

新技术小丛书

数字式测量仪表

[苏联] C. C. 赫利兹曼著



国防工业出版社

內 容 提 要

本书扼要地叙述了数字技术基础和数字式测量仪表的构成原理。介绍了数字式仪表所用的一些元件和线路，以及被测量值的变换方法和显示方法。还介绍了苏联和其他国家生产的一些数字式仪表的技术特性。

本书可供从事测量技术、生产过程自动化和数字计算技术工作的广大读者参考。

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

〔苏联〕 С. С. Хризман

ИЗДАТЕЛЬСТВО АН УССР 1963

*

数 字 式 测 量 仪 表

梁 志 魁 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 2 11/16 57 千字

1965 年 10 月第一版 1965 年 10 月第一次印刷 印数：0,001—3,640 册

统一书号：15034·1008 定价：（科六）0.35 元

56.18
714

数 字 式 测 量 仪 表

〔苏联〕C. C. 赫利兹曼著

梁 志 魁 译

3/CS/0/00

国防 1965 年 2 月 版 社

1-2.6 5

目 录

引言	3
第一章 数字技术原理	9
1. 计数制和编码制	9
2. 连续量的离散测量	14
3. 信息论概述	18
第二章 数字式仪表所用的装置	24
1. 数字式仪表的构成原理	24
2. 数字式仪表的基本单元	29
3. 连续量到离散量的变换器	35
4. 数字式读数装置和显示器	52
第三章 苏联和其他国家生产的某些数字式仪表的 技术特性	62
1. 电气机械式数字仪表	63
直流电气机械式数字电压表	63
电气机械式数字欧姆表	69
电气机械式万用数字仪表	70
2. 电子式数字仪表	72
电子管式直流及交流数字电压表	73
数字式频率计和计数器	75
模拟-代码(电压-数字)变换器	79
3. 多点检查系统	81
結束語	84
参考文献	85

引 言

如果不采用更完善的测量、处理和傳遞信息的方法，則技术的进步、新兴科学部門的发展、生产过程的綜合自动化和利用快速数字計算机来解决各种各样的研究、控制以及調节各种过程等任务是不可能的。

任何一种被监督的生产或者科学实验，如果没有获得有关它們进行过程的信息、即或是具有关于其最終結果的信息，也是不可想像的。这种信息我們可以利用各种测量仪表来取得。

任何一种复杂的或者最简单的自动調节、控制或檢查系統的主要单元，都是它們的《感觉机构》——测量(敏感)元件，这种元件可以感受被研究对象或者被檢查对象的特性，定量地衡量出被测参数的数值或其变化情况，并把这种信息傳遞到相应的信息处理装置中。用测量元件定量地测出的这种信息，經過处理后，还根据所提出的任务再送到系統中相应的調节、控制或記錄机构中去。

現代被监督的生产，特别是自动化的生产，或者复杂的科学实验，都要求得到几百个、甚至几千个点以上的大量的信息。这样多的信息通常必須及时地、有时还要按相当复杂的程序来加以处理。即使是对于經過严格訓練并且配备有普通测量仪表的人来讲，为了可靠而迅速地收集和處理必要数量的测量信息，并作出所要求的解答，其《工作能力》也总

08183

是不够的。如果对测量信息没有进行适当的收集和处理，就不可能把它们送到现代计算机中。计算机可以比人快千百倍地来处理这些已编码的测量信息，并且可以迅速地给出所要求的解答。

在大型动力系统中、在煤气管、输油管和其它一些生产中，必须核算电能、气体或物质的连续耗量，对这些数据进行统计处理，确定峰值或极限值，对这些数据进行分析，并据此采取适当的有效措施。用一般的测量记录仪表取得这些数据和处理曲线图表要耽搁很久（有时要一昼夜以上），占用很多时间，要求谨慎、耐心，而且单调乏味。

在工业和科学实验中，使用一般测量仪表的检测人员或实验观察人员，应当聚精会神地和小心翼翼地观察仪表指针或者指示器的指示。这时根据人们眼睛对仪表指针的位置、距仪表的距离和心理状态，会在测量结果中引进主观误差。检测人员长时间进行测量的紧张工作会引起疲劳，使主观误差增加。正如观察结果所表明的，经过3~4小时的工作后，主观误差的百分数会上升，测量时间也将增加。

