〔苏〕B. M. 什良金 著

数字测量装置

孙圣和 译

哈尔滨工业大学出版社

数 字 测 量 装 置

孙 圣 和 译

*

哈 尔 滨 工 业 大 学 出 版 社 出 版

新 华 书 店 首 都 发 行 所 发 行

黑龙江水利专科学校印刷厂印刷

*

开本 787×1092　1/32　印张 10.625　字数 237,000

1987年6月第 1 版　　1987年6月第 1 次印刷

印数　1—5000

书号　15341·39　定价1.80元

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。

目　　录

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И及给定的量值范围Д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Д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,δ）；в）时间连续的量化量（图1.1.в）；г）离散的量化量（图1.1.г）。

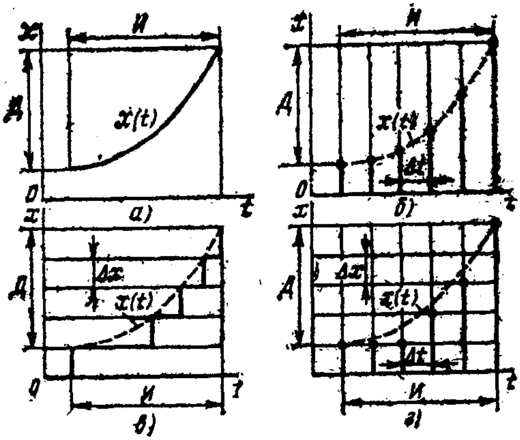

图 1.1 被测量的基本形式

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.б）。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,в），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,a）包括量化装置KвY、编码装置KY以及使其按节拍工作的离散化装置ДY。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ДC。在一般情况下，数字测量仪器（图1.2.б）包括输出模拟信号$a(t)$的模拟变换器AП；输出离散信号ДC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

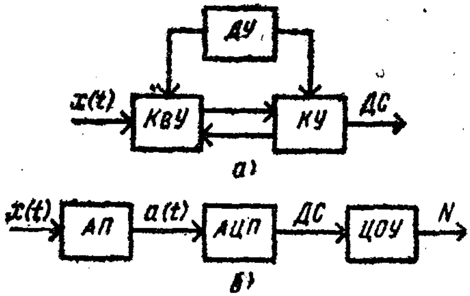

图 1.2 模-数变换器（а）
和数字测量变换器结构电路（б）

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：

$$x_i = n\Delta x = x \pm \Delta_\text{к} \tag{1.1}$$

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）；$\Delta_\text{к}$ 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 $\Delta_{\text{к}\,mak} = \Delta x_{min} = z$

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$m_\text{д}$时，数字测量仪器的分度值为：

$$z = x_{max}/10^{m_\text{д}}$$

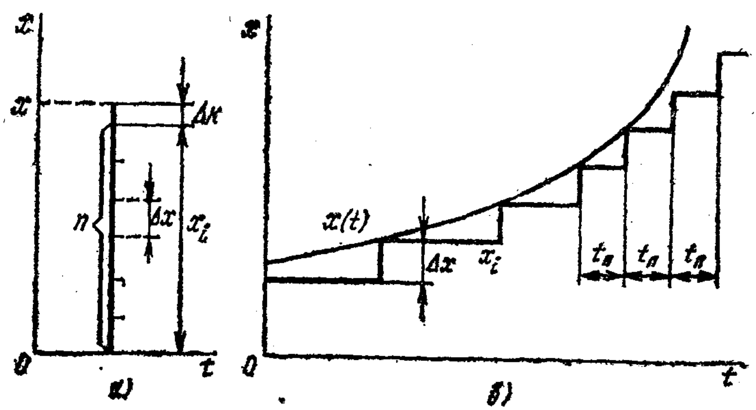

图 1.3 瞬时值的量化

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：

$$n_{max}=x_{max}/z+1 \tag{1.2}$$

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δ_{max}（用%表示），则可按下式计算量化单位：

$$z=\Delta x\leqslant\frac{\delta_{max}}{100}x_{max} \tag{1.3}$$

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：

$$x_{H}<\Delta x\leqslant\frac{\delta_{max}}{100}x_{max}$$

由此可见，假如设计量程为1V、分辨力不小于1 mV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1 mV。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$t_{П}$内足以完成一次模-数变换。变换时间$t_{П}$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

