

CHINA wE-talk

永磁伺服电机

——从选型到应用

个人简介



李鹏

高级电机工程师

B&R Industrial Automation (China) Co., Ltd.

A member of the ABB Group

E-Mail: peng.li@br-automation.com

www.br-automation.com

目录

过程穿插11个重要电机术语

- 电机工作原理
- 伺服电机主要零部件
- 伺服电机选型
- 伺服电机的参数应用

电机工作原理

电机——多物理场耦合

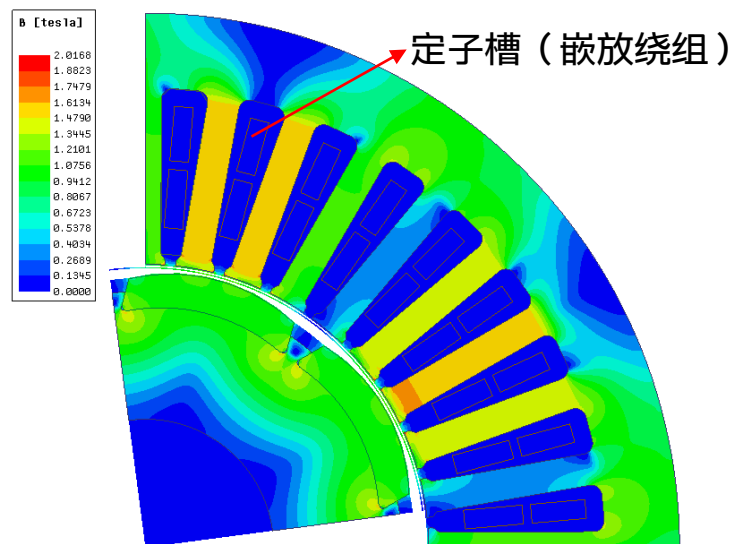
- 洛伦兹力（左手定则）

适用于通电导体在磁场中受力计算

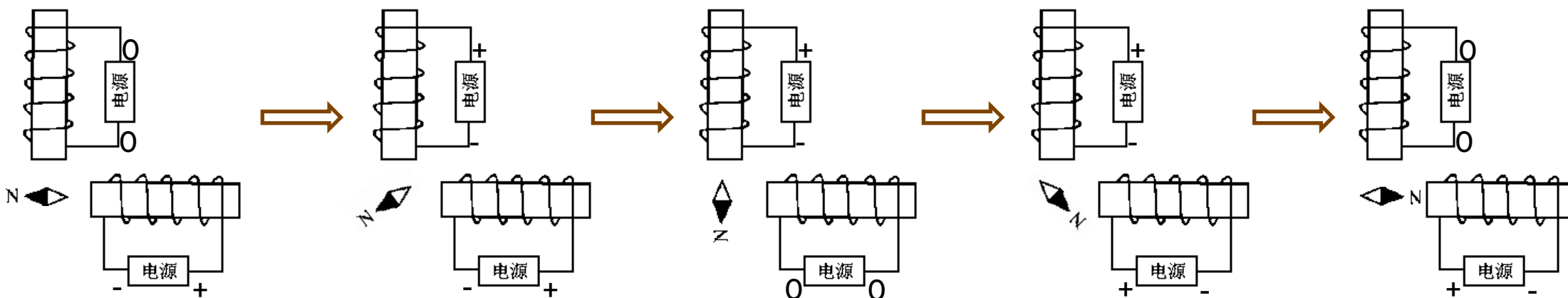
用于解释简易电机模型

- 电磁力作用（时空向量）

用于解释电机实际模型



- 红色区表示磁密大，磁力线密集
