



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： 班

姓名：

学号：

同组人：

实验名称： 电机 PWM 控制与驱动电路实验

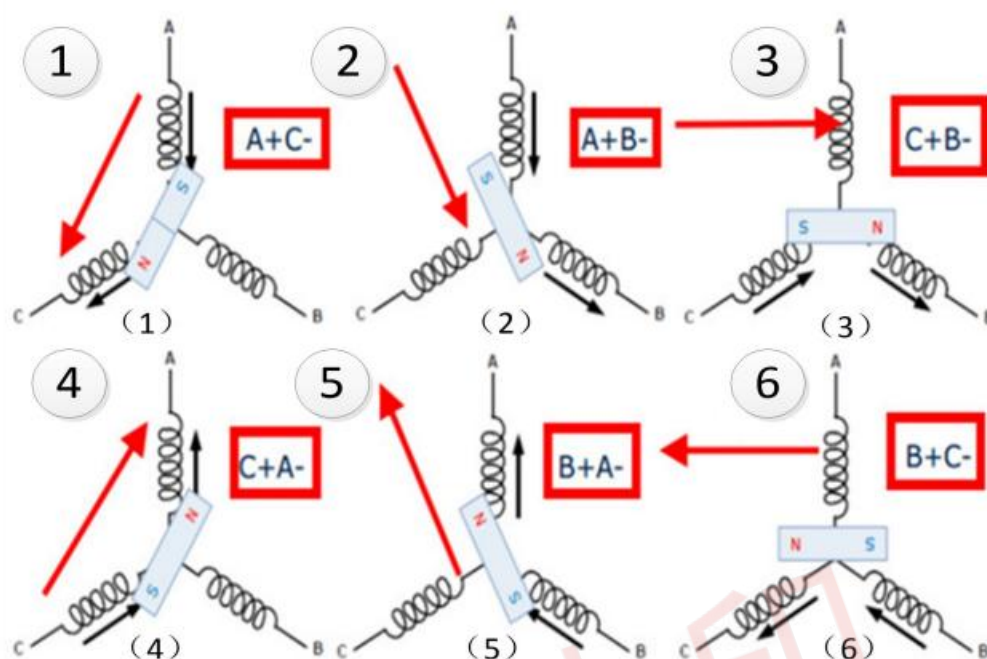
实验日期： 2023 年 月 日

实验与创新实践教育中心

Education Center of Experiments and Innovations

一、 实验原理

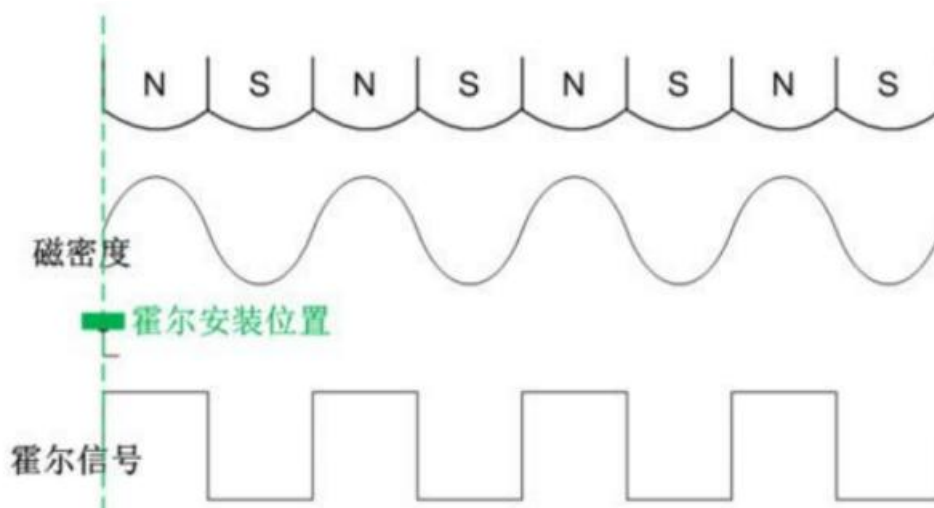
2.1 直流无刷电机六步换相



按照上图 2-1-2 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。

此外需要说明的是，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，它可以有效的反映通过霍尔原件的磁密度，有正向磁场通过霍尔传感器，输出 1，有反向磁场通过霍尔，输出 0。当霍尔传感器在和电机的转子做相对运动时，根据转子下磁场密度的变化，来产生变化的信号。如下图 2-1-3 所示。

