

1356940

数字电压表的 检定测试技术

冯占岭 王建军 编著



中国计量出版社

22

目 录

绪论	(1)
一、概述	(1)
(一) 数字电压表的发展过程	(1)
(二) 数字式仪表的简单结构	(3)
二、数字电压表的特点和动向	(6)
(一) 数字电压表的特点	(6)
(二) 数字电压表的发展动向	(8)
三、数字电压表的统一量值和检定	(11)
(一) 数字电压表统一量值的必要性	(11)
(二) 数字电压表检定测试的重要性	(12)
第一章 数字电压表的主要技术特性	(15)
一、数字电压表的分类	(15)
二、数字电压表基本工作原理	(17)
(一) 模拟数字转换技术	(17)
(二) 直流数字电压表工作原理	(20)
(三) 数字式与模拟式仪表的性能比较	(50)
三、数字显示器和供电电源	(52)
(一) 数字电压表的显示器	(52)
(二) 数字电压表的供电电源	(56)
四、数字电压表的操作、预调和校准	(58)
(一) 面板结构和操作功能	(58)
(二) 数字电压表的预调和校准	(61)
五、数字电压表的主要工作特性	(65)
(一) 测量范围和量程	(65)
(二) 分辨力和抗干扰能力	(69)

(三) 输入阻抗和零电流·····	(70)
(四) 显示能力和显示位数·····	(71)
(五) 测量速度和响应时间·····	(71)
(六) 信息输出·····	(74)
六、典型数字电压表的主要技术指标·····	(74)
第二章 数字电压表的误差分析·····	(89)
一、数字电压表的误差来源·····	(89)
(一) 数字电压表的误差项·····	(89)
(二) 内装标准源的误差分析·····	(98)
二、数字电压表的误差表达式·····	(102)
(一) 数字电压表的误差公式·····	(102)
(二) 数字电压表的误差曲线·····	(105)
(三) 误差系数的比值·····	(108)
三、输入电路对测量误差的影响·····	(111)
(一) 输入阻抗的影响·····	(111)
(二) 输入零电流的影响·····	(113)
(三) 斩波放大器的影响·····	(115)
四、量程变换引起的落差·····	(117)
(一) 数字电压表的落差·····	(117)
(二) 减小落差的方法·····	(119)
(三) 进制方式的比较·····	(122)
五、数字电压表的误差计算方法·····	(123)
(一) 数字电压表的误差计算·····	(123)
(二) 输入阻抗和零电流引起误差的计算·····	(125)
(三) 温度系数引起误差的计算·····	(127)
第三章 数字电压表误差的检定方法·····	(129)
一、误差检定的一般规则·····	(129)
(一) 检定概述·····	(129)
(二) 选取检定点和标准选择·····	(131)
(三) 标准条件和额定工作条件·····	(135)

二、直流电压和数字电压表传递系统	(140)
(一) 数字电压表的量值传递	(140)
(二) 数字电压表的准确度等级	(141)
三、直接比较法检定	(144)
(一) 检定线路的连接	(144)
(二) 检定注意事项	(147)
四、直流标准电压源法检定	(149)
(一) 标准源工作特性和误差	(149)
(二) 检定和操作过程	(151)
五、直流标准仪器法检定	(154)
(一) 电位差计和分压箱法	(154)
(二) 差值法	(163)
(三) 标准电池法	(164)
(四) 多档十进分压箱法	(166)
六、检测与应用技术	(169)
(一) 用数字表检定分压箱	(169)
(二) 用数字表检定指针式仪表	(171)
(三) 测量比率值	(172)
(四) 用作零值检测器	(174)
(五) 带打印的电压数据采集器	(177)
(六) 数字表用于非电量测量	(180)
(七) 与数字打印机联机应用	(182)
第四章 数字电压表的检定装置	(184)
一、可自校的数字电压表检定装置	(184)
(一) 工作原理及技术指标	(184)
(二) 自校准工作程序	(190)
(三) 检定操作方法	(195)
二、高准确度检定标准及误差分析	(201)
(一) 标准部件的技术性能	(201)
(二) 分压箱主要指标测试	(205)

