



杜虎林 编著

# 数字万用表

## 实用测量技法 与故障检修

504

T14938-107  
777

# 数字万用表 实用测量技法与故障检修

杜虎林 编著

人民邮电出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

数字万用表实用测量技法与故障检修/杜虎林编著. —北京: 人民邮电出版社, 2003.2  
ISBN 7-115-10704-1

I. 数... II. 杜... III. ①数字式测量仪器—复用电表—测量方法②数字式测量仪器—  
复用电表—检修 IV. TM938.107

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 082212 号

## 内 容 提 要

本书是一本比较全面系统介绍数字万用表的工作原理、测量技法与故障检修的实用技术读物。全书共分 7 章, 第 1 章介绍数字万用表的特点与技术性能; 第 2 章介绍数字万用表的构成与测量电路工作原理; 第 3 章介绍数字万用表的常规使用与选购; 第 4 章介绍数字万用表的变通使用; 第 5 章介绍用数字万用表检测常用电子元器件; 第 6 章介绍数字万用表的功能扩展与改进; 第 7 章介绍数字万用表检修。全书内容丰富, 资料翔实, 图文并茂, 通俗易懂, 实用性强。

本书可供有关电子工程技术人员、电子爱好者及电子维修人员阅读。

## 数字万用表实用测量技法与故障检修

- ◆ 编 著 杜虎林  
责任编辑 申 苹 唐素荣
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
读者热线 010-67129264  
北京汉魂图文设计有限公司制作  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷  
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 18.25  
字数: 443 千字  
印数: 1-5 000 册
- 2003 年 2 月第 1 版  
2003 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10704-1/TN · 1934

定价: 24.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223



# 前 言

本书是《指针式万用表实用测量技法与故障检修》一书的姊妹篇。指针式万用表(VOM)已有上百年的发展历史,其显著优点是能直观显示被测量的连续变化过程及变化趋势。而数字万用表(DMM)则是近20年来迅速发展起来的新型数字仪表,它的主要优点是分辨力强、准确度高、测试功能完善、测量速率快、显示直观、耗电省、过载能力强和便于携带。这两类测量仪表在电子测量领域内互相补充,共同发展,均为电子测量与维修的必备工具。

数字万用表的工作原理、使用方法及故障检修方法等均与指针式万用表有着很大的不同。为了普及推广数字万用表的原理、正确使用方法、功能扩展应用与故障检修等方面的知识,满足广大电子工程技术人员、电子爱好者及电子维修人员的迫切需要,特编著此书。

本书第1章介绍数字万用表的特点与技术性能;第2章介绍数字万用表的构成与测量电路工作原理;第3章介绍数字万用表的常规使用与选购;第4章介绍数字万用表的变通使用;第5章介绍用数字万用表检测常用电子元器件;第6章介绍数字万用表的功能扩展与改进;第7章介绍数字万用表检修。本书内容丰富、图文并茂、资料翔实、实用性强,既适合初学者阅读,也适合有一定电子基础知识的读者使用。通过阅读本书,读者不仅能学会正确操作数字万用表的一般技法,还可以根据书中介绍的方法解决在使用与维修数字万用表时所遇到的各种技术问题。

编著本书参阅了大量的电子书籍和刊物,为此,向有关作者及出版单位表示衷心的感谢。

此外,编著本书得到了许多同志的热情帮助。叶庆道、华锡明、安昌吉、黄济海、李素春等同志提供了部分珍贵的参考资料,段亚聪、段颖、刘东、刘学、李斌、李美娇、杜鹏和牡丹等同志协助完成了部分书稿的录入及校对工作。顾守仁、蒋廷武、郑文江等领导同志对笔者给予了真诚的鼓励和支持。借此出书之际,向上述同志一并致谢。