- 蓝色区表示磁密小，磁力线稀疏



同步电机① VS异步电机②

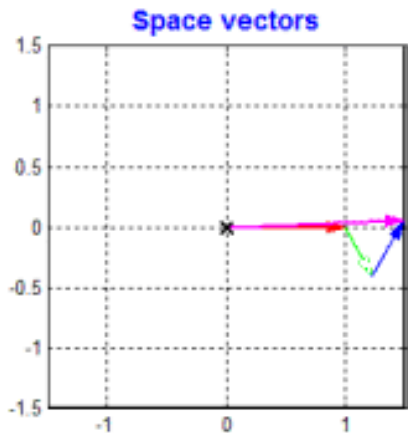
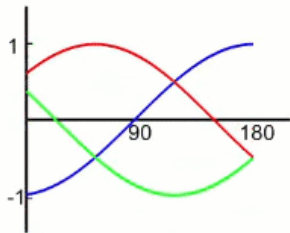
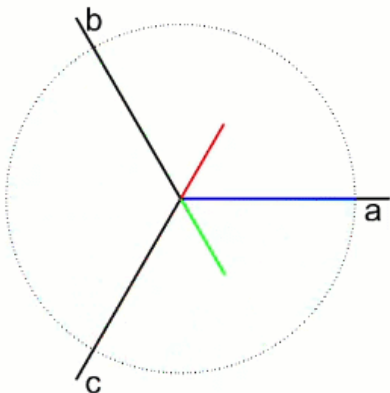
对比

电机产生有效转矩的前提条件:

- 定转子极对数相同;
- 定转子磁场旋转转速相同;

定子的时空特性:

- 时间域: 三相交变电流 (随时间正弦变化)
- 空间域: 三相相位空间相差120°



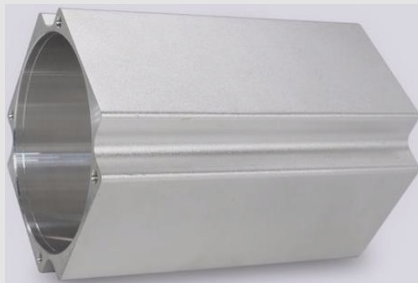
	同步电机	异步电机
定子磁场	连续旋转磁场 (n_s)	连续旋转磁场 (n_s)
转子磁场	永磁体励磁 (持续存在)	转子导体切割定子磁场后产生感应电流励磁
转子转速	n_s	$(1 - s) * n_s$
励磁电流	0	i_M
转矩电流	i_q	i_T
功率因数	≈ 1	< 1
效率	高	低

