



哈爾濱工業大學(深圳)
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

自动控制实践 A

实验报告

专业： 自动化

班级： 自动化 1 班

姓名： 吕家昊

学号： 210320111

同组人： 崔哲豪

实验名称： 电机 PWM 控制与驱动电路实验

实验日期： 2023 年 10 月 13 日

实验与创新实践教育中心

Education Center of Experiments and Innovations

一、 实验原理

1 直流无刷电机

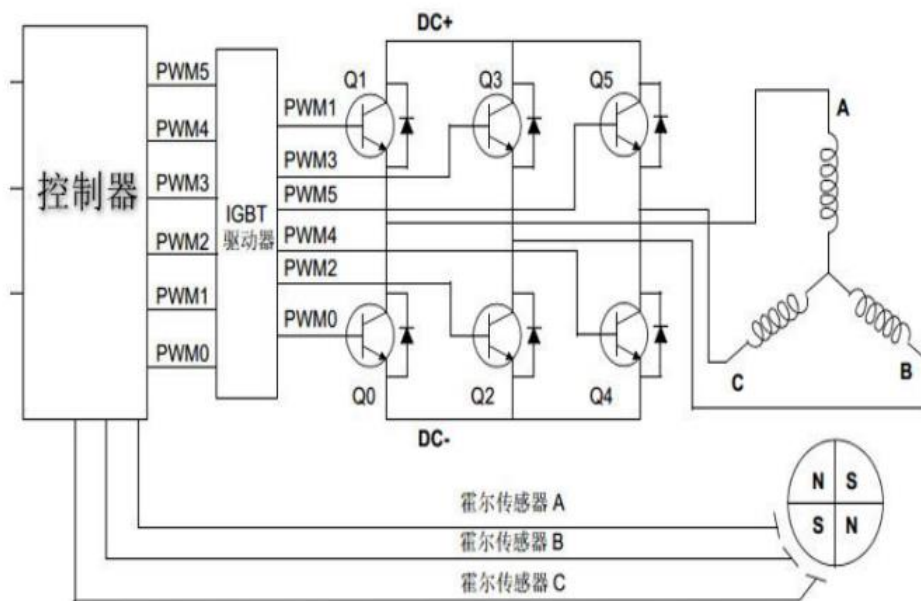


图 2-1-1 有霍尔传感器的 BLDC 控制框图

根据无刷直流电机转子磁极的位置，对定子线圈进行换相通电，形成 6 步的旋转磁场，进而带动转子同步转动。

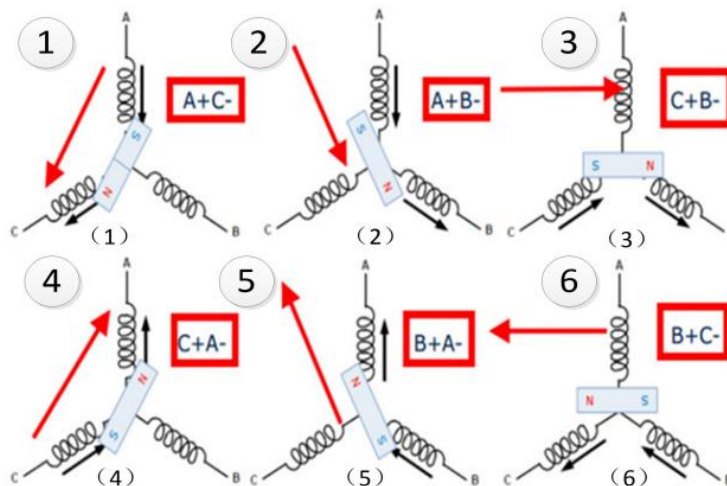


图 2-1-2 6 拍定子线圈通电方式示意图（逆时针旋转）

按照上图的方式通电时，三相绕组线圈形成的合成磁场会慢慢的逆时针转动，形成一个旋转磁场，从而导致转子的运动。

控制框图里的霍尔传感器是根据霍尔效应制作的一种磁场传感器，有正向磁场通过霍尔传感器时，输出 1，有反向磁场通过时输出 0。霍尔传感器在和电机的转子做相对运动时，由于转子下磁场密度的变化，会产生变化的信号。如果