在编著本书的过程中,尽管笔者做了大量试验,对书中数据进行了各种实测验证,但由于水平有限,疏漏与不妥之处在所难免,敬请广大读者不吝指正。

杜虎林

# 目 录

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 数字万用表的特点与技术性能 .....                              | 1  |
| §1.1 数字万用表的特点 .....                                    | 1  |
| §1.2 数字万用表的主要技术性能 .....                                | 2  |
| 第 2 章 数字万用表的构成与测量电路工作原理 .....                          | 8  |
| §2.1 数字万用表的基本构成 .....                                  | 8  |
| §2.2 双积分式 A/D 转换器的工作原理 .....                           | 9  |
| §2.3 单片 3½位 A/D 转换器 ICL7106/7107 .....                 | 12 |
| §2.4 芯片 ICL7116/7117、7126、7136、MC14433 及其构成的数字电压表电路 .. | 17 |
| §2.5 单片 4½位 A/D 转换器 ICL7135 .....                      | 22 |
| §2.6 单片 4½位 A/D 转换器 ICL7129 .....                      | 26 |
| §2.7 液晶显示器 .....                                       | 31 |
| §2.8 直流电压测量电路 .....                                    | 33 |
| §2.9 直流电流测量电路 .....                                    | 34 |
| §2.10 交流电压测量电路 .....                                   | 35 |
| §2.11 交流电流测量电路 .....                                   | 37 |
| §2.12 电阻测量电路 .....                                     | 37 |
| §2.13 晶体管 $h_{FE}$ 测量电路 .....                          | 40 |
| §2.14 电容测量电路 .....                                     | 43 |
| §2.15 蜂鸣器电路 .....                                      | 47 |
| §2.16 二极管测量电路 .....                                    | 49 |
| §2.17 温度测量电路 .....                                     | 51 |
| §2.18 电池低压检测及指示符驱动电路 .....                             | 53 |
| §2.19 液晶显示器标志符驱动电路 .....                               | 55 |
| §2.20 超量程闪烁报警电路 .....                                  | 59 |
| §2.21 自动关机电路 .....                                     | 59 |
| §2.22 保护电路 .....                                       | 61 |
| 第 3 章 数字万用表的常规使用与选购 .....                              | 66 |
| §3.1 数字万用表的操作面板与液晶屏显示内容 .....                          | 66 |
| §3.2 使用数字万用表的十点注意事项 .....                              | 70 |
| §3.3 数字万用表电压挡的使用 .....                                 | 71 |
| §3.4 数字万用表电流挡的使用 .....                                 | 75 |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| §3.5       | 数字万用表电阻挡的使用              | 78         |
| §3.6       | 数字万用表电容挡的使用              | 80         |
| §3.7       | 数字万用表 $h_{FE}$ 挡的使用      | 81         |
| §3.8       | 数字万用表二极管(蜂鸣器)挡的使用        | 82         |
| §3.9       | 数字万用表频率挡的使用              | 84         |
| §3.10      | 数字万用表测温挡的使用              | 85         |
| §3.11      | 数字万用表的选购                 | 85         |
| <b>第4章</b> | <b>数字万用表的变通使用</b>        | <b>92</b>  |
| §4.1       | 用数字万用表区分市电的火线和零线         | 92         |
| §4.2       | 用数字万用表判定电缆线(或电线)断芯的位置    | 94         |
| §4.3       | 用数字万用表检查设备外壳是否带电         | 95         |
| §4.4       | 用数字万用表 $h_{FE}$ 挡应急测量电阻  | 95         |
| §4.5       | 用数字万用表检测彩色电视机解码电路色信号     | 96         |
| §4.6       | 用数字万用表测试射频电视信号           | 97         |
| §4.7       | 用数字万用表测量静电               | 98         |
| §4.8       | 用数字万用表电容挡测量电感            | 98         |
| §4.9       | 用数字万用表检测电池的方法            | 101        |
| §4.10      | 用数字万用表测试逻辑电平             | 103        |
| §4.11      | 用数字万用表兼作信号源              | 103        |
| §4.12      | 用数字万用表测量大于 $20\mu F$ 的电容 | 107        |
| §4.13      | 用数字万用表测量大值电阻             | 108        |
| <b>第5章</b> | <b>用数字万用表检测常用电子元器件</b>   | <b>110</b> |
| §5.1       | 检测电阻器                    | 110        |
| §5.2       | 检测电位器                    | 111        |
| §5.3       | 检测电容器                    | 116        |
| §5.4       | 检测晶体二极管                  | 122        |
| §5.5       | 检测肖特基二极管                 | 125        |
| §5.6       | 检测整流桥                    | 128        |
| §5.7       | 检测双基极二极管(单结晶体管)          | 130        |
| §5.8       | 检测恒流二极管(CRD)             | 135        |
| §5.9       | 检测变容二极管                  | 137        |
| §5.10      | 检测单色发光二极管                | 141        |
| §5.11      | 检测变色发光二极管                | 143        |
| §5.12      | 检测闪烁发光二极管(BTS)           | 145        |
| §5.13      | 检测 LED 数码管               | 147        |
| §5.14      | 检测红外发光二极管                | 151        |
| §5.15      | 检测红外接收二极管                | 152        |

|              |                                                       |            |
|--------------|-------------------------------------------------------|------------|
| §5.16        | 检测晶体三极管 .....                                         | 153        |
| §5.17        | 检测单向晶闸管 .....                                         | 157        |
| §5.18        | 检测双向晶闸管 .....                                         | 162        |
| §5.19        | 检测结型场效应管(JFET) .....                                  | 166        |
| §5.20        | 检测 VMOS 场效应管 .....                                    | 169        |
| §5.21        | 检测光电耦合器 .....                                         | 171        |
| §5.22        | 检测压电蜂鸣片(PZT) .....                                    | 175        |
| §5.23        | 检测液晶显示器(LCD) .....                                    | 178        |
| §5.24        | 检测固态继电器 .....                                         | 179        |
| §5.25        | 检测指针式万用表表头的内阻 .....                                   | 184        |
| <b>第 6 章</b> | <b>数字万用表的功能扩展与改进 .....</b>                            | <b>186</b> |
| §6.1         | 提高数字万用表基准电压稳定性的简易方法 .....                             | 186        |
| §6.2         | 用数字万用表测量高压的方法 .....                                   | 187        |
| §6.3         | 利用 ICL7650 提高数字万用表电压挡的灵敏度 .....                       | 189        |
| §6.4         | 扩展 DT890B 型数字万用表电容挡量程的简易方法 .....                      | 191        |
| §6.5         | 为 DT830 型数字万用表增加测量绝缘电阻与小值电压( $\mu\text{V}$ )的功能 ..... | 192        |
| §6.6         | 数字万用表增设直流 $20\mu\text{A}$ 挡的简易方法 .....                | 193        |
| §6.7         | 用 DT1000 型数字万用表检测二极管正向导通压降( $V_F$ )的方法 .....          | 194        |
| §6.8         | 数字万用表测量占空比附加装置 .....                                  | 195        |
| §6.9         | 给数字万用表增加测量频率的功能 .....                                 | 197        |
| §6.10        | 扩展数字万用表测频范围的附加装置 .....                                | 200        |
| §6.11        | 给数字万用表增加测温功能 .....                                    | 202        |
| §6.12        | 给数字万用表增加读数保持功能 .....                                  | 206        |
| §6.13        | 给数字万用表增加自动关机功能 .....                                  | 208        |
| §6.14        | DT830 型数字万用表 9V 供电的改进 .....                           | 210        |
| §6.15        | 数字万用表电源升压电路 .....                                     | 212        |
| §6.16        | 数字万用表 9V 叠层电池替代电路 .....                               | 213        |
| <b>第 7 章</b> | <b>数字万用表检修 .....</b>                                  | <b>215</b> |
| §7.1         | 检修数字万用表的常用仪器 .....                                    | 215        |
| §7.2         | 检修数字万用表的一般步骤 .....                                    | 217        |
| §7.3         | 检查数字万用表的常用方法 .....                                    | 220        |
| §7.4         | 数字万用表常见故障检修 .....                                     | 224        |
| §7.5         | 数字万用表单片 A/D 转换器的功能检查 .....                            | 236        |
| §7.6         | DT890 系列数字万用表故障检修 .....                               | 238        |
| §7.7         | 数字万用表的误差计算与调试 .....                                   | 244        |
| §7.8         | 数字万用表故障检修 40 例 .....                                  | 265        |