测量信息经常要在保持其传递精度的条件下传递到很远的地方，而用一般的测量系统和测量仪表是不能保证这些条件的。

当采用以连续量形式取得测量信息并把它变换成相应的输出连续量的测量系统或测量仪表的情况下，就会产生上面所指出的一些困难，对评价所取得的信息来讲，输出连续量并不总是方便的。绝大多数被检查参数或被测参数的形式都是连续的时间函数，并且在数值上是平滑改变的。这些参数可以是电量、机械量、物理量、化学量、生物量等等。

由于测量仪表的种类极其繁多，因而对大量的测量信息进行集中检查和处理是比较复杂的。不过目前已经有各种各样的模拟变换器，可以把各种不同的量值变换成某一种最便于采用的形式。最广泛采用的是一种电气传感器，它们可以对任何物理量、化学量和生物量进行测量，并变换成相应的电量。这种模拟变换器可以迅速而方便地以统一的电信号的形式（在大多数情况下，其数值是连续的）来传递各种信息源的不同输入测量信息。

目前除了用连续形式传递信息的方法之外，也有用离散（不连续）形式传递信息的方法，这种方法得到了广泛的应用。在测量系统和测量仪表中，同在计算机中一样，最方便的是把离散形式的信息表示成数目（数字）的形式。

根据 В. А. 卡切尔尼可夫 (Котельников) 定理[1]，可以把在时间上和数值上连续的信号用离散形式或数字形式表示出来。如果信号值可以取有限个确定的数值，而所有中间数值都可以化成邻近的整数，则这种信号就称为在数值上是离散的。这种用近似值来代替信号的精确数值的方法称为按电平分层，这里两个相邻离散值之间的差别是一个单元量，即一个分层（图1）。还可以经过一定的时间段来测量信号值，这时信号就称为在时间上是离散的或按时间分层（图2）。

可以证明，连续形式的信号能够最准确地反映出被测过程的性质。不过我们可以把离散信号的分层减小，因而能够以任何预先给定的精度使离散信号接近于连续信号（图3）。况且连续形式的信号，即使在连续动作的仪表上进行测量时，实际上也是按电平和按时间作了分层。连续信号的《可分层性》，按电平分层时决定于仪表的不灵敏性及其精度等

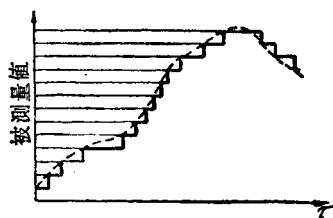


图1 按電平分層的
連續變化的變量。

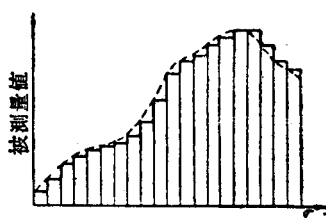


图2 按時間分層的
連續變化的變量。

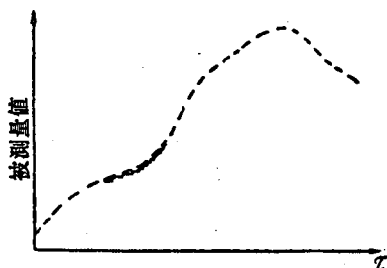


图3 减小分層值使离散
記錄接近于連續記錄。

級；而按時間分層時則決定于儀表的時間常數。

离散形式的信息具有一系列的优点。在处理和变换連續信息时，由于各个傳遞环节中誤差的积累，使信息的傳遞精度逐漸降低。离散信息的傳遞的抗干扰性

是比較好的。

輸入測量信息的离散值可以迅速而容易地傳遞到任何远的距离，直接送入数字計算机进行处理，簡單而客觀地根据数字式显示器的指示来确定、或者以适合于后面处理裝置的数字数据的形式来記錄。

解决綜合自动化問題的必要性和进行复杂的科学实验（不用解-算技术是不可想像的），都需要制造出一种能够把实际对象与数字計算机連系起來的裝置。属于这类裝置的就

是一种可以把連續（模拟）形式信息变换成离散（数字）形式信息的各种型式的变换器。这种变换器称为模拟-代碼变换器。

在各种数字式仪表中就利用了离散形式信息的这些公认的优点。数字式仪表是现代仪器制造发展的一个新的方向。它能够迅速而简单地进行精密测量、实现大量被测参数的灵活的多点检查、从测量结果中消除主观误差、给出测量信息的形式可以方便地在快速数字计算机中进行处理或传递到很远的距离而不损失精度，它还能够高精度、高速度地记录瞬时的测量信息。

