ 5-4	改善数字万用表的频率特性	(161)
§ 5-5	扩展电压档的测量范围	(173)
§ 5-6	利用 A/D 转换器进行高准确度比例运算、加减法运	

	算的原理及应用.....	(176)
§ 5-7	测量正弦波电压的峰-峰值.....	(184)
§ 5-8	测量非正弦波电压的平均值、有效值与峰值.....	(186)
§ 5-9	测量高内阻信号源的电压与内阻.....	(190)
§ 5-10	测量电平.....	(193)
§ 5-11	扩展电阻档的测量范围.....	(195)
§ 5-12	检查二极管质量以及鉴别硅管与锗管.....	(196)
§ 5-13	检查三极管质量以及鉴别硅管与锗管.....	(199)
§ 5-14	用复测法消除 h_{FE} 插口的测量误差.....	(202)
§ 5-15	检查整流桥堆的质量.....	(205)
§ 5-16	判定单晶体管的电极和触发能力.....	(206)
§ 5-17	测量单晶体管的分压比.....	(209)
§ 5-18	判定场效应管的电极和估测跨导值.....	(211)
§ 5-19	判定可控硅的电极和触发能力.....	(218)
§ 5-20	检查发光二极管以及光电耦合器的质量.....	(224)
§ 5-21	检查半导体数码管的质量.....	(228)
§ 5-22	检查光电组合器件的质量.....	(230)
§ 5-23	检查液晶显示器的质量.....	(232)
§ 5-24	检查电容器的容量.....	(234)
§ 5-25	检查电解电容器的质量.....	(238)
§ 5-26	检查压电陶瓷片的质量.....	(239)
§ 5-27	精确测量表头内阻.....	(240)
§ 5-28	判定交流电源的火线.....	(241)
§ 5-29	测量静电.....	(243)
§ 5-30	测量温度.....	(244)
§ 5-31	A/D 转换器增加读数保持功能的方法及其原理.....	(251)
附录一	数字万用表的符号.....	(253)
附录二	进口电容器容量及电阻器阻值表示法.....	(257)
附录三	数字万用表的主要生产厂家及产品型号.....	(260)
附录四	DT-890 型数字万用表电路.....	(264)

第一章 数字万用表概述

§ 1-1 数字万用表概述

传统的模拟式万用表 VOM^① 已有近百年的发展历史, 虽经不断改进, 仍远远不能满足电子与电工测量的需要。近三十年来, 由于电子技术的迅速发展, 各种数字万用表已相继问世。特别是进入八十年代以后, 随着单片 CMOS A/D 转换器的广泛应用, 新型袖珍式数字万用表 DMM^② 迅速得到推广和普及, 显示出强大的生命力, 并在许多情况下正逐步取代模拟式万用表。与此同时, 数字万用表还向着高、精、尖的方向发展, 具有高分辨力和高准确度的智能化数字万用表, 也竞相进入电子市场。

数字万用表具有很高的灵敏度和准确度, 显示清晰直观, 功能齐全, 性能稳定, 过载能力强, 便于携带。因此, 受到广大电子工作者和无线电爱好者的欢迎。

习惯上, 人们把连续变化的物理量称作模拟量, 参见图 1.1.1 (a)。指针式万用表的指针偏转可随时间作连续变化, 并与输入量保持一种对应关系, 故称之为模拟式万用表。其测量原理是把被测电量 (U 、 I 、 R 等) 都转换成直流电流信号, 使磁电式表头的指针偏转某一角度。

图 1.1.1 (b) 则反映出数字量的特征, 它不随时间作连续变化。数字万用表就是采用数字化测量技术, 把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。它是通过断续的方式进行测量的。通常, 显示结果只反映出在本

