



自动控制实践I

小功率同步电动机

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 同步电动机概述
- 2 永磁式同步电动机
- 3 磁阻式同步电动机
- 4 磁滞式同步电动机
- 5 电磁减速式同步电动机

1 同步电动机概述

- 同步电机和感应电机(异步电机)一样是一种常用的交流电机
- 同步电机的转速和磁场转速相同，与定子电流频率有严格的比例关系。



1 同步电动机概述

- 同步电机的应用

- n 同步发电机：汽轮发电机和水轮发电机

- n 同步电动机：广泛应用于转速恒定的装置中

- n 同步调相机：用于提高功率因数

- 同步电动机历来是以转速与电源频率保持严格同步著称。电源频率保持恒定，同步电动机的转速不变。

- 优点：

- n 转速与电压频率严格同步；

- n 功率因数可达到**1.0**，可以获得超前相角；

- 存在的问题：

- n 启动困难；

- n 重载时有震荡，甚至存在失步危险；

1 同步电动机概述

在传真机、计时或记录装置中，或者在纺织等多机同步的应用领域，往往需要一种能在电源电压有所波动或负载转矩有所变化时仍可保持转速恒定不变的、紧凑简单的电动机。

转速与供电频率呈恒定关系的小功率同步电动机，根据转子结构的不同，主要分为永磁式、反应式、磁滞式、电磁减速式。是上述应用需求的很好选择。

1 同步电动机概述

小功率同步电机的分类

- 按定子绕组相数
 - n 三相：比较理想的电机，圆形旋转磁场，效率高
 - n 两相：两相绕组，单相电源供电，采用电容移相
 - n 单相：罩极电机
- 按供电电源
 - n 三相和单相
- 按转子材料分：
 - n 永磁式同步电机
 - n 磁阻式同步电机
 - n 磁滞式同步电机

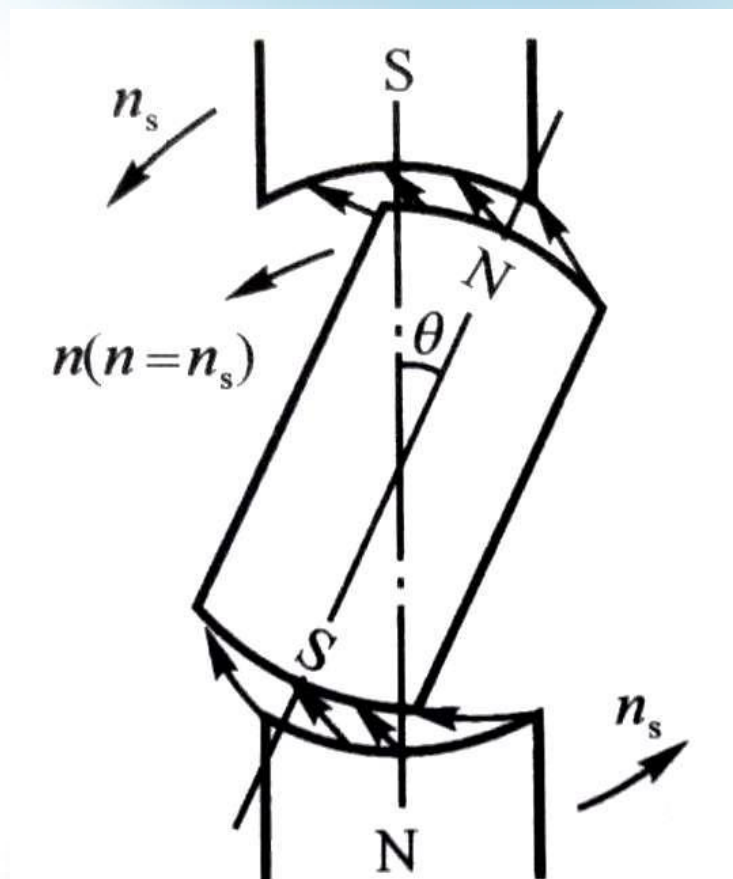
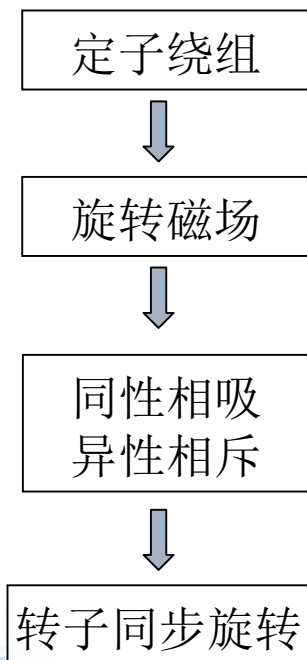


2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机原理

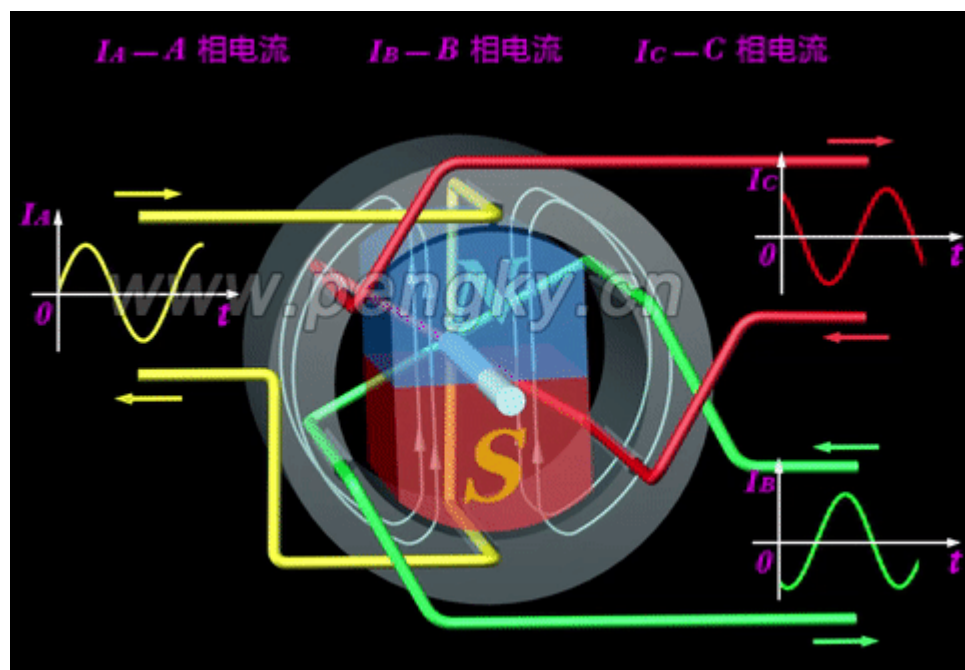
n 定子产生旋转磁场

n 转子采用永磁体制成



2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机原理

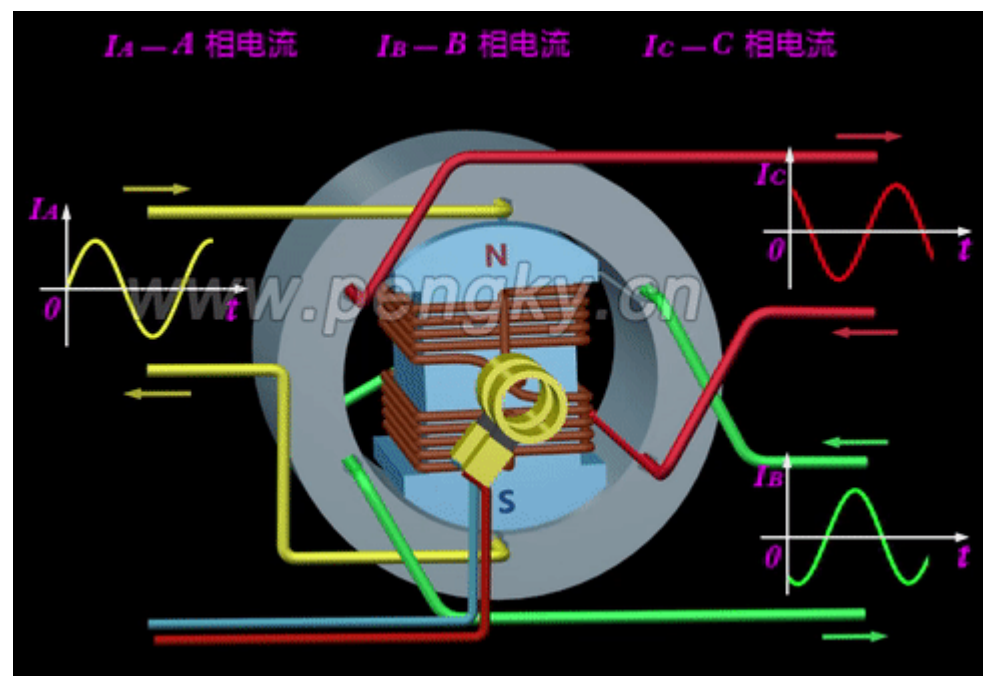


同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p} (r/min)$$

2 永磁同步电动机

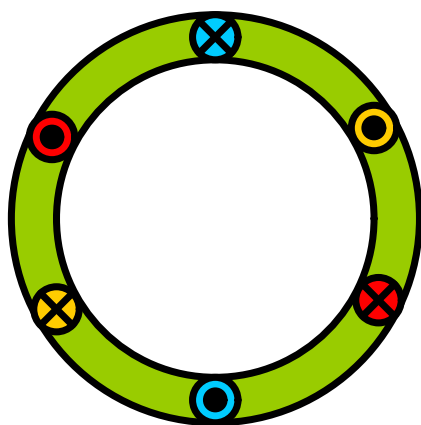
○ 永磁式同步电动机原理



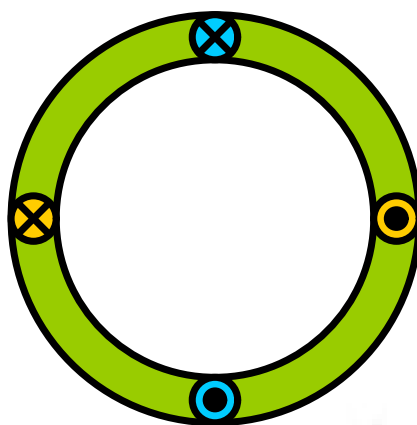
2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机结构

