

编码盘又称码器，是测量轴角位移最直接的方法之一。它具有很高的分辨率、精度和可靠性。编码器有两种类型：绝对式编码器和增量式编码器。增量式编码器需要一个计数系统，旋转的码盘通过敏感元件给出一系列脉冲，在计数器中对某个基数进行加或减，从而记录了旋转的角位移量。绝对式编码器不需要基数，它能在任意位置给出一个与位置相应的固定的数字码。

§ 3.8.1 绝对式编码器

工作原理 根据敏感元件的不同，绝对式编码器可分为接触式、磁电式和光电式等。这几种编码器的工作原理相同。本节以目前应用较广的光电式编码器为例进行介绍。

绝对式光电编码器是一种具有许多码道的可测角度信息的一种传感器，其工作原理如图

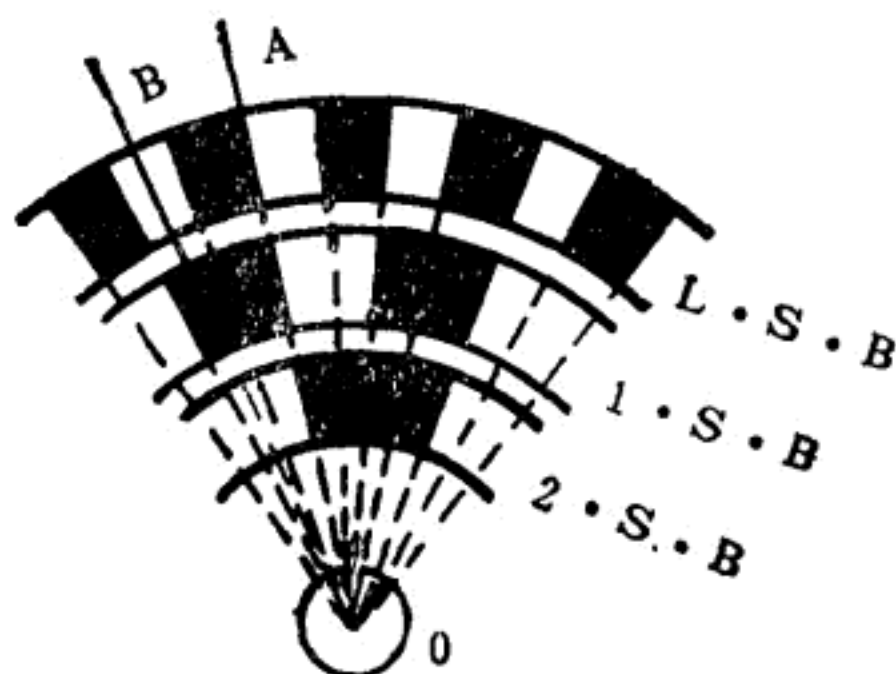


图 3.8.1 绝对式编码器原理图

3.8.1 所示。图中 $L.S.B$ 表示低数码道， $1.S.B$ 表示 1 数码道， $2.S.B$ 表示 2 数码道，其余依次类推；黑色部分表示高电平“1”，实用时可将这部分挖去，让光源透射过去，以便被接受元件转换为电脉冲；白色部分表示低电平“0”，实用中这部分遮断光源，以便使接受元件转换为低电平脉冲。在图中 $\overline{AO}$ 直线上，对应于每个数码道可分别设置一个光源，如发光二极管等。编码盘的转轴 O 可直接利用被测物的转轴，也可与被测物的转轴联轴同步。被测的角位移可由各个

码道上的二进制数来表示，如图中 $\overline{OB}$ 直线上的三个数码道所代表的二进制数码为“010”。而在直线 $\overline{OA}$ 位置上时，二进制数码就可能产生较大的误差。在低数码道 $L.S.B$ 时，这种误差仅为“1”与“0”之间的误差。而在高数码道时，就会出现较大的误差，如在数码道 $2.S.B$ 时，就有可能出现“000”、“111”、“110”等几种误差。这种现象称为错码，必须在编码盘设计中加以解决。

解决错码的方法有两种，一种是从编码技术着手，一种是从扫描方法上解决。

从编码技术上分析错码的原因可知，当由一个码变为另一个码，且只有一位码改变电平状态时，就可以避免错码。因此可以从改变编码方式来解决错码。循环码（格雷码）就是最常用的一种，它的两个相邻数的代码变化只有一位码改变状态，这就克服了二进制码经常出现同时改变一位以上的码的弊病。表 3.8.1 列出了十进制数、二进制码和循环码的对应关系。从表中可以清楚地看出上述特点。