么必须附加表示信号变化过程的数字信息。可能有两种变换方式——跟踪变换和周期变换。

在跟踪变换方式（图1.3б）时，每当量 x 的变化超过量化单位时发生一次变换。在给定量化单位时，量x的最大容许变化速率

$$(dx/dt)_{\max}\leqslant\Delta x/t_{\text{п}} \tag{1.4}$$

由一次变换的时间 $t_{\text{п}}$ 确定，因为每次跟踪变换不能在小于$t_{\text{п}}$的时间内完成。如果 x 变化速率没有超过（1.4）式确定的最大容许值，则变换误差将不超过量化单位，这是跟踪变换方式的主要优点之一。

在周期变换方式（图1.1.г）时，同时利用数值量化和时间离散，即经过时间间隔$\Delta t\geqslant t_{\text{п}}$周期地确定量$x$的离散值。此时，选择离散间隔 Δt 十分重要；因为除量化误差和离散误差之外，还有因为用按时间间隔Δt确定的离散值代替连续函数 $x(t)$而产生的逼近误差。在确定离散时刻$x(t)$的值时丢失了离散时刻之间的数值信息。为了获得此信息，必须用离散时刻值确定的某一函数去逼近原函数$x(t)$。有各种不同的逼近方法，图1.4表示直线-折线逼近法，认为从一个离散值到另一个离散值时$x(t)$线性变化。但是不论用什么方法逼近都会有逼近误差 Δ_a。

减小逼近误差的最简单方法是减小$t_{\text{п}}$，并使 $\Delta t=t_{\text{п}}$，即提高离散频率。但是这并不是最佳方法，因为在许多情况下（如 x 慢变化时）会使设备复杂，并且获得一些多余信息。因此，在选择实际的Δt时，应考虑利用什么标准，此标准应与被测过程$x(t)$参数有关。

在测量技术中选择这种标准是很难的，因为变量具有任意变化的特点，而测量仪器通常不能只用于测量有某一确定

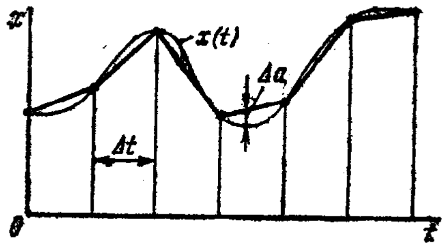

图 1.4 直线-折线逼近

变化特点的量，因此选用的标准必须有条件约束，而且只能用于有限的定性估计中。因此，下面我们只用极简单的说明来讨论这个问题的某些特殊方面。

连续量的离散法的基础是 B. A. 卡切尼柯夫定理：具有有限频谱（$0\sim f_B$）的任意连续函数 $x(t)$，完全可用按如下时间间隔求出的离散值来表示

$$\Delta t = 1/(2f_B) \tag{1.5}$$

离散频率为

$$f_Д = 1/\Delta t = 2f_B \tag{1.6}$$

这里，假定被测量可用上限频率为f_B的简谐信号之和去逼近。因此，只在已知频谱上限频率为f_B的周期变化的被测量时，直接利用此定理解决测量技术的问题才是正确的。而在一般情况下，被测量具有有限持续时间，就是说具有无限频谱，这时为了用离散值精确复现连续量$x(t)$，根据卡切尼柯夫定理，要求离散频率无限大。因此，如果大体上知道被测量变化特点，利用直线-折线逼近原函数$x(t)$（图1.4）较合理，并根据容许的逼近误差Δa确定离散频率。此时

$$\Delta_a=\left[\frac{d^2x(t)}{dt^2}\right]_{max}\cdot\frac{(\Delta t)^2}{8}=g_x\,max\,\frac{(\Delta t)^2}{8}\quad(1.7)$$

