

自动控制实践 小功率同步电机

哈尔滨工业大学

伊国兴



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

同步电动机的构造和分类

- ❖ 同步：电机的转速和磁场的转速相同，或与电源频率成严格比例关系。
- ❖ 结构：定子和转子。
- ❖ 定子：与异步电动机相同。作用是产生旋转磁场。
- ❖ 定子绕组：三相、两相和单相。
 - 三相电机使用三相电源，产生圆形旋转磁场。
 - 两相绕组电机采用电容移相的办法（实质接的单相电）。
 - 单相电机指罩极电机。
- ❖ 电源：三相电机和单相电机。
- ❖ 转子材料：永磁式，磁阻式（反应式）和磁滞式。

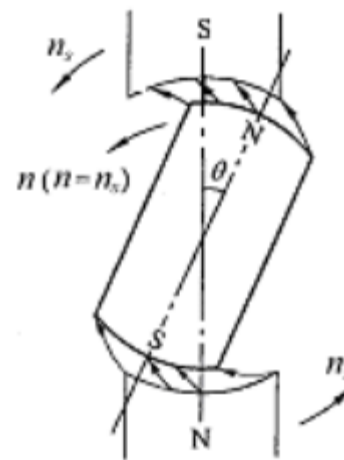
永磁式同步电动机

一、结构特点：转子是永磁磁极。
可以多级。

二、工作原理

- 磁极间的作用力+旋转磁场。
- 定子电流产生圆形旋转磁场，磁极间同性相斥、异性相吸，旋转磁场带动永磁转子共同转动。

- 同步转速为
$$n_s = \frac{60f}{p} \quad \text{r/min}$$



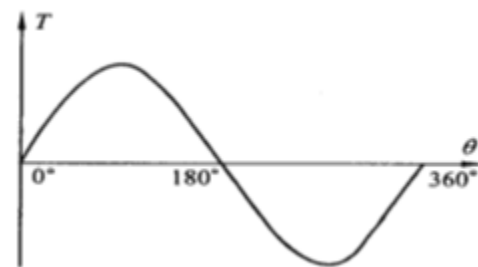
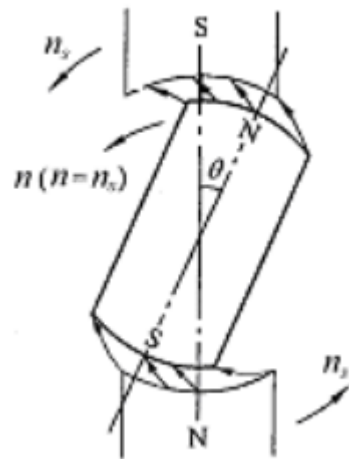
永磁式同步电动机

三、电磁转矩的解析表达式

- ❖ 设转子和定子磁极轴线的夹角（电角）为 θ ，圆柱表面磁场间的作用力矩是周期函数。
- ❖ 基波分量 $T = K \sin \theta$
- ❖ 电机的基本电磁转矩 $T = K F_s F_r \sin \theta$
- ❖ θ ：失调角或功率角

四、同步运行

- ❖ 转子转速与磁场相同。
- ❖ θ 随负载转矩变化。
- ❖ 当失调角为 90° 时转矩最大。



永磁式同步电动机

❖ 永磁式同步电机的电磁转矩与失调角有关。

若负载转矩增大，电机失调角自动增加，以便产生较大的电磁转矩来平衡负载转矩，并保持转子匀速转动；若负载转矩变小，失调角也变小，但电机始终保持在同步转速。

❖ 同步电机的负载转矩不可大于最大同步转矩。

永磁式同步电动机

五、起动与异步运行

- 纯粹的同步电机起动难。
- ⑩ 旋转磁场无惯性，转子有惯性。
- ⑩ 转矩时正、时负，平均为零。
- 影响起动的因素：转动惯量与转速差大。
- 解决办法：加鼠笼启动绕组。
- 起动与异步时，鼠笼绕组有电流和异步转矩使转速接近同步转速，磁极力拉入同步。
- 鼠笼绕组：短时工作。

