

数字测量装置

〔苏〕

B. M. 史良京 著

孙圣和 译

69598730063

哈尔滨工业大学出版社

前 言

数字测量技术是发展极为迅速的新兴学科（其发展史约25年）。目前在数字测量技术中尚有许多问题需要解决或研究，这不仅涉及术语和分类方面，而且还包括探讨最有前途的测量方法、研究最佳电路和原理方案等方面的问题。

本书主要阐述各种电量或描述电过程的各种量的测量和变换问题。

书中讨论的装置分为无总负反馈型直接变换装置（精度较低，但速度快）及有总负反馈型平衡变换装置（速度较慢，但精度最高）两种。直接变换装置根据被变换量的基本形式进一步分类；而平衡变换装置按平衡形式（按时间串行平衡和并行-串行平衡）和平衡方法（跟踪平衡和扫描平衡）进一步分类。

此外，本书讨论数字测量装置基本部件设计原理以及典型最佳结构。由于元器件的不断更新，数字测量装置的具体电路、技术数据和参数也随之不断变化，因此，书中的实例只是为了说明问题而引入的，且尽量简化了电路。例如，电路中的开关几乎都用触点形式表示，而不考虑开关的具体形式。

书中推荐了一些有发展前景而目前尚未推广的新结构。了解改进数字测量装置结构的可能性，与会利用元器件实现数字测量装置同等重要。况且，元器件的发展有助于利用那

些因实现困难而未被采用的已知新原理和新结构。

在本版中删掉了陈旧的材料，增添了数字测量装置与部件的现代结构和设计方法，主要讨论具有发展前景的方案和电路。

由于信息测量技术专业教学计划中有关课程名称的变化，所以相应地修改了本书的名称。这种修改符合国家标准《计量学·术语和定义》，因为国家标准把测量装置一词规定为测量仪表和变换器的总称。

作者感谢科学技术博士、教授B. H. 马利诺夫斯基领导的莫斯科动力学院信息测量技术教研室全体同志对本书手稿的仔细评阅，同时感谢奔萨工学院信息测量技术教研室全体同志为本书提供了一些科研成果。

作者

译者序

本书根据苏联高校出版社1981年出版的《数字测量装置》俄文版译出。

本书主要阐述了数字测量装置的基本概念，基本部件设计方法以及信号和电路参数转换成数字量的各种方法；介绍了各种用途和原理的数字测量变换器与数字仪表结构，并介绍了改进其性能的各种方法。其主要特点是：系统结构较新颖，在讨论数字测量的一般问题和基本部件的基础上，以变换原理为主干，介绍各种用途和原理的数字测量变换器和数字仪表结构；除了利用容许误差和均方根误差描述数字测量装置的精度之外，作者还介绍了利用信息熵的概念和方法分析数字测量装置的精度；介绍了提高数字测量装置精度、速度和抗干扰性的许多新颖方法，这些方法都是苏联近年来科研成果的结晶。第二章对数字测量装置基本部件的分析和设计方法较为实用。

本书系苏联信息测量技术专业的教材。内容较全面，系统性较强；叙述浅显，简明扼要。本书可作为高等学校电子测量及仪器仪表等专业的教学参考书。对于从事电子测量和仪器仪表以及数字逻辑设备研制的工程技术人员也有参考价值。

本书的第二章和第三章由张忠亭同志翻译，其它各章由孙圣和同志翻译。

由于译者水平有限，文中难免有不当甚至错误之处，敬请读者批评指正。

译 者

1983年12月于哈尔滨工业大学

绪 言

在现代社会中，随着人们对自然界认识的加深，测量的作用显得更加重要。十七世纪伽里略曾说过：“应当测量可测的全部量，并且应使目前不能测量的量变成可测的量。”

随着测量信息量（被测物理量值的信息）的不断增加，对信息处理和利用的方法及质量要求越来越高。可以把测量信息表示成连续或离散形式（连续或离散信号）。离散形式的信息，由于其处理和传输方便、抗干扰能力强，因此越来越得到广泛应用。

数字测量仪表和变换器在现代科学技术中广泛应用于信息的测量和远距离传输测量，在集中控制系统中，可利用它们作为中间变换器，把信息输入到数字计算机或其它设备中。

数字测量技术的发展具有自身的历史。早期的数字测量装置基本上是电气机械式，由电磁继电器和电子管电路构成。后来，出现了利用晶体管和二极管电路的方案，利用半导体器件可以大大提高数字测量装置的可靠性、速度和寿命。近年来，利用集成电路构成数字测量装置，结果大大减小了数字测量装置（ЦИУ）的尺寸和功耗，简化了工艺，便于生产过程自动化。

