

电磁测量与仪表丛书

数 字 电 压 表 的 电 气 性 能 测 试

冯占岭 魏德生 编著

王 镒 李继凡 李 韬 审校

机 械 工 业 出 版 社

本书系统地介绍了数字电压表的各种电气性能及其测试，内容包括数字电压表的主要电气指标的检定测试方法和测量原理、误差分析和实验测量技术，并结合实例进行了详细说明。编写内容突出了数字电压表的检测和应用技术，实用性强，以帮助广大读者解决测试、检验和使用中存在的具体问题。

本书可供科研单位、计量测试单位、工矿企业以及使用和维修数字电压表的工程技术人员阅读。也可供高等院校有关专业的师生参考。

数字电压表的电气性能测试

冯占岭 魏德生 编著
王镒 李继凡 李韬 审校

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 $1/32$ 印张 10 $1/4$ ·字数 268 千字

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000·定价 3.00 元

统一书号: 15033·6106

目 录

常用符号表

绪论	1
----	---

第一章 数字电压表的基本原理与电气性能	4
---------------------	---

一、数字电压表的分类	4
------------	---

二、直流数字电压表工作原理简介	6
-----------------	---

三、数字电压表的数字显示器和供电电源	18
--------------------	----

四、数字电压表的操作、预调和校准	23
------------------	----

五、数字电压表的特点	28
------------	----

六、数字电压表的主要工作性能	31
----------------	----

七、几种典型数字电压表的主要电气指标	38
--------------------	----

第二章 数字电压表的误差分析	45
----------------	----

一、测量误差的表示方法	45
-------------	----

二、数字电压表的误差源	48
-------------	----

三、数字电压表的误差表达式	59
---------------	----

四、输入电路对测量误差的影响	66
----------------	----

五、变换量程时的落差	72
------------	----

六、数字电压表的误差计算	77
--------------	----

第三章 直流数字电压表误差的检定方法	82
--------------------	----

一、检定的一般规则	82
-----------	----

二、直流电压及数字电压表传递系统	92
------------------	----

三、数字电压表的准确度等级	95
---------------	----

四、直接比较法	96
---------	----

五、直流标准电压源法	100
------------	-----

六、直流标准仪器法	106
-----------	-----

七、高准确度检定标准和误差分析	117
-----------------	-----

八、自校式检定装置及操作方法	124
----------------	-----

第四章 数字电压表主要电气指标的测试	138
--------------------	-----

一、输入特性的测试	138
-----------	-----

二、抗干扰能力的测试	144
------------	-----

三、稳定误差的测试	148
-----------	-----

四、线性误差的测试	151
-----------	-----

五、显示能力和分辨力的测试	153
---------------	-----

六、温度系数的测试	157
七、其它一般项目的检查和试验	158
八、测试结果的处理	165
九、数字电压表的检测与应用技术	169
第五章 数字电压表的干扰抑制和保护技术	179
一、干扰的型式和特征	179
二、串模干扰电压的抑制	183
三、共模干扰电压的抑制	191
四、数字测量电路中的干扰及屏蔽	199
五、数字电压表保护端的连接及测量技术	208
第六章 数字多用表的原理与特性	218
一、数字多用表概述	218
二、交流电压的特征量	220
三、平均值电压表转换器	225
四、有效值和峰值电压表转换器	234
五、数字多用表的欧姆转换器和电流转换器	241
六、数字多用表的技术指标	246
七、微处理器式数字多用表及其特性	251
八、数字多用表的规格选择	256
第七章 数字多用表的检定和测试	259
一、交流数字电压表的误差检定	259
二、交流数字电压表测试中的波形响应	270
三、检定和使用交流数字电压表中的问题和注意事项	277
四、交流电压标准的比对和校准	282
五、交流数字电压表主要性能测试	285
六、数字欧姆表的检定与测试	291
七、数字电流表的检定与测试	295
八、微处理器式数字多用表的运算和自诊	300
九、仪表的自动校验	303
附录	306
一、国产主要DVM电气性能统计表	306
二、国外主要DVM电气性能统计表	310
参考文献	318