	同步电机	异步电机
成本	高	低
控制器	驱动器	变频器
伺服特性	更强	强
可靠性	强	更强
弱磁能力	一般	强
体积	小	大
控制难度	低	高

	同步电机	异步电机
齿槽转矩	有	无
转矩波动	大	小
剩磁转矩	有	无

伺服电机基本组成

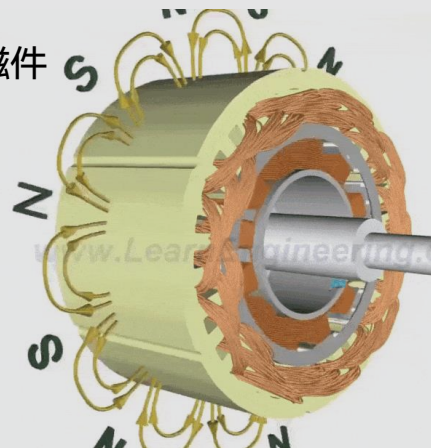
机壳



制动器



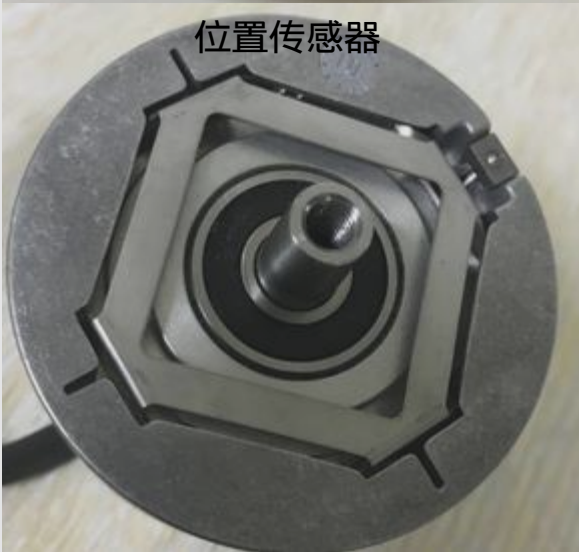
电磁件



接插件



位置传感器



选型主要参数

永磁电机

● 齿槽转矩^③

由定子齿槽效应以及转子磁极分布决定；
随转子位置周期变化，幅值代表齿槽转矩大小；
周期为槽极数最小公倍数（设计优化可消除）；
影响系统振动和噪音水平；

● 转矩波动

由齿槽转矩、电流谐波、凸极效应、磁路饱和等引起；
主要转矩波动分量频率为电频率的6/12倍；
影响系统振动和噪音水平；

● 反电势系数^④

1000r/min时线反电势有效值，单位V/krpm；
反电势波形谐波含量越低，其正弦性越好；

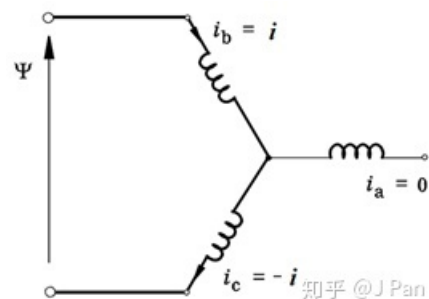
● 温升

● 散热方式

	过大	过小
转矩波动	系统振动大，噪音分贝高	设计难度大，采购成本高
反电势系数	最高转速时，母线电压不够，需弱磁控制，或抬高母线电压	转矩系数较小，需要更大的驱动电流，增加驱动成本
温升	电机过热	电机裕量大，系统成本高
极对数	高速时电磁频率高，开关频率要求高	设计不合理，采购成本高
最高转速	轴承和机械设计难度大，电机成本高	不满足负载要求
额定转矩	电机裕量较大，系统成本高	电机过热损坏或寿命缩短
峰值转矩	电机裕量较大，系统成本高	不满足系统要求

控制相关参数

d^⑥、q^⑦ 轴电感（忽略漏感）



$$\begin{cases} L_d \approx \frac{3}{2}L_{s0} - \frac{3}{2}L_{s2} = \frac{1}{2}L_{ABmin} \\ L_q \approx \frac{3}{2}L_{s0} + \frac{3}{2}L_{s2} = \frac{1}{2}L_{ABmax} \end{cases}$$

