

小值轴角编码器*

李海通

摘 要

本文提出一种轴角-交流-数字转换器——小值轴角编码器。它以电压比较式逐位编码原理为基础,采用小值编码和符号位编码组成一种全角变数字的编码方案。它的角测元件是三角波旋转变压器。因为三角波旋转变压器的特性是分段线性的,所以该编码器精度高,可靠性高,线路简单,成本低。

一、前 言

本文重点叙述小值轴角编码器的工作原理。但因三角波旋转变压器是一种新的自动控制元件,所以本文第一部分简要介绍三角波旋转变压器,第二部分介绍小值轴角编码器的工作原理。目前虽然轴角编码方法很多,但作者认为综合各项指标来看,小值轴角编码法是比较好的。

二、三角波旋转变压器

1. 三角波旋转变压器的组成和工作原理

三角波旋转变压器是适应数字技术的发展而出现的一种新的自动控制元件。它的构造和工作原理同正余弦旋转变压器相仿。它有两个定子绕组(或一个定子绕组和一个短路环)和两个转子绕组组成,如图1所示。图中 D_1D_2 和 D_3D_4 为定子绕组, Z_1Z_2 和 Z_3Z_4 为转子绕组。图2是三角波旋转变压器的转子绕组电压 u_1 和 u_2 的波形示意图。

三角波旋转变压器的工作原理与正余弦旋转变压器相似。定子绕组 D_1D_2 接400周的激磁电压 u_B 。为了减弱电机中横轴磁场的影响,将 D_3D_4 绕组短接。当三角波旋转变压器的转子沿逆时针方向转动时,两转子绕组分别产生一个400周载频的包络线为三角波的电压 u_1 和 u_2 ,并且 u_2 的包络线超前 u_1 的包络线 90° 。三角波旋转变压器的转角范围不受限制,其转子可沿正反两个方向旋转。三角波电压的周期为 $T = 2\pi$ 。可见三角波旋转变压器相当于正余弦旋转变压器的发送机,仅仅是转子绕组电压的波形不同。前者电压的包络线是三角波,后者是正余弦函数。因此,三角波旋转变压器也是一种把机械量变为电量的调制器。

