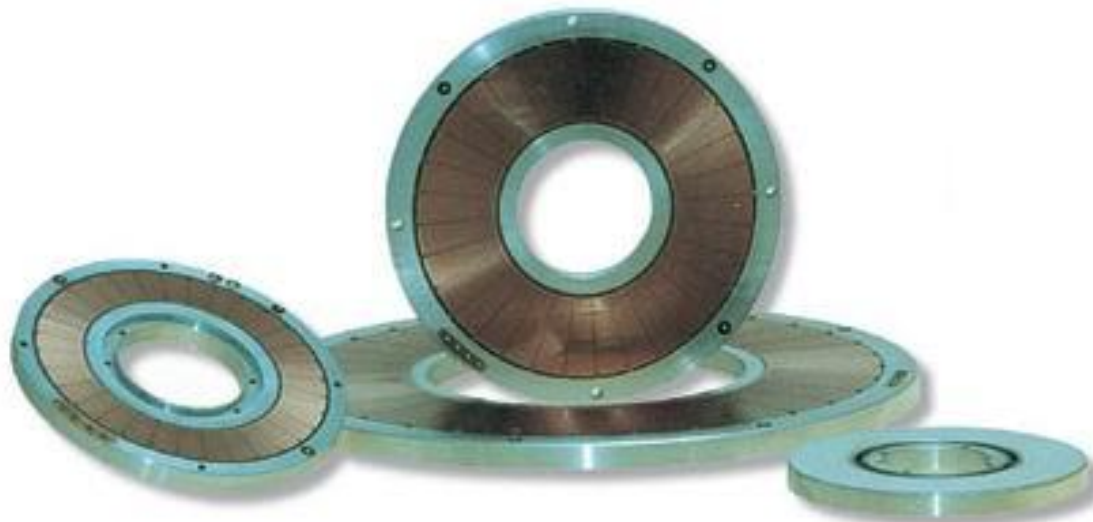


自动控制实践 感应同步器

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴



第九章 旋转变压器与感应同步器



- 测量线位移和角位移
- 电磁感应原理

课程内容

- ❖ 感应同步器的结构
- ❖ 感应同步器的工作原理
- ❖ 感应同步器的信号处理
- ❖ 感应同步器的优缺点
- ❖ 感应同步器使用注意事项

9.3.1 概述

- ❖ 感应同步器 (Inductosyn)，是一种将角位移和线位移转换为电信号的高精度测量元件。
- ❖ 原理上和多级旋转变压器一样，结构上运动部分和静止部分均采用了印制绕组。



9.3.1 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



9.3.1 概述

- ❖ 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。



9.3.1 概述

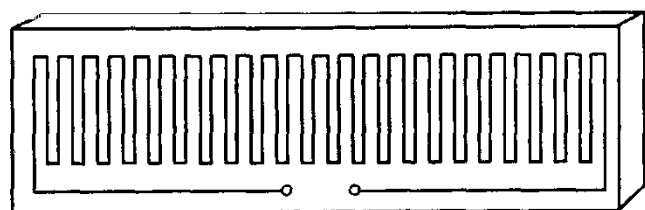
❖ 感应同步器属于哪一类传感器

- 线位移和角位移测量元件
- 基于电磁感应原理
- 结构型的测量元件
- 模拟型、数字型

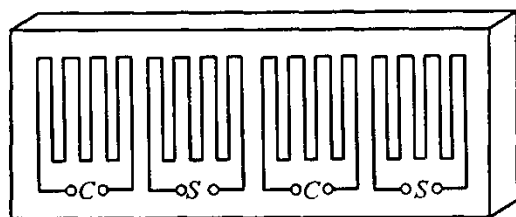
9.3.1 感应同步器的结构

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。



定尺



滑尺

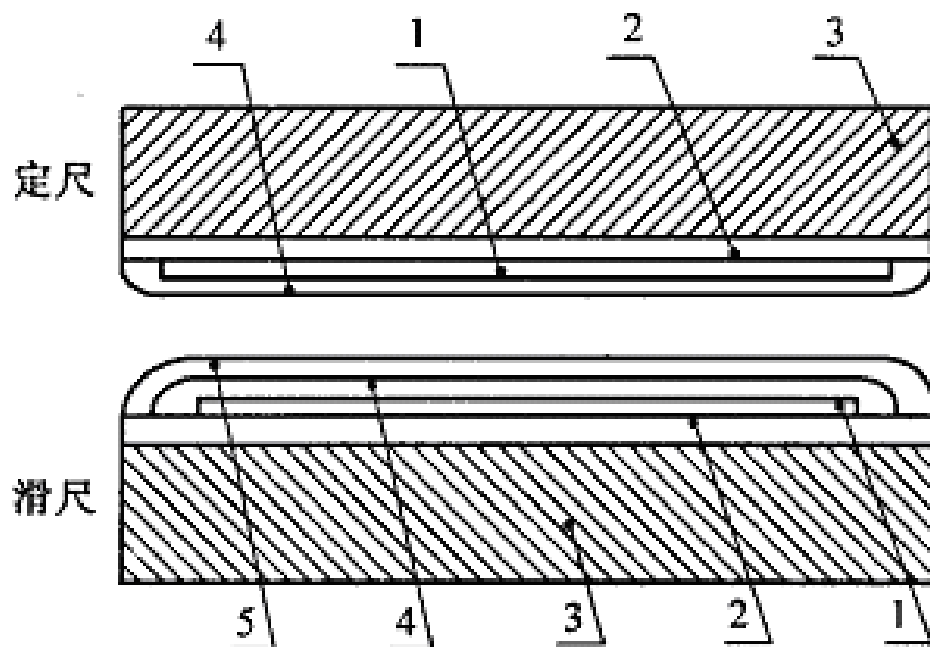
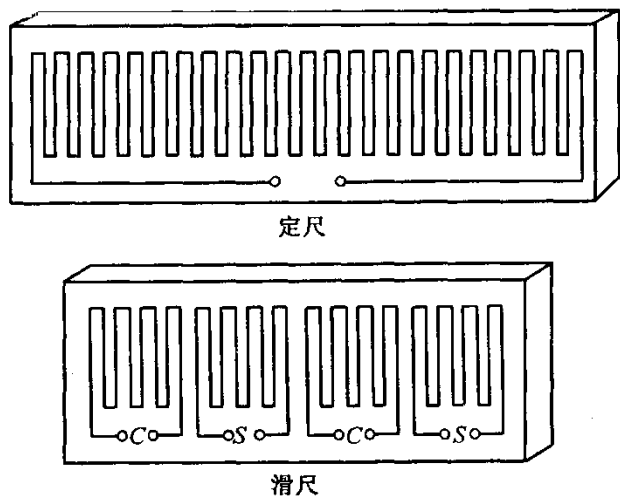


图 9-18 直线式感应同步器的结构

1—铜箔 2—绝缘粘合剂 3—基板

4—耐切削油防腐层 5—铝箔

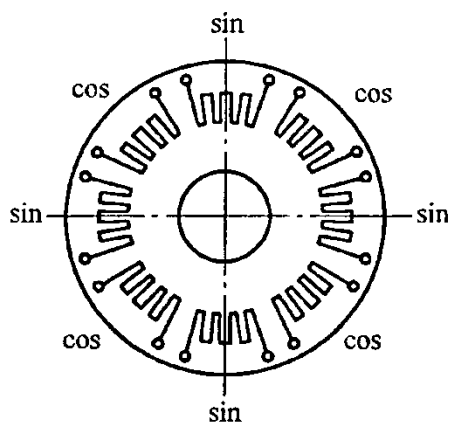
9.3.1 感应同步器的结构



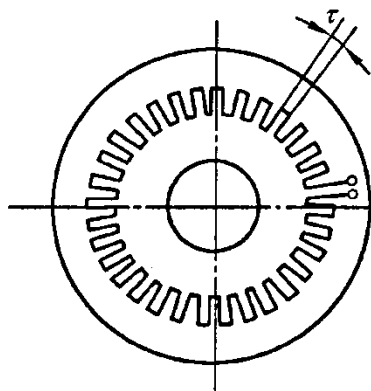
- ❖ 基板厚度为10mm。目前高精度感应同步器多采用非铁磁材料作基板，如采用铝基材料、玻璃等，这些材料没有铁磁物质，可以减小误差和提高精度。
- ❖ 绕组定尺绕组是连续的单相绕组，滑尺的绕组是分段绕组，按所处的磁场位置分为正弦绕组s和余弦绕组c，交替排列，各自串联形成正弦和余弦两相绕组。

9.3.1 感应同步器的结构

旋转式感应同步器



(a) 定子



(b) 转子

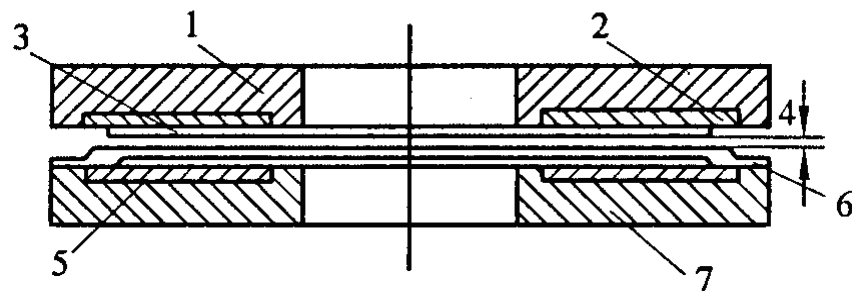
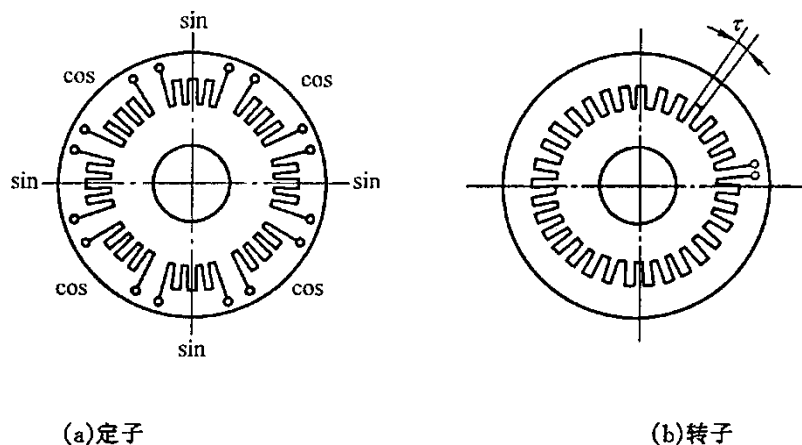


图 9-20 旋转式感应同步器的结构

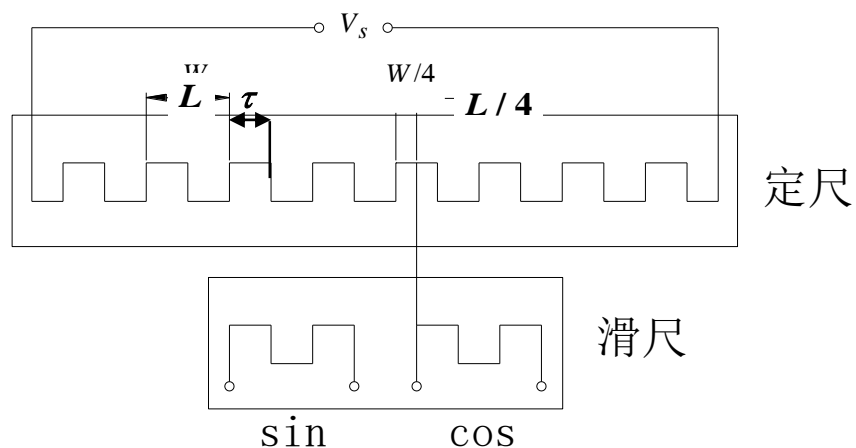
1- 定子基板 2- 绝缘粘合剂 3- 定子绕组
4- 气隙 5- 转子绕组 6- 屏蔽膜 7- 转子基板

9.3.1 感应同步器的结构



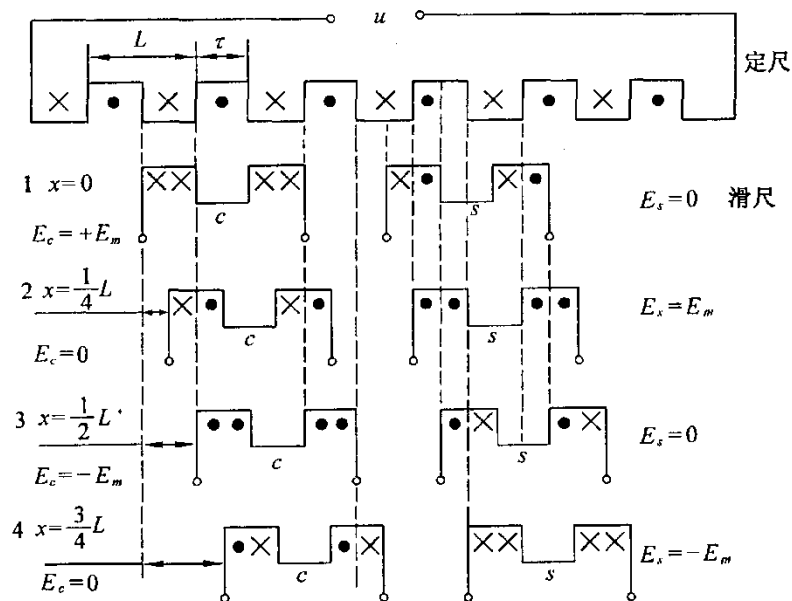
- ❖ 绕组是由辐射状的导片组成。转子上的绕组是单相连续绕组，其径向导片数也是极数。
- ❖ 定子绕组是分段绕组，分为正弦和余弦两大组，交替排列，各自串联形成两相绕组。
- ❖ 直径越大，精度越高。
- ❖ 安装时，面对面放置，气隙 $0.25 \pm 0.05\text{mm}$ 。