但是由于循环码的每一位数不代表固定的十进制数，与人们的习惯上的十进制不同，因此采用循环码盘时，需要附加专门的转换电路。循环码与十进制数的关系为

$$D = +1 \sum_{j=0}^n 2^j - 1 \sum_{j=0}^m 2^j + 1 \sum_{j=0}^g 2^j - 1 \sum_{j=0}^s 2^j + \dots \quad (3.8-1)$$

表 3.8.1 十进制数、二进制码和循环码对照表

<i>D</i>	<i>B</i>	<i>G</i>
十进制数	二进制码	循环码
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

式中 n 代表具有“1”输出的最高位的位数； m 是其次一位具有“1”输出的位数； g 、 s 则依次类推。例如循环码1011所代表的十进制数为

$$D = +1(2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0) - 1(2^1 + 2^0) + 1 \times 2^0 = 2^3 + 2^2 + 2^0 = 13$$

按上述关系式可以设计出相应的转换电路。

解决错码的第二种方法是采用导前滞后法。这种方法配合相应的逻辑电路，也可以使误差减少到最低限度。

所谓导前滞后法，就是在最低数码道上设置一个光源，而其余的数码道上都设置两个光源，如图 3.8.2 所示。在低数码道上设置光源的位置为 $\overline{AO}$ 直线处。在 1.S.B 数码道上设置两个光源，它们的位置分别在 $\overline{BO}$ 与 $\overline{CO}$ 直线处。在 $\overline{BO}$ 直线上的光源为导前光源，在 $\overline{CO}$ 直线上的光源则为滞后光源。在 2.S.B 数码道上设置两个光源的位置，一个在 D 处，另一个图中未画出。设置光源位置的原则是：按 2^n 规律设置。 n 为整数。设 θ 为数码道 L.S.B 的节距所对应的角度，则 1.S.B 数码道的两个光源应分别在 1θ 、 2θ 处，让它们分别代表二进制数 2^0 及 2^1 ；而 2.S.B 数码道设置的两个光源位置应分别在 4θ 、 8θ 处，即让它们分别代表二进制数 2^2 及 2^3 。

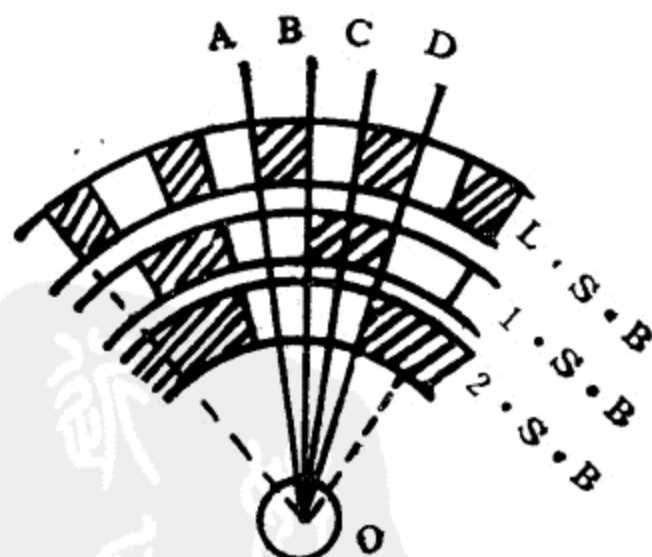


图 3.8.2 导前滞后法原理

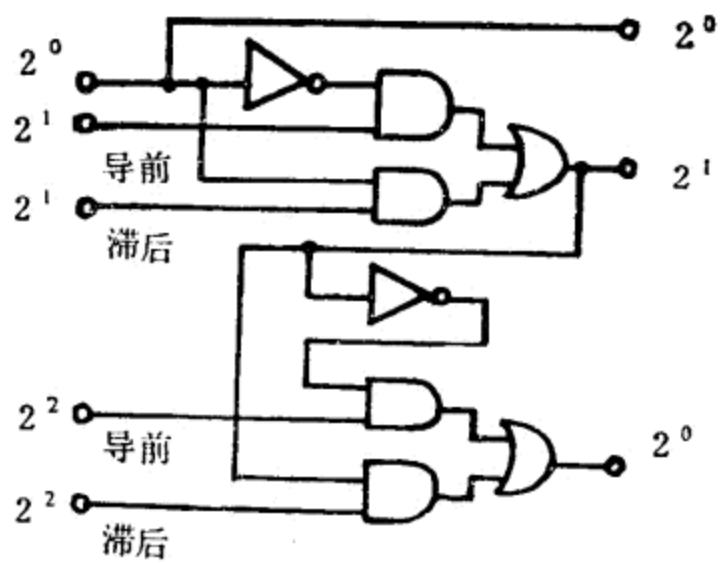


图 3.8.3 导前滞后逻辑电路

导前滞后法要配合图 3.8.3 的逻辑电路来判别。该逻辑为：当低数码道信号为高电平“1”时，则相邻的高数码道就应该以滞后光源的位置为基准。反之，当低数码道信号为低电平“0”时，则相邻高数码道就应该以导前光源位置为基准。根据上述法则，在图 3.8.2 中，当光源（可用光栏制成窄缝）在 $\overline{AO}$ 、 $\overline{BO}$ 、 $\overline{CO}$ 、 $\overline{DO}$ 四个位置时，得到的代码列于表 3.8.2 中。