绪 论

科学技术的发展, 不仅为测量仪表提供了新原理、新技术和新型元器件, 同时又对测量仪表提出了更新更高的要求。数字式电压表就是适应这种需要迅速发展起来的。

数字电压表 (DVM), 就是把连续的被测量自动地转换成断续的数字量, 并以十进数字自动显示测量结果的一种测量仪表。这是一种新型仪表, 它把电子技术、计算技术、自动化技术的成果与精密电测量技术密切地结合在一起, 成为仪器仪表领域中独立而完整的一个分支。

一台典型的直流数字电压表主要由输入电路、模数变换器 (A/D)、标准电压源、逻辑控制电路、电子计数器(或寄存器)、数字显示器、供电电源等几部分组成, 如图 1 所示。

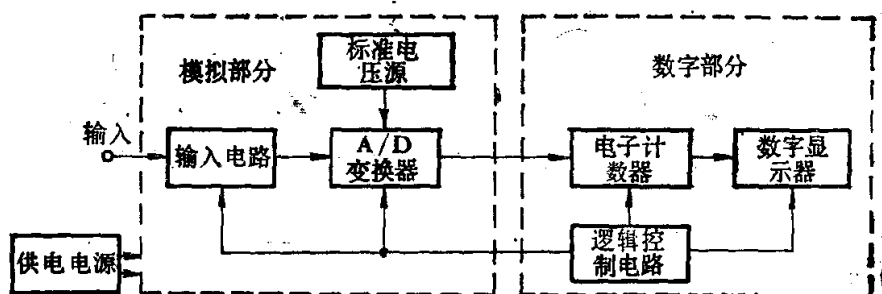


图1 直流数字电压表结构框图

输入电路一般由衰减器及放大器构成, 它和标准电压源、A/D变换器组成模拟电路部分; 而计数器、显示器和逻辑控制电路组成数字电路部分。因此一台DVM除供电电源外, 主要由模拟和数字两大部分构成。

1952年, 美国NLS(Non-Linear System)公司首创四位数字电压表, 至今三十年来, 经历了不断改进和提高的过程。数字电压

表是从电位差计的自动化考虑研制出来的，开始是四位，然后是五位、六位，而现在发展到七位、八位数码显示；从最初的一、两种工作原理发展到几十种原理；从最早采用继电器、电子管发展到全晶体管化、集成电路化、微处理器化；从一台仪表只有一种功能到能测十几种参数的多用型仪表。显示器件也从辉光数码管发展到等离子体显示、液晶显示等。从它的发展趋势看，其体积越来越小、功耗越来越低、价格逐渐下降，可靠性和电气性能逐渐提高。

我国研制数字电压表是从六十年代初期发展起来的，1964年北京、上海同时研制出五位表。目前我国已有五十多个单位研制和生产数字仪表，准确度达十万分之一甚至更高，分辨力已达到 $0.01\mu\text{V}$ ，微处理器式数字表已研制成功并开始投产。

随着工业、农业、国防和科学技术的现代化，DVM的发展和与应用与日俱增。目前我国不仅研制生产了各种数字电压表，还从国外进口了大量的数字电压表。这些数字电压表广泛应用于电磁测量、无线电测量以及各种非电量测量。然而DVM的检定和测试方法并不一致，电气方面的技术指标和量值传递也不统一，且缺少测量标准和测试手段。因此，必须充分了解DVM的各种电气性能，掌握它的测试方法和校验原理，才能正确地操作和应用。

DVM的种类和型式尽管很多，它们彼此在内部结构和性能上也往往相差很大。但对于使用者来说，无论其种类和结构如何，掌握它的主要电气性能的技术指标是最重要的；而评价某种DVM的优劣，只有通过精确地测试才能判断出来。

在电磁测量和电子测量技术领域，电压是最重要的基本参量之一。由于许多电参量都可视为电压的派生量，因此电压测量是许多电量和非电量的测量基础。

数字电压表的高速发展，使它成为实现测量自动化不可缺少的仪表。尤其是高准确度数字电压表的出现，又使它进入了计量标准和精密测量的领域。与此相应，测量的可靠性和准确性就越