9.3.2 直线感应同步器的工作原理



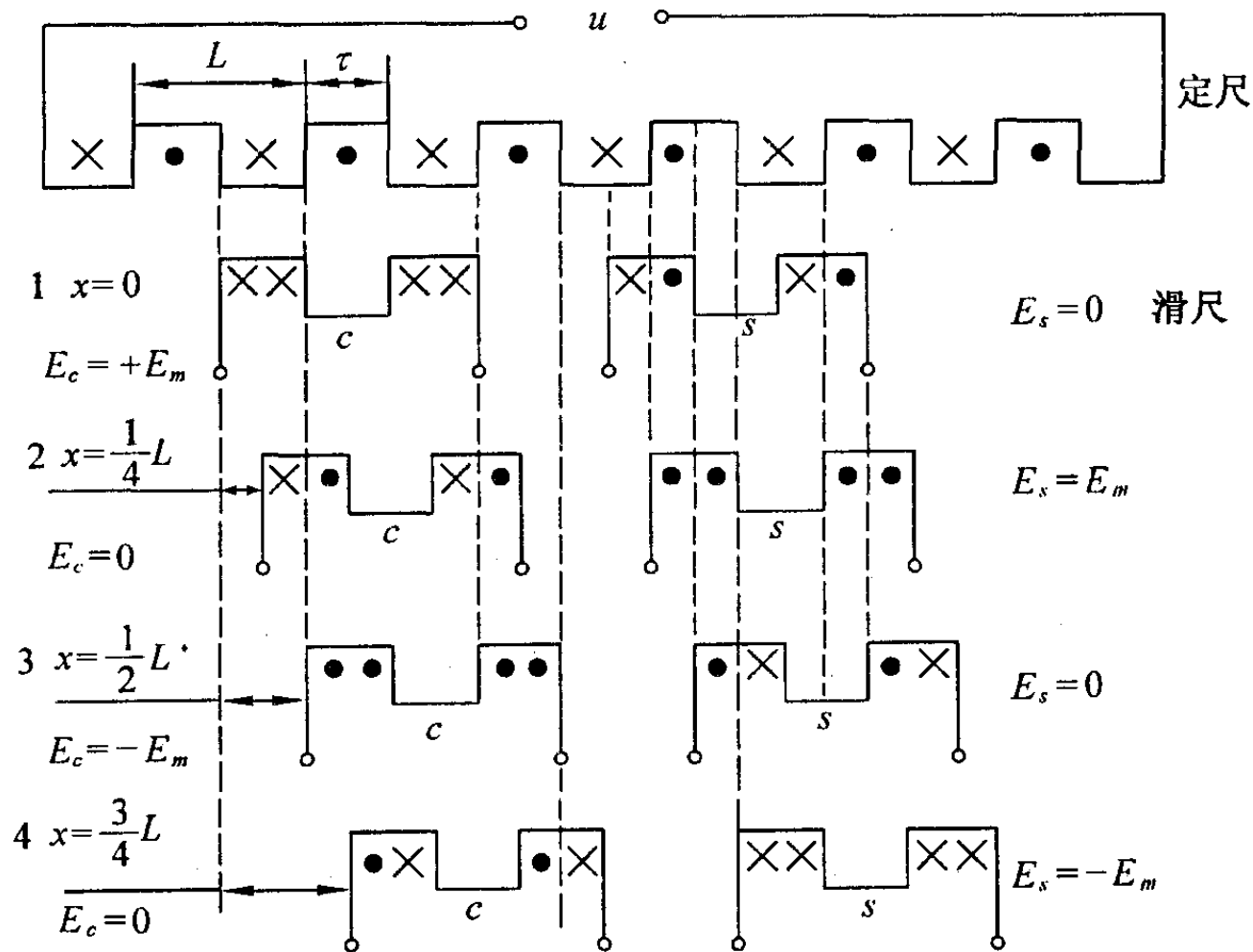
- ❖ 极距 τ 是相邻金属片中心线间的距离。
- ❖ 节距 $L=2\tau$ ，也称检测周期。
- ❖ 正弦绕组s和余弦绕组c相距 $3/4L$ 即 1.5τ 。

9.3.2 直线感应同步器的工作原理

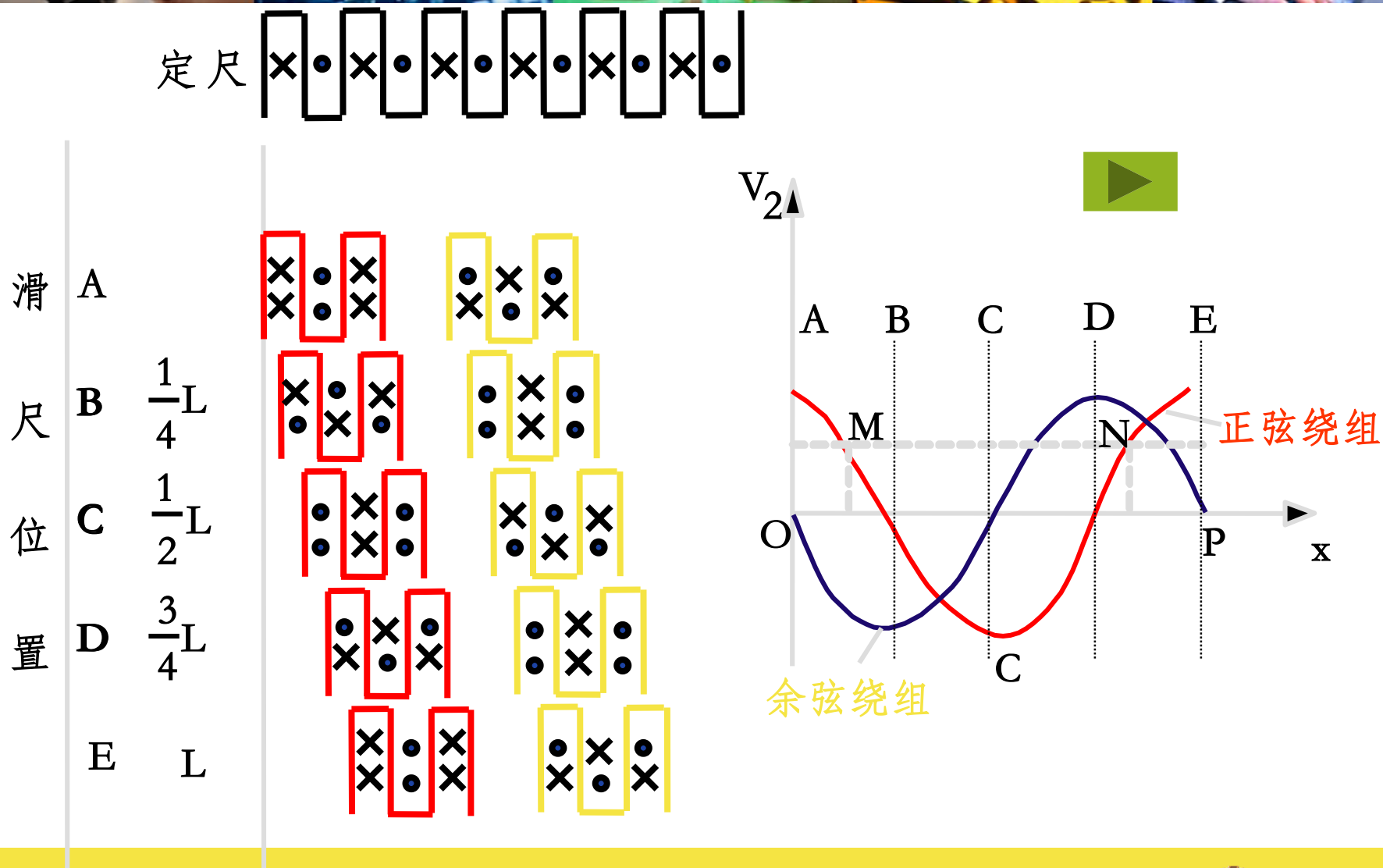


- ❖ 定尺绕组通1-10kHz交流电激磁，产生一个多极的脉振磁场。
- ❖ 磁极之间的距离是 τ ，磁场分布周期是节距 L 。
- ❖ 脉振磁场在滑尺绕组上产生感应电势，有效值随滑尺位移作周期性变化，周期为节距 L 。

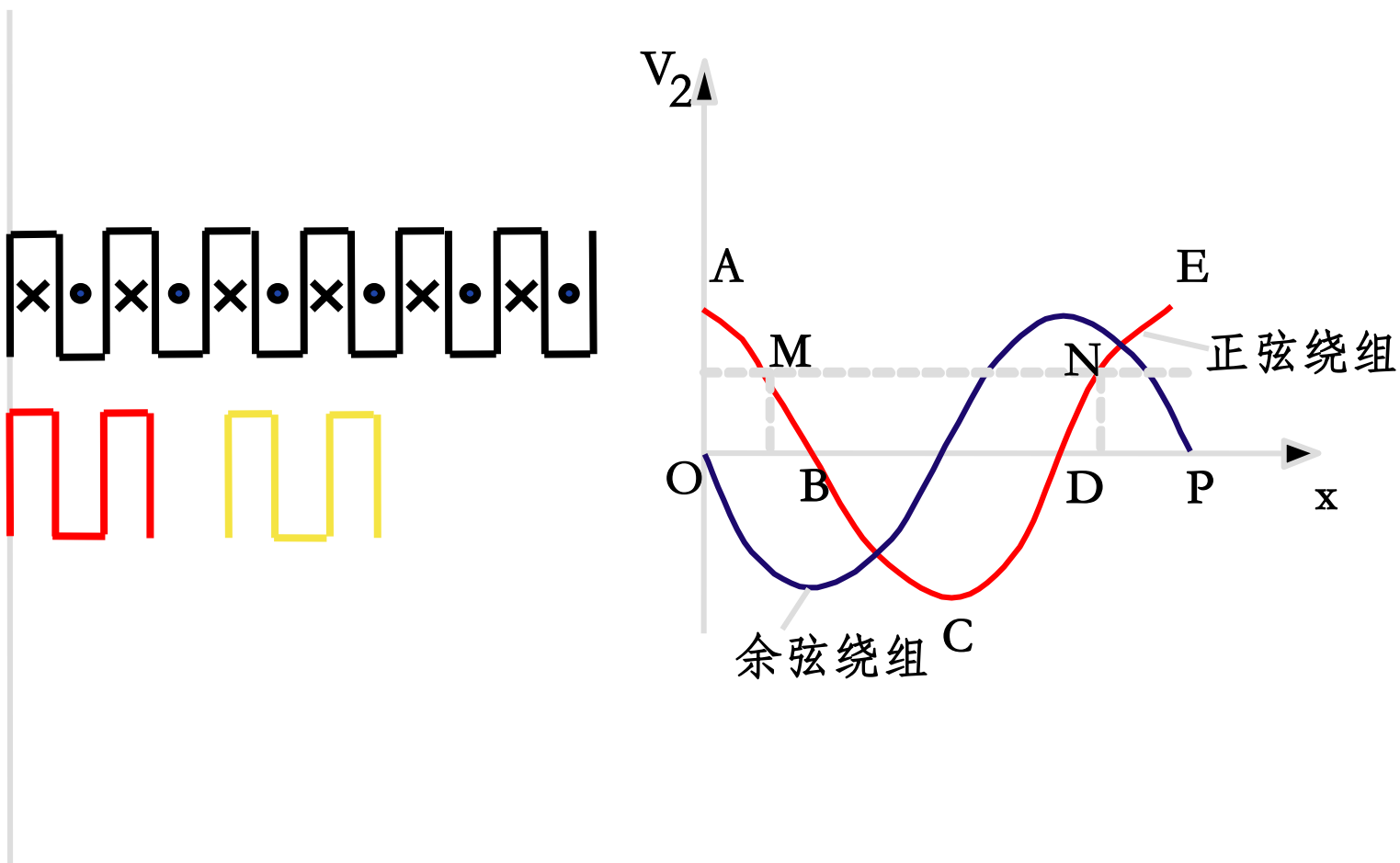
9.3.2 直线感应同步器的工作原理



9.3.2 感应同步器的工作原理—直线

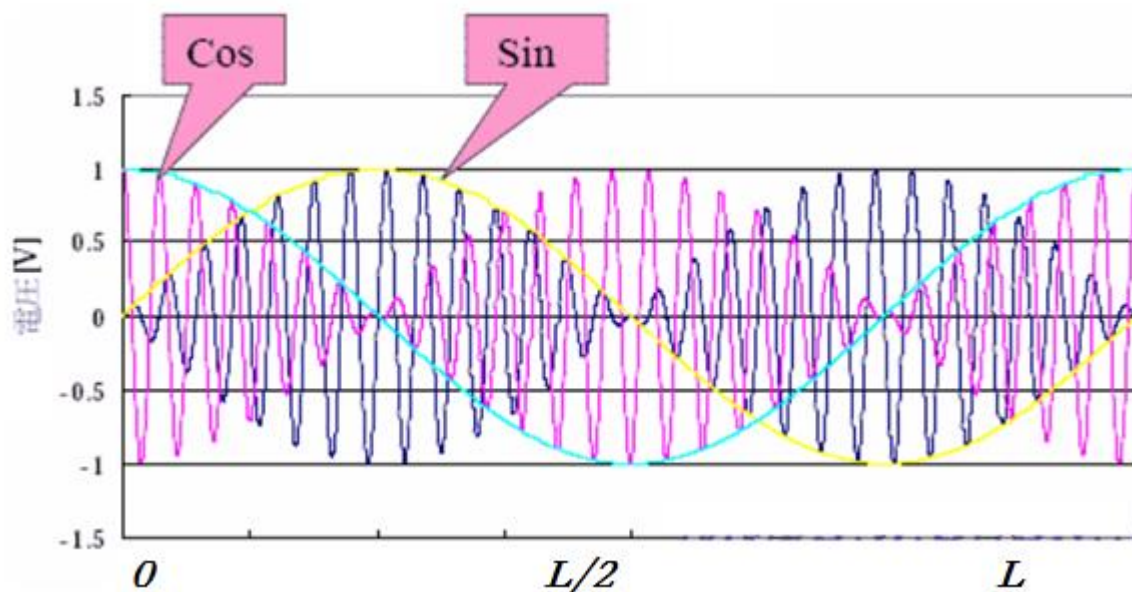


9.3.2 感应同步器的工作原理—直线



9.3.2 感应同步器的工作原理—直线

- ❖ **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。

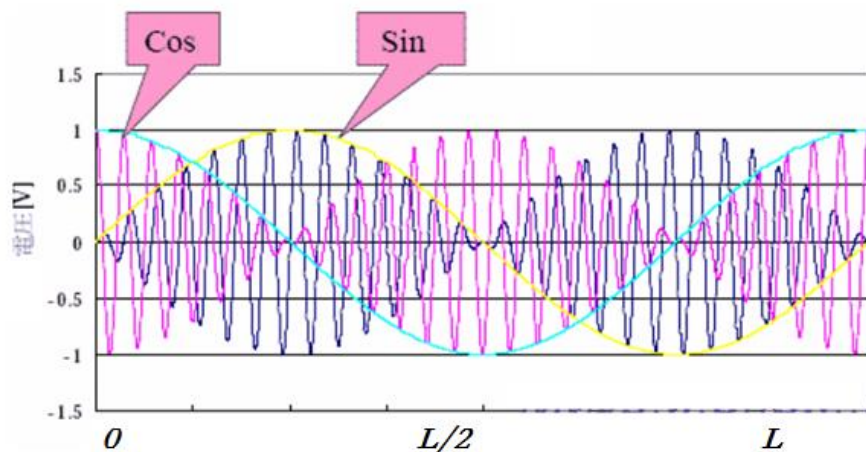


$$E_c = E_m \cos \frac{2\pi}{L} x = E_m \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

$$E_s = E_m \sin \frac{2\pi}{L} x = E_m \sin \frac{\pi}{\tau} x$$

9.3.2 感应同步器的工作原理—直线

- ❖ 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° 。



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

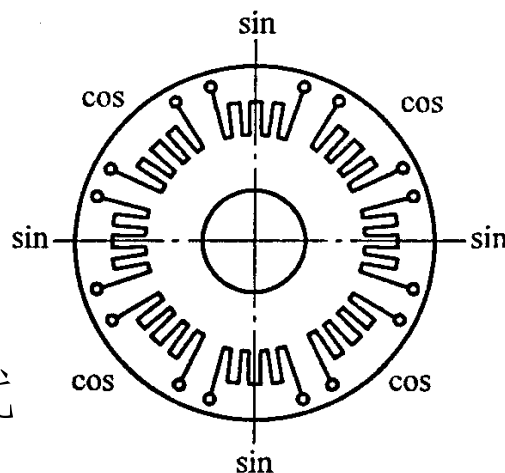
$$e_s = \sqrt{2}E_m \sin \frac{2\pi}{L} x \cos \omega t$$