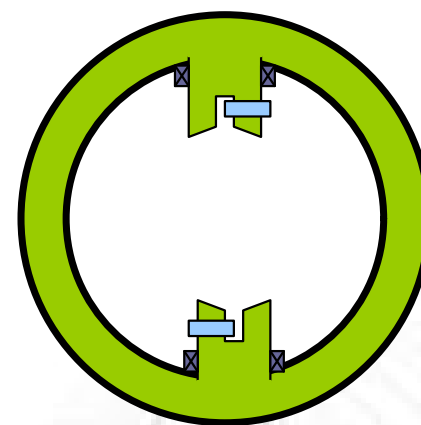
n 定子产生旋转磁场。定子结构和定子绕组与异步电动机基本相同



三相定子绕组



两相定子绕组



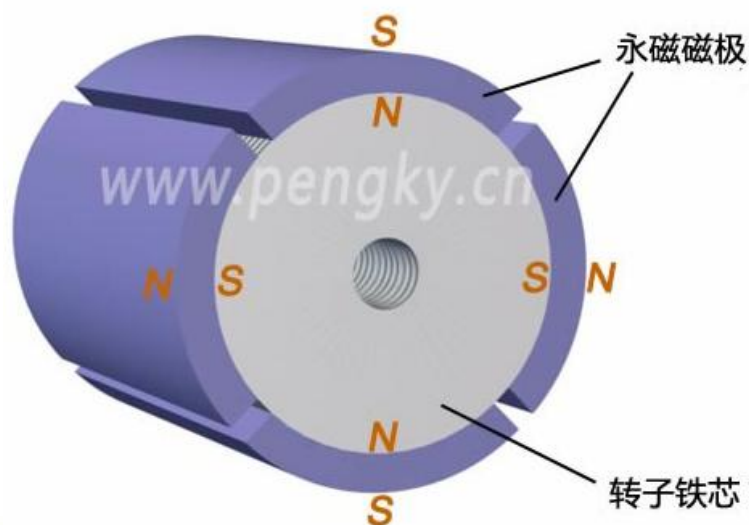
单相罩极绕组

2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机结构

n 转子由铁心和永磁体组成

n 转子铁芯仍需用硅钢片叠成，采用逆变器电源驱动时，即使产生正弦波的变频器输出都含有高频谐波，若用整体钢材会产生涡流损耗。



表面突出式永磁转子

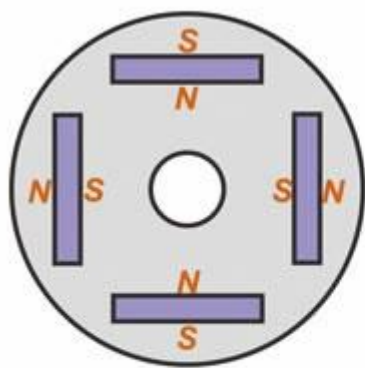


表面嵌入式永磁转子

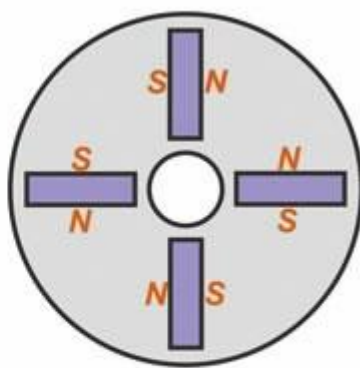
2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机结构

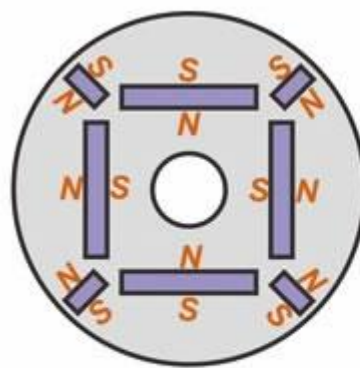
n 内埋嵌入式永磁转子



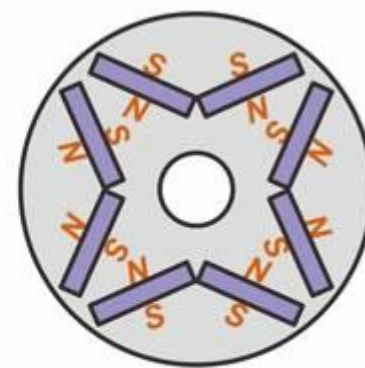
径向式



切向式



U型混合式

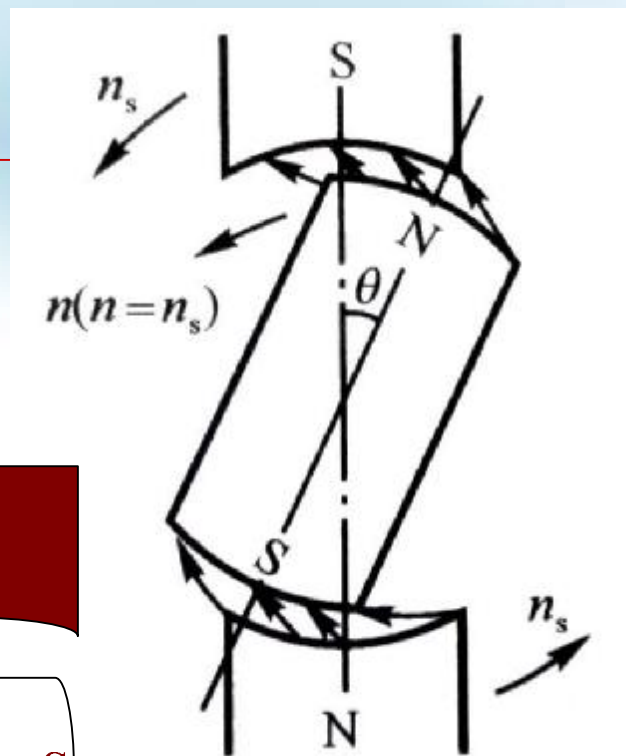
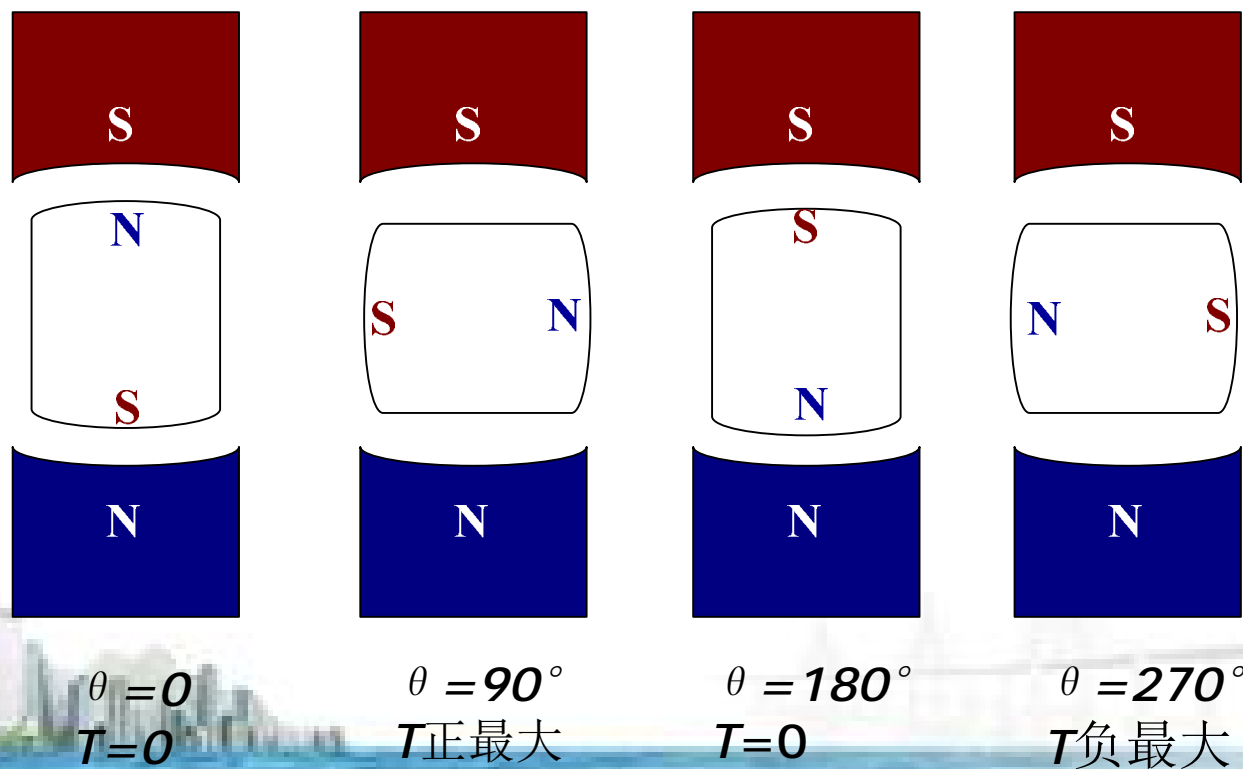


