

北京图书馆藏

20633

中文资料

数字仪表文集

22
哈尔滨电工仪表研究所情报室

1976年12月

毛主席语录

古为今用，洋为中用。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

目 录

综 述

数字仪表的发展概况	(1)
数字电压表的发展及其今后的动向	(8)
积分式数字电压表	(25)
最近的安装式数字仪表	(31)

理 论 与 设 计

高精度直流数字测量仪器的设计	(41)
新型积分—斜波式数字仪表	(45)
积分式数字电压表	(49)
双斜式积分型数字电压表的精度	(53)
数字测量仪表计数的非单值的消除	(59)
双斜式积分数字电压表的误差计算	(61)
双积分法模拟—数字变换的误差	(65)
积分型数字电压表由于干扰造成的误差	(69)
测量瞬时值电压的数字电压表	(72)
有效值数字电压表	(75)
安装式数字仪表的设计运算和结构	(77)
液晶显示安装式数字仪表	(83)
应用测量三绕组间磁场差方法的高精度数字电压比率表	(87)
有运算机能的斜波型数字电压表	(92)
干扰对积分数字电压表准确度的影响	(94)
积分式数字电压表对工频干扰的抑制能力及其提高	(97)
关于数字电压表的屏蔽	(102)
脉冲调宽调制器式数字欧姆表线路	(106)
电子数字式精密功率、电能表	(109)
用时分割乘法器作音频功率的精密测量	(126)
具有高精度的数字功率因数计	(134)
电力用数字相位表的研制	(139)
数字式相位表	(142)

测 试 技 术

数字电压表的校正和试验法	(144)
数字电压表试验方法	(151)

关于数字电压表试验方法的解释	(157)
数字式电压表的自动检验与自动校准	(164)
测量系统计量特性自动校正的新方法	(169)
数字电压表输入阻抗的测试	(175)

数字技术的应用

测量仪器中的数字技术	(177)
运算放大器在直流测量中的应用	(184)
2581型数字式RLC测量仪	(192)

部件与元件

数字化测量技术中的交直流转换器	(201)
FH19型交直流电压转换器	(213)
A—D(模—数)变换器	(221)
D—A(数—模)变换器	(228)
集成(IC)化积分型V—F变换器的设计	(232)
电容器式脉冲频率变换器最大输入电压的计算	(240)
脉冲宽度变换器的抗干扰能力	(242)
差式积分电压—数码变换器的误差	(245)
国产集成电路运算放大器及其应用	(250)
0.1 μ V仪用前置放大器	(274)
运算放大器的标准使用方法	(281)
用于校验高准确度数字电压表的步进电位差计和分压器	(294)
高稳定性的稳压器	(298)
数字电压表用的高稳定性基准电压源	(300)
动态散射式液晶的研制现状	(302)
数字电测仪表的基本名词和定义	(307)
附录:国外某些公司数字式仪表的统计表	(309)

数字仪表的发展概况

哈尔滨电工仪表研究所情报室

本文论述了各国数字仪表的发展情况、目前的技术水平以及数字仪表今后的发展方向。

一、数字表的特点和发展情况

1、数字仪表的特点

随着科学和生产的不断前进,对测量技术也提出了新的要求,其中最突出的是自动化测量。数字仪表就是适应这种客观要求而产生的。

所谓数字仪表,就是说它将连续的被测电量自动的变成断续的,而后接受数字编码,并将测量结果以数字显示。

数字仪表的技术基础是测量技术、计算技术和电子技术。

表明各种类型的数字仪表构成体系的综合性结构图如下图。

由图可以看出,测量直流电压有三种直接方式。图中没有表示出复合方式。

根据数字仪表测量的参数和动作原理,可以进行分类又可按其用途分成实验室、通用、安装式数字仪表。

相对于其他测量仪表,数字仪表具有测量精度高、灵敏度高、测量速度快、指示值的客观性(不因人或位置而异)、测量的自动化、可以将测量结果以数码的形式输出等一些优点。

数字仪表基本上有测量和进行量的变换两种用途。

2、数字仪表的发展

从1952年美国的 Non-Linedr Systeme 公司首次制成4位数字仪表到今天,它已有二十多年的历史,伴随着电子元件急剧发展,数字仪表也得到了迅速的发展和提高。它从少数几个国家到许多国家都能制造;从一两种工作原理发展到十几种原理;从一只仪表只能测一两种参数到能测十几个参数;从机电式元件到全固体化,价格也随之大为下降;从只在实验室作为标准表到检测和控制生产过程装置中大量应用;从只能测电量到可测各种非电量。

测量精度上(以直流电压为例),几年来逐步跃升,从 10^{-2} → 10^{-4} → 10^{-5} 到 10^{-6} 数量

级;测量参数不断扩展,例如最初只能测量直流电阻,而目前能够测交流阻抗,又分为容抗,感抗直到整个阻抗;测量的自动化程度不断提高,更进一步的应用了计算技术,实现了测量结果的存贮、平均、误差等计算。还出现了能直接模拟被测量的数字方程式并进行计算得到被测量的测量结果的所谓计算式数字仪表。它将给动

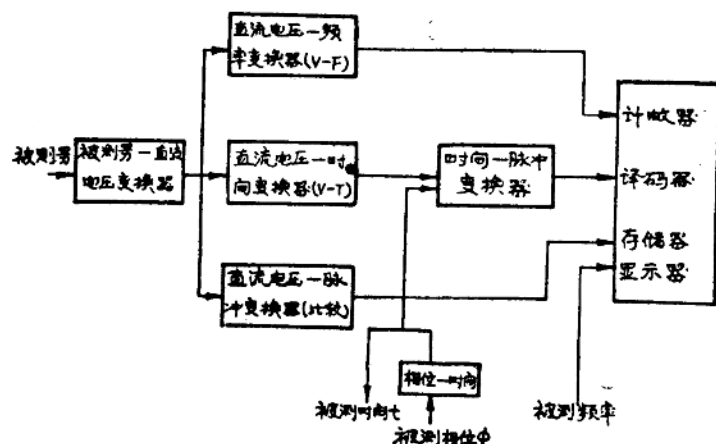


表 1

测量参数	直流电压	交流电压	电阻	功率	相位	频率	时间
精 度	0.0002~0.2%	0.01~10%	0.01~10%	0.01~1%	0.03°		0.1μS
测量范围	1μV~16000V	(10~20GHz) 10μV~12000V	10 ⁻⁴ ~10 ⁹ Ω	1nW~20KW (0~1MHz)	0~360° 0~25MHz	21GHz	0~10 ⁸ S
灵 敏 度	0.1nV	1μV	10 ⁻⁴ Ω (0.1mΩ)			1mV	