从该例可见，误差仅出现在最低位数码道上，即高电平“1”处。如果读数为 N ，出现的相对误差仅为 $1/N$ 。 N 愈大，误差愈小。

表 3.8.2 导前滞后法的代码

光源位置 \ 代码	低数码道 $L.S.B$	$1.S.B$	$2.S.B$	代码
A	1	0(滞后)	0(导前)	001
B	0	1(导前)	0(滞后)	010
C	1	1(滞后)	0(滞后)	011
D	0	0(导前)	1(导前)	100

结 构 绝对式码盘的结构如图3.8.4所示。图中： A 为光敏元件； B 为刻有窄缝的光栏； C 为绝对式码盘； D 为光源，采用发光二极管。 E 为旋转轴。

主要性能 绝对式码盘的主要性能是指它的分辨率，即可以测得的最小角度值或 360° 的等分数。设码盘的码道数目为 n ，则它在码盘上的等分数为 2^n 。当 $n=20$ 时，则对应的最小角度单位为1.24秒。

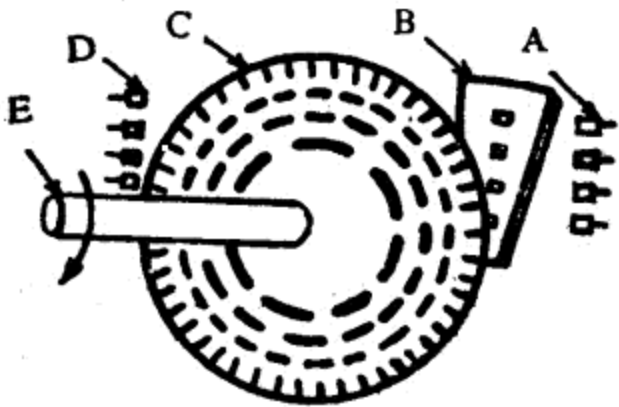


图 3.8.4 绝对式码盘结构图

绝对式码盘具有较强的抗干扰性能。它没有累计误差，也不需要判向装置。在一块码盘上不能测一转以上的绝对角度值。但是将两块码盘连接到齿轮副上构成多极码盘后，就能扩大测量范围。二块码盘可以采用同一个编码制，也可以两种编码制混合使用。后者常采用循环码作低位盘，二进制码作高位盘。

§ 3.8.2 增量式编码器

工作原理 增量式编码器又称脉冲式编码器，它由三部分构成，即检测头、脉冲编码盘及放大整形电路。检测头则由半导体发光二极管(LED)作光源，由3DU型硅光敏三极管作光电接收元件。砷化镓红外发光二极管，发光波长为 $9100\sim 9400\text{A}^\circ$ ，而3DU型硅光敏三极管的峰值波长为 $8600\sim 9000\text{A}^\circ$ 因而两者在波长上基本匹配，使接受效率较高，且响应速度

也快, 前后沿时间约为 $5 \sim 10 \mu\text{s}$ 。

光电检测头的检出方式, 有遮断型(透射型)和反射型两种。遮断型是将脉冲编码盘置于发光元件和受光元件之间。当码盘转动时, 检出光路时通时断, 形成光电脉冲。反射型是把发光元件和受光元件同置于码盘的一侧, 利用码盘本身反射或外加反射板反射, 检出光电脉冲。由于遮断型结构简单, 检出信号强, 所以常被采用。

脉冲码盘安装在脉冲编码器的转轴上, 处于检测头的发光元件和受光元件之间。当转轴旋转时, 由检测头中的受光元件检测出刻有齿槽的编码盘的角位移, 可得到两组相位相差 90° 的脉冲信号, 经放大整形后, 脉冲编码器可输出两路方波信号。利用这两个方波信号, 可辨向, 以实现可逆计数。也可外接电路进行倍频, 得二倍频信号或四倍频信号。