* 本文修改稿于1980年12月17日收到。

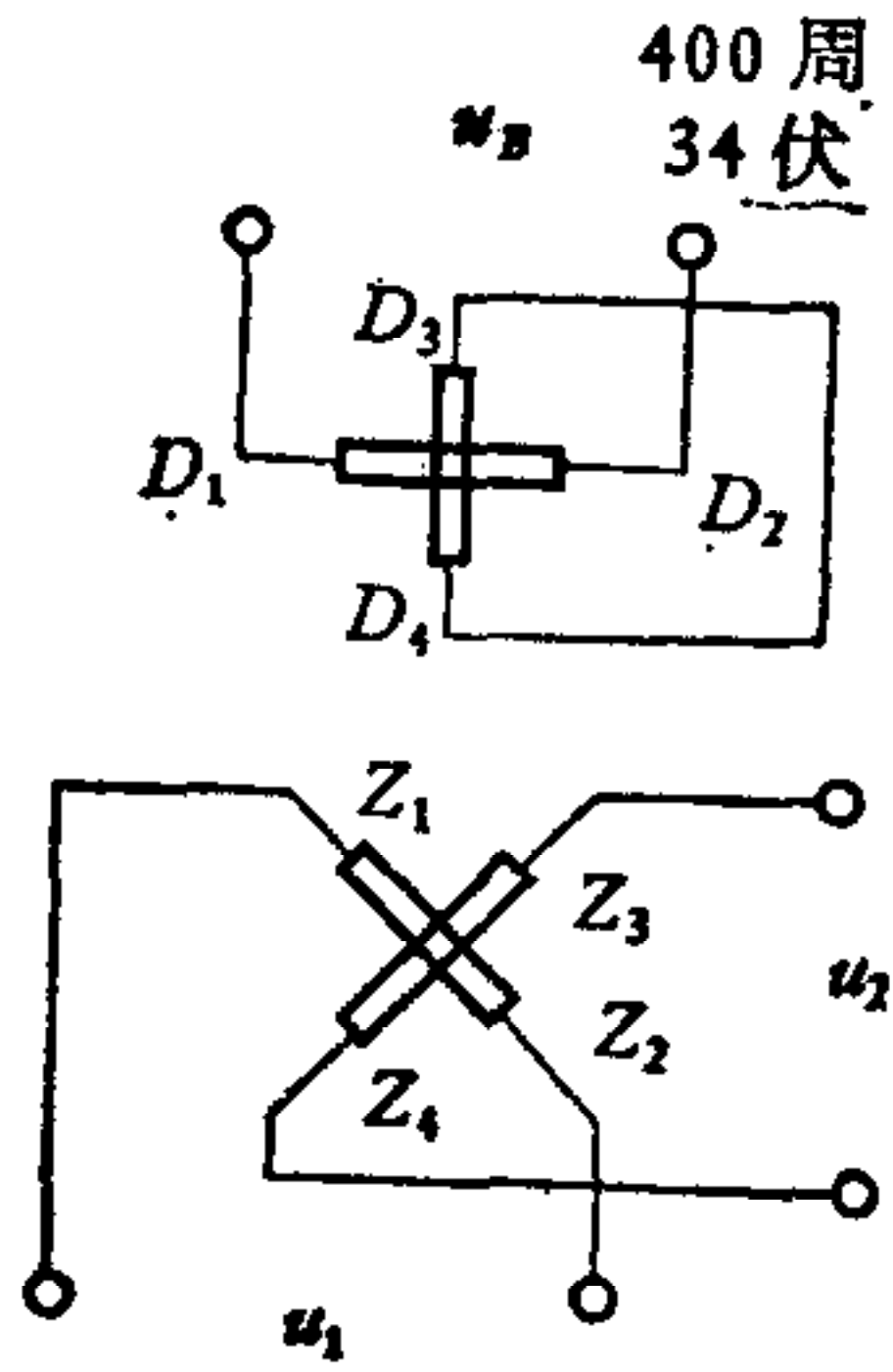


图 1 三角波旋转变压器示意图

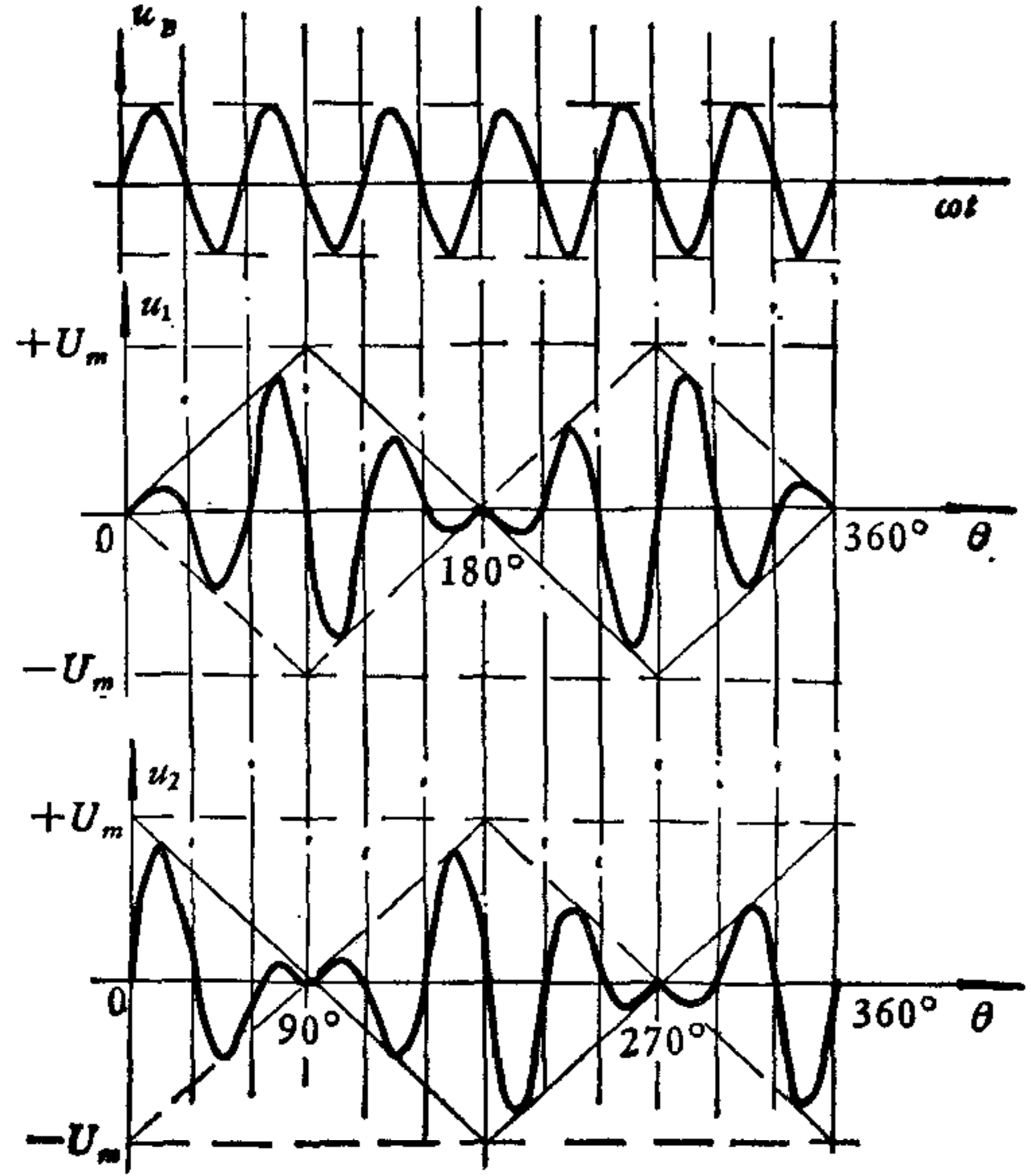


图 2 三角波旋转变压器电压 u_B, u_1, u_2 波形示意图

2. 三角波旋转变压器转子绕组电压的数学表达式

$$u_1 = f_1(\theta) = \begin{cases} u\theta \sin \omega t & (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \\ u(180^\circ - \theta) \sin \omega t & (90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \\ -u(\theta - 180^\circ) \sin \omega t & (180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ) \\ -u(360^\circ - \theta) \sin \omega t & (270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_2 = f_2(\theta) = \begin{cases} u(90^\circ - \theta) \sin \omega t & (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \\ -u(\theta - 90^\circ) \sin \omega t & (90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \\ -u(270^\circ - \theta) \sin \omega t & (180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ) \\ u(\theta - 270^\circ) \sin \omega t & (270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中 θ ——三角波旋转变压器转子转角；

$u = \frac{U_m}{90^\circ}$ ——三角波旋转变压器转子绕组电压斜率；

U_m ——三角波旋转变压器转子绕组电压最大值。

3. 对三角波旋转变压器的技术指标要求

- 1) 线性范围 $0^\circ \pm 46^\circ$ $180^\circ \pm 46^\circ$ (对 u_1)
 $90^\circ \pm 46^\circ$ $270^\circ \pm 46^\circ$ (对 u_2)
- 2) 线性精度 0级, 0.1%; I级, 0.2%; II级, 0.3%。
- 3) 其它要求同正余弦旋转变压器。