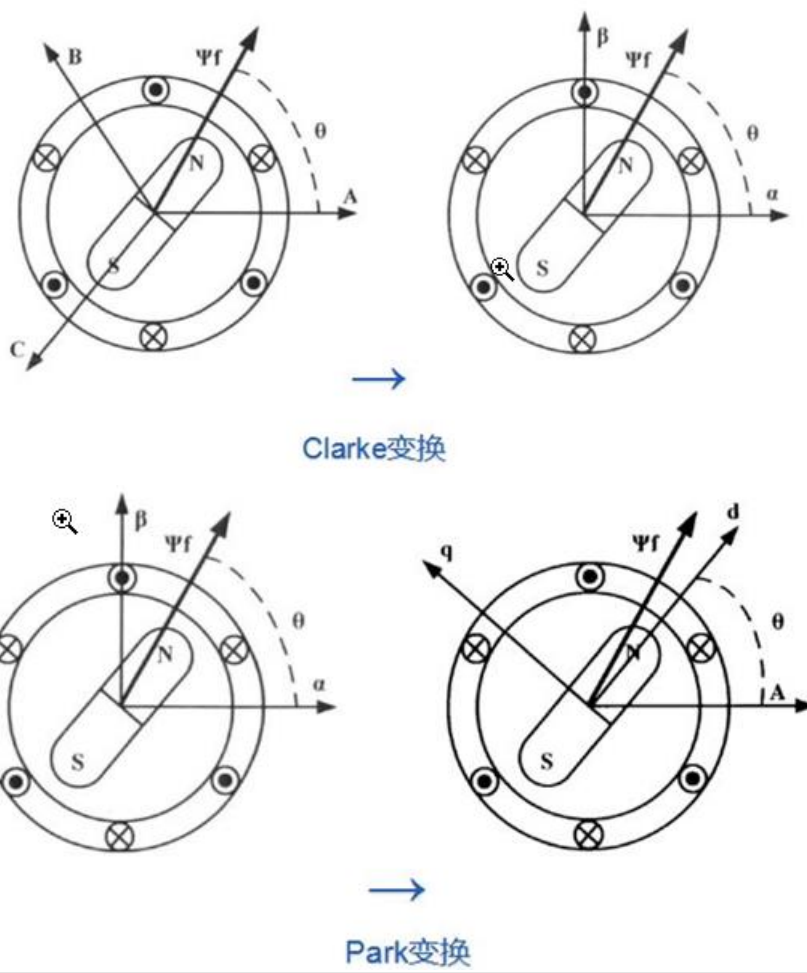
	L_d	L_q	L_q/L_d
名称	直轴电感	交轴电感	凸极比
意义	越大，弱磁能力越强； 电感越大，感生电动势越大	电感越大，感生电动势 越大	凸极比越大，弱磁时磁 阻转矩分量越大
应用场合	矢量控制时需要	矢量控制时需要	MTPC控制关键参数

对于三相电机，直轴、交轴电感具体指什么？

坐标变换

Clarke, Park变换

坐标变换两部曲



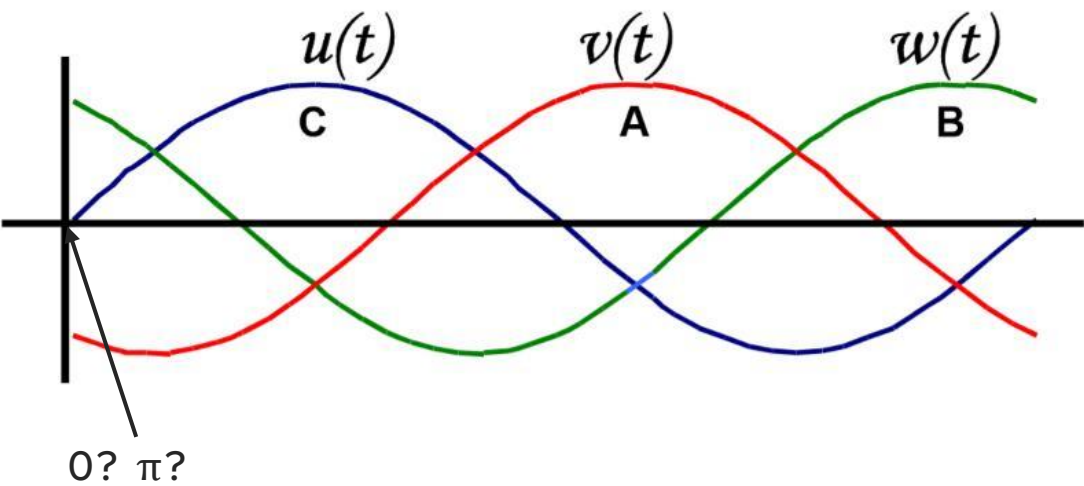
静止坐标系	旋转坐标系
三相ABC/两相 α/β	两相d/q
所有物理量为交流量 电压、电感、磁链、电感	所有物理量为直流量 电压、电感、磁链、电感
两相之间相互耦合（互感不为零）	两相完全解耦（互感为零）
控制难度大	控制难度小
通过Park变换到旋转坐标系	通过反Park变换到旋转坐标系