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。



当电机按一个（正转或反转）方向转动时，3个霍尔传感器的输出会按照6步的规律变化，如图2-1-4所示。BLDC电机的转子位置检测器件采用的是霍尔传感器，其与微控制器(MCU)连接非常简单。可以使用任一可用的具有电平变化中断功能的MCU的引脚作为其接口。

为了驱动电机运转，必须根据电机转子所处的空间位置，按照一定的换向顺序，对定子上的A、B、C三个线圈的两相同时进行通电，形成旋转磁场，从而带动转子旋转。一般在其非驱动端上的定子中安装三个霍尔传感器。这样当转子磁极经过霍尔传感器附近时，它们便会发出一个高(低)电平信号，根据这三个霍尔传感器信号的组合，就能得到定子绕组通电换向的精确顺序。

对于典型的三相带传感器的BLDC电机，有6个不同的工作区间，每个区间中对特定的两相绕组通电。每次换向，都有一个绕组连到电源的正极(电流进入绕组)，第二个绕组连到负极(电流从中流出)，第三个处于失电状态。转矩是由定子线圈产生的磁场和转子之间相互作用产生的。其转矩峰值出现在两个磁场正交时，而在两磁场平行时最弱。为了保持电机转动，由定子绕组产生的磁场应不断变换位置，因为转子会向着与定子磁场平行的方向旋转。BLDC电机其三个定子绕组每换向一轮(1个电周期)需要六步，应按照“六步换向”给定子绕组加电。

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。

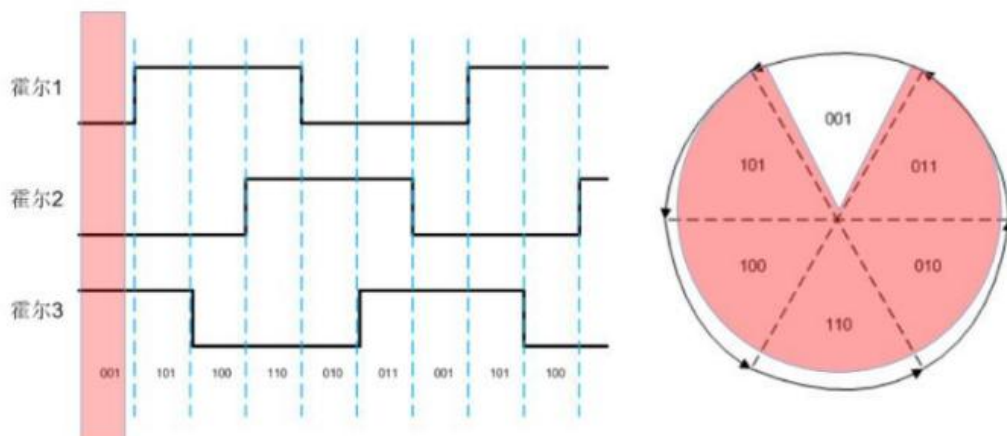
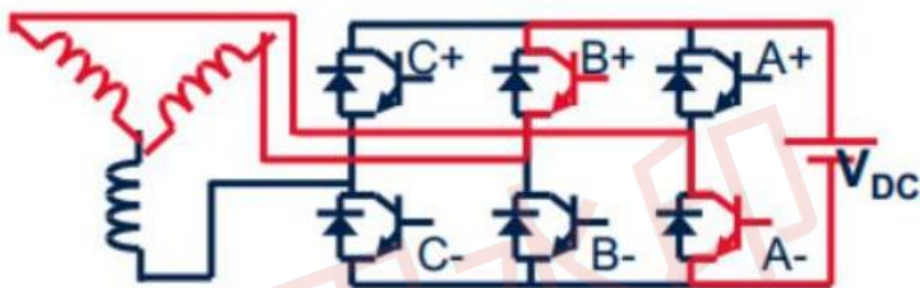


