



# 自动控制实践I

## 感应同步器

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

# 目 录

---

- 1 感应同步器的概述与结构
- 2 感应同步器的工作原理
- 3 感应同步器的信号处理
- 4 鉴相型数字编码装置
- 5 鉴幅型数显表
- 6 感应同步器的优缺点
- 7 感应同步器的使用注意事项

# 1.1 概述

- 感应同步器（Inducsyn），是利用电磁原理将线位移和角位移转换成电信号的一种装置。
- 高精度测量元件。
- **结构** 感应同步器分为固定部件和运动部件两部分，其上都有绕组。两部件的平面绕组面对面地放置，气隙为 $0.25 \pm 0.05\text{mm}$ 。



# 1.1 概述

- **工作原理** 同多级旋转变压器类似。在一个部件的绕组上通交流电压激磁，在另一个部件的绕组上产生感应电势，该电势的有效值与相互位置有关。
- **特点** 采用印制绕组，极数很多，可达几百、上千个。配上适当的信号处理电路可以达到很高的测量精度。激磁电压频率一般是1~20kHz，个别可达100kHz。



# 1.1 概述

## 感应同步器的种类

- 被测量性质  
直线和旋转感应同步器
- 极对数  
180, 360, 720, 1024, 2000
- 结构形式  
组装式和分装式
- 激磁方式  
单相和两相





# 1.1 概述

## 感应同步器的主要用途

作为测量元件：精密机床数字显示、数控机床闭环伺服、弹道制导、射击控制、雷达天线定位等高精度跟踪系统，应用广泛

## 感应同步器属于哪一类型测量元件？

- 角位移和线位移(被测量性质)
- 电磁式(工作原理)
- 结构型(结构划分)
- 模拟型、数字型(输出信号)



## 1.2 感应同步器的结构

### 直线式感应同步器

直线式感应同步器由定尺和滑尺两部分组成，滑尺比定尺短。

工作时定尺不动，滑尺沿着定尺方向移动

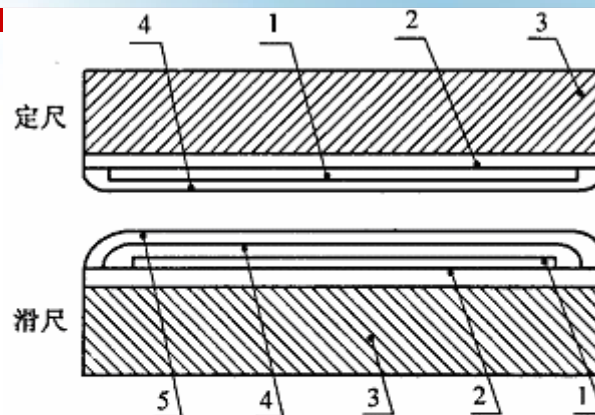
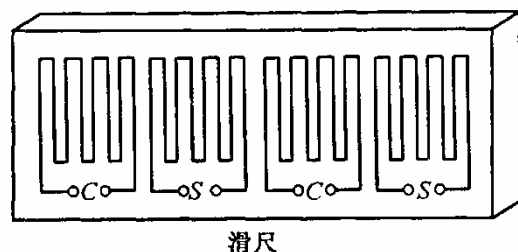
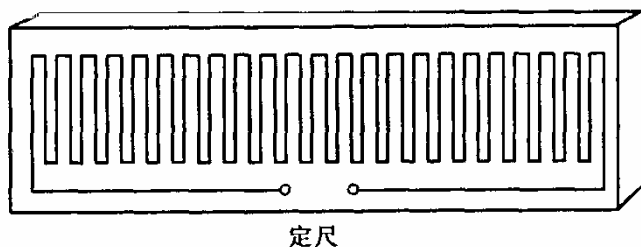
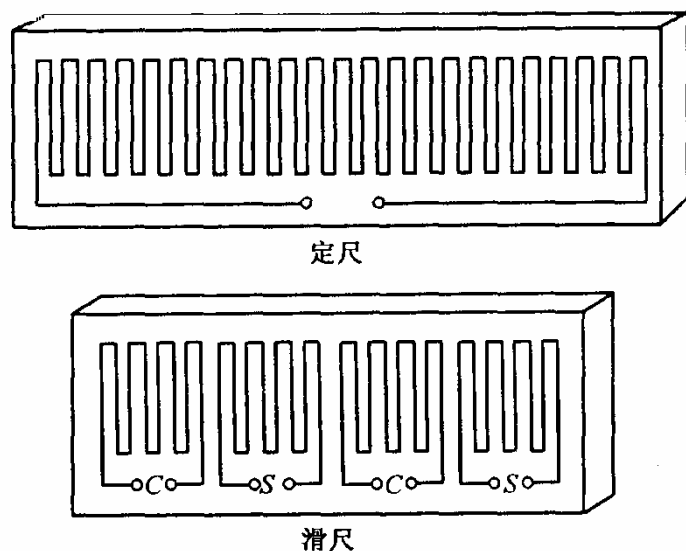


图 9-18 直线式感应同步器的结构  
1—铜箔 2—绝缘粘合剂 3—基板  
4—耐切削油防腐层 5—铝箔

感应同步器基板上覆有绝缘层，常用环氧树脂。在绝缘层上粘有一层紫铜箔，铜箔厚度为 $0.05-0.07\text{mm}$ ，利用照相腐蚀或其他方法制成印制绕组。有时在滑尺绕组上粘贴一层铝箔作为屏蔽层以防静电感应，在定尺表面喷涂一层绝缘漆以保护尺面。

## 1.2 感应同步器的结构



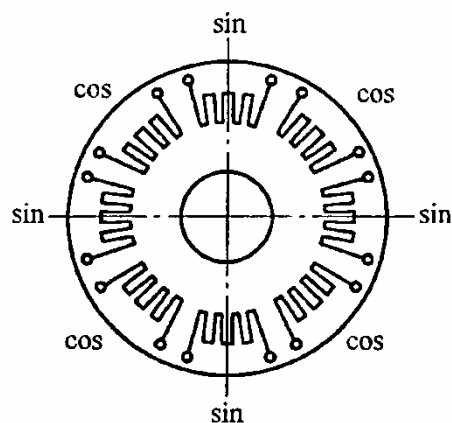
- 基板厚度为10mm。目前高精度感应同步器多采用非铁磁材料作基板，如采用铝基材料、玻璃等，这些材料没有铁磁物质，可以减小误差和提高精度。
- **绕组**：定尺绕组是连续的单相绕组，滑尺绕组是分段绕组，按所处的磁场位置分为正弦绕组s和余弦绕组c，**交替排列**，各自串联形成正弦和余弦两相绕组。



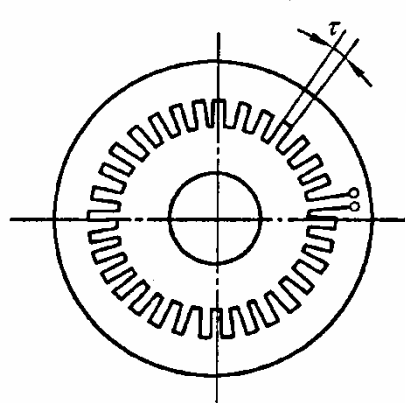
# 1.2 感应同步器的结构

## 旋转式感应同步器

○ 旋转式感应同步器由定子和转子组成。



(a) 定子



(b) 转子

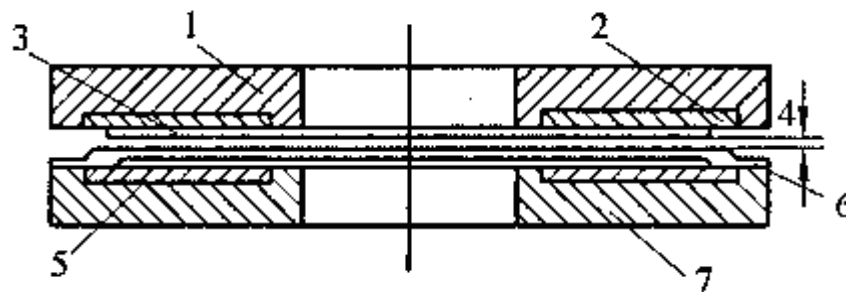


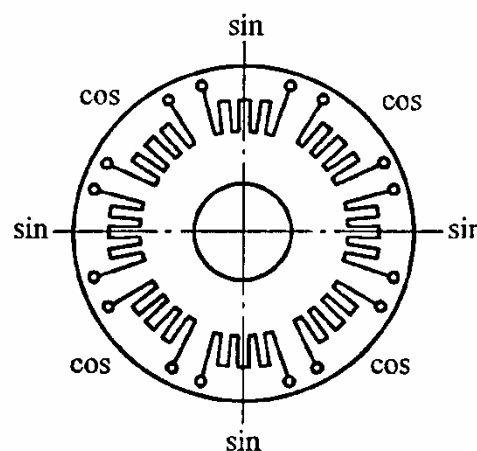
图 9-20 旋转式感应同步器的结构

1- 定子基板 2- 绝缘粘合剂 3- 定子绕组  
4- 气隙 5- 转子绕组 6- 屏蔽膜 7- 转子基板

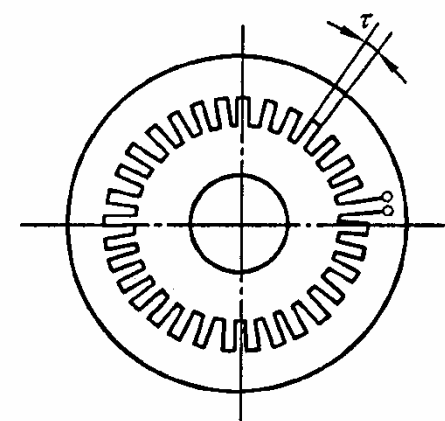
## 1.2 感应同步器的结构

### 旋转式感应同步器

- 旋转式感应同步器绕组是由辐射状的导片组成。转子上的绕组是单相连续绕组，其径向导片数也是极数。



(a) 定子



(b) 转子

- 定子绕组是分段绕组，分为正弦和余弦两大组，交替排列，各自串联形成两相绕组。
- 旋转式感应同步器的直径做得越大，越容易做得准确，精度越高。

## 2.1 直线式感应同步器工作原理

### 一 直线式感应同步器工作原理

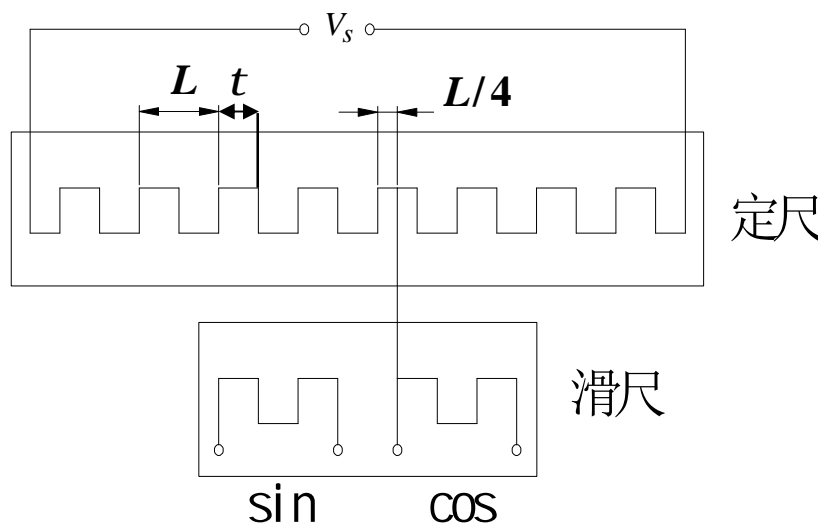
感应同步器是利用励磁绕组与感应绕组间发生相对位移时，由于电磁耦合的变化，感应绕组中的感应电压随位移的变化而变化，借以进行位移量的测量。