- 恒幅值变换
- 恒功率变换
- D/Q轴相位关系

电气零位与磁偏角^⑤

形成原因与应用校准

电气零位	机械零位	磁偏角
A相绕组中心线所对应位置	旋变或光编指示的零位	转子N极中心线处于电气零位时，反馈显示的位置角
由定子铁芯、绕组形式所决定	由旋变安装位置所决定	由电气零位和旋变安装共同决定
定子热套时铁芯圆周位置影响电机电气零位	反馈的安装位置（与定转子的相对位置）影响机械零位	需要通过Phasing整定电机磁偏角(也可通过反馈安装位置调整)
生产过程一般对电气零位不做严格要求	安装过程对机械零位不做要求	可以要求电机出厂时磁偏角为指定值



电机转矩方程

转矩系数⑧

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\psi_d I_q - \psi_q I_d)$$

$$k_e = \frac{50\sqrt{2}\pi}{\sqrt{3}}p\psi_{pm}$$

大部分电机采用 $I_d=0$ 控制：

$$k_T = \frac{T_{em}}{I} = \frac{\frac{3}{2}p\psi_{pm}I_q}{I_q/\sqrt{2}} = \frac{3}{\sqrt{2}}p\psi_{pm} = \frac{1}{60.46}k_e$$

- 注：1）电机通入单位线电流产生的平均电磁转矩为电机的转矩系数；
- 2）上式为理论推导，实际电机受温度和电枢反应影响，转矩系数的试验测量值会略低于理论值；
- 3）对于 $I_d \neq 0$ 的控制，转矩系数和反电势系数之间关系为非线性关系；
- 4）电机输出转矩的波动大小不仅与电流的正弦性（时间分量）有关，还与齿槽效应（空间分量）有关，过载输出时，还会受磁路饱和程度影响（磁性材料饱和区的非线性特性）。