结 构 脉冲编码盘的结构如图3.8.5

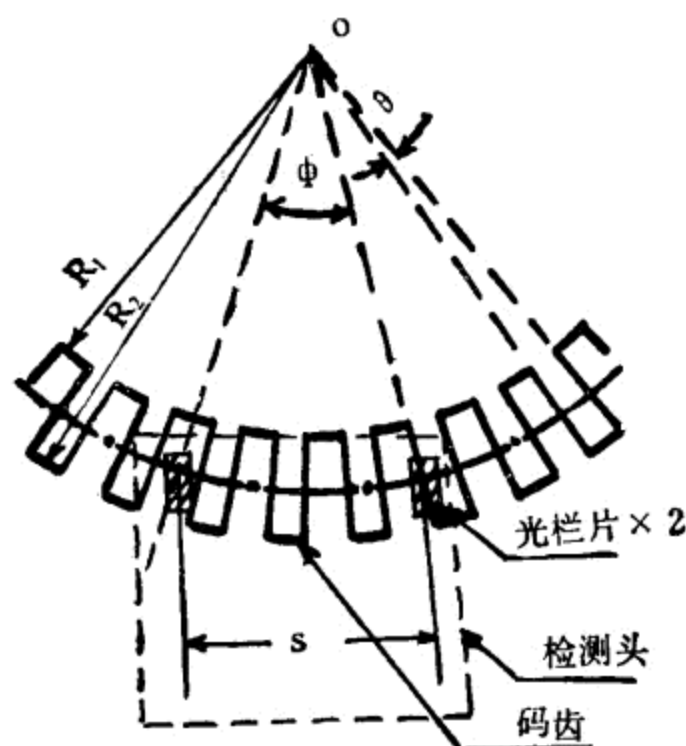


图 3.8.5 脉冲编码器

所示。它是一个刻有齿槽的金属薄片圆盘。图中 $R_1 = 27.5 \text{ mm}$, $R_2 = 20 \text{ mm}$, 码盘齿数 $Z = 36$, 齿间距对应的角度 $\theta = 5^\circ$, 两光栏片之间距离 $S = 12.87 \text{ mm}$, 对应的角度 $\varphi = 37.5^\circ$ 。左边光栏中的孔与右边光栏中的孔, 两者在相位上错开 $1/4$ 节距, 以便使两组发光元件和受光元件能检出相位相差 90° 的信号, 以便辨向。距离 S 所对应的角度 φ 可按下式设计

$$\varphi = (2n \pm \frac{1}{2}) \theta^\circ \quad (3.8-2)$$

式中 n 为整数, 根据码盘齿数多少可以任意设定。齿槽数目多时, n 可取大一些。反之, 取小些。如在图3.8.5中, 取 $n = 4$, $\theta = 5^\circ$,

则 $\varphi = (2 \times 4 - \frac{1}{2}) \times 5^\circ = 37.5^\circ$ 。

电 路 脉冲编码器中检测头所用的电路, 主要是发光二极管的驱动电路和光敏三极管的光电检测电路。在设计之前, 首先要考虑如下问题:

1. 合理使用发光、受光元件

由于发光二极管的发光强弱与流过它的正向电流 I_F 成正比, 因此供电电源采用恒流源较为合适。若采用恒压源供电, 则需串接限流电阻加以保护。应同时考虑到使用的最高温度对发光二极管的影响, 常取 $I_F = 10 \sim 30 \text{ mA}$ 。发光二极管随温度升高, 发光效率将下降, 这点在设计中应特别注意。