# 第 1 章 数字万用表的特点与技术性能

本章介绍数字万用表的特点及其主要技术性能。通过阅读本章内容，读者可对数字万用表有一个总体了解。

## §1.1 数字万用表的特点

### 一、准确度和分辨力高

数字万用表的准确度相当高，这是指针式万用表所望尘莫及的。例如，目前大量使用的  $3\frac{1}{2}$  位或  $4\frac{1}{2}$  位数字万用表的测量准确度为  $\pm 0.5\% \sim \pm 0.03\%$ ，而指针式万用表(使用磁电系表头)，其准确度仅为  $2.5\%$ ，较高者的准确度也只有  $1.0\%$ 。至于  $5\frac{1}{2}$  位或  $8\frac{1}{2}$  位的数字万用表，其准确度就更高了，分别为  $\pm 0.002\%$  及  $\pm 0.00006\%$ 。

数字万用表的分辨力也是很高的。例如， $3\frac{1}{2}$  位和  $3\frac{3}{4}$  位数字万用表的分辨力为  $100\mu\text{V}$ ； $4\frac{1}{2}$  位、 $4\frac{3}{4}$  位数字万用表的分辨力为  $10\mu\text{V}$ ；而  $5\frac{1}{2}$  位、 $6\frac{1}{2}$  位、 $7\frac{1}{2}$  位、 $8\frac{1}{2}$  位数字万用表的分辨力分别为  $1\mu\text{V}$ 、 $100\text{nV}$ 、 $10\text{nV}$  和  $1\text{nV}$ 。

### 二、输入阻抗高

数字万用表的输入阻抗很高，在测量过程中对被测电路的影响极小，因此测量的准确性较高。例如在测量电压时， $3\frac{1}{2}$  位数字万用表直流挡的输入阻抗一般为  $10\text{M}\Omega$ ，交流挡不小于  $2.5\text{M}\Omega$ 。

在测量电阻时，数字万用表的高阻挡测试电流不超过  $1\mu\text{A}$ ， $200\Omega$  挡的最大测试电流(即把两表笔短路时的电流)也仅为  $1\text{mA}$  左右。而指针式万用表在小倍率电阻挡上(如  $R\times 1$  挡)的短路电流可达数十毫安。因此数字万用表更适合对一些低功耗和易受温度影响的元器件(如热敏电阻)进行检测。

### 三、测量速率快

数字万用表的测量速率主要取决于 A/D 转换器的转换速率。结构不同的数字式万用表，其转换速率可以相差很大。 $3\frac{1}{2}$  位、 $4\frac{1}{2}$  位数字万用表的测量速率通常为  $2\sim 4$  次/秒， $4\frac{3}{4}$  位至  $7\frac{1}{2}$  位的数字万用表的测量速率一般可达每秒几十次甚至更高。

### 四、过载能力强

对于数字万用表，在使用过程中只要不超过规定的极限值，偶尔出现误操作，一般不会损坏表内的大规模集成电路，它的过载能力要比指针式万用表强得多。这是由于数字万用表



本身的输入阻抗很高，并且具有比较完善的保护电路所决定的。

### 五、测量的参数多

一般的指针式万用表只能测量交直流电压，交直流电流和电阻。而数字万用表除了能测量上述的参数外，一般还能测量晶体二极管的正向压降和三极管的共射极电流放大系数  $h_{FE}$ 。一些数字万用表还具有电容、频率和温度等测量功能。较新型的数字万用表还增设了电导测量功能。另外，由电子蜂鸣器的声响还可判断线路的通断，这给电子线路的调试和维修带来很大的方便。

### 六、功能齐全

首先，数字万用表具有自动调零功能(电容挡除外)，这保证了当被测量为零时读数也为零；其次，它能自动转换并显示极性，即当被测电压/电流极性与表笔极性不一致时，仪表能自动显示负号，而不必像指针式万用表那样需要调换表笔。对于非自动量程切换的数字万用表，当它过载时，能自动给出过载显示(一般显示“1”或“-1”，负号显示与否取决于仪表输入的极性)；第三，当电池电压过低造成供电不足时，仪表能通过显示特定的符号(如“LO BATT”、“←”等字样)自动进行提示。另外，某些数字万用表还能自动显示被测量的单位和符号(如“mA”、“k $\Omega$ ”等字样)。

数字万用表的数字显示使得测量结果的读数更加迅速准确，从而克服了人为的读数误差，也减轻了使用者的视觉疲劳。

数字万用表的优点还体现在它小巧的体积和轻巧的重量上。仪表内部采用了大规模集成电路和低功耗电路元件，使得仪表重量一般不超过 300 克。小巧的体积使它几乎可以装入衣袋内，这给经常外出进行维修服务的人员带来极大的便利。

### 七、不足之处

数字万用表的不足之处主要表现在它难以像指针式万用表那样直观地反映被测量的连续变化过程和变化趋势。另外，由于这种仪表采用了专用集成电路芯片，所以它的维修相对要难一些。

## §1.2 数字万用表的主要技术性能

数字万用表的说明书不仅对仪表的使用方法作了具体的说明，而且还标明了仪表的技术特性。只有理解了这些技术特性，才能正确地选择和使用仪表。

### 一、测试功能

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( $\Omega$ )、二极管正向压降( $V_F$ )、晶体管共发射极电流放大系数( $h_{FE}$ )，还能测量电容量(C)、电导(G)、温度( $t$ )和频率( $f$ )，并增加了用以检查线路通断的蜂鸣器挡(BZ)以及低功率法测电阻挡(LO  $\Omega$ )。有的仪表还具有电感挡、信号挡以及 AC/DC 自动转换功能和电容挡自