V型径向式

2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机基本电磁转矩

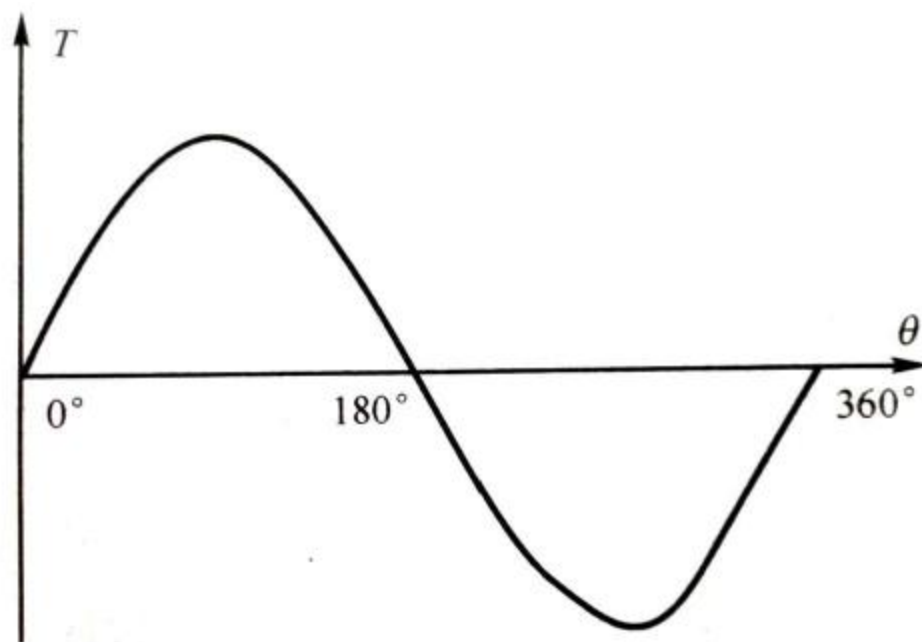
n 转子磁极轴线与定子磁极轴线间的夹角
 θ 可称为**失调角**或**功率角**



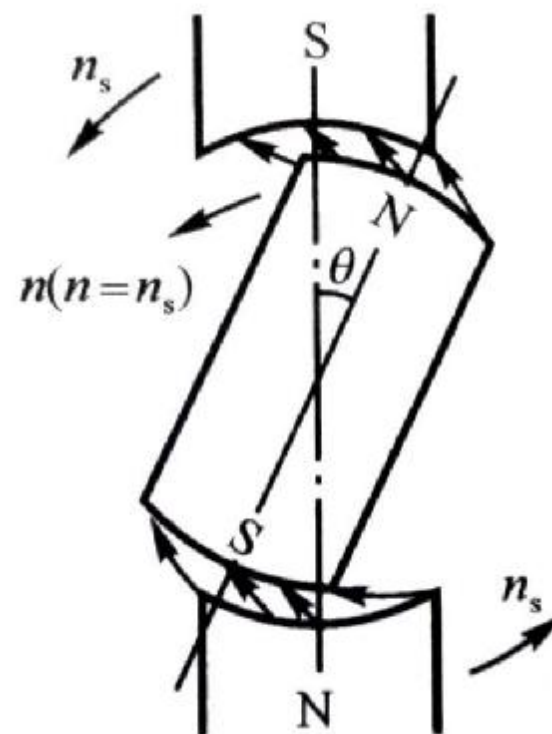
2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机基本电磁转矩

n 同步电动机转矩和失调角的关系曲线



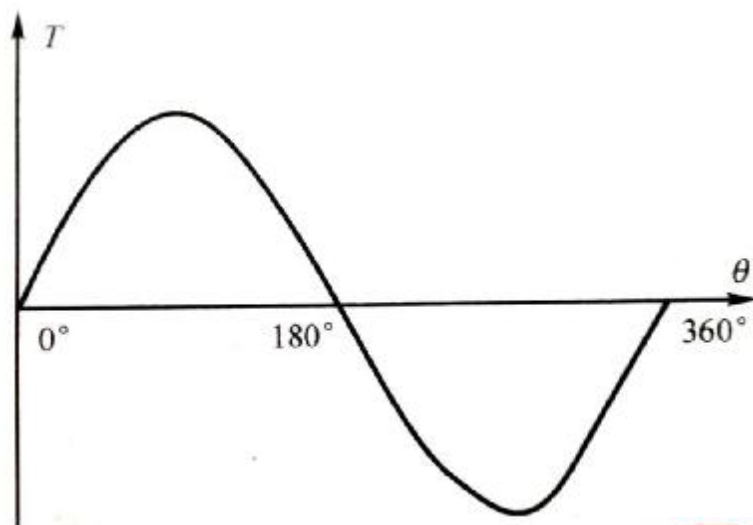
转角转矩曲线



2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机基本电磁转矩

■ 当失调角为 90° 时转矩最大，这个转矩称为**最大同步转矩**。使用同步电机时，负载转矩不能大于最大同步转矩。



转角转矩曲线

$$T = KF_s F_r \sin \theta$$

K : 比例系数

F_s : 定子磁势或磁密

F_r : 转子磁势或磁密

θ : 磁极轴线夹角(电角)

某一永磁同步电机，同步转速为1500r/min。最大输出电磁转矩为1Nm，当负载转矩为0.5Nm时，电机转子转速？转子失调角？

2 永磁同步电动机

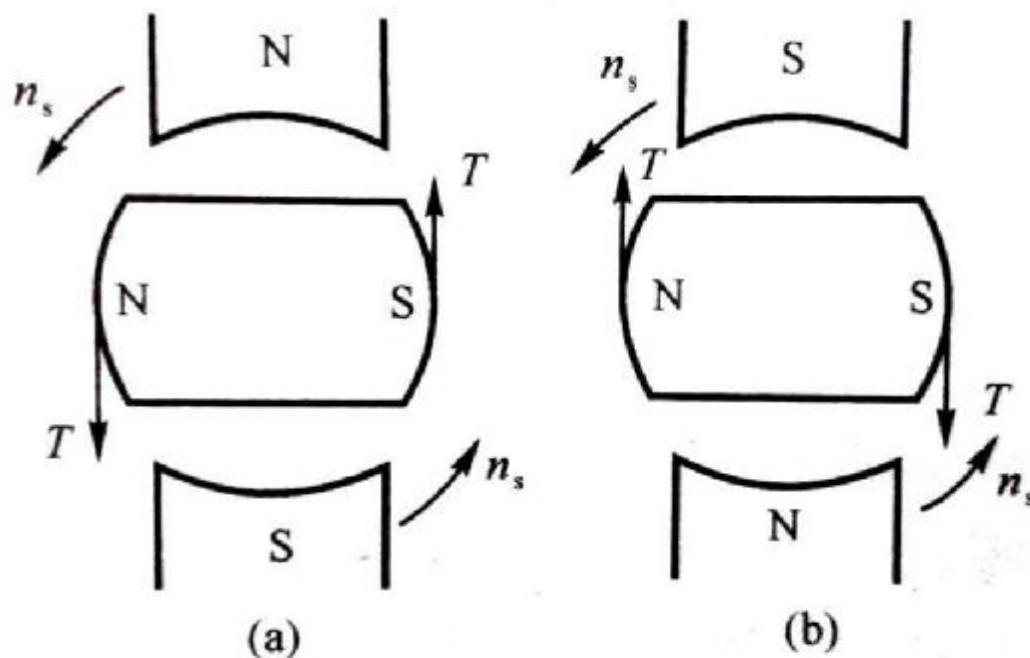
○ 永磁式同步电动机的启动

n 纯粹的永磁同步电机启动困难

n 转子的转动惯量大

n 启动时的转差率大

○ 在同步电机运行过程中，只要转子转速和旋转磁场转速之间出现较大的转速差，也会出现平均转矩接近与零的情况



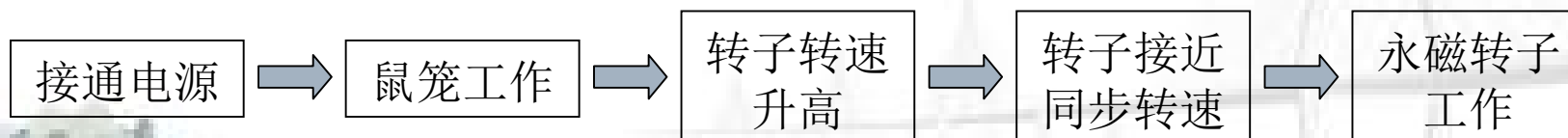
2 永磁同步电动机

○ 永磁式同步电动机的启动方法

- n 降频启动
- n 在转子上装启动鼠笼绕组，异步启动

○ 异步启动

- n 为了使永磁式同步电机能够顺利启动，同时也使电机由同步“跌入”失步时不会很快停转，在转子上一般都装有启动绕组。
- n 启动绕组的结构与异步电机鼠笼转子相似
- n 启动绕组是按短时工作设计的，因此同步电机不允许在异步状态长时间工作
- n 异步启动过程