二、小值轴角编码器

1. 电压比较式逐位编码原理

图 3 是电压比较式逐位编码原理图。它可以把要编码的电压 V_x 转换成对应的数字

量 D 。图中 B_+ 和 B_- 是两个控制门。比较器输出端 3 为高电平时, B_+ 门打开, 脉冲通过正通道, 使 D 寄存器数码增加; 3 端为低电平时, B_- 门打开, B_+ 门被封死, 脉冲通过负通道, 使 D 寄存器数码减少。 V_x 为待编码的电压, V_{\bullet} 为基准电压, D 为寄存器中的数码。当 $V_x = V_{\bullet} = DV_{\bullet}$ 时, 编码系统处于平衡状态, D 不再增加, 此时 $D = V_x / V_{\bullet}$, 当 $V_x = V_{\bullet}$ 时, (通常 $V_x < V_{\bullet}$), $D = 1$ 。系统工作前, 先将 D 寄存器清零, 此时比较器 2 端为零电平, 由于被比较的电压总是负值, 故 $V_1 < V_2 = 0$ 。比较器 3 端在开始工作时总是高电平。编码结束后, 比较器 3 端为低电平。

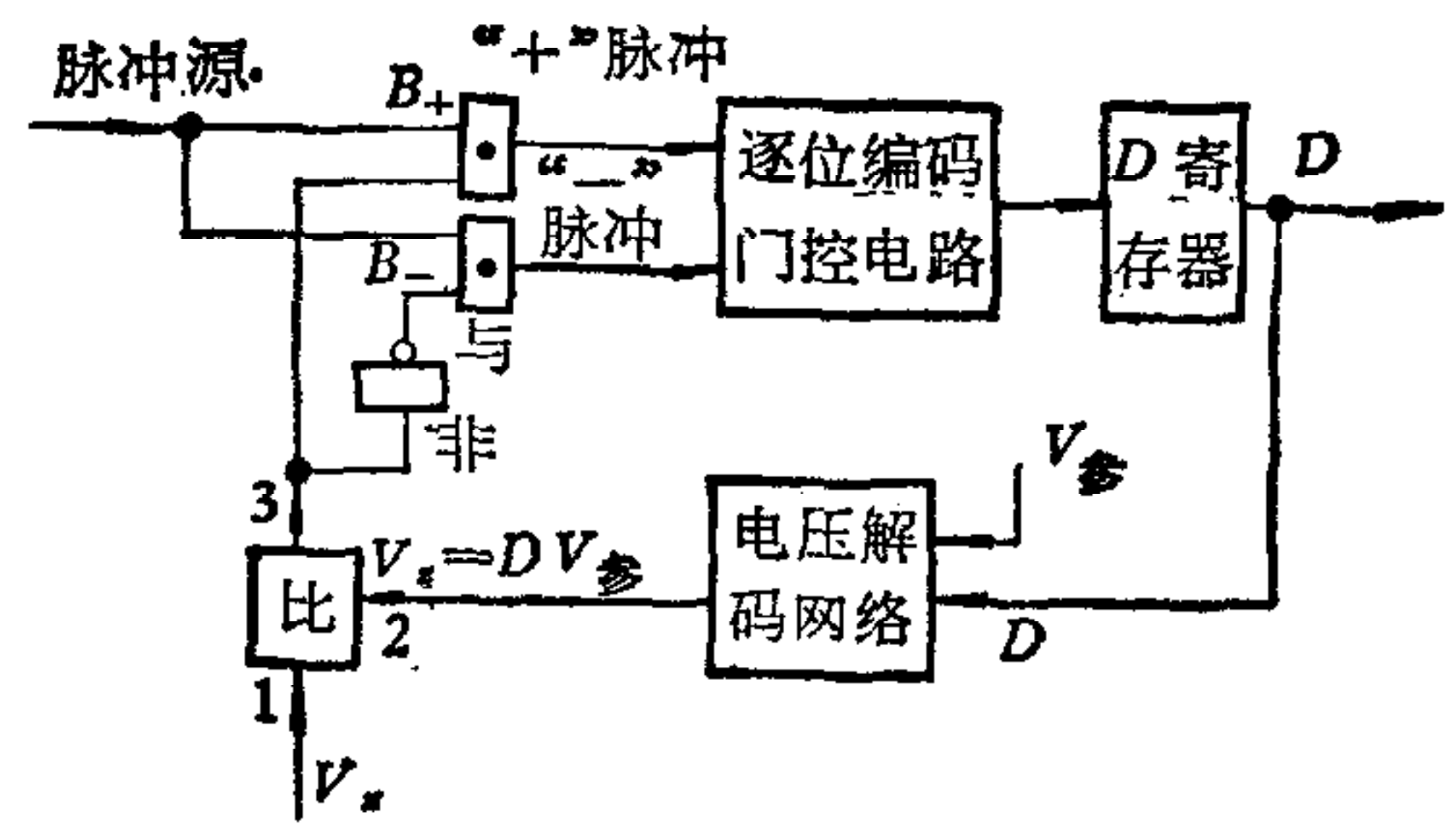


图 3 电压比较式逐位编码原理图

图 4 是图 3 的具体化, 它由 D 寄存器、比较器、逐位编码门控电路、脉冲控制门和电压解码网络组成。转换前先启动线路, 启动脉冲在将 D 寄存器清零的同时, 将移位寄存器的最高位 T_1 置“1”, 其余各位置“0”, 便成 1000000 状态(设图 4 中 $n = 7$)。使通向 D 寄存器第一位 D_1 的门 B_1 和 B'_1 打开, 第一拍节脉冲经由 B_+ 与 B_1 将 D_1 置“1”, 同时使移位寄存器右移一位(T_2 置 1), 成为 0100000 状态, 门 B_2 、 B'_2 和 B'_1 打开, 作好第二拍节脉冲引向 D 寄存器第二位 D_2 的准备。第二拍节脉冲将 D_2 置“1”, 同时使移位寄存器右移一位(T_3 置“1”), 成 0010000 状态。以下依次类推, 到第七拍节脉冲到来时 D_7 置“1”, 而移位寄存器成为 0000000 状态。编码完毕, 可从 D 寄存器中将数码取出。当第二个启动脉冲(即采样脉冲)到来时, 重复上述的过程。假设编码过程中, 第 i 个脉冲将 D_i 置“1”, 使得 $DV_{\bullet} > V_x$, 则比较器 3 端即变为低电平, 门 B_+ 被封死, 第 $i + 1$ 个脉冲经 B_- 门将 D_{i+1} 置“1”, 同时将其相邻的高位 D_i 置“0”, 使 D 寄存器中数码减少, 直到 $DV_{\bullet} = V_x$ 为止。