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

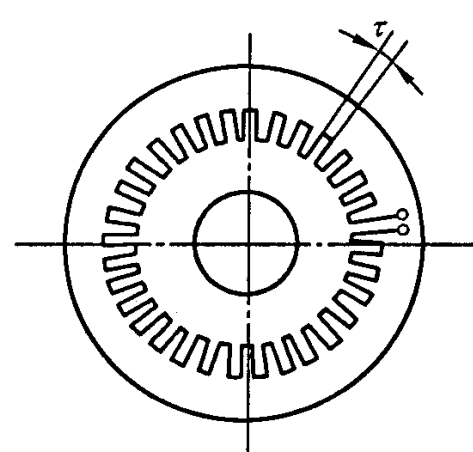
9.3.2 感应同步器的工作原理—旋转

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 τ 就是磁极之间的距离，称为极距（rad）。



(a) 定子

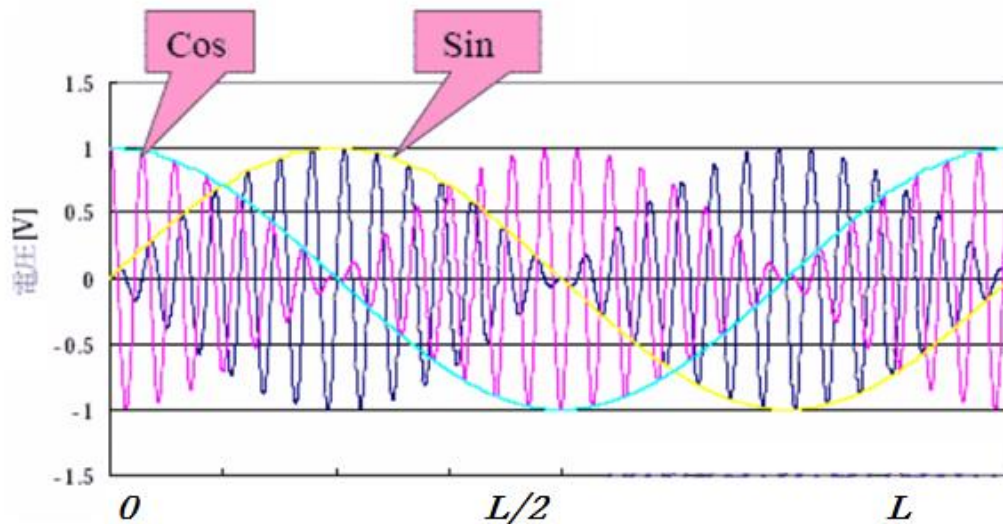


(b) 转子

$L=2\tau$ (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

$$p = N / 2 = 2\pi / L$$

9.3.2 感应同步器的工作原理—旋转



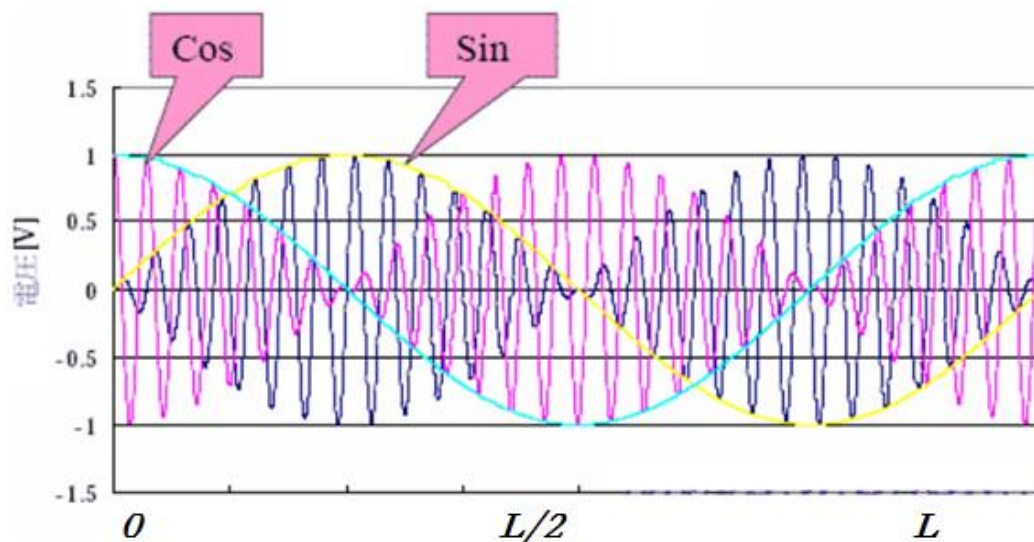
$$E_s = E_m \sin \frac{2\pi}{L} \theta = E_m \sin \frac{\pi}{\tau} \theta = E_m \sin \frac{N}{2} \theta = E_m \sin p\theta$$

$$E_c = E_m \cos \frac{2\pi}{L} \theta = E_m \cos \frac{\pi}{\tau} \theta = E_m \cos \frac{N}{2} \theta = E_m \cos p\theta$$

9.3.2 感应同步器的工作原理—旋转

❖ 感应电势的瞬时值 领先激磁电压 90° 。

若激磁电压为 $u = \sqrt{2}U \sin \omega t = U_m \sin \omega t$



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

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

9.3.2 感应同步器的工作原理

❖ 关于感应同步器感应电势的几个结论

定义电角 θ_e ，可将感应电势公式统一。

直线式感应同步器

$$\theta_e = \frac{2\pi}{L} x = \frac{\pi}{\tau} x \text{ (rad)}$$

旋转式感应同步器

$$\theta_e = p\theta = \frac{N}{2}\theta = \frac{\pi}{\tau}\theta = \frac{2\pi}{L}\theta \text{ (rad)}$$

感应电势的有效值可以重写为

$$E_s = E_m \sin\theta_e = \frac{U}{k} \sin\theta_e$$

$$E_c = E_m \cos\theta_e = \frac{U}{k} \cos\theta_e$$

9.3.2 感应同步器的工作原理

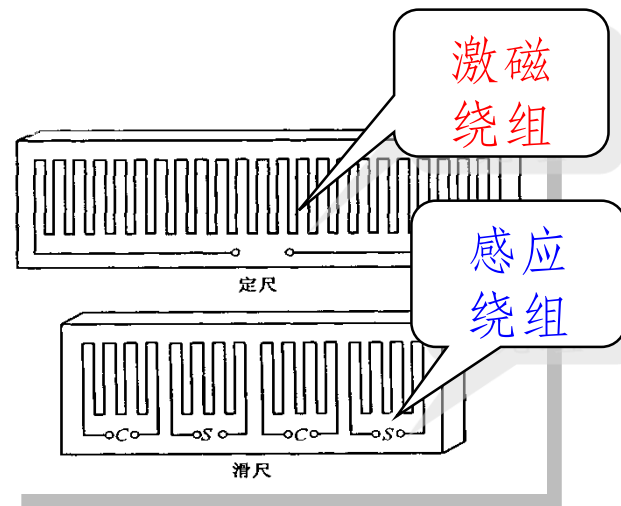
在连续绕组中给定激磁电压

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

正余弦绕组输出电势的瞬时值为

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

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

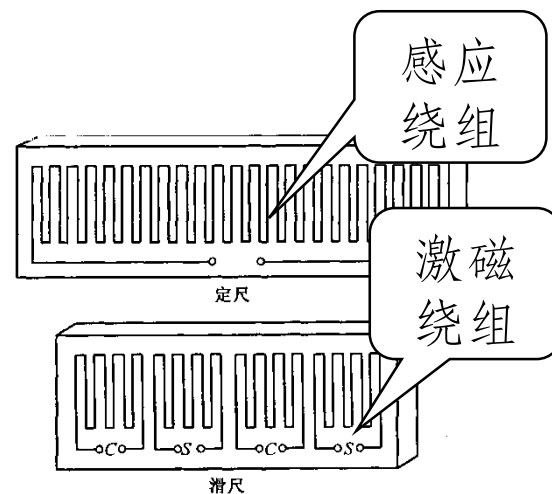


9.3.2 感应同步器的工作原理

❖ 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

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

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



❖ 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° 。一般取感应电势超前激磁电压 90° 。

9.3.3 感应同步器的信号处理方式

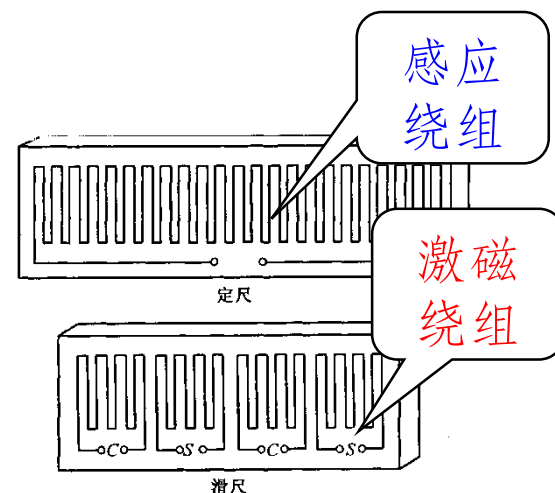
鉴相型处理方式-电势的相位来鉴别电角。

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° 的交流激磁电压

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

$$u_c = -U_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$



单相绕组上感应的电势

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

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

9.3.3 感应同步器的信号处理方式

❖ 应用叠加原理可知单相绕组总感应电势

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

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

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

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

9.3.3 感应同步器的信号处理方式

2) 单相激励式

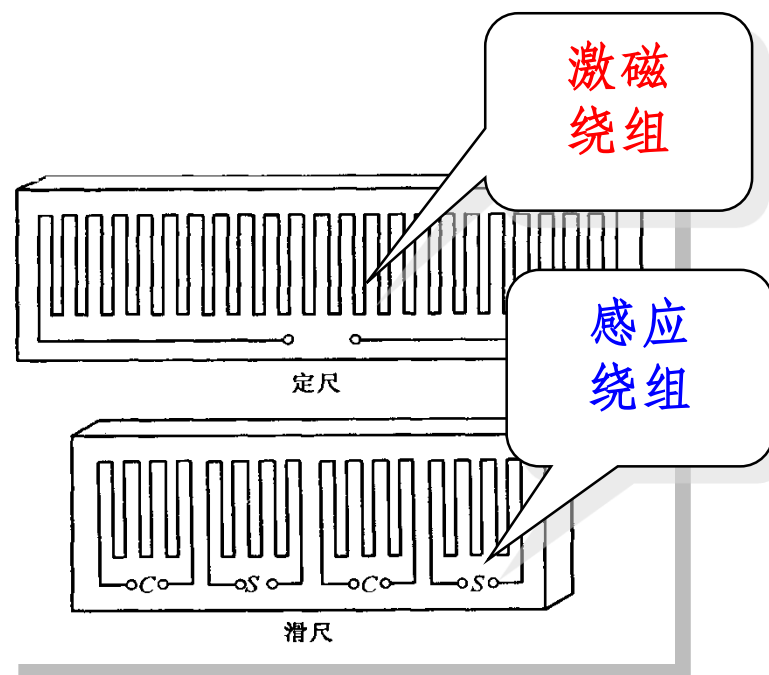
❖ 单相绕组加激励电压

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

• 正余弦绕组瞬时感应电势

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

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



9.3.3 感应同步器的信号处理方式

2) 单相激磁式

对正弦绕组电势移相 90°

$$e'_s = kU_m \sin\theta_e \sin(\omega t + 90^\circ) = kU_m \sin\theta_e \cos\omega t$$

将 e'_s 和余弦绕组输出电势相加得

$$e_2 = e'_s + e_c = kU_m \sin\theta_e \cos\omega t + kU_m \cos\theta_e \sin\omega t$$

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

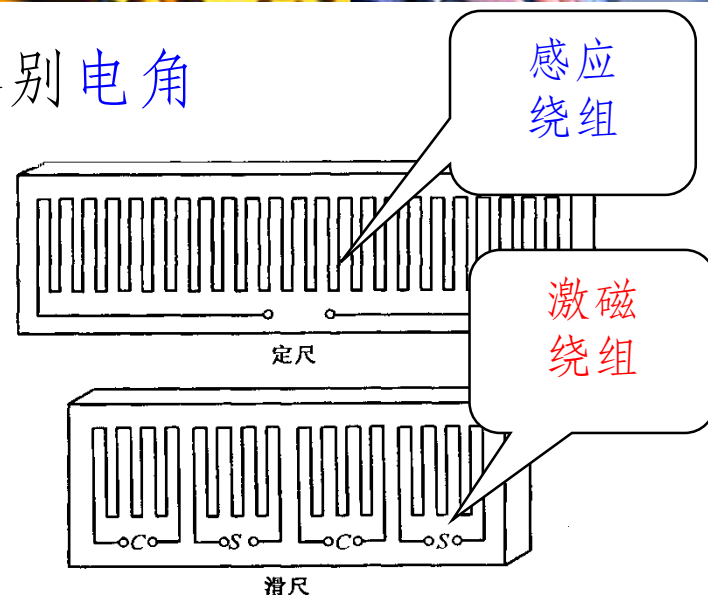
9.3.3 感应同步器的信号处理方式

鉴幅型处理方式—根据信号的幅值鉴别电角

1) 两相激磁式

给定激磁电压幅值如下

$$\begin{aligned}u_s &= U_m \cos\theta_1 \sin\omega t \\u_c &= -U_m \sin\theta_1 \sin\omega t\end{aligned}$$



θ_1 为指令位移角，是已知的。单相连续绕组的总感应电势为

$$e_2 = e_{2s} + e_{2c} = kU_m \cos\theta_1 \sin\theta_e \cos\omega t - kU_m \sin\theta_1 \cos\theta_e \cos\omega t$$