来越重要。数字电压表使用起来很方便，但正由于方便，若不考虑由于仪表的使用条件和测试方法不当所造成的误差，以及校准周期等因素，往往会得到错误的测量结果。

数字电压表的应用十分广泛，其准确度已从 10^{-4} 提高到 10^{-8} ~ 10^{-6} 量级，因此研究它的检定测试方法，分析并掌握它的电气性能和技术指标，是计量测试部门、研究单位、生产厂家、使用和维护单位的一项重要的技术工作。本书所讨论的电气性能测试原理和测试方法，适用于各种数字电压表的检定测试及性能试验等。为了发挥数字电压表的许多突出的优点，必须掌握它的技术性能，为了正确地使用数字电压表并保证其测量结果的准确一致，必须对各种数字电压表进行检定、测试和校准。我们编写这本书的主要目的就在于让读者了解DVM的电气性能并掌握它们的测试方法。

第一章 数字电压表的基本原理与电气性能

一、数字电压表的分类

随着数字技术的迅速发展，高性能的直流数字电压表（DC-DVM）、数字多用表（DMM）、廉价的数字面板表（DPM），正被陆续地普及和广泛地采用。把直流模拟电压转换成数字量的DC-DVM是数字电压表乃至整个数字仪表的基本组成部分，而DC-DVM的核心又是A/D变换器。所以A/D变换器往往决定着数字电压表的特征。为了方便起见，通常人们也把直流数字电压表简称为数字电压表。

目前，DVM广泛应用于电压的测量和校准，在DC-DVM的基础上配合各种适当的输入转换部件，可以构成交流数字电压表、直流和交流数字电流表、数字欧姆表以及能测量相位、功率的多种电参量的其它数字式仪表。这里所说的数字多用表是和常用的模拟式万用表相类比的，即除去能测量直流电压外，还可以测量交流电压、直流电流、交流电流和电阻的五种功能的数字仪表。

就DC-DVM而言，虽然都是用来测量直流电压，但由于A/D变换器型式不同，工作原理和内部结构也不同，而出现了各种型式的数字电压表。因此按A/D变换器的原理进行分类，更能掌握其性质，也比较普通。下面介绍按A/D变换器原理的分类方法^[1]。

1. 比较型

- (1) 逐次逼近比较式；
- (2) 跟踪比较式；
- (3) 余数再循环比较式。

2. 电压—时间变换型（V/T）

- (1) 阶梯波式；

(2) 斜波式 (锯齿波式)。

3. 积分型

(1) 电压-频率变换式(V/F)；

(2) 双积分式 (双斜式)；

(3) 脉冲调宽式；

(4) 三斜率式、四斜率式等。

4. 复合型

(1) 两次采样电阻分压比较式；

(2) 两次采样电感分压比较式；

(3) 三次采样积分式；

(4) 动态量程扩展式(D. S. S.)；

(5) 扩展电流比较式(S. C. C.)。

5. 特殊型

(1) 机械编码式；

(2) 光电式；

(3) 数学运算式 (乘、除、开方等)。

以上多种型式的DVM，其原理不同，特点各异。

除去按A/D变换器的原理分类外，还可以按使用场合分为：

1. **实验室型** 准确度高、环境条件要求严格。

2. **通用型** 准确度一般，环境条件要求比较宽。

3. **面板型** 准确度低，多安装在面板上作为指示电表之用，也称作数字表头。

按显示位数可分为四位、五位、六位、七位、八位，也可分成 $3\frac{1}{2}$ 位至 $7\frac{1}{2}$ 位等位数。

按测量速度还可分为低速型 (几次/秒)、中速型 (几十次至几百次/秒)、高速型 (几百次至几万次/秒)。

按测量准确度又分为低精度、中精度、高精度等。

另外，也有按使用方式或重量分的，如台式、便携式、袖珍式 (手持式) 等。

二、直流数字电压表工作原理简介

在DVM电路中，被转换的模拟量是被测电压，即需要实现电压-数字变换，所以A/D变换器是DVM的主体部分，而电子计数器的作用只是读出被转换成的数字量。DVM的技术指标主要取决于所用电压-数字变换的组成方案和制造质量。目前，DVM中的电压-数字变换器种类有几十种之多，而且不断出现新方案。为了掌握不同类型DVM的特点和测试方法，以便正确地使用和操作它，我们对几种典型A/D变换器的工作原理作些简单的介绍。对电子计数器和逻辑控制电路部分就不叙述了。