对于硅光敏三极管, 要考虑到暗电流 I_{ce0} 随温度的影响, 应选 I_{ce0} 小的管子。

2. 应避免干扰光的影响

外界光入射到硅光敏三极管上时, 会产生较大的干扰信号。因此, 需采用罩盖遮光措施。同时, 为了避免灰尘、油雾及水汽等影响, 最好采用密封结构。

3. 应根据使用寿命长短来合理设计电路

脉冲编码器的使用寿命, 取决于发光二极管、硅光敏三极管的合理使用与否。若设计合理, 使用寿命可达10万小时。

脉冲编码器常用的发光二极管驱动电路如图3.8.6所示。

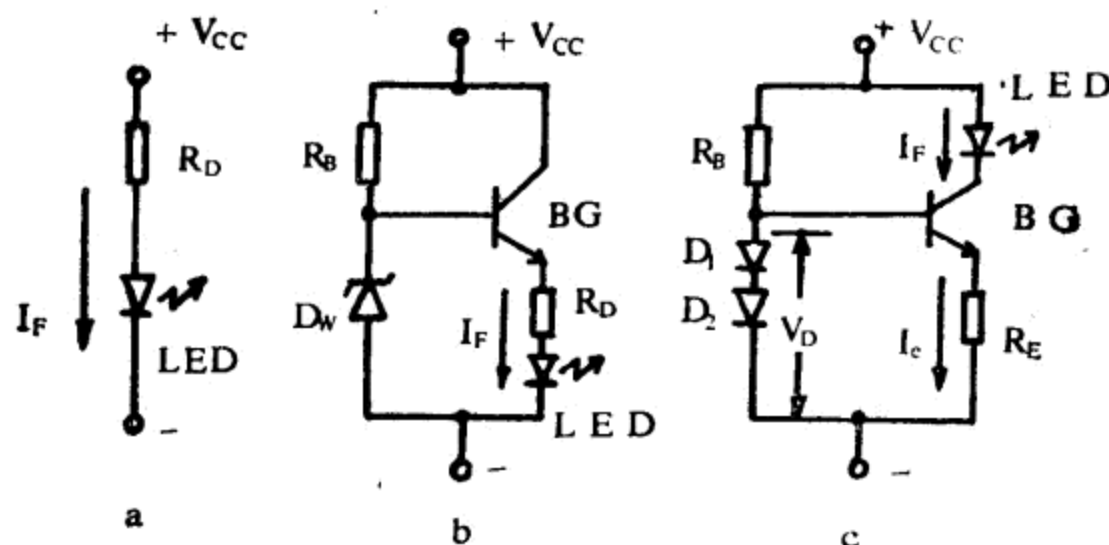


图 3.8.6 发光二极管驱动电路

图中(a)为常用的驱动电路, R_D 为发光二极管 LED 的串联电阻, V_{CC} 为电源电压。设 V_F 为发光二极管的正向压降, 则流过它的正向电流为

$$I_F = \frac{V_{CC} - V_F}{R_D} \quad (3.8-3)$$

设计时, 使 I_F 不超过 LED 的极限电流。一般应使 $V_{CC} > 2V_F$, 如 5GL 型砷化镓红外发光二极管的 $V_F \leq 1.3V$, 则 V_{CC} 应大于 2.6V。

在图3.8.6(b)中, 设稳压管 D_W 的工作电压为 V_W , 三极管的发射结压降为 V_{be} , 则流过 LED 的正向电流 I_F 为

$$I_F = \frac{V_W - V_{be} - V_F}{R_D} \quad (3.8-4)$$

式中 V_F 仍为 LED 的正向压降。

在图3.8.6(c)中, 两个硅二极管正向压降 $V_D = 1.4V$, 三极管的 $V_{be} = 0.7V$ 。因此发射极电流 $I_e = (V_D - V_{be}) / R_E$, 而 LED 的正向电流 I_F 为

$$I_F = \frac{V_D - V_{be}}{R_E(1 + \beta)} \quad (3.8-5)$$

式中 β 为三极管共射接法时的电流放大倍数。

脉冲编码器中光电变换检测电路如图3.8.7所示。图中 BG_1 把光信号变为电信号后,

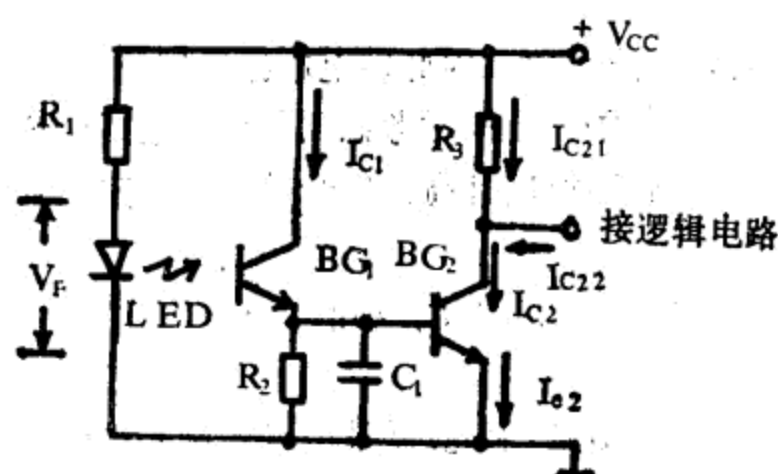


图 3.8.7 光电变换检测电路

由 BG_2 进行放大, 然后接入逻辑电路。选定电容 $C_1 = 0.022 \mu F$, 电源电压波动范围为 $V_{CC(min)} \sim V_{CC(max)}$, R_1 的值大小可按下式计算

$$R_1 \geq \frac{V_F [V_{CC(max)} - V_F]}{P_C} \quad (3.8-6)$$

式中 P_C 为发光二极管在工作温度为最大时的允许功耗。如 5GL 型砷化镓红外发光二极管的 $P_C = 100 mW$, $V_F = 1.3V$ 。

选取 R_3 数值的大小, 要考虑到抗噪声能力的大小。当 I_{e2} 小时 (即 R_3 大), 抗噪能力差。一般选取 $I_{e2} = 0.5 \sim 1 mA$, 这时 R_3 的数值可按下式确定