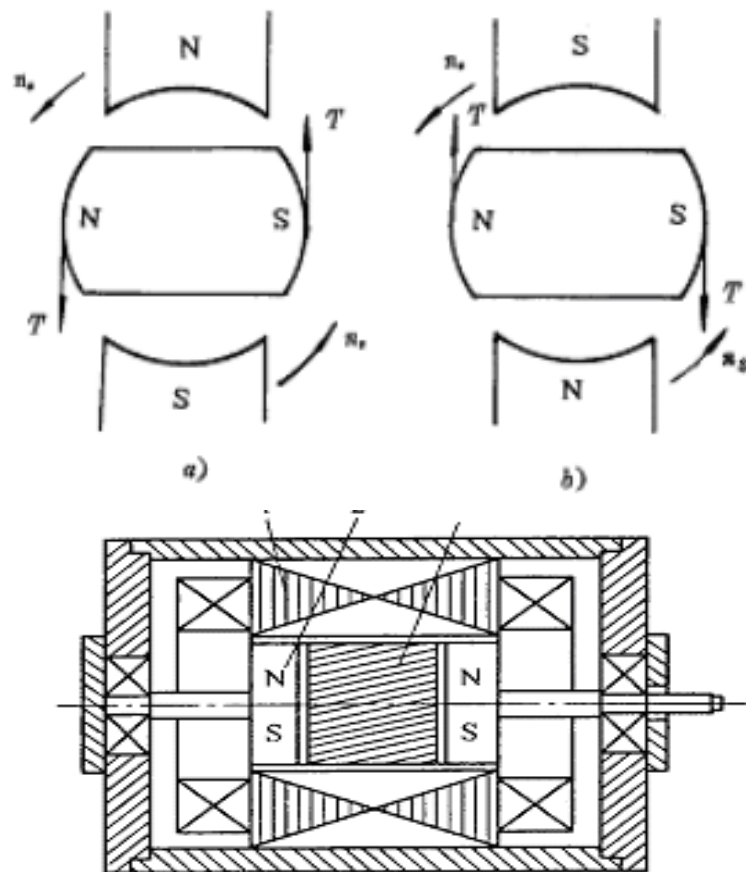
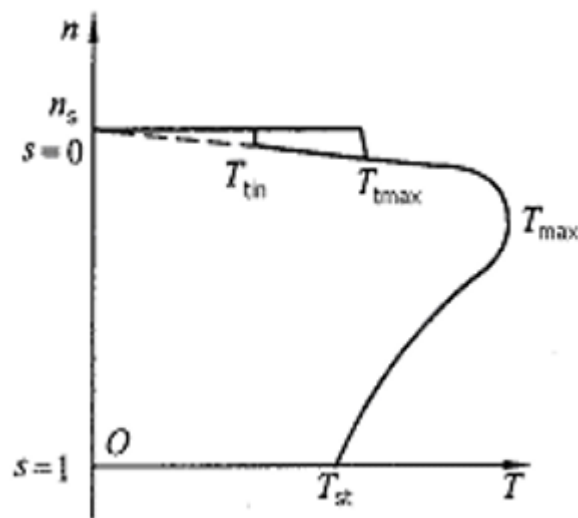


图 4-4 永磁式同步电动机的结构
1-定子 2-永久磁体 3-笼式启动绕组

永磁式同步电动机

六、机械特性

- $T_{t\max}$ 为最大同步转矩，又称为失步转矩。
- T_{tin} 为名义牵入转矩 ($s=0.05$)
- 鼠笼绕组电阻小，机械特性硬，避免 $s=0.05$ 处 T_{in} 太小。