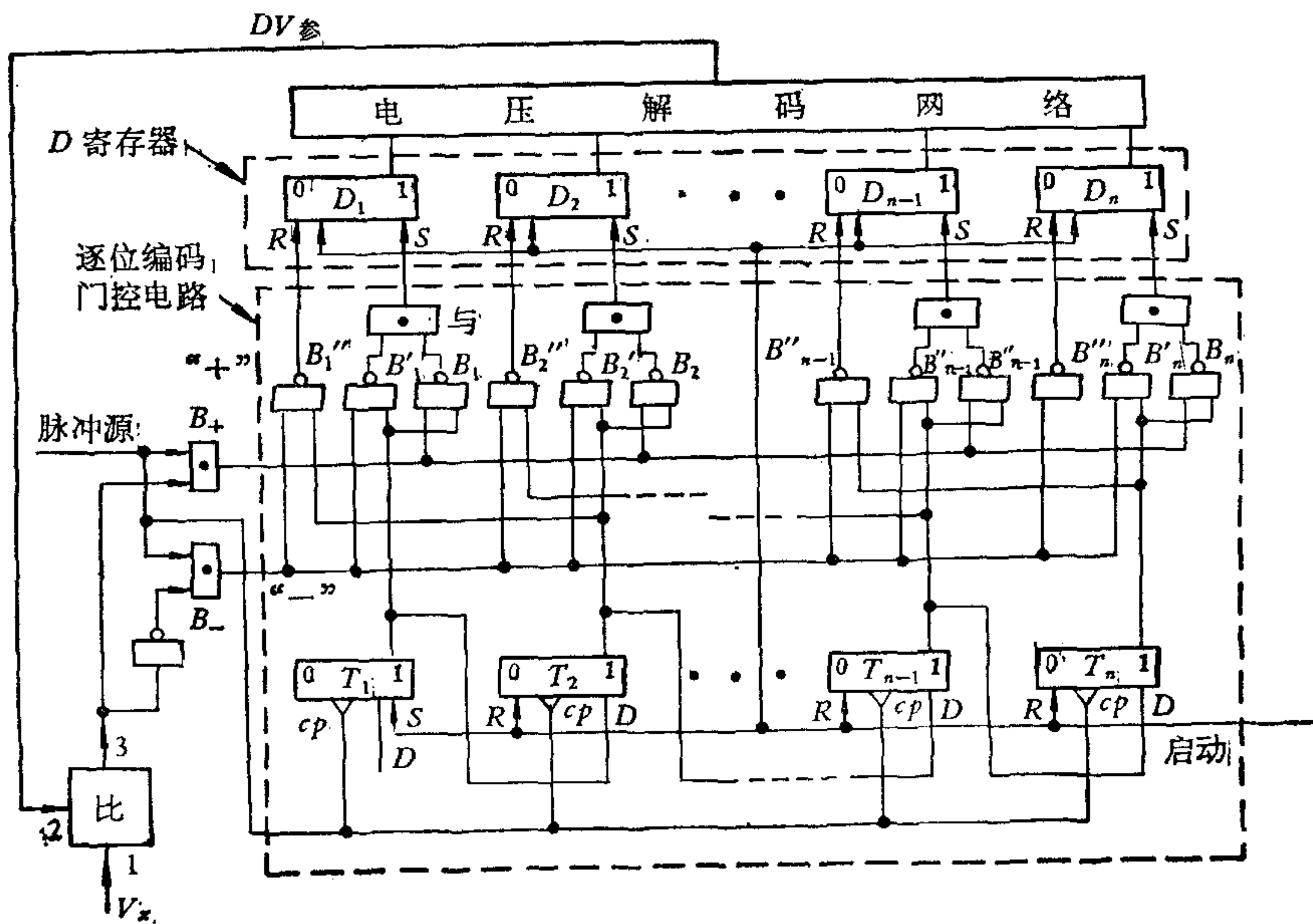


图 4 电压比较式逐位编码逻辑图

2. 小值轴角编码原理

在图 3 中, 我们用三角波旋转变压器的转子绕组电压 u_1 代替 V_x , 用基准电压 $U_m \sin \omega t$ 代替 V_s . 由电压比较式逐位编码原理知, 编码系统处于平衡状态时,

$$u_1 = DU_m \sin \omega t$$

$$D = \frac{u_1}{U_m \sin \omega t} \quad (3)$$

又因 $u_1 = u\theta \sin \omega t = U_m \frac{\theta}{90^\circ} \sin \omega t$

故

$$D = \frac{\theta}{90^\circ} \quad (4)$$

所以, 数字量 D 与角度 θ 成比例.

而 $D_{\max} = 1, \therefore \theta_{\max} = 90^\circ$

由此可见, 采用这种方法只能把小于 90° 的角度变为数字量. 表 1 列出了数字量 D 和角度 θ 的关系.

表 1 数字量 D 和角度 θ 的关系

θ	45°	22.5°	11.25°	5.6°	$2.8^\circ \dots$	$\frac{90^\circ}{2^n}$
D	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2^2}$	$\frac{1}{2^3}$	$\frac{1}{2^4}$	$\frac{1}{2^5}$	$\frac{1}{2^n}$

当角度大于 90° 时, 可利用三角波旋转变压器转子绕组电压 u_1 和 u_2 的电压符号在各象限中的不同, 组成两位符号位码, 再把符号位码变为二进制码.