①VOM——英文 Volt-ohmmeter “伏欧表” (即指针式万用表) 的缩写。

②DMM——英文 digital multimeter “数字多用表” 的缩写。

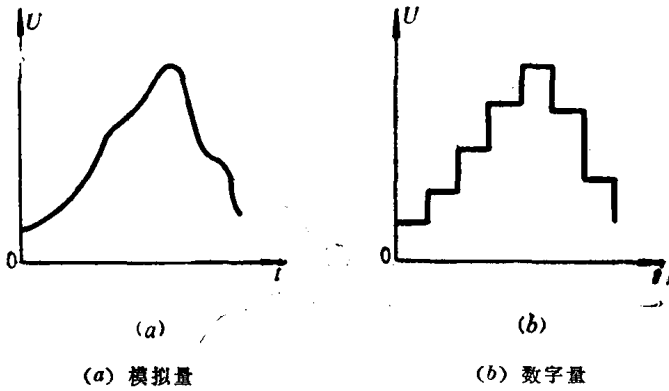


图 1.1.1 模拟量与数字量的区别

次采样期内被测量的大小。在数值上是一系列离散值。

数字万用表是在直流数字电压表 DVM①（或数字面板表 DPM②）的基础上扩展而成的。DVM 的简单原理如图 1.1.2 所示，主要由模拟量-数字量 (A/D) 转换器、计数器、译码显示器和控制器等组成。在此基础上，利用交流-直流 (AC-DC) 转换器、电流-电压 (I-V) 转换器、电阻-电压 (Ω -V) 转换器，就可以把被测电量转换成直流电压信号。这就构成了一块数字万用表，见图 1.1.3。

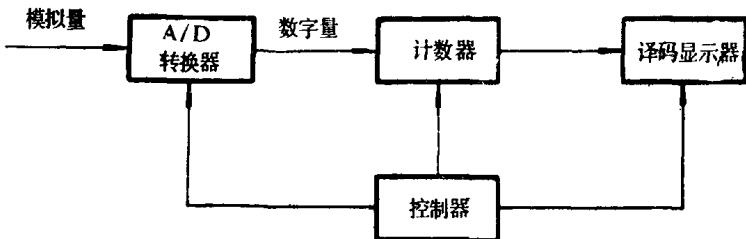


图 1.1.2 直流数字电压表的组成

图 1.1.4 是 DT-830 型 $3\frac{1}{2}$ 位袖珍式液晶显示数字万用表的

①DVM——英文 digital voltmeter “数字电压表” 的缩写。

②DPM——英文 digital panel meter “数字面板表” 的缩写。

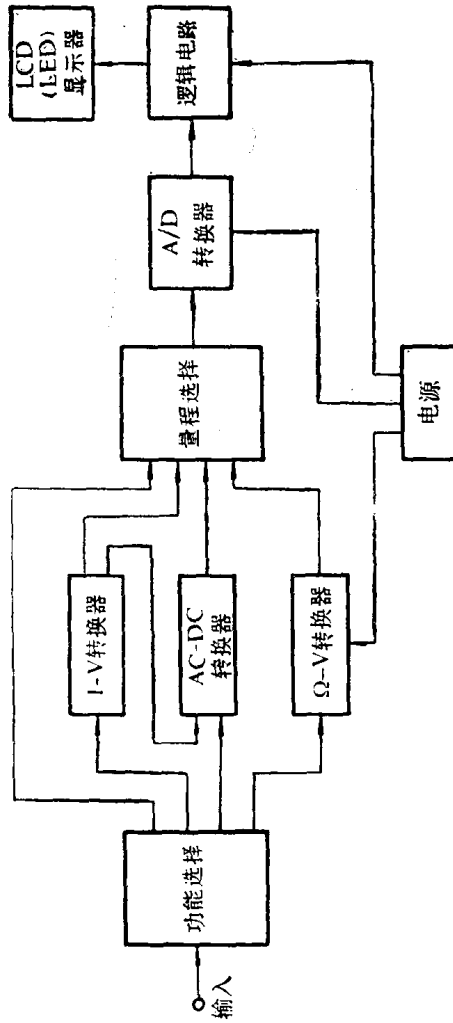


图1.1.3 数字万用表的构成

原理框图。该仪表采用7106型单片CMOS A/D转换器，由9V 迭层电池供电。在7106的外部增加十来个阻容元件，即可构成一块直流数字电压表（以下简称数字电压表，或DVM）。它具有自动调零功能，整机无须手动调零，还能够自动显示极性。测直流电压（DC V）时，被测电压经过分压器衰减成200mV

