

高等学校教材

数字化测量技术及仪器

(修订本)

中国计量学院 尤德斐 主编

ENGINEERING
XIAO JIAO

机械工业出版社

前 言

本书自1980年发行第一版以来,数字化测量技术在近年又有了重大进步与发展,这主要表现在数—模及模—数转换器的集成化与固态化,以及微处理机在测量技术中的大最应用。在这两方面的促进下,如果说过去数字化仪器主要用于测量电气量及元件电参数,那么现在实际上已应用于几乎一切测量技术的领域,使数字化测量技术这门课程具有了更广泛的意义。面对品种日益繁多的各种数字化仪器,本课程应更致力于提取最基本的技术内容,而不应成为各类仪器的技术说明。

同时,各兄弟院校电磁测量技术及仪表制造专业教研室这几年来又根据需要开出了《仪器用运算放大器电路》等加强电子学的课程,《脉冲数字电路》也已列入共同的教学计划,因此根据1984年3月在哈尔滨召开的机械工业部高等院校本专业教材会议的决定,在修订后的第二版中,不再列入第一篇“基本电子模拟电路”及第二篇“数字逻辑设计基础知识”,而将课程内容集中在实现数字化测量的基础知识上,使学生对A/D及D/A转换器具有较新的系统的知识,较多熟悉有关数字化测量仪器的集成化器件,掌握常用数字化仪器的测量原理,具备设计数字化仪器的基本误差知识及其他知识。

本书修订工作由中国计量学院尤德斐、哈尔滨工业大学涂君载及上海工业大学夏雪生三同志执笔,尤德斐同志担任主编。哈尔滨电工学院费正生同志担任主审,对修订稿作了仔细审阅及不少有益的修正,使本书避免了不少错误,对此表示深切谢意。本书修订工作难免还有许多不足或错误,敬请读者批评指正。

编者

一九八六年十二月

目 录

绪论	1	§ 2-6 D/A 转换器在电测中的应用	45
第一章 数字化测量技术的一般问题	6	一、程控电源	45
§ 1-1 连续量的不连续表示方法	6	二、可控增益放大器	49
一、连续量的离散化与量子化	6	三、可编程的波形发生器	50
二、测量结果的两种基本显示方法: 模拟量法及数字值法	7	四、用作峰值保持器	53
§ 1-2 数字化测量技术应用于动态测量	8	§ 2-7 串行 D/A 转换器	53
一、周期扫描法	8	一、电路组成	53
二、跟踪测量法	9	二、电路的工作原理	54
三、采样保持法	9	思考题	56
§ 1-3 数字化测量仪表的分类及其主要技术指标	10	参考文献	56
一、数字化测量仪表的分类	10	第三章 模拟—数字转换器	57
二、数字式仪表的主要技术特性	10	§ 3-1 概述	57
参考文献	17	一、A/D 转换器的分类	58
第二章 数字—模拟转换器	18	二、A/D 转换器的主要技术特性	59
§ 2-1 概述	18	§ 3-2 直接比较型 A/D 转换器	62
一、D/A 转换器的基本表达式	18	一、反馈比较式 A/D 转换器	62
二、D/A 转换器的基本工作原理和组成	19	二、斜波比较式 A/D 转换器	82
三、D/A 转换器的双极性工作	21	§ 3-3 间接比较型 A/D 转换器	86
四、D/A 转换器的分类	23	一、双斜积分型 A/D 转换器	87
五、D/A 转换器的技术特性	24	二、具有零漂补偿的双斜积分原理	98
§ 2-2 T 型电阻网络 D/A 转换器	25	三、双重双斜式 A/D 转换器	105
一、T 型电阻网络的特点	26	四、多斜率积分式 A/D 转换器	111
二、T 型电阻网络 D/A 转换器电路分析	27	五、脉冲宽度调制式 A/D 转换器	115
§ 2-3 反 T 型电阻网络 D/A 转换器	30	六、电压—频率(V—F)型 A/D 转换器	121
一、反 T 型电阻网络 D/A 转换器的基本电路	30	§ 3-4 复合型 A/D 转换器	135
二、电流切换开关	32	一、剩余再循环型 A/D 转换器	136
三、双极性工作方式	32	二、动态刻度展宽式 A/D 转换器	139
§ 2-4 权电阻型 D/A 转换器	34	§ 3-5 高速 A/D 转换	145
一、权电阻型 D/A 转换器的工作原理	34	一、并行 A/D 转换器	146
二、变形权电阻网络	35	二、并串行 A/D 转换器	148
§ 2-5 集成 D/A 转换器	36	思考题	150
一、10 位单片 CMOS D/A 转换器	36	参考文献	150
二、双极型十二位 D/A 转换器	42	第四章 频率和相位的数字化测量	151
		§ 4-1 频率和时间的数字化测量	151
		一、频率的计数法测量	151
		二、周期的计数法测量	153
		三、频率比的测量	156

四、时间的计数法测量	158
§ 4-2 提高频率及时间测量准确度和分辨力的方法	158
一、游标法	159
二、内插法	160
§ 4-3 提高计数速率的方法	162
一、预定标法	162
二、电流型开关电路	162
三、隧道二极管开关电路	164
§ 4-4 频率和时间的数字化测量举例	165
§ 4-5 相位的数字化测量	170
一、相位—电压转换器	170
二、相位—频率转换器	174
三、数字式相位计举例	177
思考题	178
参考文献	178
第五章 交流电压、功率和能量的数字化测量	179
§ 5-1 交流电压平均值的数字化测量	179
一、平均值检波器	179
二、误差分析	180
三、平均值检波器电路举例	182
§ 5-2 交流电压峰值的数字化测量	183
一、峰值检波器	183
二、峰值检波器的误差分析	184
三、其他形式的峰值检波电路	186
§ 5-3 交流电压有效值的数字化测量	187
一、电子式交直流转换器	187
二、有效值转换器转换精度与输入波形的关系	189
三、有效值交直流转换器举例	190
§ 5-4 功率和电能的数字化测量	192
一、时分割乘法器式功率—电压转换器	192
二、三相有功和无功功率的数字化测量	196
三、采样算法数字式瓦特计	196
四、电能的数字化测量	198
思考题	199
参考文献	199