(三) 总体误差分析.....	(210)
三、直流标准电压源及其性能测试	(214)
(一) 国内、外水平及现状	(214)
(二) 工作原理介绍.....	(215)
(三) 微处理器控制的标准源.....	(221)
(四) 标准电压源性能测试.....	(229)
四、10 V 电压标准及其传递	(235)
(一) 电子式电压标准.....	(236)
(二) 串联标准电池组	(241)
(三) 误差校准及量值传递.....	(242)
五、可编程标准源的校准技术	(248)
(一) 5440 型标准源原理结构	(248)
(二) 主要技术特性.....	(250)
(三) 校准技术.....	(253)
第五章 数字电压表的干扰抑制和保护技术	(258)
一、干扰的型式和特征	(258)
(一) 干扰源概述.....	(258)
(二) 串模干扰和共模干扰	(259)
二、串模干扰电压的抑制	(262)
(一) 双积分技术抑制工频干扰	(263)
(二) 自动频率跟踪技术.....	(267)
(三) 滤波器技术	(269)
三、共模干扰电压的抑制	(271)
(一) 浮地输入电路.....	(272)
(二) 双层浮地保护电路	(275)
(三) 单元电路之间的隔离	(279)
(四) 电源变压器的屏蔽.....	(280)
四、数字电压表屏蔽保护及测试技术	(281)
(一) 保护端的接法.....	(281)
(二) 热电势的干扰.....	(290)

(三) 应变仪输出电压的正确测量	(291)
(四) 测量系统的屏蔽	(293)
第六章 数字电压表主要技术指标的测试	(295)
一、输入特性的测试	(295)
(一) 输入阻抗的测试	(295)
(二) 零电流的测试	(300)
二、抗干扰能力的测试	(302)
(一) 串模干扰抑制比的测试	(302)
(二) 共模干扰抑制比的测试	(304)
三、稳定误差和线性误差的测试	(307)
(一) 稳定误差的测试	(307)
(二) 线性误差的测试	(310)
四、显示能力和分辨力的测试	(313)
(一) 显示能力的检查和测试	(313)
(二) 分辨力的测试	(314)
五、一般项目的测试和检查	(317)
(一) 温度系数的测试	(317)
(二) 供电电源电压和频率的影响试验	(319)
(三) 辅助输出信息的测试	(321)
(四) 绝缘电阻和耐压强度试验	(322)
(五) 其它项目的检查试验	(324)
六、检定和测试结果的处理	(327)
(一) 数据处理和检定误差	(327)
(二) 数据表格	(329)
第七章 数字多用表原理特性及测试	(332)
一、概述	(333)
(一) 数字多用表中的转换器	(333)
(二) 交流数字电压表的分类和特征参数	(334)
二、平均值和峰值电压转换器	(340)
(一) 平均值转换器	(340)

(二) 平均值转换器的输出特性	(345)
(三) 峰值转换器	(348)
三、有效值电压转换器	(351)
(一) 热偶式转换器	(351)
(二) 全电子式转换器	(353)
(三) 对数计算式转换器	(356)
四、交流数字表的波形响应和使用方法	(356)
(一) 平均值转换器与波形的关系	(357)
(二) 峰值和有效值转换器与波形的关系	(361)
(三) 交流数字电压表的使用方法	(364)
五、交流数字电压表的测试技术	(368)
(一) 主要技术指标	(368)
(二) 误差检定和校准	(368)
(三) 主要性能测试	(373)
六、欧姆转换器和电流转换器	(379)
(一) 电阻-电压 (Ω -V) 转换原理	(379)
(二) 电流-电压 (I-V) 转换原理	(385)
(三) 多功能数字表和标准源	(387)
七、数字欧姆表和电流表的检定与测试	(391)
(一) 数字欧姆表的检定与测试	(391)
(二) 数字电流表的检定与测试	(398)
八、数字多用表的技术规格选择	(396)
(一) 测量范围和准确度	(396)
(二) 响应特性和输入、输出特性	(397)
(三) 电压测量的基本要求	(398)
第八章 微处理器式数字表及自动测试系统	(401)
一、微处理器式数字表的结构和特性	(401)
(一) 微处理器的功能	(401)
(二) 微处理器式数字表电路结构	(402)
(三) 微处理器式数字表技术特性	(406)