1. 逐次逼近比较式DVM

逐次逼近式又称反馈比较式，其含意类似机械天平或具有自动补偿作用的爱特差计。图1-1是这类DVM的原理框图。

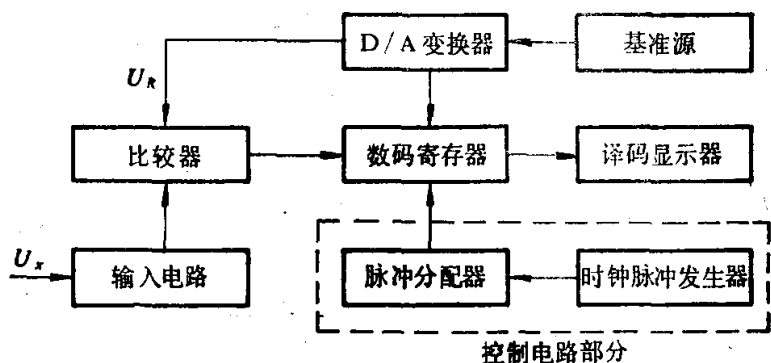


图1-1 逐次逼近式DVM原理框图

图中主要部分的作用如下：

(1) 比较器：这是一个电压幅值比较鉴别器，用以比较被测电压 U_x 及步进标准电压 U_R 的差值（即 $\Delta U = U_x - U_R$ ）的极性， ΔU 为差值电压。比较器要求灵敏度高、零点稳定、动态特性好。比较器的输出驱动控制门，再送到数码寄存器。

(2) 时钟脉冲发生器：用来产生固定频率的脉冲信号。

(3) 脉冲分配器：将来自时钟的一连串时序脉冲变成按空间分布的节拍脉冲。

(4) 数码寄存器: 用来暂时存放与被测信号大小相对应的数码存储单元, 它把每次比较结果保存下来 (“1” 或 “0”)。

(5) D/A 变换器: 数 - 模变换器, 用来产生一系列步进标准电压。此标准电压作为反馈信号与被测电压 U_x 一起在比较器中进行比较。标准电压的数值由数码寄存器的工作状态决定。

(6) 基准源: 也称标准源, 用来作为标准电压 U_R 的机内参考电压源。

在控制电路的作用下, 被测电压与基准电压砵码由高位到低位逐位加码比较, 大者弃, 小者留, 逐次累积, 逐次逼近。最后所留基准电压砵码的累积总和近似等于被测电压的大小。下面举例来说明它的测量过程。

设被测电压 $U_x = 1893\text{mV}$, 测量一开始, 由脉冲分配器产生第 1 个节拍脉冲作为复零信号, 使数码寄存器全部处于 “零” 状态, 这时 $U_R = 0$, 显示器读数为 0000mV 。

第 2 个节拍脉冲通过数码寄存器打开 D/A 变换器的第一位 (最高位) 解码开关, 输出第一个最高有效位数的标准电压 $U_{R1} = 2048\text{mV}$, 并与被测电压 $U_x = 1893\text{mV}$ 在比较器中进行比较。这时, 误差电压的大小为 $\Delta U_1 = U_x - U_R < 0$, 相当于过补偿。比较器输出一个负误差信号, 并由 “去”、“留” 逻辑电路作出 “去” 的判断, 数码寄存器相应地给出一个 “零” 的数码。

然后, 第 3 个节拍脉冲使 D/A 的第二位解码开关打开, 输出次高位的标准电压 $U_{R2} = 1024\text{mV}$, 同时关掉 U_{R1} 输出信号, 这时 $U_x - U_{R2} = 1893 - 1024 > 0$, 相当于欠补偿。比较器输出一个正误差信号 ΔU_2 , 并通过 “去”、“留” 逻辑电路作出 “留” 的判断。数码寄存器相应地输出一个 “1” 的数码。

.....