七、优、缺点

- 功率较大，功率因数和效率最高，综合性能指标较好。
- 起动电流倍数较大，且永磁体价格贵，结构复杂，所以整机成本较高。

磁阻同步电动机

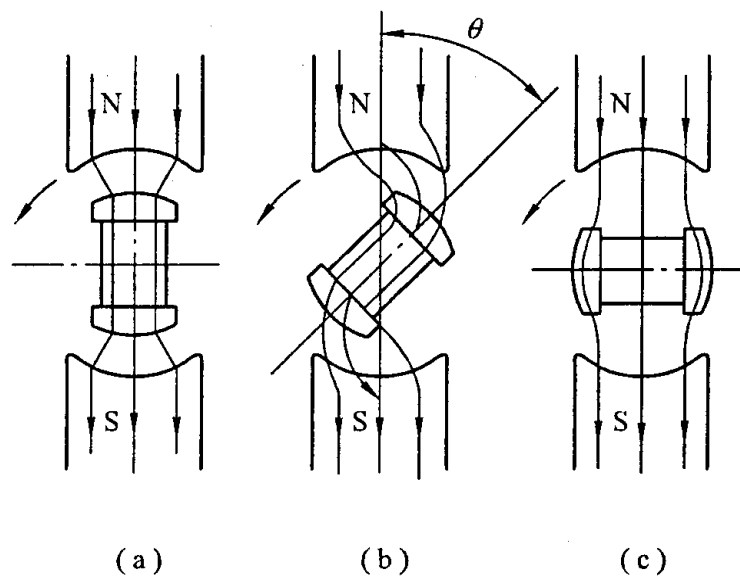
❖ 变磁阻或反应式同步电动机

一、结构特点

- 软磁钢片加非磁性金属片。
- 转子不同的方向磁阻不同。
- 磁阻随转角变化。
- 凸极（导磁）。

二、工作原理

- 磁力线收缩力，使磁阻最小、磁力线最短。
- $$n = n_s = \frac{60f}{p} \text{ r/min}$$
- 启动困难，需要启动绕组。



磁阻同步电动机

三、电磁转矩

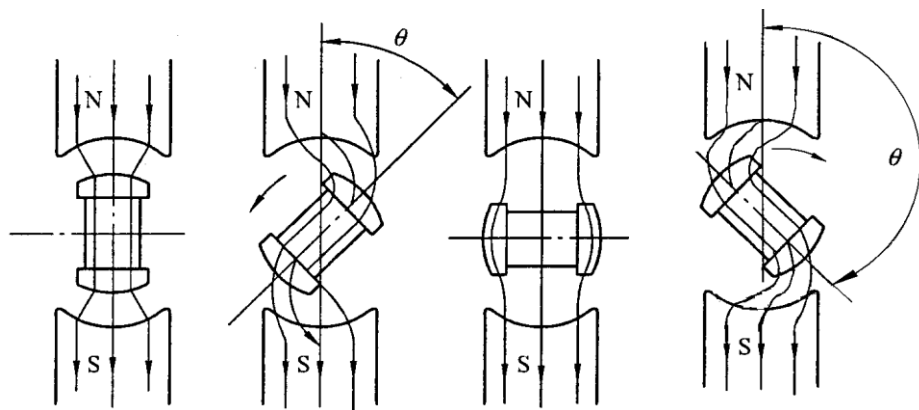
$\theta: 0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 135^\circ \rightarrow 180^\circ$

$T: 0 \text{ } ++ \text{ } ++ \text{ } ++ \text{ } ++ \text{ } 0 \text{ } -- \text{ } -- \text{ } -- \text{ } -- \text{ } 0$

- T 是 θ 的周期函数，
周期是 180° ，基波

$$T = K_1 \sin 2\theta$$

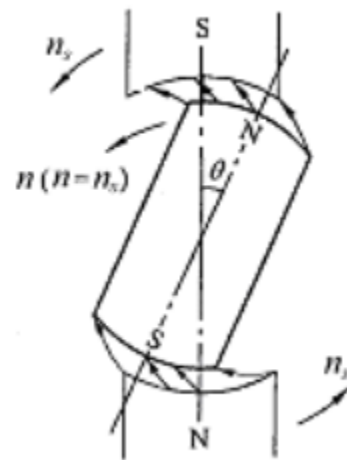
- $\theta = 45^\circ$ 转矩取得最大值。
- 转矩 $T = K(R_{mq} - R_{md}) \sin 2\theta$ ，由磁阻不同产生。
 R_{mq}, R_{md} 分别为交轴磁阻和直轴磁阻。
- 磁阻同步电动机原理：旋转磁场+磁阻转矩