数字测量装置的优点是：读数与记录方便、客观；高分辨力时仍可宽范围测量；由于无指针式仪表所固有的机械过渡

过程，故可实现高速测量等。其缺点是生产工艺复杂，价格昂贵。

在苏联，首次研究成功数字测量装置的，是Ф. Е. 切姆尼克夫，而制成首批数字测量装置的，则是由М. П. 查宾克所领导的全体科学家及工程师。我国许多科学家在发展及改进数字测量装置方面起了重要作用，如：Э. И. 格奇斯、Ф. Б. 格里涅维奇、И. Ф. 科利斯托夫、В. Ю. 克涅列尔、А. И. 康达列夫、П. П. 奥尔纳特斯基、В. Б. 斯莫罗夫、Б. И. 什维茨基等。

目前国内外生产了许多测量和变换各种量并具有宽范围技术特性的数字测量装置，如伏特表，安培表，电阻、电容和电感测量仪，频率计，相位计，计数器。时间间隔测量仪，转速表，压力表和计时器等装置。应用最广的数字测量装置（如数字电压表），在规定条件下其基本引用误差小于0.001%，数字变换器的速度每秒达几百万次。

数字测量装置能满足人们对现代测量技术提出的基本要求——使测量过程自动化，在保持必要的精度条件下提高速度。

根据苏共第二十六次代表大会决议的精神，苏联很重视数字测量技术的发展，包括增加数字测量装置的产量和大力改进其技术性能。我国工业部门生产的数字测量装置，在平均的无故障工作时间为2500小时的条件下，其基本特性应符合下列极限值：

直流数字电压表

分辨力	μV	1
误差	%	0.002

速度	次/秒	50
----	-----	----

交流数字电压表

分辨力	μV	10
误差	%	0.05
速度	次/秒	1
频率范围	Hz	$45 \sim 2 \times 10^5$

数字欧姆表

测量范围	Ω	$10^{-3} \sim 10^9$
误差	%	0.01
速度	次/秒	1

数字电容测量仪

测量范围	μF	$10^{-7} \sim 10^2$
误差	%	0.02
速度	次/秒	1

数字电感测量仪

测量范围	H	$10^{-6} \sim 10^2$
误差	%	0.05
速度	次/秒	1

数字频率计

测量范围	Hz	$10^{-1} \sim 10^8$
相对误差		10^{-8}

精密模拟-数字变换器

分辨力	μV	500
误差	%	0.01
速度	次/秒	10^5

高速模拟-数字变换器

分辨力	μV	500
误差	%	0.1
速度	次/秒	10^7

目 录

前 言	(I)
绪 言	(III)

第一章 数字测量技术概论

§ 1.1 连续量的离散表示	(1)
§ 1.2 模拟和数字量的基本操作	(13)
§ 1.3 数字指示和记录	(21)
§ 1.4 数字测量装置的分类	(30)
§ 1.5 数字测量装置的基本技术特性	(40)

第二章 数字测量装置的基本部件

§ 2.1 数码-电压变换器	(67)
§ 2.2 数字测量装置的比较器	(101)

第三章 直接变换式数字测量装置

§ 3.1 空间量和脉冲数变换式数字测量装置 ..	(121)
§ 3.2 频率变换式数字测量装置	(132)
§ 3.3 时间变换式数字测量装置	(154)
§ 3.4 幅度变换式数字测量装置	(212)

第四章 平衡变换式数字测量装置

§ 4.1 平衡变换式数字测量装置的输入 电路	(220)
§ 4.2 串行变换式数字测量装置	(246)
§ 4.3 并行-串行变换式数字测量装置	(260)

§ 4.4	交流电压的测量.....	(275)
§ 4.5	双参数变换的数字测量装置.....	(282)
第五章 改进数字测量装置基本特性的几个方向		
§ 5.1	系统误差自动修正.....	(296)
§ 5.2	提高数字测量装置的精度和速度的 结构方法.....	(303)
关于常用俄语下标的说明		
参考文献		(322)

第一章 数字测量技术概论

§ 1.1 连续量的离散表示

基本概念和定义 数字测量仪器和模拟-数字测量变换器是数字测量装置的基本形式。

自动形成测量信息的离散信号，并用数字形式给出示值的测量仪器叫做数字测量仪器（ЦИП）。离散信号不是包含被传送信息的所有量值的信号，而是用与所传送信息相对应的一些信号的大小及其相互分布来表示的一种信号。因此，与连续信号不同，离散信号只具有有限数目的离散值。利用数字或离散信号按一定规则表示信息的方法叫做编码。