目前这门急速发展的测量技术包括有大量的各种用途和作用原理的系统 and 仪表。在这里可以把数字式仪表的发展分成两个主要方向。

第一个方向是制造一种对一系列参数进行多点检查的自动测量系统，它可以对每一个参数进行多次輪流的测量，并用数字形式加以记录。这种系统都是一些相当复杂的系统，它们用于工艺过程的綜合自动化和进行复杂的研究，即用于不仅需要有大量的快速和精密的仪表，而且需要迅速处理大量的测量结果的地方。这种系统可以具有不同的精度和速度，可以测量任何数目的参数，可以在磁带、紙带和穿孔卡片上记录测量结果，可以把数字代碼送到数字计算机中进行处理，或者送到遙测系统的通信道上。

第二个方向是制造具有直接数字讀数的仪表，这种仪表称为独立的数字式仪表。属于这类仪表的有数字电压表、数字欧姆表和数字频率計。独立的数字式仪表在采用适当的电气传感器的情况下，能够给出任何被测量值的数字讀数。

这种独立的数字式仪表，作为一种宽量限的高精度快速仪表而用于生产过程中和实验室工作中（如精密测量、监督、仪表的校验等等）。有时它们又兼作数字式数据处理系统中的输入装置。

本书力图收集和概括一下一些零散的有关数字式仪表的资料，并以通俗的形式使广大读者了解这类仪表的构成原理和工作，以及这类仪表所采用的一些基本单元和装置。为便于了解离散装置的工作原理，书中还介绍了有关计数制和编码方法的一些简单知识。

苏联和其他国家生产的某些数字式仪表的技术数据也占有相当大的篇幅，它们标志着现代离散式测量装置的水平和发展。为使读者更详细地了解有关问题，书中还介绍了有关数字式仪表和离散技术基础知识的参考文献。

第 一 章

数字技术原理

1. 計数制和編碼制

为了对数目进行数字记录，必須取用某些符号和书写这些符号的次序，即选择計数制。在大家熟悉的十进制計数制中，采用十个不同的符号：0、1、2、3、4、5、6、7、8、9。但这并不是唯一的一种計数制。例如，古代巴比倫曾用过一种六十进（六单位）計数制，其中采用六十个不同的符号。直到目前为止，这种計数制还以十进制同六十进制相配合的形式用来测量時間（秒、分、时的关系）。印第安馬雅人曾用过一种五进制。双五进制則是羅馬計数制，其中采用了五个基本符号（I、V、X、C、M）和两个补充符号（L、D）。

任何一个数 M 都可以按一定的計数制表示成总和的形式：

$$M = q_n h^n + q_{n-1} h^{n-1} + \dots + q_2 h^2 + q_1 h^1 + q_0 h^0, \quad (1)$$

式中 h ——計数制的基数（可取1到 n ）；

q ——因数，可取值0到 $h-1$ 。

例如，若 $M=5839$ ，則在十进制中可以表示成下面的总和形式： $5 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 9 \cdot 10^0 = 5839$ 。在六十进制中，当用十进制符号表示时，此数可以表示成下面的总和： $1 \cdot 60^2 + 37 \cdot 60^1 + 19 \cdot 60^0 = 1.37.19$ 。把数 $M=5839$ 記成1.37.19的这种表示方法是不习惯的，因为我們习惯于把它想像成十

进制。但是，如果指明数 5839 是以秒来表示时间时，则每一个人都不会费力地采用六十进制，并且马上就可以指出 5839 秒是 1 小时 37 分 19 秒，也就是数 $(1.37.19)$ ，它用六十进制的总和来表示。

正如在十进制中， 10^0 为个位、 10^1 为十位、 10^2 为百位一样，在六十进制中， 60^0 为个位（在时间刻度盘上为秒）、 60^1 为分、 60^2 为时。

在数字装置中，采用上述各种计数制，甚至采用习惯的十进制计数制，都是非常麻烦的。在十进制计数制中，很难运用电气装置和电子装置。这是因为在每一位中要有几个稳定状态，或者能存储几个数字，这与在计数制的基数中包含有几个单位是一样的。例如，对十进制来讲，数字装置要有十个稳定状态。

在电气装置和电子装置中有很多种具有两个稳定状态（通—断、是—非、有电流—无电流）的普通单元。属于这类单元的有：各种继电器、触发器、氖灯、闸流管、磁性元件等。因此，对数字装置来讲，二进制是最方便的计数制。采用二进制可以使数字装置的线路大为简单，并且能提高数字装置的速度。