动转换量程功能。

新型数字万用表大多增加了读数保持(HOLD)、逻辑测试(LOGIC)、真有效值测量(TRMS)、相对值测量(REL  $\Delta$ )和自动关机(AUTO OFF POWER)等功能。

最新开发的 3 $\frac{3}{4}$ 位~4 $\frac{3}{4}$ 位智能数字万用表,将高性能与低成本集于一身,大都具有下述功能:液晶条图显示(LCD Bargraph)、多重显示、最小值/最大值存储方式(Min/Max Mode)、峰值保持(PK HOLD)、数据存储(MER)、读存储数据(MEM RCL)、复位(RST)、数据输出(COMM)、预置(SET)、设定测量范围的上/下限(UP $\wedge$ , DOWN $\vee$ )、自动校准(AUTO CAL)、功率电平测量(dBm)、电源电压设定(S)和快速测量(FAST)等。

## 二、测量范围

测量范围是指仪表对被测量进行测量时所能达到的范围。一般包括多量程的划分、各量程的测量范围(从零到满度显示值)、量程的选择方式(如手动、自动)及被测量极性的显示情况等。

例如,常用的 DT890 型 3 $\frac{1}{2}$ 位数字万用表,它把直流电压的 0~1000V 测量范围划分为 5 个量程(0.2V、2V、20V、200V 及 1000V),自动显示极性,手动切换量程。

再如,4 $\frac{1}{2}$ 位多功能数字万用表的测量范围一般为,DCV: 0.01mV~1000V; ACV: 0.01mV~700V 或 750V; DCA: 0.1 $\mu$ A~20A; ACA: 1 $\mu$ A~20A;  $\Omega$ : 0.01 $\Omega$ ~20M $\Omega$ ,少数仪表可达 200M $\Omega$ ; 电导: 0.1nS~100nS; 电容 C: 0.1pF~20 $\mu$ F; 频率  $f$ : 10Hz~20kHz,部分仪表可达 200kHz;  $h_{FE}$ : 0~1000。以上测量范围可满足常规电子测量的需要。智能数字万用表进一步扩展了量程,其测量范围更宽。

## 三、量程

量程是指在不改变显示倍乘系数(如小数点位置)的情况下,仪表能够测量输入量的一个连续范围。某量程的满度值(也叫满量程)是指该量程有效测量范围上限的绝对值。

数字万用表的电压挡量程有基本量程和非基本量程之分。基本量程是指被测电压不经分压器衰减而直接进入数字表头的量程,因而基本量程的测量误差最小。除基本量程外的其他量程都称为非基本量程。它们的输入电压通过分压器被衰减到基本量程之内,因而其输入范围也都高于基本量程的输入范围。

## 四、准确度

任何仪表在测量时都不可避免地会产生误差。仪表的测量误差是仪表本身最重要的技术特性之一。仪表的准确度则是仪表的测量误差限,它表示在规定的条件下仪表的测量误差不会超过它给定的一个误差范围。因此,测量误差表示仪表示值与被测量的真值之间的差异程度,它是相对于某一测量结果而言的,而仪表的准确度则是相对于某一台仪表而言的。

仪表的测量误差包含两部分,即依赖于被测量大小而变化的误差和不依赖于被测量大小变化的误差。前一项称为相对误差,后一项称为固定误差。总的误差是这两项误差的合成。

数字万用表的准确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合。它表示测量值与真值的一致程度,也反映测量误差的大小。一般来讲,准确度越高,测量误差就越小,反之亦然。

准确度有两种表达方式,分别如下:

$$\text{准确度} = \pm(a\% \text{RDG} + b\% \text{FS}) \quad (1-1)$$

$$\text{准确度} = \pm(a\% \text{RDG} + n \text{个字}) \quad (1-2)$$

RDG——仪表的显示值，即读数，也有的仪表用  $U_x$  表示显示值；

FS——仪表的满度值，也有的仪表用  $U_M$  (或  $V_M$ 、RNG) 表示满度值；

$a$ ——误差的相对项系数；

$b$ ——误差的固定项系数。

数字万用表的相对误差包括分压器误差、输入量到直流电压的转换误差和 A/D 转换器中基准电压的误差；固定误差主要是由 A/D 转换器的量化误差、零点漂移及内部噪声等因素引起的。一般也称前一项为读数误差，后一项为满度误差。在式(1-2)中， $n$  个字和表示固定误差的  $b\% \text{FS}$  实质上是一样的。只要把  $n$  个字折合成满量程的百分数，即得到了  $b\% \text{FS}$  表示的  $b$  值。

数字万用表(DMM)的准确度远高于指针式万用表。以基本量程的准确度指标(不含数字化误差)为例， $3\frac{1}{2}$ 位、 $4\frac{1}{2}$ 位 DMM 分别可达  $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.03\%$ ， $8\frac{1}{2}$ 位 DMM 可达  $\pm 0.00006\%$ 。

有些万用表的说明书中使用“精度”一词来表示仪表测量误差的大小，这是不规范的。根据 JJG1001-91“通用计量名词及定义”的规定，精度作为精密度(precision)的简称，用来表示在一定条件下对同一量值多次重复测量时各次测量结果的差异程度。仪表的测量误差一律用准确度(accuracy)表示。

## 五、分辨力与分辨率

分辨力是指使显示器末位跳一个字所需输入的量值，它表示仪表可读最小量的数对被测量的可表达程度。分辨力能反映出仪表灵敏度的高低。在不同的量程上，仪表的分辨力是不同的。在最低量程上仪表具有最高的分辨力，此最高分辨力定义为数字万用表的分辨力指标。在许多场合，最高分辨力又称为仪表的灵敏度。