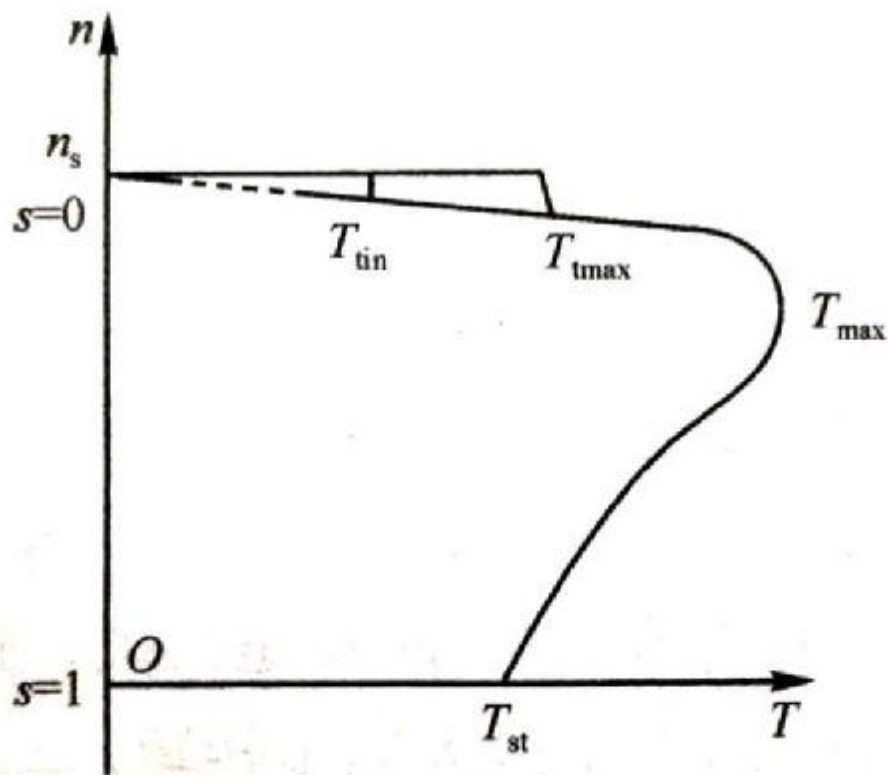
2 永磁同步电动机

○ 转子结构



2 永磁同步电动机

带启动绕组的同步电机机械特性曲线



T_{tmax} : 最大同步转矩，又称为失步转矩

T_{tin} : 名义牵入转矩。当负载阻转矩不大于 T_{tin} 时，电机应能顺利牵入同步



电机启动过程中，转子受力情况如何？

2 永磁同步电动机

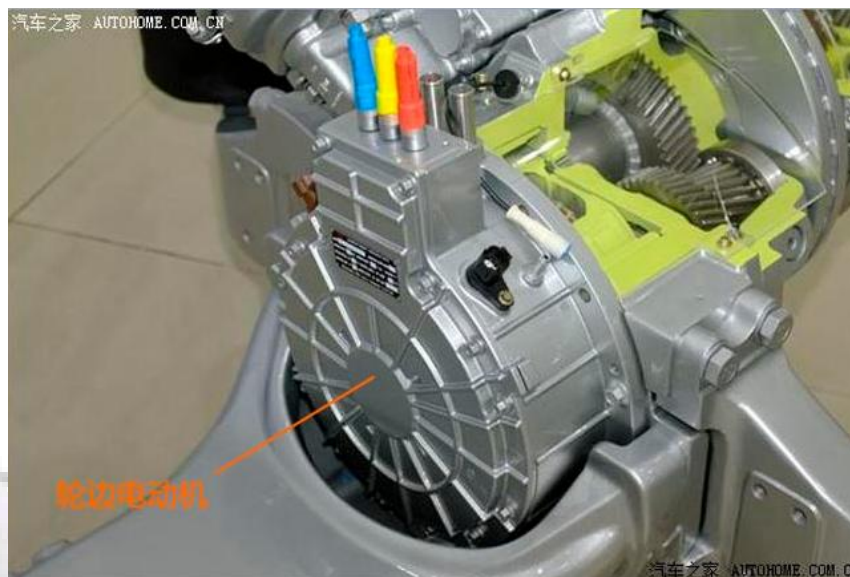
○ 特点

- n 与其他微型同步电机相比，永磁同步电机功率较大，功率因数和效率较高，功率与重量比大，综合性能指标好
- n 启动电流倍数较大(**8-20**倍额定电流)，且永磁体价格贵，结构复杂，成本较高
- n 转子可多对磁极，使电动机的转速较低，在自动化仪表中多有应用
- n 适合**kW**级纺织用的同步运行，也适合**10-100kW**级长时间恒速传动应用
- n 不可长期运行于异步状态

2 永磁同步电动机

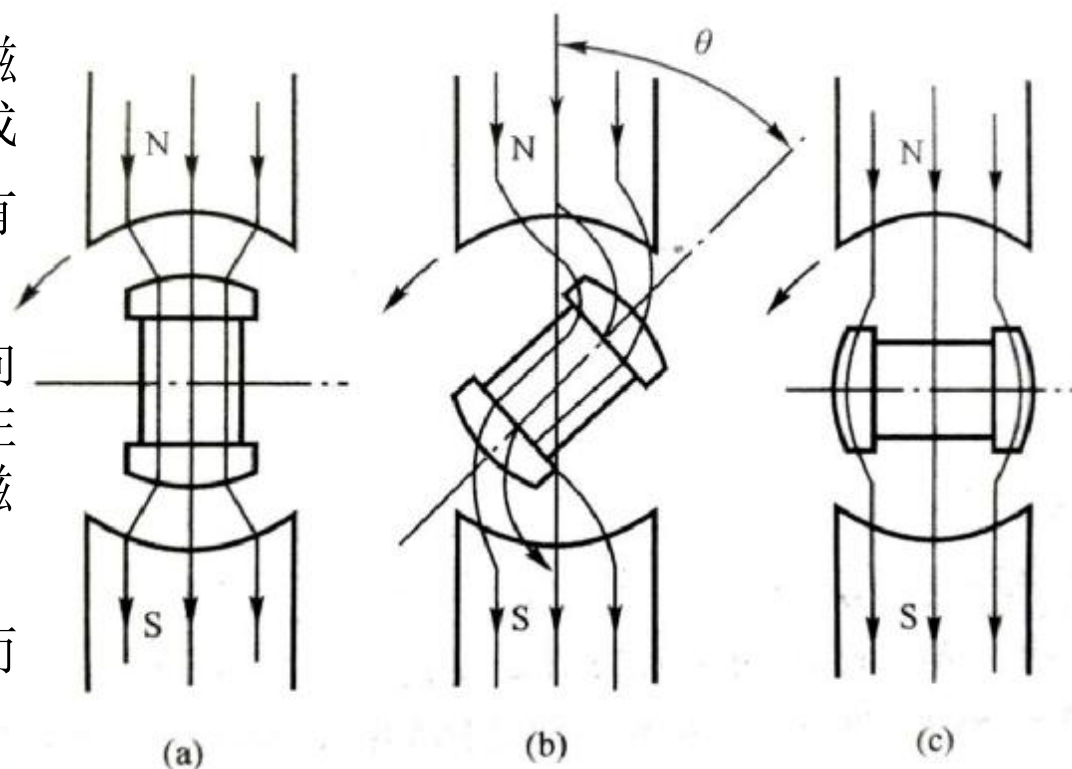
○ 典型应用

- n 在电动汽车中广泛采用永磁同步电动机作为驱动动力，左图是比亚迪电动大巴的轮边电机，为永磁同步电机，最大功率**90kW**
- n 永磁同步电机已在高铁动车组作为牵引电机使用，功率在**600kW**以上



3 磁阻同步电动机

- 磁阻同步电机又称为反应式同步电机
- 磁阻同步电机定子与永磁式同步电机相同
- 磁阻同步电机转子由软磁钢片加非磁性金属片制成
- 转子没有永磁体，也没有激磁绕组，结构简单
- 转子的特点是在不同方向具有不同的磁阻，其中在两个正交方向(电角)上磁阻差别最大
- 电机的磁阻随转子转角而变化