表 2

参 数	输入阻抗	干扰抑制	测量速度	重 量	尺 寸	价 格
范 围	100K~10 ⁸ MΩ	CMR 180db NMR 120db	1次/3秒~ 20000次/秒	最轻只有250克	最 小 为 76×45×38mm	100~3000美元

态测量技术开创广泛的前途。近期也出现了数字和指针相结合的仪表，以便相应补偿各自的不足。

这里给出所知道的用数字仪表测量的一些电参数所达到的指标，如表 1 所示。数字仪表其他性能如表 2 所示。

二、数字仪表的技术水平

这里我们主要谈的是直流电压表，测量其它参数的表，只选突出的问题谈一下。因为其它一些参量一般都可变成直流电压，然后用直流电压表加以测量（频率、相位、时间除外，因它们属于直接变换的量）。

表 3

作用原理	特 点
比较方式	精度高、速度快、线路复杂
斜坡方式	精度低，线路简单
积分方式	抗干扰能力强，线路简单，速度低。
复合方式	精度高，灵敏度低，抗干扰能力强，线路复杂。

1、主要工作原理的比较

直流电压表的几种主要工作方式的特点列于表 3 中。

目前各国都认为积分方式中的两次积分为

最优方案，其精度可达 0.003%，在精度上可与比较方式相比美。在抗干扰方面也比其他积分方式优越。再一个是积分式的脉冲调宽式，其精度可达 0.005%。现在都在运用两次积分的复合方式。

2、主要技术指标与仪表关键部件的关系

作为测量用的仪表，其最主要的指标是误差。以前最常见的误差表示方法是 $\pm$ （读数的 $a\% + 1$ 个字），但随着数字仪表精度的提高，现在都改用 $\pm$ （读数的 $a\% +$ 满度的 $b\%$ ），而且要注重使用温度，保证精度的时间和测量量限。误差中的系数 a 是由于仪表中内附的基准源和仪表中测量线路的传递系数的不稳定所决定的，一般基准源的不稳定度是 1×10^{-5} / 几个月，传递系数的不稳定主要决定于电阻的不稳定性，其一般是 2×10^{-5} / 几个月，误差中的系数 b 是由放大器的零漂、热电势和量子化误差引起的。因此，在看一个产品误差时必须全面的看，例如日本武田理研的 TR-6567，使用在温度为 $23^\circ \pm 1^\circ \text{C}$ 是 $\pm$ 读数的 0.0003% $\pm$ 一个字，当使用温度为 $20^\circ \sim 30^\circ \text{C}$ 90 天时，误差就变成读数的 $\pm 0.006\%$ ，而美国的 H-P 公司的 3462A 是 $25^\circ \pm 5^\circ \text{C}$ 90 天，误差为 $\pm$ （读数的 0.004% + 满度的 0.0002%）。可见还是 3462A 的误差小。

数字仪表的第二个指标是输入阻抗。在低电平(小于10V)电压时,一般是直接加在放大器输入端,由于运用深负反馈放大器,使得输入阻抗大为提高,一般达到 $10^2 \sim 10^4 \Omega$,例如英国Dynamco公司的DM2010在1V量限上输入阻抗为 $25000 M\Omega (2.5 \times 10^4 \Omega)$ 。大的($>10V$)输入电压时,应用输入分压器,一般输入阻抗降为 $10^2 \Omega (10 M\Omega)$,因再大难于保证分压器传递系数的稳定性。应用扩展放大器输出幅度特性的方法,可以扩展被测电压的测量范围,而具有高阻抗,例如日本的武田理研的TR—6515同插件TR—6017结合,在测100V时,输入电阻达 $10^9 \Omega (1000 M\Omega)$ 。

第三个是分辨力——最末位一个字的表示量。在具有场效应管调制器的输入前置放大器时,一般具有分辨力为 $10^{-5} \sim 10^{-6} V (10 \mu V \sim 1 \mu V)$ 。每进一步提高分辨力,由于感应(在被测信号阻抗上的)所限,变得困难。例如,为使分辨力达 $10^{-8} V$,则被测电压源电阻不应超过 10Ω 。在高灵敏度的放大器中一般应用机械振子调制器。例如日本的TR—6018D与TR—6515结合保证分辨力为 $0.01 \mu V (10^{-8} V)$ 。

第四个是干扰抑制系数。一般比较方式的都具有滤波器,以加强抗干扰能力,积分式的不用。

从上面技术指标的介绍过程中,可以看出,仪表中的主要部件是电阻(或分压器),放大器和基准源。

分压器一般用高精密线绕电阻分压器和感应分压器,使用前者的数字电压表年稳定度不超过0.002%,电阻的温度系数为0.0001%/1°C。例如英国的Dynamco公司的DM2022、DM2023、DM2025应用这样的分压器基本误差在0.005%左右,日本的武田理研,已将用塑料封装的高稳定的精密电阻改为金属封装,使其有 $0.5 \sim 1 \text{ppm}/1^\circ\text{C}$ 的稳定度。在DM2010和DM2011数字表中应用感应分压器,这种分压器不稳定性仅为0.0001%,而温度从0到40°C一般没有什么变化,具有感应分压器

的数字电压表,允许以0.00001%的精度进行电压比较。DM2010和DM2011的长时间误差为0.001%。

日本武田理研正在研究时分割法代替传统的电阻分压法,此公司用此方法取代TR—6567中的电压型变换器,以便提高精度和应用大规模集成电路。

放大器在仪表中有两种用途,其一是用于变换部分,其二是向小电压区域扩大测量范围。其典型产品是日本的TR—6018,它的传递系数是 $1-10-100-1000$,分辨力 $0.01 \mu V$,零电平漂移是 $0.03 \mu V/1$ 个月,误差0.02%,温度系数是 $0.07 \mu V/1^\circ\text{C}$ 。西德的Nanomat 9208型高灵敏度数字电压表(量限 $0-10 \mu V-100 \mu V-1 \text{mV}$)中的放大器的零漂是 $10^{-3} \sim 10^{-8} V/\text{小时}$ 。