如此进行下去, 直到第 13 个节拍脉冲时, D/A 的输出 $U_{R12} = 1893\text{mV}$, $\Delta U_{12} = 0$ (指在所规定的误差范围内), 电路处于平衡状态。由脉冲分配器发出的第 14 个节拍脉冲作为结束信号, 使数码寄存器停止计数, 整个比较系统处于休止状态。这时, 由数

码寄存器输出的二进制数码为 011101100101, 经二十进制译码后最后得到 1893mV 的显示值。

上述比较过程列于表 1-1, 其波形图示于图 1-2。

表 1-1 逐次逼近式 DVM 的比较过程

i	U_{Ri-1} (mV)	U_{Xi-1} (mV)	U_x (mV)	$\Delta U (U_x - U_{Xi})$	逻辑电路 判别结果	数码寄存器输出 (二进制码)
1	0	0	1893	0		
2	2048	$U_{X1}=2048$	1893	<0	去	0
3	1024	$U_{X2}=1024$	1893	>0	留	1
4	512	$U_{X3}=1536$	1893	>0	留	1
5	256	$U_{X4}=1792$	1893	>0	留	1
6	128	$U_{X5}=1920$	1893	<0	去	0
7	64	$U_{X6}=1856$	1893	>0	留	1
8	32	$U_{X7}=1888$	1893	>0	留	1
9	16	$U_{X8}=1904$	1893	<0	去	0
10	8	$U_{X9}=1896$	1893	<0	去	0
11	4	$U_{X10}=1892$	1893	>0	留	1
12	2	$U_{X11}=1894$	1893	<0	去	0
13	1	$U_{X12}=1893$	1893	$=0$	留	1
14	0					

表 1-1 中, U_{Ri} 为第 i 个脉冲作用下, 解码开关输出的步进标准电压值, U_{Xi} 为 D/A 输出的总的标准电压。由于步进标准电压是按 2^n 幂级数的方式设定的, 故比较过程可以快速进行。从工作原理可以看出, 这种 DVM 的优点一是速度快和程序固定, 其转换时间与输入电压大小无关。二是准确度较高, 它将 A/D 变换精度转化为 D/A 变换器的精度, 其准确度主要决定于基准电压源、D/A 变换器和比较器的性能指标, 故容易实现。它的缺点是线路相对比较复杂。由于它是将被测电压在采样时间的瞬时值与基准电压进行比较, 所以交变干扰信号会引起误差, 抗干扰能力差。

2. 斜波式 V/T 变换型 DVM

斜波式电压-时间变换型 DVM 的基本思想是通过对输入电压 U_x 和随时间呈线性变化的电压 (即斜波式电压) 进行比较, 把被测输入电压按一定比例转化成时间间隔, 然后用电子计数器在此