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

9.3.3 感应同步器的信号处理方式

2) 单相激磁式

给定激磁电压

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

在正弦绕组和余弦绕组的感应电势分别为

$$e_s = k U_m \sin \theta_e \cos \omega t$$

$$e_c = k U_m \cos \theta_e \cos \omega t$$

送入函数变压器或其他装置中处理

$$e'_s = k U_m \sin \theta_e \cos \theta_1 \cos \omega t$$

$$e'_c = -k U_m \cos \theta_e \sin \theta_1 \cos \omega t$$

送入加法器相加后作为输出信号输出

$$e_2 = e'_s + e'_c = k U_m \sin(\theta_e - \theta_1) \cos \omega t$$

9.3.3 感应同步器的信号处理方式

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

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

利用什么方法能将输出信号的幅值或者相位转换为角度信息？

9.3.4 鉴相型数字编码装置

一、鉴相型编码原理

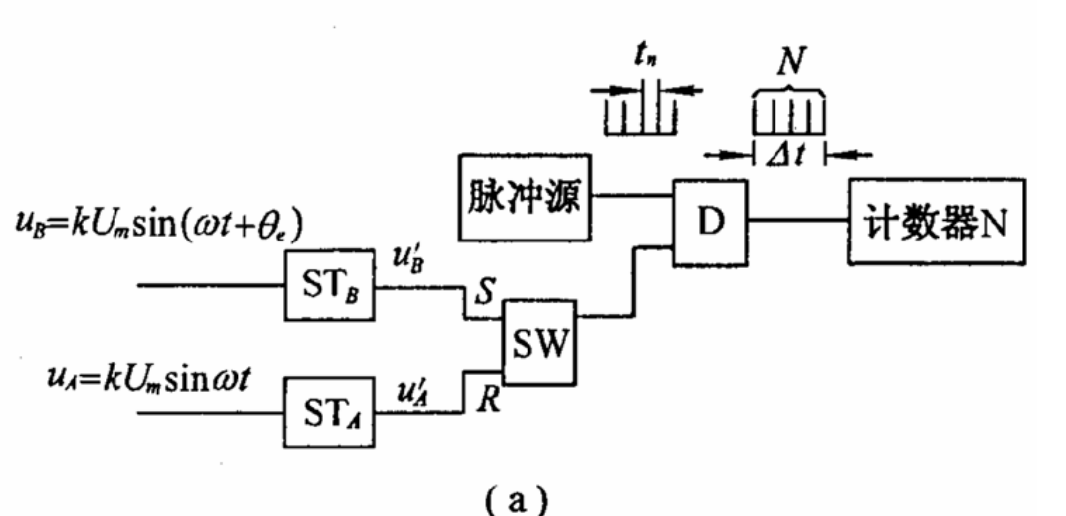
将被测信号

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

与基准信号

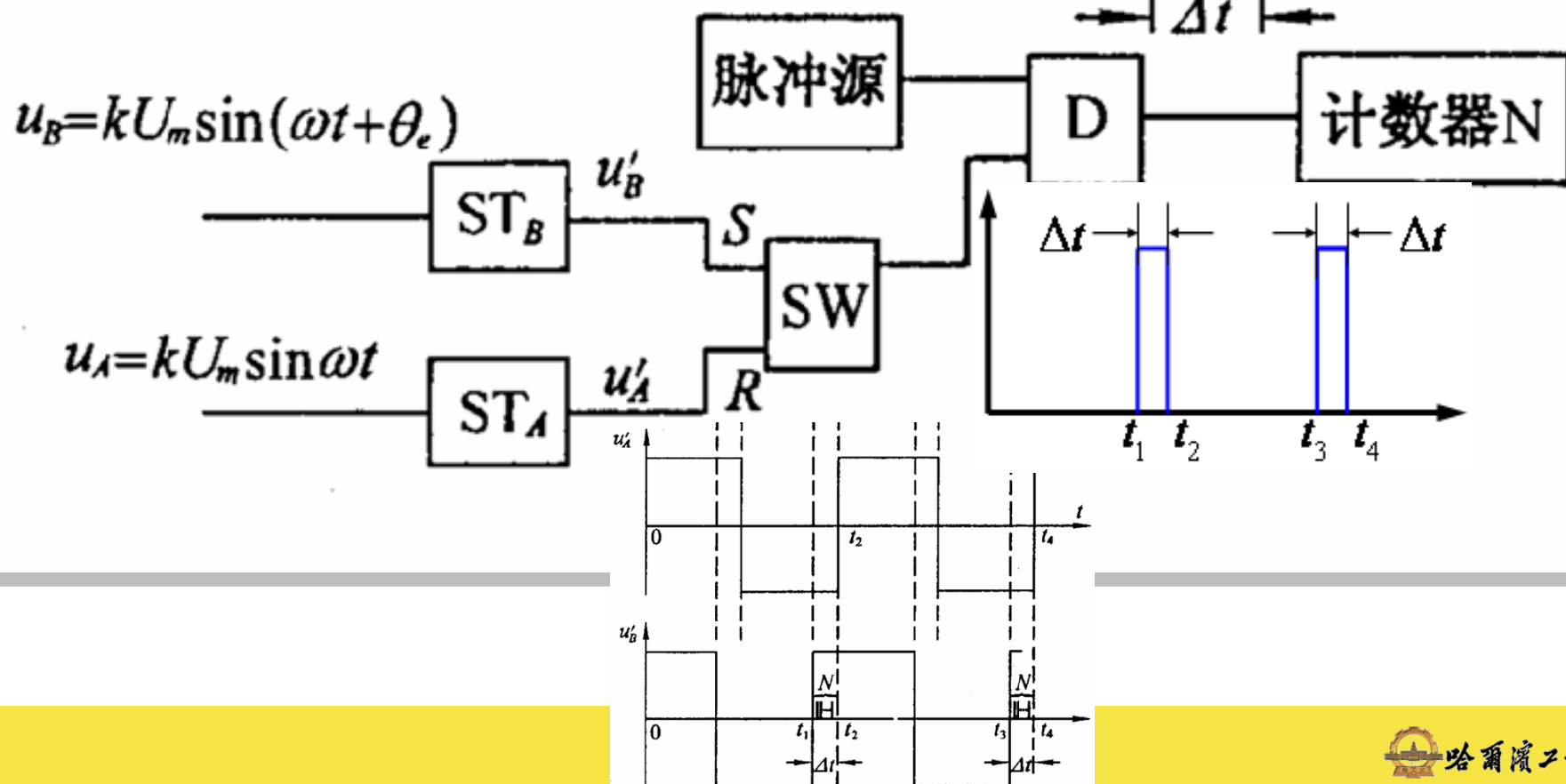
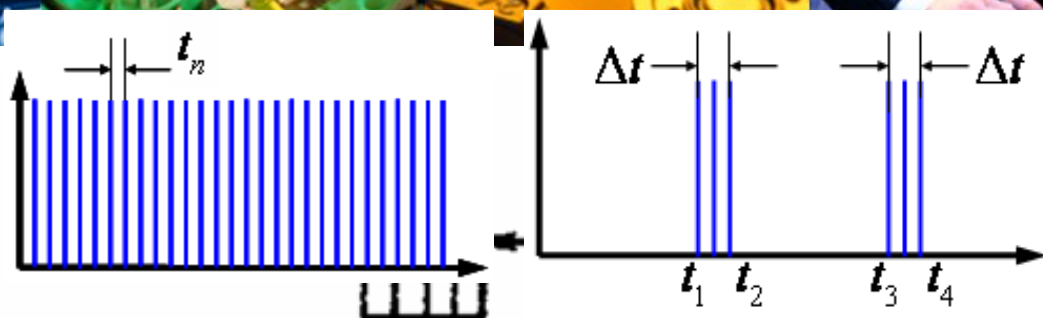
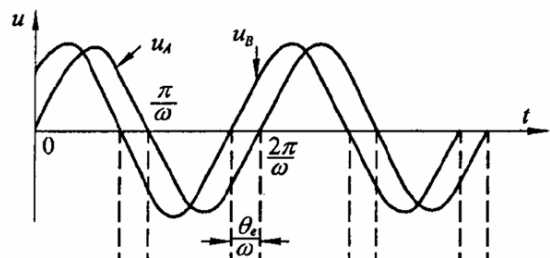
$$e_{20} = kU_m \sin \omega t$$