在二进制计数制中， $k = 2$ ，因此，每一位只有两个符号，因为 q 只能为 0 或者 1。为了在二进制中记下数字 2，还要有第二位，也就是说，在二进制中，把 2 表示成 10。数字 3 为 $2+1$ ，因此根据公式(1)，在二进制中则记成 11 等等。例如，数 $M = 5839$ 在二进制中就是下面的形式：1011011001111，即 $1 \cdot 2^{13} + 0 \cdot 2^{12} + 1 \cdot 2^{11} + 1 \cdot 2^{10} + 1 \cdot 2^9 + 0 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 4096 + 0 + 1024 + 512 + 0 +$

$128 + 64 + 0 + 0 + 8 + 4 + 2 + 1 = 5839$ 。乍看起来好像二进制应当比十进制需要更多的单元，但这种看法是不对的。为了在十进制中有可能《存储》数 5839，则必须有 4 个十进位，即要有 40 个稳定位置，而在二进制中只有 13 位双稳定位置就够了，总共才有 26 个稳定位置，比在十进制中差不多减少了三分之一。

二进制计数制或二进制代码的另一个重要优点就是完成算术运算比较简单。如果在十进制中要记忆一系列的规则和乘法表（包括 100 个进位规则），则在二进制中只有 4 个加法规则：

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 0, \text{ 并把 } 1 \text{ 进到下一位。}$$

乘法表也有 4 个规则：

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

减法运算还需要一些补充规则，为了使数字装置简单，用对该数的补码进行加法运算来代替减法运算。乘除法归根到底也可以变成加法运算，但要按乘法规则。这些基本的算术运算，用一些最简单的逻辑线路就可以顺利地进行。

采用简单的二进制代码并非总是很方便的。在带有输出供目视观测用的显示器的数字式仪表中，以及在某些情况下要求用数字记录时，要得到的测量结果并不是用二进制数

制的形式来表示，而是用我們易于接受的十进制計数制的形式来表示。在这种情况下，要把連續的被測量值变换成二进制代碼，而为了得到十进制数，則需采用所謂二-十进制編碼。

在二-十进制編碼时，十进制数由 4 个二进制符号組成。这种二进制編碼的十进制由具有两个稳定状态的单元来完成。根据二进制符号及其采样的組合，构成二进制編碼的十进制方案有很多种（約 $3 \cdot 10^{10}$ 种）。最常采用的代碼是，其中任何从 0 到 9 的数都可以用四位二进制数单值地来表示，即 $q_3 \cdot 2^3 + q_2 \cdot 2^2 + q_1 \cdot 2^1 + q_0 \cdot 2^0$ 。其它一些代碼則不能給出滿足所要求的单值性。这种代碼称为 1—2—4—8。其中二进制編碼十进制数的每一位都由四位二进制数組成（表 1）。

表 1 二-十进制代碼

十进制数	二 进 代 碼				二-十进制代碼的数值
	q_3	q_2	q_1	q_0	
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	0	1	1	$2 + 1$
4	0	1	0	0	4
5	0	1	0	1	$4 + 1$
6	0	1	1	0	$4 + 2$
7	0	1	1	1	$4 + 2 + 1$
8	1	0	0	0	8
9	1	0	0	1	$8 + 1$

对某些型式的模拟-数字变换器来讲，并不希望采用一般的二进制代碼，这是因为誤差很大，有可能达到該数的最大值。在这种情况下，采用一种特殊的循环代碼，有时又称为格雷（Грей）代碼。循环代碼是这样构成的：当从任何一个

数轉到下一个数时,改变的只是代碼某一位中的数字,即可能的差錯不会大于最低位数的一个单位〔2〕。

还要指出一种可以方便地进行减法运算的带有剩余 011 (3) 的代碼。在这种代碼中,任何一对組成 9 的数 (0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5) 內, 0 和 1 的排列次序都是直接对立的。因此,可以用改变 1 为 0 和改变 0 为 1 的