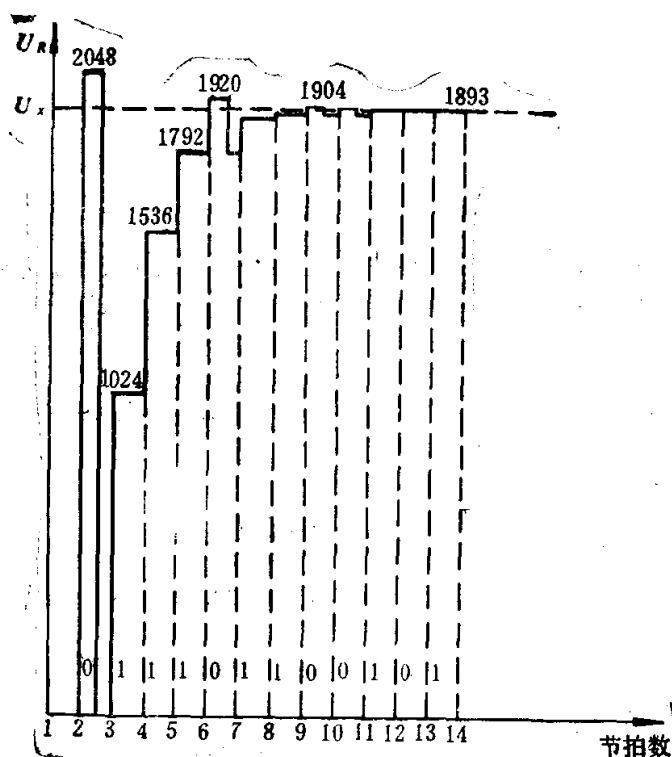


图1-2 逐次逼近式DVM波形图

时间间隔内计出的脉冲数，来表示被测电压的模拟量。这是一般V/T变换器的基本方式，其原理框图如图1-3所示。

整个电路由两部分组成。第一部分由线性斜波电压发生器和两个比较器组成，其任务是将电压转换成时间间隔。第二部分由脉冲发生器和计数器组成，其任务是把时间间隔转换成数字量。

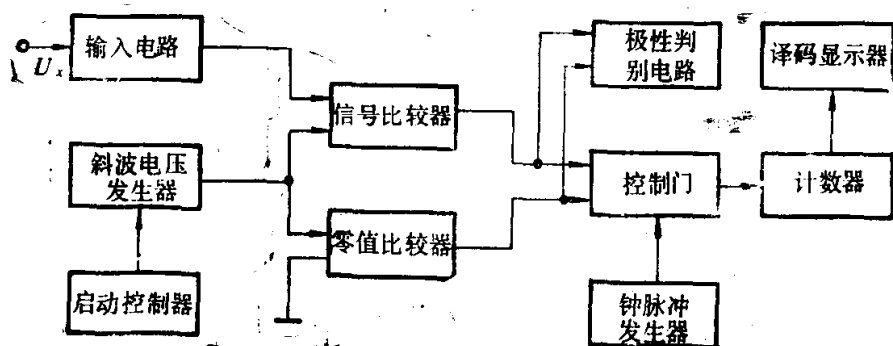


图1-3 斜波式V/T变换型DVM原理框图

输入被测电压 U_x 作用到信号比较器上, 与线性斜波电压比较, 当线性斜波电压与被测电压相等时, 信号比较器发出启动脉冲, 使控制门开启, 钟脉冲通过门, 供给电子计数器计数。线性斜波电压同时作用到零电压比较器与零电平比较, 当线性斜波电压为零时, 零电平比较器发出停止脉冲, 使门关闭。这时计数器所计钟脉冲数就是被测电压的数字量。图 1-4 给出了单极性电压测量过程中各部分的波形。

设开门时间为 t_1 , 关门时间为 t_2 , 线性斜波电压斜率为 K , 则被测电压为

$$U_x = K(t_2 - t_1) = K \Delta T$$

若钟脉冲周期 $T = \frac{1}{f}$, 则计数器在开门时间内所计脉冲数为

$$N = \frac{\Delta T}{T} = \frac{U_x}{KT} = \frac{f}{K} U_x \quad (1-1)$$

如果 $f = 10^6 \text{ Hz}$, $K = 100 \text{ V/s}$, 则

$$N = \frac{10^6}{100} U_x = 10000 U_x$$

由此可见, 计数器在开门期间 ΔT 内所计的钟脉冲数与被测电压 U_x 成正比, 从而达到测量被测电压大小的目的。这种转换器是电压-时间的变换原理, 故称为 V/T 变换式, 或简称斜波式 DVM。