将一只霍尔传感器安装在靠近转子的位置，当 N 极逐渐靠近霍尔传感器，即磁传感器达到一定值时，其输出是导通状态；当 N 极逐渐离开霍尔传感器、磁感应逐渐小时，其输出仍然保持导通状态；只有磁场转变为 S 极并达到一定值时，其输出才翻转为截止状态。在 S 和 N 交替变化下传感器输出波形占高、低电平各占 50%。如果转子是一对极，则电机旋转一周霍尔传感器输出一个周期的电压波形。

转子每转过 60° 电角度，定子上其中一个霍尔传感器就会改变状态，因此，完成电周期需要六步。在同步模式下，每转过 60° 电角度相电流切换一次。（一个电周期可能并不对应于完整的转子机械转动周期，完成一圈机械转动要重复的电周期数取决于转子磁极的对数。）每对转子磁极换向需要完成一个电周期。因此，转子的转数=电周期数/转子磁极对数，即提前设定好输出电流或电压信号的电周期数，就能得到电机转子旋转的转数，实现位置控制。

2 交流伺服电机

在伺服系统中，直流伺服电机能获得优良的动态与静态性能，其根本原因是被控制量只有电机磁通 Φ 和电枢电流 I_a ，且这两个量是独立的。此外，电磁转矩与磁通 Φ 和电枢电流 I_a 分别成正比关系，因此可做线性控制。如果能够模拟直流电机，求出交流电机与之对应的磁场与电枢电流，独立地加以控制，即可使交流电机具有与直流电机近似的优良特性。为此，必须将三相交变量（矢量）转换为与之等效的直流量（标量），建立起交流电机的等效模型，然后按直流电机的控制方法对其进行控制。

在使用矢量控制方法控制电机时，需建立交流伺服电机的等效模型，使用 Clark 和 Park 变换对矢量进行变换并加以控制。

交流伺服电机的磁场方向为正弦磁场。U、V、W 三相的电流分别为 i_a 、 i_b 、 i_c ，且电流幅值相等，相位相差 120°，可得电机各相电流表达式：

$$\begin{cases} i_a = i_m \sin(\omega t) \\ i_b = i_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = i_m \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

其中 ω 表示电流角频率， i_m 表示电流幅值。

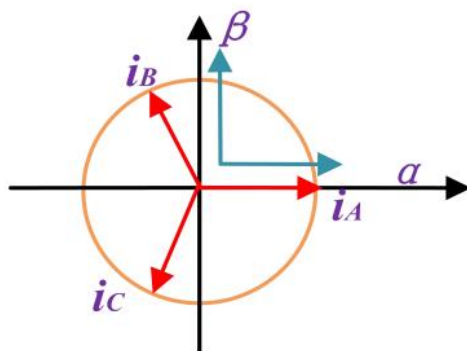


图 2-2-3 电流矢量变换原理图

将平面三电流矢量经 Clark 变换到静止的 $\alpha \beta$ 坐标系下，投影到坐标轴可得：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, S_a = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

为了进一步方便计算，把二维坐标系建在电机转子上，同时由于电机转子在实时转动，则需要一个转化规则，将上述二维坐标系转化为转子上的运动坐标系。随时间变化的绕组电流产生的磁场可等效为旋转磁场，则可以将绕组电流表达在旋转坐标系中。在二维坐标系进行旋转变换时，也就是进行 Park 变换（把 α β 坐标系变换到旋转 dq 坐标系下）。

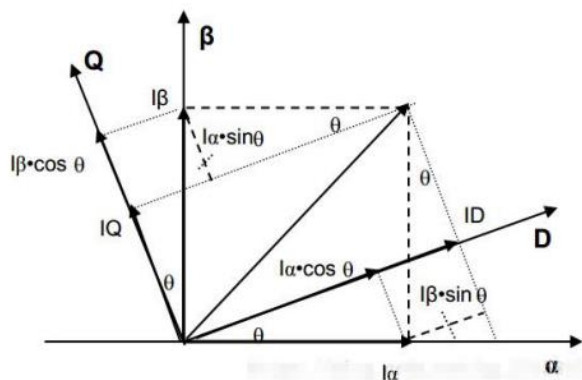


图 2-2-4 dq 变换

$$\begin{cases} I_D = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta \\ I_Q = -i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta \end{cases}$$