由式 (1) 和 (2) 知, u_1 在一、二象限为正, 在三、四象限为负. 我们规定, 电压为正时, 符号位码为“0”; 电压为负时, 符号位码为“1”.

由图 2 可以看出, 在一、二象限中 u_1 为正, 其载波电压和基准电压 $U_m \sin \omega t$ 同相位;

在三、四象限 u_1 为负值, 其载波电压和基准电压反相位. 同理 u_2 的载波电压和基准电压在一、四象限同相位, 在二、三象限反相位. 据此可以得到 u_1 (符) 和 u_2 (符) 两位符号位码形成原理图, 如图 5 所示.

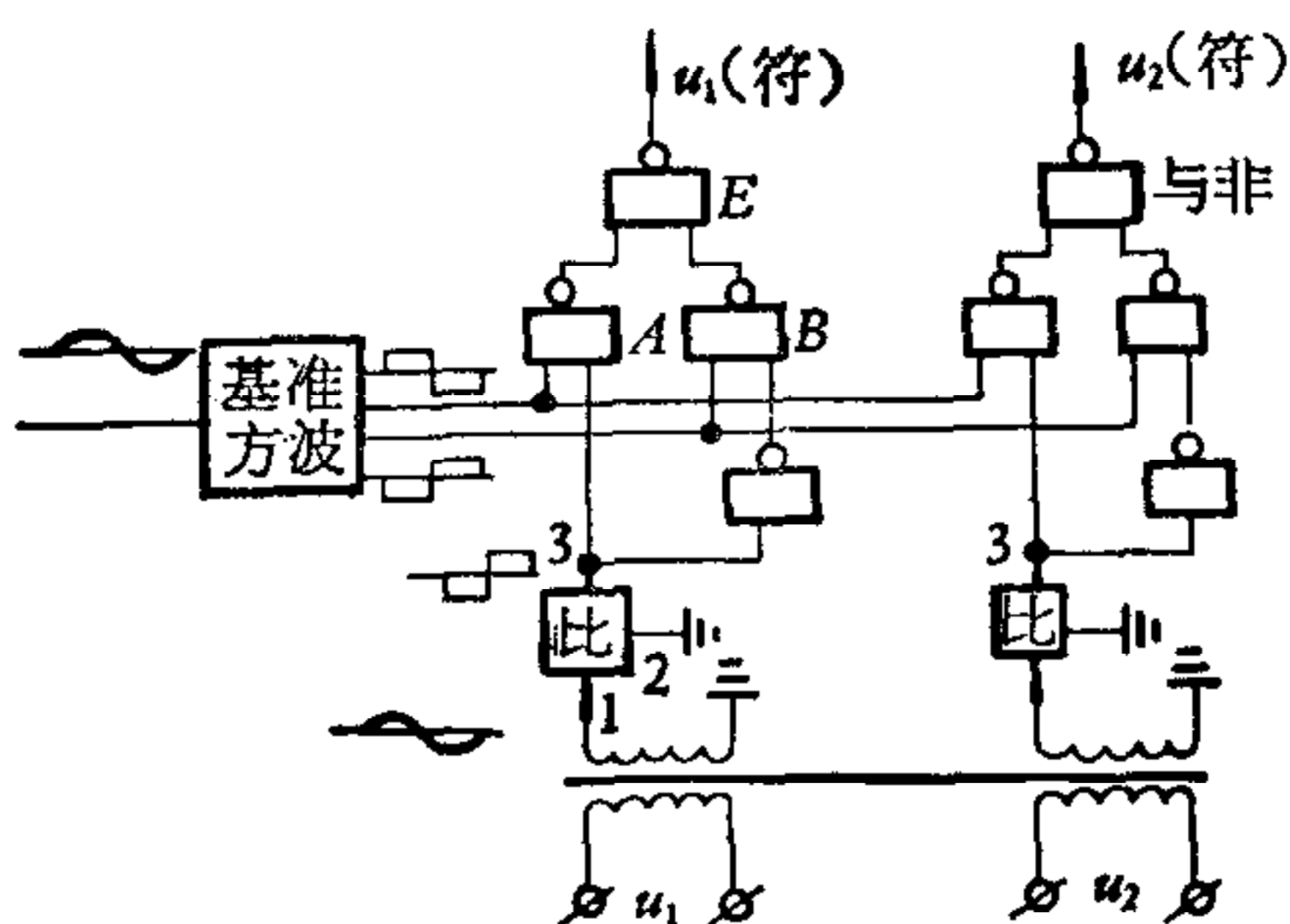


图 5 两位符号位码形成原理图

图 5 是两位符号位码形成原理图. 下面以 u_1 (符) 的形成为例说明符号位码的形成原理. 图中比较器的 2 端接地, 1 端接电压 u_1 , 3 端输出电压方波. 当转角 θ 在一、二象限时, u_1 的载波与基准电压同相, 由于比较器的反相作用使得与非门 A 和 B 在基准电压的正半周内得不到同时为正的输入信号, 因而门 A 和 B 均输出高电平, 从而使与非门 E 输出低电平. 故 θ 在一、二象限时, u_1 (符) 为“0”. 当转角 θ 在三、四象限时, 由于 u_1 的载波和基准电压反相位, 所以 E 门的输出为高电平, 即 u_1 (符) 为“1”. 符