二、微处理器式数字表的运算程序	(418)
(一) 7065 型 运算程序	(418)
(二) 8520 A 型 运算程序	(422)
三、微处理器式数字表的自动校准	(425)
(一) 自动校准技术	(425)
(二) 自检和自诊	(429)
四、自动测试系统与标准接口	(432)
(一) 接口技术	(432)
(二) 自动测试系统	(434)
(三) 测试系统与标准接口	(436)
五、数字多用表的自动检定系统	(439)
(一) 数字电压表的自动检定	(439)
(二) 一种五功能数字表自动检定系统	(449)
六、数字化、自动化在测量技术中的作用	(453)
(一) 测量过程的自动化	(453)
(二) 微处理器在测量系统中的“智能化”	(454)
参考文献	(459)

绪 论

一、概 述

(一) 数字电压表的发展过程

科学技术的发展为测量仪器、仪表提供了新原理和新技术以及新型的元、器件，同时又对测量仪表提出了更新、更高的要求。数字电压表（简称为 DVM）就是在精密电测量技术、计算技术、自动化技术和电子技术的基础上产生和发展起来的。

1952 年，美国 NLS 公司首创四位数字电压表，到现在的三十多年中经过了不断的改进和提高。DVM 是从电位差计的自动化考虑中研制成功的，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、二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 DVM 只能测一、二种参数到能测十几种参数的多用型；显示器件也从辉光数码显示发展到等离子体、发光二极管、液晶显示等。DVM 的体积和功耗越来越小，重量不断减轻，价格也逐步下降，可靠性越来越高，量程范围也逐渐扩大。

回顾一下 DVM 的发展过程，大致可分为以下三个阶段。

(1) 数字化阶段。50~60 年代中期，DVM 的特点是运用各种原理实现模数(A/D)转换，即将模拟量转化成数字量，从而实现测量仪表的数字化。1952 年，第一个问世的 DVM 是

采用电子管的伺服比较式；1956 年出现斜波式（电压-时间变换型）；1961 年出现全晶体管化的逐次逼近比较式；1963 年出现电压-频率（V/F）变换型（单积分式）；1966 年出现双积分式（双斜式）等。这一时期的显示位数是 $3\frac{1}{2}$ ~ $5\frac{1}{2}$ 位。

（2）高准确度阶段。由于精密电测量的需要，DVM 开始向高准确度、高位数方向发展，出现了所谓复合型原理的仪表。如 1971 年的日本 TR-6567（三次采样积分式）；1973 年的英国 SM-215（两次采样电感分压比较型）；1972 年研制的 TR-6501 型 DVM 已达到了八位数，与此同时，对积分方案进行了改进和提高，出现了如美国 Dana 公司的 6900 型（七位）、英国 Solartron 公司生产的 7075 型（八位），其准确度可达几 ppm（百万分之几）。

（3）智能化阶段。60 年代末期，电子技术和工艺结构有了飞跃的发展，而大规模集成电路（LSI）与计算技术相结合的产物是微处理器（简称为 μp ）。1972 年，美国 Intel 公司首创微处理器，不久即研制出微处理器式数字电压表，实现了 DVM 数据处理自动化和可编程序。因为带有存储器并使用软件，所以可进行信息处理，可通过标准接口组成自动测试系统（简称为 ATS）。例如，美国 Fluke 公司的 8500 A 型、英国 Solartron 公司的 7065 型、Datron 公司的 1071 型、美国 HP 公司的 3455 A 型等，除了完成原有 DVM 的各种功能外，还能够自校、自检，保证了自动测量的高准确度，实现了仪器、仪表的所谓“智能化”。当前，智能仪表发展十分迅速，而微处理式 DVM 在智能仪表中占的比重最大。智能化的 DVM 为实现各种物理量的动态测量提供了可能。

我国的数字电压表是从 60 年代初期发展起来的，1964

年，北京、上海同时研制出五位 DVM。现在我国已有 50 多个单位研制生产数字仪表，并出现了许多六位表和七位表，准确度达百万分之几，灵敏度已达到 $0.01\mu\text{V}$ 。目前，数字电压表已广泛应用在国防、科研、学校、工矿企业、计量部门和各种物理量的非电量测量系统中。