当已知被测量变化的最大加速度 $g_x\,max$时，则可大大减小所需的离散频率

$$f_{\text{п}}=\frac{1}{\Delta t}=\sqrt{\frac{g_x\,max}{8\,\Delta_a}}\qquad(1.8)$$

利用直线-折线逼近函数 $x(t)$ 是很方便的，因为不需要任何附加装置和计算，而其它逼近方法需要附加装置和计算。

标准随机函数 $x(t)$第 i 阶导数最大值可用下述 C. H. 别尔什津不等式描述，这个不等式对于具有有限模和上限频率为$\omega_B=2\pi f_B$的频谱密度函数是正确的

$$\left|x_{max}^{(i)}(t)\right|\leqslant\omega_B^i\left|x_{max}(t)\right|$$

因此，公式（1.8）可改写成

$$f_{\text{п}}=\frac{\omega_B}{2}\sqrt{\frac{x\,max}{2\Delta_a}}$$

如果已知被测过程的大体特点，那么在设计数字测量装置时可正确选择必须的离散频率。

如按下式

$$\Delta t=t_{\text{п}}=\frac{\Delta x}{(dx/dt)_{max}}$$

并考虑别尔什津不等式

$$f_{\text{п}}=1/\Delta t=\omega_B\,x_{max}/\Delta x$$

则得到较高的离散频率。

但是，如上所述，变换误差较小，因为其值不超过量化

单位。如果再考虑条件（1.3），那么当$\Delta x \geqslant x_{\text{п}}$时有

$$t_{\text{п}} \leqslant \frac{\delta\,\max}{100} \cdot \frac{x\,\max}{(dx/dt)\max} \tag{1.9}$$

考虑别尔什津不等式

$$t_{\text{п}} \leqslant \delta\,\max/(100\omega_{\text{в}})$$

在信息传输和处理时，为了提高抗干扰能力，连续量的数字化同样是很重要的。因为一旦存在与连续信号可比拟的干扰时，连续信号立刻产生畸变。如果将该信号变换成数字形式，那么为了避免信息畸变，可将信号增加很多倍，使其不发生明显畸变。实际上，如果存在0.1V干扰，而必须利用数字形式表示0.375V电压时，则可将电压表示成375个大幅度（如100V）的脉冲，此时没改变电压的数字表示，但干扰的相对影响却显著地减小了。

数字测量装置中利用的计数制 当$k=1\sim h$时，可把任意数字N表示成下列形式：

$$N = a_{k,m}h^{m-1} + a_{k,m-1}h^{m-2} + \cdots + a_{k,3}h^2 + a_{k,2}h^1 + a_{k,1}h^0 = \sum_{i=1}^{m} a_{k,i}h^{i-1} \tag{1.10}$$

式中h——底数；i——位数；m——最高位数；$a_{k,i}$——位系数（从0至$h-1$）。

在所有的计数制中书写数字N时，一般只利用位系数，即

$$N \sim a_{k,m}\,a_{k,m-1}\,a_{k,m-2}\cdots a_{k,2}\,a_{k,1} \tag{1.11}$$

计数制的形式取决于底数h。常用形式是十进计数制（h=10）。在十进制中原始量用相邻位差10倍的数字N表示，因此，在每位中利用0至9的十个数字（位系数$a_{k,i}$）：

$$N = a_{k,m}\times 10^{m-1} + a_{k,m-1}\times 10^{m-2} + \cdots + a_{k,3}\times 10^2 + a_{k,2}\times 10^1 + a_{k,1}\times 10^0 \tag{1.12}$$