第六章 电路参数的数字化测量	200
§ 6-1 电阻的数字化测量	200
一、恒流法	200
二、电桥法	204
三、补偿法	204
四、比率法	205
§ 6-2 电容的数字化测量	207
一、恒流法	207
二、比较法	208
三、单结晶体管法	209
§ 6-3 电感的数字化测量	210
一、时间常数法	210
二、同步分离法	211
§ 6-4 数字式LCR测量仪	213
一、电流—电压法	213
二、带微处理器的LCR自动测量仪	215
思考题	220
参考文献	220

第七章 数字化测量仪器中干扰的抑制及防护技术	221
§ 7-1 串模干扰及其抑制	221
一、SMR与采样时间 T_s 的关系	222
二、固定的采样时间 $T = kT_s$ 法	224
三、采样始点与过零点同步, 相隔半周期两次采样法	225
四、 $Y = 0$ 法	227
五、锁相频率跟踪法	229
六、数字滤波原理的应用	232
七、SMR的测定	234
§ 7-2 共模干扰及其抑制	235
一、共模干扰电压的产生原因	235
二、抑制共模干扰电压的方法	237
思考题	240
参考文献	241

第八章 数字化测量仪器误差的分析与综合	242
§ 8-1 概述	242
§ 8-2 误差的分类与误差的综合	243
一、从综合误差的角度出发的误差分类法	243
二、已定系统误差的综合	245

三、随机误差与未定系统误差的综合	246
四、总的不确定度的合成	251
五、整机误差的综合	251
六、增益误差 α 与偏移误差 b 的关系	252
七、静态量子化误差及满量程码数 N 的确定	254
八、关于误差综合的几个应该注意的问题	255
§ 8-3 数字电压表主要部件误差的典型分析方法	256
一、由衰减器、反馈网络及前置放大器构成的输入电路的误差	256
二、误差链及 α 、 b 误差系数的计算	260
三、基准电压源的误差分析	263
四、模-数转换器的误差分析	265
§ 8-4 精密数字电压表误差分析实例	274
一、某型DVM的原理	274
二、基本部件的电路	277
三、输入电路的误差计算	282
四、基准电压源的误差计算	285
五、积分放大器与比较器带来的误差	290
六、静态量子化误差	295
七、整机误差的综合	295
§ 8-5 提高数字电压表技术性能的途径	297
一、概述	297
二、数字式自动动态校零技术	297
三、整体自校技术	302
四、零漂电压的校正及输入偏置电流 I_0 的自动补偿	302
五、零区非线性补偿	302

六、多次采样平均值测量法	303
七、数字电压表的常用内附运算功能	304
思考题	305
参考文献	306

第九章 数据采集技术

§ 9-1 模拟多路切换开关	308
一、干簧继电器多路切换开关	309
二、场效应管多路开关	309
三、场效应管多路切换开关	315
四、差动输入多路切换装置	318
五、辅助切换和分组	319
§ 9-2 采样	322
一、概述	322
二、采样定理	322
三、量子化噪声	323
§ 9-3 采样保持电路	324
一、概述	324
二、采样保持电路的特性及参数	324
三、采样保持电路	326
§ 9-4 数据采集装置	327
一、概述	327
二、应用逐位逼近式 A/D 转换器的数据采集装置	328
三、数据采集系统的构成方式	329
§ 9-5 数据采集系统的技术性能	331
一、准确度	331
二、速度问题	332
思考题	333
参考文献	333

附录：计量器具检定规程 JJG315-83

(试行)《直流数字电压表》之中三、四两节	334
----------------------------	-----

绪 论

(一) 数字化测量技术的特点、地位及发展

数字化测量技术的基本内容是将连续的被测物理量先转换成相应的量子化断续量,然后予以数字编码,进而传输、存贮、进行数据处理、显示和打印。在各种物理量中,直流电压及频率两者较易数字化,其他物理量往往通过各种传感器或转换器变换成直流电压或频率后再对它进行数字化测量。

第一台数字式电压表出现于 50 年代初。这种仪表之所以出现,一方面由于电子计算机的应用逐渐推广到系统的自动控制及实验研究的领域,提出了将各种被观测量或被控制量转换成数码的要求,以满足实时控制及数据处理的需要;另一方面,也正是电子计算机的发展,推动了电子技术的进步,为数字式仪表的出现提供了条件。

相对于其他测量仪表,数字式仪表具有测量精确度高、灵敏度高、测量速度快、读数客观、测量自动化及将测量结果以数码形式输出等一系列优点。

因此,数字式电压表问世之后,就不仅是作为模拟量—数字量转换之用,而且被应用于更广泛的测量技术领域,使电测技术的水平大大提高了一步。它已经取代并正在进一步取代各种传统的模拟式电工仪器与仪表,成为一代新的测量仪表。

当然,这些优点并不是一开始就完全具备的。第一台数字式电压表是电子管式的,技术指标很低,体积庞大。出现了晶体管之后,数字式仪表获得了飞速发展。漂移很小的高性能晶体管运算放大器、快速而又误差很小的切换开关、各种复杂的逻辑电路及计数器、高稳定度的低压基准源等器件的出现,使人们可以做出体积不大、性能优良、足以与高精度电工仪表相抗衡的电压表、繁用表、相位表、电桥、频率计等各种数字式仪表。此外,各种快速的每秒转换次数高达几万次至几十万次的模—数及数—模转换器也创制出来了。

随着半导体器件集成化程度的不断提高,数字式仪表的发展近年来又进入了一个新阶段。高集成度的小型化数字式仪表,特别是数字式面板表不仅准确、灵敏度高,而且价格逐年降低。如果说 60 年代的数字式仪表主要在实验室中应用,那么现在其应用已扩大到几乎一切测量领域及生产现场。不只是测量电气量,而且在测量诸如长度、重量、温度、流量、压力、振动、冲击、扭矩、磁场…时,人们也愿意使用读数方便、指示准确的数字式表头来显示测量结果,更何况它们还能输出数码,以供计算机的进一步处理。另一方面,生产过程自动控制系统中越来越多地采用计算机多级控制,为了自动检测被控参量并获得数码以输入计算机,大规模集成电路化的模—数及数—模转换器也得到了很大的发展。

