

无刷直流电机与交流伺服电机 - 知识点详解

第一部分：交流伺服电机概述

1. 定义与作用

- 伺服 (Servo)**: 源于词根 "Servus" (奴隶)，意为严格遵照指令工作。伺服系统是使物体的位置、方位、状态等输出量能够**精确跟随**输入目标变化的自动控制系统。
- 伺服电机**: 作为执行元件，将电信号转换为轴上的角位移或角速度。
- 核心要求**: 强调**精确的位置控制**、**速度控制**和**转矩控制**。

2. 结构演变（从直流到交流）

- 传统直流伺服**: 依靠机械换向器和电刷，存在火花、磨损、维护难的问题。
- 交流伺服 (AC Servo)**:
 - 结构翻转**: 将直流电机的“定子磁场、转子电枢”翻转为“定子电枢、转子磁场”。
 - 去掉了电刷**: 实现了“无刷化”，维护简单，寿命长。

第二部分：BLDC 与 PMSM 的核心区别

这是本章的**理论核心**。我们不能只记结论，要掌握背后的***“电磁设计规则” (Design Rules)**。

1. 设计逻辑链条

电机的类型不是由驱动器决定的，而是由**电机本体**决定的。遵循以下因果链：

转子磁极设计 → 气隙磁密分布 (B) → 反电动势波形 (E) → 最佳驱动电流 (I)

2. 详细对比表

特性	无刷直流电机 (BLDC)	永磁同步电机 (PMSM)
1. 转子磁极设计	瓦片形磁极，采用径向充磁。	面包形磁极，采用平行充磁；或 Halbach 阵列。
2. 气隙磁密 (B)	设计目标是平顶宽阔的梯形波。	设计目标是纯净的正弦波。

特性	无刷直流电机 (BLDC)	永磁同步电机 (PMSM)
3. 反电势 (E)	梯形波 (平顶宽度应 $\geq 120^\circ$ 电角度)。	正弦波。
4. 理想驱动电流	方波 (矩形波)。	正弦波。
5. 转矩产生原理	$T = 2 \times (E_{\text{平顶}} \times I_{\text{平顶}})$ 利用平顶对平顶，避开斜坡。	$T \propto (E_{\sin} \times I_{\sin})$ 三相合成恒定力矩。
6. 传感器配置	低成本霍尔元件 (Hall) (3个，分辨率低)。	高精度光电编码器/旋变 (检测绝对位置 θ)。

第三部分：无刷直流电机 (BLDC) 的工作原理 (重点补充)

第一版这里讲得太略了，这里详细补充“六步换向法”的细节，这是 BLDC 能转起来的关键。

1. 系统硬件组成

- 三相逆变桥：由 6 个功率开关管 (VT1~VT6) 组成。
- 位置传感器：通常是 3 个霍尔元件 (H_a, H_b, H_c)，安装在定子上，互差 120° (或 60°) 电角度。

2. 控制策略：三相六拍 (120° 导通型)

- 核心规则：
 - “两两导通”：任意时刻，只有 2 相 绕组通电 (一相进，一相出)，第3相悬空。
 - “六步换向”：转子每转过 60° 电角度，霍尔信号变一次，功率管开关状态切换一次。
- 换向过程详解 (以 A 相 为例)：
 - Step 1-2 (120°区域)：A 相作为 正极 进电 ($I_a = +I$)。此时反电势处于 正平顶。
 - Step 3 (60°区域)：A 相关断 ($I_a = 0$)。此时反电势处于 下降斜坡 (避开它!)。
 - Step 4-5 (120°区域)：A 相作为 负极 出电 ($I_a = -I$)。此时反电势处于 负平顶。
 - Step 6 (60°区域)：A 相关断 ($I_a = 0$)。此时反电势处于 上升斜坡。

- 为什么叫“方波驱动”？

如果你看某一相的电流波形，它就是：“通(+) → 通(+) → 断(0) → 通(-) → 通(-) → 断(0)”。这个波形就是方波。

第四部分：交流伺服的矢量控制 (FOC) 原理 (核心补充)

这里补充我们讨论过的**“频率不可见”和“坐标变换”**的深层含义。

1. 控制目标：解耦

- 将复杂的、耦合的交流电机模型，通过数学变换，等效为**直流电机模型**来控制。
- i_d (励磁分量) \leftrightarrow 对应直流电机的励磁电流。
- i_q (转矩分量) \leftrightarrow 对应直流电机的电枢电流。

2. 三大坐标变换详解

1. Clark 变换 (3 \rightarrow 2 静止):

- 利用 $i_a + i_b + i_c = 0$ (星型接法无中线)，将三相交流电投影到 $\alpha - \beta$ 静止坐标系。

2. Park 变换 (2 静止 \rightarrow 2 旋转) —— 最关键的一步

- 输入：交流量 i_α, i_β 和 **实时转子角度 θ** 。
- 输出：直流量 i_d, i_q 。
- 物理意义**：建立一个**跟着转子一起跑**的坐标系。在这里，旋转的电流矢量看起来是**静止**的。
- “频率不可见”**：PI 控制器处理的是 i_d, i_q 这两个**直流值**，它感觉不到电机转速的变化（频率信息被 Park 变换剥离了）。

3. 反 Park 变换 (2 旋转 \rightarrow 2 静止):

- 将 PI 算出的直流电压指令 V_d, V_q ，结合实时角度 θ ，还原成交流电压指令。
- “自同步”**：电机转得越快， θ 变化越快，这里生成的正弦波频率就自动越高。

3. FOC 闭环控制流

- 电流环**： i_q 跟踪转矩指令， i_d 通常锁定为 0 (SPM 电机)。
- 速度环**：测量速度与给定速度比较，输出 i_q 指令。
- 位置环**：最外环，实现精密定位。

第五部分：直线伺服电机 (Linear Motor)

1. 结构原理

- “切开拉直”**：旋转电机 $\xrightarrow{\text{沿径向切开并展平}}$ 直线电机。
- 定子 \rightarrow 初级 (Primary)**：线圈绕组，通常运动。
- 转子 \rightarrow 次级 (Secondary)**：永磁体轨道，通常固定。

2. 优缺点 (直驱技术 DD)

- 优点：
 - 速度/加速度极高：无离心力限制，无机械传动惯量。
 - 精度极高：消除了反向间隙 (Backlash)。
 - 缺点：
 - 发热严重：初级是运动的，散热难，热膨胀影响精度。
 - 边端效应：磁场两头断开，导致推力波动。
 - 防护难：磁铁裸露吸铁屑。
-

第六部分：重点问题 Q&A (来自你的提问)

1. 极对数 p 的定义：
 - 结论：每相绕组的极对数 = 合成旋转磁场的极对数 = 转子永磁体的极对数。它是电机的**硬件固有参数**，数值唯一。
2. 为什么 i_c 不需要测？
 - 基于 星型接法 (Y) 且中性点不接地。根据 KCL 定律，强制 $i_a + i_b + i_c = 0$ ，所以测两相即可算第三相。
3. 转子磁场方向：
 - 定义为 **d 轴 (直轴)** 方向。FOC 中控制 $i_d = 0$ 就是为了让定子磁场始终垂直于这个轴 (q 轴)，产生最大转矩。