感应同步器定尺上的绕组是励磁绕组，滑尺上的绕组是感应绕组

定尺固定在床身上，滑尺则安装在机床的移动部件上。通过对感应电压的测量，可以精确地测量出位移量。

## 2.1 直线式感应同步器工作原理

### 一 直线式感应同步器工作原理



极距  $\tau$  相邻金属导片中心线的距离

节距  $L$   $L=2\tau$ ，也称检测周期

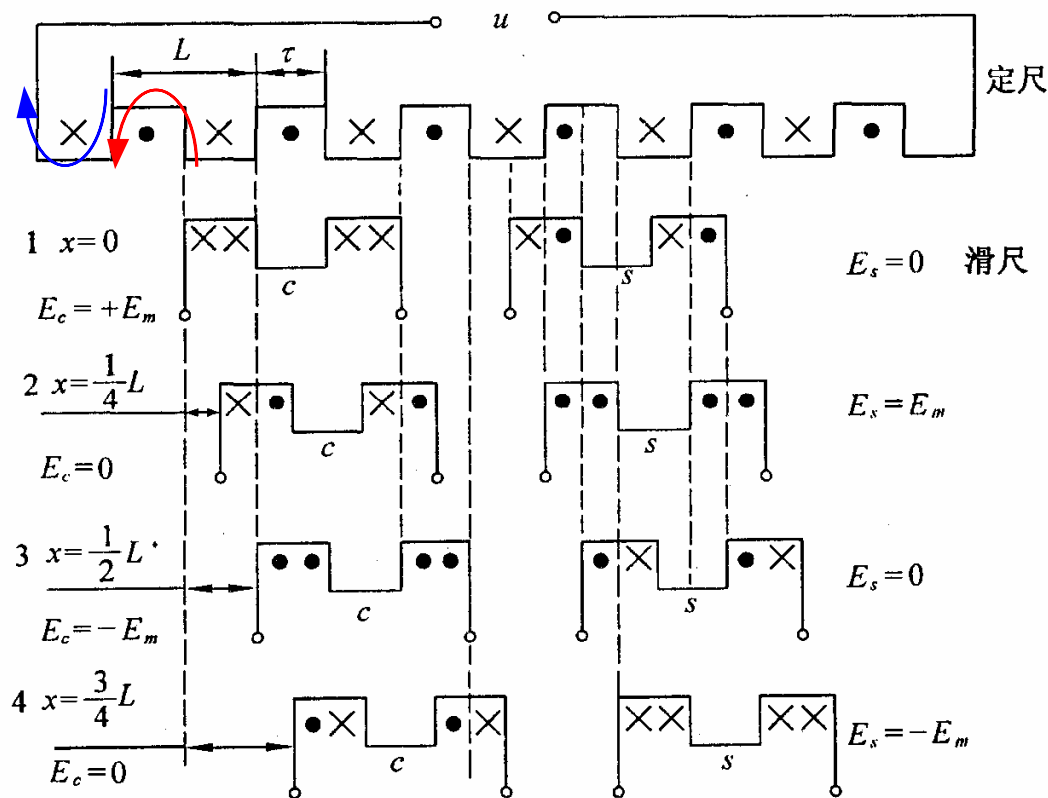
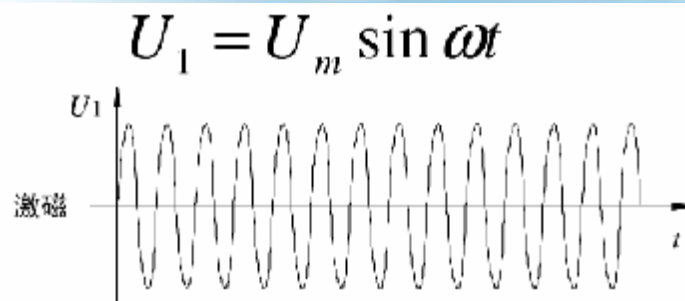
相邻正弦绕组s和余弦绕组c相距  
 $(K \pm 1/4)L = (n/2 + 1/4)L$   
其中  $n$  和  $K$  为正整数