二、 实验内容

（简述实验内容及操作过程）

1 直流无刷电机

电流环控制模式下，上位机给定一个参考电流 REF，并产生斜坡到参考的目标值，使用电流 PID 闭环。导入工程到 DSP 后，上位机设置通信端口。启动 Matlab 上位机程序，设置 PID 模块中 KP 值，电机开始运动。

2 交流伺服电机

导入 DSP 工程后，设置上位机通信端口。电机设置为电流环运动模式，打开力矩 PID_IQ 模块，设置 PID 参数并给定电流 pid_ref，并使用 Speed 与 Pos 模块观察速度与位置曲线。

三、 实验结果及分析

（实验原始数据、实验曲线及其分析）

1 直流无刷电机六步换向

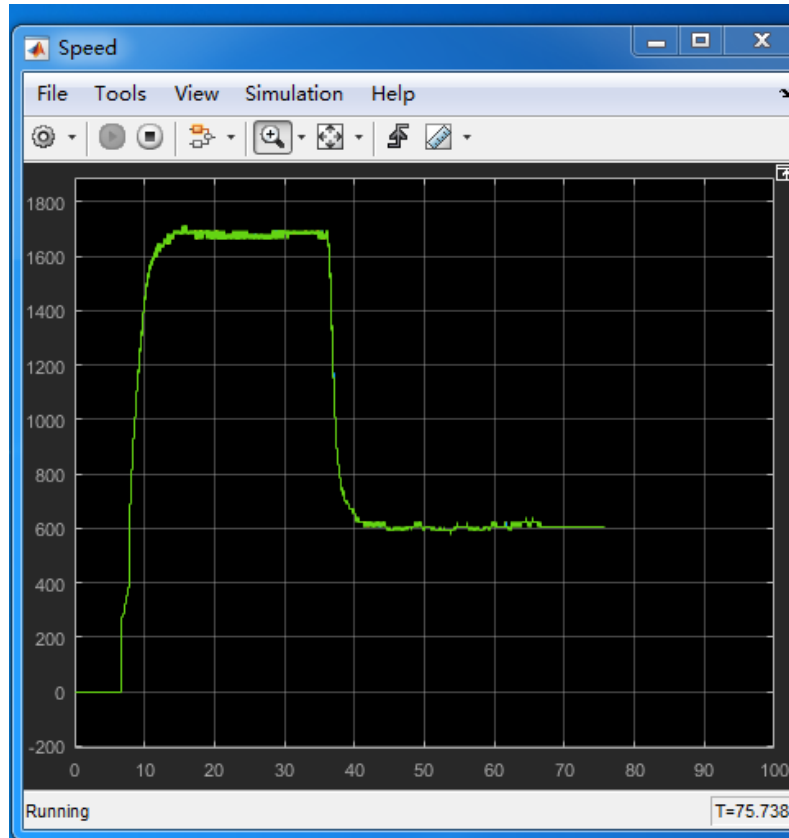
1.

霍尔传感器输入			相电压			PWM 信号状态
1	2	3	A	B	C	pwml.CmtnPointer
0	1	0	DC+	关	DC-	0
0	1	1	DC+	DC-	关	5
0	0	1	关	DC-	DC+	4
1	0	1	DC-	关	DC+	3
1	0	0	DC-	DC+	关	2
1	1	0	关	DC+	DC-	1

逆时针旋转 (MOTOR_DIR=0) 控制规律

霍尔传感器输入			相电压			PWM 信号状态
1	2	3	A	B	C	pwml.CmtnPointer
1	0	1	DC+	关	DC-	0
0	0	1	关	DC+	DC-	5
0	1	1	DC-	DC+	关	4
0	1	0	DC-	关	DC+	3
1	1	0	关	DC-	DC+	2
1	0	0	DC+	DC-	关	1