3 磁阻同步电动机

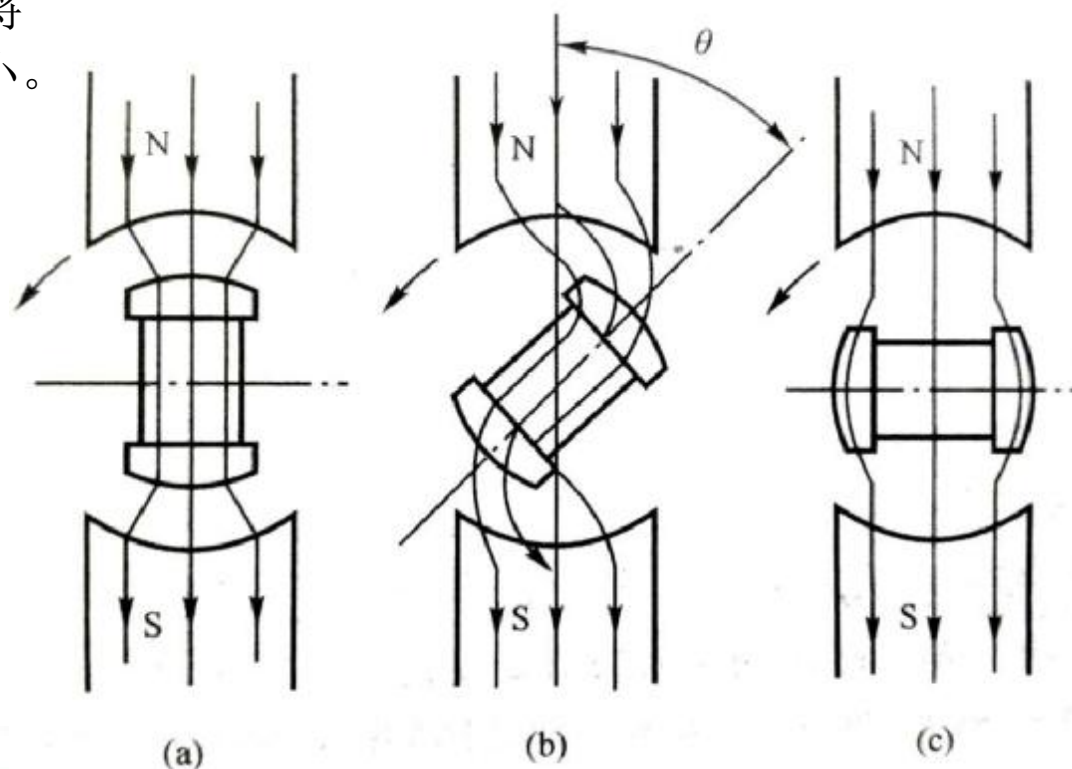
○ 磁阻同步电机工作原理

n 磁力线类似于弹簧或橡皮筋，有尽量把自己收缩到最短的趋势，并且如果能改变磁路结构，将使所经过的路径磁阻最小。

n 根据磁阻最小原理，利用磁引力拉动转子旋转，于是磁阻转子就会跟随定子产生的旋转磁场同步旋转。

n 同步转速：

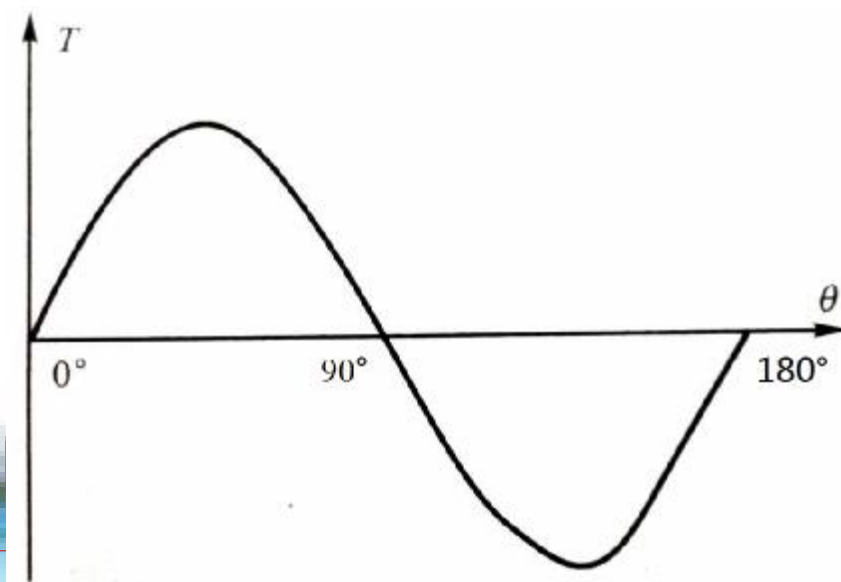
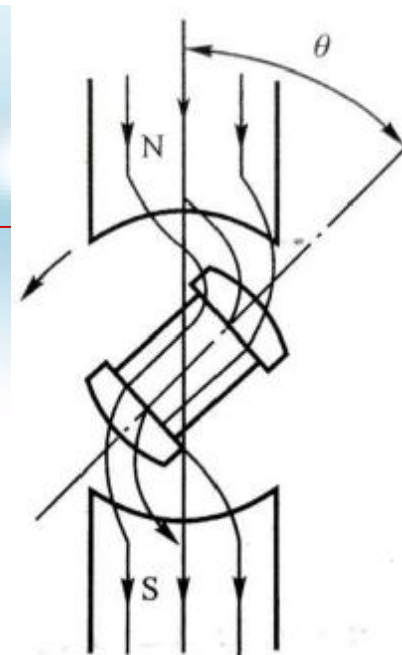
$$n_s = \frac{60f}{p} (r/min)$$



3 磁阻同步电动机

○ 磁阻同步电动机基本电磁转矩

- n** $\theta = 0$ 时, 电磁转矩为0;
- n** $0 < \theta < 90^\circ$ 时, 电磁转矩为正;
- n** $\theta = 90^\circ$ 时, 电磁转矩为0;
- n** $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, 电磁转矩为负;
- n** $\theta = 180^\circ$ 时, 电磁转矩为0;



$$T = K(R_{mq} - R_{md}) \sin 2\theta$$

K : 比例系数

R_{mq} : 转子交轴磁阻

R_{md} : 转子直轴磁阻

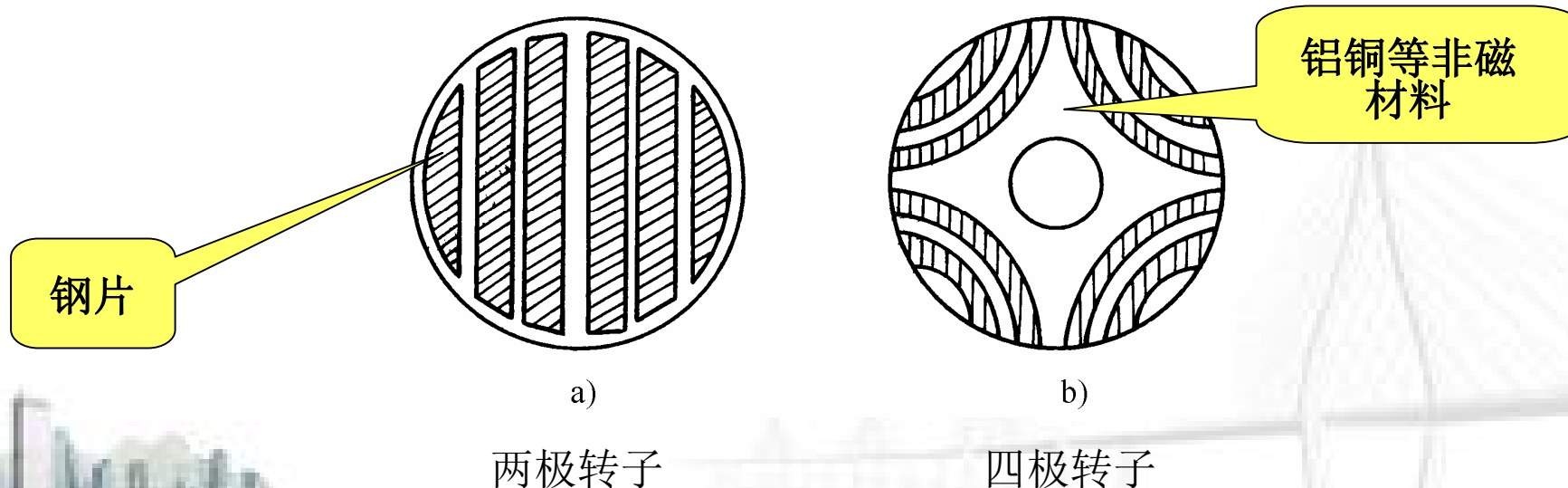
θ : 失调角或功率角(电角)

3 磁阻同步电动机

- 磁阻同步电动机的启动

- n 磁阻同步电机与永磁同步电机一样，存在启动困难的问题

- n 启动方法：降频启动或加装鼠笼启动绕组



3 磁阻同步电动机

○ 磁阻同步电动机特点

- n 结构简单，价格便宜，过载能力强，不易失步，工作可靠，性能与价格比较高
- n 应用广泛，可以用于记录仪表、摄像机、录音机及复印机等设备中
- n 启动转矩较小，不可长时间处于失步下的异步工作状态
- n 功率因数和效率低于永磁式同步电机，但高于磁滞式同步电机

