# 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。
7. 电流闭环控制：让电机始终产生一个恒定的力矩(也就是恒定的电流，因为力矩和电流成正比)
8. Clarke变换：实际上就是降维解耦的过程，把三相相位差120度的电机波形(Ia、Ib、Ic)降维成两维矢量(Iα、Iβ)，仍是非线性的正弦。
9. Park变换：将Iα、Iβ线性化

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



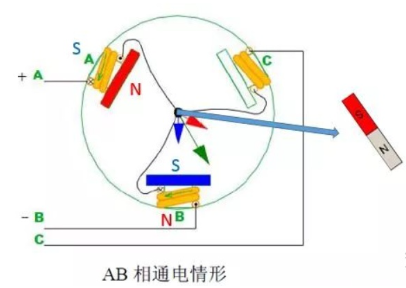
图\* 直流电机基本模型

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。



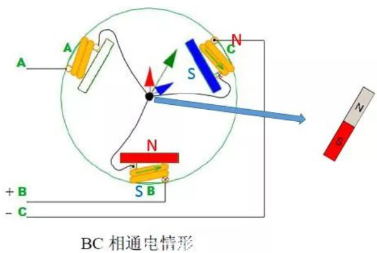
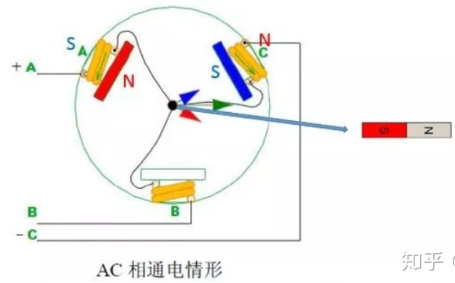
图\* 三相无刷电机结内部构简图



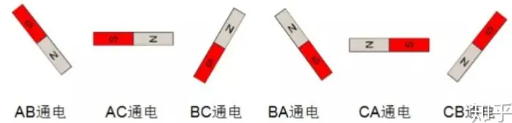
转子处于CO(O为中心点)连线平行时，磁铁受到A、B两个磁极一推一拉的作用，此时受到的力矩最大。

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？

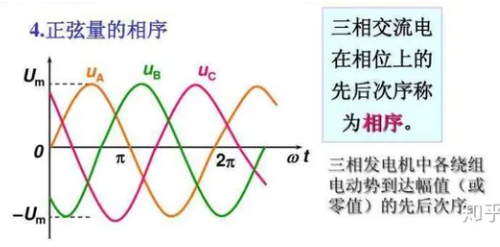
1.上下桥臂同时导通：相当于电源短路

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。

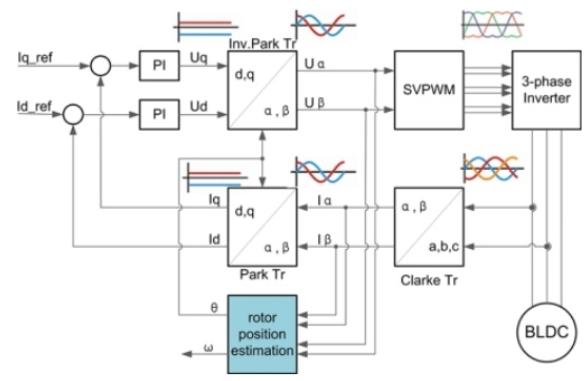
# 2. FOC控制原理

如果要平稳地驱动三相电机转动，需要生成三个相位差120度的正弦波。

SPWM：在PWM的基础上用正弦波来调制合成具有正弦波规律变化的方波。

不过SPWM调试方法在FOC控制中并不常用，因为SPWM比SVPWM的母线电压利用率要低15%。

FOC控制的整个流程图(以电流闭环控制为例)：



FOC控制步骤：

1. 对电机三相电流进行采样，得到Ia，Ib，Ic
2. 将Ia，Ib，Ic经过Clark变换得到Iα，Iβ
3. 将Iα，Iβ经过Park变换得到Iq、Id
4. 计算Iq、Id和其设定值Iq\_ref、Id\_ref的误差
5. 将上述误差输入到两个PID(只用到PI)控制器，得到输出的控制电压Uq、Ud
6. 将Uq、Ud经过Park逆变换得到Uα、Uβ
7. 用Uα、Uβ合成电压空间矢量，输入到SVPWM模块进行调制，输出该时刻三个半桥的状态编码值(000、001、010、011、100、101、110、111)
8. 按照前面输出的编码值控制三相逆变器的MOS管开关，驱动电机
9. 循环上述步骤