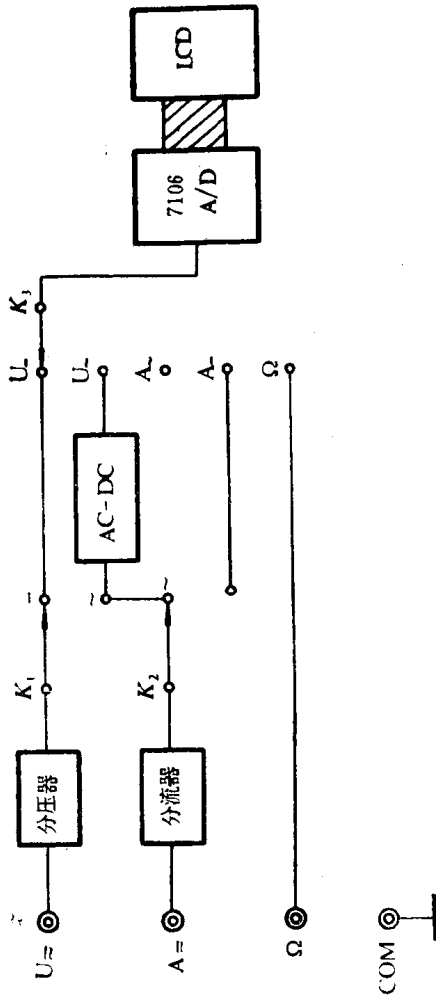


图 1.1.4 DT-830 型数字万用表原理框图

以下的电压，然后送到7106的输入端。测交流电压(AC V)时，先衰减成 200mV 以下的电压，再经 AC-DC 转换器变成直流电压。测直流电流(DC A)和交流电流(AC A)时，都通过分流器把电流信号转为电压信号，所不同的是测交流电流还需经过 AC-DC 转换器。通常采用比例法测量电阻(Ω)，这种方法的电路简单，而测量准确度较高。由于显示值与被测电阻值呈线性

关系，就不存在模拟式万用表非线性刻度带来的误差。

数字万用表的显示位数一般为4~8位。若最高位不能显示从0~9的所有数字，即称作“半位”，写成“ $\frac{1}{2}$ ”位。例如袖珍式数字万用表共有4个显示单元，习惯上叫“ $3\frac{1}{2}$ 位”（读作“三位半”）数字万用表。同样道理，具有8个显示单元的DMM，则称 $7\frac{1}{2}$ 位数字万用表。少数数字万用表（如DF-8），没有半位，全

表 1.1 $3\frac{1}{2}$ 位袖珍式数字万用表与模拟式万用表性能比较

$3\frac{1}{2}$ 位数字万用表 DMM	模拟式万用表 VOM
(1) 数字显示，读数直观，没有视差	(1) 表针指示，读数不方便，有读数误差
(2) 测量准确度高，分辨力 $100\mu\text{V}$	(2) 测量准确度低，灵敏度为一百~几百毫伏
(3) 各电压档的输入电阻均为 $10\text{M}\Omega$ ，但各档电压灵敏度不相等，例如 200mV 档高达 $50\text{M}\Omega/\text{V}$ ， 1000V 档为 $10\text{k}\Omega/\text{V}$ 。	(3) 各电压档的输入电阻不等，量程愈高，输入电阻愈大， 500V 档一般为几兆欧。各档电压灵敏度基本相等，通常为 $4\text{k}\Omega/\text{V}\sim 20\text{k}\Omega/\text{V}$ ，直流电压档的灵敏度较高。
(4) 采用大规模集成电路，外围电路简单，LCD显示	(4) 采用分立元件和磁电式表头
(5) 测量范围广，功能全，能自动调零操作简便，有的表还能自动转换量程	(5) 一般只能测量 I 、 V 、 Ω （三用表）需要调机械零点，测电阻时还要调 Ω 零点
(6) 保护电路较完善，过载能力强，使用故障率低	(6) 只有简单的保护电路，过载能力差，易损坏
(7) 测量速度快，一般为 (2.5~3) 次/秒	(7) 测量速度慢，测量时间（不包括读数时间）需一至几秒
(8) 抗干扰能力强	(8) 抗干扰能力差
(9) 省电，整机耗电一般为 $10\sim 30\text{mW}$ （液晶显示）	(9) 电阻档耗电较大，但在电压档和电流档均不耗电
(10) 不能反映被测电量的连续变化	(10) 能反映变化过程和变化趋势
(11) 体积很小，通常为袖珍式或笔式	(11) 体积较大，通常为便携式
(12) 价格偏高	(12) 价格较低
(13) 交流电压档采用线性整流电路	(13) 采用二极管作非线性整流