(二) 数字式仪表的简单结构

数字式仪表是能把连续的被测量自动地变成断续的、用数字编码方式的、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的结合在一起，成为仪器、仪表领域中独立而完整的一个分支。

数字式仪表的种类很多，它们的内部结构往往相差很大，应用场所各不相同。根据仪表的用途（即被测量的性质）计有：数字电压表、数字欧姆表、数字电流表、数字瓦特表、数字 Q （品质因数）表、数字静电计、数字电桥、电子计数器等。经过适当变换后，还可测量许多非电量，如数字温度表、数字转速表、数字位移表、数字钟、数字秤、数字测厚仪、数字高斯计等，还有许多其它数字式测量仪器和测量装置。按照数字式仪表被测对象的不同，可以画出图 0-1。

自然界中，许多物理量是通过换能器和变换器先转换成电压，然后由电压量转换成数字量；或者由电压转换成时间间隔，再转换成数字量，这个过程称为模拟-数字变换过程。因此，电压-数字变换是一种最基本的模数变换，而数字电压表是整个数字仪表的主体和核心部分。各种换能器、A/D 变换器、电子计数器、数字显示器、数字打印机、数据处理器和记录仪等，便构成了一个典型的 A/D 变换测量仪表。

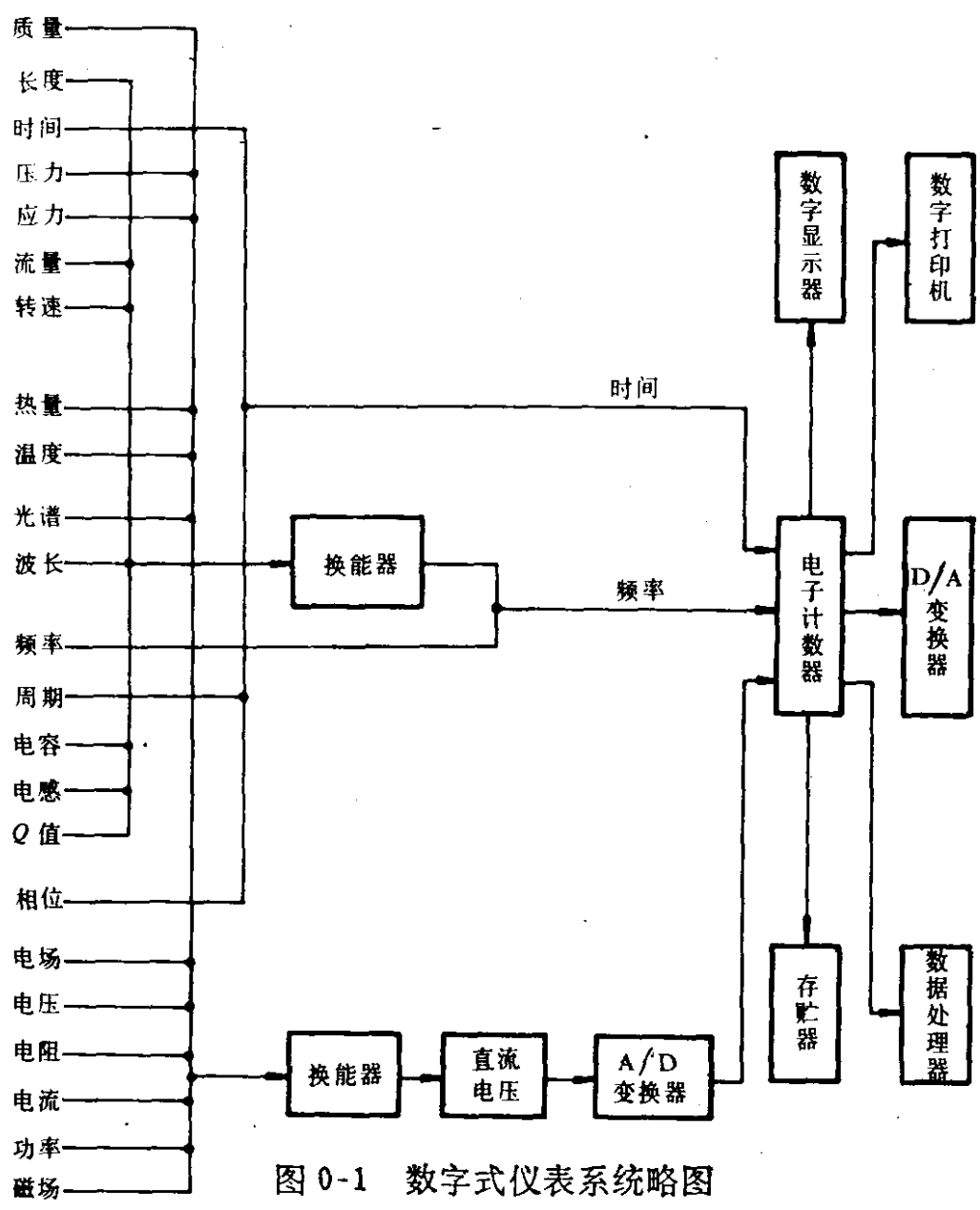


图 0-1 数字式仪表系统略图

数字电压表就是利用上述模拟-数字变换原理，以十进制数字形式显示被测电压值的仪表。DVM除广泛用于电压测量外，通过各种变换器还可以测量其它电量和非电量。而各种被测量一般都是先经过变换器变换成直流电压再进行测量的，因此直流电压是最基本的参量之一。当前，高性能的直流数字电压表(DC-DVM)是整个数字仪表的基本组成部分。为了方便起见，通常也把直流数字电压表简称为数字电压表。图0-2给出了以各种变换器为核心的数字电压表的通用结

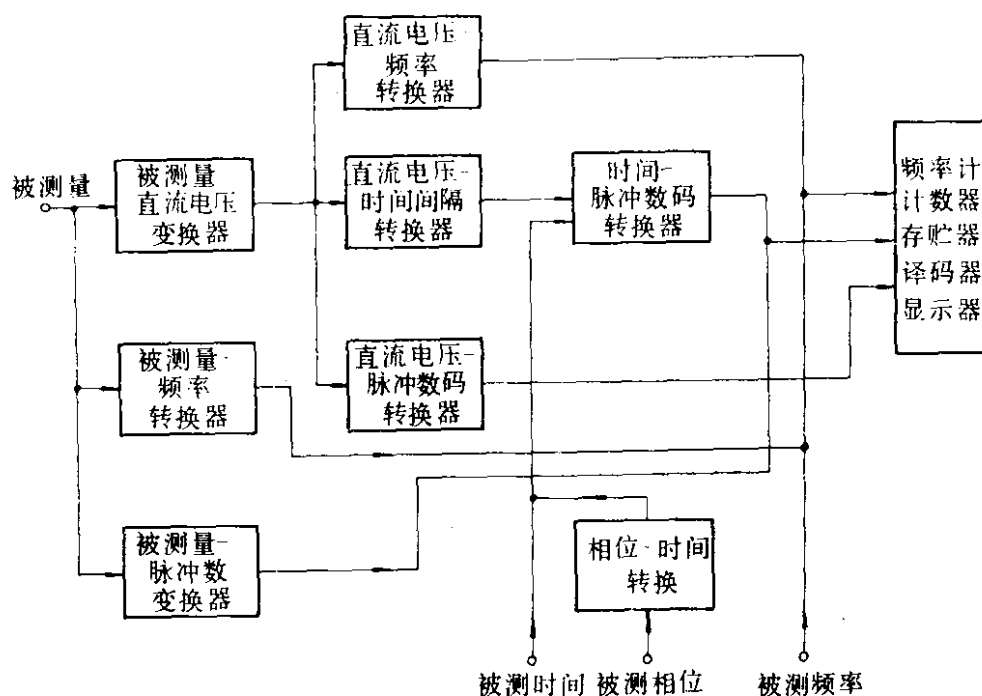


图 0-2 数字电压表通用结构框图

构框图。

由图 0-2 可见，被测量变换成直流电压后，由直流电压可变换成相应的频率量 f （即 V/F 变换式 DVM）；也可以变换成相应的时间间隔 T （即 V/T 变换式 DVM），然后经过一次时间-脉冲数码变换成频率量 f ；另外一种可通过直流电压-脉冲数码变换器变成频率量 f （即反馈比较式 DVM）。除此之外，某些复合型和派生型 DVM 的基本构思也是大同小异。