## 2.1 直线式感应同步器工作原理

○定尺绕组通1-10kHz交流电激磁，产生一个多极的脉振磁场，

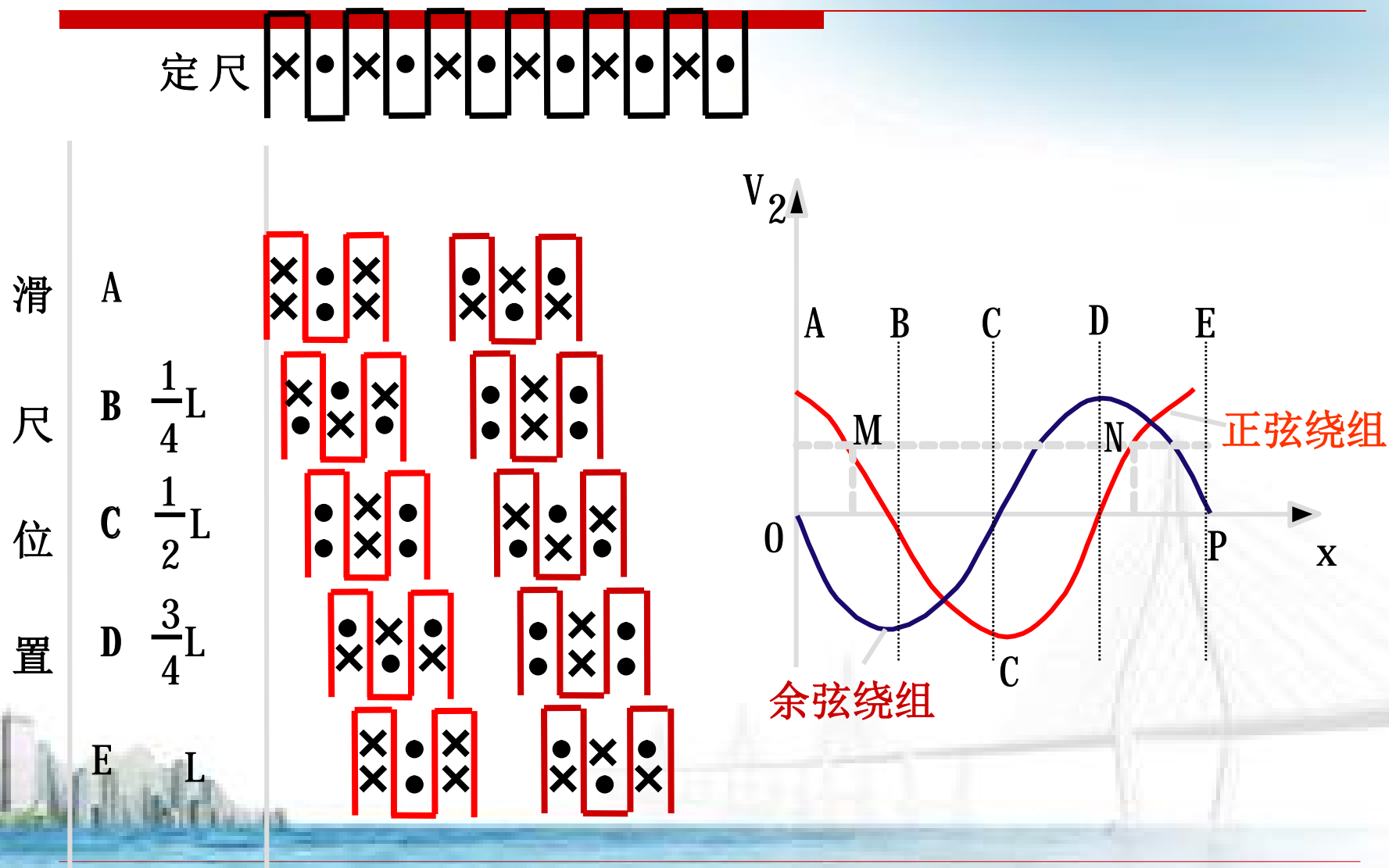
○磁极之间的距离是 $\tau$ ，磁场分布周期是节距 $L$ 。

○脉振磁场在滑尺绕组上产生感应电势，有效值随滑尺位移作周期性变化，周期为节距 $L$ 。

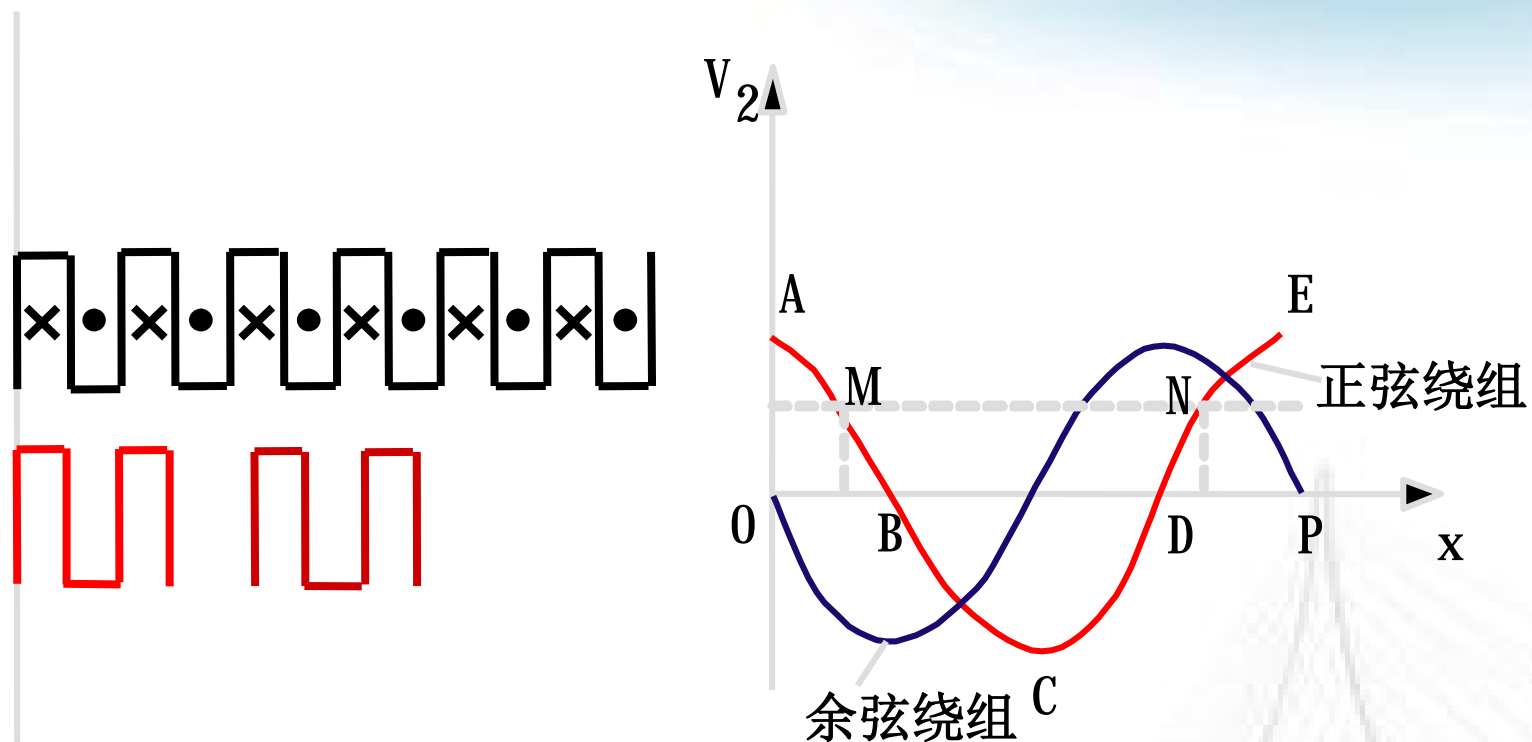




## 2.1 直线式感应同步器工作原理



## 2.1 直线式感应同步器工作原理

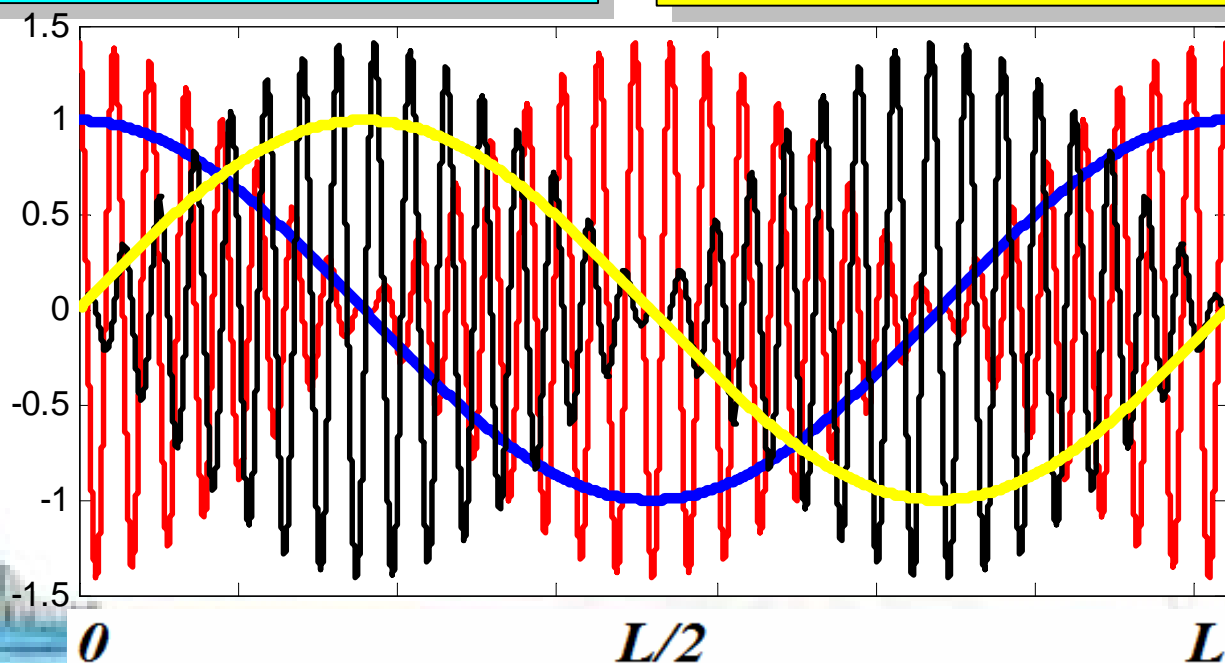


## 2.1 直线式感应同步器工作原理

- 有效值 输出电势分解为基波和一系列谐波之和，其中谐波很小，所以输出电势可用基波分量表示。由于周期为 $L$ ，所以正弦绕组s和余弦绕组c中的感应电势有效值如下所示。其中 $E_m$ 为感应电势的最大有效值， $\theta_e = 2\pi x/L$ 称为电角。

$$E_c = E_m \cos \frac{2\pi}{L} x = E_m \cos \frac{\pi}{t} x$$

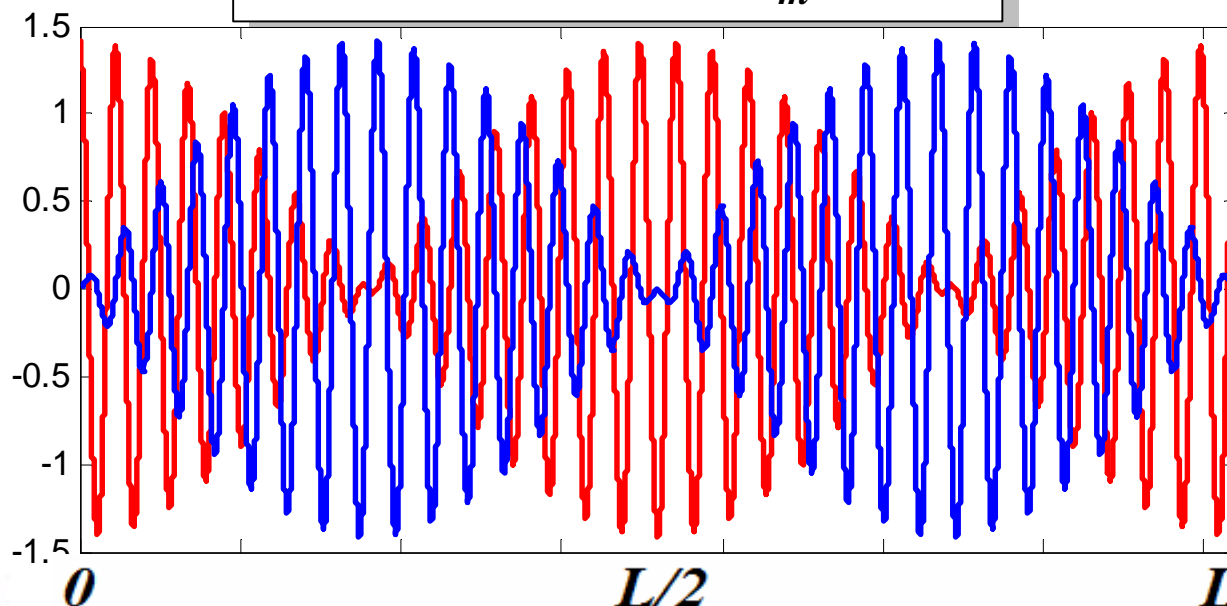
$$E_s = E_m \sin \frac{2p}{L} x = E_m \sin \frac{p}{t} x$$



## 2.1 直线式感应同步器工作原理

- **瞬时值** 绕组的感抗远小于电阻，选择适当的正方向后，可认为感应电势领先激磁电压 $90^\circ$ 。 $u$ 为激磁电压， $e_s$ 和 $e_c$ 分别为正弦绕组和余弦绕组输出电压的瞬时值。

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$



$$e_c = \sqrt{2}E_m \cos \frac{2\pi}{L} x \cos \omega t$$

$$e_s = \sqrt{2}E_m \sin \frac{2\pi}{L} x \cos \omega t$$

## 2.2 旋转式感应同步器工作原理

### 二 旋转式感应同步器工作原理

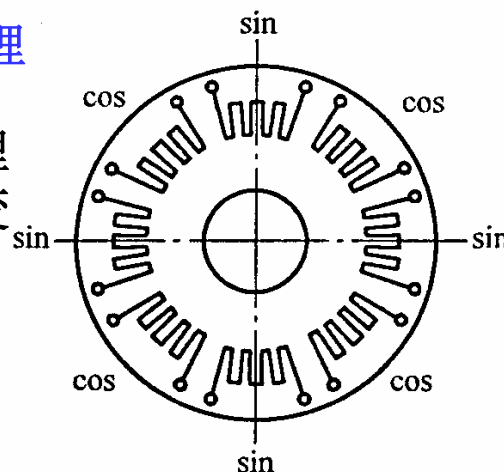
旋转式感应同步器的工作原理与直线式感应同步器、旋转变压器都是类似的。

单相绕组通电时形成磁场，磁极数与径向导片数 $N$ 相等。

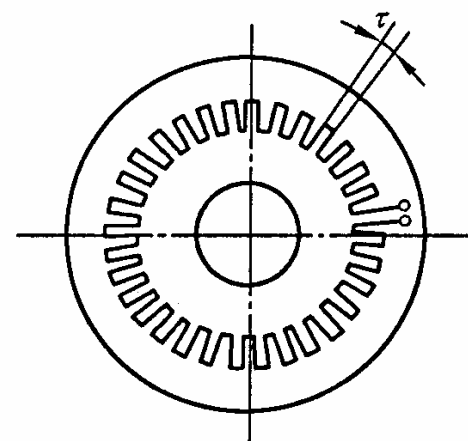
两相邻导片间的夹角  $\tau$  就是磁极之间的距离，称为极距 (rad)。