图 2-1-4 霍尔传感器输出规律变化原理图

电机驱动电路如图 2-1-5 所示。



2.2 交流伺服电机 Clark/Park 变换

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（ $T_m=K_T \Phi I_a$ ）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。涉及到交流伺服电机中的磁场分布如图

2-2-1 所示。交流伺服电机的磁场方向为正弦磁场。由于 U、V、W 三相的电流分别为 i_a 、 i_b 、 i_c 。

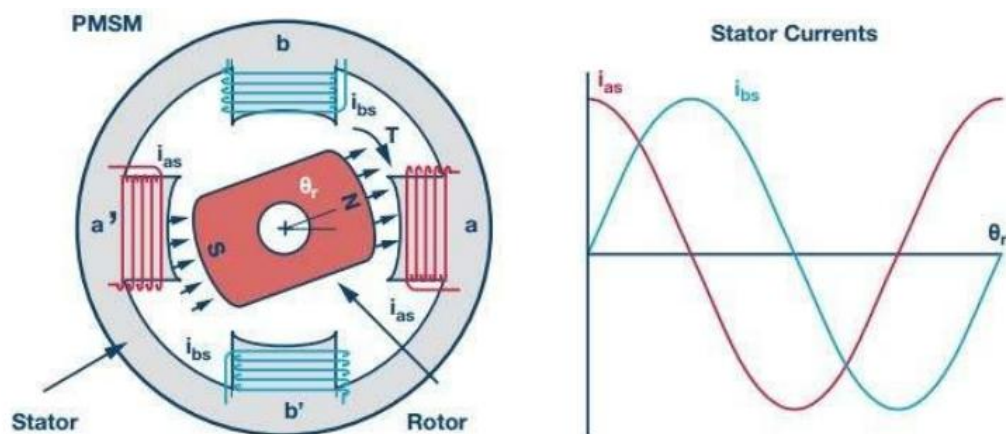


图 2-2-1 交流伺服电机的磁场

又因为在交流伺服电机中，电流的幅值相等，相位角各相差 120° 。所以可得电机在动态的时候各相电流表达式：

$$i_a = i_m \cdot \sin(\omega t) \quad (2-2-1)$$

$$i_b = i_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-2-2)$$

$$i_c = i_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2-2-3)$$

其中， ω 表示电流角频率， i_m 表示电流幅值。这三个电流在空间的矢量分布如图 2-2-2 所示。

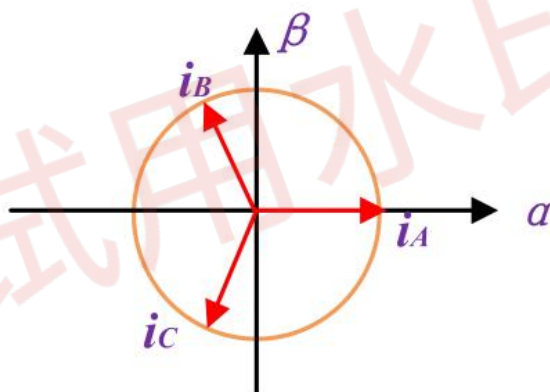


图 2-2-2 平面内电流矢量分布图

把平面内的三个电流矢量经过 Clark 变换（将 abc 变换到静止的 $\alpha\beta$ 坐标系下）

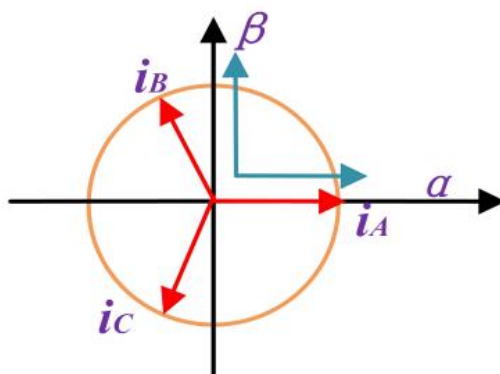


图 2-2-3 电流矢量变换原理图

投影到 α 、 β 轴上可得出：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad S_a = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2-2-4)$$