近年来数字化测量技术另一个新的发展方向是数字化测量系统。科学实验和生产工艺流程经常需要测量的已不是个别参数,而是一群参数,每个参数不仅只测一个数据,而且往往要有一组数据,这就需要将许多仪器组织起来,形成测量系统。为了使这种系统能自动地工作,越来越多地应用计算机作为测量控制器及数据处理器。于是产生了如何以标准化的通用接口将各种仪表与各种电子计算机相联接的问题。多年来已发展了 CAMAC 及 IEC625 两种

国际上推荐的通用仪表接口系统。它们都采用总线应答工作方式,若用它们将各种仪表与计算机配合,可以灵活地构成十分复杂、功能极强的自动化测量系统,当然这样的系统必须是数字化的。

最近由于微处理机的广泛应用,数字化测量技术的发展正进入一个新的阶段,各种数字式仪表的性能有了显著的提高,主要表现在以下几个方面:

(1) 程控操作 内装微机及配有相应接口的数字式仪器,能够根据功能键所对应的指令,按预先存贮的操作程序自动完成测量工作。当仪器出现故障时还可自动寻找代用方案,迅速投入备用部件,大大提高了仪器的可靠性指标。

(2) 自校准 可以根据机内或机外的基准量具,随时进行自校,并记忆仪器的系统误差,然后在测量阶段自动扣除系统误差。这就有可能在采用不是十分精密的元部件情况下获得较高的测量准确度,从而可以降低高准确度数字式仪表的成本。

(3) 故障诊断 可以利用微机的逻辑功能自动诊断故障的部位及原因,给出必要的显示或文字说明(一般通过 CRT 显示器),从而缩短调整与维修时间,提高仪器的使用率。

(4) 计算与处理 利用内装微机可对测量数据作进一步的计算与处理,如求平均值,解方程求间接测量的结果等。

我国第一台数字式电压表于 1958 年在上海制成,1965 年试制成功了一批准确度较高的晶体管式数字电压表及频率计。70 年代后期,数字式仪表的生产有了很大的发展。不仅成批生产了使用中规模集成电路的电压表、频率计、相位表、万用表、功率表、欧姆表等等,而且数字式面板表也有了系列化产品,复式采样的高准确度数字电压表也初步制成,另外功能组件化的数据采集装置及通用仪表接口系统 CAMAC 也都试制成功并推广应用,标志着我国数字化测量技术达到了较高的水平。近年来,一方面有许多工厂、研究所及高校努力研制出一批内装微机的数字式仪表,IEC625—IB 通用接口系统也得到初步应用;另一方面,国内大规模集成电路生产的发展,各种数字化仪表中的功能元件如模—数,数—模转换器,译码显示器等也有不少已经制成,若干重点大厂还引进了国外先进数字式仪表的技术等等,使我国数字化测量仪器的生产水平正在接近现代的水平。随着工农业及国防技术的发展,对数字化测量技术的要求越来越高,可以预期数字化测量技术将有一个高速度的发展。

(二) 数字化测量仪器的结构框图及主要技术指标

数字化测量仪器的通用结构框图示于图0-1中。

各种被测量一般都先经过被测量—直流电压变换器变换为直流电压,然后由直流电压—频率转换器变换成相应的频率 f ,再由计数器在单位时间内测定周波数而获得频率的量值,最后存贮周波数、经译码后显示为相应于被测量的数字值。由图可见,直流电压也可以被转换成相应的时间间隔 T ,然后又经过一次时间间隔—电脉冲数的转换,而进入存贮器,最后被译码、显示。另有一类则为将一个可编码的可变直流电压与被测直流电压相比较,其过程和用直流电位差计测量直流电压相似,在最终平衡时获得代表可变直流电压的编码量,经译码后显示出来。现有各种数字直流电压表的原理大体都可归纳为以上三类,当然也出现了某些复合以上二种方式的类型、或某些派生的型式,但它们的基本构思还是这一些。

有一些物理量可直接变换成相应的频率,如弦式张力计,谐振式电容测微计、涡轮流量

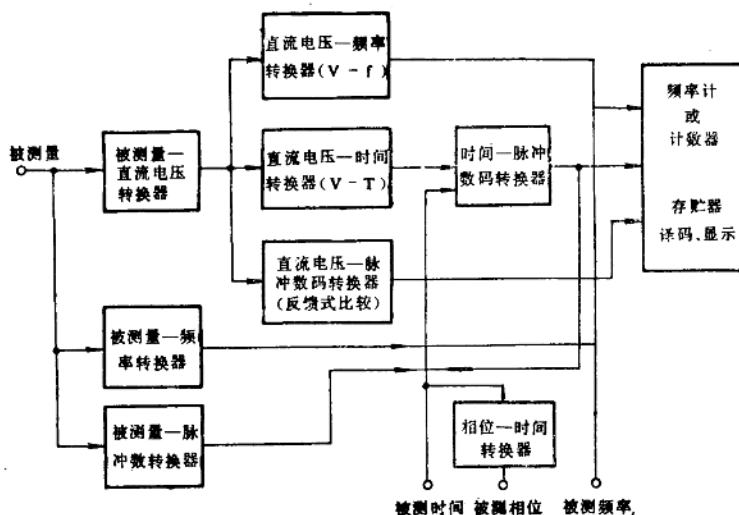


图0-1 数字化测量仪器的通用结构框图

计等，它们的输出频率可直接由频率计测定而读数。

至于时间量，其中包括频率和相位，更易实现数字化测量，这在图 0-1 中已一目了然。

一台具体数字化仪器的内部结构图常常是很复杂的，各种不同原理仪表的框图也有相当大的差别，这在以后的章节中将要分别详述。但一般说来，总是具备下面列举的一些部件：衰减器、切换开关、前置放大器、基准电压源，某一种模—数或数—模转换器、比较器、时标发生器（时标又称钟频）、计数器、译码器、显示器、控制逻辑电路（或微机）等。它们之间在数字式电压表内的一般关系示于图 0-2 中。应该说明，这仅是十分简单的示意图，并不能完全表达准确的关系，但有助于了解仪表的基本组成部分及其结构。