有些物理量可直接变换成相应的频率或相应的脉冲数，直接由计数器读出。若被测量是时间、相位和频率，则更容易实现数字化测量，如图 0-2 所示。

直流数字电压表的实际内部结构框图比较复杂，而且，不同变换原理的 DVM 的结构也有相当大的差别（在第一章将分别介绍）。但一台典型的 DC-DVM，主要由衰减器、切换开关、前置放大器、基准电压、A/D 变换器、时钟发生器、计数器、译码显示器、控制逻辑电路以及电源等部分组

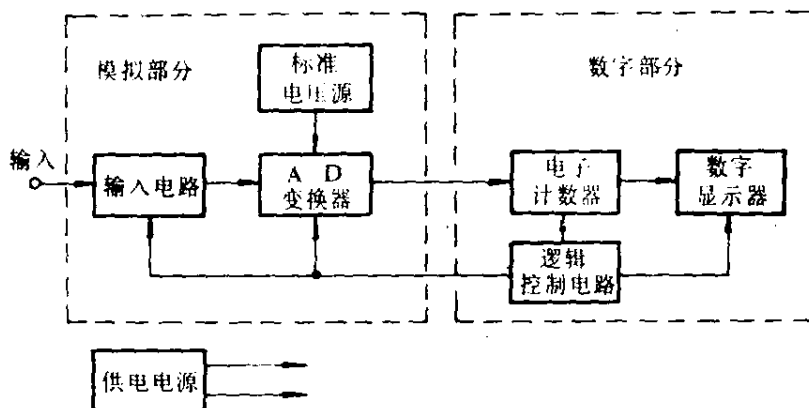


图 0-3 DC-DVM 简单框图

成。

图 0-3 给出了 DC-DVM 的简单框图。

输入电路由衰减器、前置放大器组成，它与 A/D 变换器、基准电压源等构成模拟电路部分；而计数器、译码显示器、时钟发生器、逻辑控制电路等构成数字电路部分。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。

二、数字电压表的特点和动向

(一) 数字电压表的特点

DVM 的应用遍布各个技术领域，它有许多突出的优点，但也有一定的缺点。DVM 与指针式电表、直流电工仪器及一些电子仪器相比较，有如下一些技术特点：

(1) 准确度高。目前，DC-DVM 的测量准确度可达 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级。一般的 DVM 达到 $\pm 0.01\%$ 很容易，而模拟式电表最高准确度为 $\pm 0.1\%$ ，测量准确度提高了两个数量级以上。

(2) 测量电压范围大、灵敏度高。高分辨力的 DVM 可达

0.1~0.01 μV ，一般做到 1 μV 、10 μV 已不成问题。测量上限可达 1500V，几乎覆盖了直流电位差计、分压箱和指示电表的所有测量范围。

(3) 测量速度快。由于 DVM 实现了测量自动化，加快了测量速度。易于和其它仪器组成一个完整的测试系统。DVM 的采样速率可从 1 次/10 秒到每秒几万次，一般为每秒几次或每秒几十次，并且测量速度可灵活控制，这样给自动化测量提供了一个速度可控的有利条件。同样，DVM 也可以进行人工控制、单次采样和手动操作等。

(4) 输入电阻高。DC-DVM 利用电子反馈技术使其输入电阻相当高，在测量时就大大减少了由于信号源内阻带来的测量误差。一般基本量程可做到 1 000 M Ω 以上，而做到兆欧级很容易，这是模拟电表比不了的。

(5) 使用方便、用途广泛。DVM 使用很方便，开机预热、预调或校准后即可使用。它操作简便，不必进行线路平衡就可以直接读数，用不着象电位差计那样反复调节工作电流。它具有编码信息输出，可配接打印机、记录仪等进行自动记录；也可以配上相应的转换器，对各种物理量进行数字化遥控测量。

(6) 抗干扰能力强。高性能 DVM 的串模干扰抑制能力 (SMRR) 可做到 80~120 dB，其共模干扰抑制能力 (CMRR) 可达 160 dB 或更高。这样，即使在微小信号存在干扰噪声的情况下，也能进行高准确度、高分辨力的测量。