其中 i_α ， i_β 是把平面内的三个矢量用二维坐标来进行表示。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 $\alpha\beta$ 坐标系变换到旋转 dq 坐标系下），如图 2-2-4 所示

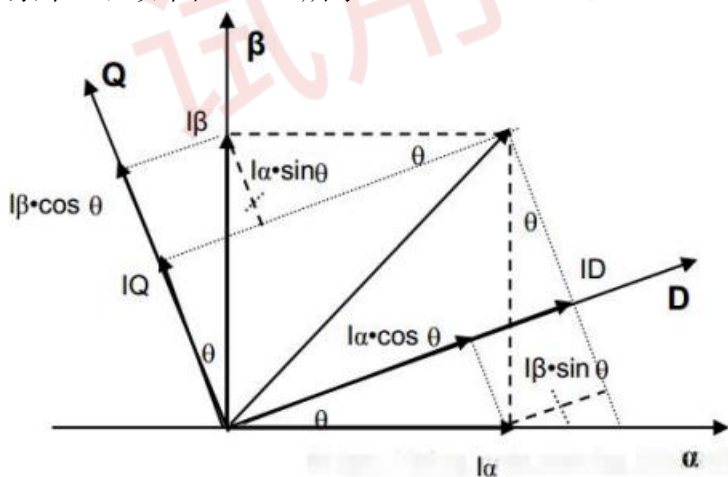


图 2-2-4 dq 变换

经由旋转之后可以得出：

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

二、 实验内容

3.1 直流无刷电机六步换相实验步骤

1. 线路连接: CN3 和 CN5 连接、CN4 和 CN6 连接, USB 与上位机 USB 连接。

在连接 USB 接口前时, 需要先打开**设备管理器**——点击**端口**; 然后查看现有端口,

再插上 USB 线观察哪一个端口是重新出现的, 并做好实验记录, 为后续操作做好准备。

向上推动断路器开关上电

2. 打开 CCS, 在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\pwm\BLDC”下导入工程 BLDC

编译完成后点击仿真下载, 若点击红框的运行按钮, 软件开始运行

3. 打开 Matlab, 打开目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\pwm\BLDC”下 speed_control 程序

4. 双击 Packet Input 模块设置 Packet Input 的 COM 口

5. 在弹出的窗口中选择 Board setup 选项。在弹出的对话框中设置 COM 口参数。在第一个步骤时已经对新出现的端口做了记录, 此时的端口需要与记录的端口保持一致, 波特率是 115200。点击 Test 以检查系统是否能够正常通信

5. 双击 single-out 模块

6. 双击 Packet Output 模块设置 Packet Input 的 COM 口

7. 在弹出的窗口中选择 Board setup 选项, 在弹出的对话框中设置 COM 口参数。在第一个步骤时已经对新出现的端口做了记录, 此时的端口仍然需要与记录的端口保持一致, 波特率是 115200。点击 Test 以检查系统是否能够正常通信

8. 把电机模式改为 1 (电流环运动模式), 双击 MODEL 模块, 在弹出的对话框中 Constant Value 填入 1 (电流环运动模式), 单击 OK

9. 启动运行程序, 打开 PID 模块 (力矩模式 PID)

10. 打开 Speed (速度) 模块

11. 在对话框中拖动滑块给定 pid_ref 参考电流, 拖动滑块给定 PID 参数, 电机开始运动 (参考电流为 0 时电机不动)。运行结束拖动滑块使参考电流为 0, 电机停转, 再点击停止按钮, 打开 speed 示波器模块, 点击缩放按钮, 可以看到

完整的运行过程的曲线图。

通过打开 speed 或 pos 模块观察速度位置变化情况, 并保存几张速度或位置变化曲线

3.2 交流伺服电机 Clark/Park 变换实验步骤

程序设计

1. 根据对 Clark 变换原理的理解, 以及给出的变量的意义, 设计出 Clark 变换核心代码。

2. 打开 CCS, 在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\pwm

\PMSM”下导入工程 PMSM_SD (详见附录 A), 打开 main.c 文件, 找到 main.h 按

下 Ctrl 再点击 main.h, 找到 clarke.h 按下 Ctrl 再点击 clarke.h., 如图 3-2-1 所示, 搜索

CLARKE_MACRO 到指定位置。请在下面的空白处, 结合对 Clark 变换原理的理

解给出的变量填写核心代码。

3. 根据对 Park 变换原理的理解, 以及给出的变量的意义, 设计出 Park 变换的核心代码。

4. 打开 main.c 文件, 按住键盘上 Ctrl 键, Ctrl+f 搜索 Park_MACRO, 按下 Ctrl 使用鼠标点击 PARK_MACRO, 进入到 park.h 文件中给出的变量填写所设计的核心代码

5. Clark 和 Park 变换代码设计完成后, 点击保存, 编译下载代码, 并根据后续步骤验证代码。代码设计若无异常, 经过实验验证, 电机可正常运行, 则在上

位机中电流环、速度环、位置环都可正常运行。

操作步骤

1. 线路连接: CN1 和 CN5 连接、CN2 和 CN6 连接, USB 与上位机 USB 连接, 连接电源, 开关上电

2. 打开 CCS, 在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\pwm \PMSM”下导入工程 PMSM_SD

3. 打开 Matlab 软件, 单击 Open, 在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b \workspace\pwm\PMSM”下打开 PMSM 项目

4. 检查是否打开上述软件

5. 双击 Packet Input 模块设置 Packet Input 的 COM 口

6. 在弹出的窗口中电机 Board setup 选项, 在弹出的对话框中设置 COM 口参数

7. 打开 single-out 模块

8. 打开 Packet Output 模块, 设置 Packet Input 的 COM 口

9. 在弹出的窗口中电机 Board setup 选项, 在弹出的对话框中设置 COM 口参数

10. 把电机模式改为 1 (电流环运动模式), 打开 MODEL 模块, 在弹出的对话框中 Constant Value 选项中填入 1 (电流环运动模式), 单击 OK

11. 启动运行程序, 打开 PID_IQ 模块 (力矩模式 PID)

12. 在对话框中拖动滑块给定 pid_ref 参考电流, 拖动滑块给定 PID 参数

13. 打开 Speed 和 pos 模块监控力矩模式的速度和位置

14. 打开 Speed 模块, 观察速度曲线

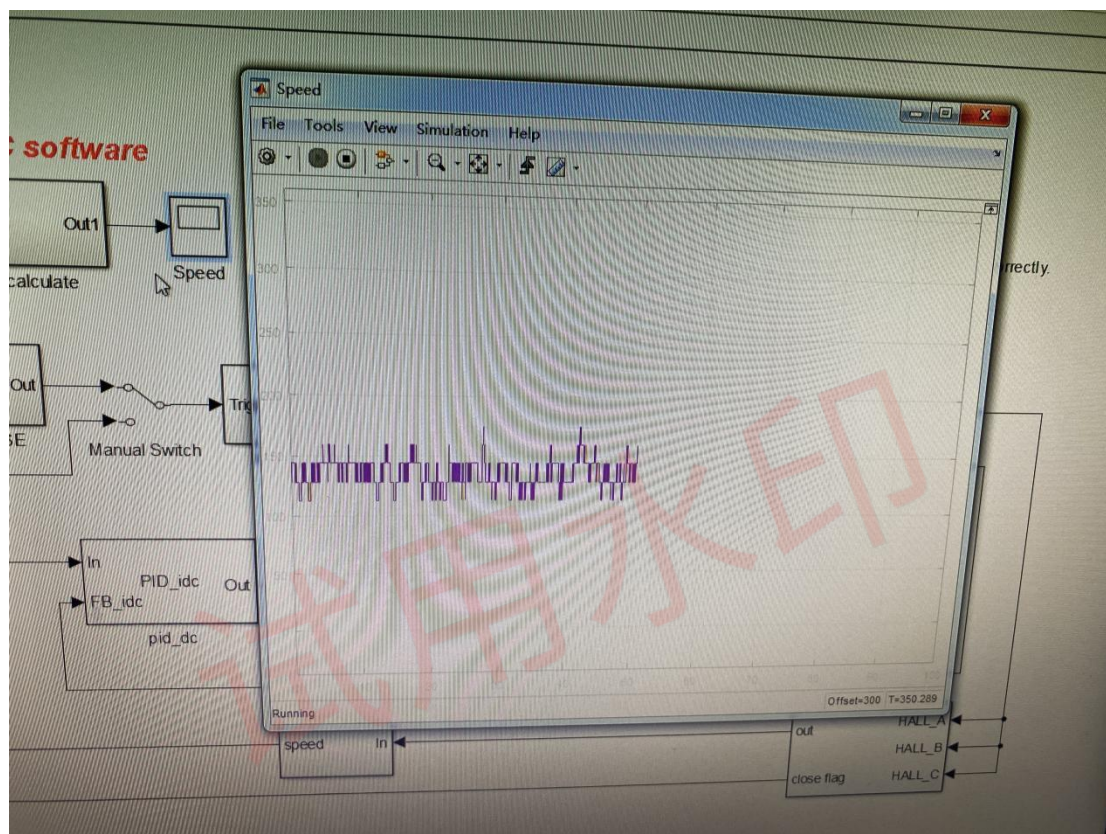
通过打开 speed 或 pos 模块观察速度位置变化情况, 并保存几张速度或位置变化曲线