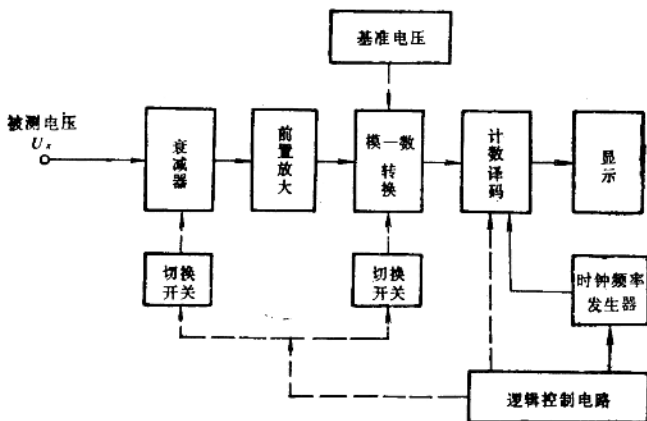


图0-2 数字电压表简单框图

表0-1 数字式电压表主要性能的典型值

性能等级	显示位数	灵敏度	直流电压测量误差①	交流电压测量误差②	备 注
A	$8\frac{1}{2}$	10nV	$1.0\text{ppm}U_x + 0.3\text{ppm}U_m$	$0.02\%U_m$	7081型
B	$7\frac{1}{2}$	10nV	$2.0\text{ppm}U_x + 0.5\text{ppm}U_m$	$0.01\%U_x + 0.005\%U_m$	1081型
C	$6\frac{1}{2}$	0.1μV	$5.0\text{ppm}U_x + 4\text{ppm}U_m$	$0.02\%U_x + 0.01\%U_m$	1061型
D	$5\frac{1}{2}$	1μV	$0.0015\%U_x + 0.0005\%U_m$	$0.04\%U_x + 0.02\%U_m$	1065型
E	$4\frac{1}{2}$	10μV	$0.005\%U_x + 0.005\%U_m$	$0.07\%U_x + 0.03\%U_m$	DS14-1C型
F	$3\frac{1}{2}$	1mV	$9.1\%U_x + 0.1\%U_m$		DM4B面板表

① 指短期内可保证的误差。

② E、F等级的仪表一般只能测交流电压平均值，A、B、C、D等级的仪表可测真有效值。

数字式仪表种类繁多，难以一一列举其技术指标，现以用得最多的数字式电压表为例，列出其主要性能的典型值于表0-1中。

表0-1中只列入了显示位数、灵敏度及误差三项指标，此外还有：

输入阻抗：一般优于10MΩ，高精度表优于1000MΩ。

测量速度：每秒几次到几十次不等，也有高至几百次乃至几万次的，但一般规律是速度高的仪表测量误差也大。

串模干扰抑制比：50~90dB。

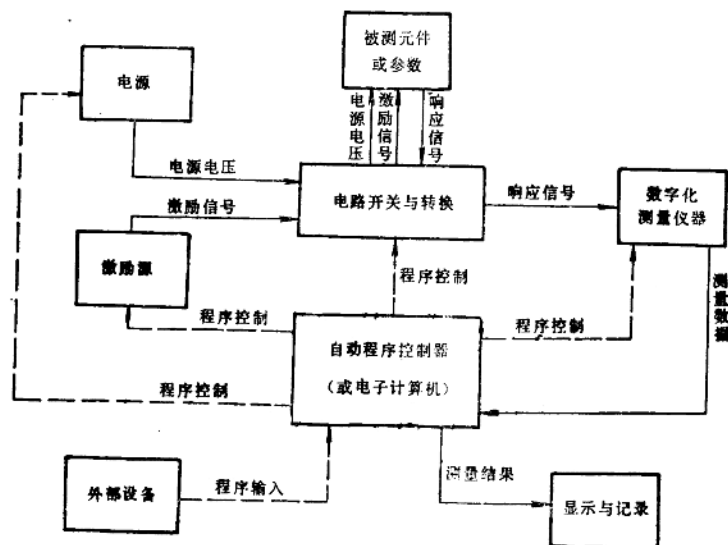


图0-3 自动测试系统原理框图

共模干扰抑制比：80~150dB。

辅助功能通常有自动量程切换、自动极性显示、数字值BCD编码输出等，在装有微机的数字式仪表中一般还有许多便于使用的功能。

近年来在数字式仪表基础上发展起来的数字式自动测试系统具有图0-3所示的框图结构。这种测试系统可以完成如下操作：将测试仪器与设备连接成测量电路；将被测件接入测试端；向被测件提供测试用的激励信号（如被测量本身具有能量，如电压，则不需激励）；控制测量过程；处理测量数据；记录与显示测量结果。在图中，自动程控设备可以是较简单的程控器，也可以是计算机（小型机或微机），其作用是执行控制、运算、存贮、逻辑等功能。电源单元用来供给有源被测件所需的功率，激励源视被测件不同可以是振荡器、函数发生器、直流电压源、脉冲电压源等，其作用是供给被测件激励信号（例如给被测电阻通以电流，给被测齐纳管施加偏置电流等）。数字化测量仪表可以是交、直流数字电压表、欧姆表、相位表、功率表、频率计或计数器等，用于测量被测件对激励信号的响应。电路开关与转换单元是开关与其他零件的组合，通过它的动作来组成并变换测量电路，对信号加以分配与转换，使之符合特定的测试要求，显示与记录单元可以是曲线记录仪，CRT及各种数据存贮器（如磁带机、磁盘机等），外部设备为键盘、外存贮器等。这种系统的工作过程如下：

- （1）利用外部设备编制测试程序；
- （2）程控设备按测试程序逐条发出操作指令；
- （3）进行系统的自校准；
- （4）各单元按指令进行动作；
- （5）给出测量结果；
- （6）转入下一次测试或根据测试结果的情况转入另一测试程序。