4 磁滞同步电动机

○ 磁滞同步电动机的结构

- n 磁滞同步电动机定子与普通交流电动机一样
- n 磁滞同步电动机转子结构如下图，转子为隐极结构，没有绕组，有效层为磁滞材料

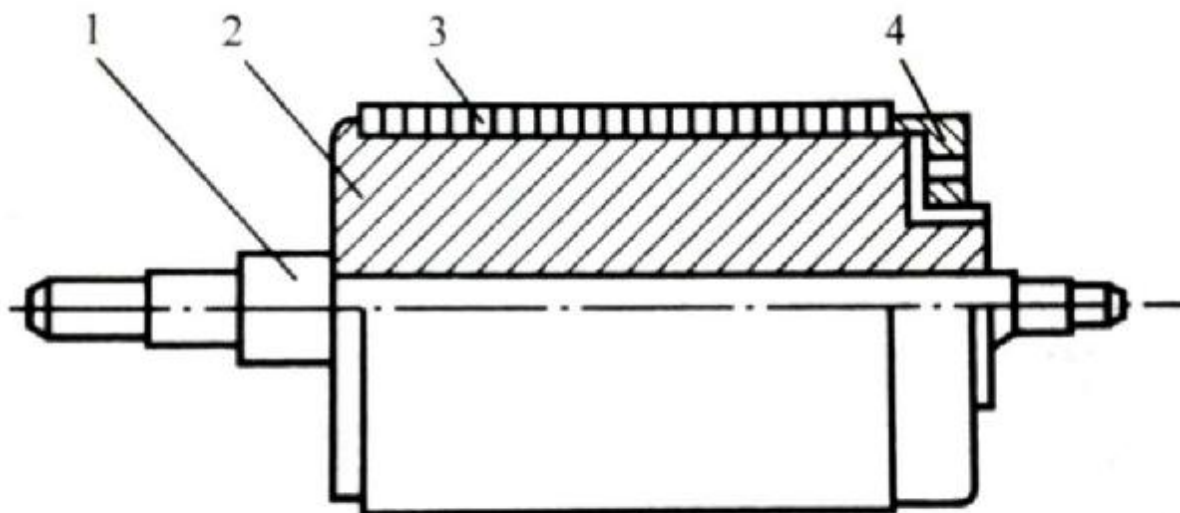


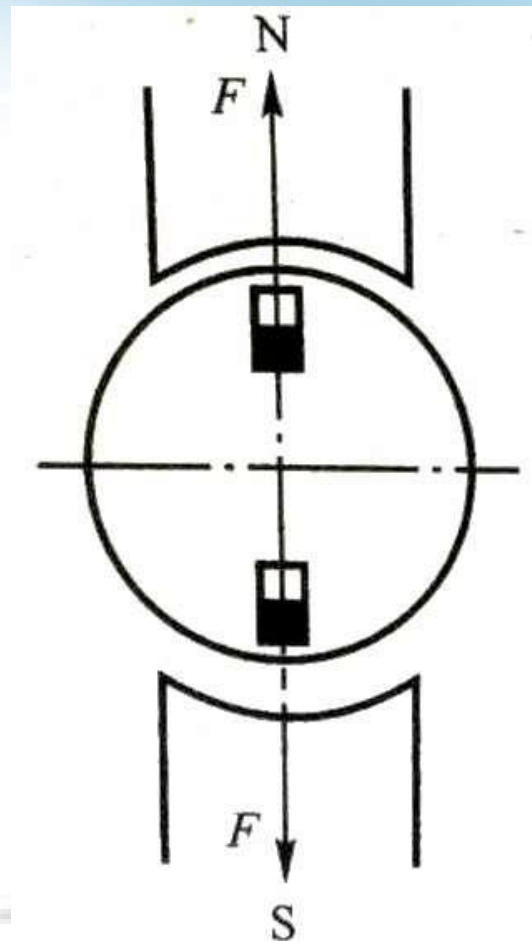
图 4-8 磁滞电动机转子的结构简图

1. 轴 2. 衬套 3. 有效层 4. 螺帽

4 磁滞同步电动机

○ 工作原理

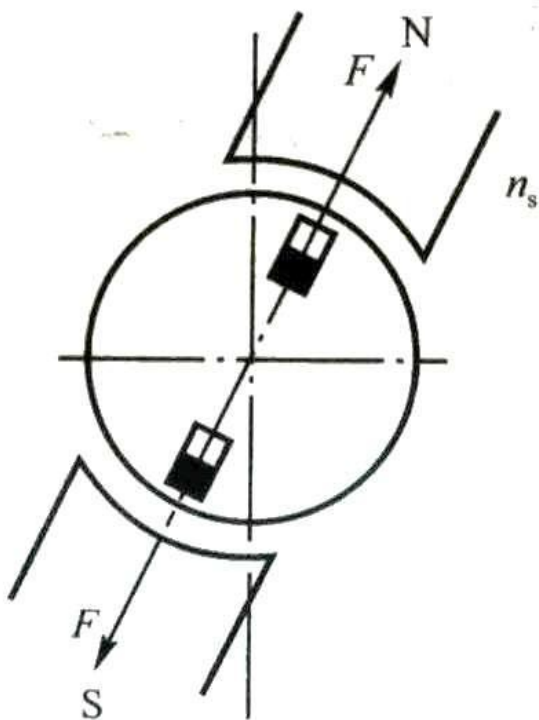
- n 磁滞材料又称为半硬磁材料，磁性介于硬磁和软磁之间。
- n 假设有磁滞材料制成的转子是实心的，定子磁场作为外磁场，用一对旋转磁极表示
- n 外磁场静止时，被磁化后的转子材料轴线将与外磁场轴线重合。转子受到电磁转矩为零



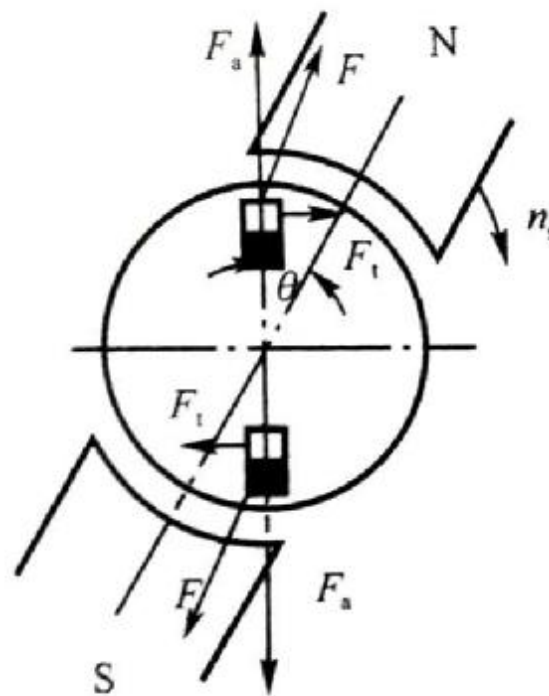
4 磁滞同步电动机

○ 工作原理

n 磁场旋转后，软磁材料的磁化情况。



n 磁场旋转后，磁滞材料的磁化情况。



4 磁滞同步电动机

○ 工作原理

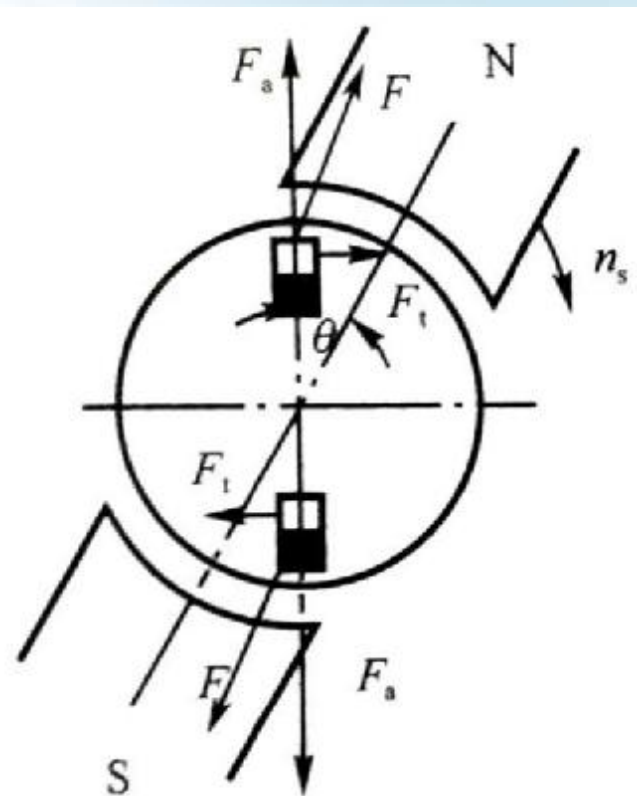
n θ 称为**磁滞角**或**失调角**。

n 由于失调角 θ 的存在，转子和外磁场之间产生电磁转矩，这个转矩称为**磁滞转矩**。

n 磁滞转矩和失调角的关系为：

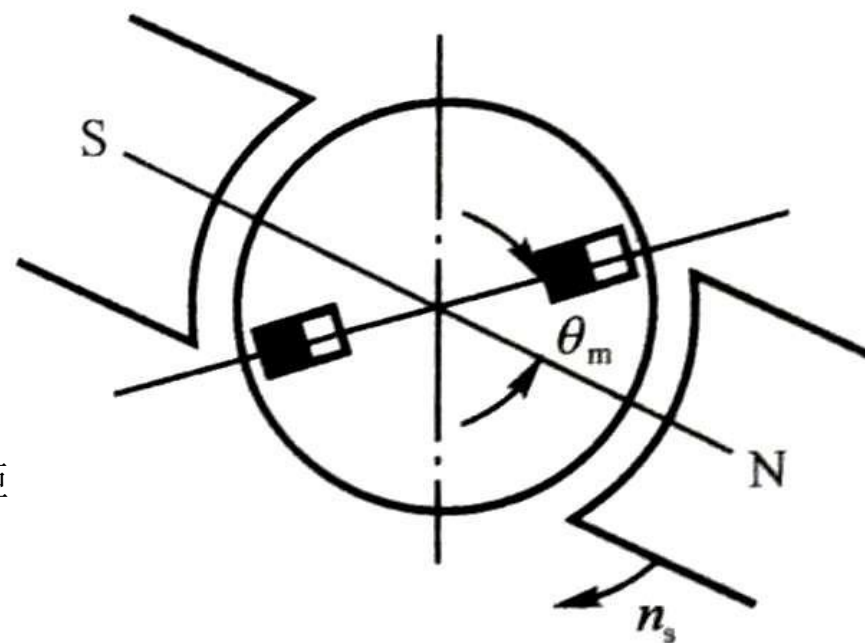
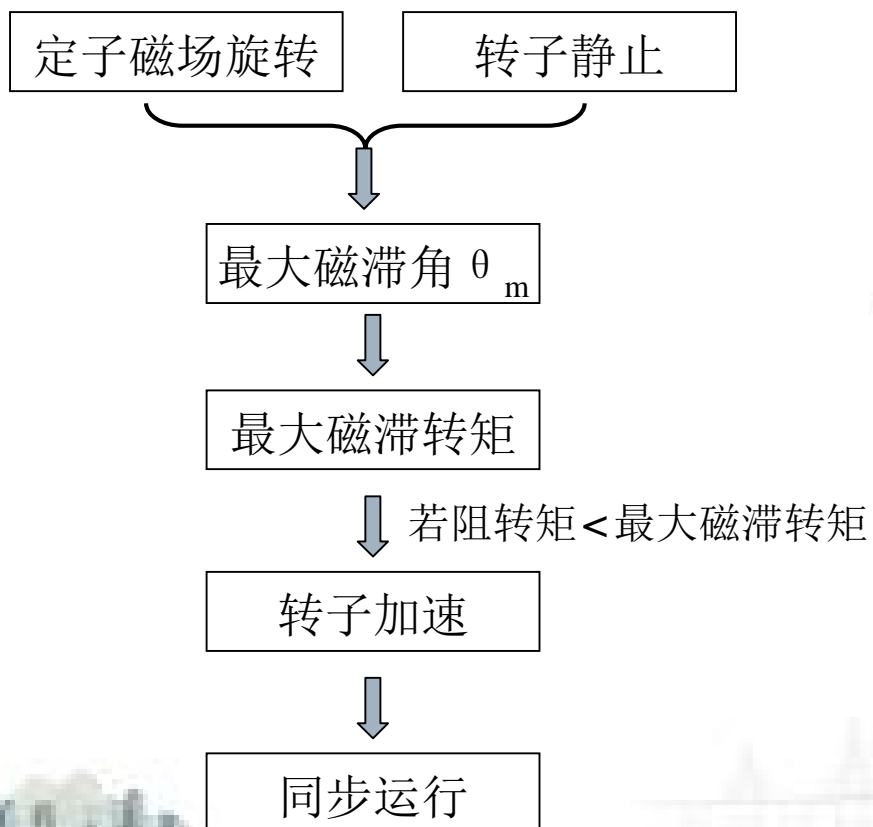
$$T = K \sin q$$