的相位进行比较，求出相位差 θ_e 并转换成脉冲个数

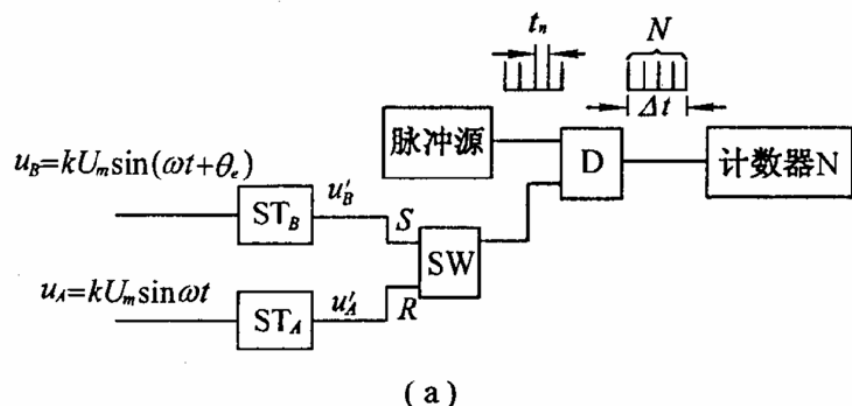


整形电路，双稳态触发器，上升沿触发。

9.3.4 鉴相型数字编码装置

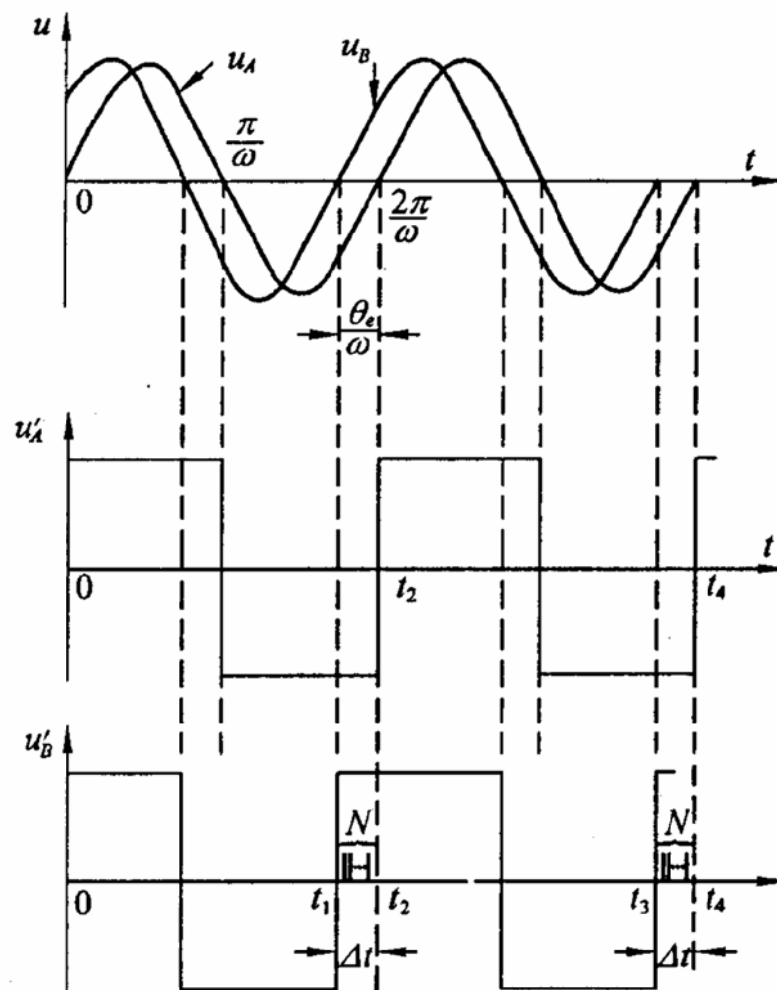


9.3.4 鉴相型数字编码装置



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

如何由计数值求取角度？



9.3.4 鉴相型数字编码装置

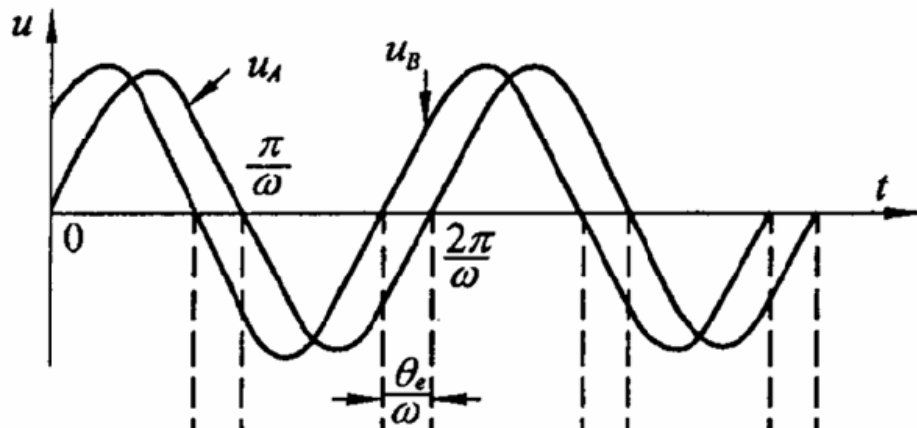
$$u_A = kU_m \sin \omega t$$

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



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

曲线 u_B 是由曲线 u_A 向左平移 θ_e / ω 得到的。



$$\Delta t = \theta_e / \omega$$

$$\Delta t = Nt_n$$

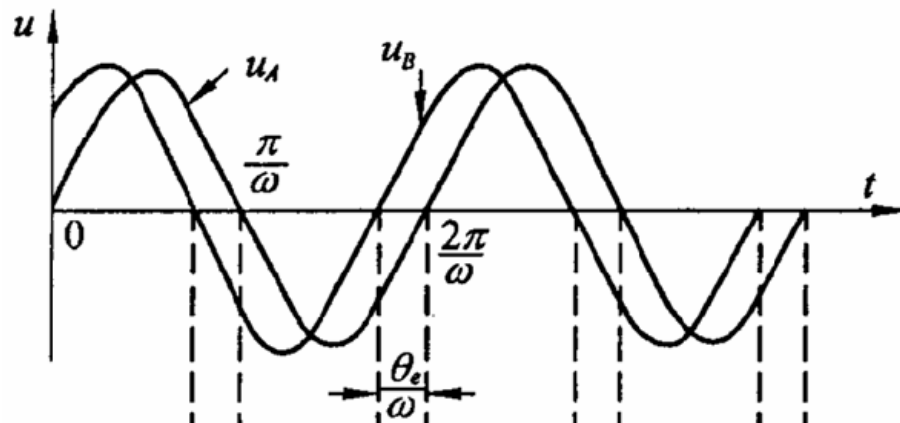


$$\theta_e = \omega Nt_n$$

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？

9.3.4 鉴相型数字编码装置



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

$$\Delta\theta = \frac{t_n}{T} L = \frac{f}{f_n} L$$

如何提高分辨率和测量精度？

9.3.4 鉴相型数字编码装置

二、鉴相型数显表

1. 位移变成电信号

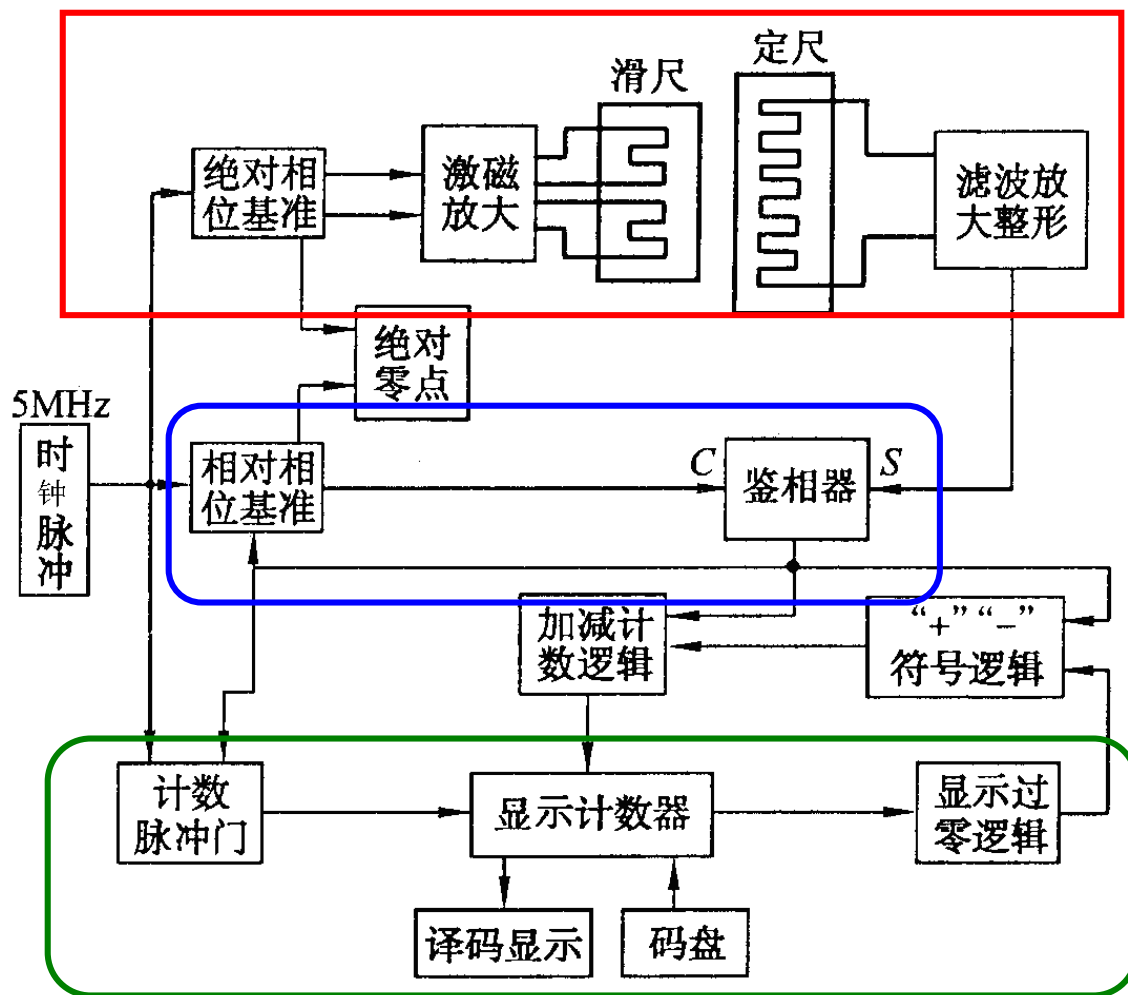
时钟脉冲、绝对相位基准、激磁、感应同步器和滤波整形电路。

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。

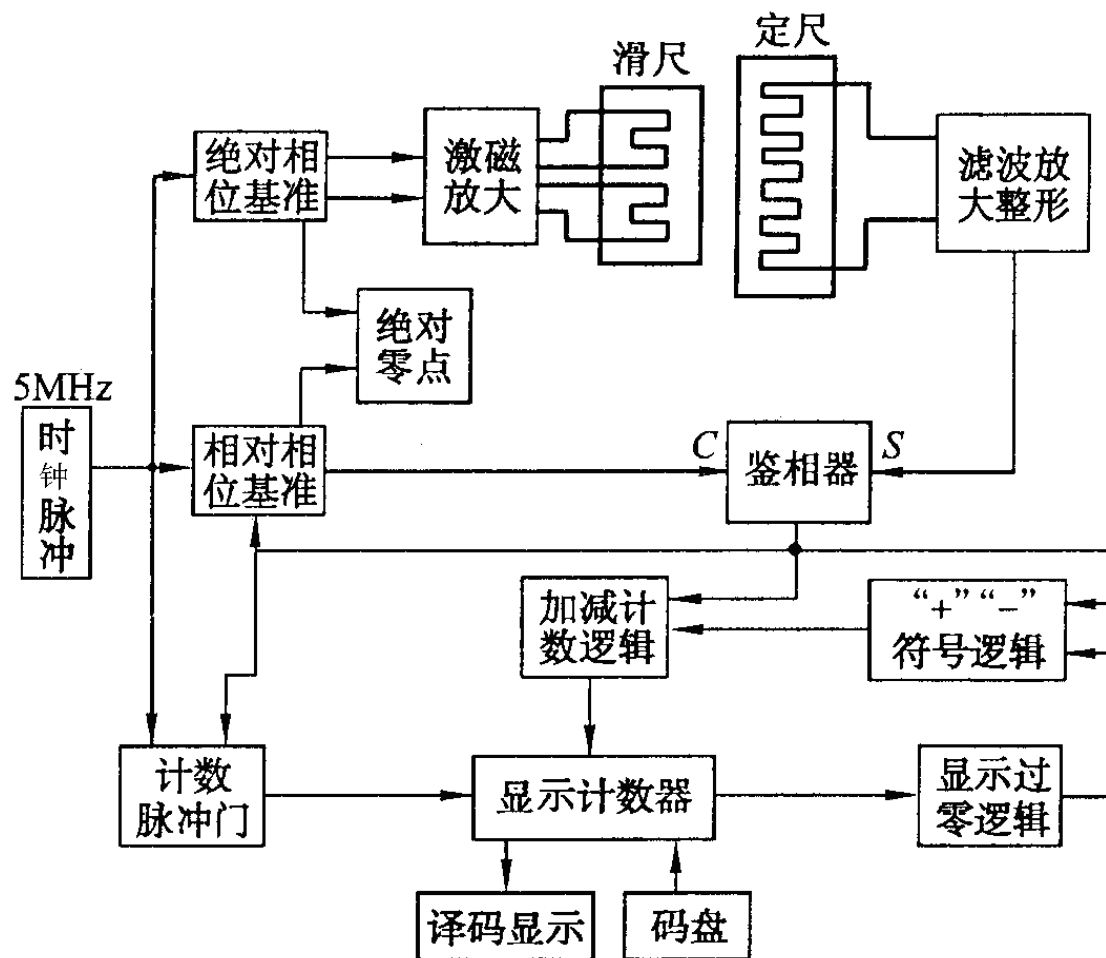


9.3.4 鉴相型数字编码装置

二、鉴相型数显表

5M时钟，2000分
频后作为激磁频
率，那么对应的
分辨率是多少？

位置信号的形式？



9.3.5 鉴幅型数显表

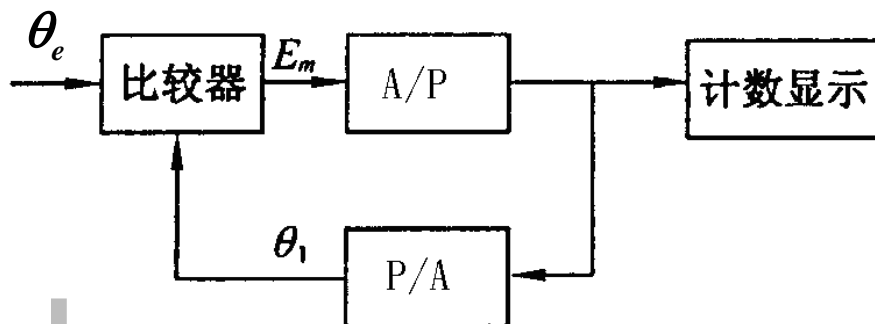
两相激磁式直线感应同步器，激磁电压

$$u_s = U_m \cos \theta_1 \sin \omega t$$

$$u_c = -U_m \sin \theta_1 \sin \omega t$$

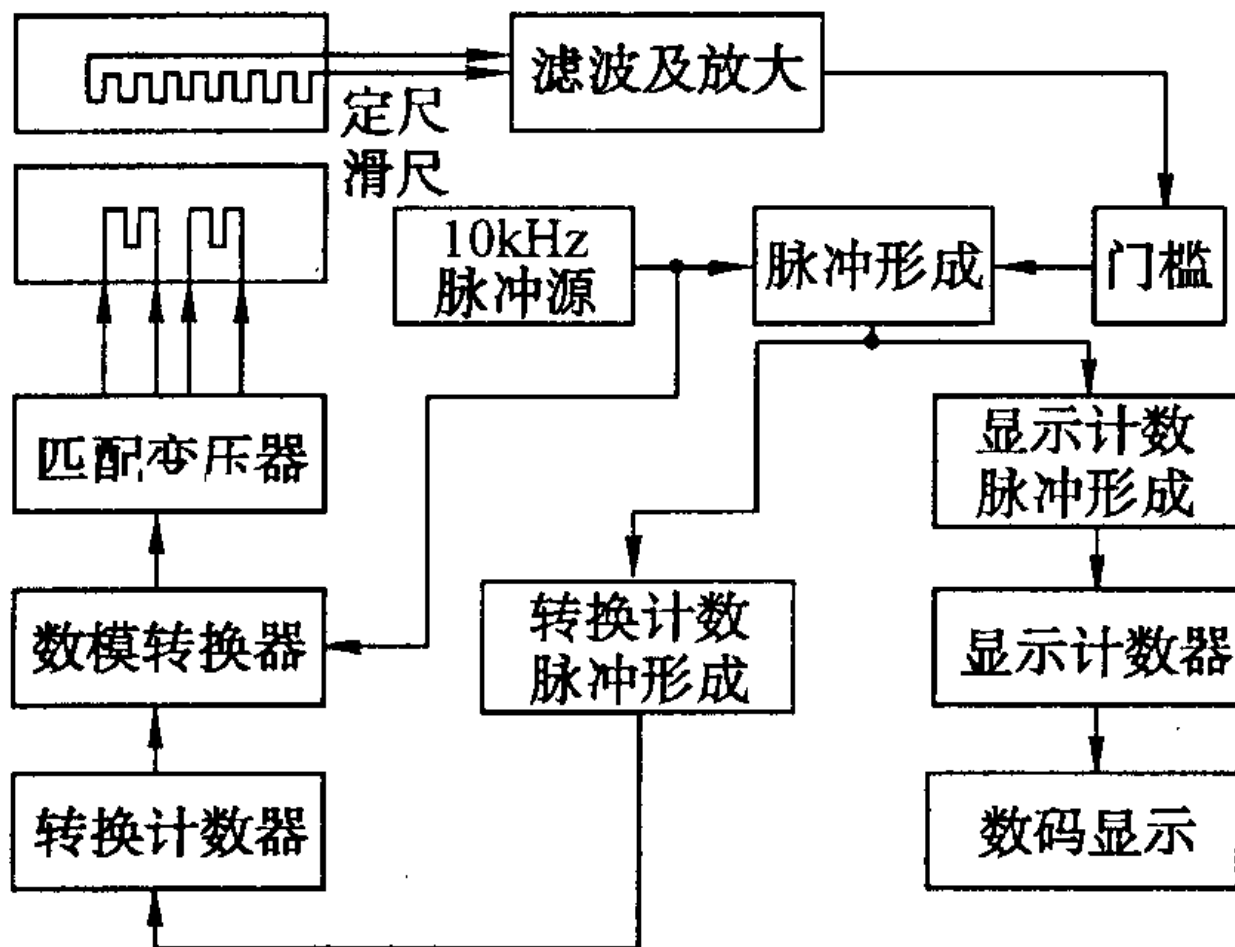
输出电势的幅值

$$E_m = kU_m \sin(\theta_e - \theta_1)$$



- ❖ 指令角 θ_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 θ_1 。

9.3.5 鉴幅型数显表



9.3.8 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 $\pm 1\mu\text{m}$ ，分辨率可达 $0.05\mu\text{m}$ ，重复性误差可达 $0.2\mu\text{m}$ 。直径为300mm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。

9.3.8 感应同步器的优缺点

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。

9.3.8 感应同步器的优缺点

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。

9.3.8 感应同步器的优缺点

❖ 感应同步器的缺点：

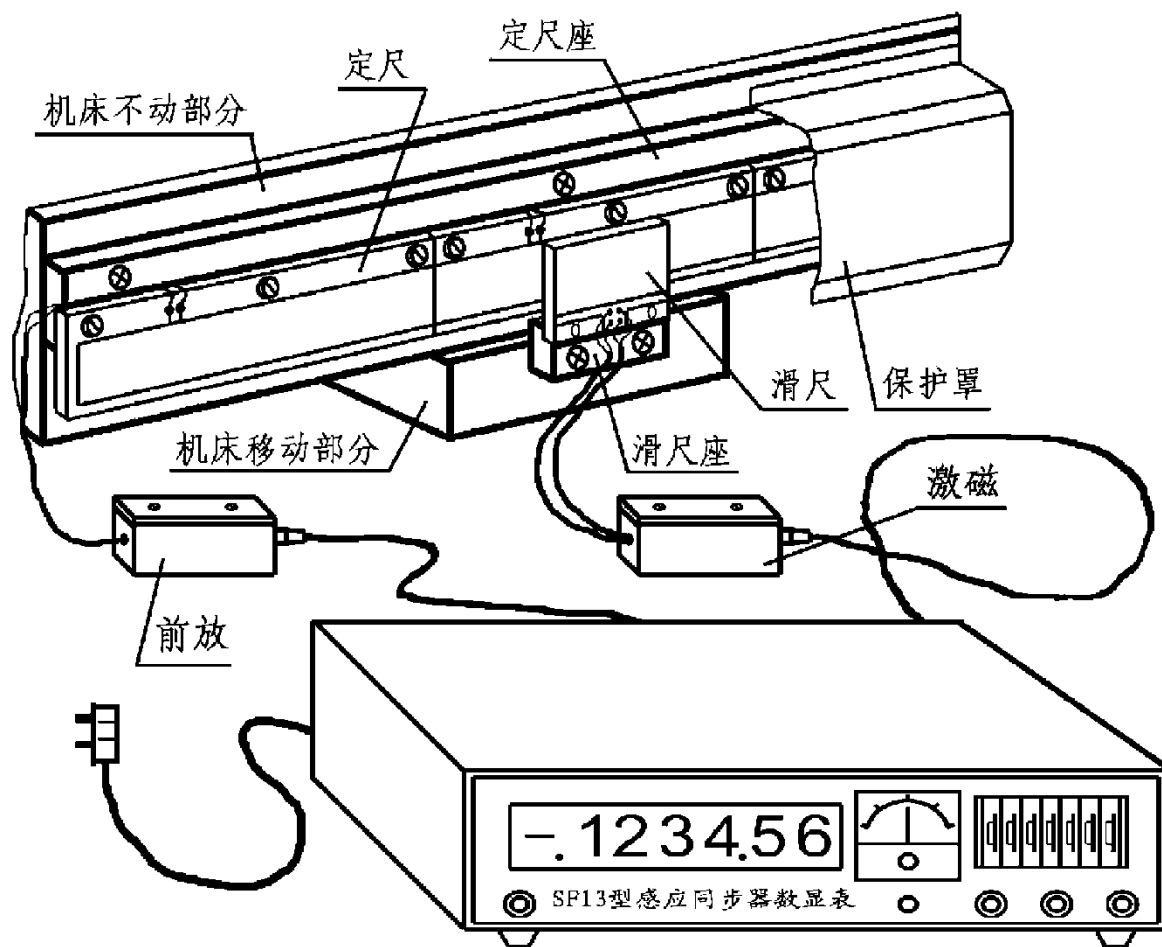
1. 输出信号弱，信号处理麻烦，配套信号处理设备（数显表）复杂，价格高。
2. 多数为分装式，安装时精度相对较高
3. 使用时，必须进行电路参数的调整，才能满足精度要求
4. 单通道多堆极感应同步器输出信号为增量方式，必须进行寻零操作