数字仪表的分辨力随显示位数的增加而提高。不同位数的 DMM 所能达到的最高分辨力指标如下： $100\mu\text{V}$ ( $3\frac{1}{2}$ 位)、 $10\mu\text{V}$ ( $4\frac{1}{2}$ 位)、 $1\mu\text{V}$ ( $5\frac{1}{2}$ 位)、 $100\text{nV}$ ( $6\frac{1}{2}$ 位)、 $10\text{nV}$ ( $7\frac{1}{2}$ 位)和  $1\text{nV}$ ( $8\frac{1}{2}$ 位)。

分辨力指标亦可用分辨率来表示。分辨率是指仪表所能显示的最小数字与最大数字的百分比。例如，DT890 型  $3\frac{1}{2}$ 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  $1/1999 \approx 0.05\%$ 。同理可计算出， $3\frac{2}{3}$ 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、 $7\frac{1}{2}$ 位和  $8\frac{1}{2}$ 位 DMM 的分辨率依次为  $0.033\%$ 、 $0.025\%$ 、 $0.005\%$ 、 $0.0025\%$ 、 $0.0005\%$ 、 $0.00005\%$ 、 $0.000005\%$ 和  $0.0000005\%$ 。

需要指出的是，分辨力与分辨率是有所区别的。例如， $3\frac{1}{2}$ 位、 $3\frac{2}{3}$ 位和  $3\frac{3}{4}$ 位仪表的分辨力相同，都是  $100\mu\text{V}$ ，但三者的分辨率却是不同的，分别为  $0.05\%$ 、 $0.033\%$ 和  $0.025\%$ ，这是由定义式所决定的。

另外，还应明确，分辨力与准确度是属于两个不同的概念。分辨力表征的是仪表对微小电压的“识别”能力，即其“灵敏性”，而后者反映的是测量的“准确性”，即测量结果与真值的一致程度。二者无必然的联系，不能混为一谈。实际上，分辨力仅仅与仪表的显示位数有关，而准确度则与仪表内部 A/D 转换器、功能转换器的综合误差以及量化误差有关。在实际应用中，并不是准确度和灵敏度越高越好，还要根据被测的具体对象而定，否则也是一种

浪费。

## 六、输入阻抗

数字万用表的输入阻抗是指它的交直流电压挡在工作状态下从输入端看进去的等效阻抗。在测量电压的过程中，由于仪表的输入阻抗为有限值，因此它总要从被测电路中吸取电流而影响被测电路的工作状态，使测量结果产生误差。这一误差的大小不仅与仪表的输入阻抗有关，而且还与被测电路的等效输入电阻有关。

在测量电压时，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中吸取的电流极小，不会影响被测电路或信号源的工作状态，能够减小测量误差。3½位数字万用表的DCV挡输入阻抗一般为10MΩ，5½位~8½位智能数字万用表的输入阻抗可大于10000MΩ。ACV挡受输入电容的影响，其输入阻抗一般低于DCV挡，只适于测量中、低频电压，测高频电压需借助于高频探头(仪表附件)。

## 七、抗干扰能力

引起数字万用表测量误差的干扰源不外乎内部干扰和外部干扰两个方面。内部干扰有漂移和各种噪声；外部干扰有共模和串模干扰之分。对于使用者来说，更关心的是外部干扰的来源及抑制。

串模干扰和共模干扰是按干扰源进入输入回路的方式划分的。串模干扰是指以串联的方式与被测量一起作用于仪表输入端的干扰电压。最常见的串模干扰形式是叠加在直流信号上的50Hz工频及其谐波干扰信号。用来表征仪表对串模干扰抑制能力的指标是串模抑制比SMRR，它定义为串模干扰电压的峰值 $U_{sm}$ 与仪表显示值产生的最大误差 $\Delta U_{sm}$ 之比，并用对数表示，即 $SMRR = 20\lg(U_{sm}/\Delta U_{sm})\text{dB}$ 。

共模干扰是指同时加在仪表两个输入端子上的干扰电压。这种干扰可能是直流，也可能是工频或高频交流电压。与SMRR类似，用来表征仪表对共模干扰抑制能力的指标是共模抑制比CMRR，它定义为共模干扰电压的峰值 $U_{cm}$ 与仪表显示值产生的最大误差 $\Delta U_{cm}$ 之比，并用对数表示，即 $CMRR = 20\lg(U_{cm}/\Delta U_{cm})\text{dB}$ 。

由于数字万用表内部的A/D转换器为双积分式，因此它对50Hz工频一类的周期信号产生的串模干扰有很强的抑制能力。同时，这类A/D转换器对共模干扰亦有较强的抑制能力，其共模抑制比可达85~120dB。抑制比的数值越大，表示抗干扰能力越强。

5½位以下的数字万用表普遍采用积分式A/D转换原理，只要选择的正向积分时间恰好等于串模干扰信号周期的整倍数，就能有效地抑制串模干扰。这是因为串模干扰信号在正向积分阶段被平均掉的缘故。

## 八、测量速率

测量速率是指数字万用表单位时间(一秒钟)内对被测量测量的次数，也就是仪表每秒钟内给出显示值的次数，其单位是“次/秒”。

测量速率主要取决于A/D转换器的转换速率。对于采用不同类型A/D转换器的数字万用表，其测量速率差别很大。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需要的时间叫测量周期。显而易见，测量速率与测量周期呈倒数关系，测量速率

越高，测量周期就越短。 $3\frac{1}{2}$ 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的测量速率可达20次/秒。 $5\frac{1}{2}$ 位~ $7\frac{1}{2}$ 位数字万用表的测量速率一般为几十次每秒以上，有的能达到几百甚至上千次每秒。