顺时针旋转 (MOTOR_DIR=1) 控制规律



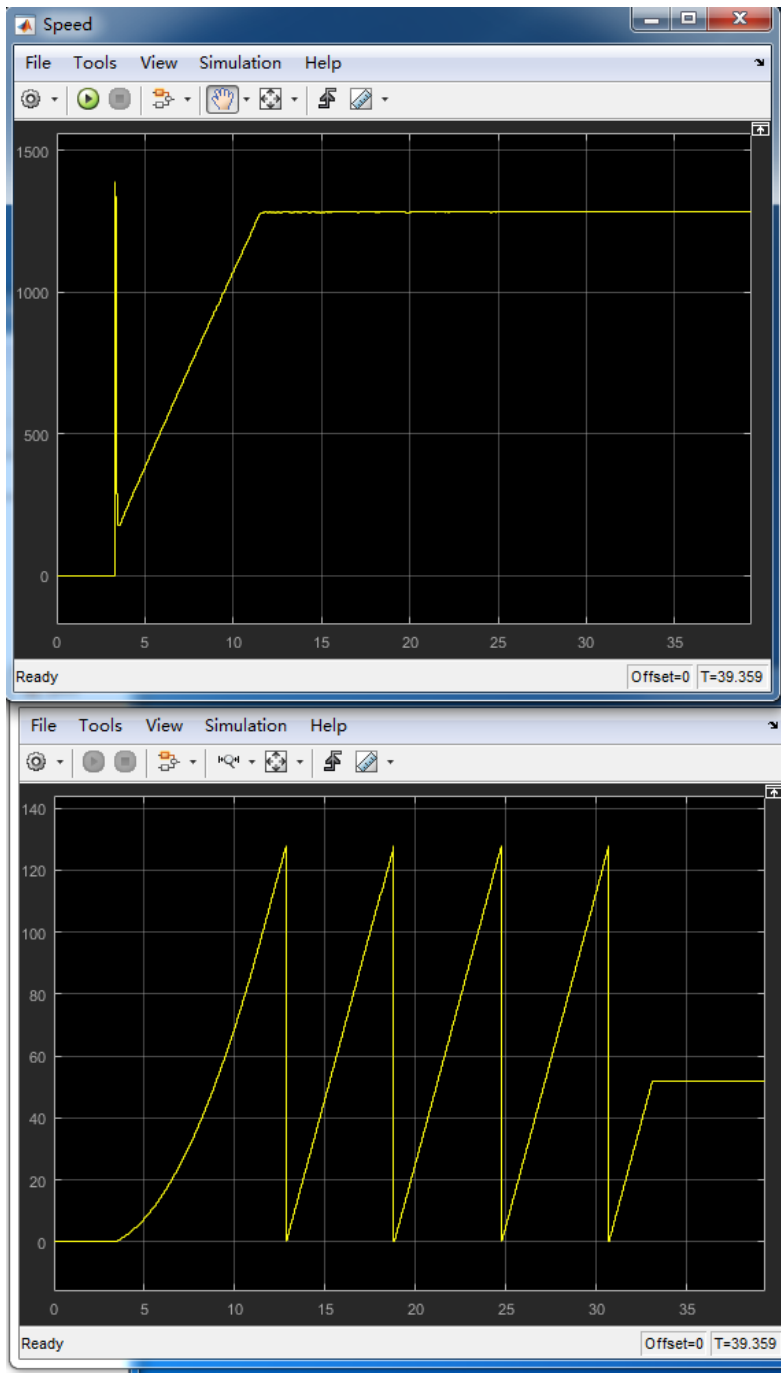
2 交流伺服电机 Clark 变换和 Park 变换

1. 变换公式

$$Clark: \begin{cases} i_{\alpha} = i_a \\ i_{\beta} = (i_a + 2i_b)/\sqrt{3} \end{cases}$$

$$Park: \begin{cases} I_D = i_{\alpha} \cos\theta + i_{\beta} \sin\theta \\ I_Q = -i_{\alpha} \sin\theta + i_{\beta} \cos\theta \end{cases}$$

2. 电机速度/位置变化曲线



上图为 Speed，下图为 Position