$$R_3 > \frac{V_{cc(max)}}{I_{c2}} \quad (3.8-7)$$

BG_2 的 β 值取80左右。为保证总输出电流 $I_{c2} = I_{c21} + I_{c22}$ 的最小值 $I_{c2(min)}$ 符合要求, 则 BG_2 的基极电流 I_{B2} 应为

$$I_{B2} > \frac{I_{c2(min)}}{\beta_{min}} = I_{B2(min)} \quad (3.8-8)$$

光敏三极管的暗电流 I_{ceo} 及 BG_2 的 I_{cbo} 大小, 可由产品给出的暗电流及温度特性, 根据环境工作温度的上限制来确定。

BG_2 的截止条件可由下式确定:

$$\frac{I_{ceo(max)} + I_{cbo(max)} + I_{c1(max)}}{N_{F(min)}} R_{2(max)} < V_{BE2(OFF)(min)} \quad (3.8-9)$$

式中 $N_{F(min)}$ 为光电变换器的信噪比(即受光时输出电流与遮光时输出电流的比值)的最小值。 $V_{BE2(OFF)(min)}$ 为 BG_2 截止时基射电压的最小值。在 BG_2 截止时, 允许 I_{c2} 达到一定数值, 而该值由下式确定:

$$V_{cc(min)} - R_{3(max)} \cdot I_{c2} > V_0 \quad (3.8-10)$$

V_0 为光电变换器连接到下一级电路时, 下一级电路高电平“H”临界电压的最小值。由式(3.8-10)决定的 I_{c2} , 在工作环境温度最大的条件下, 与 I_{c2} 相应的 BG_2 基射电压即为 $V_{BE2(OFF)(min)}$ 。

BG_2 的导通条件, 则由下式决定:

$$[I_{c1(min)} - I_{B2(min)}] \times R_{2(min)} > V_{BE2(ON)(max)} \quad (3.8-11)$$

式中 $I_{B2(min)}$ 为 BG_2 基极电流的最小值, 它由式(3.8-8)决定。而 $V_{BE2(ON)(max)}$ 为 BG_2 导通时, 在环境温度为最低条件下, 与 $I_{c2(min)}$ 对应时的 BG_2 基射电压。式中的 $I_{c1(min)}$, 是考虑到 LED 发光效率随使用时间的变化及工作环境灰尘的影响会使输出电流下降等因素, 通常应该选用为原设计输出电流初始值下限的 $1/2 \sim 1/3$ 。

脉冲编码器的突出优点是非接触式, 寿命长, 功耗小, 耐振动。可广泛应用于角度、距离、位置检测控制及速度、加速度、转速、流量等方面的测量与控制。由于它输出 A、B 两组相位相差 90° 的方波, 正转时 B 超前 A 90° , 反转时 A 超前 B 90° 。在进行位置测量时, 可利用正、反两路计数脉冲来辨向; 在转速测量时只用一组矩形脉冲即可。

要提高脉冲编码器的分辨率, 可采用细分法的基本原理。这种方法有零点基准法、振幅基准法、相位基准法及同步法等。下面仅介绍前两法。

零点基准法是目前较为广泛使用的一种简单方法。这种方法是把原始信号分成几个相当于细分当量的相位差的信号, 并检测该信号波形零点来获得细分脉冲。如图 3.8.8 所示, 它是具有辨向功能的四倍频电路。在图 3.8.8(b) 中, A 为传感器 A 所检出的正弦波, B 为传感器 B 所检出的余弦波, 两个传感器检出信号时位置相差 $1/4$ 节距, 以便辨向。A₁、B₁ 为输出脉冲, A₂ 为正向输出脉冲, B₂ 为反向输出脉冲。图 3.8.8(a) 中, M 为单稳, AND 为“与”门, OR 为“或”门。

零点基准法的关键是将 A 正弦波和 B 余弦波以适当的幅值比相加, 可得到下式所示的具有任意相位差 $\tan^{-1} K$ 的信号:

$$\sin(2\pi\theta)/s + K\cos(2\pi\theta)/s = \sqrt{1+K^2} [\sin(2\pi\theta)/s + \tan^{-1} K] \quad (3.8-12)$$