通常，连续量 $x(t)$ 定义为：在连续时间间隔 Π 及给定的量值范围 Π 内，具有无穷多连续值的量（图1.1a）。

一个量可能只是数值连续量，也可能只是时间连续量。时间连续量的概念与离散量的概念不同，时间离散量的值只在确定时刻不等于零，数值连续量与量化量的概念不同，数值量化量在给定的数值范围 Π 内，具有有限数目的取值。

因此，在测量过程中通用的量有四种基本形式：a) 连续量（图1.1.a）；б) 数值连续的离散量（图1.1.б）；в) 时间连续的量化量（图1.1.в）；г) 离散的量化量（图1.1.г）。

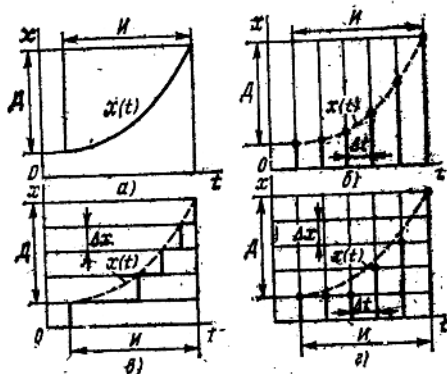


图 1.1: 被测量的基本形式

模拟量（不是“连续量”的同义词）应理解为某个二次量，其全部量值都是一次（原始）量值的连续函数。因此，上述四种量可以是模拟量，即表示某种原始量的模拟信息。

将离散信号的信息表示成数字形式，则叫做数字信号。

因此，通常应当用“连续-离散变换”这一术语代替惯用的“模拟-数字变换”。只有当原始连续量预先转换成模拟量，而离散信号转换成数字信号时，术语“模拟-数字变换”才是正确的。由于在技术文献和实践中人们已经把“模拟-数字变换”看作是“连续-离散变换”的同义词，所以今后我们也使用“模拟-数字变换”。

数字测量就是用数字形式指示测量结果的测量。

离散就是利用只在确定时刻（离散时刻）保持连续量的

瞬时值的方法，将时间连续量转换成时间离散量的变换（图1.1.6）。两个相邻离散时刻之间的间隔 Δt 叫做离散间隔。在一定时间内间隔可以是恒定的（均匀离散），也可以是变化的（非均匀离散）。在时间连续量离散时，虽然损失了它的部份信息，但每个离散值对离散时刻却是准确对应的。例如，周期地记忆时间连续量的瞬时值就是最简单的离散过程。

量化就是利用若干相邻的固定值代替数值连续量的瞬时值，将其变换为量化量（见图1.1,Б），这些固定值的数列或总和是按着一定的规律通过量具形成的。两个相邻固定值之差叫做量化单位，在给定范围内，量化单位可以恒定（均匀量化），也可变化（非均匀量化）。当数值连续量量化时会损失部分连续量的信息，由于量化所得数值的精度基本上取决于量具的误差。需要指出，时间（ t ）是一个特殊量，在测量时间过程中离散概念失去了意义，仅仅存在时间本身的量化过程。

按某种计数制以数字组合形式获得量化量数值的过程叫做数字编码。

通常，将连续输入量的离散、量化和编码的测量过程叫做模-数变换，能自动实现这一过程（形成反映输入量信息的离散信号）的测量变换器叫做模-数变换器（АЦП）。

模-数变换器的框图（图1.2,а）包括量化装置КВУ、编码装置КУ以及使其按节拍工作的离散化装置ДУ。被测信号 $x(t)$ 加在量化装置的输入端，编码装置输出相应的离散信号 $ДС$ 。在一般情况下，数字测量仪器（图1.2.6）包括输出模拟信号 $a(t)$ 的模拟变换器АП，输出离散信号 $ДС$ 的模-数变换器АЦП，输出连续被测量 $x(t)$ 的数值 N 的数字读数装

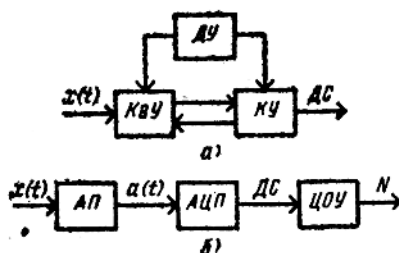


图 1.2 模-数变换器 (a)
和数字测量变换器结构电路 (b)

置ЦОУ.