9.3.9 感应同步器的使用注意事项

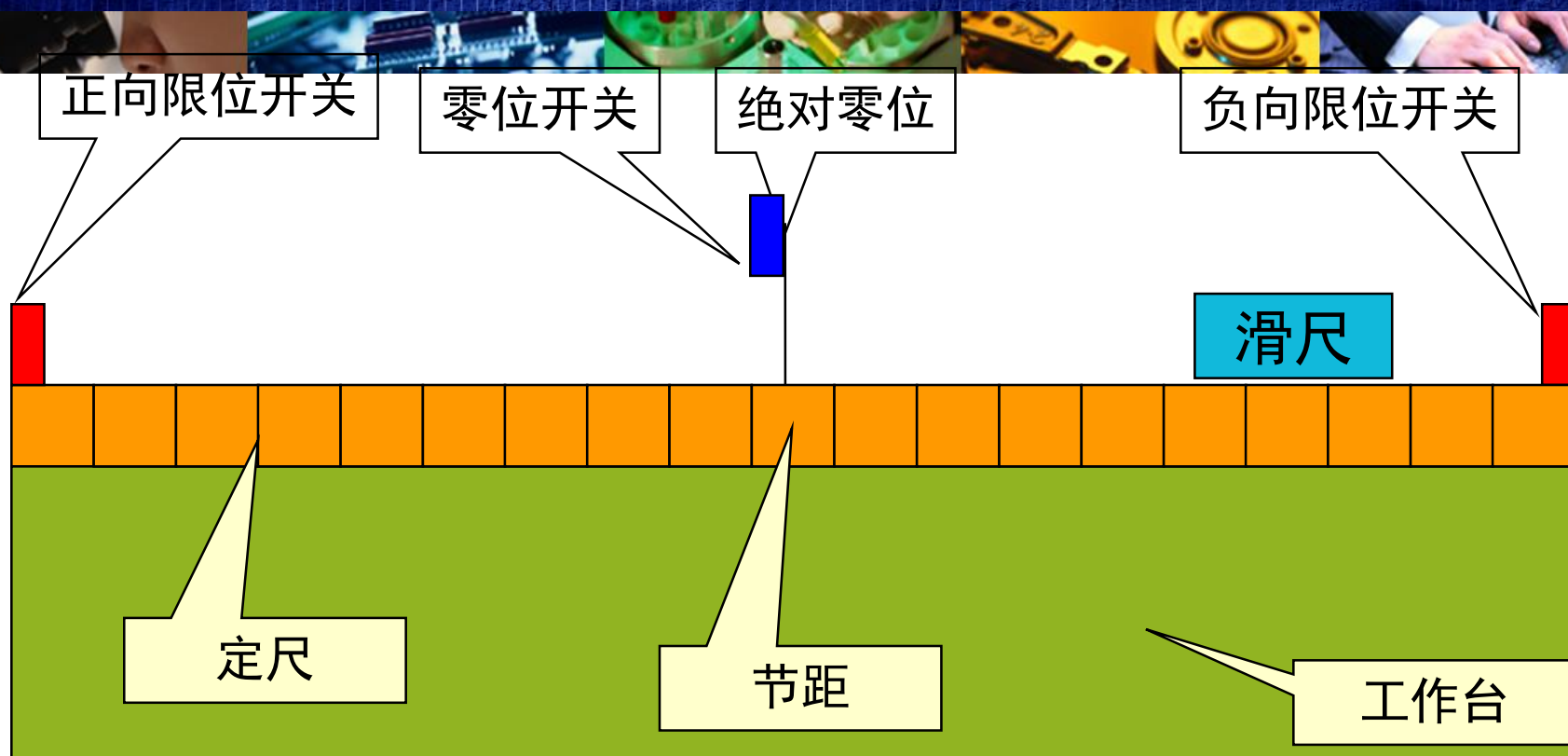


- ❖ 安装时，定转子之间距离要准确，距离约0.25mm
- ❖ 长距离测试拼接时要保证拼接精度
- ❖ 信号线要用双绞屏蔽线，避免和强电平行走线，要正确接地
- ❖ 单通道多极感应同步器要设计寻零功能
- ❖ 输出信号长距离传输时，在感应同步器测要加前置放大电路
- ❖ 用前要检查感应同步器的绝缘，避免铁削等进入
- ❖ 要采取措施抑制大功率器件的电磁干扰