测量速率与准确度指标存在着矛盾，二者难以兼顾。通常是准确度越高，测量速率越低。

## 九、显示位数

显示位数是表征数字万用表性能的最基本也是最直观的指标之一，它是以完整显示数字的多少来确定的。

数字万用表的显示位数通常为 $3\frac{1}{2}$ 位~ $8\frac{1}{2}$ 位。具体讲，有 $3\frac{1}{2}$ 位、 $3\frac{2}{3}$ 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、 $7\frac{1}{2}$ 位和 $8\frac{1}{2}$ 位共9种。

判定数字万用表的显示位数，可遵循以下两条原则：其一，能显示从0~9中所有数字的位是整数位；其二，分数位的数值是用最大显示值中最高位数字作分子，用满量程时最高位数字作分母。例如，某数字万用表的最大显示值为 $\pm 1999$ ，满量程计数值为2000，这表明该仪表有3个整数位，而分数位的分子是1，分母是2，故称之为 $3\frac{1}{2}$ 位，读作“三位半”，其最高位只能显示0或1(0通常不显示)。

$3\frac{2}{3}$ 位(读作“三又三分之二位”)数字万用表的最高位只能显示从0~2的数字，故最大显示值为 $\pm 2999$ 。在同样情况下，它要比 $3\frac{1}{2}$ 位DMM的量限高50%，后者仅为 $\pm 1999$ 。应当指出，目前也有人把 $3\frac{2}{3}$ 位仪表仍称作 $3\frac{1}{2}$ 位仪表，但必须指明其量限已扩展50%，以免将二者混淆。

$3\frac{3}{4}$ 位(读作“三又四分之三位”)数字万用表的最高位可显示从0~3的数字，因此最大显示值为 $\pm 3999$ ，其量限比 $3\frac{1}{2}$ 位仪表高1倍。使用 $3\frac{3}{4}$ 位数字万用表测量电网电压有许多优越之处。例如，普通 $3\frac{1}{2}$ 位DMM的次高交流电压挡为200V，若要测量220V或380V电网电压，必须选择最高交流电压挡(通常为700V挡，少数表为750V挡)，该挡分辨力仅1V。相比之下， $3\frac{3}{4}$ 位DMM的次高ACV挡为400V，最适宜测量工频电网电压，既不欠量程，也不超量程，其测量准确度优于上述700V挡，而分辨力可提高10倍，达到0.1V，与 $4\frac{1}{2}$ 位DMM的700V挡分辨力相同。

普及型数字万用表一般属于 $3\frac{1}{2}$ 位仪表。 $4\frac{1}{2}$ 位数字万用表分袖珍式、台式两种。 $5\frac{1}{2}$ 位及 $5\frac{1}{2}$ 位以上的仪表大多属于台式智能数字万用表。

## 十、仪表类型

按照量程转换方式来分类，数字万用表通常可分为3种类型：

- (1) 手动量程(MAN RANGE)；
- (2) 自动量程(AUTO RANGE)；
- (3) 自动/手动量程(AUTO/MAN RANGE)。

按照功能、用途及价格的不同来分类，数字万用表可分成9种类型：

- (1) 低档数字万用表(亦称普及型数字万用表)；
- (2) 中档数字万用表；
- (3) 中、高档智能数字万用表；
- (4) 数字/模拟混合式仪表；



- (5) 数字/模拟条图双显示仪表;
- (6) 多重显示仪表;
- (7) 专用数字仪表;
- (8) 由特制集成电路(ASIC)构成的仪表;
- (9) 万用示波表(将数字万用表、数字存储示波器、函数发生器集于一身)。

## 十一、集成化

数字万用表采用单片 A/D 转换器, 外围电路比较简单, 只需少量辅助芯片和元器件。近年来, 随着电子技术的飞速发展, 单片 DMM 专用芯片不断问世, 使用一片集成电路(IC)即可构成功能比较完善的自动量程数字万用表, 不仅能简化设计而且还能有效地降低成本。

## 十二、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。3½位、4½位袖珍式 DMM 的整机功耗仅几十毫瓦, 适宜用 9V 叠层电池供电。5½位~8½位 DMM 的总功耗一般也只有十瓦至几十瓦。

## 十三、保护功能

数字万用表一般都具有比较完善的保护功能, 过载能力强。使用中只要不超过规定的极限指标, 即使出现误操作(例如用电阻挡去测 220V 交流电压), 一般也不会损坏仪表内部的大规模集成电路。但是, 任何保护电路都不可能做到万无一失, 一旦保护电路出现故障, 就会使保护功能失效。所以, 应力求避免误操作。

# 第2章 数字万用表的构成与测量电路工作原理

本章介绍数字万用表的基本构成、A/D 转换器的基本原理及各种芯片的技术特性，并讨论如何用这些芯片来构成数字电压表，最后介绍数字万用表测量电路的工作原理。

## §2.1 数字万用表的基本构成

数字万用表是由数字电压表(常简称为 DVM)配上各种变换器所构成的，因而具有交直流电压、交直流电流和电阻等多种测量功能。数字电压表是数字万用表的核心。数字电压表的线路可分为模拟电路、数字电路和供电电源三大部分，其结构如图 2-1 所示。