是整位。

表 1.1 列出了 3½ 位袖珍式数字万用表与模拟式万用表的主要性能比较。

§ 1-2 几种常见的 A/D 转换器简介

A/D 转换器是数字电压表的核心部件。数字电压表问世近三十年来，A/D 转换器已发展成十多种形式。按照原理划分，大致有四种类型：斜波型、积分型、比较型和复合型。每种类型又包括若干种形式，参见表 1.2。下面简要介绍几种常见的形式，使读者有比较全面的了解。

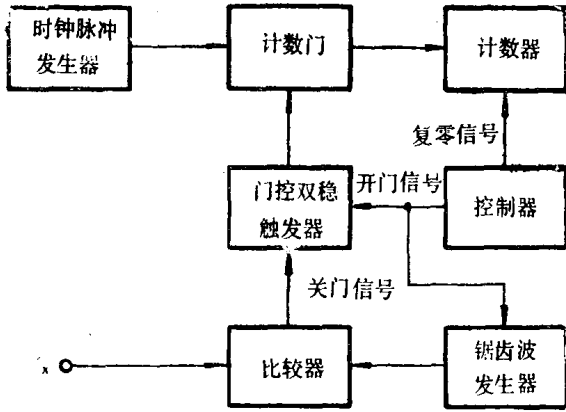
表 1.2 A/D 转换器的分类

类 型	形 式
斜 波 型	斜波式、阶梯斜波式
积 分 型	双积分式、三次积分式、 V/f 转换式、脉冲调宽式
比 较 型	逐次比较式、跟随比较式、再循环剩余比较式
复 合 型	积分斜波式、两次取样式

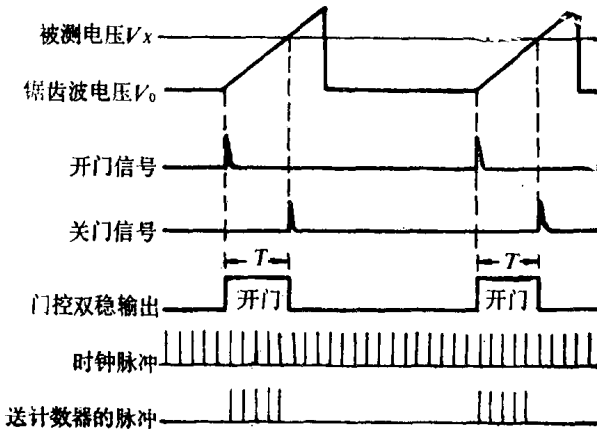
1. 斜波式数字电压表

早期的数字电压表，大多采用斜波式电压-时间(V/T)转换器。它是把被测直流电压 V_x 转换成时间间隔 T ，并以 T 作为计数器的采样时间，对标准时钟脉冲进行计数。其原理框图和主要波形如图 1.2.1 所示。这里选用锯齿波作为参考电压 V_0 。锯齿波电压是按周期性变化的，它沿着一条斜线上升到最大值，然后迅速回零，故称斜波电压。