n 转子材料一定，外磁场参数不变，磁滞角有个最大稳态值 θ_m ，与 θ_m 对应的电磁转矩也就是**最大电磁转矩**。



4 磁滞同步电动机

○ 磁滞同步电机的启动



4 磁滞同步电动机

- 磁滞同步电动机的特点
 - n 磁滞电动机有点：具有启动转矩，不必另装启动绕组，结构简单，启动电流与额定电流较其他同步电机小；
 - n 具有较大的堵转转矩，启动性能较好
 - n 转子可被任意极对数的磁场磁化，并产生磁滞转矩，并无固定极对数，所以定子上可以装两个或多个不同极对数的绕组，做成多速磁滞电动机。
 - n 缺点：功率因数低(30-50%)；阻尼弱，易震荡；成本高。



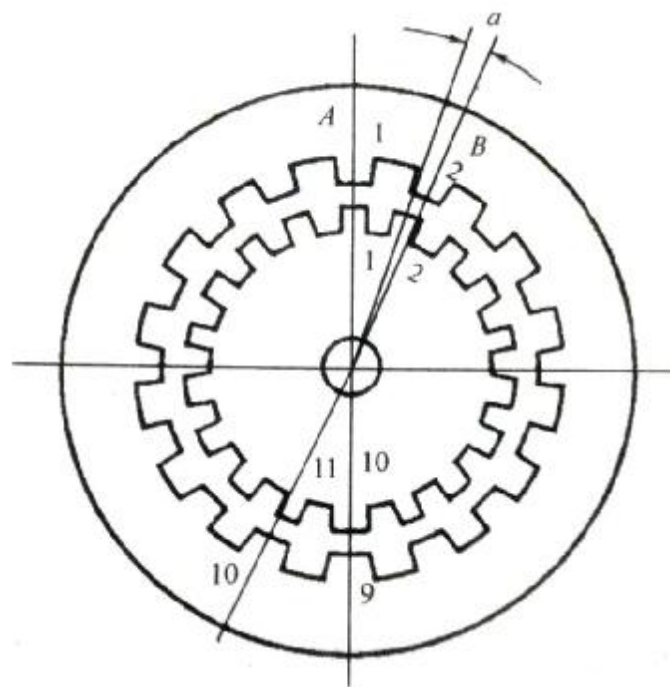
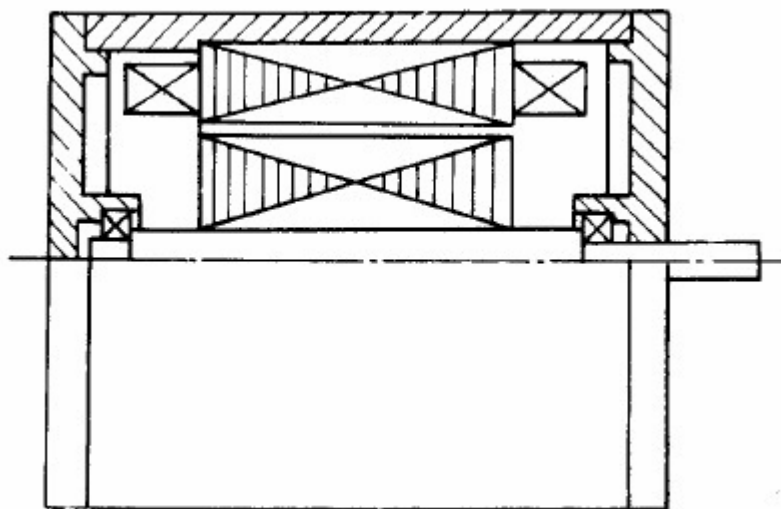
5 电磁减速式同步电机

- 电磁减速同步电动机又称为低速同步电动机
- 一般类型同步电机
 - n 同步转速: $n_s=60f/p$
 - n 电网频率: $f=50\text{Hz}$
 - n 极对数: $p=2、4、6、8$ (通常小于10)
 - n 电机转速: $n=n_s=300-3000\text{ rpm}$
- 低速同步电机
 - n $n < n_s=60f/p$ (每分钟几十转)
- 类型
 - n 反应式
 - n 励磁式

5 电磁减速式同步电机

○ 反应式电磁减速同步电动机结构特点

- n 定、转子铁心都做成开口槽
- n 定子槽中放有两相或三相绕组，转子没有绕组



5 电磁减速式同步电机

○ 反应式电磁减速同步电动机的工作原理

假设条件:

n 电机极对数: $p=1$

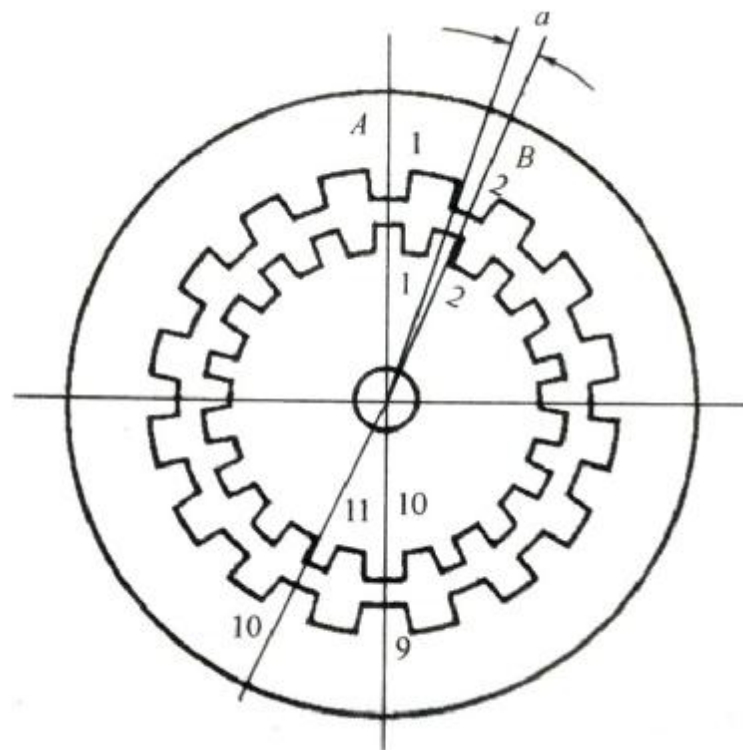
n 定子齿数: $Z_S=16$

n 转子齿数: $Z_R=18$

n 定子的齿距角: $\theta_S = 2\pi / Z_S$

n 转子的齿距角: $\theta_R = 2\pi / Z_R$

n 两者的齿角差: $\alpha = \theta_S - \theta_R$



5 电磁减速式同步电机

○ 反应式电磁减速同步电动机的工作原理

n 当磁场位于定子(1,9)齿轴线A:

在磁通 Φ 反应力矩的作用下,

转子(1,10)齿与定子(1,9)齿对齐

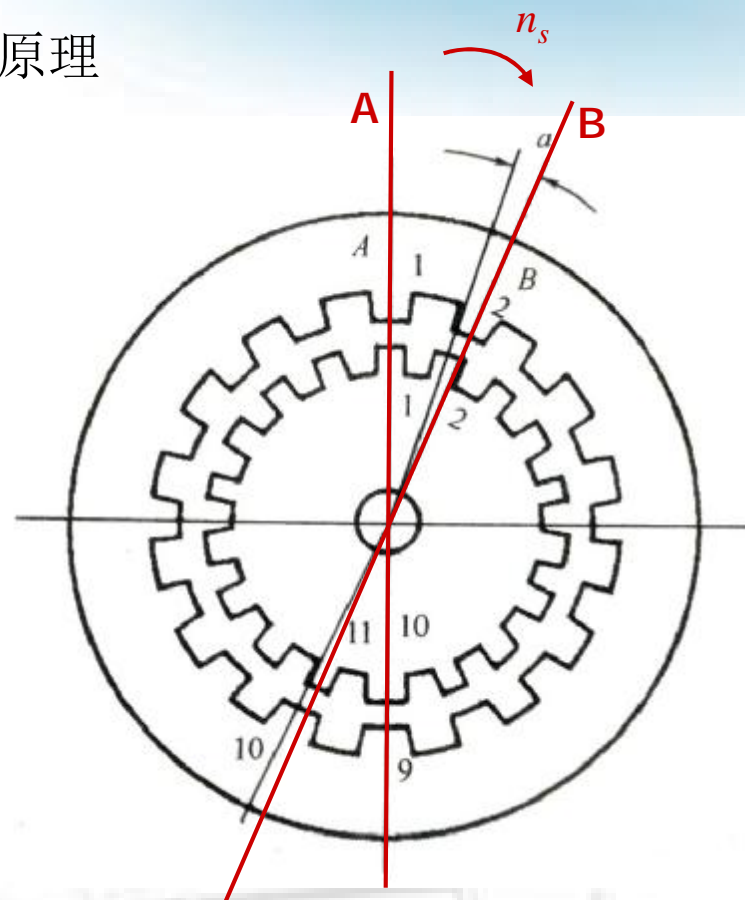
n 当磁场转过齿距 θ_s 到B位置时:

在磁通 Φ 反应力矩的作用下,

转子(2,11)齿与定子(2,10)齿对齐

n 转子转过的角度:

$$a = q_s - q_R$$



5 电磁减速式同步电机

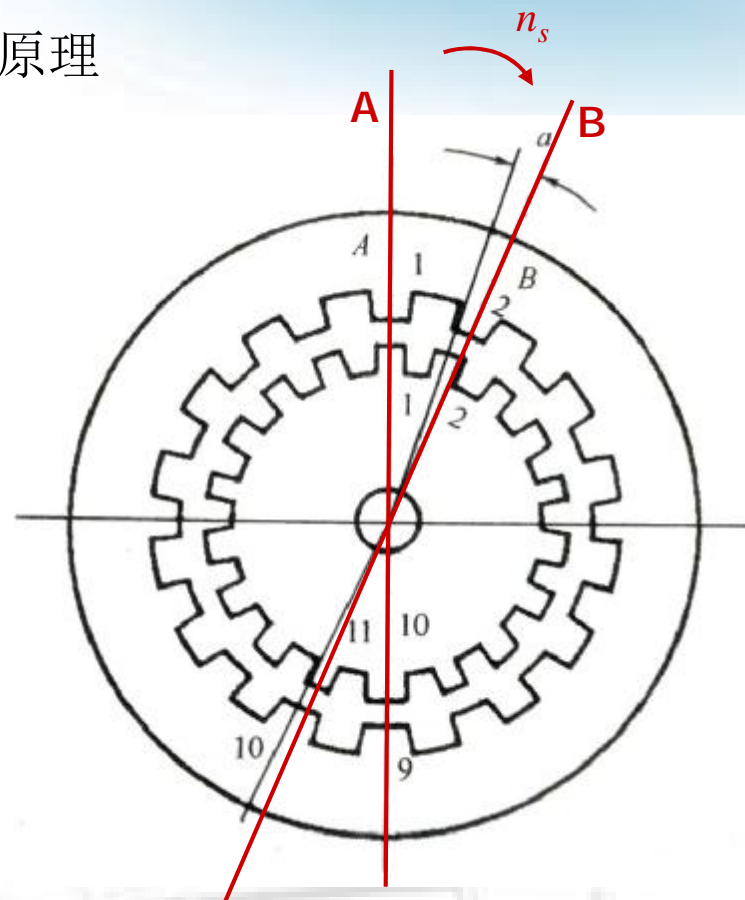
○ 反应式电磁减速同步电动机的工作原理

■ 当旋转磁场转过一个定子齿距角时：

$$q_s = \frac{2p}{Z_s}$$

■ 转子转过一个齿角差：

$$a = \left(\frac{2p}{Z_s} - \frac{2p}{Z_R} \right) = 2p \left(\frac{1}{Z_s} - \frac{1}{Z_R} \right)$$



5 电磁减速式同步电机

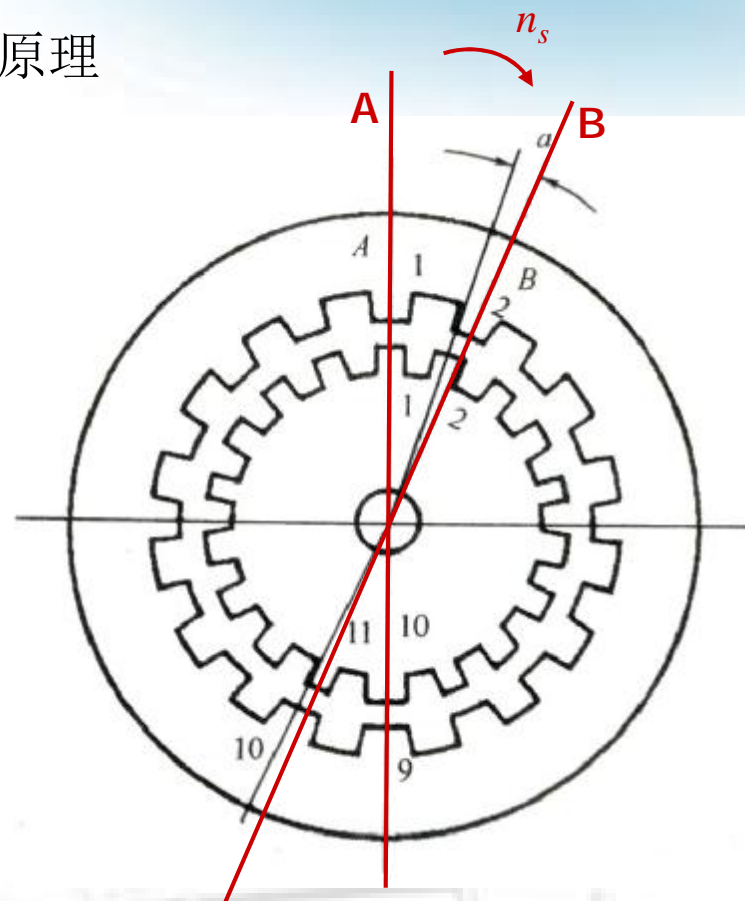
○ 反应式电磁减速同步电动机的工作原理

■ 电机的电磁减速比:

$$k_R = \frac{n_s}{n} = \frac{q_s}{a} = \frac{\frac{1}{Z_S} 2p}{(\frac{1}{Z_S} - \frac{1}{Z_R}) 2p} = \frac{Z_R}{Z_R - Z_S}$$

■ 电机转子转速为:

$$n = \frac{n_s}{k_R} = \frac{60f(Z_R - Z_S)}{pZ_R}$$



5 电磁减速式同步电机

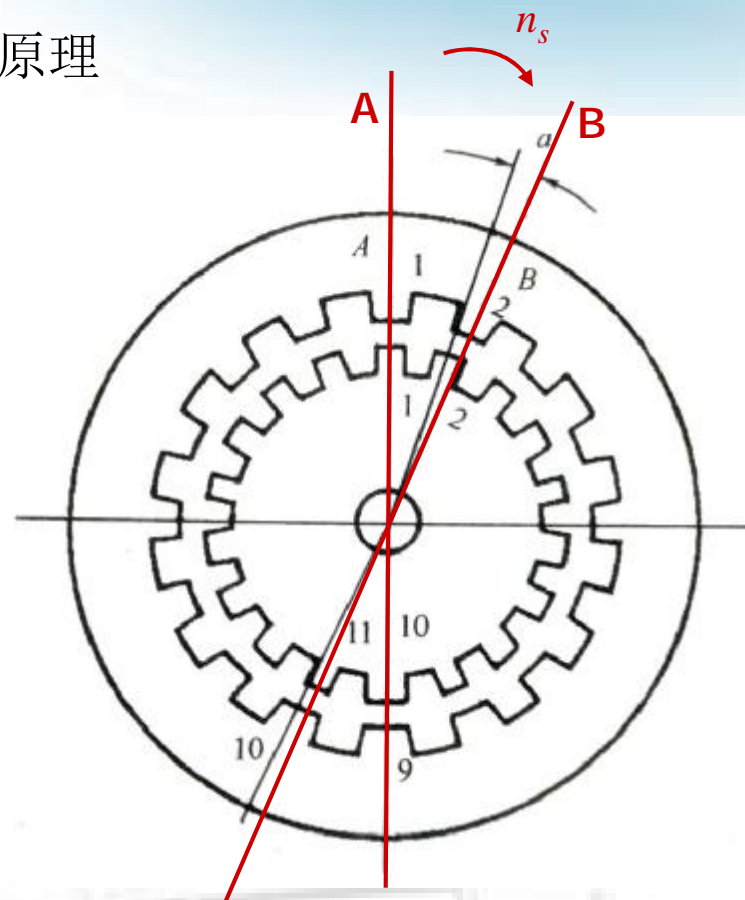
○ 反应式电磁减速同步电动机的工作原理

n 定、转子齿数的设计条件:

$$Z_R - Z_S = 2p$$

n 电机转子转速为:

$$n = \frac{n_s}{k_R} = \frac{60f(Z_R - Z_S)}{pZ_R} = \frac{120f}{Z_R}$$



5 电磁减速式同步电机

○ 结论

- n 为实现减速，必须使 $Z_R - Z_S = 2p$;
- n 当电源频率 f 一定时，电机转速随着转子齿数 Z_R 增多而降低。

○ 特点

- n 电磁减速同步电机无需启动绕组，结构简单，制造方便，成本低，转速较低，是一种常用的低速电动机。