基准源是仪表的一个内附基准,可以说它决定着整个仪表的最高精度。目前,都采用硅稳压管(齐纳二极管)作的基准源,经过仔细的选择,其稳定度在 1×10^{-8} /几个月。因此,数字仪表再想提高精度,必须首先提高基准源的精度。目前美国、日本等正在研究将约瑟夫逊效应器件做仪表中的基准源,而代替标准电池,精度可达 10^{-8} 数量级,美国Fluke公司可能在2—3年内会有应用该器件的新数字电压表出现,日本武田也在研制。

3、结构及所用元件

数字仪表从结构方面,经历了一机单机能一机插件式的多机能——卡片式多用表,而在系统中应用的表采用积木式结构。

从所用元件看,数字仪表所用元件是伴随着电子技术的不断发展而得到不断改善的。从应用机电元件到电子管、晶体管,到薄膜集成电路,到逻辑部件用半导体集成电路,现在出现了全固体电路式。各种元件的密度列于表4。

另一个比较大的部件是显示部件,现在已应用了液晶显示。各种显示器及其性能列于表5。

随着元件变化,数字仪表得以减小尺寸、减小重量,而可靠性得以提高。

表 4:

各种安装方式元件的密度 (个/dm³)

元 件 种 类	CT管	Sub MT管	印 刷 布 线	高 精 度 安 装	薄 膜 集 成 电 路	半 导 体 (固 体 电 路)
密 度	30	300	150	$5 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$	$3 \times 10^4 \sim 10^5$	$6 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$

表 5

显 示 器	性 能	出 现 年 代	工 作 电 压 (V)	尺 寸 (mm)	寿 命 (小 时)	消 耗 功 率 (W)
旋 转 式 显 示 器						
光 学 数 字 显 示			6—24	比较大	5万	1~3
数 字 放 电 管		1955	170	8—135	20万	0.2~2
发 光 二 极 管		1968	1.7			
液 晶 数 字 显 示		1968.5	7		>2年	<14μW

4、标准化、系列化与质量管理

因为数字仪表的历史不长,特别在1960年以后发展很快,因此各国有关数字仪表的标准化工作一般都在1970年左右进行的。例如苏联是68年制定的数字仪表名词、定义、检定等国家标准;日本在67年8月开始调查,经一年编制成检定和系列化方案。设立数字式电气计器专门委员会。

在产品的系列化方面,在资本主义国家都是较为混乱的,每个制造厂都是各行其事,特别是美国更乱一些,英、德、日等国近几年情况好一些,因其制造公司较少。例如日本的武田理研的产品有从0000—8000共八个系列,数字电压表为6000系列。

在质量管理方面,各国都非常重视直流电压和频率标准的建立。例如武田的直流电压标准是加拿大的9930,精度为0.0001%;频率标准是原子频率标准器(Atomicron Nc—1601)其性能:原子频率绝对值正确度: $\pm 1 \times 10^{-10}$

长期稳定性: $\pm 1 \times 10^{-11}$ /永久的

短期稳定性: $\pm 1 \times 10^{-12}$

输出功率: 100KHz, 1MHz/1伏,

50欧姆,

并且建立了频率管理系统,以便付之应用。

除了建立基准器以外还制造一些精度较低一些的校验装置,如美国的H—P公司的H—

P740B电压发生器,直流从1μV~1000V,稳定度为±(读数的0.002%+满度的0.0004%)/30天,负载电流为50mA,类似的还有 Selcel 公司的5500和5501型。

5、其它一些品种的数字仪表的情况

a. 频率表: 目前测频最高为武田的 TR—5024型频率变换器, 可到 21×10^9 Hz (21 GHz), 美国到18GHz。

b. 交流电压表: 精度较高的为美国的 Eldorado 公司的 1820A, 精度为0.01%, 测量范围为1mV—1000V。

c. 瓦特表: 日本的YEW(横河)制造的2885型瓦特表, 它采用信号的时间分割方式的乘法器, 可工作在直流和声频段, 直流时误差不超过0.01%, 而在50~500Hz时是0.02%, 在20~10KHz为0.25%, 在额定的输入电压(75、100、150、300V)和电流(6.5、1.2、5、10、20A)时, 功率测量范围为37.5~6000W。

d. 万用表: 它在近几年得以飞速发展。一般的是两种机能以上称为多用表, 目前机能最多的为苏联的 Уцип—1 型, 可测电压、电流、电阻、电感、频率、时间、相位。在多用表中被测量的变换不用插件, 而用面板上的转换开关或用印刷板的互换(卡片单元式)。按着精度它可分为高、中、低三类。其一般性指

表6

分 类	测 量 参 数	直 流 电 压	直 流 电 流	交 流 电 压	交 流 电 流	电 阻	价 格
高 精 度		0.003~0.01%		0.05~0.1%		0.01~0.10%	1500~3000 美 元
中 精 度		0.05~0.02%		0.30~0.1%		0.10~0.02%	20~40万日元
低 精 度		0.10~0.20%	0.2~0.3%	0.20~0.5%	0.2~1%	0.20~1%	10~20万日元

标列于表6。多用表主要是其经济性而使其具有生命力。

e. 安装式数字表

安装式数字表是1967年左右出现的,其主要应用于中央检测和自动测验及控制系统中。其作用是进行信息的变换和测量指示,对其要求是抗干扰能力强及对工作环境的适应性。

f. 变换器

各国除了生产数字仪表外,还生产各种变换器,如交流变换为直流的变换器,以及A/D、D/A变换器,作为直流数字表的附件或单独出售。

6、经济指标

以前数字表是相当昂贵的,致使其不能广泛的应用。1970年以后,日、美等国高精度数字电压表已由原来的9200~20000元(折合人民币,下同)下降为3700~7000元。现在已有700~800元一台的简易型数字式多用表,安装式数字表为几百元左右。在日本希望降为200元一台,目前各国都在力图降低价格,使其与指针式仪表价格接近,以便大量代替指针式仪表。在表7中给出1971年左右,日、美等国各类数字仪表的价格表。