开始测量时，首先由控制器发出一个复零脉冲，将计数器复零，由于门控双稳触发器的输出端呈低电位，使计数门关闭。然后再由控制器发出开门信号，一方面使锯齿波发生器工作；另一



(a)



(b)

(a) 原理框图

(b) 主要波形

图 1.2.1 斜波式 A/D 转换器框图和波形

方面还触发门控双稳翻转，输出端变成高电位，把计数门打开，时钟脉冲就通过计数门送往计数器计数。当锯齿波电压上升到 $V_0 = V_x$ 时，比较器产生一个关门信号，使门控双稳的输出为低电位，计数门关闭，停止计数。因此，计数器的显示值与开门时间 T 成正比，亦即和被测电压 V_x 成正比。只要适当选取时钟脉冲以及量化单位，即可显示出 V_x 的大小。

除锯齿波电压以外，还可采用阶梯波电压作为参考电压，工作原理同上。

斜波式数字电压表的优点是电路简单、准确度也较高，其主要缺点是抗干扰能力差。

2. V/f 转换式数字电压表

其特点是采用电压-频率 (V/f) 转换器，将被测直流电压转换成频率信号，再利用数字频率计测量。 V/f 转换器有多种形式，例如电压反馈式、电荷平衡式等等。其中比较简单的方案是把被测电压作为压控振荡器 (符号为 VCO) 的控制电压，则 VCO 的振荡频率 f 与 V_x 成正比。要求当 $V_x = 0$ 时最低振荡频率 $f_{\min} = 0\text{Hz}$ ，且在 $V_x > 0$ 时 f 具有良好的线性度，参见图 1.2.2。

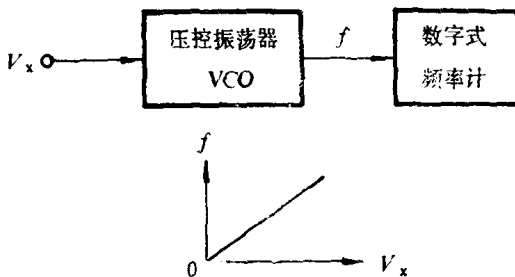


图 1.2.2 V/f 转换器原理

V/f 转换式数字电压表的主要优点是，抗干扰能力强，准确度高，测量速率快。

3. 双积分式数字电压表

双积分式亦称双斜式，目前 $3\frac{1}{2}$ 位数字面板表和袖珍式万用表大多采用此种形式。其主要特点是抗串模干扰能力强，灵敏度高，成本较低。不足之处是测量速率低。原理详见第二章。

近年来，在双积分的基础上又发展了三次积分式（即三斜式）数字电压表。它与双积分式的区别是，在反向积分过程中首先对较高的基准电压 V_{01} 作快速积分，直到积分器的输出接近零点时，再改对一个较低的基准电压 V_{02} 作慢速积分，以提高仪表的分辨能力。因此，积分器输出的波形是由三段不同斜率的直线所构成的，见图 1.2.3。

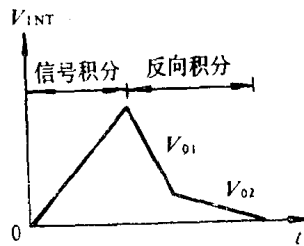


图 1.2.3 三次积分式数字电压表的波形

4. 逐次比较式数字电压表

逐次比较的过程与使用天平称重量的原理相似。所不同的是，这里采用一系列基准电压 V_{0i} (V_{01} 、 V_{02} 、 \dots 、 V_{0n}) 代替砝码，用比较器代替天平，并且利用控制器来实现测量的自动化。

逐次比较式数字电压表主要包括比较器、判别器、控制器、基准电压发生器和译码显示器，见图 1.2.4。需要指出的是，基准电压发生器里包含一个 D/A 转换器，它的输出电压已经变成数字化（通常为 BCD 码）的基准电压系列。因此，经过译码即可显示测量结果。