$L=2\tau$  (rad) 也称为节距或检测周期，它是磁场分布的周期。极对数 $p$ 为

$$p = N / 2 = 2p / L$$



(a) 定子



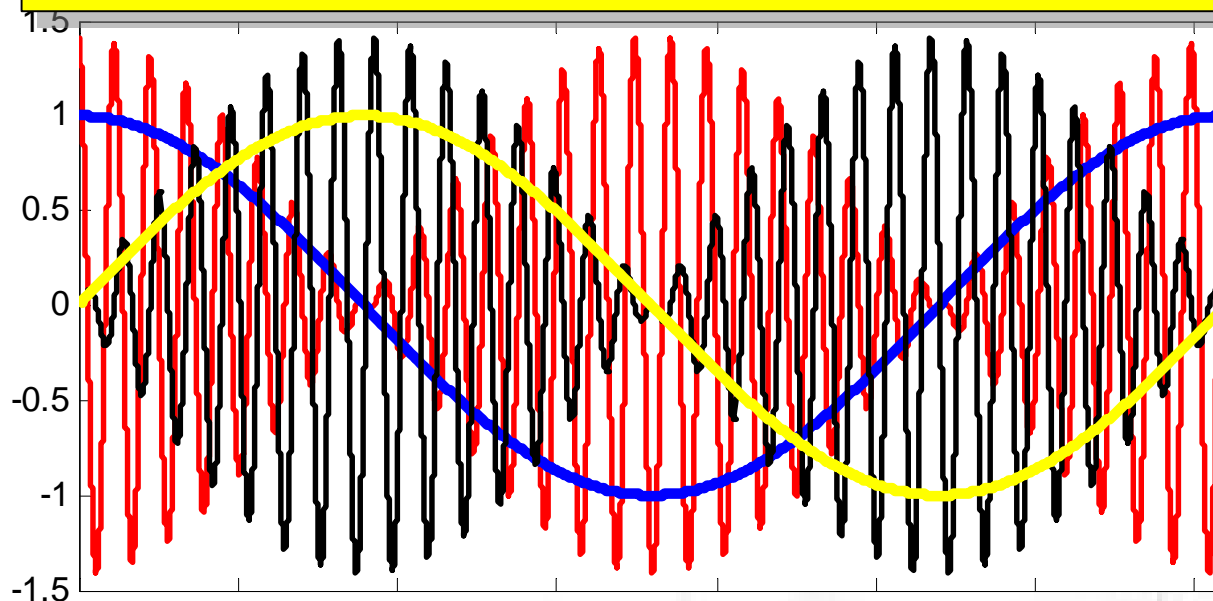
(b) 转子



## 2.2 旋转式感应同步器工作原理

感应电势有效值 以 $L$ 为周期，故有

$$E_s = E_m \sin \frac{2p}{L} q = E_m \sin \frac{p}{t} q = E_m \sin \frac{N}{2} q = E_m \sin pq$$

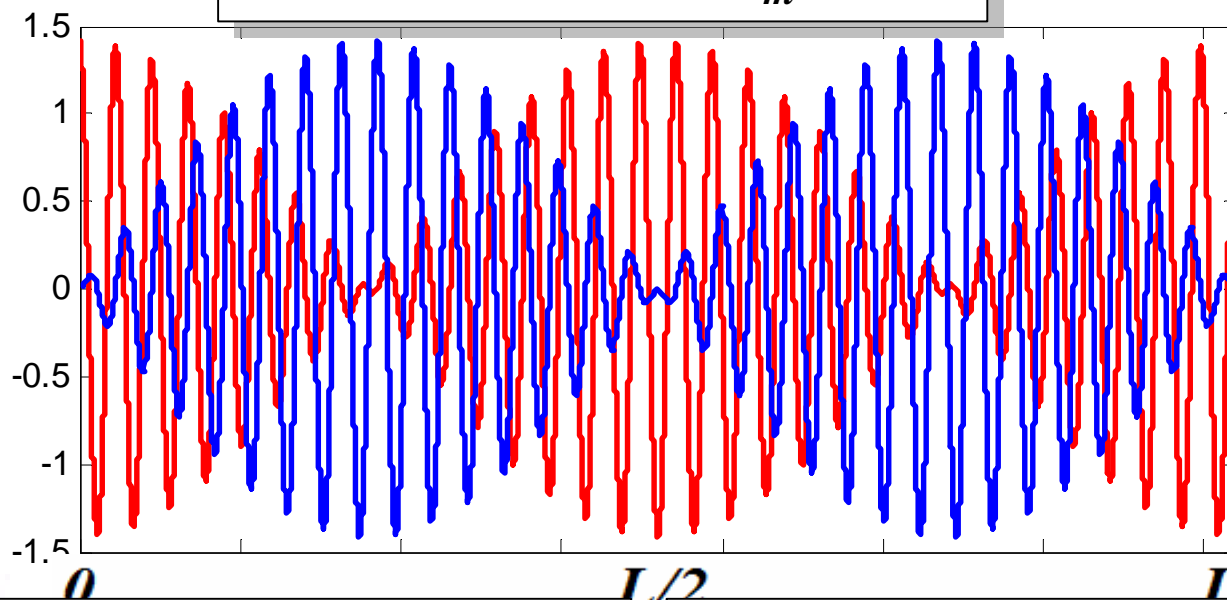


$$E_c = E_m \cos \frac{2p}{L} q = E_m \cos \frac{p}{t} q = E_m \cos \frac{N}{2} q = E_m \cos pq$$

## 2.2 旋转式感应同步器工作原理

- **感应电势的瞬时值** 选择适当的正方向后，可认为感应电势领先激磁电压 $90^\circ$ 。 $u$ 为激磁电压， $e_s$ 和 $e_c$ 分别为正弦绕组和余弦绕组输出电压的瞬时值。

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$



$$e_s = \sqrt{2}E_m \sin \frac{2\pi}{L} q \cos \omega t$$

$$e_c = \sqrt{2}E_m \cos \frac{2\pi}{L} q \cos \omega t$$

## 2.3 感应同步器感应电势的几个结论

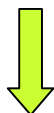
### 三 关于感应同步器感应电势的几个结论

定义电角  $q$ ，可将感应电势公式统一。

直线式感应同步器

电角度：

$$q_e = \frac{2\pi}{L} x = \frac{\pi}{t} x \text{ (rad)}$$



感应电势：

$$\begin{aligned} E_s &= E_m \sin q_e = \frac{U}{k} \sin q_e \\ E_c &= E_m \cos q_e = \frac{U}{k} \cos q_e \end{aligned}$$

旋转式感应同步器

$$q_e = pq = \frac{N}{2} q = \frac{\pi}{t} q = \frac{2\pi}{L} q \text{ (rad)}$$



$$\begin{aligned} E_s &= E_m \sin q_e = \frac{U}{k} \sin q_e \\ E_c &= E_m \cos q_e = \frac{U}{k} \cos q_e \end{aligned}$$

## 2.3 感应同步器感应电势的几个结论

### 三 关于感应同步器感应电势的几个结论

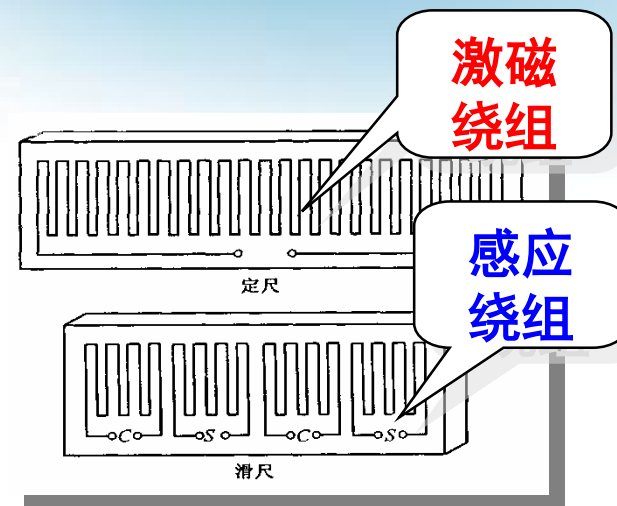
在连续绕组中给定激磁电压

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

正弦绕组输出电势的瞬时值为

$$e_s = \sqrt{2}E_s \cos \omega t = \sqrt{2}E_m \sin q_e \cos \omega t = \sqrt{2} \frac{U}{k} \sin q_e \cos \omega t$$

$$e_c = \sqrt{2}E_c \cos \omega t = \sqrt{2}E_m \cos q_e \cos \omega t = \sqrt{2} \frac{U}{k} \cos q_e \cos \omega t$$



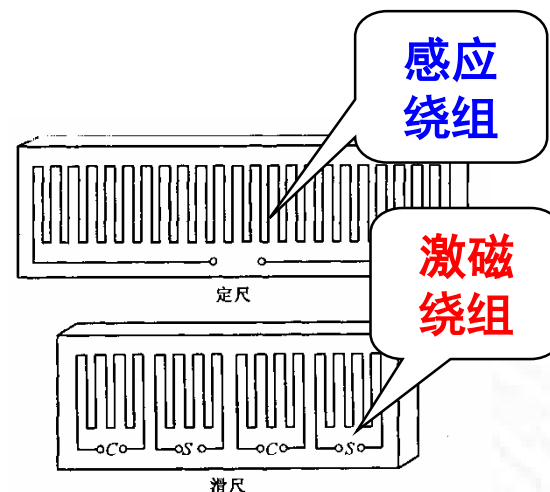
## 2.3 感应同步器感应电势的几个结论

### 三 关于感应同步器感应电势的几个结论

采用完全相同的方法还可以得出下述结论：当正弦绕组s和余弦绕组c中分别接上有效值为 $U$ 的正弦（或余弦）交流激磁电压时，它们在单相连续绕组中感应的电势有效值分别为

$$E_{2s} = kU \sin q_e = E \sin q_e$$

$$E_{2c} = kU \cos q_e = E \cos q_e$$



无论是单相绕组激磁还是两相绕组激磁，感应电势都属于同频率的正弦电势，感应电势与激磁电压的相位差是 $90^\circ$ 。一般取感应电势超前激磁电压 $90^\circ$ 。



### 3 感应同步器的信号处理方式

- 感应同步器作为测量元件，还需要解决几个问题
  - n 正余弦函数在一个周期内并不是单值对应关系
  - n 当电角度超出一个周期范围，这时必须记录周期个数才能确定电角度
  - n 输出电压存在误差
- 有鉴相型和鉴幅型两种信号处理方式
- 两类激磁方式
  - n 两相绕组激磁——两相激磁式
  - n 单相绕组激磁——单相激磁式
- 前面介绍工作原理时时以单相激磁式为例。目前在实用中多数用两相激磁方式。

## 3.1 鉴相型处理方式

一 鉴相型处理方式：根据输出电势的相位来鉴别电角

### 1 两相激磁式

在感应同步器正弦绕组s、余弦绕组c上加幅值和频率相同、相位差 $90^\circ$ 的交流激磁电压

正弦绕组激磁电压

$$u_s = U_m \sin \omega t$$



单相绕组产生的感应电势

$$e_{2s} = kU_m \sin q_e \cos \omega t$$

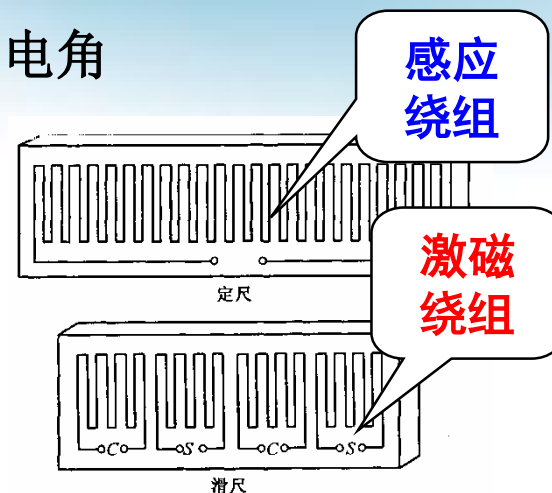
余弦绕组激磁电压

$$u_c = -U_m \cos \omega t$$



单相绕组产生的感应电势

$$e_{2c} = kU_m \cos q_e \sin \omega t$$



## 3.1 鉴相型处理方式

一 鉴相型处理方式：根据输出电势的相位来鉴别电角

### 1 两相激磁式

采用叠加原理可得单相绕组总感应电势

正弦激磁绕组在单相绕组产生的感应电势

$$e_{2s} = kU_m \sin q_e \cos \omega t$$

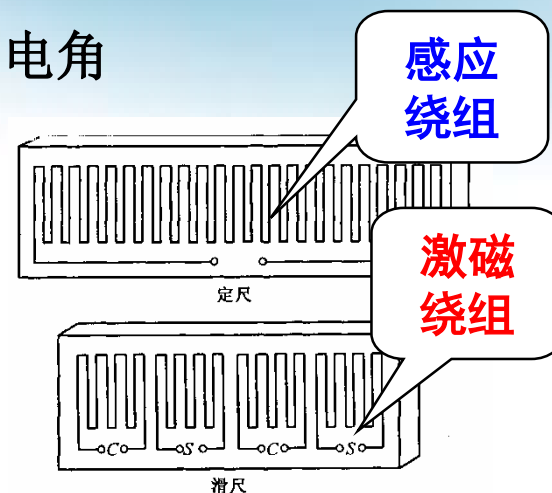
余弦激磁绕组在单相绕组产生的感应电势

$$e_{2c} = kU_m \cos q_e \sin \omega t$$

$$e_2 = e_{2s} + e_{2c} = kU_m \sin q_e \cos \omega t + kU_m \cos q_e \sin \omega t$$

$$e_2 = kU_m \sin(q_e + \omega t)$$

此时，输出电势的幅值是一个不变的常数，而输出电势的相位改变量等于电角  $q_e$ ，因此，求出电角  $q_e$  就可以求出对应的线位移或角位移。



## 3.1 鉴相型处理方式

一 鉴相型处理方式：根据输出电势的相位来鉴别电角

### 2 单相激磁式

单相绕组加激磁电压

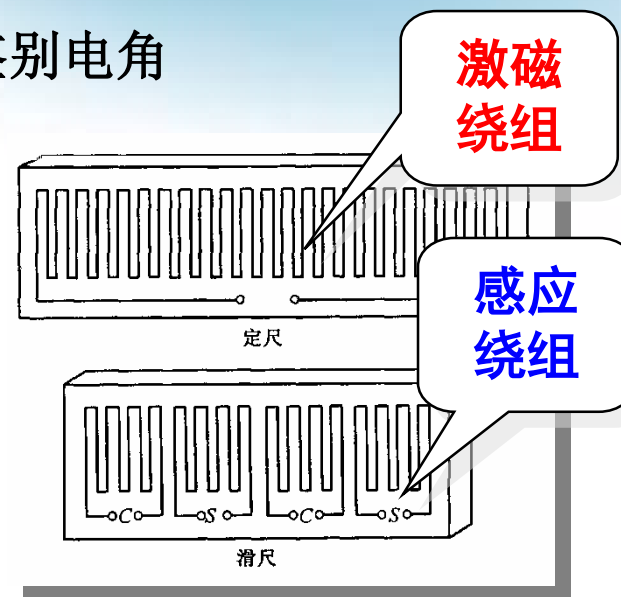
$$u = -U_m \cos \omega t$$

正弦绕组感应电势

$$e_s = kU_m \sin q_e \sin \omega t$$

余弦绕组感应电势

$$e_c = kU_m \cos q_e \sin \omega t$$



# 3.1 鉴相型处理方式

一 鉴相型处理方式：根据输出电势的相位来鉴别电角

## 2 单相激磁式

正弦绕组感应电势

$$e_s = kU_m \sin q_e \sin \omega t$$

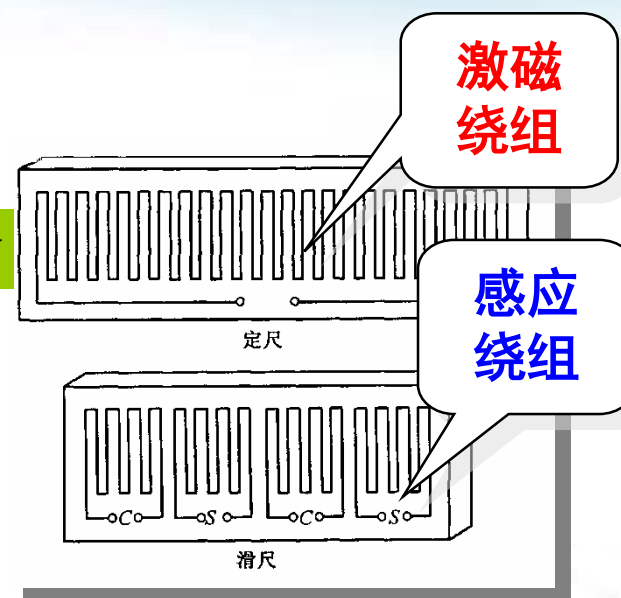


移相 $90^\circ$

$$\begin{aligned} e'_s &= kU_m \sin q_e \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= kU_m \sin q_e \cos \omega t \end{aligned}$$

余弦绕组感应电势

$$e_c = kU_m \cos q_e \sin \omega t$$



$$e_2 = e'_s + e_c = kU_m \sin q_e \cos \omega t + kU_m \cos q_e \sin \omega t = kU_m \sin(\omega t + q_e)$$



## 3.2 鉴幅型处理方式

二 鉴幅型处理方式：根据输出信号的幅值来鉴别电角

### 1 两相激磁式

在感应同步器正弦绕组s、余弦绕组c 上施加激磁电压

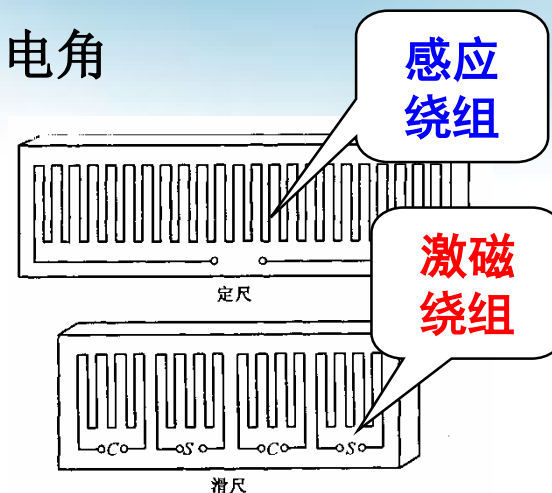
正弦绕组激磁电压

$$u_s = U_m \cos q_1 \sin \omega t$$

余弦绕组激磁电压

$$u_c = -U_m \sin q_1 \sin \omega t$$

其中  $\theta_1$  称为指令角位移，是已知的。



单相绕组产生的感应电势

$$e_{2s} = kU_m \cos q_1 \sin q_e \cos \omega t$$



单相绕组产生的感应电势

$$e_{2c} = -kU_m \sin q_1 \cos q_e \cos \omega t$$

## 3.2 鉴幅型处理方式

二 鉴幅型处理方式：根据输出信号的幅值来鉴别电角

### 1 两相激磁式

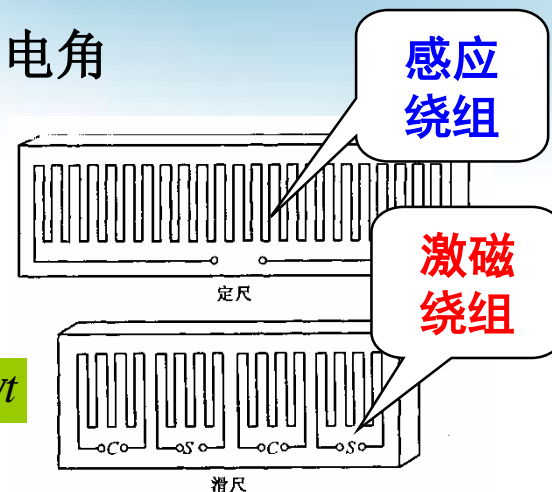
采用叠加原理可得单相绕组总感应电势

正弦激磁绕组在单相绕组产生的感应电势

$$e_{2s} = kU_m \cos q_1 \sin q_e \cos \omega t$$

余弦激磁绕组在单相绕组产生的感应电势

$$e_{2c} = -kU_m \sin q_1 \cos q_e \cos \omega t$$



$$e_2 = e_{2s} + e_{2c} = kU_m \cos q_1 \sin q_e \cos \omega t - kU_m \sin q_1 \cos q_e \cos \omega t$$

$$e_2 = kU_m \sin(q_e - q_1) \cos \omega t$$

此时，输出电势的幅值与电角  $q_e$  有关，当鉴别出输出电势的幅值为零就说明  $q_e = q_1 + kp$ ，如果能确保  $k=0$ ，则  $q_e = q_1$ ，因  $q_1$  是已知的，所以就能确定  $q_e$