随着价格的不断下降,尺寸和重量的缩

表7

性 能 等 级	显 示 位 数	灵 敏 度	精 度	价 格 (折合人民币)
A	109999~1299999	10μV, 1μV, 0.1μV	读数的0.004~0.006% + 满度的0.001%	6600~13000元
B	12000~59999	10μV, 100μV	读数的0.005~0.01% + 1个字	3000~7000元
C	9999~12000	10μV, 100μV	读数的0.005~0.1% + 满度的0.01%	2200~3000元
D	3000~6000	10μV, 100μV 10mV	读数的0.05~0.1% + 1个字	1500~1800元
E	999~2000	10μV, 100μV 1mV, 10mV	读数的0.2~0.1% + 1个字	731~1500元
F (DPM)	1999~9999		读数的1%~0.05% + 1个字	350~730元

小,品种的不断增加以及自动化的发展,数字仪表的产量大幅度的增长,据日刊“电子工业报”报导,1970年日本的数字表的产量是6736台,而1971年是9427台。例如武田的TR-6354B型数字多用表,两年的销售量某型为1万台(价格74800日元),苏联的一个厂年产量从400台转年增为1000台以上。

7、一些国家数字仪表水平的比较

一些国家数字表有关方面的比较列于表8中。

美国:其生产数字仪表最早,各方面发展的比较全面。其综合水平最高,几乎各种电参数测量都在0.01%以上。研制的新原理最多,晶体管、薄膜、半导体集成电路也都是首创。

表 8

国家	比较项目	第一台表制造厂 出现时间(公司)数	代 表 性 厂 (公 司)	数字表原理 首创数	直 流 电 压		测 量 精 度		灵敏度	测量频率最高值	所用元件水平	价 格 (以精度为 0.01%计)
					最 高 精 度	实 用 精 度						
美 国		1952 100以上	Fluke H—P Pon—Ligos Systems(NLS)	8		$\pm 0.004\%$ (90天 $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)			0.1 μV	18GHz	固体化液晶显示	3000~7000元
英 国		1958 17以上	Solartron Digital Measurement		读数的0.0001% +全标尺0.0001 3个月	0.016%90天 $\pm$ 5 $^{\circ}\text{C}$			0.01 μV	600MHz	"	
日 本		1958 13以上	武田理研, 横河电机, 桑野	4	读数的0.0003% ± 1 个字	$\pm$ (读数的0.0006 %(90天+20~30 $^{\circ}\text{C}$))			0.01 μV	21GHz	"	3000~7000元
民 德		1958 4以上	Rochos Sessel To kelec		读数的0.0025% +全标尺0.0015 %	$\pm 0.0008\%$ (90天 +20~30 $^{\circ}\text{C}$)			1 μV	520MHz (直接计数)	"	3000元(0.1%的 万用表)
西 德		10以上			0.0003%				0.1 μV		"	
苏 联		1955 10以上	Вибратор Щефский Краснояр		0.0006%	0.01%			0.01 μV	40MHz (直 接)	"	4000~8000元
中 国		1958 26以上	上海电表厂 哈尔滨无线电七厂 北京无线电仪器厂			0.01%			0.1 μV	18GHz		

英国：其数字仪表是在较高级的指针式仪表和仪器的基础上发展起来的，以比较式数字表为其所长。其SE实验室制成SE215型误差为0.0002%的数字表，Solartron公司制成JM1776型计算式数字表，使动态测量技术大大向前推进一步。

日本：日本紧跟美国，例如美国Fairchild公司1966年首创两次积分型仪表，日本在1966年也跟着制成此类仪表。其中武田理研公司的频率计可说名列首位，横河电机以脉冲调宽方式为基础，制成一个系列。

法国：以多用表著称，在此方面与日、美在争夺市场上十分激烈。

西德：其水平为世界先进水平，例如Bursteys prazisions messtechnik(ФПГ)公司Nanommat系列9208型7位数字表，灵敏度为0.1nV (10^{-9} V)。

苏联：理论研究水平较高，但元件工艺水平差。例如利用霍尔效应制造的功率表，有些国家达0.3%，而苏联由于霍尔片不过关，只作到1%。

三、数字仪表的发展趋势

近十年，在测量技术中主要的趋势是：第一，从模拟测量技术向数字测量技术：从单一的一个通道的测量向综合的和多通道的；从单个仪表向测量信息系统过渡。第二，各种非电，电量测量变换成统一量（时间、频率、直流、电压）后进行测量。第三、由半导体分立向集成电路电子学过渡。

上面头两个方面，如果没有数字仪表是做不到的，结合着测量技术的要求，数字仪表的发展趋势如下：

1、高精度、高位数、高灵敏度

目前数字仪表的最多位数是7位，日本武田理研正在利用美国Fluke公司的剩余再循环的方式制造8位数字电压表，精度为千万分之二，(0.2ppm/3个月)，灵敏度为0.1μV。

2、制造低价格的仪表

各国都在制造廉价的数字表，以使其在更

大的范围内代替指针式仪表，其方法是降低成本和一表多用。

3、利用电子技术中的最新成就

在数字表中大量运用半导体集成电路、液晶显示，以减小体积、重量，提高可靠性。

4、使仪表测量的参数范围更扩大

例如测量阻抗的表，再使其能测量感抗和容抗等。

5、达到使用上更自动化

例如对测量结果进行平均。误差计算等的数据处理。

6、研制全模拟型的计算式仪表

从整个仪表的发展情况可看出如下顺序：指针仪表→电子仪表→数字仪表→计算式仪表。头两种是连续指示仪表，后两种是数字仪表。

如英国Solartron公司的JM1776型是计算式仪表，按被测量的数字方程（动态的）来测量的，因此它可以测量各种波形的参数。计算式仪表由于进一步的应用了计算技术，它更近于计算机了。

7、数字仪表应用的发展

数字仪表由只应用于实验室中作测量和校验用，到现在已被应用于数字处理系统、各种元件的自动分选和特性的自动测量系统、巡回检测系统、自动控制系统。并已扩展到其它领域的各种物理量的测量，如温度、重量、长度的测量。现在医学上也大量应用数字仪表，如脉搏计等。