测量时，首先把某个基准电压 V_{0i} （一般先从最大的电压 V_{0n} 开始）与被测电压 V_x 进行比较，当 $V_{0i} > V_x$ 时称为过补偿，判别器就输出“0”信号；当 $V_{0i} < V_x$ 时叫欠补偿，判别器输出“1”信号。控制器则根据判别器的信号，接通相应的模拟开关，选取并组合成不同的基准电压值。这样经过逐次比较，最后 V_0 就等于（或非常逼近于） V_x 之值，所显示的结果即反映出被

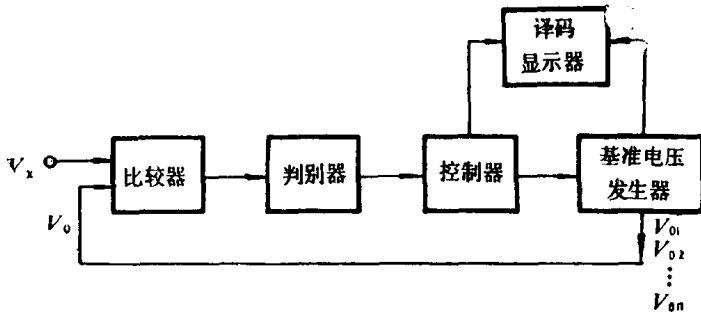


图 1.2.4 逐次比较式数字电压表方框图

测电压的大小。

采用逐次比较的方式，可以大大缩短测量时间，因为它不需要逐个的计数，只要经过有限次（例如几次或十几次）的比较，即可完成一次测量。这种数字电压表的显著特点是测量速率快，每秒钟可达几万次，甚至更高，因此被广泛用于多点快速检测系统以及电子秤中。其不足之处是抗干扰能力不如积分式数字电压表。

5. 复合式数字电压表

综上所述，积分式仪表的抗干扰能力强，但测量速率慢；而逐次比较式仪表正好相反，它的测量速率虽高，但抗干扰能力又差。复合式数字电压表就是在吸收二者优点的基础上发展而成的。这种仪表的电路较复杂，价格亦较高，大多供实验室测量使用。限于篇幅，不详细介绍了。

§ 1-3 数字万用表的特点

同模拟式万用表相比，数字万用表主要有以下特点：

1. 采用数字显示，读数迅速准确，能消除视差。
2. 准确度高

准确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合，它表示测量结果与真值的一致程度。目前在科技界以及数字万用表说明书中，仍较多使用“精度”一词，并且一般是用它表示“准确度”。但是，根据国家计量总局1983年1月1日开始施行的“常用计量名词术语及定义（JJG1001-82）”中规定，“精度”只能作为“精密度”的简称，用来表示在一定条件下进行多次测量时，所得测量结果彼此之间符合的程度。按照新规定，准确度（又称精确度）和精度不属于同一概念。因此，本书一律使用“准确度”来衡量数字万用表的测量准确程度。

数字万用表的准确度远高于模拟式万用表，现仅以袖珍式 $3\frac{1}{2}$ 位DMM为例，它与模拟式万用表的准确度比较，参见表1.3。

表1.3 袖珍式 $3\frac{1}{2}$ 位数字万用表与模拟式万用表的准确度比较

被 测 量	仪 表	袖珍式 $3\frac{1}{2}$ 位数字万用表 DMM	模拟式万用表 VOM
直流电流 DC	A	$\pm (0.5 \sim 1.0) \%$	$\pm (1.0 \sim 2.5) \%$
直流电压 DC	V	$\pm (0.1 \sim 0.5) \%$	$\pm (1.5 \sim 2.5) \%$
交流电压 AC	A	$\pm (1.0 \sim 1.5) \%$	$\pm 2.5\%$
交流电压 AC	V	$\pm 1.0\%$	$\pm 2.5\%$
电 阻 Ω		$\pm (0.2 \sim 1.0) \%$	$\pm (2.5 \sim 4) \%$
分 辨 力		100 μ V	0.1V

需要说明几点：

(1) $3\frac{1}{2}$ 位台式数字万用表的准确度，还可比袖珍式高出一个数量级。通常，数字万用表的位数愈多，准确度愈高。例如英国舒力强 (Solartron) 公司于1983年推出的7081型 $8\frac{1}{2}$ 位数