电机机械方程

转动惯量^⑨

$$T_{em} = T_L + J \frac{d\Omega}{dt} + B\Omega$$

转动惯量（ $kg \cdot m^2, kg \cdot cm^2$ ）——旋转运动惯性大小的量度；

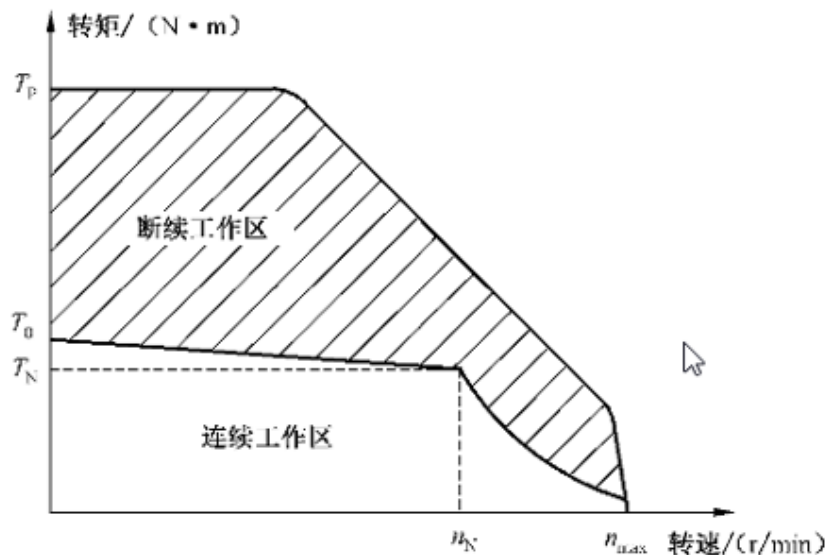
转动惯量越大，旋转角速度变化越慢，动态响应速度越慢；

大多应用场合会指定电机和负载的惯量匹配范围值（ J_L/J_M ）；

性能匹配

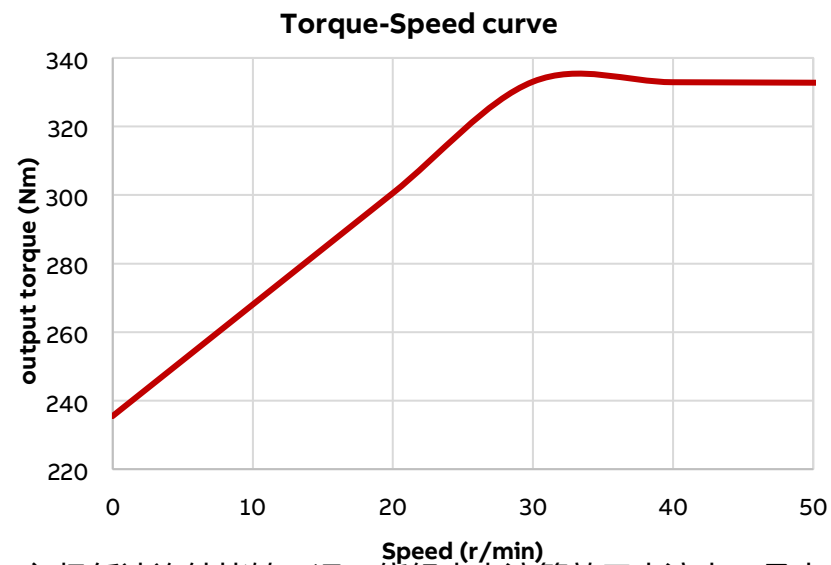
工作区^⑩

现有方法（国标、客户手册）



T_p —— 峰值堵转转矩；
 n_{max} —— 最高允许转速；
 n_N —— 额定转速；
 T_0 —— 连续堵转转矩；
 T_N —— 额定转矩。

连续堵转转矩更新

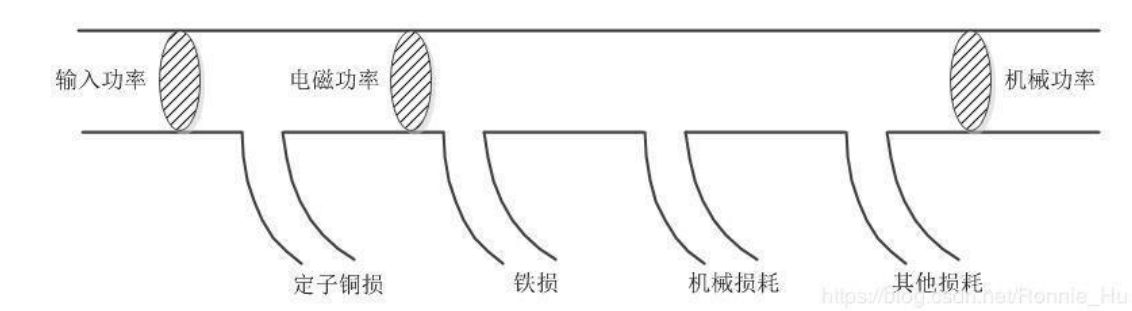


注：1) 极低速连续堵转工况，绕组内电流等效于直流电，且大小为交流电流幅值；
2) 连续堵转转矩仅为0.747倍。

- 所有工况点需落在工作区（包括断续工作区和连续工作区）内；
- 一个完整工作循环中转矩的均方根值为负载等效转矩，转速的绝对值均值为负载等效转速，对应的等效工作点需落在连续工作区内；
- 保证每个断续工作点有足够的温升裕量（持续时间电机不发生过热报警）；

