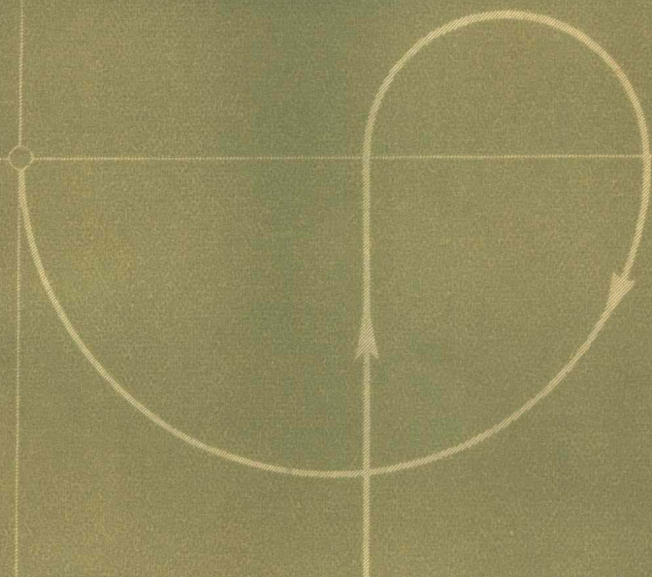


自动化丛书



# 计数式模拟数字转换器

〔苏联〕A. B. 扎沃罗金著 吴培根译

上海科学技术出版社

# 计数式模拟数字转换器

〔苏联〕A. K. 扎沃罗金 著

吴培根 译 黄 泓 校

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书叙述将机械量和电气量轉換为等值数字量的模拟数字轉換器的結構原理和分类方法。书中除一般性地介紹各种轉換器的方框图和基本特性外,并着重分析各种計数式模拟数字轉換器的結構和性能。

本书可供从事于应用数字技术在生产过程自动控制方面的工程技术人员参考。

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕПРЕРЫВНЫХ ВЕЛИЧИН В ЧИСЛОВЫЕ ЭКВИВАЛЕНТЫ

А. К. Заволокин

Госэнергоиздат • 1962

自动化丛书(23)

計数式模拟数字轉換器

吳培根 譯 黃 淞 校

自动化丛书編輯委员会主編

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可證出093号

---

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 2 24/32 排版字數 60,000

1963年12月第1版 1963年12月第1次印刷 印數 1—6,000

統一書号 15119·1758 定价(十二) 0.34 元

## 前 言<sup>①</sup>

如果說在几年前，数字装置和执行机械配合工作是一种罕有的事情，那么，现在却可举出大量的用数字计算机来解算各种数学问题的例子。题目的原始数据一般都是由物理对象给出，用数字法解求的结果比用模拟法求得的更正确。不仅如此，实际上还有许多与自动化有关的问题非模拟计算机所能解决。因此，用于控制和调节生产过程的专用数字计算机必将得到进一步的发展。

数字计算机工作时有一特殊要求，即原始数据和运算结果应能自动地输入和输出。于是，常需要将模拟量（如机械位移或电压）转换为对应的等值数字量。能准确地将模拟量转换为等值数字量，是一个当前急需解决的专门的问题。要解决这个问题，就必须创制能满足一定要求的转换器。

本书基本上只讨论一种转换器——计数式转换器。为了说明这种计数式转换器在各类转换器中所占据的地位，就有必要将所有的转换器归类，同时对其余各类转换器亦作一些最基本的介绍。

苏联和其他各国都在从事转换器的研究试制工作，并已创制了许多结构新型、性能优良的转换器。为了使读者能对各种转换器的准确度、体积和其他性能有一个较清楚的概念，在书中列举了一些已试制成的、并经过试验的具体装置。