参 考 资 料

- [1] 国外部分测试仪器概况 上海市仪表局情报所
- [2] “无线电”1973年№2 中国科学技术情报所重庆分所
- [3] “电子技术”（日）1966№11
- [4] 电气学会技术报告（2部）№11.1970.10月
- [5] 电子计测 通卷121・№7.1970
- [6] 电子计测 №3.1971
- [7] 电子计测 №3.1972
- [8] 电子计测 №6.1972
- [9] 电子计测 №10.1972
- [10] 武田理研厂的频率标准 TR—技术杂志
- [11] 日经“电子技术” 1973.7
- [12] Приборы и системы управления 1969—2. 1970 6.11 1971—6 1973—3.2.5
- [13] ГОСТ 13607—68 Группа 1730
- [14] 测量文摘〔俄文〕72—73年
- [15] 英Solartron, 法Tekelco, Alrtronig公司样本。

数字电压表的发展及其今后的动向

数字电压表(以下简称为DVM)从1952年问世以来,经历了不断改进的过程,从最早采用继电器、电子管的型式发展到了现在的全固态化、集成化(IC化),另一方面,精度也从0.1%提高到了现在的0.01%~0.005%,而且从实验室用的高价的所谓的样品开始已发展到了现在厂矿企业广为利用的所谓的廉价型,进而出现了能够用于安装板上作指示仪表的安装型。

在此,将根据数字电压表各种型式所出现的次序,叙述其发展经过,同时对今后的动向予以简述。

1. 数字电压表的发展经过

1-1、比较型数字电压表

1952年由美国NLS公司所研制的比较型DVM是最早出现于世界的DVM了。它是一种将被测输入电压变换为时间间隔,并以此时间间隔去驱动脉冲发生器,由计数器读取其脉冲数的类似现代计数式的变换装置。它的特点是直接控制振荡器。

虽然这种型式存在着很伤脑筋的问题,即数字—模拟(简称为D/A)变换器——它实际上是一个电流求和装置——的组成单元如开关电路、逻辑电路、放大器等等都采用了电子管,所以须把灯丝电源变化引起的漂移进行补偿。然而,当时作为完全新型的高精度仪表,把它作为模拟—数字(简称为A/D)变换器广泛用在数据处理中了。

随着A/D变换器的广泛应用,电位差计的自动化问题就提到日程上来了。于是,作为自动化的措施,逻辑电路采用了电话机用的继电器。若将变换速度置于次要位置,那么在晶体管还没被普及的当时这种逻辑电路确实用起来是很方便的。因而具有这种逻辑电路的逐次比

较型DVM的性能已达到了四位显示,精度为0.05%,测量速度为0.5秒,极性和量程转换都为自动的地步。

随着电子元件的发展,1958年在美国又出现了使用步进开关的跟从比较式数字电压表。这种型式的长处为,因为直接取得十进位数而不需显示电路和打印输出用的编码变换器,所以电路结构简单。其短处为步进开关的旋转速度最大也不过是每个阶跃30ms,所以响应迟缓,需1~3秒的测量时间,驱动功率大,寿命不长。

在1964年,随着电路的晶体管化和小型化这种步进开关型式被淘汰了。然而,另一方面,1960年开始出现了采用干簧继电器或水银继电器的比较式DVM,它的出现进一步提高了DVM的精度和速度,就是说,测量时间缩短为0.1~0.5秒,较之步进开关式提高将近10倍,满量程也出现了五位(99999)。这种比较式有逐次比较和跟从比较两种,分辨率也达到了100 μ V,极性显示和量程转换也全被自动化了。这种型式因为干簧继电器比起电磁继电器其触点只有一组,所以寿命长且稳定,另一方面水银继电器的寿命和稳定性就更优越些。然而采用水银继电器的比较式DVM的成本高,同时存在结构上要求不能有30°倾斜的缺陷。

作为转换标准电压的D/A变换器的开关而采用这种继电器,但是随着晶体管、二极管等元件性能的进一步提高,从1961年开始也出现了不用机械式继电器的全固态化比较式数字电压表,全固态化DVM是作为数据处理用D/A变换器而迅速发展起来的,其重点在于高速度变换,输入电压为10V左右,分辨率为1~10mV,变换速度为100 μ s~1ms。现在甚至达到了10 μ s以下的高速度。

在比较式中具有最重要作用的比较器,不

管在步进开关型中还是在干簧继电器型中几乎都采用了机械振动子,然而近来随着晶体管的发展而迅速发展的所谓运算放大器的应用,这种比较器也被集成化了。因此,近来在欧美全固态化的高精度比较式DVM就发展得很快。

它们的性能大致是:

- (1) 位数: 满度99999, 109999, 159999
- (2) 灵敏度: $100\mu\text{V}$ 或 $10\mu\text{V}$, 外附前置单元时, $1\mu\text{V}$, $0.1\mu\text{V}$
- (3) 精度: 读数 $0.01\% + 1$ 个字
或读数 $0.005\% + 1$ 个字。
- (4) 测量时间: 一至几十毫秒
- (5) 输入阻抗: $10\text{M}\Omega \sim 1000\text{M}\Omega$
- (6) 量程、极性: 自动

1—2、计数型, 积分型DVM

如前所述, DVM 是从比较式开始的, 然而过了一两年以后便出现了以计数接合器构成的计数式 DVM。最初的计数型为斜波—时间式, 是产生比例于输入电压的时间间隔而计数在此期间通过门的标准脉冲的一种型式, 与比较式相比, 其逻辑电路少而电路简单, 因而成本低, 同时测量时间也快。但是, 其精度受到斜波电压的直线性和稳定性的限制而只能为 0.1% 。HP 公司的最早 DVM 就属于此种型式。但是欧洲 Blackburn Electronic 就用此种型式作出了五位显示, 0.01% 的精度, $10\mu\text{V}$ 分辨率的 DVM。与这种变换型式同样的还有以阶梯波形成斜波电压的阶梯—斜波式 DVM。现在 0.1% 精度的简易型 DVM 大都以这种型式构成。