式中 s 为节距, K 为振幅比。例如, 当 $K=1$ 时, 可获得相位错开 $\pi/4$ ($1/8$ 节距) 的信号,

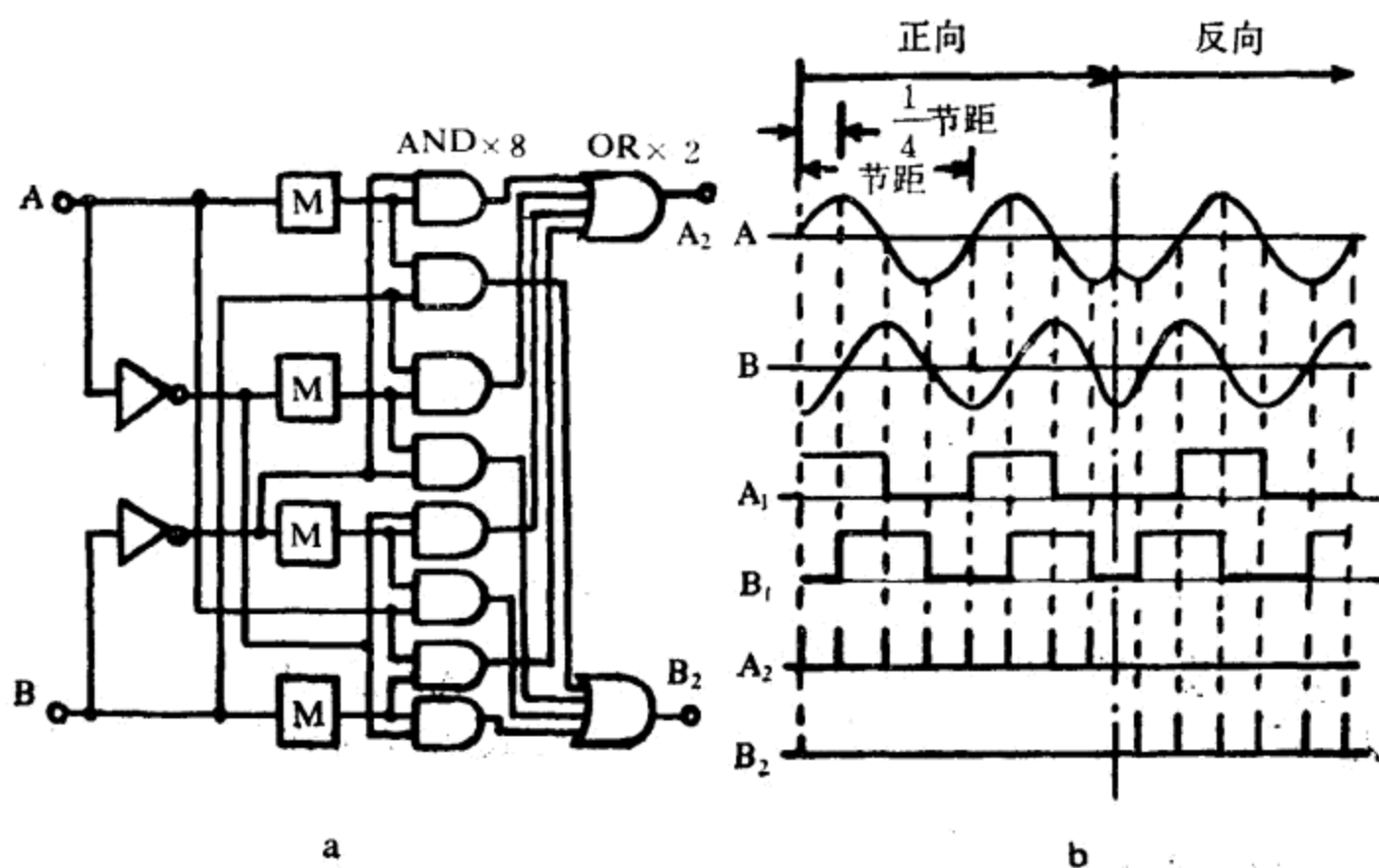


图 3.8.8 零点基准法

a. 零点基准内插法(四倍频、判向)逻辑电路 b. 波形图

因而可以进行 8 倍频。

所谓**振幅基准法**，就是当传感器输出为准确的正弦波时，可以预先选定对应于一个节距内等分值的电压模拟值。通过对基准电压与传感器输出的比较来确定细分位置。图 3.8.9 为