## 3.2 鉴幅型处理方式

### 二 鉴幅型处理方式

#### 2 单相激磁式

单相绕组加激磁电压

$$u = U_m \sin \omega t$$



正弦绕组感应电势

$$e_s = kU_m \sin q_e \cos \omega t$$



$$e'_s = kU_m \sin q_e \cos q_1 \cos \omega t$$



余弦绕组感应电势

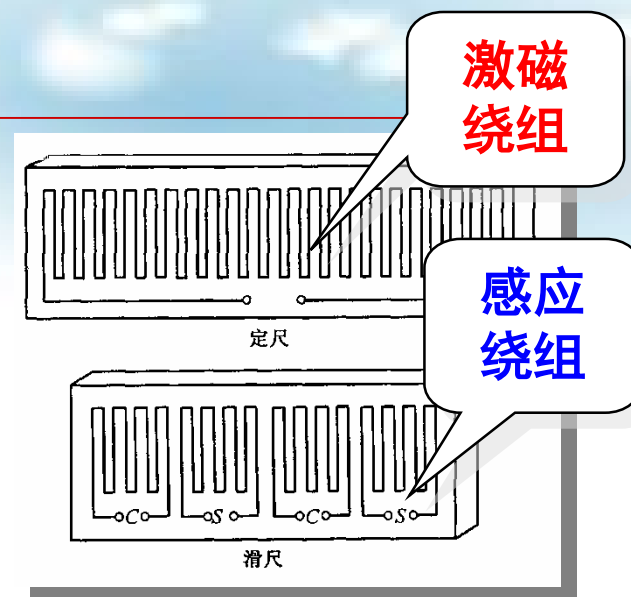
$$e_c = kU_m \cos q_e \cos \omega t$$



$$e'_c = -kU_m \cos q_e \sin q_1 \cos \omega t$$



$$e_2 = e'_s + e'_c = kU_m \sin(q_e - q_1) \cos \omega t$$



## 3.2 鉴幅型处理方式

通过前面的分析，我们可以得到相位或者幅值和感应同步器位移（角度）相关的输出信号

$$e_2 = kU_m \sin(\omega t + \theta_e)$$

相位

幅值

$$e_2 = kU_m \sin(\theta_e - \theta_1) \cos \omega t$$

那么我们利用什么方法将输出信号的幅值或者相位转换为角度信息呢？

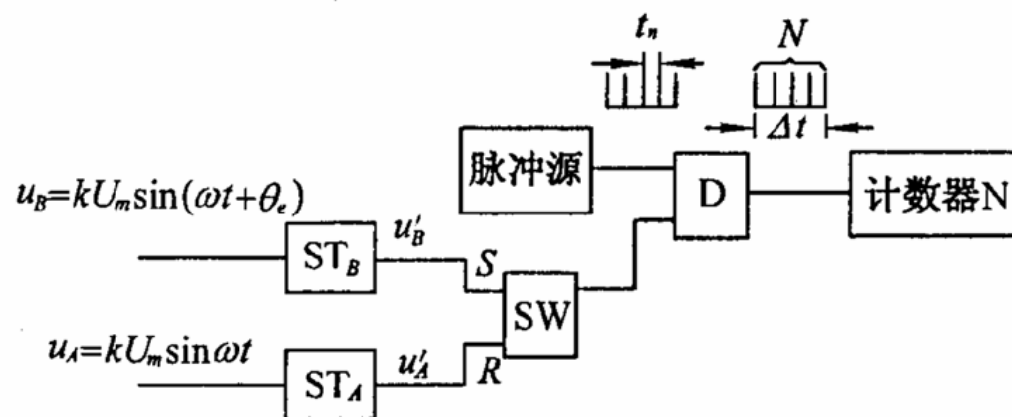
## 4 鉴相型数字编码装置

### 一、鉴相型编码原理

将被测信号  $e_2 = kU_m \sin(\omega t + q_e)$

与基准信号  $e_{20} = kU_m \sin \omega t$

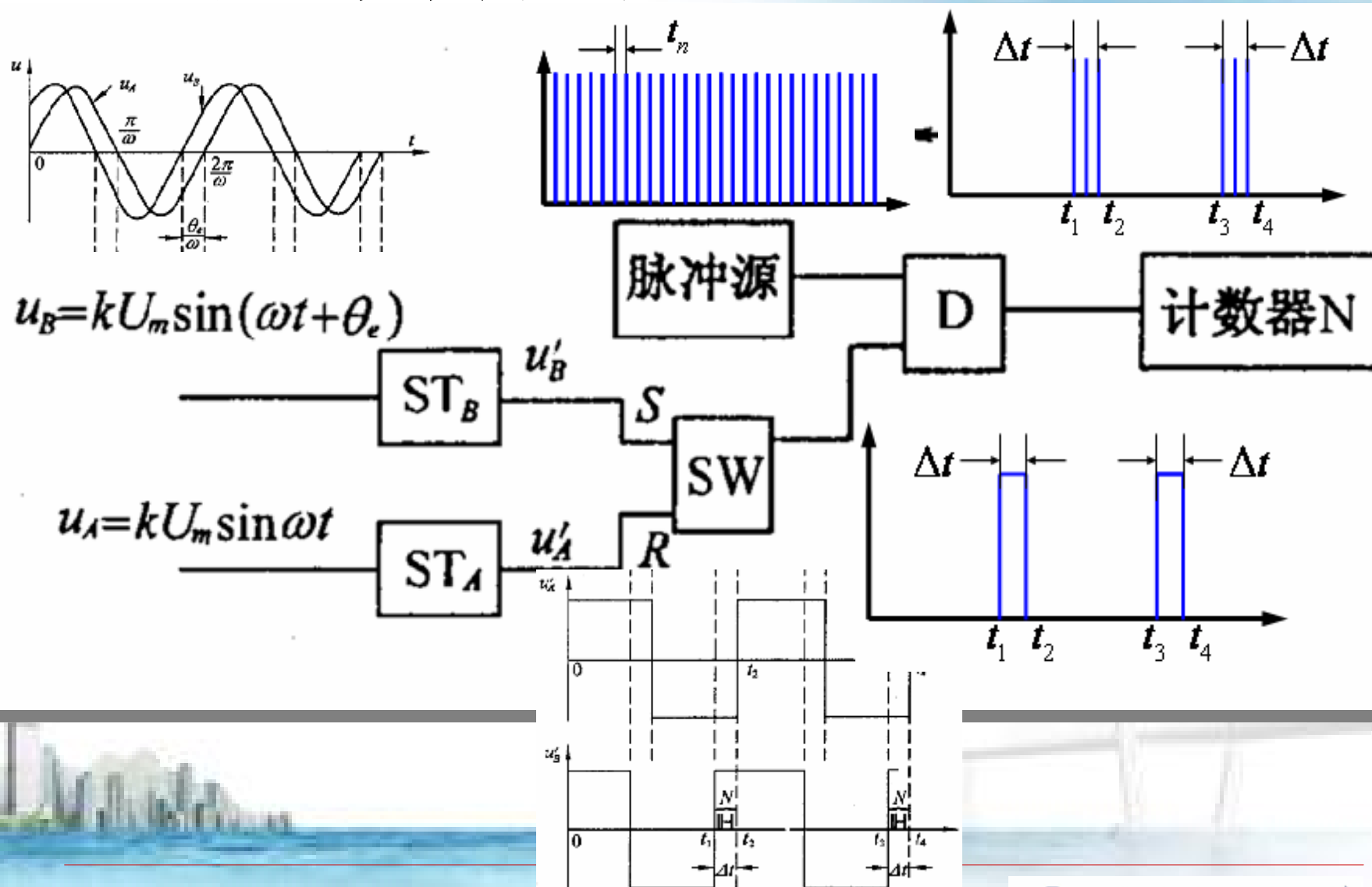
的相位进行比较，求出相位差  $q_e$  并转换成脉冲个数



(a)