电机的热分析

发热与散热



等效物理量		
电压差	电流	电阻
温度差	热流	热阻

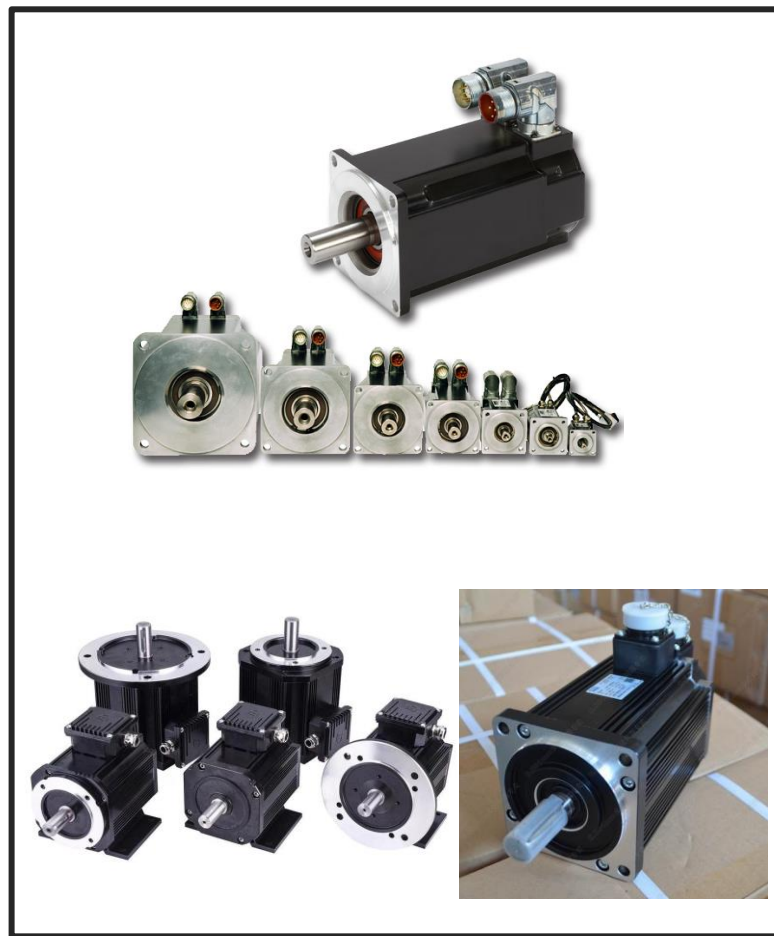
- 散热过程中热流为各部分损耗；
- 热阻越大，散热能力越差，传热后温升越高；
- 热稳定后，电机散热量等于损耗之和（能量守恒定律）；
- 降低损耗可以降低温升（优质铜线、高性能硅钢片等）；
- 降低热阻可以降低温升（内部：定子灌封；外部：强制冷却）；

表 2-1 电动机绝缘等级、极限温度及温升关系						
绝 缘 等 级		A	E	B	F	H
极限工作温度/℃		105	120	130	155	180
热点温差/℃		5	5	10	15	15
温升/K	电阻法	60	75	80	100	125
	温度计法	55	65	70	85	105
注：环境温度规定为 40℃						