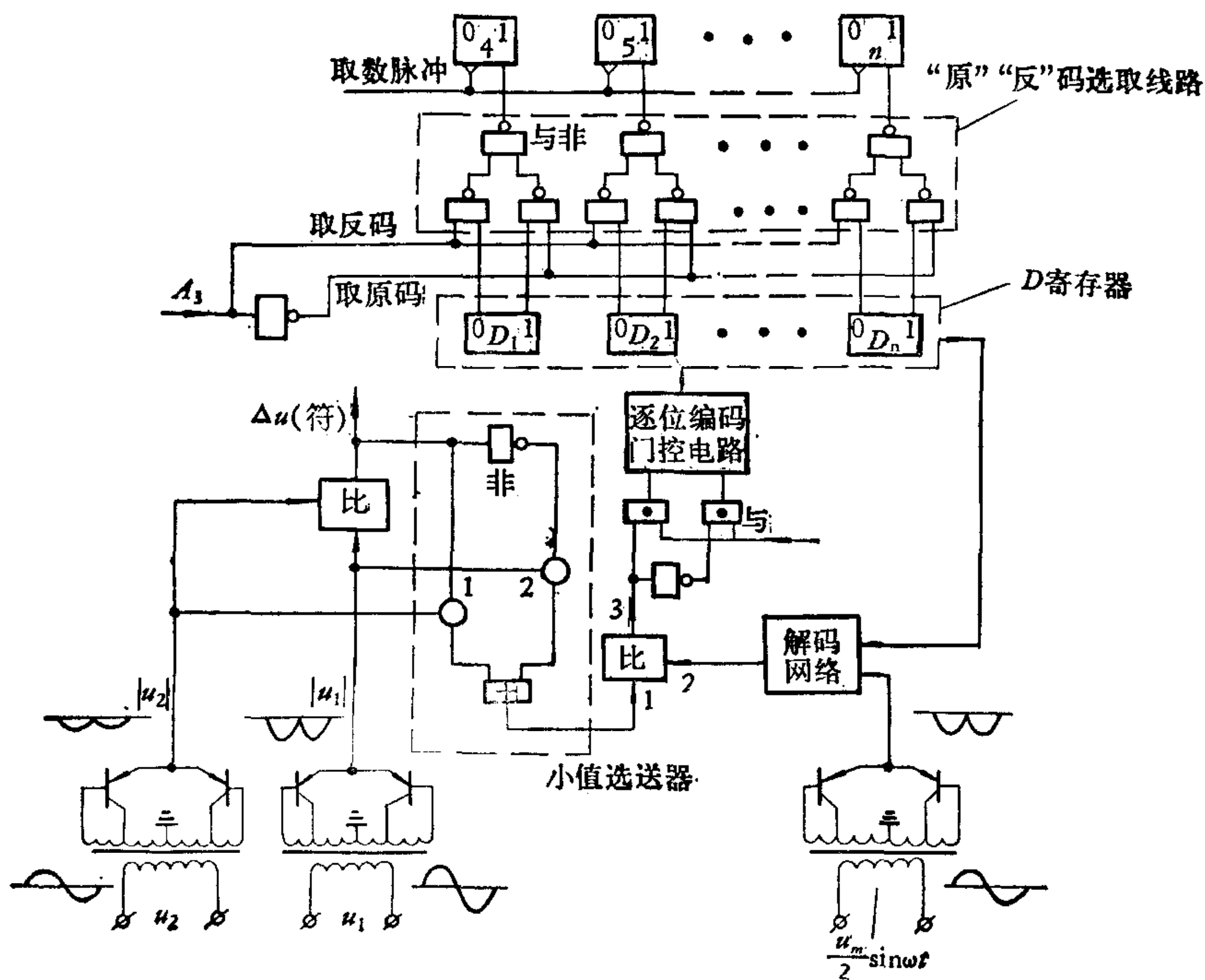


图6 符号位码 Δu (符)形成和带有小值选送器及“原”、“反”码选取线路的低位编码原理图

号位码 u_2 (符)的形成和 u_1 (符)相同。至此我们得到了两位符号位码。经过逻辑变换符号位码可变为二进制码,它和逐位编码得到的数字量组合为全角数字量。

由于比较器的差模电压范围、比较器的鉴别力、电压解码网络的参考电压的幅值等受到一定的限制,因而限制了低位编码的字长。为了提高编码的精度,减小量化误差,把低位编码限制在 45° 以内(实际上在 $\theta = 90^\circ \pm 20^\circ$, $\theta = 270^\circ \pm 20^\circ$ 的范围内, $u_1 = f_1(\theta)$ 很难做成线性的,所以把低位编码限制在 45° 以内是必须的。)当 θ 角大于 45° 时,用 $|u_2| - |u_1| = \Delta u$ 形成第三位符号位码。当 $\Delta u \leq 0$ 时, Δu (符) = “0”, $\Delta u > 0$ 时, Δu (符) = “1”。图6示出了 Δu (符)的形成原理。 $|u_1|$ 和 $|u_2|$ 是通过全波整流得到的,因为图中比较器采用负电压工作制,所以把 u_1 和 u_2 整流成负半波。至此,我们得到了三位符号位码 u_1 (符)、 u_2 (符)和 Δu (符),它们实际上是一种循环码,可以按照循环码和二进制码的关系转换成二进制码 A_1 、 A_2 和 A_3 。图7是符号位码和高位码转换关系代码挂限图。