所谓数字电压表, 是将直流电压变换为数字的 A/D 变换器, 然而到目前还没有直接将交流电压变换为数字的 A/D 变换器。

那么, 是否随着 DVM 精度的提高而所测得的直流电压为单纯的电压呢? 回答是否定的, 就是说存在着大于直流电压电平 10% 或 20% 的交流成分。常遇到的情况是工频 50Hz 或 60Hz 甚至脉冲干扰。

在这种场合, 以 DVM 测得的电压是指哪一个电平呢? 在回答这一问题之前, 先弄清什

么样的电压叫做直流电压。一般地说, 当把波形 t 的函数 $F(t)$ 展开成富里叶级数时, 与时间无关的第一项 F_0 定义为直流电压, 因此, DVM 只要指示出此值就正确了。然而, 比较式和斜波电压式都存在着工频交流干扰的影响而不能正确指示出这一直流分量, 所以须在输入端设置一滤波装置。

作为测量直流电压的理想仪表, 历来采用了磁电系指针仪表。然而随着 DVM 的发展, 在 1962 年出现了能够同这种指针仪表比美的具有平均值指示特点的所谓的积分型 DVM。而这种型式的最初阶段又都采用了电压—频率 (简称为 V—F) 变换式, 它是产生比例于被测电压的频率而由计数器在一定的采样时间内计数此频率即脉冲数的一种测量型式。

再说, 虽然 V—F 变换器的种类不少, 但是它们的直线性和稳定性都存在问题, 而用于 DVM 的型式就仅限于 HP 型式 (因美国 HP 公司所研制而得名)

随后在 1966 年由美国 Fairchild 公司研制出了称为双斜率式 (或称重积分式) 的 DVM, 目前这种型式所构成的 IC 化廉价型 DVM 占 DVM 的大多数。这种型式的基本原理是一种电压—时间变换型, 当输入被测电压通过积分器时, 能够抵消其输出的标准电压被转换而加入于积分器的输入端, 从这一时间开始计数器是计数标准脉冲, 当积分器的输出被检出为零时计数门就被关闭, 从而实现被测电压比例于时间的变换。

如果, 设被测电压被积分的时间为 T_1 , 标准电压被积分的时间为 t_x , 则成立下列关系式:

$$V_x \frac{T_1}{CR} - V_R \frac{t_x}{CR} = 0$$

$$\frac{t_x}{T_1} = \frac{V_x}{V_R}$$

从上式看到, 变换结果与积分常数 CR 无关, 而且被测电压 V_x 直接受 t_x 和 T_1 之比的影响, 但与它们的绝对值无直接联系, 因此如果将确定 T_1 和 t_x 的标准脉冲取自同一个发生器, 则不需其长期的稳定性。于是, 可以说这种型

式的精度取决于标准电压 V_R 。

在此,将两种型式即V—F变换式和双斜率式进行比较时可发现,前者是一种具有最小单位脉冲数的所谓的数字积分型,而后者是一种完全的模拟积分型。因此,目前V—F变换型五位数字电压表的门时间就约需1秒,而双斜率型则需20~50ms的门时间,所以后者的测量速度快。与此相反,当作为时间长的积分器而使用时,则V—F变换型比双斜率型适合些。而且,当以V—F变换型进行完全的模拟积分时,必然要带来正输入时输出脉冲数与负输入时的输出脉冲数之间的差值。然而,由NLS公司研制出了以V—F变换型进行完全模拟的积分式DVM。

除上述原理之外,1967年由日本横河研制出了所谓的反馈型脉冲宽度调制式DVM。它也是一种电压——时间宽度变换型,它的特点是具有反馈电路而其精度不受比较器不灵敏阈电压的影响。

积分型DVM所指示的是平均值,因而具有噪音干扰影响小的特点,但当在输入电压上迭加一定频率的交流分量时,为了指示 V_{DC} 的直流电平,非在周期 T 的整数倍时间内取平均值不可。这就是说,为了保证精度,必须将V—F变换式的门时间或双斜率式的积分时间准确地选择在 nT 倍,才能指示出直流电平的大小。一般为了消除噪音影响,对工频50Hz选20ms的整数倍时间(对工频60Hz则选16.7ms的整数倍时间)。

上述积分型数字电压表的国内外一般的水准为4~5位显示,灵敏度 $10\mu V$,精度 $0.01\% \pm 1$ 个字。

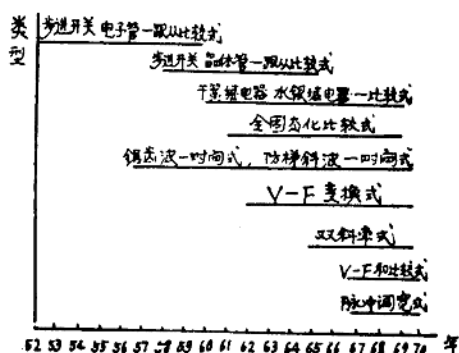
1—3 其他型式

现在,比较型DVM就有高精度六位表,目前这种型式在国外仍然发展着,另一方面,如前所述的所谓高抗干扰积分型DVM却在国内外引起重视而得到了迅速的发展。然而,六位高精度表仍然说明了比较型的优越之处,于是1965年由美国HP公司将具有高抗干扰的积分型和具有高精度的比较型综合而研制出了称

为Dual—Technique的七位数字的DVM。它是一种其高位三位按积分型工作,而其低位四位要按比较型工作的DVM。

除此之外,在欧洲出现了依从从比较型工作的,称为Maximum or Minimum Seeking Mode Operation的测量输入电压最大值或最小值的DVM。

以上简述了数字电压表的发展经过,概括起来如表所示。



DVM的发展图表

1—4 从价格、形状看DVM的发展

前面主要从性能上谈了DVM的发展经过,现在从经济性和实用性来考虑DVM的今后发展趋势。

从NLS公司研制出第一台DVM以来,虽然作为自动化的高精度表使用起来很方便,但其价格高是一个矛盾的问题。比如其价格高达电位差计及其所有附件价格的三倍。然而因具有电位差计不能比拟的许多长处而作为实验室用的测量标准仪器或者作为数据处理装置得到了发展。如今,随着电子元件的发展,尤其是伴随半导体的发展,实现了廉价化和小型化,于是精度要求不太高的数字化的实用仪器就得到了迅速的发展,从1962年开始所谓的廉价型DVM就陆续出现了。这种廉价型的大致的性能是:

测量范围——10, 100, 1000V, 量程手动转换

灵敏度——1 mV

位数——3~4位

精度—— $0.1\% + 1$ 个字

作为廉价型, 1966年由 Faichild 公司制出了价格在300美元左右的IC化的DVM, 与此同时, 在日本也制出了价格为20万日元的高级廉价型DVM和15万日元的普通廉价型DVM。这种高级廉价型的灵敏度也达 $100\mu\text{V}$ 或 $10\mu\text{V}$, 满程为5000的4位显示, 精度为 $0.05\% + 1$ 个字。而普通的廉价型则其灵敏度为 1mV , 以3位显示达到 $0.1\% + 1$ 个字的精度。它们的工作原理有积分型和以伺服平衡式旋转符号板或直接旋转可逆数字轮的型式, 然而由于积分型DVM采用了全固态化IC电路而具有寿命长, 可靠性高的优点, 被广泛采用。

如上所述的廉价型, 作为实用仪器目前广为用在实验室和工厂的生产现场中。从1968年开始, 为实现各种电子测量仪器的数字化在欧美和日本陆续出现了小型安装式DVM。它们的价格也不过在数万日元左右。除此之外, 也出现了叫做高级型检测器的所谓繁用DVM。综上, 从目前的趋势来看, 小型DVM正在越来越多地被普及着。

2、数字电压表今后的动向

前面叙述了DVM的发展经过, 从这里也能看出DVM的今后趋向或者说动向。首先, 对高精度型来说, 分辨率能达到 1ppm (即百万分之一), 若提高内部标准电源、精密电阻等的稳定性, 则其绝对精度也能达到 10ppm (即十万分之一)。而灵敏度也能达到 $1\mu\text{V}$ 或 $0.1\mu\text{V}$, 今后可能达到更高的数量级。但是, 从工业要求来讲恐怕再高的精度就没有必要了。那么高精度型DVM今后的动向是什么呢? 我们觉得,

- ①降低成本,
- ②提高可靠性,
- ③实现小型化。

要想实现上述几点, 就得采用全集成电路甚至采用大规模集成电路。

其次, 对廉价型而言, 首先是降低成本和实现小型化的问题。随着半导体元件的发展,

尤其是廉价的计数器的出现, 七十年代实现100美元以下是不成问题的。

再次, 对小型化而言, 现在安装式DVM的大小同安装式指针仪表相差不多, 若是进一步实现集成电路化, 那么不久的将来就能制出仅有现有仪表的三分之一大小的仪表, 因现有仪表中显示部分和电源部分占很大体积,

以上谈到了数字电压表发展经过及其今后的动向, 若了解国内外目前DVM的水平, 按DVM的精度级别分类具体请参见“电测与仪表”71年12期, 这里不再赘述。下面就各种形式偏电压表的原理作以介绍。

3、逐次比较型数字电压表

3-1、概述

前面已谈到了各种型式的数字电压表的简单测量原理, 看起来繁多, 但归根结底无非是两种型式而已。以比较平衡式为代表的类似电位差计的零平衡来直接进行测量的和以积分式为代表的进行间接测量的两种型式。这两种型式的前一种又类似于天秤, 而后一种则类似于弹簧秤。

在直接比较式中, 有采用汤姆逊——华莱型电桥的连续比较平衡式和采用梯型电桥的逐次比较平衡式两种。首先, 从它们的平衡时间来看, 当被测输入量的变化量小时, 连续比较式就很快取得平衡, 但变化量大时则逐次比较式平衡要快一些。

其次, 从平均变换时间来看, 在使用同一个标准脉冲的条件下, 从理论上逐次比较式比连续比较式短一些。另一方面, 逐步比较式因为每次测量所需的一联串开关的动作要依一定的程序进行, 所以其变换时间一般是恒定的。这是逐次比较式的特点之一。从这一点出发, 又将连续比较式称为非同步式, 而将逐次比较式称为同步式。

基于上述原因, 我们要在此叙述逐次比较平衡式数字电压表。

逐次比较型数字电压表, 一般习惯上又叫做反馈型数字电压表, 它的特点是测量精度

响,稳定性好,测量速度高。因此常被制成高精度数字电压表。现在这类表的精度已达0.005%,同时还可制成快速测量仪表,如巡回检测仪的模数转换器或快速电压表。

逐次比较型数字电压表从工作原理来看好象一架自动天秤,所不同的是这里不是加减法码,而是利用增减电压的办法来实现与被测电压的平衡。因此,这种被增减的标准电压也叫做电压法码。测量的过程是由平衡放大器(检零器或比较器)通过逻辑控制电路而控制电压法码的增减,最后达到电压法码与被测电压的平衡。平衡后,平衡放大器的输出为零,经过显示电路示出电压法码的数值,即为被测电压值。

逐次比较型数字电压表的精度,主要取决于内部标准电压源以及电阻分压器和平衡放大器的精度。

那么,逐次比较型数字电压表的工作究竟是如何来实现的呢?下面对此予以简述。

3-2、工作原理

我们举EO-8型数字电压表为例予以叙述。其电路构成如图1所示,其主体为模拟—数字变换器(下面简记为A/D变换器)。其工作过程简单说来,是在包括数字—模拟变

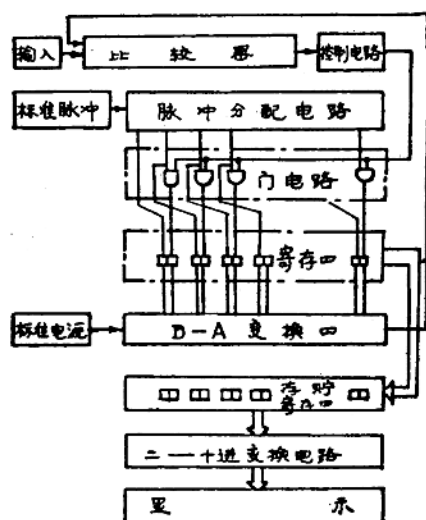


图1 逐次比较式电路方框图

换器(下面简记为D/A变换器)在内的反馈系统中,数字寄存器要按一定的程序从最高位开始逐次比较而进行A/D变换,最后达到模拟输入与D/A变换器输出的平衡。

D/A变换器是由精密的电阻网络(电阻群)和开关以及标准电压源所组成,因此,从某种意义上讲,本仪器的测量方式是基于精密测量的最基本方法——电位差计原理,因而能够进行稳定的高精度的测量。