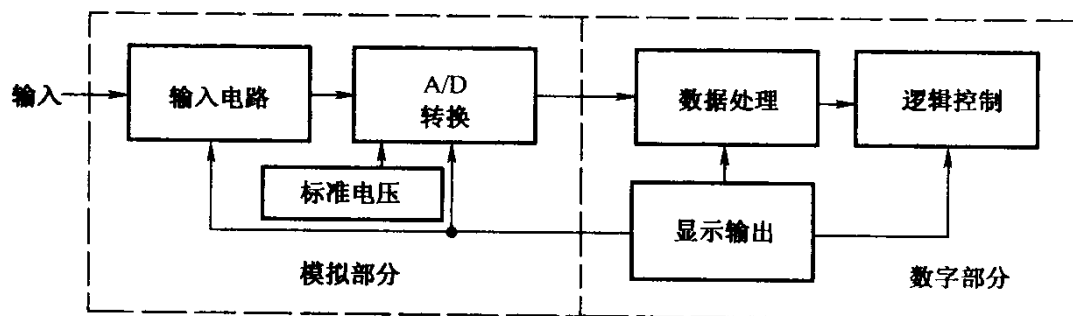


图 2-1 数字电压表的原理框图

图中的输入电路一般由衰减器/放大器构成。A/D 转换电路是数字电压表的核心，它决定了数字电压表技术性能的基本特征。不同的 A/D 转换电路构成了不同原理的数字电压表。数据处理和逻辑控制部分基本上决定了仪表的自动化和智能化程度。它们可以简单地由计数器和一些门电路及触发器构成，也可以由微处理器组成一个复杂的信号处理系统。数字显示器直观而清晰地显示出测量结果。

数字电压表的分类方法很多，按工作原理(即 A/D 转换电路的类型)分类，能比较充分地反映数字电压表的技术性能。表 2-1 列出了不同工作原理的数字电压表基本性能的比较。

表 2-1 不同工作原理的数字电压表的性能比较

| 工作原理  | 准确度 | 分辨力 | 采样速度 | 抗干扰能力 | 线路结构 | 其 他            |
|-------|-----|-----|------|-------|------|----------------|
| 比较型   | 较高  | 较高  | 快    | 差     | 较复杂  | 常用于实现快速检测      |
| V/T 型 | 较低  | 较低  | 不快   | 差     | 简单   | 稳定性好，普遍应用于低速测量 |
| 积分型   | 较高  | 高   | 慢    | 强     | 简单   | 成本低，常用于要求不高的场合 |
| 复合型   | 高   | 高   | 慢    | 强     | 复杂   | 成本较高，综合技术性能好   |

按使用场所分类可分为实验室型、通用型和面板型。实验室型仪表准确度高,使用条件严格,一般用做计量标准或精密测量。通用型仪表用于一般的测量。面板型仪表结构简单,准确度高,多安装在面板上作为指示电表用,因此这类仪表也称数字面板表,简称 DPM(Digital Panel Meter)。数字电压表也可按使用方式分为台式、便携式和袖珍式(或称手持式)等。

为了说明数字万用表的结构特点,下面将其与指针式万用表的结构进行一下比较。

图 2-2(a)所示为指针式万用表的结构框图,框图中的表头部分是一磁电系电流表,功能选择和量程选择由转换开关来实现。由于表头测量的基本量是直流电流,因此指针式万用表的其他被测量只有通过各种变换器转换成直流电流才能得以测量。这些变换器通常是由一些精密的电阻网络组成的。对于电阻/电流变换电路,还需要电池作为电源。

图 2-2(b)是数字万用表的结构框图,比较两种框图可以看出两点:第一,数字万用表测量的基本量是直流电压,而不是直流电流;第二,在数字万用表中,用 A/D 转换、显示逻辑及显示器组成的单一量程的数字电压表代替了指针式万用表中简单的磁电系表头。

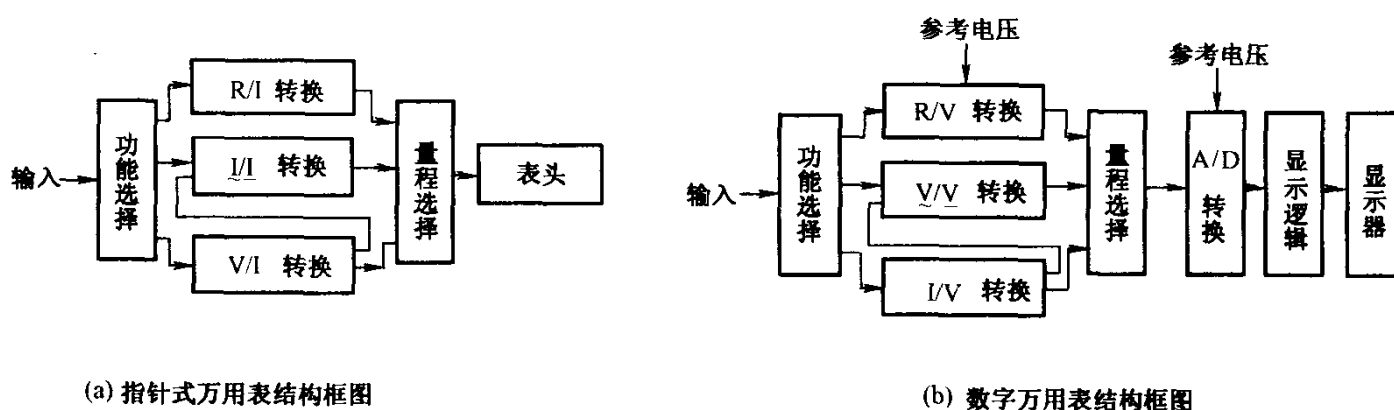


图 2-2 指针式万用表与数字万用表结构比较

数字万用表的 A/D 转换器一般都采用双积分式原理,并且把 A/D 转换器与能够直接驱动液晶显示器的显示逻辑集成在一块集成电路芯片上。这样,只要在这块集成电路芯片的周围配上相关的电阻器和电容器,并配上一块液晶显示器,便组成了数字万用表表头。数字万用表的整体性能主要由这一数字表头的性能所决定。

在袖珍式数字万用表中,这类集成电路芯片(A/D 转换器)的典型产品有 7106、7116、7136(3½位)、7135 和 7129(4½位)。

数字万用表与指针式万用表相同部分的电路主要是输入信号至直流电压的变换电路,以及电压与电流的测量电路,这些电路一般由无源的分压或分流电阻网络构成。而数字万用表的交直流转换电路与 R、C 等电参数测量的转换电路一般都采用有源器件组成的网络来实现,这样可有效地改善转换电路的线性度和准确度。