## 2.1 Clark变换

FOC控制中第一步：对三个相电流进行采样。只需要两个采样电阻即可，因为由基尔霍夫电流定律(KCL)，在任一时刻，流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和，也就是：

Ia + Ib + Ic = 0，三个电流基本上为三个相位差120度的正弦波。

因此，只需要知道其中两个即可算出第三个电流。

Clarke变换：实际上就是降维解耦的过程，把三相相位差120度的电机波形(Ia、Ib、Ic)降维成两维矢量(Iα、Iβ)，仍是非线性的(正弦)

注意这里的Iα、Iβ，是虚拟出来的变量，所以在计算出一组Iα、Iβ后，需要通过Clark逆变换还原到原来的三相波形。



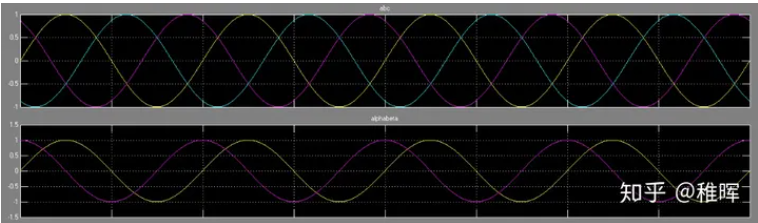
图\* clark变换(α-β坐标系)

把三维矢量Ia、Ib、Ic降维到二维坐标系α-β中可得：





Ia = Iα，通过上式可以得到Ib = Ic

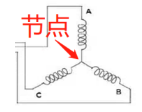


经过变换后其实还是正弦波，只不过少了一个需要控制的变量，现在只需要控制Iα、Iβ这两个变量。

### 克拉克变换的等幅值形式

假设α相输入1A电流：

当电流输入时，根据基尔霍夫电流定律：Ia+Ib+Ic=0



假设Ia = -1，则根据上面的式子，Ib = Ic = 1/2，(电机三相的相电阻相等)



将其带入得：



矢量a与α轴重合，但是由于b、c相电流投影的存在，导致在a相输入1A电流，反应在α轴上的电流并不是1A，而是-3/2。

因此为了，让式子等幅值，即使得a相电流为1A时，反应在α轴上的电流也是1A，因此需要乘上系数2/3。



克拉克变换的等幅值变换公式：







由于基尔霍夫电流定律的存在，因此并不需要知道所有的三相电流，只需要知道其中的任意两相电流即可求出另一相的电流，在硬件电流设计中，可以省去一路的电流传感器，节省了成本。

经过clark逆变换：由公式可得



## 2.2 Park变换

在实际应用中，转子一直处于转动的状态，因此对应转子状态的Iα和Iβ实际上一直在变化。

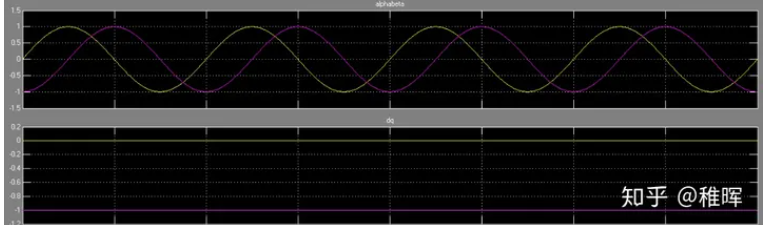
固定在定子上的坐标系α-β，固定在转子上的坐标系q-d

帕克变换是在电机定子上的α-β坐标系上，另外新建一个q-d坐标系，这个坐标系可以随电机转子转动，它与电机转子固联。

将坐标系旋转θ度，其中Q-D坐标系随转子转动，D指向电机的N级，将Q-D坐标系因转动而产生的与 α-β坐标系的差角θ称之为电角度。







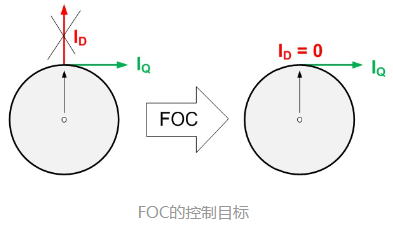
因为Q-D坐标系相对于α-β坐标系处于静止状态，因此通过Park变换可以将非线性矢量Iα、Iβ进行线性化为Iq和Id