为了进行正负双极性输入电压的测量, 可设计能跨过正负两个区域的斜波电压发生器, 再配上图 1-3 中的极性判别电路即可实现。

这种 DVM 的准确度取决于 V/T 变换的精度和 ΔT 时间内所测数字量的精度。

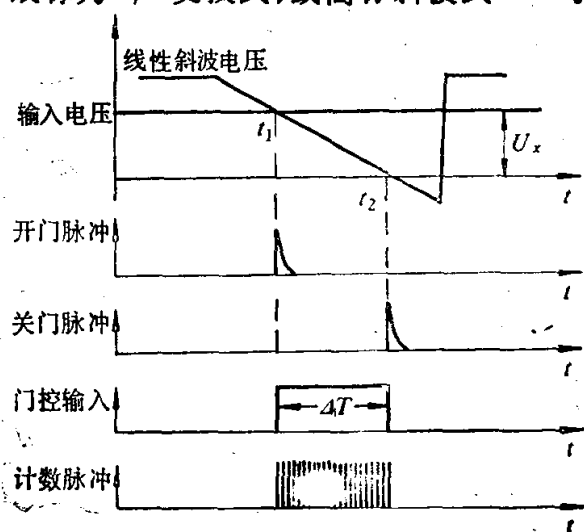


图 1-4 斜波式 DVM 波形图

由于石英晶体振荡器的频率很稳定,一般 ΔT 的数字量测量精度可以做的很高,所以主要取决于 V/T 变换器的精度。 V/T 变换器则取决于斜波电压的线性度、比较放大器的灵敏度和输入放大器的精度。由于这种变换是被测电压采样的瞬时值与斜波电压相比较,交变干扰直接影响比较器的工作而造成误差,因而抗干扰能力差。又由于斜波电压的线性度和稳定度难以做得很高,以及比较器的零漂等也会引起误差,使这种变换器准确度不高,一般只能做到0.01%左右。

由原理可见,这种线路突出的优点是线路和逻辑结构都比较简单,成本比较低,在要求不高的场合下如数字多用表、数字面板表经常采用这种线路。如国产PZ-17、DYJ-2、SD-02、SW-2型就是采用这种方案。

3. 双积分式DVM

双积分式又称双斜式,它的工作原理是借助于积分器的两次积分过程,将被测电压 U_x 变换为与其平均值成正比的时间间隔,然后用脉冲发生器和计数器在此时间间隔内所计钟脉冲数来表示被测直流电压的模拟量,从而实现A/D变换。工作原理如图1-5所示。

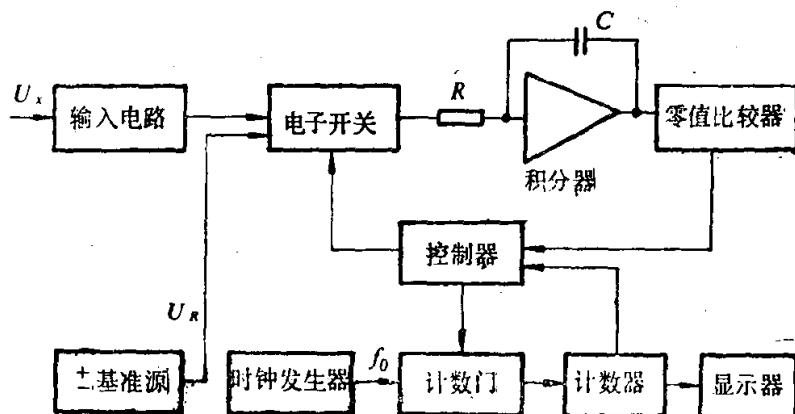


图1-5 双积分式DVM原理框图

输入被测电压 U_x 经输入电路作用到电子开关,控制器将电子开关接到 U_x 端, U_x 作用到积分器,先对 U_x 积分,这个过程称为采样阶段,由于逻辑控制电路发出采样指令的作用,使采样时间

T_1 是固定值。同时控制器使门开启,时钟脉冲通入计数器,使计数器对钟脉冲进行计数。当计数器计满时,输出溢出脉冲作用到控制器,然后对标准电压 U_R 进行反向积分。当积分器输出为零电平时,检零比较器输出信号作用到控制器,使门关闭。这时计数器所计钟脉冲就是被测电压的数字量。对 U_R 积分的过程称为比较阶段,比较时间为 T_2 。工作波形如图 1-6 所示。由于积分器输出为双斜波形,所以又叫双斜式 DVM。

设积分器从零电平开始对 U_x 积分,积分器输出为

$$U_{01} = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_1} U_x dt$$

$$= -\frac{T_1}{RC} \bar{U}_x \quad (1-2)$$

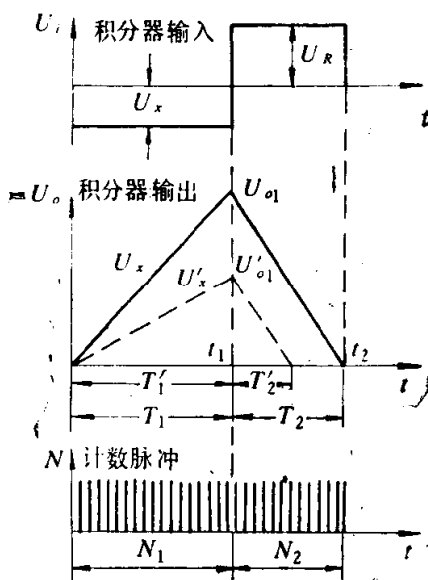


图1-6 双积分式DVM波形图

式中 $\bar{U}_x$ 为 U_x 在 T_1 时间内的平均值。

经过一个固定时间 T_1 后,计数器达到其满量限 N_1 值,采样周期结束,积分器由 U_{01} 开始,对 U_R 反向积分,直到输出为零时停止。这时积分器输出为

$$U_{02} = U_{01} + \frac{1}{RC} \int_0^{T_2} U_R dt = 0$$

由于 U_R 为常数,因此,

$$U_{01} + \frac{1}{RC} T_2 U_R = 0$$

将式 (1-2) 代入得:

$$-\frac{T_1}{RC} \bar{U}_x + \frac{T_2}{RC} U_R = 0$$

$$T_1 \bar{U}_x = T_2 U_R$$

所以

$$T_2 = \frac{T_1}{U_R} \bar{U}_x \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可见, T_2 与 U_x 成正比。

设钟脉冲频率为 f_0 , 则

$$T_1 = \frac{N_1}{f_0} \quad (1-4)$$

$$T_2 = \frac{N_2}{f_0} \quad (1-5)$$

式中 N_1 、 N_2 为脉冲数, 将式 (1-4) 式 (1-5) 代入式 (1-3), 则有

$$N_2 = \frac{N_1}{U_R} U_x \quad (1-6)$$

考虑到工频 50Hz, 通常取 $T_1 = 20\text{ms}$ 或它的整倍数, f_0 是固定的钟频, 所以 N_1 为一个常数。基准电压 U_R 也为一恒定量。因而只要知道计数器在比较阶段所计脉冲数 N_2 , 就可以准确地得到被测电压 U_x 的平均值。

双积分式的核心部件是积分器, 积分器对 DVM 的技术指标影响很大, 因此对积分器的线性度、稳定性、动态范围及零点漂移等指标要求越高越好。

因为是平均值测量, 而不是对瞬时值进行测量, 可将对称的串模干扰平均掉, 故抗干扰能力很强。只要积分采样时间 T_1 为干扰信号周期的整数倍, 就有极高的串模抑制比。同时, 它对过零信号也具有⁴⁰很强的抑制能力。详见第五章。

这种原理的数字表准确度高、稳定性好。其原因主要是 U_x 和 U_R 公共一个积分器及钟频, 公式 (1-6) 中不存在积分元件 R 和 C 变化的影响, 降低了对积分器的要求。另外, 测量比较时间 T_2 的标准脉冲不需要长时间的稳定性。因为经 V/T 变换后的时间 T_2 正比于 T_1 , 若 T_1 有变化, T_2 也随之变化, 只要两者变化速率相同, 则对测量结果不产生误差。

由于双积分式 DVM 有以上突出的优点, 这种原理应用很广泛, 如国产 PZ-12、DS-14、DS-26、DS-18A 等, 并生产出了许多高准确度的双积分式数字电压表。