磁阻同步电动机

四、磁阻转矩与基本电磁转矩

- 磁化形成的临时磁极与固有磁极，周期不同。
- 永磁同步电机中有两种转矩，磁阻转矩很小，称为附加转矩。
- 直流有槽电机存在磁阻转矩，引起转矩波动。



五、电机的起动：起动难，用鼠笼绕组。

六、机械特性 同永磁同步电机。

七、优缺点：结构简单，价格低，功率因数和效率低。

磁滞同步电动机

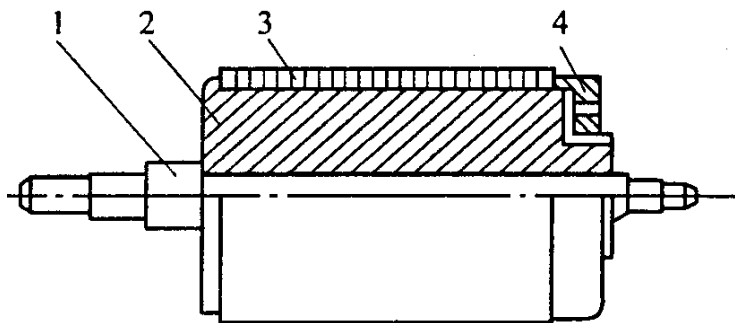
一、磁滞电动机的结构

定子结构与普通交流电机相同；

- 转子：隐极式结构,没有绕组，在外圆周处是一个环

状的有效层，由具有磁滞特性的硬磁材料制成的，但预先不磁化，无固定磁极。环状结构可以节省硬磁材料。

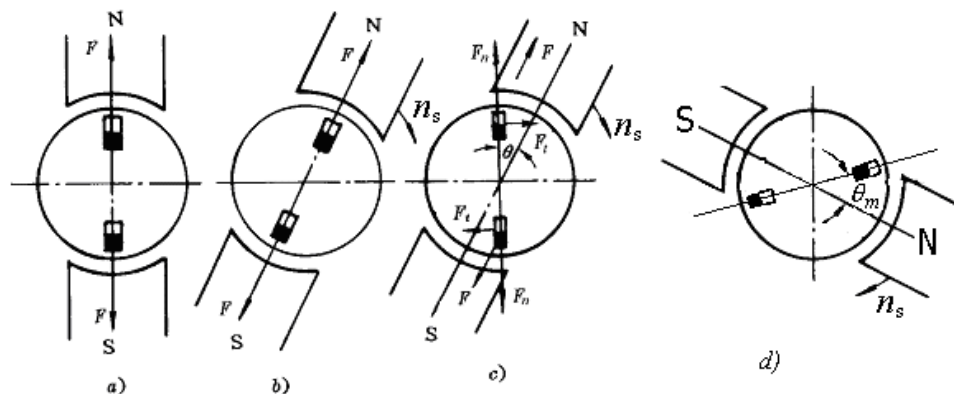
- 有效层内用非磁性材料或软磁材料制成（如黄铜、铝合金等），称衬套。



磁滞同步电动机

二、旋转磁场中磁滞材料的磁滞特性 (B变化滞后于H变化)

- 设转子由磁滞材料制成，定子磁场是外磁场，可以旋转。
- 设转子不动，外磁场转动，两磁场轴线夹角为 θ 。



- 软磁材料: $\theta = 0$ 。磁滞材料: $\theta \neq 0, \theta \leq \theta_m$ 。外磁场转角小时转子磁场轴线不变，转角大时转子磁场轴线转动。
- 磁滞角 (失调角): θ ，最大磁滞角: θ_m 。
- 转子磁场轴线滞后于定子磁场轴线变化，由磁滞材料特性决定

三、磁滞转矩 $T = K \sin \theta$

- 最大磁滞转矩 $T_{hm} = K \sin \theta_m$

磁滞同步电动机

四、起动过程

- 定子绕组通电产生旋转磁场转速 n_s 。相当于转子不动，磁场以 $n_s - n$ 转动。磁场夹角 θ_m 。 $T = T_{hm} = K \sin \theta_m$

五、同步运行 $n = n_s$

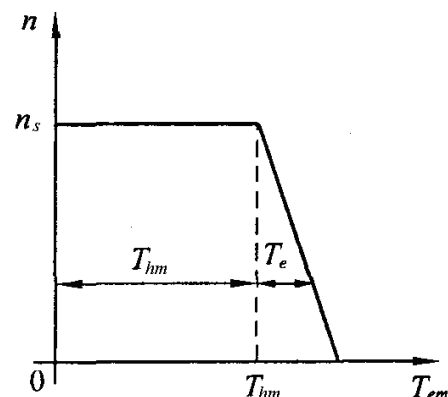
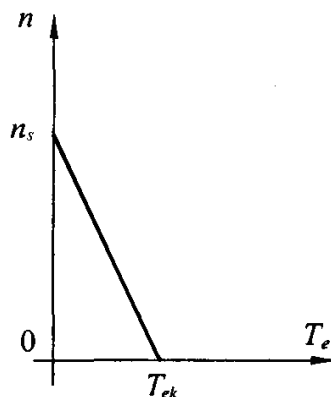
$$0 \rightarrow n_s$$

$$T = K \sin \theta \quad 0 < T \leq T_{hm} \Rightarrow 0 < \theta \leq \theta_m$$

六、异步运行 $n < n_s$

- 磁滞转矩： $T_{hm} = K \sin \theta_m$
- 涡流转矩： T_e
- 总转矩： $T = T_{hm} + T_e$

七、机械特性



磁滞同步电动机



八、异步运行时的热损耗

- 产生涡流损耗和磁滞损耗。磁滞材料磁滞损耗大，发热严重，不宜长期异步运行。

十、优缺点

- 优点：转子无起动绕组，结构简单；堵转转矩大；转子结构对称，动平衡好，转速可以很高。
- 缺点：功率因数低；磁滞材料贵。

永磁式同步电动机

❖ 思考：

- 永磁异步电动机的鼠笼绕组有何作用？为何启动时（或转差率较大时）鼠笼绕组产生电磁转矩而永磁铁不产生电磁转矩？为何同步运行时永磁铁产生转矩而鼠笼绕组不产生转矩？
- 某一永磁式同步电机，同步转速 1500r/min 。最大输出电磁转矩为 1Nm ，问当负载转矩为 0.5Nm 时，电机的转子转速？转子失调角？

Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn

