

# 交流绕组与无刷直流电机 - 知识点详解

## 第一部分：交流绕组的基本概念

这是理解所有交流电机（BLDC、PMSM、IM）的理论基石，请务必掌握以下核心参数的**准确定义**。

### 1. 极对数 ( $p$ )

- 定义：**指定子上**每相绕组**（例如单独的A相）通入电流后，在气隙空间所形成的磁场极对数。
  - 若每相绕组产生  $2p$  个磁极（即  $N$  极和  $S$  极的总数），则极对数为  $p$ 。
- 合成磁场：**虽然定义是基于“每相”的，但当三相绕组通入对称交流电时，它们合成的总旋转磁场的极对数**依然是**  $p$ 。
- 作用：**决定了电机的同步转速  $n_s = 60f/p$ 。

### 2. 电角度 ( $\theta_e$ ) 与 机械角度 ( $\theta_m$ )

- 定义：**
  - 机械角度：**转子在几何空间上实际转过的角度。
  - 电角度：**磁场变化的一个周期（即导体经过一对 N/S 极）定义为  $360^\circ$  电角度。
- 换算公式：**

$$\theta_e = p \times \theta_m$$

- 物理意义：**电机控制系统（如换相时刻、PWM波形）是基于电角度工作的，而电机的物理转动表现为机械角度。

### 3. 每极每相槽数 ( $q$ )

- 定义：**定子铁心上，每一个磁极（ $2p$ ）、每一相（ $m$ ）平均分到的槽数。
- 公式：**

$$q = \frac{Z}{2p \cdot m}$$

- $Z$ ：定子总槽数； $m$ ：相数； $p$ ：极对数。
- 分类：**
  - 整数槽：** $q$  为整数（设计简单，最常见）。
  - 分数槽：** $q$  为分数（常用于无刷电机，可削弱齿槽转矩）。

## 第二部分：无刷直流电机 (BLDC) 的结构与组成

### 1. 结构特点：与有刷电机的“里外翻转”

- **有刷直流电机**：磁极（定子）不动，电枢绕组（转子）旋转，靠**机械换向器**换向。
- **无刷直流电机 (BLDC)**：
  - **定子**：安放多相（通常为三相）**电枢绕组**，产生旋转磁场。不动，易于散热。
  - **转子**：由**永磁体**构成。旋转，惯量小。
  - **换向**：机械电刷消失，取而代之的是**“位置传感器 + 电子开关电路”**。

### 2. 系统组成

BLDC 是一个典型的**机电一体化系统**，缺一不可：

1. **电机本体**：定子 + 转子。
2. **位置传感器** (Position Sensor)：
  - 安装在转子轴端（常用霍尔元件 Hall Sensor）。
  - **作用**：检测转子磁极的实时位置，相当于“电子眼”，告诉控制器何时换向。
3. **电子开关线路** (Inverter)：
  - 由功率开关管（MOSFET或IGBT）组成的三相逆变桥。
  - **作用**：相当于“电子换向器”，根据传感器的信号，按顺序切换定子绕组的电流。

---

## 第三部分：BLDC 的工作原理 (电子换向)

### 1. 控制策略：方波驱动 (120°导通型)

- **两两导通原则**：
  - 在任何时刻，三相绕组中只有**两相**通电（一相电流流入，一相电流流出），**第三相悬空**（不通电）。
- **六步换向法**：
  - 转子每转过  $60^\circ$  **电角度**，霍尔传感器信号跳变一次。
  - 控制器接收到信号后，切换一次功率管的状态。
  - 在一个电周期（ $360^\circ$  电角度）内，电流状态切换 **6次**（例如：AB → AC → BC → BA → CA → CB）。

### 2. 磁场与转矩的产生

- **定子磁场（步进式）**：
  - 由于采用六步换向，定子合成磁场并非连续平滑旋转，而是**每隔  $60^\circ$  电角度跳变一次**。
  - 磁场像是在前面“走台阶”，转子在后面“追”。

- **转子运动：**
    - 设计上保证定子磁场总是出现在转子磁极前方  $90^\circ \pm 30^\circ$  的范围内。
    - 在此范围内，定子对转子的电磁吸力（转矩）最大，驱动转子连续旋转。
- 

## 第四部分：主要运行特性

### 1. 机械特性

- 与他励直流电机类似，BLDC 具有**硬特性**（转速随负载增加下降很少）。
- **调速：**通过调节直流母线电压或改变 PWM 占空比，可以平滑地调节转速。

### 2. 转矩脉动 (Torque Ripple)

这是 BLDC 的主要缺点，需重点理解其成因：

- **换相转矩脉动**（主要来源）：
    - **原因：**绕组**电感 ( $L$ )** 阻碍电流突变。
    - **现象：**换相时，关断相电流下降慢（续流），开通相电流上升慢。若两者速率不一致，会导致总电流出现**尖峰或凹陷**，直接引起转矩波动。
  - **齿槽转矩：**
    - **原因：**定子开槽导致磁阻不均匀，转子旋转时产生周期性的“卡顿感”。
- 

## 第五部分：重点问题解答

结合你之前的提问，这里是专门的总结。

### Q1：无刷直流电机的定子磁场是连续变化还是步进变化的？

- **结论：**是**步进变化**的。
- **解释：**在标准的“三相六状态”方波控制下，定子绕组的通电状态是离散的，每隔  $60^\circ$  电角度切换一次。因此，定子合成磁场矢量在空间上也是每隔  $60^\circ$  电角度**瞬间跳变**一次，呈现出“跳跃/步进”式的旋转，而不是像正弦波驱动那样连续平滑旋转。

### Q2：如何减少无刷直流电机的转矩脉动？

1. **控制层面：**
  - **PWM 调制优化：**在换相期间，通过调节开关管的 PWM 占空比，强制让关断相电流的下降速率等于开通相电流的上升速率，保持总电流恒定。

- **改为正弦波驱动 (FOC)**: 将控制方式升级为矢量控制 (PMSM模式), 输入连续的正弦波电流, 产生连续旋转的圆形磁场, 从根本上消除换相脉动。

## 2. 电机本体层面:

- 增加相数 (如五相电机, 步进角减小)。
- 采用**斜槽** (定子或转子磁极倾斜) 或**分数槽绕组**, 以消除齿槽转矩。

## Q3: BLDC 交流伺服电动机为什么会出现换相转矩脉动?

- **核心原因**: 绕组电感 ( $L$ ) 的存在导致电流无法突变。
- **详细机制**:
  - 换相意味着电流路径的切换 (例如电流从 B相 换到 C相)。
  - B相电流要切断, 但因电感作用只能缓慢下降; C相电流要接通, 也因电感作用只能缓慢上升。
  - 在换相过渡期内, 如果“一降一升”的速度不完全匹配 (受反电势和电压影响), 流过电机的**合成总电流矢量**的大小就会发生波动。
  - 根据  $T_{em} = K_T I$ , 电流的瞬时波动直接导致了输出转矩的脉动 (冲击)。