本仪器的编码采用了二—十进制,一位十进制由四个单元(4, 2, 2, 1)组成,因此本仪器由四位十进制单元和表示“1”或“0”的溢出(过载)的一位共十七个单元组合而表示0到满度10999的数值。这十七个单元又各自对应着十七个寄存器(触发器)。

当由寄存器去控制相应的D/A变换器的开关时,标准电压被各个开关所切换并对应于电阻网络的权系数而分压,从而变换成比例于数字量的模拟量,便作为比较电压而加入在比较器。

标准脉冲通过分频电路从最高位开始顺次被分配,经由那些具有不同时间的判定信号的“与”门而逐次决定每个寄存器的信息。这样,十七次比较平衡动作就结束,输入电压和比较电压的误差最后在一个字以内时,各个寄存器的信息就表示输入电压的数值。

因为测量过程中寄存器的信息是顺次变化的,所以采用同样数目的记忆寄存器,而当计数终了时将所寄存的信息同时移过去。这种迁移是要通过耦合变压器来实现的,因此输入电路和输出电路是隔离着的。

记忆寄存器的信息,照样作为BCD(二—十进制编码)而输出,而且进行二—十进变换而去驱动显示器。

3-3、电压比较电路及控制电路

电压比较电路,是为取得将D/A变换器的模拟输出与被测输入电压进行比较而判定其大小,并控制各寄存器触发门所必需的A/D变换串联信号的电路。其电路构成如图2所示。

比较器由高精度差动放大器所构成,除了

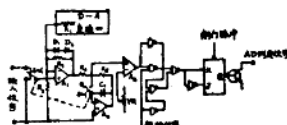


图 2

基本单元外还附有防止饱和电路 (D_1 、 D_2)，零点调整电路 (VR) 以及零点自动补偿电路。

D_1 、 D_2 为对接的齐纳二极管，当放大器 A_1 的输出超过 $\pm 6V$ 时通过两个二极管引入一负反馈，而防止放大器的饱和。至于平衡时， D_1 、 D_2 即使不在其齐纳击穿区域，但其漏电流仍要随温度而增加，然而其最小阻抗即使为 $10M\Omega$ ，也因 R_2 约为 400Ω 而量限的漂移就能减小到 0.005% 以内。

R_1 为 D/A 变换器的输出阻抗，是 $4K\Omega$ 的恒定值。因为 D/A 变换器的满度电压约为 $11V/10999$ ($1mV/1$ 个字)，所以当输入信号电平低于此值时，可以插入 R_2 进行输入电平加上满度值的测量。

由 SW_1' 、 R_3 、 C_1 以及放大器 A_2 来构成零点自动补偿电路。由开始测量的指令信号将各个寄存器复位而使 D/A 变换器的输出为 0，但与此同时将闭合 SW_1 而使比较器的输入也置于零电位。这时仪器的模拟系统所含有的漂移分量就将出现在 A_1 的输出端，但由于 SW_1' 也被闭合着，所以 A_2 就单作为运算放大器而工作，其输出要产生与 A_1 的漂移输出极性相反的电压而充电于 C_1 。当 SW_1 被打开时，本仪器就进行原来的测量动作，但这一期间 A_2 要保持原先被充电于 C_1 的与漂移电压极性相反的电压而补偿 A_1 的输出，从而进行扣除了漂移分量的准确的测量。 A_2 、 A_3 的漂移对输入端来讲，被减小 A_1 的增益倍 (约 200) 而可以忽略不计。

当由比较器的输出去驱动寄存器和 D/A 变换器时，在本仪器中利用闸门电路和触发器所带来的延迟来清除反馈，从而得到稳定的动作。就是说，比较器的输出被加入于 J-K 主从触发器，随后依着比标准脉冲超前 $2\mu S$ 的闸

门脉冲被迁移于随从触发器中，其输出要决定同标准脉冲相符合的同一时间。

至于比较器的输出 AD，AD 要对应被测输入信号的极性而把在 J-K 被切换的输入相对值的比较换成绝对值的比较，便进行正负输入电压的测量。

3—4、寄存电路

作为从比较器所得到的 AD 串联信号来逐次决定寄存器的信息并记忆的电路，由脉冲分配器门、运算寄存电路以及记忆寄存电路等来构成。其电路的构成如图 3 所示。

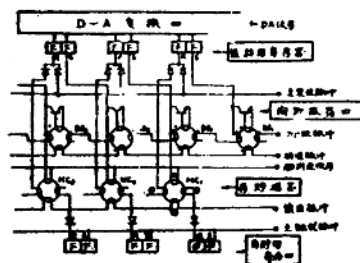


图 3

在图 3 中，由 BO_0 、 BO_1 、 BO_2 、 BO_3 变压器 (采用了方型磁芯) 和晶体管来组成单稳间歇振荡器。在磁芯绕组旁边所标注的黑点表示线圈电流引起的磁化方向。标准脉冲和激励脉冲引起的磁化方向是要相反，而且标准脉冲电流所流的方向应在晶体管的基极线圈中感应出“导通”脉冲，再则集电极线圈和基极线圈的耦合极性要相反。

当依着标准脉冲所有磁芯都保持为 (0) 状态时，若在 BO_0 中流入激励脉冲，则只有此一 BO_0 将从 (0) 状态变换为 (1) 状态，直到下一个标准脉冲流入为止，而当标准脉冲流入时，则又从 (1) 状态变换为 (0) 状态。这样当磁通从 (1) 状态变为 (0) 状态时， BO_0 电路就引起间歇振荡而要产生脉冲。此脉冲电流又作为下一级磁芯的激励脉冲而流入，但因为此激励脉冲电流比标准电流脉冲其安匝比大，所以 BO_1 磁芯就从 (0) 状态变为 (1) 状态，而且又当下一个标准脉冲流入时只有 BO_1 引起间歇振荡。