本书适合于对电子数字计算装置的一般原理及其各元件比较熟悉的读者阅读。书中着重讨论各种转换器的工作程序、典型方框图和基本特性。

① 有节略。——译者

# 目 录

## 前 言

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第1章 轉換器的类别</b> .....          | 1  |
| 1. 計数式轉換器 .....                  | 1  |
| 2. 直讀式轉換器 .....                  | 4  |
| 3. 逐位編碼式轉換器 .....                | 17 |
| <b>第2章 累积式轉換器</b> .....          | 20 |
| <b>第3章 模拟量經中間轉換的計数式轉換器</b> ..... | 35 |
| 4. 模拟量經中間轉換为頻率的轉換装置 .....        | 35 |
| 5. 模拟量經中間轉換为時間間隔的轉換装置 .....      | 41 |
| 6. 关于頻率的配合方法 .....               | 54 |
| <b>第4章 多級讀数的計数式轉換器</b> .....     | 65 |
| 7. 机械分級的轉換器 .....                | 65 |
| 8. 电气分級的轉換器 .....                | 73 |
| 9. 軸轉角轉換器类型的選擇 .....             | 76 |
| <b>参考文献</b> .....                | 81 |

# 第 1 章

## 轉換器的類別

### 1. 計數式轉換器

轉換裝置可按它們的各種特征進行分類<sup>[1~4]</sup>。其中最重要的特征就是取得等值數字量的原理。因而，以此作為轉換器分類的基本原則是恰當的。

轉換器分類的輔助原則，可以採用下列各種特征：如被轉換量的種類（電流、電壓、轉角或速度等等）、有無觸點、結構特點（用光電元件、磁鼓或感應電機等等）和轉換器的工作特性等。

以下我們將按上述的基本原則將主要的轉換器進行分類。這樣做有很大的好處，因為取得等值數字量的轉換原理本身，就完全確定了轉換裝置的各項重要的運行指標，如動作速度、抗擾能力、循環工作能力和零位固定的單值性等等。並且，各種不同的轉換器，無論是電量（電壓或電流）或是機械位移的轉換器，都可以併入為數不多的三類，即計數式轉換器、直讀式轉換器和逐位編碼式轉換器（圖 1）。上述的分類法是以取得等值數字量的三種基本方法為基礎的。其中，計數式轉換器是將模擬量先轉換為一系列電脈沖，其個數和模擬量成正比。這些脈沖順次地送入計數器進行總加。