字万用表，准确度高达 1.2ppm（1 ppm 等于百万分之一），分辨力为 10nV。该公司生产的 $8\frac{1}{2}$ 位数字电压表的分辨力竟达到一亿四千万分之一，转换准确度为 0.00003%。

（2）多数模拟式万用表没有交流电流档，而数字万用表都具有四至五个交流电流档。

（3）仅在规定的环境温度下（例如 $23 \pm 5^\circ\text{C}$ ），数字万用表才能达到准确度指标。若实际温度相差较多，应考虑由此而产生的温度附加误差。

（4）数字万用表的准确度有两种表示方法。

第一种表示法：

$$\text{准确度} = \pm(a\% \text{rdg} + b\% \text{f.s}) \quad (1.3.1)$$

式中，rdg 表示读数值，f.s 表示满度值。括弧内前一项代表转换器、分压器等的综合误差；后一项是由于数字化处理而带来的误差。对于某块数字仪表而言， b 值是固定的， a 值则与所选择的测量种类及量程有关。通常要求 $b \leq a/2$ 。

第二种表示法：

$$\text{准确度} = \pm(a\% \text{rdg} + n \text{个字}) \quad (1.3.2)$$

这里的 n 是由于数字化处理引起的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，即是式(1.3.1)，因此二式是等价的。

举例说明：SK-6221 型数字万用表采用第一种表示法，例如该表直流 2V 档的准确度为 $\pm(0.8\% \text{rdg} + 0.2\% \text{f.s})$ 。DT-830 型数字万用表则采用第二种表示法，例如该表直流 2V 档的准确度（ $23 \pm 5^\circ\text{C}$ ）为 $\pm(0.5\% \text{rdg} + 2 \text{字})$ 。

一般说来，数字万用表的准确度愈高，电路愈复杂，价格也愈昂贵（可达几万元甚至十几万元人民币）。对于无线电爱好者来讲，一块 $3\frac{1}{2}$ 位袖珍式数字万用表已能满足使用要求了。

(5) 影响仪表准确度的主要因素(不考虑环境条件)是, 仪表内部基准电压源的准确度与稳定性, 时钟频率的稳定性。通常直流档的准确度较高, 由于转换器会引起转换误差, 使得交流档及电阻档的准确度稍差一些。

3. 分辨力高

模拟式万用表的灵敏度是用最低电压档(例如直流 2.5V 档, 交流 10V 档)的最小分度值来表示的。该数值愈小, 说明灵敏度愈高, 一般为 0.1V 至零点几伏。

数字万用表与之对应的技术指标是分辨力, 它表示在最低量程(例如 200mV 档)末位上的一个字所对应的电压值。3 $\frac{1}{2}$ 位数字万用表 200mV 档的最大显示值为 199.9mV, 末位上的数字 1 表示 0.1mV, 即 100 μ V, 因此分辨力为 100 μ V, 比模拟式万用表要高一千倍。

数字万用表的分辨力亦可用分辨率来表示。分辨率是指, 能显示的最小数字与最大数字之比, 并用百分数来表示。例如 3 $\frac{1}{2}$ 位数字万用表可显示的最小数字(不包括零)为 1, 最大数字为 1999, 故分辨率为 1/1999 \approx 0.05%。

利用数字万用表高分辨力之特点, 可以测量弱信号电压, 例如话筒的输出电压, 录放音磁头的电压等。

4. 输入阻抗高

3 $\frac{1}{2}$ 位数字万用表交、直流电压档的输入电阻一般为 10M Ω 。

5 $\frac{1}{2}$ 位数字万用表的输入电阻已能达到 10G Ω (即 10¹⁰ Ω)。交流电压档受输入电容的影响, 其输入阻抗低于直流输入电阻。

为便于说明问题, 下面引入电压灵敏度的概念。定义

$$\text{电压灵敏度} = \frac{R_V}{V_M} \quad (1.3)$$