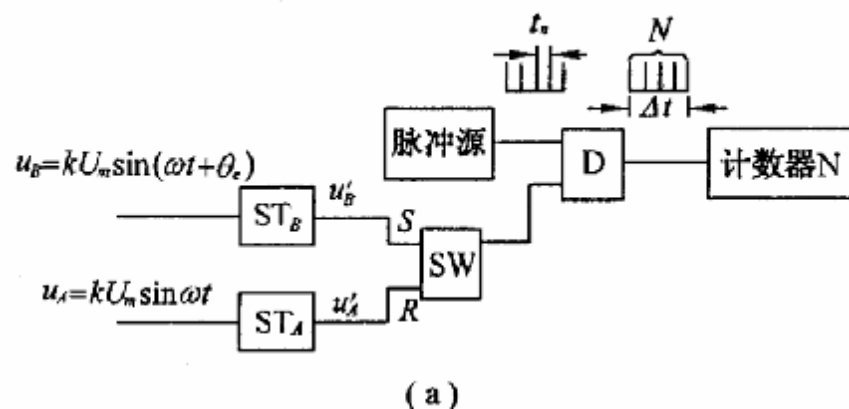
整形电路，双稳态触发器，上升沿触发。

## 4 鉴相型数字编码装置





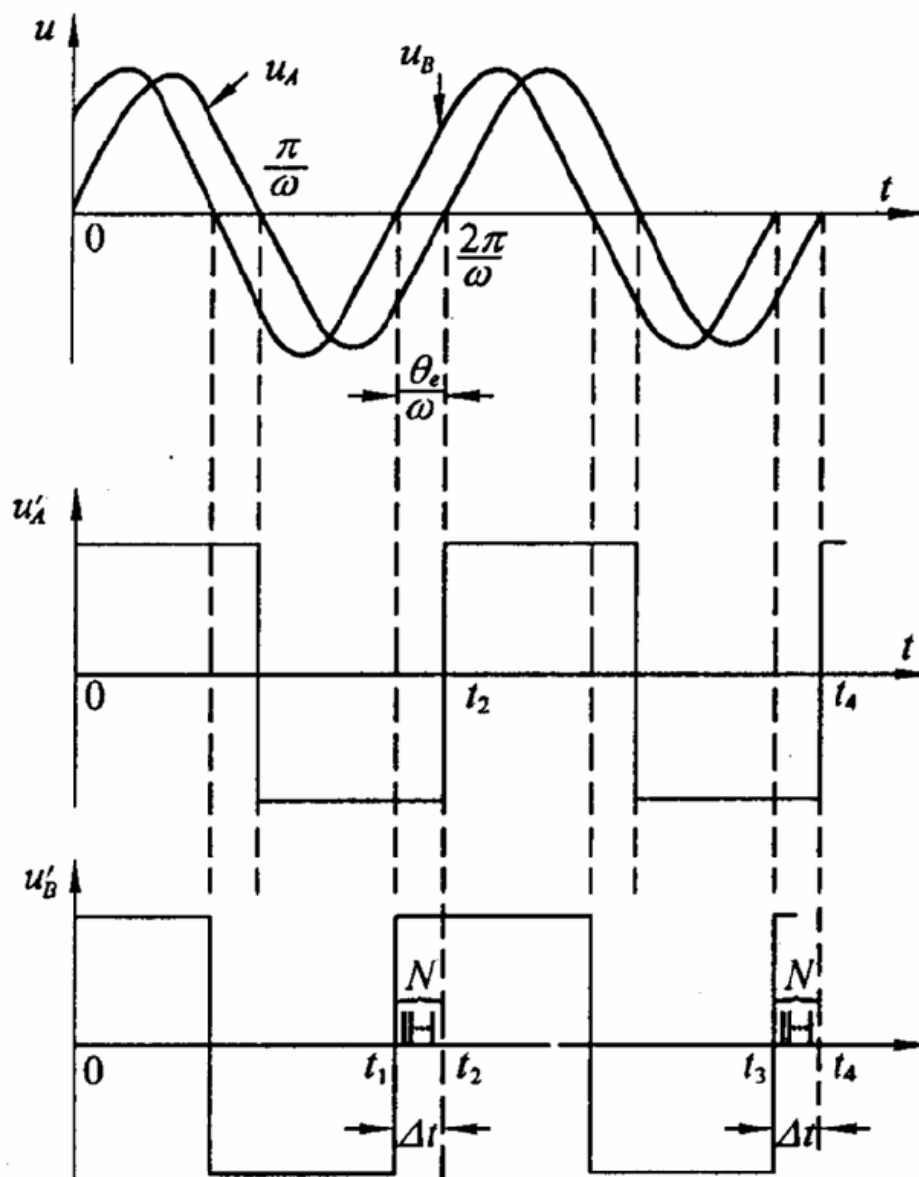
## 4 鉴相型数字编码装置



计数器只在  $\Delta t = t_2 - t_1$   
 $\Delta t = t_4 - t_3$  时间内计数。

$\Delta t$  对应曲线相移

如何由计数值求取角度？



## 4 鉴相型数字编码装置

$$u_A = kU_m \sin \omega t$$

$$u_B = kU_m \sin(\omega t + q_e)$$

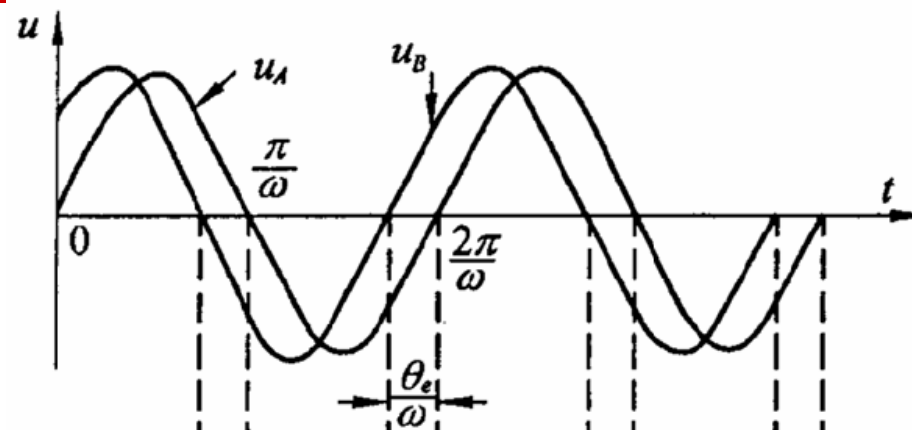
$$u_B = kU_m \sin \omega(t + q_e / \omega)$$