9.3 感应同步器的应用



9.3 感应同步器的应用

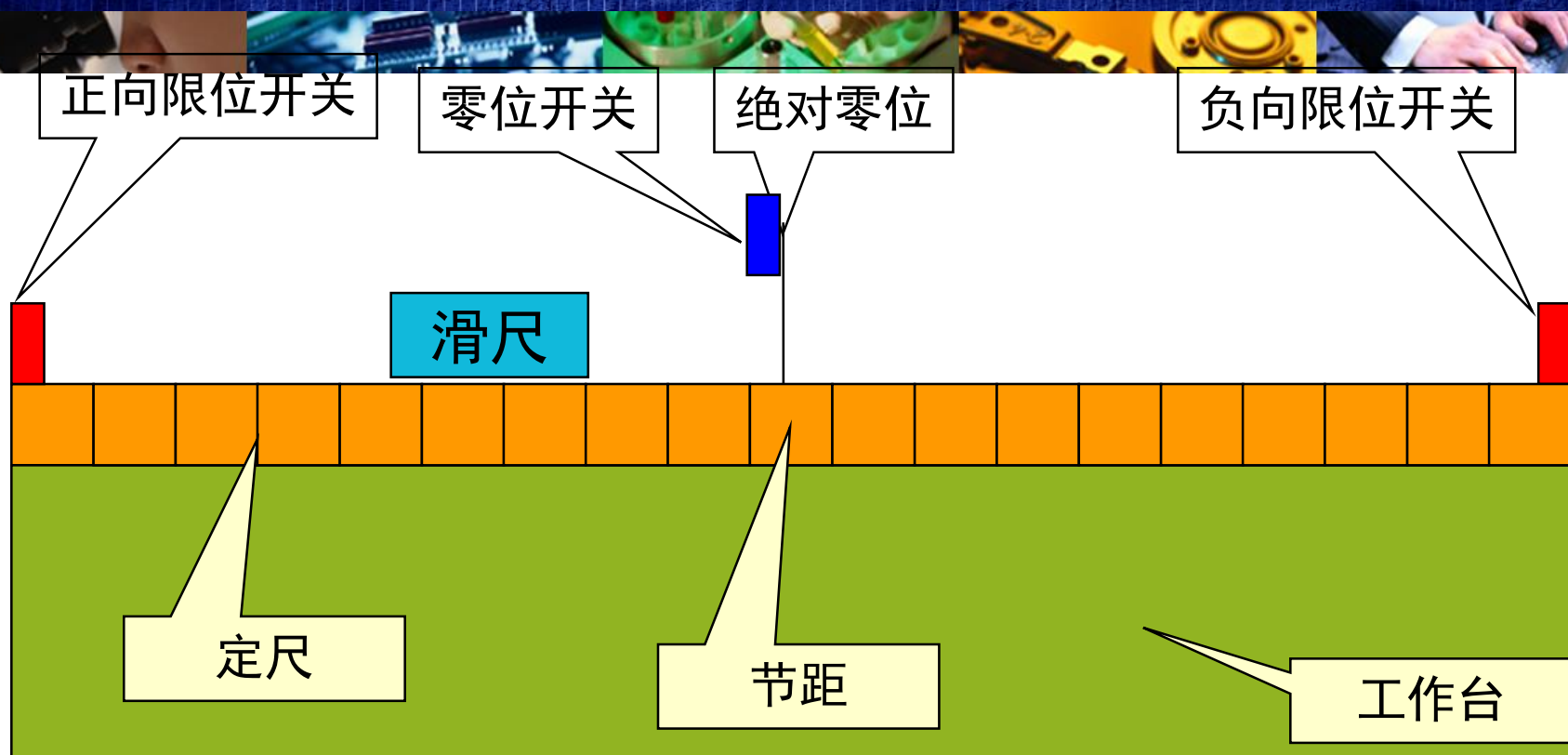


00.000



自动寻零方法

9.3 感应同步器的应用

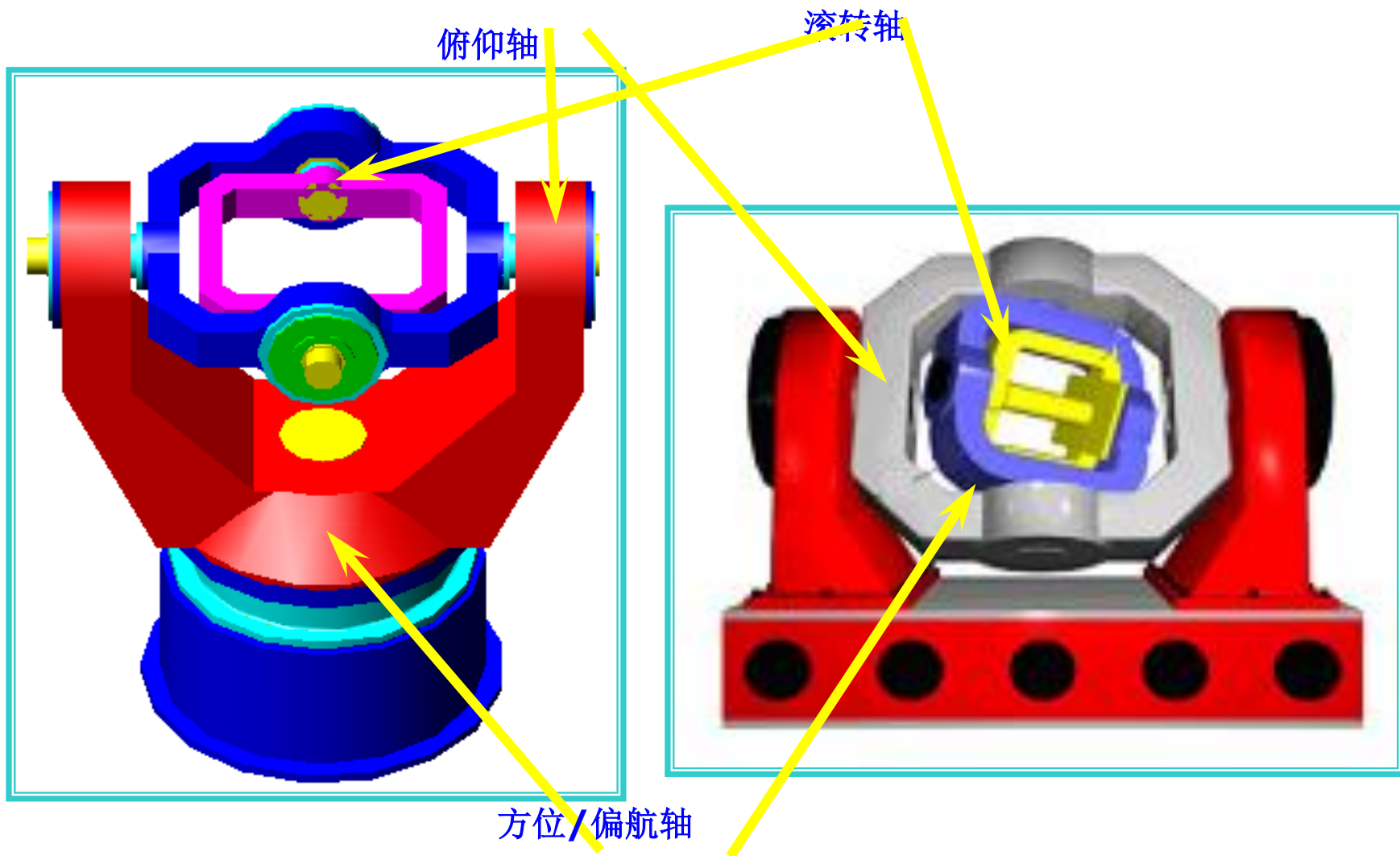


00.000

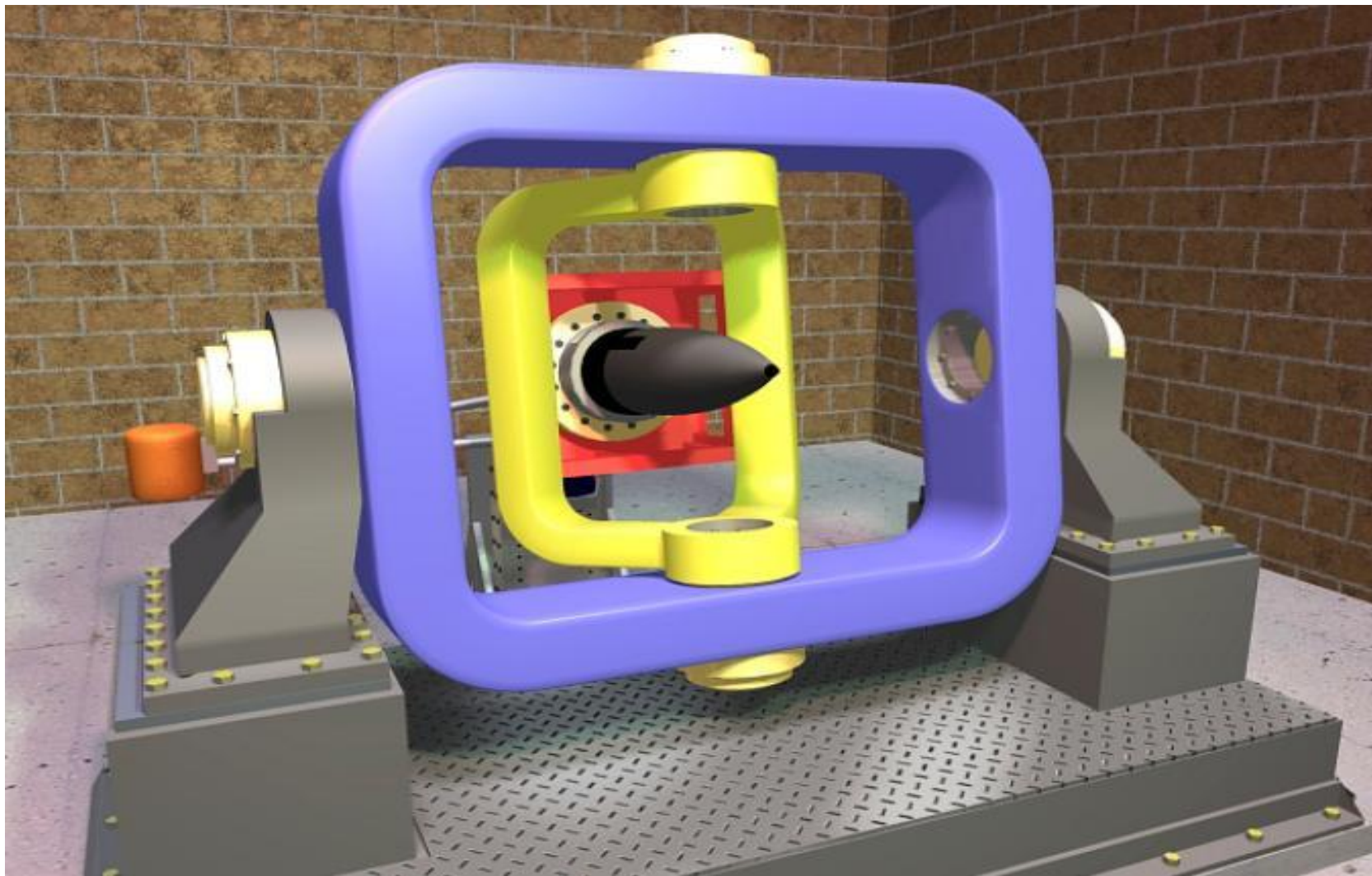
自动寻零方法



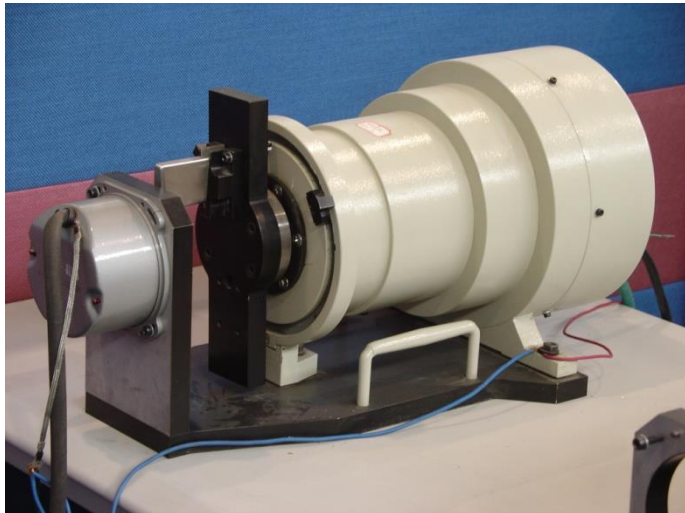
转台



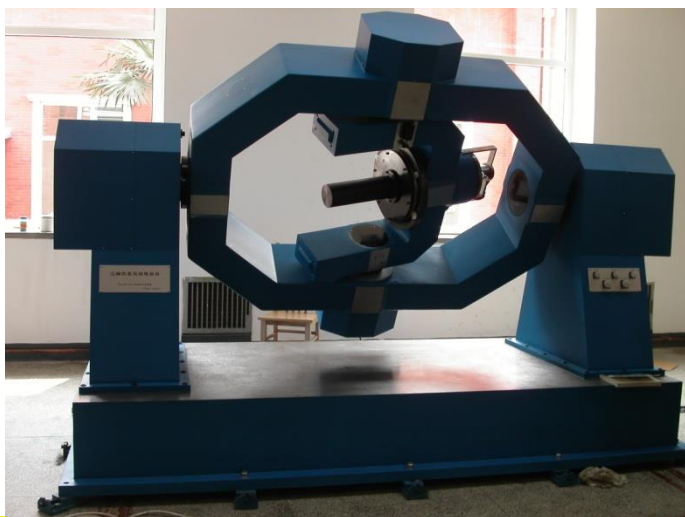
转台的应用 ——空空导弹导引头以仿真转台测试



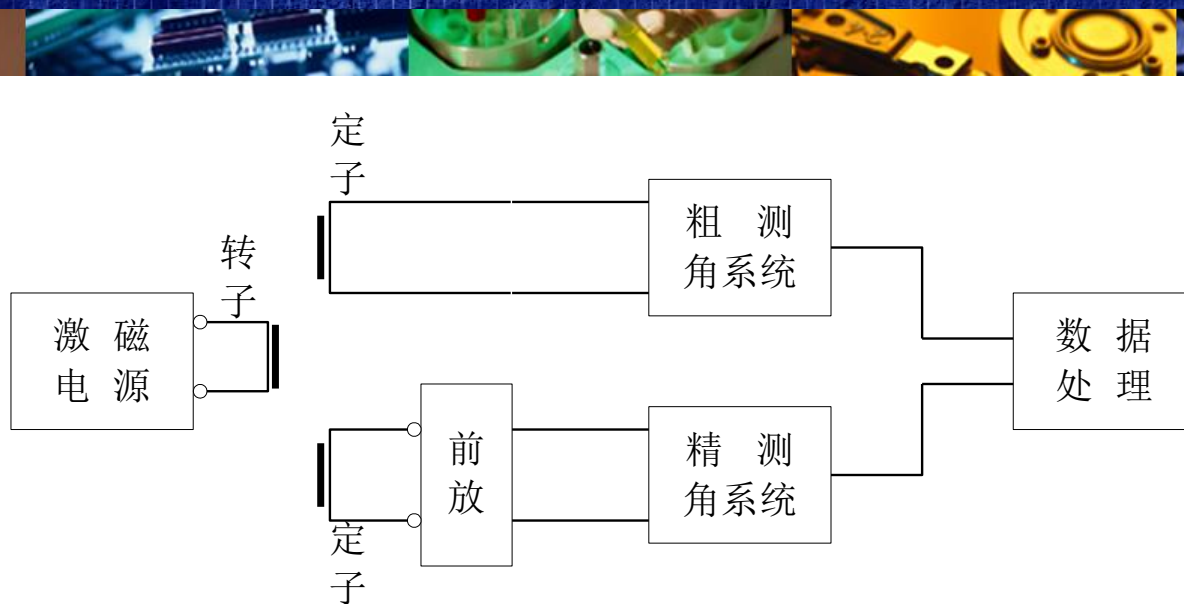
转台



转台

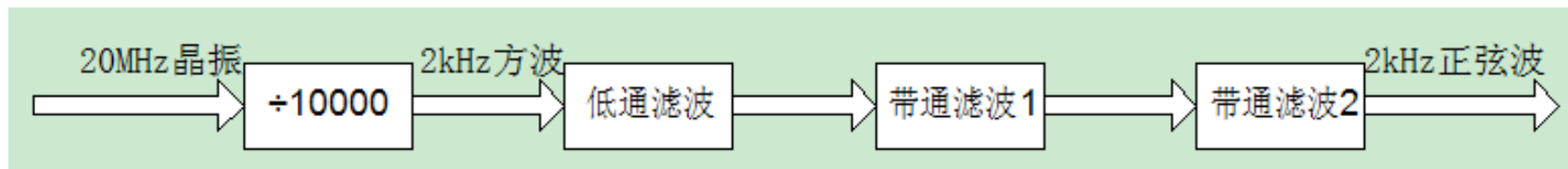


旋转变压器、感应同步器测角系统典型应用举例



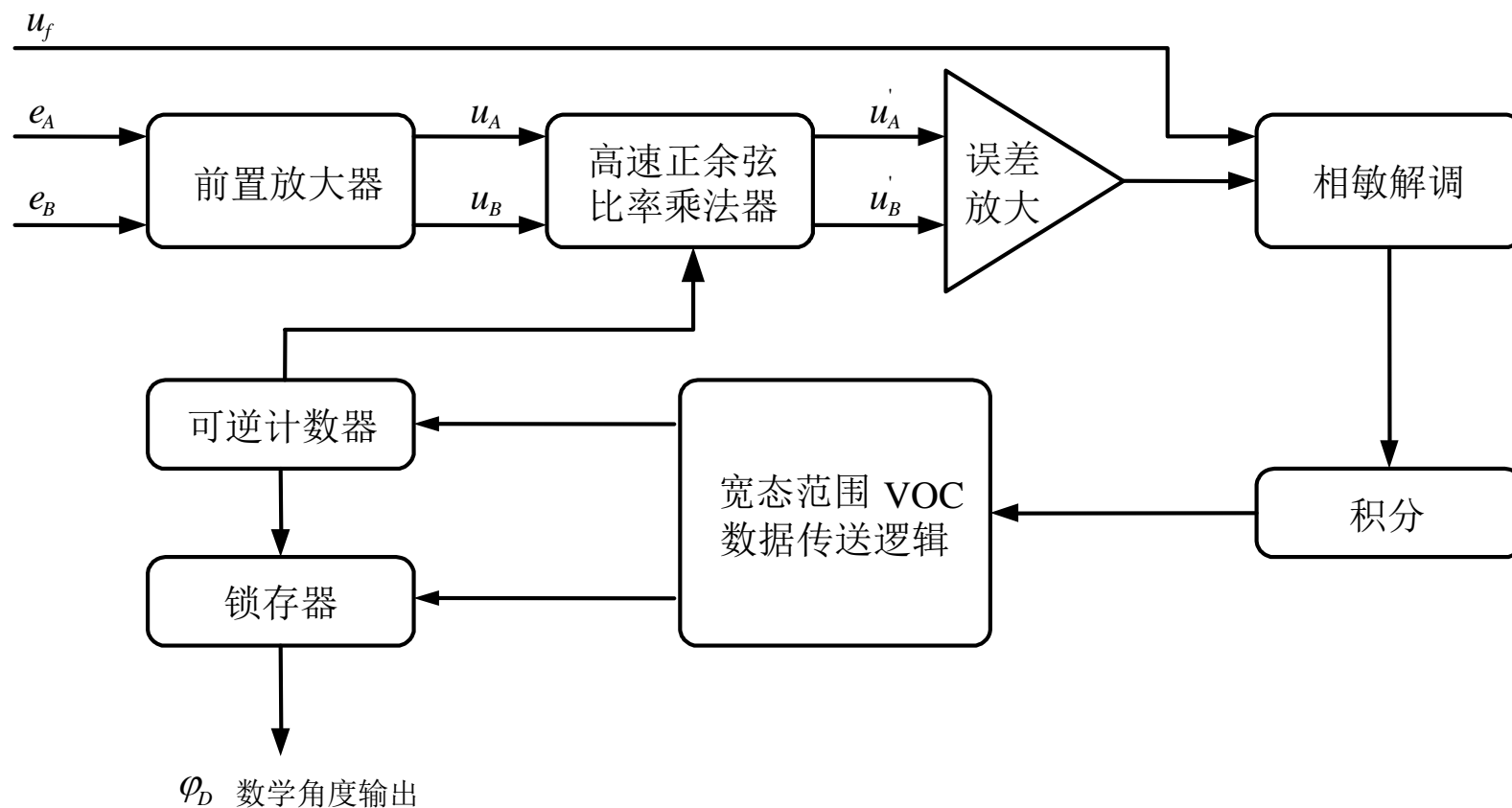
- ❖ 旋转变压器和感应同步器组成的粗—精双通道测角系统。
- ❖ 粗测采用一对极旋转变压器，精测采用180对极感应同步器。
- ❖ 采用单相激磁双相输出鉴幅工作方式。
- ❖ 系统主要由三部分组成：激磁电源部分、轴角变换部分、数据处理部分。

旋转变压器、感应同步器测角系统



- ❖ 为降低失真度，采用多级滤波。
- ❖ 带温度补偿的20MHz晶振经三极管放大变成TTL电平，再经10000分频，产生2kHz方波，再经滤波，产生2kHz低失真度的正弦波作为感应同步器的激磁信号。
- ❖ 为保证激磁信号的稳定，所选的都是低温度系数的元件。经测试，激磁的失真度低于0.05%。

旋转变压器、感应同步器测角系统



- ❖ 采用连续绕组激磁运行方式与AD2S80构成跟踪鉴幅型测角系统

旋转变压器、感应同步器测角系统

❖ 激磁信号

$$u = U \sin \omega t$$

❖ 前置放大器输出

$$\begin{cases} u_A = k_v U \cos \theta_D \cos \omega t \\ u_B = k_v U \sin \theta_D \cos \omega t \end{cases}$$

❖ 乘法器输出

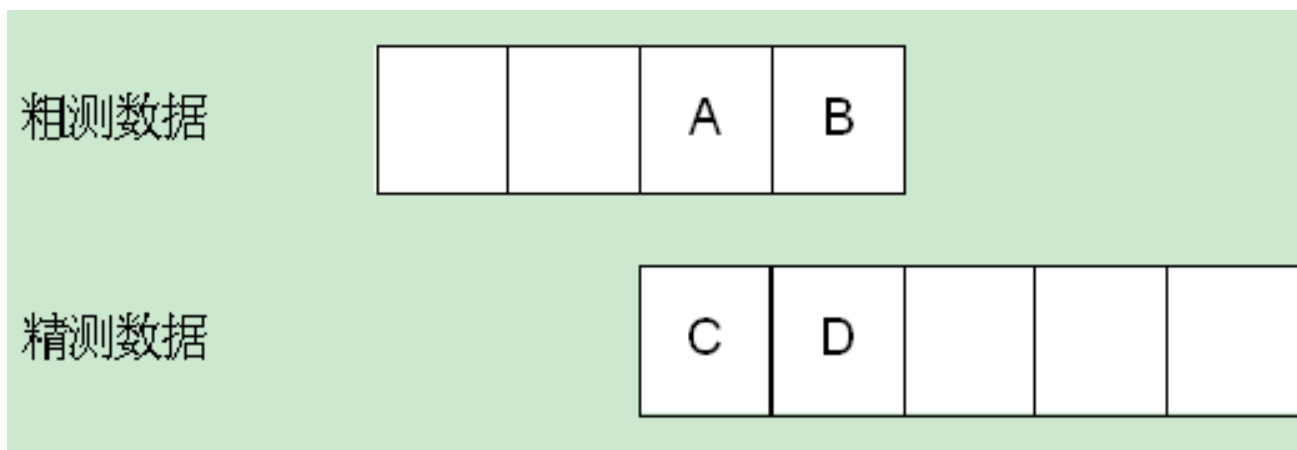
$$\begin{cases} u_A' = u_A \sin \varphi_D = k_v U \cos \omega t \cos \theta_D \sin \varphi_D \\ u_B' = u_B \cos \varphi_D = k_v U \cos \omega t \sin \theta_D \cos \varphi_D \end{cases}$$