数字万用表的功能选择也是通过转换开关或琴键开关的切换来实现的。量程选择的切换,既可以通过手动的转换开关切换,也可以通过自动量程切换电路来实现。

## §2.2 双积分式 A/D 转换器的工作原理

由上一节的内容可知,数字万用表是在数字电压表的基础上扩展而成的,而 A/D 转换器

又是数字电压表的核心。因此，A/D 转换器的性能从根本上决定了数字万用表的性能和所具有的特点。

众所周知，在数量上连续变化的量称为模拟量，而在数量上离散变化的量称为数字量，数字量的大小和每次增减变化都是某一最小数量单位的整倍数。对于自然界中形形色色的物理量的变化过程，既可以用模拟量来表示，也可以用数字量来表示。当然，一连续变化过程的数字量表示及一离散变化过程的模拟量表示与各自的实际情况是有出入的。因此，一个物理量用模拟量和用数字量的两种表示是可以相互转换的，尽管这种转换存在误差。

当用数字量来表示某一连续变化的模拟量时，就称这一模拟量被“量化”了。所谓 A/D 转换，就是这样一个量化过程，通过这一过程可以把一连续变化的模拟量转换为用一最小量化值(或称 1 比特权重)和与最小量化值相对应的一数字量来表示。最小量化值与数字量的对应关系取决于数字量的编码方式。量化过程产生的误差称为量化误差。

A/D 转换器按原理可划分为直接型和间接型两大类。但从本质上讲，A/D 转换的过程，实际上都是模拟输入电压与参考电压(或称基准电压)的比较过程。在直接型 A/D 转换器中，这一比较过程是直接完成的，而间接型 A/D 转换器则要首先将模拟输入与基准电压转换成某种中间量(如时间、频率等)，然后再由中间量的比较完成转换过程。

数字万用表中的 A/D 转换器大多为双积分式。双积分式属于间接转换型，它把输入的模拟电压与参考电压的比较，通过两次积分过程转换为两个时间间隔的比较，由此将模拟电压转换为与其平均值成正比的时间间隔，然后用时钟脉冲计数器测量这一时间间隔，所得的计数值即为 A/D 转换的结果。

A/D 转换器的原理电路图如图 2-3 所示。在图 2-3 中，虚线框内的电路(显示器除外)功能可全部集成在一块芯片上，具有这些功能的芯片就叫做 A/D 转换器，较常见的有 ICL7106、ICL7107 等多种型号，它们都属于双积分式 A/D 转换器。双积分式 A/D 转换器内部电路虽然很复杂，但根据图 2-3 的电路可以清楚地说明其工作原理。它在一个测量周期内的工作过程如下：

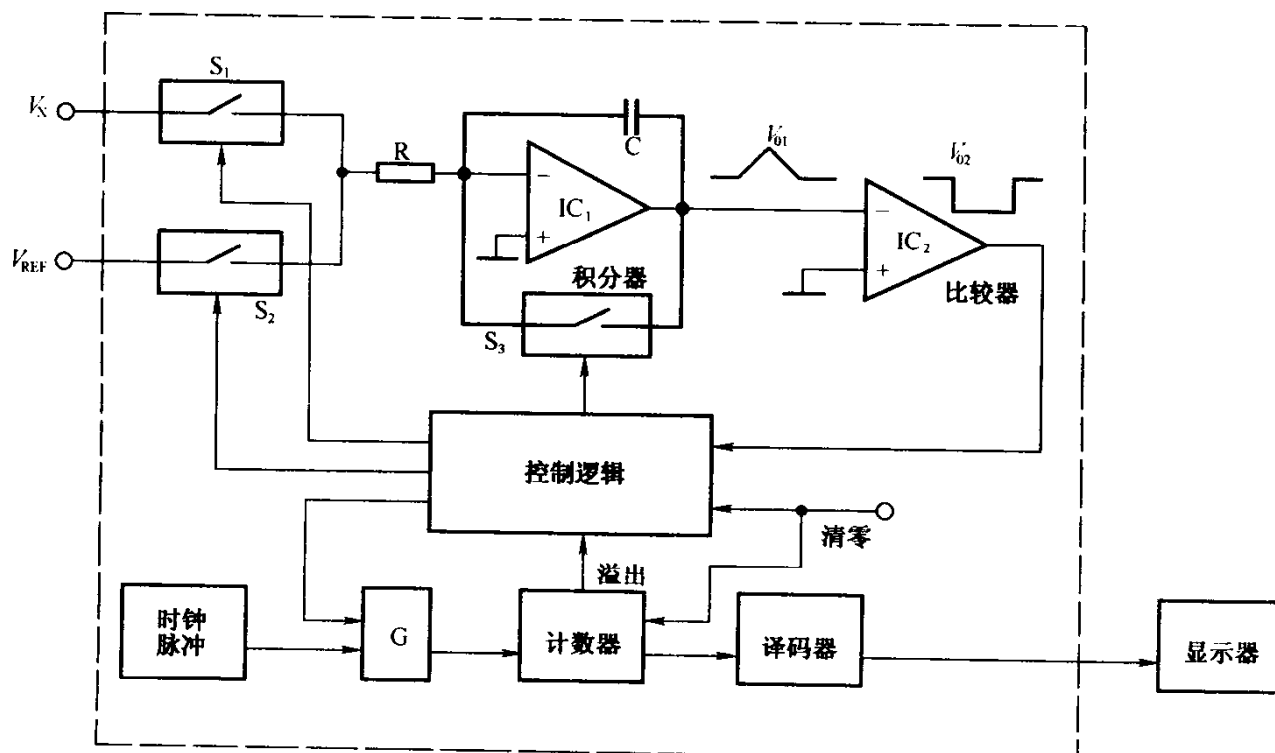


图 2-3 A/D 转换器工作原理电路图