# 1. 基础知识

1. FOC(Field-Oriented Control)：磁场定向控制，也被称作矢量控制(VC，Vector Control)
2. BLDC：无刷直流电机
3. PMSM：永磁同步电机
4. ESC：电子调速器(电调)，航模中对于无刷电机的驱动
5. KV值：电机电压每升高1V，电机转速提升的数值，在无刷电机中，这个值为常量
6. 尺寸：无刷电机的型号命名中有2216、2814等数字，前两位是指定子的外径，后两位是指定子的高度，数值越大的电机功率越大，重量也越大。

无刷电机和有刷电机最大的区别：有刷电机为机械换向，无刷电机通过电子换向来驱动转子不断地转动。电机的电压和KV值决定了电机转速，而电机的转速决定了换向的频率。

BLDC的反电动势接近梯形波，所以会有抖动问题。

PMSM的反电动势为正弦波

用软件和算法结合PWM技术将方波转变成等效的SPWM正弦波或者SVPWM马鞍波，可以实现更好的无刷电机平滑控制。

## 1.1 无刷电机原理



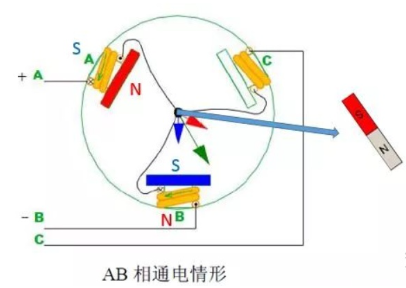
图\* 直流电机基本模型

电机驱动的基本原理如图\*所示，根据右手螺旋定则和磁极同性相斥异性相吸的原理，中间的永磁体在两侧电磁铁的作用下被施加一个力矩，从而进行旋转。

对于无刷电机，以三相二极内转子电机为例，其简化模型如图\*所示。



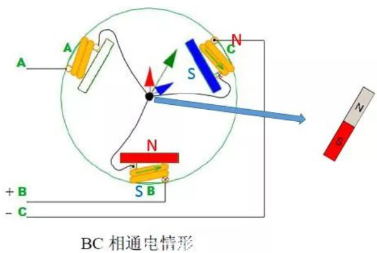
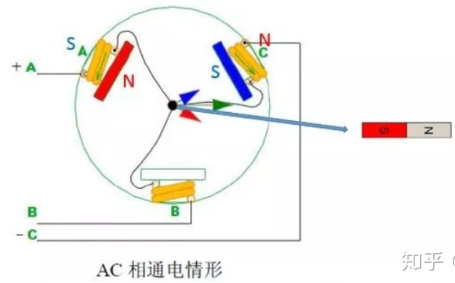
图\* 三相无刷电机结内部构简图



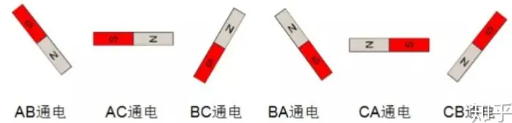
转子处于CO(O为中心点)连线平行时，磁铁受到A、B两个磁极一推一拉的作用，此时受到的力矩最大。

当处于上图中右边的状态时，受到的合力矩为0处于稳定状态。也就是说，AB相通电会让转子努力转到上图中右边的状态。C相此时并不起作用。

同理可得下面的状态：



以此类推，可以得到每个通电状态下转子的角度，就是下图中的6个状态，每个状态间隔60度，6个过程即完成了完整的转动，共进行了6次换相。



BLDC由于反电动势接近梯形波，所以肯定会有换相时的抖动问题。但是转一圈抖6下太明显了，如果增加电机槽、极对数(磁铁对数)，之前是360度里面抖6下，现在变成120度里面抖6下，甚至更小。实际上买到的BLDC电机基本都是多级对的。



## 1.2 三相逆变电路

图\* 三相逆变电路简图

逆变电路：将直流电变换为交流电，简单地是就是一个可以产生不同电流流向的电路。



MOS管可以看作电压控制的高速电子开关，在MOS管的栅极施加高电平或低电平，既可以控制MOS管的源极和漏极导通或关闭。如图\*所示的三相逆变电路，假设打开第一组半桥电路的上桥臂Q1、第二组和第三组半桥电路的下桥臂(Q4和Q6)，此时电流从电源正极流过无刷电机的A相，流经B、C相，最后回到电源负极。

在此三相逆变电路中，每个状态下的无刷电机三相线圈都会有电流产生，相比于只让两相线圈有电流通过，此电路可以产生更大的扭矩。

如果将每个半桥电路中的上桥MOS管导通而下桥MOS管关闭状态定义为1，将半桥电路中的上桥MOS管关闭而下桥MOS管导通状态定义为0，则此三相逆变电路中的半桥驱动电路共有8种组合方式：000、001、010、011、100、101、110、111。

为什么一个半桥中的上下桥臂同时只能导通或关闭1个？

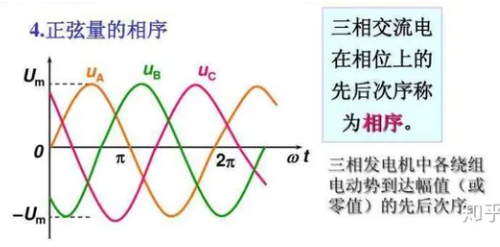
1.上下桥臂同时导通：相当于电源短路

2.上下桥臂同时断开：这样就相当于有一相不起作用，浪费！

## 1.3 旋转的三相电机波形

假设现有一个电机，手动匀速转动它的转子，然后用示波器观察它的三相输出电压(也就是反电动势产生的电压)

可以得到3根正弦曲线，而且三根曲线相位差为120度



假如在三相无刷电机的三相线圈上输入上述的三相正弦电压，那么就可以驱动无刷电机平稳高效地旋转了。

FOC驱动无刷电机的基本手段：通过计算所需电压矢量，使用SVPWM技术产生调试信号，驱动三相逆变电路，合成出等效的三相正弦电压驱动电机。

# 2. FOC控制原理