❖ 误差放大器输出

$$\begin{aligned} u_e &= k_e (u_A' - u_B') \\ &= k_e k_v \cos \omega t \sin(\phi_D - \theta_D) \\ &= k U \cos \omega t \sin(\phi_D - \theta_D) \end{aligned}$$

旋转变压器、感应同步器测角系统

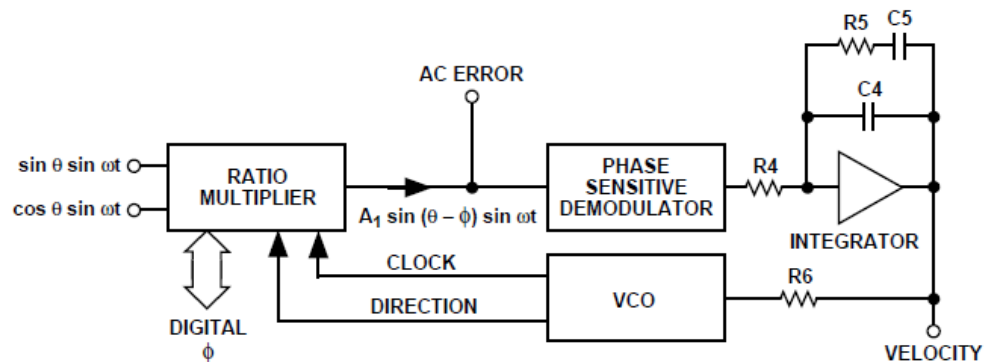
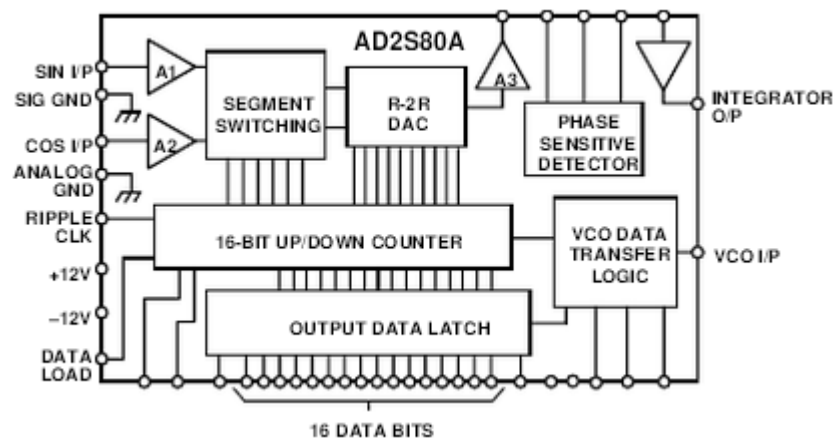
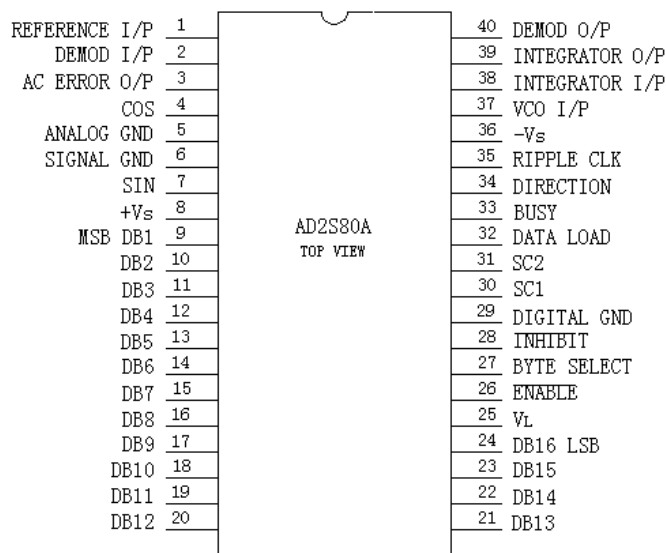
180对极感应同步器与旋转变压器测角精粗耦合算法举例



- ❖ A、C奇偶相同时，A不修正
- ❖ A、C奇偶不同时，对A进行加1或减1修正
 - $D-B < 0$ 时，A位加1
 - $D-B > 0$ 时，A位减1

感应同步器常用处理芯片

- AD2S80系列,基于鉴幅工作原理,输出信号为并行数字信号,转换精度10, 12, 14, 16位。



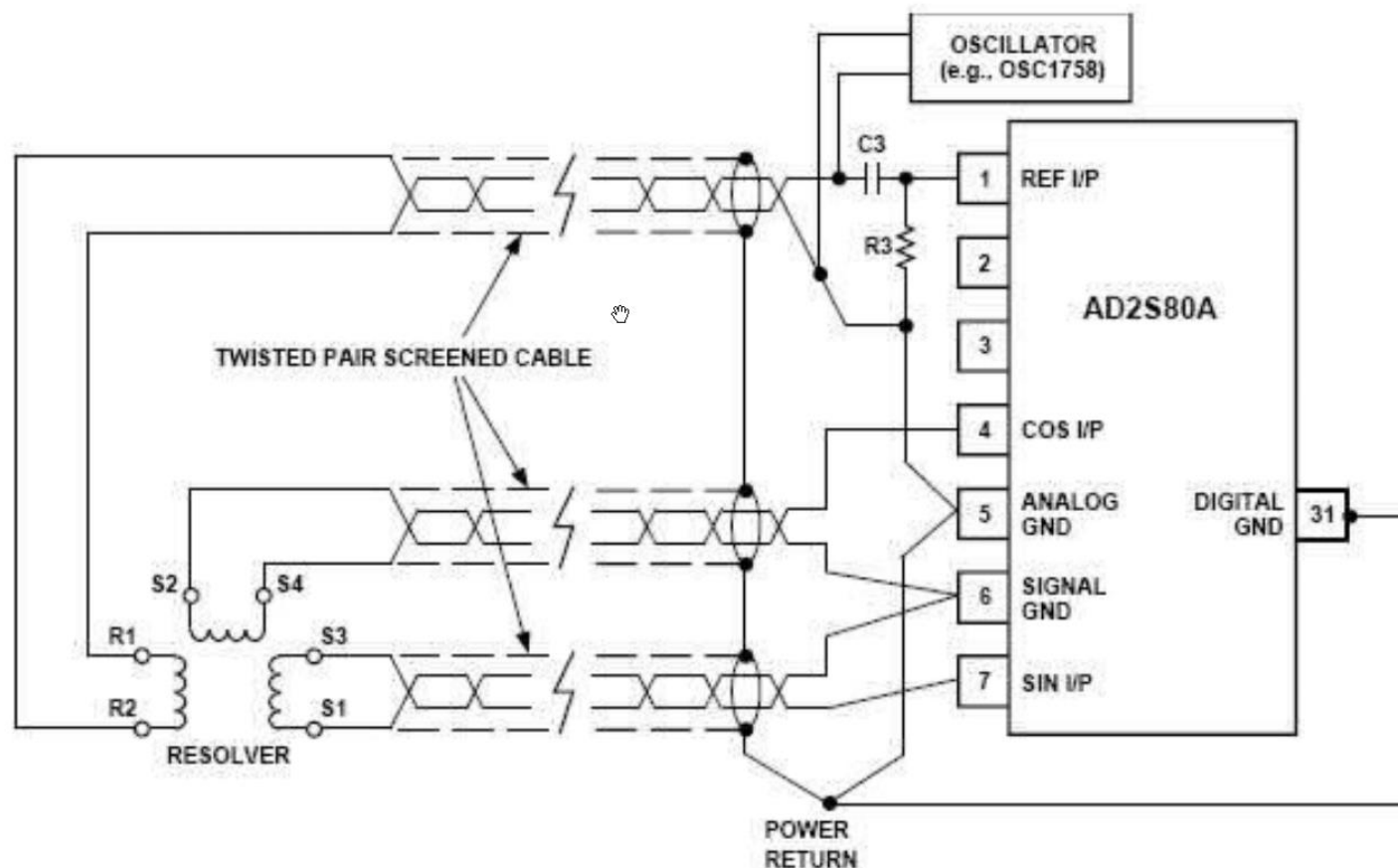
感应同步器常用处理芯片



- ❖ 10位、12位、14位和16位的分辨率。
- ❖ 输出并行二进制数。
- ❖ 连续输出数据而没有转换延迟。
- ❖ 用户可通过外围阻容元件的选择来改变带宽、最大跟踪速度等动态性能。
- ❖ 能产生与转速成正比的模拟信号，可代替传统的测速发电机，提供高精度的速度信号。
- ❖ 具有过零标志信号和旋转方向信号。

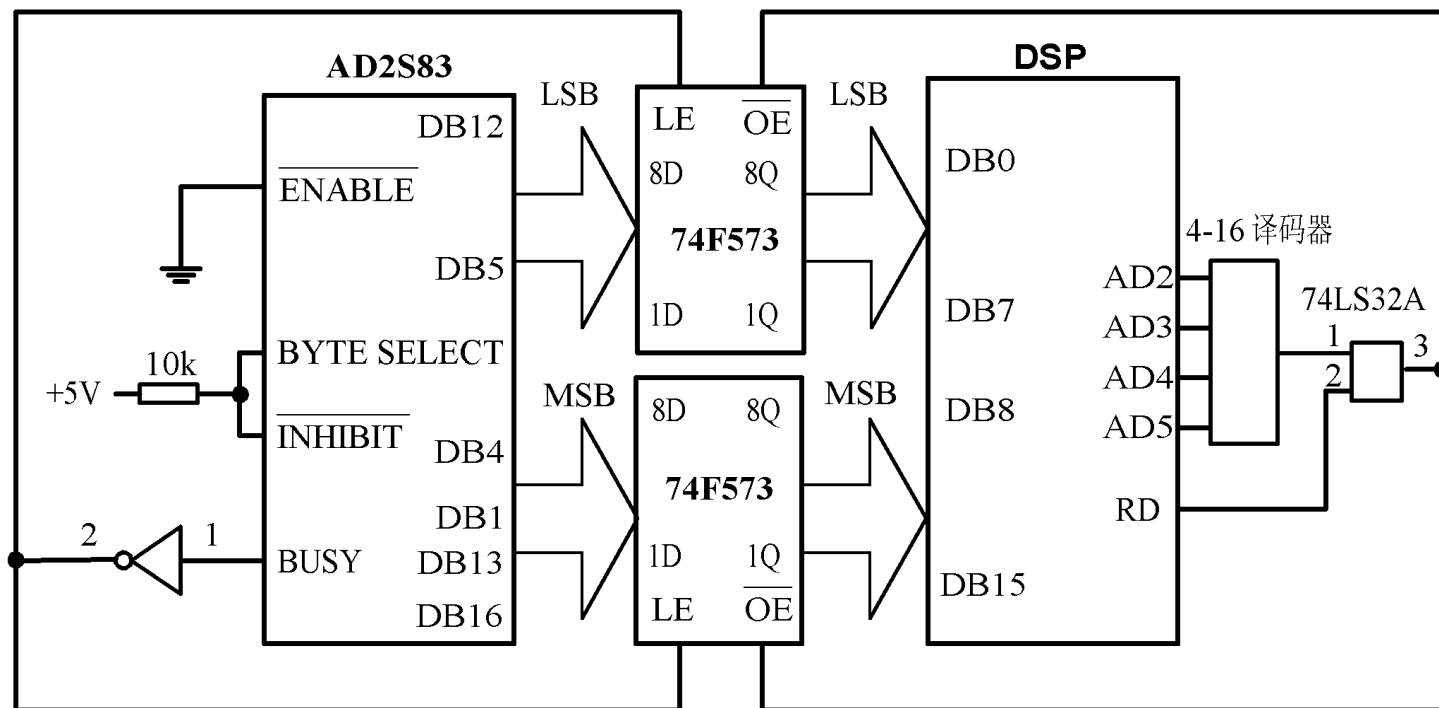
感应同步器常用处理芯片

❖ 感应同步器接线方式



感应同步器常用处理芯片

❖ AD2S80系列芯片与DSP的接口电路举例

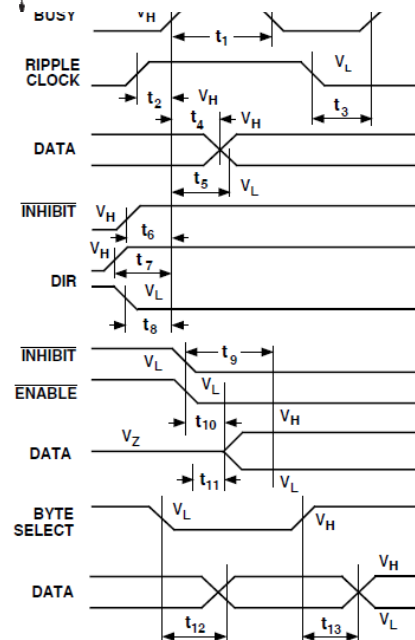
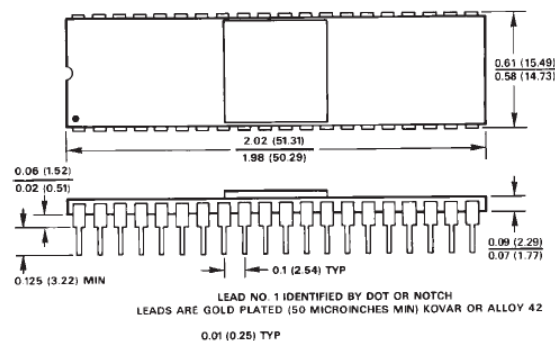


感应同步器常用处理芯片

❖ 设计电路时注意事项

- 各管脚的功能定义
- 输入输出电压要求
- 激励频率范围
- 外围电路设计, 参数计算方法
- 电路的时序
- 响应速度、带宽
- 封装形式
- 使用环境

40-Pin Ceramic DIP (D) Package



44-Terminal LCC (E) Package

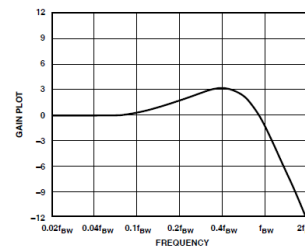
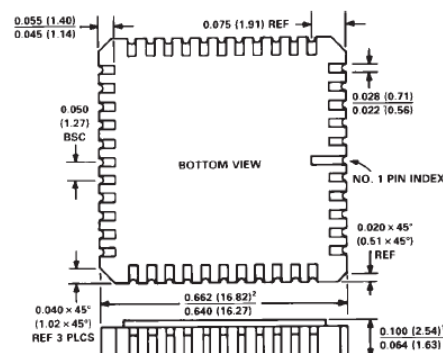
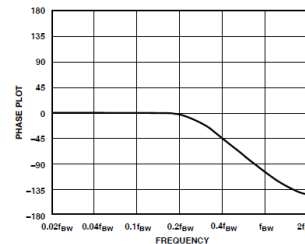


Figure 4. AD2S80A Gain Plot



Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn