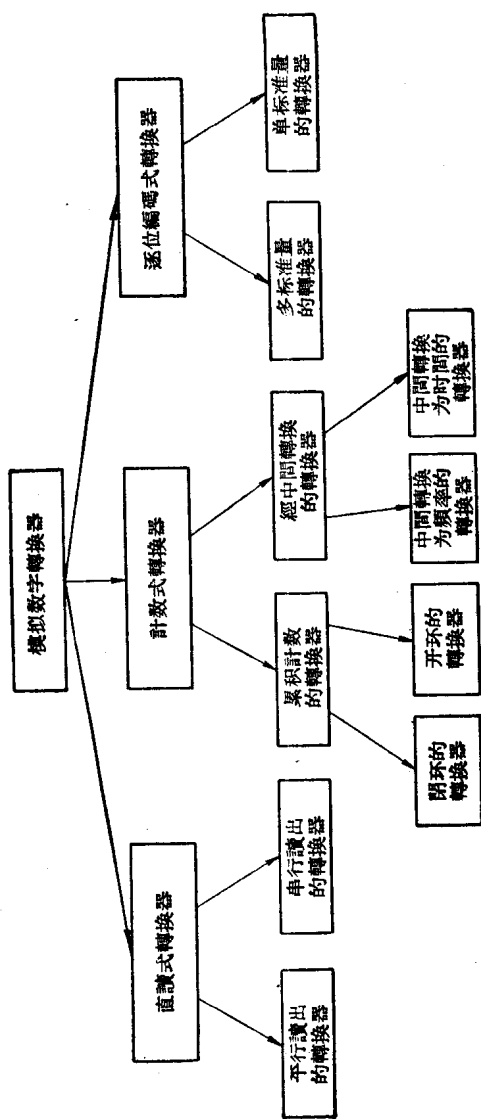


图 1 轉換器的类别

計數式轉換器又分為兩種：模擬量經中間轉換的轉換器和累積式轉換器。在以后各章中將作詳細的討論。這裡僅指出，所以這樣劃分，那是由可能接收等值數字量的方式所決定的。例如，可以設計這樣一種轉換器，即當被轉換量改變一個微增量時，它就發出一個脈沖。若這些脈沖按代數相加累積起來，則記錄在計數器中的數字量將單值地表示被轉換的模擬量。這種轉換器就稱為累積式轉換器。累積式轉換器可按開環或閉環線路組成（參閱第2章）。

開環線路的累積式轉換器可用來轉換角位移。它們的優點是機電部分結構簡單和動作速度快，缺點是零位固定不是單值的和抗擾能力差。閉環線路的累積式轉換器用於電量（電壓或電流）的轉換。它們的特點是動作速度快（在輸入量不躍變的條件下）、抗擾能力好以及零位固定是單值的。

先將模擬量中間轉換為時間間隔或頻率，然後再轉換為等值數字量的轉換器是計數式轉換器的第二種型式（參閱第3章）。當將模擬量中間轉換為時間間隔時，時間間隔的大小和模擬量的瞬時值成正比，在這段時間內有脈沖送入計數器，結果，在計數器中記錄的脈沖總數將是和模擬量瞬時值相對應的等值數字量。採用這種原理可以構成轉換電量或轉換機械量的轉換器。

在很多場合，比較恰當的方案不是將模擬量中間轉換為時間間隔，却是先將它轉換為電脈沖，其重複頻率和被轉換的模擬量成正比。然後在嚴格規定的一段時間內用計數器來計算脈沖個數，在計數周期結束後，計數器中所記錄的脈沖總數將是和被轉換模擬量相對應的等值數字量。在這基礎上可以構成極為有效的軸轉速的轉換器。

模擬量經中間轉換的轉換器具有不斷循環工作的特點，

即在每次得到和前一瞬时的模拟量相对应的等值数字量之后,紧接着转换过程又从新开始,结果又得到和后一瞬时的模拟量相对应的等值数字量。如此不断循环地工作就决定了零位固定是单值的,以及抗扰能力很好。所谓抗扰能力好,就是说,在短时干扰的影响下,给出了一次不正确的转换结果,但在下一个工作循环中,误差将能得到纠正。

## 2. 直讀式轉換器

这类转换器的结构有些特殊,其中有一个预先制造好的“数码表”,表中汇集了所有可能的等值数字量。根据模拟量的数值,转换器从数码表上自动地选出(讀出)和模拟量相对应的、一定的等值数字量。

从图1可知,直讀式转换器又分为并行讀出和串行讀出

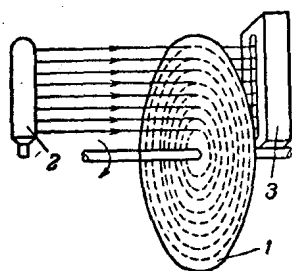


图2 由碼盘构成的  
直讀式转换器

两种。在并行讀出的转换器中,所有各位的数值是在一拍中同时讀出的。在串行讀出的转换器中,各位数值是在几拍中順序讀出的。这时,每拍只讀出一位数值。因而在这种串行讀出的转换器中,数字量讀出所需的时间和最大等值数字量的位数成正比。

直讀式转换器原则上可以设计成用来转换电量,或设计成用来转换位移。它们的特点为零位固定是单值的,以及抗扰能力很好。图2所示的装置,是一个角位移转换器的典型例子。这装置包括碼盘1、光源2和光电元件3等组件。碼盘上有許多同心碼道,其上按一定规律排列着許多透明或不透明的部分。每一个光电元件对应

着一条碼道。光源发出的狭长光束按徑向投射在碼盘上。当碼盘轉至某一角度时，若光源和某一个光电元件之間恰处于同心碼道的透明部分上，則光电元件的輸出端上就有訊号，此訊号即讀出訊号。所有光电元件的訊号，它們的各种組合代表按一定規律編碼的、确定的数字量，可根据它們单值地确定軸的轉角。有时数字量就用二进或十进計数制来表示。

現以 Baldwin Piano 公司生产的一种光学轉換器为例来更清楚地說明上述轉換裝置。該轉換器的結構如图2所示。碼盘用玻璃制成，直徑約为 21.6 厘米<sup>①</sup>，其上用照相法印有 16 位二进碼。这相当把碼盘的圓周分成 65536 ( $2^{16}$ ) 个間断部分，在确定軸的轉角时，能使最大的角度誤差不超过 10 秒。光源为一个細长形的功率气体放电管。光栅的寬度为 5 微米。用小型光电晶体三极管讀取輸出量，后者为 16 位二进制数字量。

显然，对这类轉換器來說，上例中所讲的并不是它唯一的結構方案。但是，尽管結構的个别部分可以不同，所有的直讀式轉換器总应当有一个按一定方式分格的特殊机械部件(碼盘、碼鼓等等)，以后将称它为轉換器的定碼器。

另外，不管这类轉換器的結構如何，它們总得要有一定数量的直接讀出定碼器数字量的特殊元件。这些元件以后将一般地称为“轉換器的敏感元件”。敏感元件可以是光电元件、电刷、磁头或电容耦合元件等等。在用来轉換位移的直讀式轉換器中，敏感元件的个数通常不少于最大等值数字量的位数。在这种轉換器中敏感元件的数量很多，并且又需相当精确地把它們安置在固定的位置上，这一点是这种轉換器的缺点，因为将由此而降低轉換器的工作可靠性，以及使調整工作

① 应作 21.6 厘米，原文为毫米。——校注

变得很复杂。

利用阴极射线管构成的、将电压转换为数字量的转换装

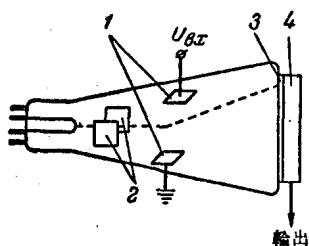


图3 用阴极射线管构成的直读式转换器

置,是这类转换器的一种特例,其结构如图3所示。这种装置的工作原理系根据阴极射线的偏转距离是和加在射线管偏转板上的电压成正比的。被转换电压加在偏转板1上,同时把锯齿形扫描电压加在偏转板2上。

这里和位移转换器中的情形

相仿,在射线管的光屏3上有许多码道,各码道是由许多透明和不透明的部分组成。光电元件4按置在光屏前面,当阴极射线透过透明部分投射在某光电元件上时,这光电元件就送出适当的讯号。在某一瞬时,根据某一个光电元件输出端上有、无讯号,就可确定二进制等值数字量的某一位的数值。

设计直读式转换器时存在一个问题,即当被转换量的大小恰巧相当于两个相邻数量级的界限时,将发生非单值性的转换,并引起很大的误差,这一点必需设法避免。例如,图46所示的是一个按二进制编码的光屏,它被划分为16个整量级。在图中可以看

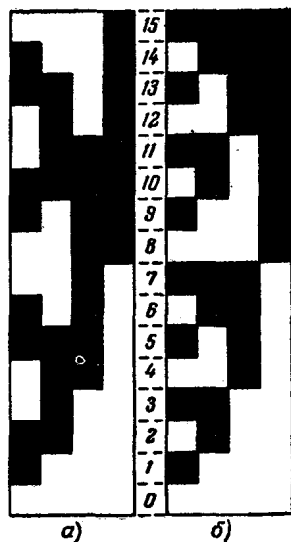


图4

a—按葛莱方法编码的光屏;  
b—按二进制编码的光屏

出,如果阴极射线移在某一碼道中間,則将有完全正确的用二进制表示的数碼輸入計算裝置,数碼就代表垂直偏轉的距离。而如果把阴极射线滑在两个相邻数碼量的界限上,則阴极射线在垂直方向即使只有极微小的偏动,亦将引起不能允許的誤差。例如,若射线移在数碼量标记“7”和“8”(图 46)的邻界上,則随着射线在垂直方向波动,使輸出至計算裝置的二进制数字亦不相同,可能为由 0000 到 1111 中的任一数值。

在設計制造轉換机械位移的轉換器时,也存在类似的問題。解决这問題有好多方法。

有一种方法是,光屏或轉換器的定碼器不按通常的計数制(十进制、二进制和八进制等等)編碼,而用特殊方法編碼,例如可以把数字量表为一般所称的循环碼(葛萊碼)。

将二进制数字量改变为对应的循环碼,可按以下法則进行:如果有  $m$  位二进制的数字量  $A = a_{m-1}a_{m-2} \cdots a_2a_1a_0$  ( $a_i$ —数字量  $A$  的第  $i$  位的数值),則对应的以循环碼表示的数字量  $A' = a'_{m-1}a'_{m-2} \cdots a'_2a'_1a'_0$  ( $a'_i$ —数字量  $A'$  的第  $i$  位的数值)为以下两个二进制数字量逐位不进位相加的結果:

$$\left( \begin{array}{c} a_{m-1}a_{m-2} \cdots a_2a_1a_0 \\ + \quad a_{m-1} \cdots a_3a_2a_1 \\ \hline a'_{m-1}a'_{m-2} \cdots a'_2a'_1a'_0 \end{array} \right)_{6.11} \quad (1)$$

括弧后的脚碼 6.11 表示逐位相加时所得到的 1 应丢掉,不进位。

可以証明<sup>[5]</sup>,用上述循环碼所表示的数字量和用  $m$  位二进制所表示的数字量是单值地相对应的。而在循环碼中,两相邻数字量之間只差一位数字。因此,在直讀式轉換器中,都广泛采用循环碼。例如,图 4a 所示的阴极射线管的四位碼屏,就是按循环碼編碼的。由图可見,若阴极射线的纵向波动

不大于最低一位数字所代表的数量，則讀出的等值数字量的誤差，亦将不大于最低一位数字所代表的数量。

現在以美国 Cambridge 公司生产的一种光学轉換器为例，來說明將轉角轉換为数碼时应用循环碼的情况。这种轉換器的結構亦如图 2 所示。定碼器是一个玻璃圓盘，其上用照相法印有 13 位循环碼，角度轉換誤差不大于 3 分。

应当指出，在按循环碼編碼的直讀式轉換器中，轉換得到的等值数字量，有时还要求將它們再变换为一般的二进制数碼。这种变换可用特殊的电子装置来实现。这种装置的工作原理是根据文献[5]的两条定律，关于这两条定律，这里不來証明，仅作如下說明：

第一条定律証明，假如把以循环碼表示的数字量的所有各位数字，进行不进位相加，則得到的結果将等于对应的二进制数字量最低位数字的数值。这可用以下数学式表示：

$$(a'_{m-1} + a'_{m-2} + \cdots + a'_2 + a'_1 + a'_0)_{6.n} = a_0 \quad (2)$$

第二条定律說明，假如  $b$ 、 $c$  和  $d$  为某些二进制数字，且彼此間的关系为

$$(b + c)_{6.n} = d \quad (3)$$

則以下等式成立

$$(b + d)_{6.n} = c \quad (4)$$

根据第一条定律，可以决定二进制数字量最低位数字  $a_0$  的数值；实际上这可用触发器来实现。設触发器原始处于零位，然后把循环碼数字量所有各位数字的数值相应地变为一串脉冲，并将它們順次加在触发器的計数輸入端上，触发器就进行不进位相加，其最終状态就确定了  $a_0$  的数值。

$a_0$  的数值确定后，再根据已知的循环碼数字量，可求得  $a_1$ 。实际上，根据式(1)的关系可求得

$$a'_0 = (a_0 + a_1)_{6.n} \quad (5)$$

并依据上述的第二条定律, 上式可改写为

$$a_1 = (a_0 + a'_0)_{6.n} \quad (6)$$

式(6)的右边皆是已知数, 故不难求得  $a_1$ 。

算出  $a_1$  后, 用类似的方法可确定下一位的数值:

$$a_2 = (a_1 + a'_1)_{6.n} \quad (7)$$

这样, 二进位数字量的第  $i$  位数字的数值一般可表为

$$a_i = (a_{i-1} + a'_{i-1})_{6.n} \quad (8)$$

能将循环码改变为二进码的装置有许多种。其中一种的方框图如图 5 所示。这一装置包括: 触发器  $T$ 、四个符合线路 (閘門)  $B_1 \sim B_4$ 、“或”线路  $P$  和两个延时线路  $\mathcal{B}3_1$  和  $\mathcal{B}3_2$  等元件。

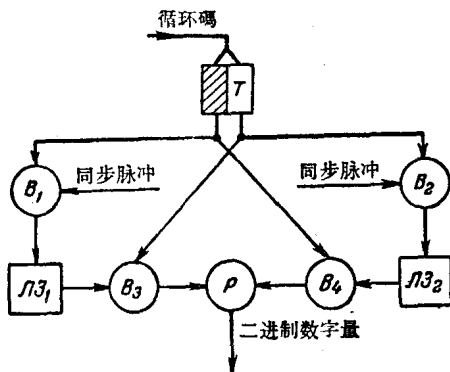


图 5 将循环码数字量改变为二进制数字量装置的方框图

把循环码数字量各位数字的数值, 从最低位开始顺序加至触发器的计数输入端上。触发器的输出信号送至符合线路  $B_1$  和  $B_2$  的两输入端之一上。加在两符合线路其余两输入端上的是和加在触发器上的循环码各位数字同步的同步脉冲。每一同步脉冲究竟是通过  $B_1$ , 还是通过  $B_2$ , 这将由该瞬时触

发器的哪一半处于激励状态来决定。

因为二进制数字量的最低位  $a_0$  可能是 0 或 1, 那么触发器左右两半中有一半的初始状态将和  $a_0$  的数值相当。由式 (6~8) 可知, 在循环码的各位数字  $a'_0, a'_1, \dots, a'_{i-1}, \dots, a'_{m-2}$  的数值加至触发器的输入端上之后, 触发器中上述那一半的状态就表示二进制数字量各位数字  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{m-1}$  的数值。

不难看出, 在循环码到二进码的转变过程中, 符合线路之一 ( $B_1$  或  $B_2$ ) 的输出端上的脉冲序列将代表二进制数字量的正码, 而另一符合线路输出端上的脉冲序列则代表它的反码。但根据前面的第一定律得知, 只有将循环码的所有各位数值实行不进位相加 [参阅式 (2)] 之后, 才能确定两输出端中哪一个给出二进制数字量的正码。为此, 装置中考虑接入两个延时线  $J3_1$  和  $J3_2$ , 其时延等于循环码数字量通过  $B_1$  和  $B_2$  所需的最大时间。这样, 只有等到触发器将输入数码的所有各位不进位地总加一次之后, 数字量才开始加至符合线路  $B_3$  和  $B_4$  的输入端上。

触发器总加一次之后的最终状态就代表  $a_0$  的数值, 若这状态和原始状态相反, 则  $a_0=1$ , 若和原始状态相同, 则  $a_0=0$ 。根据这种性能控制二进制数字量的输出: 由触发器使那个输出正码的符合线路开放, 而使输出反码的符合线路闭锁。最后, 正二进制数字量通过“或”线路  $P$  输出。

上述线路有一个缺点, 即它需按双拍工作。在第一拍中, 触发器实行不进位相加, 同时二进制数字量存入延时线; 在第二拍中, 触发器只用来控制两符合线路  $B_3$  和  $B_4$  的工作, 使二进制数字量通过其中一个符合线路而输出。为了提高工作速度, 可再用一个触发器  $T_2$ , 由它把触发器  $T_1$  实行不进位相加

后的最终状态记忆下来,如图6所示。等到循环码所有各位相加结束后,立即把记忆脉冲(И.З.)加至符合线路 $B_5$ 和 $B_6$ 上,同时触发器 $T_2$ 就按照当时 $T_1$ 的状态而定位,并去打开那个应当打开的符合线路( $B_3$ 或 $B_4$ )。二进制数字量经延时线延时后,接着就通过那个被打开的符合线路。这时触发器 $T_1$ 又可以开始对第二个循环码数字量进行不进位相加。

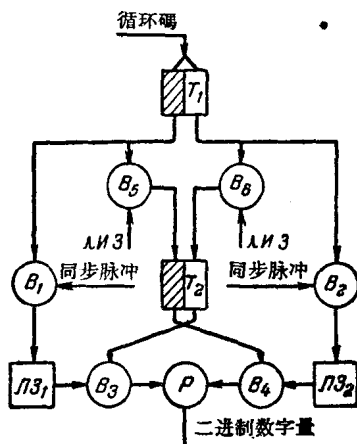


图6 将循环码改变为二进制数字量的高速变换装置的方框图

这种装置在 $N+1$ 个周期中能转换 $N$ 个数字量。而若用图5所示的线路来转换 $N$ 个数字量,就需要 $2N$ 个周期。

必须指出,按图5和图6线路所构成的装置,它们总是从最低位开始把二进制数字量逐位送入计算机的。这一点在很多场合极为重要,因为在串行式计算装置中,在输入二进制数字量的第一位数字后,立即就可开始数学运算。

阴极射线式电压转换器的光屏以及位移转换器的定码器采用循环编码,是解决非单值性问题的一般方法之一。近来,

还出现了另一些特殊的编码方法，采用这些编码方法亦可以消除转换的非单值性。例如，可以采用所谓“Lippel 码”<sup>[7]</sup>，它是一种特殊的二-十进制数码（十进制的每位数字均用四位二进制数字表示），编码时，每 4 位二进制数字中的各位的权量是改变的。文献[8]中介绍的方法亦能避免转换的非单值性，其方法如下：用 5 位二进制数字来表示 1 位十进制数字，同时，在表示某一个十进制数字的 5 位二进制数字中，每一个 1 的权不仅与它的位置有关，且亦与这位十进制数字的数值有关。最后还得说明，前述的适用于二进制计数制的循环码，亦可推广用于其他基数的计数制<sup>[10]</sup>。所有刚才列举的原则上能解决非单值性问题的一些编码方法，至今都没有广泛应用。

现再介绍一种消除转换非单值性的一般方法，即所谓逻辑读出法。这方法的实质，就是根据前一位（较低位）的数值来确定下一位数字。

图 7 是转换器的定码器的展开图，在这转换器中，用安置在不同位置（图中黑点所示）的读出元件进行逻辑读出。在大多数情况下，读出元件都按 V 形布置。所以此法有时称为 V 形读出法。

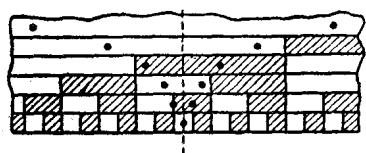


图 7 消除转换非单值性的 V 形读出法

最低位的数值由一个敏感元件读出。读取其余各位时，需用分置两处的两个敏感元件，它们彼此之间间隔开等于前一位数字的单位距离。

设图 7 所示的定码器中画有阴影的部分代表 1，不画阴影的部分代表 0。由哪一个敏感元件读出可按以下规律确定：若前一位数字的数值为 0，则应由位于中线（图中虚线）右边的敏感元件读取下一