例如 $1074 = 1\times10^3 + 0\times10^2 + 7\times10^1 + 4\times10^0$

为了利用物理系统表示数字，对于每一位需有一个显示位系数 $a_{k,i}$ 所有可能状态的元件。对于十进制来说，可能状态是10个。多数物理元件只有两种状态：开与关。因此，在现代数字技术中广泛应用二进计数制（$h=2, a_{k,i}=0$ 或 1），此时

$$N = a_{k,m}\times2^{m-1} + a_{k,m-1}\times2^{m-2} + \cdots + a_{k,3}\times2^2 + a_{k,2}\times2^1 + a_{k,1}\times2^0 \tag{1.13}$$

例如，数字13用二进制可表示成

$$13 = 1\times2^3 + 1\times2^2 + 0\times2^1 + 1\times2^0 \sim 1101 \sim \sim a_{k,4}\,a_{k,3}\,a_{k,2}\,a_{k,1}$$

对于数字测量仪表的读数来说，二进制数字是很不方便的。将二进制数变换成十进制数，需要相当复杂的线路，因为此时不能直接划分成十进位。因此，在数字测量技术中广泛利用二-十进计数制，它由四个二进制位组成一个十进制位：第一个十进制位是8-4-2-1；第二个十进制位是80-40-20-10；第三个十进制位是800-400-200-100等等。在这种计数制中，每个高位的权增加10倍。为了读数方便，希望每四位数字和不超过9。在数字测量仪器中，通常利用好几种二-十进制码，如4-2-2-1码，5-2-1-1码等。为了数学运算方便，采用补码，补码对应的数字与其位系数反码对应的数字和等于9。例如，在4-2-2-1码中数字3写成二进制的形式是0-0-1-1，如果将位系数求反（二进制形式为1-1-0-0），则得到数字6，该数与原数之和等于9。利用这种特性对十进制数的二进制原码求补，则可将减法运算变成加法运算。表1.1表示将0～13的数字变换成二进制（8-4-2-1）和二-十进制（4-2-2-1）的方法。

表 1.1

十进制数	二进制位						二进制数					二-十进制位								
	…	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0						…	40	20	20	10	4	2	2	1
1	…					1	…	0	0	0	1	…								1
2					2			0	0	1	0								2	
3					2+	1		0	0	1	1								2+	1
4				4				0	1	0	0						4			
5				4	+	1		0	1	0	1						4	+		1
6				4+	2			0	1	1	0						4	+	2	
7				4+	2+	1		0	1	1	1						4	+	2+	1
8			8					1	0	0	0						4+	2+	2	
9			8+			1		1	0	0	1						4+	2+	2+	1
10			8+		2			1	0	1	0					10				
11			8+		2+	1		1	0	1	1					10		+		1
12			8+	4				1	1	0	0					10		+	2	
13			8+	4	+	1		1	1	0	1					10		+	2+	1

容易看出，在二-十进制中，小于9的数字对应的码是不确定的。例如，在 4-2-2-1 码中，十进制数字 4 可以表示成 0110，或者1000等形式。通常采用一定的编码方式来消除不必要的组合。为了减少不确定性并提高抗干扰性，苏联国标（ГОСТ 12814—74）规定，在数字测量装置中利用二-十进制的 2-4-2-1 码。

为了表示给定的最大数N_{max}，二进制所用的元件数量是最少的。可以证明 $N_{max}=2^m-1$（例如，当 $m=10$ 时，$N_{max}=1023$）。所需的二进制位数

$$m=\frac{\lg(N_{max}+1)}{\lg 2}\approx 3.3\lg(N_{max}+1) \qquad (1.14)$$

此值即等于需要的两状态元件数。

对于十进制和二-十进制（每位数字和不超过9），$N_{max}=10^m-1$，（例如，当$m=3$时，$N_{max}=999$），所以

$$m=\lg(N_{max}+1)$$

在十进制中，每位的两状态元件应不少于 9 个，那么总元件数应等于