曲线 $u_B$ 是由曲线 $u_A$ 向左平移  $\theta_e / \omega$  得到的。

$$\Delta t = q_e / \omega$$

$$Dt = Nt_n$$

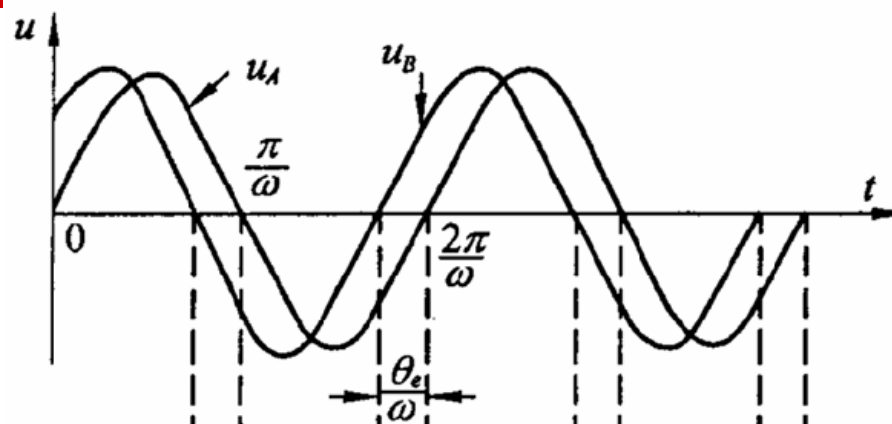
$$q_e = \omega Nt_n$$



一个脉冲所代表的相位移取决于 $t_n$ ，可见相位—数字转换的精度和分辨率取决于时钟脉冲周期。

如何计算分辨率？

## 4 鉴相型数字编码装置



一个脉冲对应的角度就是分辨率，设激励电压频率和脉冲源频率为 $f$ (周期为 $T$ ) 和 $f_n$ ，则分辨率为

$$Dq = \frac{t_n}{T} L = \frac{f}{f_n} L$$

如何提高分辨率？

## 4 鉴相型数字编码装置

### 二、鉴相型数显表

#### 1. 位移变成电信号

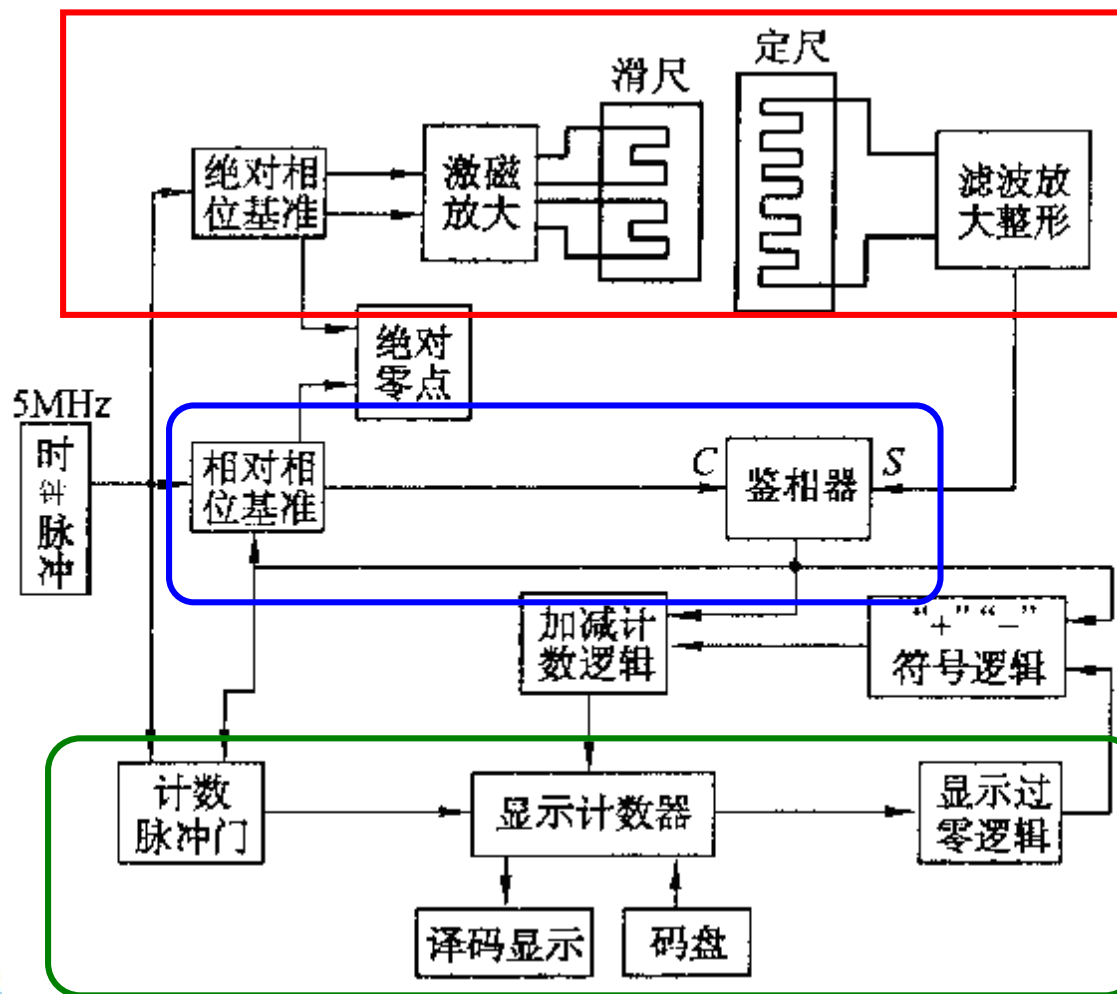
时钟脉冲、绝对相位基准、激磁、感应同步器和滤波整形电路。

#### 2. 相位转成数字

时钟脉冲、相对相位基准和鉴相器。

#### 3. 计数及显示

计数脉冲门、显示计数器、加减计数逻辑、绝对零点、译码显示等。



## 5 鉴幅型数显表

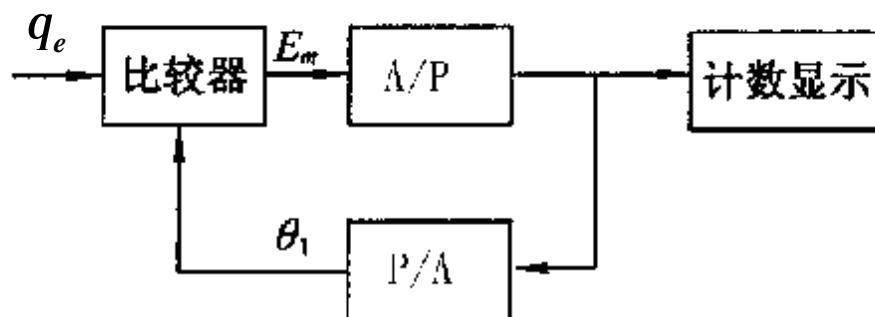
两相激磁式直线感应同步器，激磁电压

$$u_s = U_m \cos q_1 \sin \omega t$$

$$u_c = -U_m \sin q_1 \sin \omega t$$

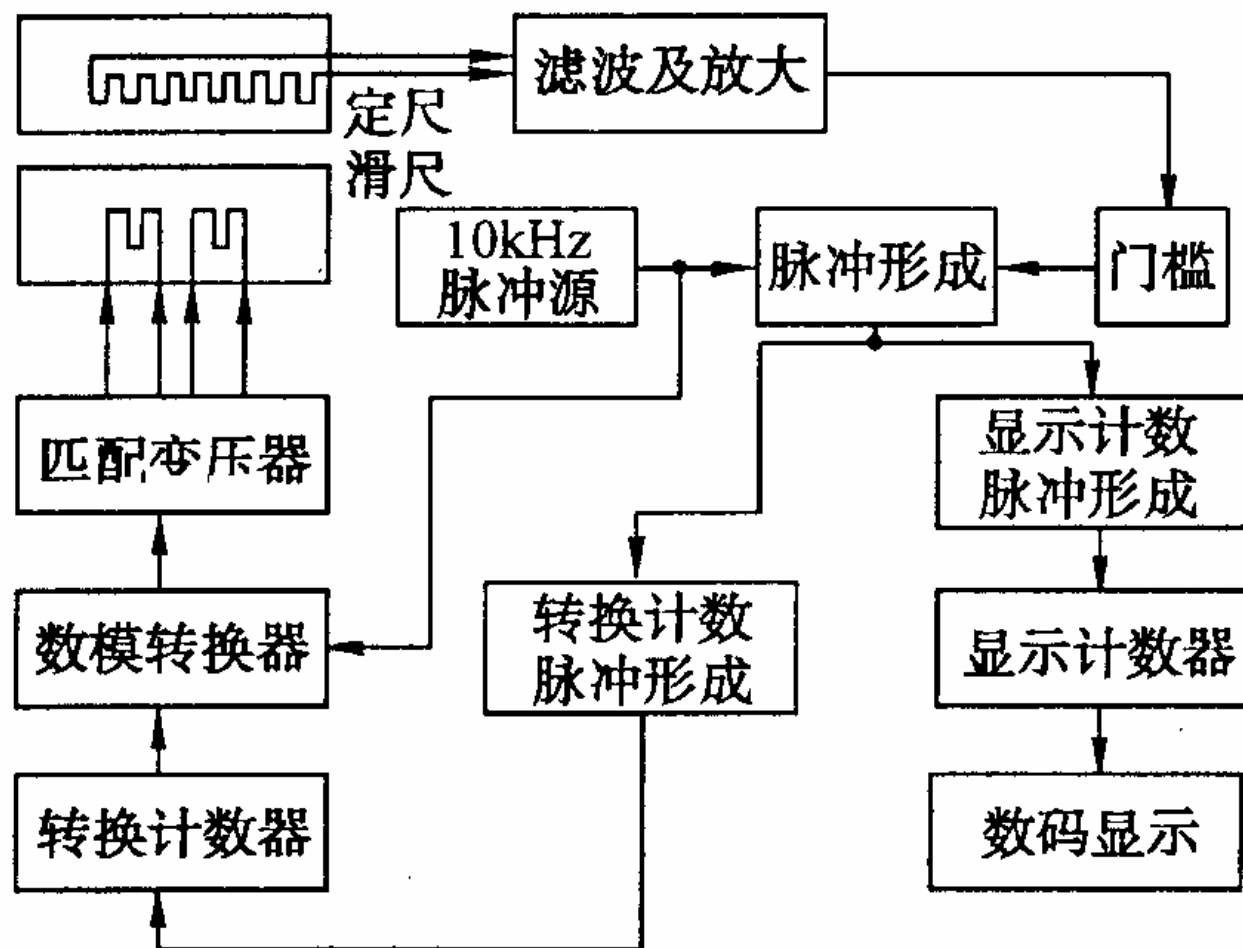
输出电势的幅值

$$E_m = kU_m \sin(q_e - q_1)$$



- 指令角  $\theta_1$  是已知的，代表感应同步器的激磁电压幅值。
- 转换计数器使数模转换器改变滑尺激磁电压的幅值，即改变  $\theta_1$ 。

## 5 鉴幅型数显表



## 5 鉴幅型数显表

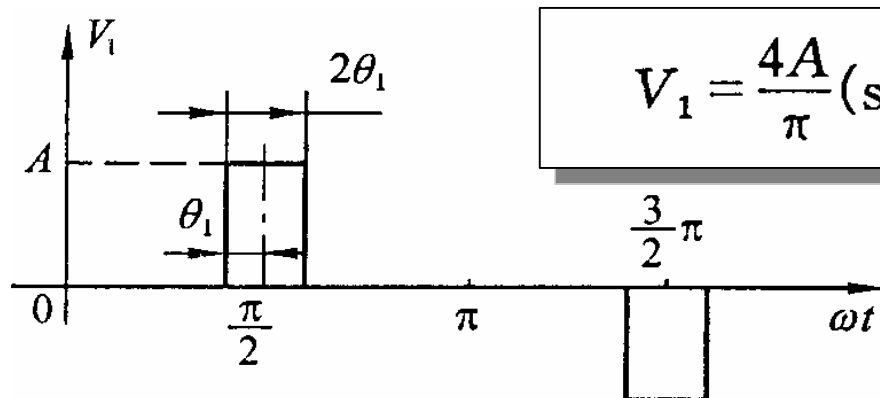
**关键** 使感应同步器激磁电压的幅值随着指令角  $\theta_I$  按正、余弦关系变化。

如何实现这一功能？

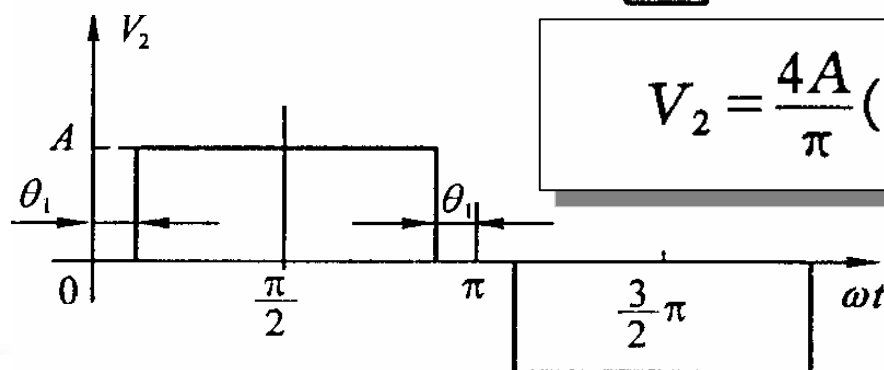
**函数变压器** 这种变压器的副端有很多抽头，再配上电子开关线路就可以实现电压的改变。

## 5 鉴幅型数显表

### 脉冲调宽方法



$$V_1 = \frac{4A}{\pi} (\sin\theta_1 \sin\omega t - \frac{1}{3} \sin 3\theta_1 \sin 3\omega t + \dots)$$



$$V_2 = \frac{4A}{\pi} (\cos\theta_1 \sin\omega t + \frac{1}{3} \cos 3\theta_1 \sin 3\omega t + \dots)$$

第一项基波与所要求的激磁电压相似。用转换计数脉冲改变激磁电压方波的宽度可以精确地调整激磁电压。优点：集成化。



## 6 感应同步器的优缺点

### 感应同步器的优点:

#### 1. 具有很高的精度和分辨率

直线式感应同步器的精度可达到 $\pm 1\text{mm}$ ，分辨率可达 $0.05\text{ mm}$ ，重复性误差可达 $0.2\text{ mm}$ 。直径为 $300\text{mm}$ 的旋转式感应同步器的精度可达 $\pm 1''$ ，分辨率可达 $0.05''$ ，重复性误差可达 $0.1''$ 。测量精度远高于制造精度。

#### 为什么测量精度高于制造工艺？

其测量精度首先取决于印制电路绕组的加工精度，感应同步器是由许多节距同时参加工作，多节距的误差平均效应减小了局部误差的影响

## 6 感应同步器的优缺点

### 感应同步器的优点：

#### 2. 抗干扰能力强

感应同步器在一个节距内是一个绝对测量装置，在任何时间内都可以给出仅与位置相对应的单值电压信号，因而瞬时作用的偶然干扰信号在其消失后不再有影响。平面绕组的阻抗很小，受外界干扰电场的影响很小。

#### 3. 使用寿命长，维护简单

定尺和滑尺，定子和转子互不接触，没有摩擦、磨损，所以使用寿命很长。它不怕油污、灰尘和冲击振动的影响，不需要经常清扫。

## 6 感应同步器的优缺点

### 感应同步器的优点：

#### 4. 可以用于长距离位移测量

可以根据测量长度的需要，将若干根定尺拼接。拼接后总长度的精度可保持（或稍低于）单个定尺的精度。目前几米到几十米的大型机床工作台位移的直线测量，大多采用感应同步器来实现。

#### 5. 工艺性好，成本较低，便于复制和成批生产

由于感应同步器具有上述优点，长感应同步器目前被广泛地应用于大位移静态与动态测量中，例如用于三坐标测量机、程控数控机床及高精度重型机床及加工中测量装置等。

## 6 感应同步器的优缺点

### 感应同步器的缺点:

1. 输出信号弱，信号处理麻烦，配套信号处理设备（数显表）复杂，价格高。
2. 多数为分装式，安装时精度相对较高
3. 使用时，必须进行电路参数的调整，才能满足精度要求
4. 单通道多对极感应同步器输出信号为增量方式，必须进行寻零操作

## 7 感应同步器的使用注意事项

- 1 安装时，定转子之间距离要准确，小于0.25mm
- 2 长距离测试拼接时要保证拼接精度
- 3 单通道多极感应同步器要设计寻零功能
- 4 输出信号长距离传输时，在感应同步器测要加前置放大电路
- 5 信号线要用双绞屏蔽线，避免和强电平行走线，要正确接地
- 6 用前要检查感应同步器的绝缘，避免铁削等进入
- 7 要采取措施抑制大功率器件的电磁干扰