(7) 自动化程度高。数字化、自动化是密切相关的。事实上，在数字化的过程中就伴随着仪器的自动化。DVM 利用数字电路的各种逻辑功能很容易实现自动化重复测量、自动极性转换、自动量程转换以及各种自动调节、自动校准、自动记录和打印等。新型的 μp -DVM 还可进行程控、数据

采集、数据处理、逻辑运算，有的还可自寻故障。

(8) 读数清晰、直读方便。因为是数字显示，不存在模拟式电表所必需的视差，减轻了使用者眼睛的疲劳，还可以多人同时进行现场观测。不仅有数字显示，还有符号、单位、极性、小数点等显示，直读起来非常方便。

(9) DVM 的主要缺点是线路复杂，元、器件繁多，工艺技术不保证，容易出现故障。

(10) 价格比较贵。有些 DVM 还没做到小型、轻便；高档的 DVM 使用条件要求较严格，这就限制了它的广泛应用。随着 LSI 和计算技术的发展，这些问题终将逐步得到解决。

(二) 数字电压表的发展动向

最近十几年来，随着半导体技术、集成电路 (IC) 和微处理器技术的发展，数字电路和数字化测量技术也有了巨大的进步，从而促使了 DVM 和 A/D 变换器的日新月异，并不断出现新的类型。今后，总的趋势是简单电路代替复杂电路；高准确度代替低准确度；低成本代替高成本；同时向着自动化、程控化和智能化相结合的方向发展。

(1) DVM 的小型化、多功能化。DVM 只作为直流电压测量的时代已经过去了。当前，数字多用表 (DMM) 以其多功能、宽量程、读数清晰等优点而被广泛使用，它之所以能够代替指针表，在于它的小型化、固体化和手持化。例如，HP 公司的 970 A 型 DMM 只有 $3\frac{1}{2}$ 位，用发光二极管显示，采用集成块，重量仅有 200 g 左右，有四档自动量程转换，电压范围 $0 \sim \pm 1000 \text{ V}$ ，拿在手上好象一只仪表探头。目前，DMM 一般多在三功能以上。

(2) 实现自动化。数字电压表的自动化包括两个方面：一是数字电压表要为生产、科研自动化测量服务，必须实现

可编程序，同时要采用标准接口技术，随着微处理器的发展，这方面已逐步形成；另一方面，数字电压表本身也要自动化，如自动检测、自动校准、自寻故障等。例如，有的DVM不仅能自动调零和校准，而且具有自寻故障的功能，一旦发生故障，在故障点能点燃指示灯，便于迅速检修。数字电压表已成为实现自动测试系统的关键。

(3) 进一步提高灵敏度和准确度。鉴于许多传感器小电压测量的需要，DVM的灵敏度要进一步提高。目前能达到 $0.1\mu\text{V}$ 的产品已经不少，如Dana的5700型；Solartron的1490型、7081型；YEW的2805型以及国产DS18M1型等。法国TE925型积分式DVM采用光电斩波技术，灵敏度可达到 10^{-9}V (1nV)。如果采用低温超导技术，灵敏度还可以进一步提高。

众所周知，长期以来一直沿用饱和标准电池作为电压标准，年稳定性可达 10^{-7} 。1962年发现的约瑟夫森效应(Josephson)的应用，使电压稳定度达到了 2×10^{-9} ；1985年以后的多结阵列数据用计算机进行处理，亦能达到 10^{-9} 量级。

目前，A/D变换器的原理制式越来越多，美国HP公司的3456A型和英国Datron的1071型采用多斜原理，将电压变成时间量，再按比例变成数字量。美Fluke的8506A型DVM采用余数再循环式，其显示位数为 $7\frac{1}{2}$ 位。如采用超导器件作为内基准，测量准确度可突破到 10^{-7} 的量级。

(4) 测量速度和抗干扰能力。当DVM用于动态测量时，测量速度则是关键性指标。但是，目前DVM所采用的制式其显示位数与测量速度成反比关系，准确度越高速度越低，反之亦然。因此，测量速度和准确度是矛盾的。在A/D变换器中，速度最快的是光电式，其次是并行A/D式，逐次逼