在自动测试系统的工作过程中，人们可以通过控制台及记录显示设备等了解测试的运行情况，并在必要时介入测试，发出必要的指令，完成自动系统不能进行的辅助工作。

（三）数字化测量技术课程的内容

本课程内容以基础知识为主，俾使读者在学习之后能理解、应用于日新月异的测量技术中去。内容大体分为三部分：

（1）关于数—模及模—数转换器的基本理论、特点与性能，这是数字化测量技术的主要部件，将给予足够的篇幅。

（2）各种数—模（D/A）及模—数（A/D）转换器的应用。这里着重于各种电量（ V 、 I 、 f 、 P 、 φ ……）及电路参数 R 、 L 、 C 等的数字化测量方法。至于其他物理量，均可转换成上述电量或电参数后再实现测量的数字化。

（3）有关设计数字化测量仪器的若干理论与实践问题，如干扰的抑制及防护技术、误差的分析与综合方法，提高仪器准确度的方法等。

第一章 数字化测量技术的一般问题

§ 1-1 连续量的不连续表示方法

自然界中各种物质的量一般表现为连续的。所谓连续,是指一个量 $x(t)$ 在某一时段 T 的无穷多个时刻上也具有无穷多个值,并且这些值不超出某个已知范围。自然界中也有以不连续形式出现的物质,主要是在微观世界中。本课程的任务是讨论连续量的数字化测量问题,在实现数字化测量过程中,连续量被离散化和量子化,最后以不连续的形式表示测量的结果。

一、连续量的离散化与量子化

根据上述连续量的定义,一个连续量可以表示为图 1-1 中的曲线 $x(t)$, 它在时段 T 及范围 A 内是连续的。

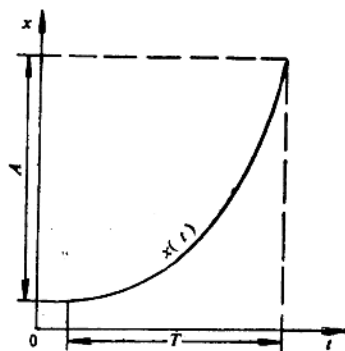


图1-1 连续量 $x(t)$

如果不是在无穷多个时刻上而是在相隔 ΔT 的若干有限个数的时刻上去测量并确定 $x(t)$, 则可以得到相应各时刻的 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 它们将以自己的群体来代表量 $x(t)$ 。于是我们得到的已不是真正的连续量 $x(t)$, 而是在时间上不连续的量 $x(t)$, 这样的量称为离散化的量。由图 1-2 可见, 离散化的量其相邻两个值的差并不为定值。

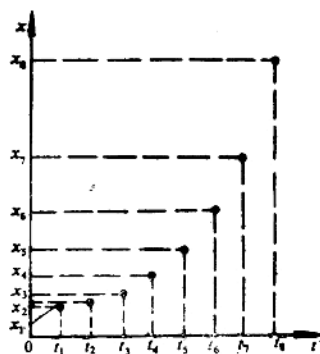


图1-2 连续量 $x(t)$ 的离散化

由于干扰不能完全被抑制以及噪声或机械间隙的存在,任何测量仪器的分辨力不可能小到等于零,仪器只能对大于其分辨力的被测量增量 Δx 作出响应,因此,若将仪器的测量结果看作是若干数目的分辨力的累加,即虽然对被测量在时间上是连续地观察的,而测量结果却是呈阶梯形变化的。如图 1-3 所示那样,则这种按 Δx 增减变化的量称为量子化的量。

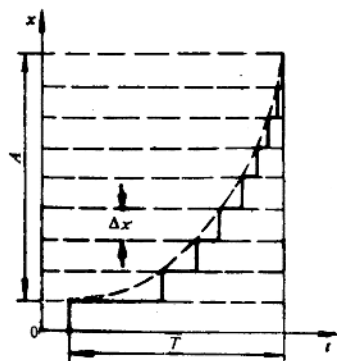


图1-3 连续量 $x(t)$ 的量子化

格说来,这种现象在模拟式仪表中实际上也存在,在数字化仪器中测量结果的显示就更是完全量子化了,其量子值一般即为读数最后一位的一个单位值。

由图1-2及图1-3可见,离散化或量子化后所得的量,已不能完全反映连续量 $x(t)$ 的真实情况,丢失了关于 $x(t)$ 的若干信息。在数字化测量仪器中,一个连续的被测量通常每隔一定时间间隔 ΔT 被采样或被测量一次,同时又以数字或数码显示测量结果,因而离散化过程及量子化过程同时存在,如图1-4所示。

由于离散化与量子化都要给测量结果带来一定的误差,数字化测量仪表与非数字化测量仪表相比,这是新增的误差源。但由于近代微电子学的高度发展,离散化与量子化误差已能降低到可以忽略不计的程度,使之在相当宽的频率范围内应用数字化测量技术而不会带来过大的误差,但在很高的频率下实现数字化测量仍有较大的困难。这些将在后面叙述。

二、测量结果的两种基本显示方法:模拟量法及数字值法

测量结果的模拟量显示法是使测量结果与被测量之间保持连续函数关系。一切曲线显示或绘制仪器,一切指针一刻度尺系统都可看作模拟量显示法的体现,这是在数字化测量技术出现以前人们早已使用并熟悉了的。

数字值显示法在“数字化测量技术”这一专门名词出现以前即已存在,各种电阻仪器如电桥、电位差计等就是用数字显示测量结果的仪器。但真正被称作数字式仪器的,是近代发展起来的各种能自动地以数字值显示测量结果的仪器仪表。现在,不仅人们已越来越习惯于数字显示,因为不需用眼去判读曲线高度或指针位置就能得到不带视差的测量结果值,并且,这种数字值又十分易于转译成数码传送给控制器或计算机,实现对被测对象的控制或进一步作数据的分析与处理。

测量结果的数字值显示法正是以上述巨大的优势而能够在各个测量领域中取代模拟量显示法,从而出现了“数字化测量技术及仪器”这一新的技术门类。前面已经讲过,任何一种数字化的测量都伴随着对被测量的离散化和量子化操作,并对离散化和量子化作了形象化的解释,现在来对这两个术语作准确的说明:

1. 离散化——将时间上连续的量转换为离散的量,即在各确定时刻上确定并保持其瞬时值。两个相邻确定时刻间的时间间隔 Δt 称为离散化的时距。在给定的时间段 T 内,若进行均匀的离散化,则时距 Δt 是常数;若离散化是不均匀的,则时距 Δt 将是变化的。虽然离散化要带来关于时间连续函数的信息损失,但是离散化量的每一个值都与相应的离散时刻严格地连系在一起。

2. 量子化——将幅度上连续的量转换为阶梯形变化的量,也就是用一组按一定规则组合起来的已知固定量值,分别去近似地代替连续量的各瞬时值。两个相邻固定量值间的差值 Δx 称为量子化的量距。在给定的幅度范围内,若量子化是均匀的,量距 Δx 是常数,反之,则 Δx 将是变化的。对幅度上连续的量进行量子化要带来关于该量的信息损失,量子化后所

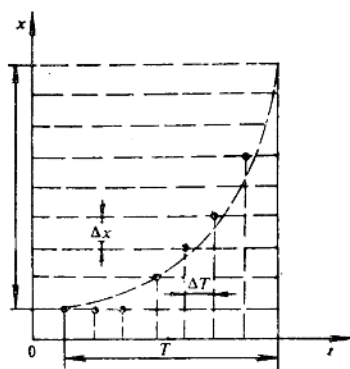


图1-4 连续量 $x(t)$ 的同时量子化及离散化

得的值其准确度取决于固定量值的误差。

时间是一特殊物理量，测量时间时只有量子化过程，而不能有离散化过程。

最后要说明的一点是在数字化测量技术中可以应用各种数制，如二进制、八进制、十六进制等，也可以应用各种表示数值的码制，如BCD码、ASCII码等等，一切视实际应用的需要而定。

以上讲到的量子化、离散化、量距、时距等，是数字化测量技术的基本概念，反映了数字化测量技术的特点。

§ 1-2 数字化测量技术应用于动态测量

如果被测量是恒定的，或变化非常缓慢的，只需测量一次就可以得到测量结果。但如被测量作较快变化，就需增加测量次数，用一组测量结果的数列来反映被测量，这就是动态测量。

在数字化测量技术中，最基本的动态测量方法有以下三种：

一、周期扫描法

此法的原理如图1-5所示。图中呈锯齿形的是扫描信号 $s(t)$ ，扫描周期为 T 。 $s(t)$ 一般作线性变化，上升到最高点时即自动返零然后再开始一次新的扫描。每当 $s(t)$ 上升到与被测信号 $x(t)$ 相等时，例如图中的 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 等点，就产生一个信号，将这一点的时刻记录下来。如果采取某种技术，计算出从每次扫描开始到这一时刻止的时间 $T_1, T_2, \dots, T_7$ 等等，就可求得相对应的被测量瞬时值 $x_1, x_2, \dots, x_7$ ，因为我们从图上看到这里存在着相似三角形的关系：

$$\frac{x_1}{T_1} = \frac{x_2}{T_2} \dots = \frac{x_7}{T_7} = K$$

由之可得： $x_1 = KT_1, x_2 = KT_2, \dots, x_7 = KT_7$ 。显然，若 K 已知， $T_1, T_2, \dots, T_7$ 就代表了各 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 。

周期扫描法中的扫描信号 $s(t)$ 也可以为阶梯形上升的信号，如图1-6所示。这里只画出了两次扫描，每当 $s(t)$ 上升到大于 $x(t)$ 时，就将这时 $s(t)$ 的瞬时值 $s_1, s_2, \dots$

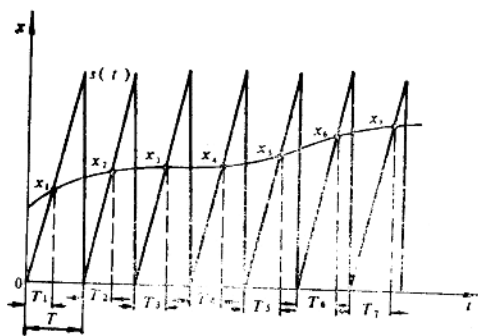


图1-5 周期扫描法原理

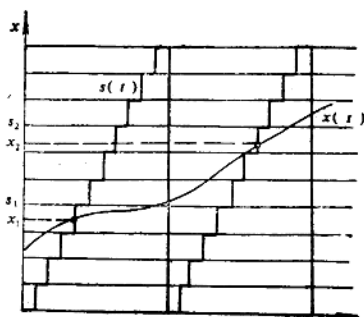


图1-6 阶梯形上升扫描信号

记录下来,显然, $s_1, s_2, \dots$ 总是大于被测信号的瞬时值 $x_1, x_2, \dots$ 但误差不会超过一个量距。只要量距足够小,能满足测量准确度的要求即可。

周期扫描法的主要缺点是在单位时间内可测定的点数不多,无论是锯齿波还是阶梯波都不可能在极短的时间内完成一次扫描,这就限制了这种方法应用于快速变化量的测量。

二、跟踪测量法

跟踪测量法是使用标准的可变数字信号源跟踪被测量的变化,如图1-7所示。图中 $x(t)$ 变化很快,但跟踪信号 $s(t)$ 始终跟踪 $x(t)$ 而变化,跟踪的差距不超过一个量距 Δs 。数字信号源的输出信号 $s(t)$ 的两个参数:幅值 s_i 及瞬时时间 t_i 如果都以数码形式存贮下来,则在以后将它们重新转换为模拟量时,就可以复现被测量 $x(t)$ 。

跟踪测量法可以实现很快的动态测量,因为每一次跟踪只需改变一个量距 Δs 。由于跟踪过程相当于不断地进行测量,所以获得的信息要比周期扫描法多。但跟踪测量法的逻辑控制比较复杂,且只适用于单个被测量,若有多个被测量需同时跟踪,必须有多组测量设备同时工作。