通常, 模-数变换器和数字测量仪器在基本特性 (精度和速度) 及实际应用方面有很大差别。

数字测量仪器用于测量, 应具有很高的精度。其工作速度主要决定于操作者读取变化示值的能力。由于人眼的惰性, 难以进行速度高于每秒10~12次的测量。当数字测量仪器用于数字记录时, 其速度同样受记录装置的能力限制。

模-数变换器主要用于将离散信号表示的测量信息输入到后面的离散装置 (例如, 数字计算机)。其速度基本上由被测量的变化速度所确定, 相当快, 因为后面的离散装置实际上不会限制模-数变换器的速度。通常不要求高精度的变换, 因而可简化模-数变换器的结构, 提高其速度。

在许多情况下, 上述结构还可具有特殊形式。例如, 需要时模-数变换器也可包含数字读数装置; 而在数字测量仪器中, 可以没有模拟变换器, 或者没有模-数变换器中的某一个部件, 这取决于在量值的四种可能形式 (见图 1.1)

中的哪一种是被测量。由于数字测量仪器的概念包括了模-数变换器的概念，而且它们所采用的模-数转换原理相同，因此，以后主要用数字测量仪器的概念，而模-数变换器的概念只在必要的场合下才使用。

均匀量化时（图1.3.a），连续量 x 的瞬时值可用有限的量化单位数目 n 表示：

$$x_i = n\Delta x = x \pm \Delta x \quad (1.1)$$

式中 Δx 为量化单位，它与量化装置的确定状态有关（电位大小，继电器触点位置等）， Δx 是量化装置的量化误差，它是在量化过程中利用已知值代替被测量值时产生的。最大可能量化误差与量化单位的最小值（非均匀量化时）有关，即 $\Delta x_{\max} = \Delta x_{\min} = z$

根据苏联国家标准（ГОСТ 16263—70），与普通仪表类似，把 z 叫做数字测量仪器的分度值。当已知被测量变化范围的最大值 $x_{\max}$ 和读数装置的十进制的位数 m_n 时，数字测量仪器的分度值为：

$$z = x_{\max} / 10^{m_n}$$

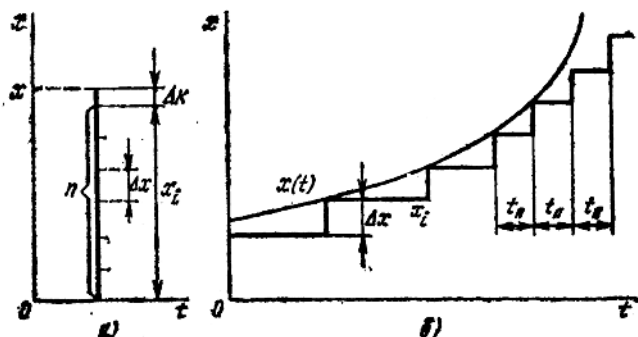


图 1.3 瞬时值的量化

因此，数字测量仪器在 1V 量程三位读数与 10V 量程四位读数时，都具有相同的 1mV 的分度值。

要获得量化的数字结果就必须进行编码，利用专门的编码装置按一定码制在每次量化时选择确定的数目。在均匀量化并且量化单位等于被测量单位的简单情况下，未知数 N 等于量化单位数目，即 $N = n$ 。

若已知 x 变化范围为 $x_{\max}$ ，那么 x 的离散值的最大可能数（包括 $x = 0$ ）为：

$$n_{\max} = x_{\max} / z + 1 \quad (1.2)$$

显然，量化误差不应超过变换总误差。如果变换容许的相对误差值为 $\delta_{\max}$ （用 % 表示），则可按下式计算量化单位：

$$z = \Delta x \leq \frac{\delta_{\max}}{100} x_{\max} \quad (1.3)$$

式中等号只在理想（无附加误差）变换情况下成立。

此外，任何变换装置（模拟或离散的）都有一定的分辨力 x_H ，它是引起仪表示值可见变化所需的最小被测量值。因此 Δx 值应不小于 x_H ，并满足不等式：

$$x_H < \Delta x \leq \frac{\delta_{\max}}{100} x_{\max}$$

由此可见，假如设计量程为 1V、分辨力不小于 1mV 的数字测量仪器，则选择量化单位最小值（也就是分度值）应不小于 1mV。此时数字测量仪器的相对误差不会小于 0.1%。

如果被测量 x 是不随时间变化的恒量，那么在由量化和编码装置速度决定的变换时间 t_n 内足以完成一次模-数变换。变换时间 t_n 定义为模-数变换器输入被测信号时刻和输出数字量时刻之间的时间间隔。如果被测量 x 随时间变化，那