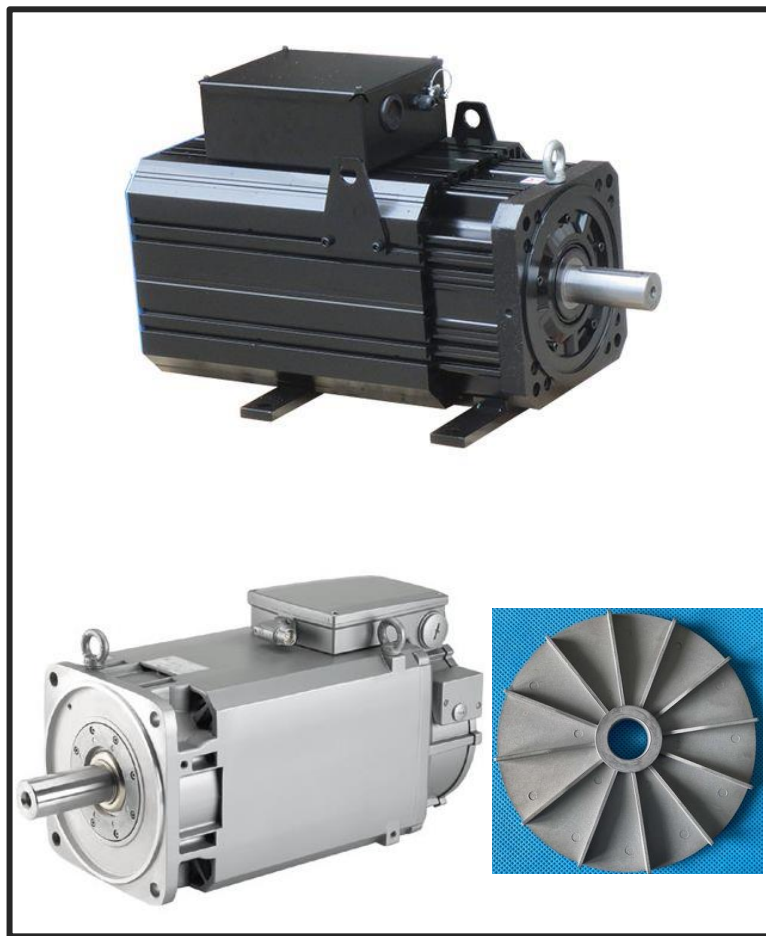
- A级绝缘材料：经过浸渍或使用 时浸于油中的棉纱、丝和纸等有机材料。
- E级绝缘材料：聚脂树脂、环氧树脂及三醋酸纤维等制成的绝缘薄膜。
- F级绝缘：云母、石棉及玻璃纤维等材料浸漆。

散热方式⑪

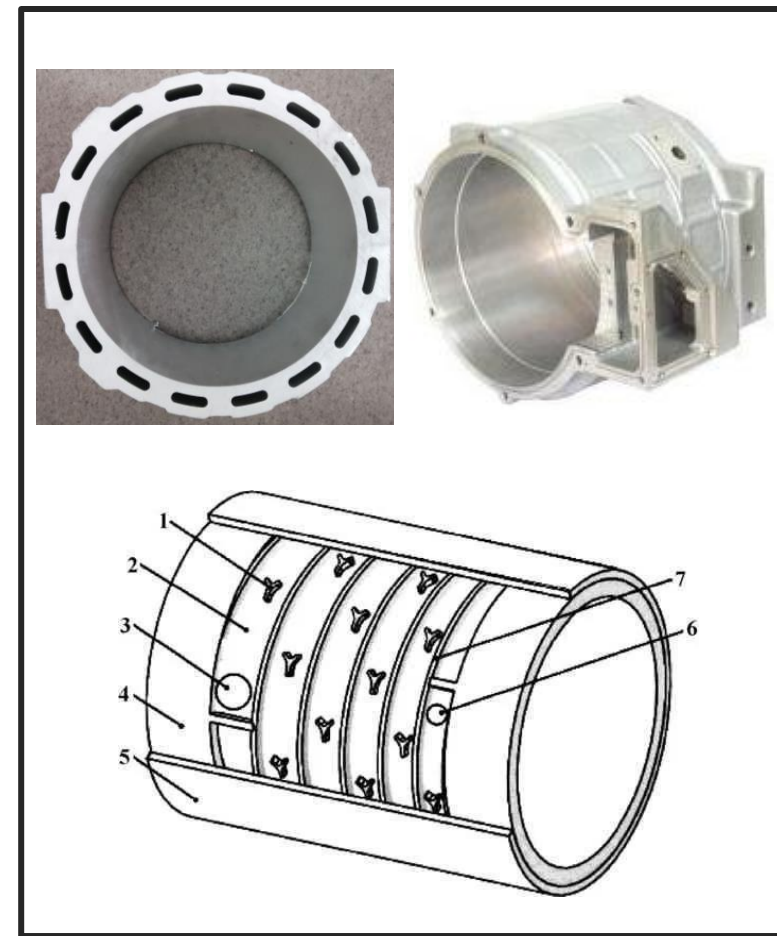
自然冷却、强制风冷和水冷



自然冷却



强制风冷



水冷

谢谢!