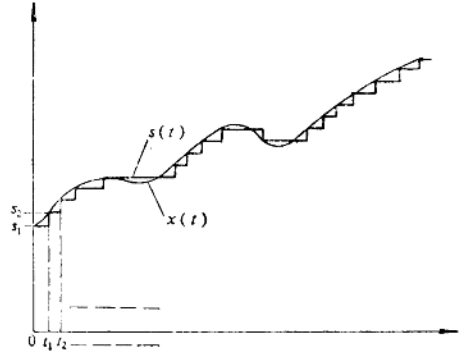


图1-7 跟踪测量法

三、采样保持法

采样保持法是对动态信号按一定的时间进行采样,将所采得的瞬时值保存在若干个记忆元件中,然后再依次对记忆元件进行数字化测量。由于记忆元件上的采样值可以保留相当长的时间,测量就不必很匆忙,可以使用准确度高但速度较慢的仪表。这种“快采慢测”的方法,缓和了测量技术中始终存在的测量速度与测量准确度两者不可得兼的矛盾。

图1-8是一种采样保持电路。被测信号 U_x 经过可控开关 S_1 输入放大器,放大器经过二极管对电容充电,当电容电压 U_c 上升到使源极跟随器的输出 U_o 与 U_x 相等时, U_c 不再上升。此后若打开 S_1 ,电容将在相当长的一段时间内保持 U_c 不变,因其放电回路的电阻非常大。 U_c 不变,则输出信号 U_o 亦保持不变,且 $U_o = |U_x|$ 。当然, U_c 实际上在缓慢下降(放电电阻不为 ∞),因此必须在 U_c 下降到其误差不超过允许值之前对 U_o 完成数字化测量。

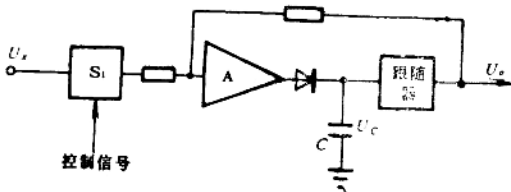


图1-8 采样保持电路

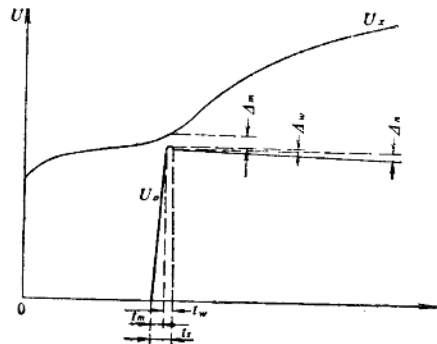


图1-9 U_o 与 U_x 的时间关系

由于采样电路的动态性能不是理想的,其环路增益也不为 ∞ ,故 U_s 一般小于 $|U_x|$,其差 Δ_s 即为采样误差,图1-9所示为被测电压 U_x 与采样保持电压 U_s 的时间关系。

图1-9中 t_s 为采样时间,即开关 S_1 接通时间, t_r 为 S_1 断开后到 U_s 平稳下降前的过渡时间,取决于采样电路元件内部的过渡过程。 t_s 与 t_r 之和为采样时间 t_{Σ} 。优良的采样器其 t_s 为微秒级的, t_r 为纳秒级的。 Δ_s 为采样误差, Δ_r 为过渡误差, Δ_d 为放电误差。关于这些误差将在以后第九章中进一步讨论。

利用采样保持法,配以高速模—数转换器,近代已可实现对动态信号作每秒兆次以上的测量,为动态信号的分析开辟了广阔的前景。

§ 1-3 数字化测量仪表的分类及其主要技术指标

一、数字化测量仪表的分类

数字化测量技术已被应用于十分广泛的测量领域,相应的仪表种类甚多。简单的办法是按被测量进行分类,但这种分类方法难以建立科学的体系。

这里介绍一种比较科学的分类法。各种数字化测量仪表的核心部件是模—数转换器,因而若根据模—数转换器的结构特点对数字化测量仪表进行分类,可以得到系统的概念。

从模—数转换器的结构特点出发,可将模—数转换器分为直接变换式与平衡变换式两种(另一种分类法是从“测量是标准量与被测量进行比较并获得数字结果”的观点出发的,这种分类法强调测量方法的特点,将在第三章中介绍)。因而也可将数字化测量仪表分为直接变换式与平衡变换式两大类。

1. 在直接变换式数字化测量仪表中,模—数转换器的输入部分不存在输出部分对它的总体负反馈(图1-10 a)。在转换器内信号流经若干个变换器 T_i ,其中每一个都可能具有自身的负反馈 F_i (图1-10中虚线所示)。这种结构方案所具有的特点是有可能获得很高的测量速度,但由于各变换器 T_i 的误差的累积,准确度相当低。

2. 在平衡变换式数字化测量仪表中,模—数转换器的输出量 y 。(数码)又经过总体负反馈变换器变换成与输入信号(被测量) x 相同类型的反馈信号 y ,在输入端与 x 相补偿。从原理上讲,总体负反馈变换器一般即为某种数—模转换器。这种结构方案的特点是准确度主要取决于总体负反馈变换器的误差。

二、数字式仪表的主要技术特性

性

数字式仪表中数字式电压表应用最广,其技术特性具有典型意义,这里对它们着重介绍。其他数字式仪表的技术特性将在有关章节中进一步介绍。

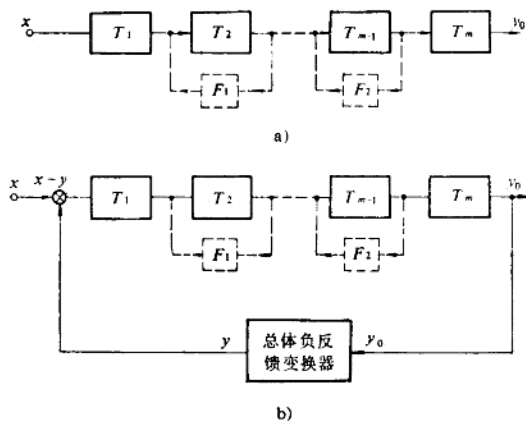


图1-10 a) 直接变换式及 b) 平衡变换式模—数转换器

1982年国家仪器仪表工业总局批准了我国《直流数字电压表技术条件》，即 ZB YO95-82，并于1983年1月1日起正式实施。在 ZB YO95-82中对数字电压表的技术要求作了详尽的规定，本书择其主要部分进行解释。

(一) 准确度 (精确度)

准确度这一术语是误差的反义，对于测量仪表来说，误差是直接表明其性能的指标，本来只须使用误差这一术语即可。但人们已经习惯于用准确度来划分仪表的等级，所以准确度这一术语也被普遍使用。

任一仪表的准确度总是和它的一定工作范围相联系的，在此工作范围内其误差不超出规定的值。

与其他仪表一样，数字式仪表在标准条件下的误差称为基本误差，而当工作条件偏离标准条件时，应以基本误差与附加误差之和来表示其误差。对于数字式仪表除标准工作条件外，一般还需规定其额定工作条件。

数字电压表的基本误差可以有以下几种表示形式：

1. 将被测量的值与仪表输出信息值的绝对误差用两项和的形式表示：

$$\Delta = \pm (a \% U_n + b \% U_n) \quad (1-1)$$

或

$$\Delta = \pm (a \% U_n + d)$$

式中 U_n ——被测量电压的输出信息值；

U_n ——所确定量程的满度值；

$a\%$ ——变换系数误差引起的测量误差与 U_n 之比的百分数表示值；

$b\%$ ——除变换系数误差之外的其他因素所引起的最大综合测量误差值与仪表满度值 U_n 之比的百分数表示值；

d ——以绝对值表示的绝对误差值。

2. 用仪表输出信息值的相对误差 δ 表示 (也是两项和式)：

$$\delta = \pm \left[(a + b) \% + b \left(\frac{U_n}{U_x} - 1 \right) \% \right] \quad (1-2)$$

仪表的准确度等级以 $(a + b)$ 表示，它是仪表基本量程在 $U_n = U_n$ 时的基本误差的相对值误差。用比值 $(a + b)/b$ 表示相同准确度等级的仪表在有效测量范围内各测量点上的误差趋近于准确度等级的程度。对于多量程仪表，各量程可以有不同的准确度等级，但相邻量程要取相邻的准确度等级。对于一个具体的数字电压表产品应同时给出准确度等级 $(a + b)$ 之值及 $(a + b)/b$ 之值。

式 (1-2) 可由式 (1-1) 导出，若以 U_n 去除式 (1-1)，则得到

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{U_n} &= \pm \left(a \% \frac{U_n}{U_n} + b \% \frac{U_n}{U_n} \right) = \pm \left(a \% + b \% - b \% + b \% \frac{U_n}{U_n} \right) \\ &= \pm \left[(a + b) \% + b \% \left(\frac{U_n}{U_x} - 1 \right) \right] \end{aligned}$$

而 $\frac{\Delta}{U_n}$ 即为相对误差 δ 。

大家知道，一般指针式仪表是以引用误差即对满量程值的相对误差来表示其准确度等级的，但数字电压表不采用这种方法。数字电压表有其自身的特点。若采用引用误差，将不能刺

微它去进一步降低分度值 g ，亦即提高其读数的位数，这可用一个例子来说明。设有一台数字电压表，量限为 1 V ($0 \sim 999.9\text{mV}$)，4 位读数，准确度等级以引用误差表示为 0.1 。由于其分度值为 0.1mV ，则这种仪表在其测量范围的开始段（例如在 100mV 处）的最大量子化相对误差将不超过 0.1% ，即

$$\frac{0.1\text{mV}}{100\text{mV}} \times 100\% = 0.1\%$$

但仪表是按引用误差来定为 0.1 级的，则在 100mV 测量点上没有必要保证有 0.1% 以下的量子化误差，而只须保证此误差不超过 1% 。这就是说仪表的分度值为 1mV 亦已足够，因而其 4 位的读数是多余的，3 位即可。

如果采用式 (1-2) 的方法，设准确度等级 $(a + b)$ 也为 0.1 ，其中 $a = 0.07$ 及 $b = 0.03$ ，则在满量程值上（即 $U_n = U_m$ ）相对误差为

$$\delta = \pm \left[(a + b)\% + b\% \left(\frac{U_n}{U_n} - 1 \right) \right] = \pm (a + b)\% = \pm 0.1\%$$

与采用引用误差的准确度等级为 0.1 的仪表是相同的，但在 100mV 测量点上，按式 (1-2) 可得 δ 值应不超过

$$\delta = \pm \left[(0.07 + 0.03)\% + 0.03 \left(\frac{100\text{mV}}{100\text{mV}} - 1 \right) \right] = \pm 0.37\%$$

也就是说，绝对误差不应超过 0.37mV ，在这种情况下分度值不可能再取为 1mV ，而必须取小于 1mV 的值，亦即应取 4 位读数。可见两项和式误差表示法促进了读数位数的增加。

上例中 $\frac{a+b}{b} = \frac{0.1}{0.03} = 3.3$ 。得到在 100mV 测量点上的相对误差 $\delta = 0.37\%$ ，若取 $\frac{a+b}{b} = 2.0$ （设 $a = 0.05$ ， $b = 0.05$ ），则在该点上 $\delta = 0.55\%$ 。可见 $\frac{a+b}{b}$ 越大，在非满量程值点上的相对误差越小， $\frac{a+b}{b}$ 作为数字电压表准确度等级的重要补充是完全必要的。

(二) 分度值

分度值是指仪表的满量程值 U_n 与仪表最大显示码数 N_n 的比值，以 g 表示之：

$$g = \frac{U_n}{N_n} \quad (1-3)$$

数字电压表的满量程值应按下式选择：

$$U_n = m \times 10^n \text{ V} \quad (1-4)$$

式中， m 可取 1 、 2 、 3 、 5 、 6 五个数中之一，但建议选用 1 或 3 。 n 为任意整数（正的或负的）或零。

分度值决定了数字电压表所能跟踪被测量而变的量距大小，从形式上看与模拟式仪表的灵敏度相仿，但在数字电压表中不采用灵敏度这一术语。

分度值与分辨力也容易混淆。分辨力 s 是分度值的重要组成部分，但分度值不一定等于分辨力。

(三) 分辨力

一般称分辨力为测量仪表所能区分的被测量的最小变化量，对于数字电压表来说，形式上表现为能够引起最末一位读数有一个数字变化的被测量变化量，亦即相当于一个分度值。但分度值在全量程范围的各点上是恒定的，而分辨力却不是常数，它们两者只能在“理论”