

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 (θ_e) 与 机械角度 (θ_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° 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° **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° 电角度) 内，电流状态切换 **6次**（例如： $AB \rightarrow AC \rightarrow BC \rightarrow BA \rightarrow CA \rightarrow CB$ ）。

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° 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° 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° 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)。