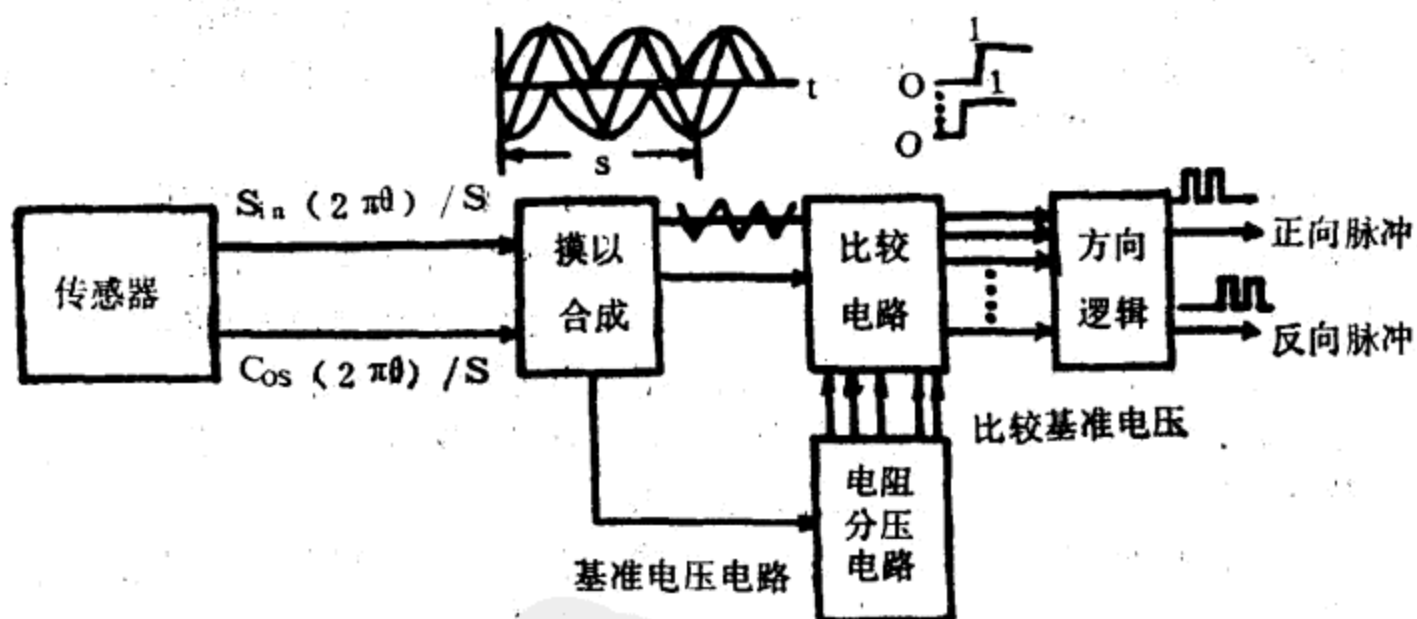


图 3.8.9 振幅基准细分法

振幅基准法细分方法的方框图。它将由两个传感器中取得准确的正弦波及余弦波，通过模拟合成电路转换成三角波。在比较器中，比较相当于合成三角波的对应于各等分细分点的基准电压值，按照不同电压比值输出“0”、“1”逻辑信号，再通过方向鉴别器及增量变换逻辑电路可获得 80 细分内插脉冲。

主要性能 国外目前脉冲编码器产品的主要性能见表 3.8.3。

表 3.8.3 国外的脉冲编码器主要性能

生产厂及产品型号 主要技术指标	西德海登海茵 ROD 426	日本小野测器 RP-432 Z	日本东京精机 RIT 5
脉冲数 (P/R)	50~5000	60~1024	40~500
电 源 (V)	5	5 或 12	5 或 12
最高频响 (kHz)	20	50	15
最高转速 (转/分)	12000	5000	6000
温度范围 (℃)	0~50或-30~+80	0~+50	0~+50
外形尺寸 (mm)	φ58×72	H 70×L88	φ55×40

国内目前编码器产品的主要技术性能指标见表 3.8.4。

表 3.8.4 国内目前编码器产品的主要性能

产 品 名 称 及 型 号	主 要 技 术 性 能 指 标
BM-250/1-6 增值型光电编码器	分辨率: 250 (输出相位差正弦波四个)
	最高转速: 4000 转/分
	每周一个零位码输出
	出轴直径: φ6 H6/h6
BM-180/0-5 增值型光电编码器	分辨率 180 (输出相位差 π/2方波)
	无零位码输出
	出轴直径 φ6 H6/h6
	最高转速 4000 转/分
	电源电压 5V·DC
11位绝对式光学轴角编码器	码型 “二”~“十”进制
	量程 0~400g(0~360°)
	理论分辨角 0.2g(≈648°)
	分辨角误差 ≤±40″
	启动力矩 ≤50gf·cm
21位光电轴角编码器	测角分辨率 0.618″
	精度 0.7″
	最大角速度 150°/s

续表

$GMB-\frac{1}{2}$ 型脉冲编码器	脉冲数 1~120 电源 5~15 V 最高频响 15 kHz 最高转速 10000转/分 温度范围 -10~+50℃ 外形尺寸 $\phi 74 \times 77$ mm
QDZ-A 增量光电编码器	输出脉冲 60~1000 输出波形 方波 最高转速 3000转/分 出轴直径 $\phi 4$ mm 外形尺寸 $\phi 36.5 \times 75$ mm
QDZ-B 增量光电编码器	输出脉冲 60~1800 输出波形 方波 最高转速 3000 转/分 出轴直径 $\phi 5$ mm 外形尺寸 $\phi 70 \times 64$ mm