三、 实验结果及分析

(实验原始数据、实验曲线及其分析)

直流无刷电机六步换向

实验曲线



反向的话按照相反方向通电，例正转通 C-A 时反转通 A-C

交流伺服电机：

1. 根据 Clark 变换和 Park 变换的原理,写出永磁同步电机的 Park 和 Clark 变换公式。

把平面内的三个电流矢量经过 Clark 变换（将 abc 变换到静止的 $\alpha\beta$ 坐标

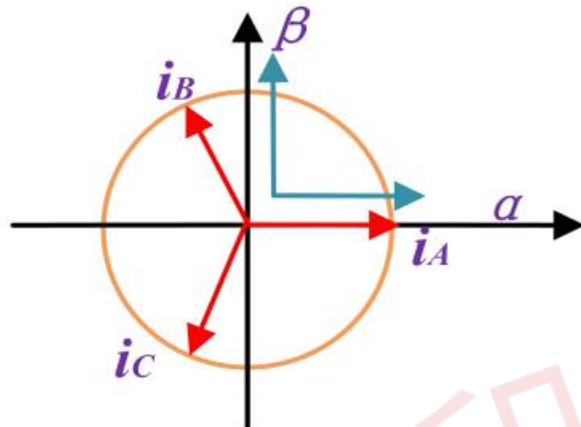


图 2-2-3 电流矢量变换原理图

投影到 α 、 β 轴上可得出：

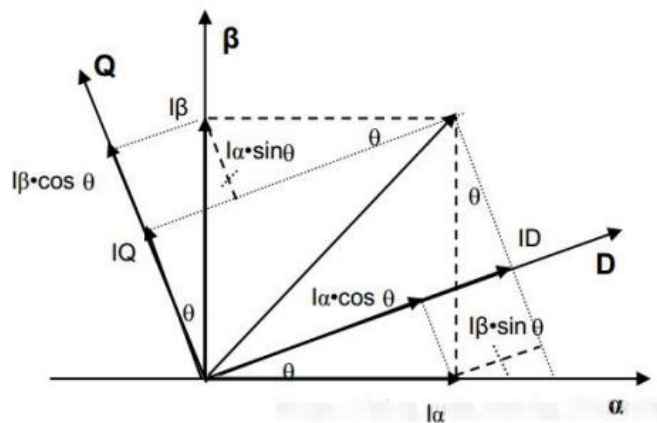
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad S_a = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}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

由式子 (2-2-1)、(2-2-2)、(2-2-3)、(2-2-4) 联合可知：

$$i_d = \frac{3}{2} i_a$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} (2i_b + i_a)$$

其中 i_α , i_β 是把平面内的三个矢量用二维坐标来进行表示。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 $\alpha\beta$ 坐标系变换到旋转 dq 坐标系下),如图 2-2-4 所示。



Park 变换公式:

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

实验曲线:

第一张为速度曲线,稳定增长之后恒定

第二章为位置曲线,呈锯齿波周期变化