表 2 某些数在各种計数制中用代碼的表示

十进数	二进数	循环代碼 中的数	带有剩余 3 的 二进制碼中的数	1-2-4-8 二十进制碼 中的数
0	00000	00000	00011	0000 0000
1	00001	00001	00100	0000 0001
2	00010	00011	00101	0000 0010
3	00011	00010	00110	0000 0011
4	00100	00110	00111	0000 0100
5	00101	00111	01000	0000 0101
6	00110	00101	01001	0000 0110
7	00111	00100	01010	0000 0111
8	01000	01100	01011	0000 1000
9	01001	01101	01100	0000 1001
10	01010	01111	01101	0001 0000
11	01011	01110	01110	0001 0001
12	01100	01010	01111	0001 0010
13	01101	01011	10000	0001 0011
14	01110	01001	10001	0001 0100
15	01111	01000	10010	0001 0101
16	10000	11000	10011	0001 0110
17	10001	11001	10100	0001 0111
18	10010	11011	10101	0001 1000
19	10011	11010	10110	0001 1001
20	10100	11110	10111	0010 0000
21	10101	11111	11000	0010 0001
22	10110	11101	11001	0010 0010
23	10111	11100	11010	0010 0011
24	11000	10100	11011	0010 0100
25	11001	10101	11100	0010 0101
26	11010	10111	11101	0010 0110
27	11011	10110	11110	0010 0111
28	11100	10010	11111	0010 1000
29	11101	10011	100000	0010 1001
30	11110	10001	100001	0011 0000
31	11111	10000	100010	0011 0001
32	100000	110000	100011	0011 0010

方法求出 9 以內的任何数的补碼。

表 2 給出了某些数在各种計数制和代碼制中的表示方法。除了上述一些代碼外，在模拟-数字变换器和数字式仪表中，有时也采用其它一些代碼方案。在文献〔2、3、4〕中介绍了各种計数制和編碼制，它們的算术运算，及其在数字装置中的应用。

2. 連續量的离散測量

各种数字式仪表的工作都是基于把連續量变换为离散量的原理。把連續量变换为数字代碼的过程，可以給出連續量按時間和按电平进行分层（离散化）的总合（图 4）。

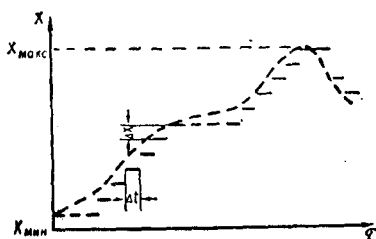


图 4. 連續变量按电平和按時間的分层。

我們研究一下按电平进行分层的一些基本条件。加到变换器上的輸入連續信号通常要受到变换器正常工作的測量工作范围的限制。在此范围内，信号可以从无限个可能数值中取任何数值（图 4）。

但是任何一种測量仪表都具有一定的灵敏度，它取决于信号的最小值，这个最小值就是还可以測量到的，或者微微能察覺到的值。如果用 Δx 来表示信号的最小变化，則从 x_{MHH} 到 x_{MAKC} 的被測量范围内，由有限个 (n) 离散值 Δx 組成：

$$n = \frac{x_{MAKC} - x_{MHH}}{\Delta x} + 1, \quad (2)$$

或当 $x_{\text{min}} = 0$ 时,

$$n = \frac{x_{\text{max}}}{\Delta x} + 1. \quad (3)$$

知道了测量仪表的允许相对误差 δ 的百分数, 就可以确定绝对误差 Δx :

$$\Delta x = \frac{2\delta}{100} x_{\text{max}}. \quad (4)$$

例如, 当用刻度尺为 0~10 伏, 误差为 2.5% (2.5 级) 的普通电压表测量 0~10 伏电压时, 最大绝对误差为:

$$\Delta x = \frac{2 \cdot 2.5}{100} \cdot 10 = 0.5 \text{ 伏}.$$

对此仪表确定离散读数 (电平) 的可能数目:

$$n = \frac{10}{0.5} + 1 = 21.$$

这个例子令人信服地表明, 甚至在具有连续刻度尺的仪表中, 我们也可以只采用被测量的有限个离散值 (在上例中总共有 21 个)。

还要更明确地指出一点, 即数字式仪表是用来测量连续量的数值的。因而数字式仪表的模拟装置 (分压器、电导箱、标准电源等) 的误差就是数字式仪表的直接误差。制造和调整精度以及这种装置的稳定性, 基本上决定了数字式仪表的测量精度。

离散单元或数字读数装置中, 二进位或十进制的数目, 在原理上可能有无限多个, 但这时读数精度与测量精度并不相符合。因此, 数字式仪表中显示器符号的数目要使读数精度与测量精度相符合才行。这时读数装置最低位的 1 在绝对值上要比模拟装置的最大误差大。输入被测量值的每一阶