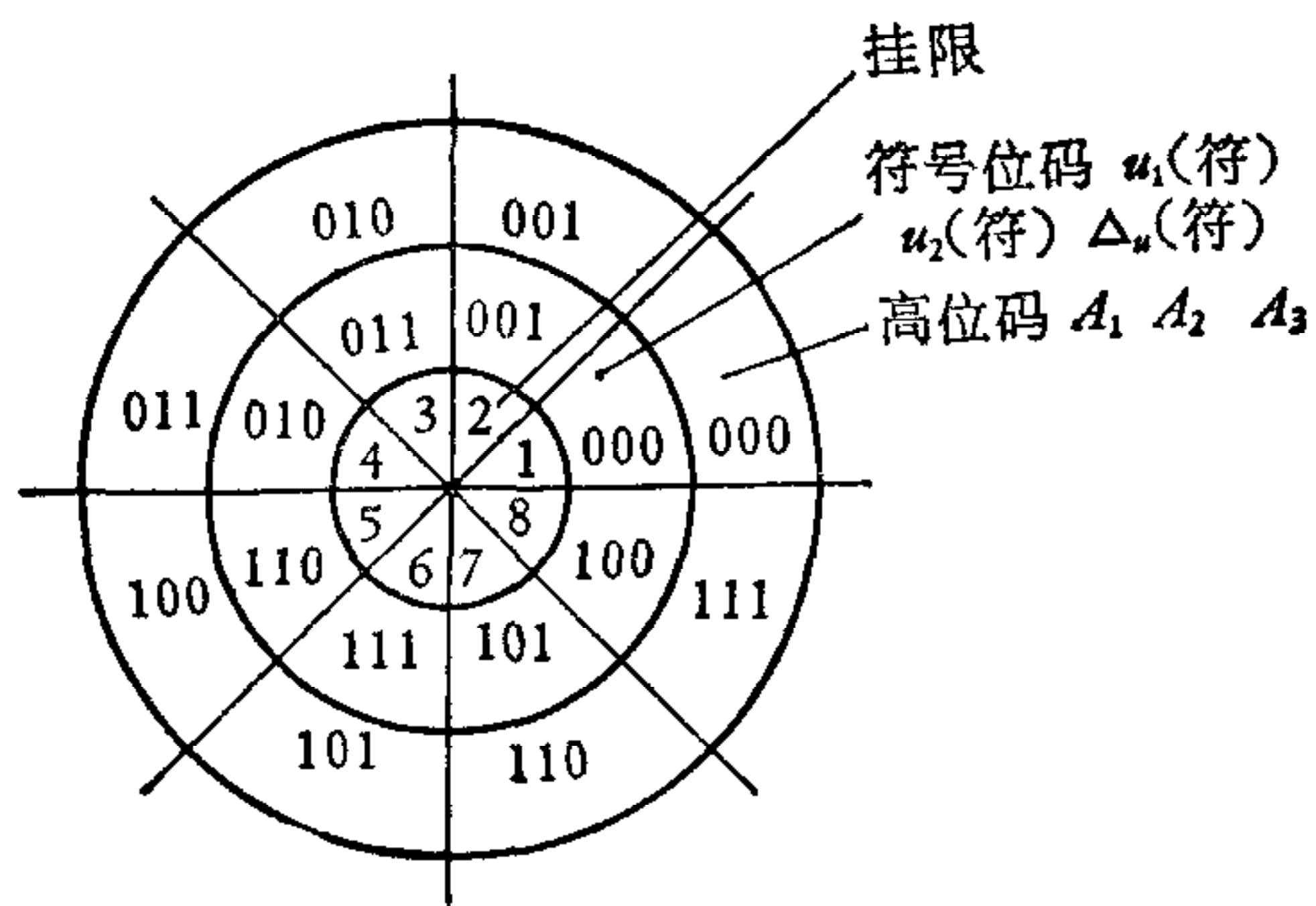


图7 代码挂限图

A_1 、 A_2 和 A_3 叫做高位码。 $A_1 = “1”$ 时,代表 180° ; $A_2 = “1”$ 时,代表 90° ; $A_3 = “1”$ 时,代表 45° 。逐位编码得到的数码叫做低位码。高位码和低位码组成全角数字量。当高位码和低位码全为“1”时,并且编码位数 n 足够大时,认为码值的总和为 1,它代表全角 360° 。

由于低位编码限制在 45° 以内，所以全角编码被分为八个挂限。在 1, 3, 5, 7 挂限中, $|u_2| > |u_1|$, 在 2, 4, 6, 8 挂限中, $|u_1| > |u_2|$. 因为我们选择 $V_{\bullet} = \frac{1}{2} U_m$, 所以在编码过程中始终应选 $|u_1|$ 和 $|u_2|$ 中较小的一个送入逐位编码比较器的 1 端, 因而应有一个小值选送器. 又因为 $|u_2|$ 随角度 θ 增加而减小, 所以低位编码在 2, 4, 6, 8 挂限应取反码. 在 1, 3, 5, 7 挂限应取原码, 故低位编码还应设有“原”、“反”码选取线路. 由图 7 可以看出, 高位码 A_3 在 1, 3, 5, 7 挂限中为“0”, 在 2, 4, 6, 8 挂限中为“1”, 所以高位码 A_3 可作为取“原”或“反”码控制信号. 图 6 绘出了小值选送器和“原”、“反”码选取线路的原理图.

因为这种编码始终是选取 $|u_1|$ 和 $|u_2|$ 中较小的一个进行编码, 所以这种编码器叫做小值轴角编码器.

在编码过程中, 由于 u_1 和 u_2 交替地采用, 所以要求 u_1 和 u_2 的最大绝对值相等. 实际上这一点是做不到的. 目前西安微电机所生产的三角波旋转变压器两转子绕组最大电压之差为 1%. 所以要提高编码精度, 应在转子绕组上串入无电感可调电位器, 并调至 u_1 和 u_2 最大值之差并不大于 0.1%.

图 8 是小值轴角编码器全角编码的原理方框图.