因此，在知道电角度的前提下，可以用Q-D坐标系上的定值来描述电机的旋转。在实际的FOC应用中，电角度一般由编码器测得，可以当作已知量，通过Park逆变换可以求出Iα和Iβ如式\*所示，进而可以通过Clark逆变换求出电机的三相电流Ia、Ib、Ic。通常在简单的FOC应用中，只需要控制Iq的电流大小，而把Id设置为0，即可控制定子的三相电流的大小，进而控制定子产生的磁场强度和电机产生的力矩大小。



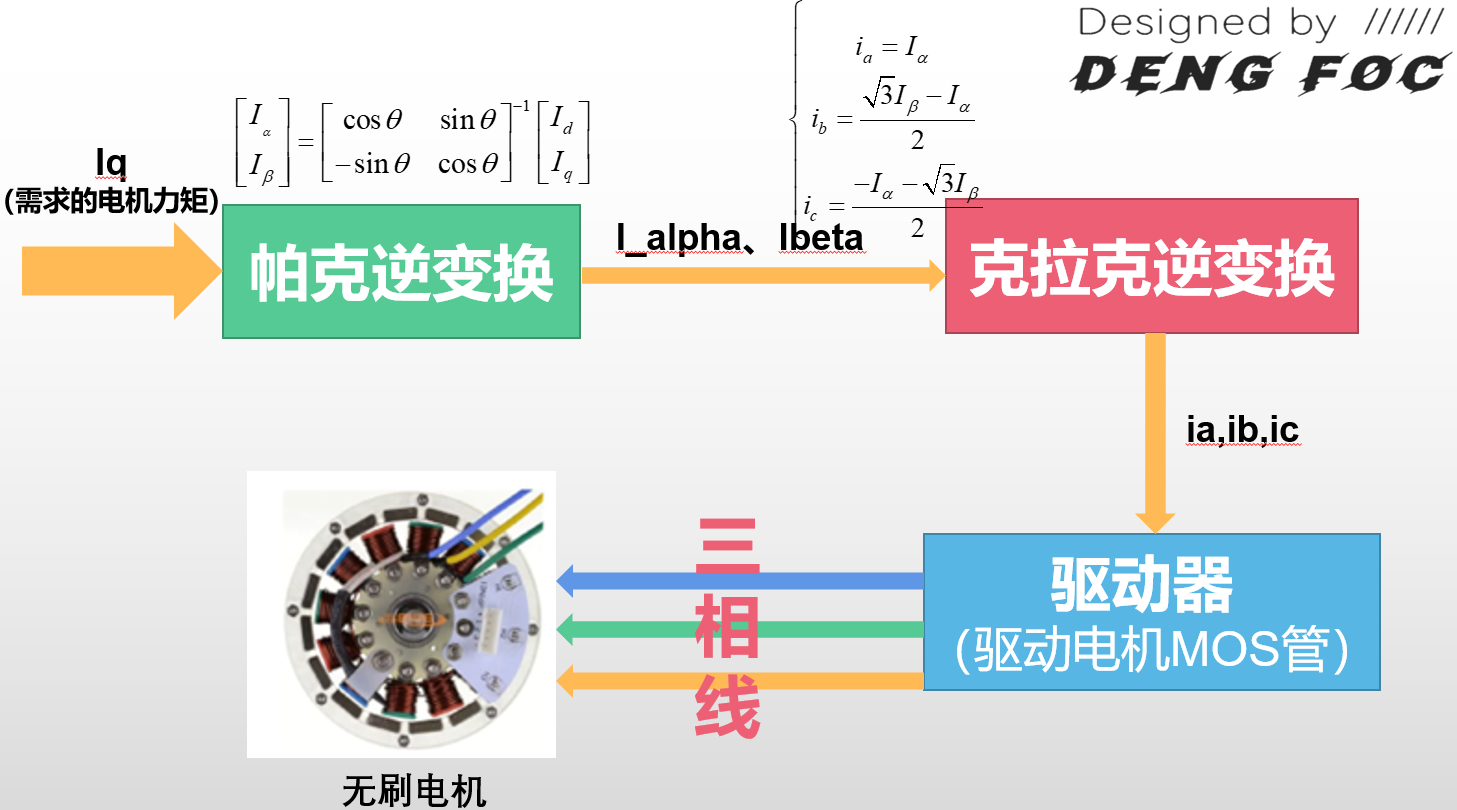
其中Iq是我们需要的，代表了期望的力矩输出。

Id不需要，希望尽可能把它控制为0



# 3.开环速度代码编写

FOC基础算法过程总结：



FOC控制过程：输入需求的力矩，最后得到对应真实世界电机输出力矩的过程。其中最核心的数学过程就是Park逆变换和Clark逆变换。

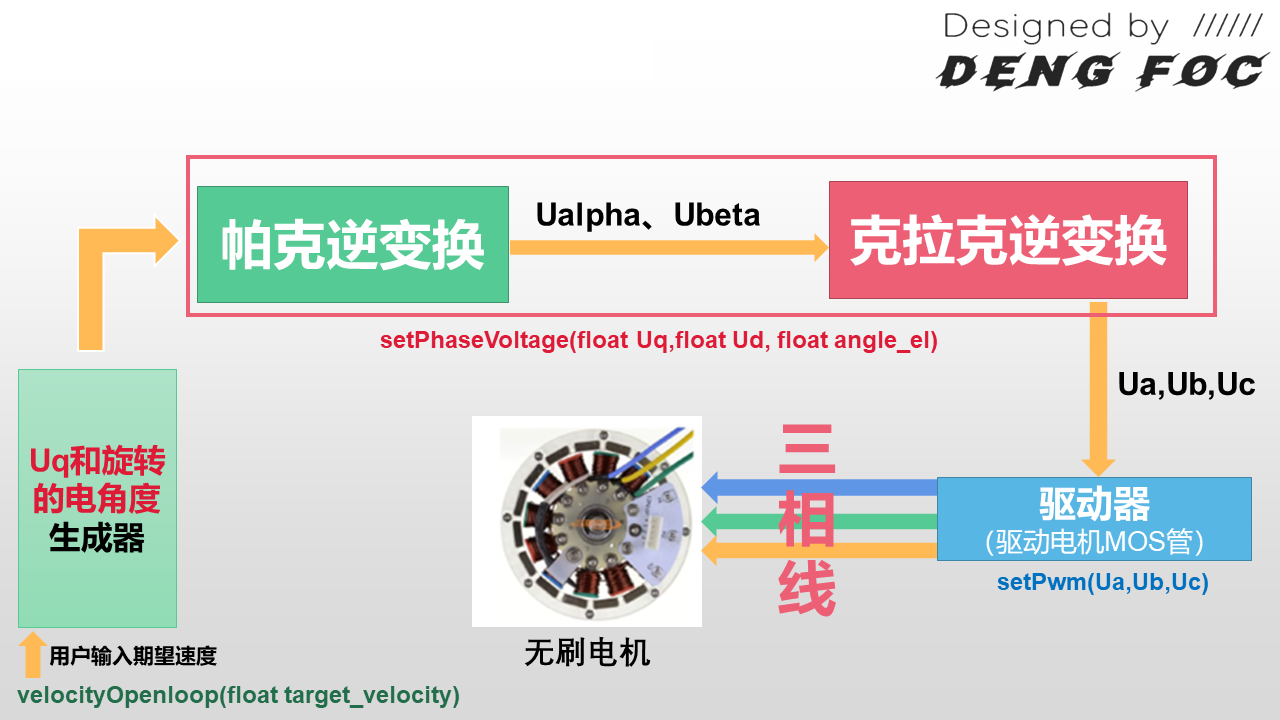
Park逆变换：对用户输入的Iq进行变换，根据电角度求出Iα和Iβ。

Clark逆变换：根据Iα和Iβ求出三相电流Ia、Ib、Ic。

最后这三个Ia、Ib、Ic能够用作控制指令输入到电机控制器硬件中进行电机的控制。

## 3.1 开环速度控制原理

常见的无刷电机控制芯片和电路，只能接受Ua、Ub、Uc电压控制信号，而不能直接的控制Ia、Ib、Ic。



电机的极数就是的磁极数，磁极分N极和S极，一般磁极数是成对出现，如2极电机，一般把1个N极和一个S极称为一对磁极，也就是极对数为1。

电角度 = 机械角度 \* 极对数

## 3.2电机的极对数测量

方法1：可以使用低压直流电源，限制一定的电流，加载到三相中的任意两相，用手拨动电机一圈，有稳定位置的个数就是极对数。

方法2：使用示波器进行测试，将示波器的端子和地连接到三相电机的任意两相上，用手转动电机一圈，出现几个正弦波就是几对极。

# 4.空间电压矢量

空间电压矢量：在控制电机过程中虚拟出来的一个矢量，矢量(有大小和方向)。

以前面的三相逆变驱动电路中的状态(100)为例：



此时等效电路如图：