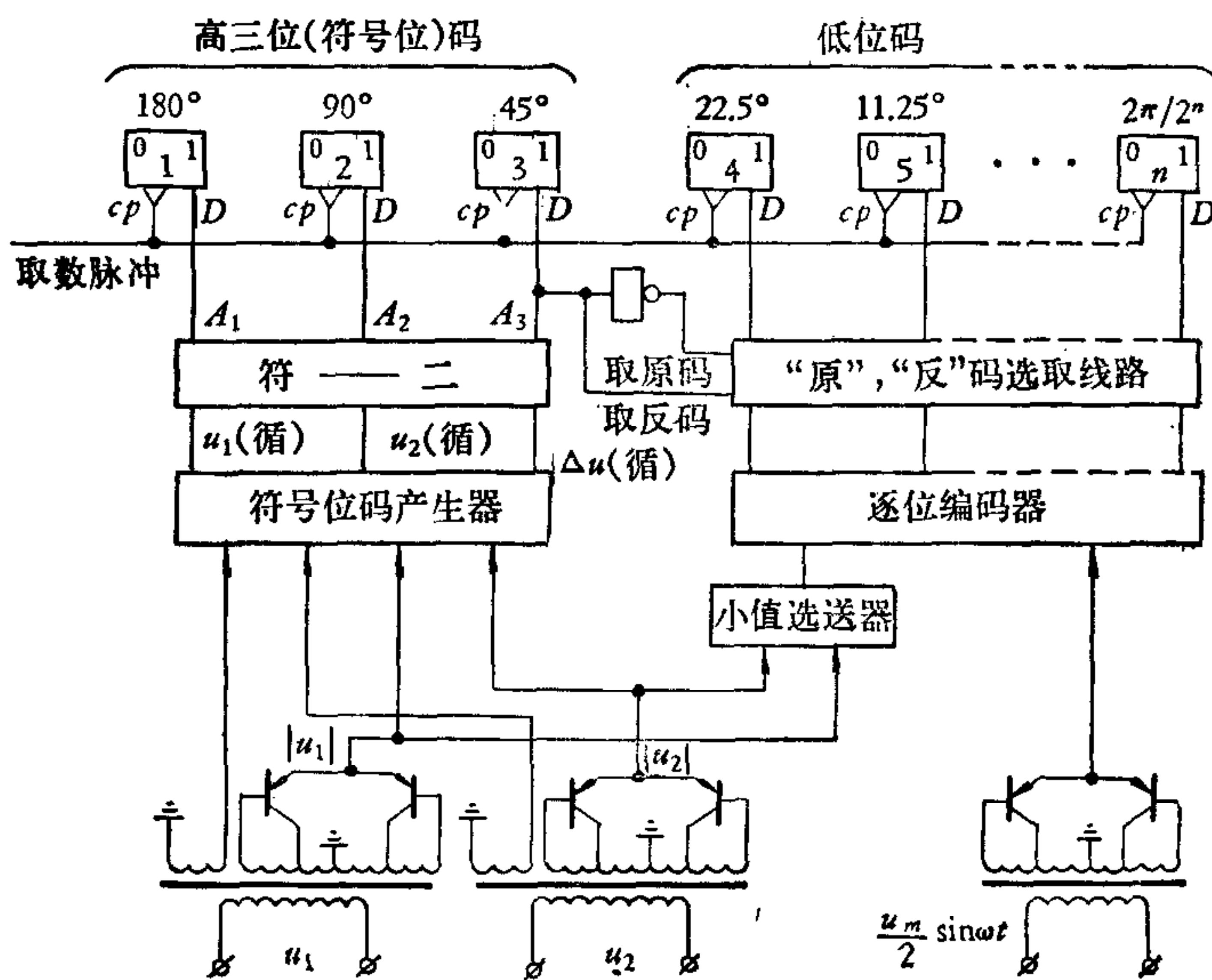


图 8 小值轴角编码器全角编码原理方框图

3. 采样时刻的选择

由于数字 D 和转角 θ 的关系式是 $D = \frac{\theta}{90^\circ}$, 所以在编码过程中, 对采样时刻的选择应无任何约束. 但因 $u_1 = f_1(\theta) \sin \omega t$, $u_2 = f_2(\theta) \sin \omega t$, $u_{\bullet} = \frac{1}{2} U_m \sin \omega t$, 其交流载波都是 $\sin \omega t$, 如果采样时刻选在 $\omega t = n\pi$ 的瞬间、($n = 0, 1, 2, \dots$) 编码是不能进行的. 因为这时 $u_1 = u_2 = u_{\bullet} = 0$, 比较器无从比较, 比较器 3 端的电平可能是错误的, 所以编码不能在交流电压穿过 0 轴的时刻进行. 另一方面电压过低不利于电路工作, 比较器有一定的灵敏限, 解码网络等的开关也有一定的压降, 故采样时刻应选在交流电压峰值附

近的一段时间内。

4. 小值轴角编码器的优点

1) 精度高: 小值轴角编码器采用三角波旋转变压器作测角元件, 电压和角度的关系是分段线性的, 可直接编出角度的数码, 不需要进行非线性运算, 因而精度高。其编码精度列于表 2 中。

表 2 小值轴角编码器的编码精度

三角波旋转变压器精度等级	0	I	II
单通道编码精度	13 bit	12 bit	11 bit
双通道编码精度(精粗比 32)	18 bit	17 bit	16 bit

2) 线路简单、编码速度快, 工作可靠, 成本低。

5. 小值轴角编码器的推广应用——小正弦轴角编码器

令 $u_1 = U_m \sin \theta \sin \omega t$, $u_2 = U_m \cos \theta \sin \omega t$, 则小值轴角编码器变为小正弦轴角编码器。由于其低位编码也被限制在 45° 以内, 而 45° 以内的正弦曲线接近于一条直线, 所以它的反正弦运算比较简单。同时克服了正弦轴角编码在 90° 附近由于电压变化缓慢而引起的精度降低。因而小正弦轴角编码器比正弦轴角编码器线路简单、精度高。

参 考 文 献

- [1] 戴世宗, 数字随动系统, 科学出版社 (1976 年).
 [2] A. A. 阿赫麦特扎诺夫著(白英彩译), 高精度同步随动系统, 国防工业出版社 (1966 年).

A SMALL VOLTAGE SHAFT ENCODER

LI HAITONG

Abstract

This paper presents a shaft angle to alternating current voltage to digit converter which is called the small-voltage shaft encoder. Based upon bit by bit coding of voltage comparison type it uses the small voltage code and the sign bit code to form a scheme of converting all-range angle to digit. The angular measuring element is a triangular wave rotary transformer. As the voltage characteristic of the rotary transformer is sectionally linear, therefore this coder has performance of high precision, high reliability, simple circuit and low cost.