

《车用驱动电机原理与控制基础》

——教学试验指导书

扫描二维码或点击链接获得实验套件更多相关资料



<http://gofile.me/4VBZ9/HNdAVAMVB>

目 录

1. 安全须知.....	3
2. 教学试验装置概述.....	4
2.1. 系统组成.....	4
2.2. 电机控制开发板概述.....	5
2.3. 电机参数.....	6
3. 控制算法介绍.....	7
3.1. PMSM FOC 控制程序简介（下位机程序）.....	7
3.2. 上位机程序简介.....	9
3.3. 代码编写和编译软件支持.....	10
4. 基础实验项目.....	13
4.1. 开环电压矢量激励下电机稳态运行.....	13
4.2. FOC 稳态过程分析.....	14
4.3. FOC 动态过程分析.....	14
5. 提升项目要求.....	16
5.1. SVPWM 实现方法分析.....	16
5.2. 电流滤波和坐标变换.....	16
5.3. 转速和电流环 PI 整定.....	16
5.4. 电流比例谐振控制器.....	16
5.5. 位置标定.....	18
5.6. 位置解算（锁相环方法）.....	18

（C）2021 年版本，版权归原书作者所有

1. 安全须知

- 使用者必须在使用实验套件前接受适当的电气安全培训；
- 本实验套件包含旋转部件，如果操作/使用不当，可能造成触电、火灾危险以及人身伤害。使用本实验套件时必须谨慎，并采取适当措施避免造成人身伤害和/或财产损失；
- 本实验套件应当远离水、液体和灰尘；
- 使用者必须在明确理解实验套件电压和绝缘要求后再给实验套件通电；
- 套件没有运行时也不要接触套件中的电子元件，避免静电造成的元件损坏；
- 使用时不要超过电压、电流、温度等额定工作条件。

2. 教学试验装置概述

本实验装置以《车用驱动电机原理与控制基础》教材为基础，旨在建立一个简易便捷的 PMSM 电机矢量控制平台，利于使用者更直观地理解 PMSM 电机运行及控制过程。

本教学试验装置的硬件原理图、PCB 工程文件及控制程序源代码可以在项目网站 (<http://gofile.me/4VBZ9/EnvInJFeC>) 下载使用，但未经授权不得用于商业目的。

2.1. 系统组成

实验套件系统组成如下表所示：

No.	组成部件	参数/型号	备注
1	PMSM 电机	DM2BLD150-24A-30S	集成位置传感器及传感器引出线
2	电机控制开发板	含电机控制板+驱动板 分别基于 TI28035 DSP 和低压 mosfet	经由灰排线和红白排线连接
3	控制板直流电源	绿联电源适配器	12V/1A
4	驱动板直流电源	明纬 GST60A 电源适配器	24V/2.5A
5	USB 数据线	绿联 USB2.0 转 Mini USB 数据线	

实验装置由一个集成驱动控制板的小型逆变器（即一套电机控制开发板）和一个 PMSM 电机组成。控制板使用 12V/1A 直流电源供电，驱动板使用 24V/2.5A 直流电源供电，将直流逆变为三相交流电后驱动 PMSM。控制板通过灰排线和红白排线与驱动板连接，控制板将控制信号传递给驱动板，同时驱动板将电机状态反馈至控制板。

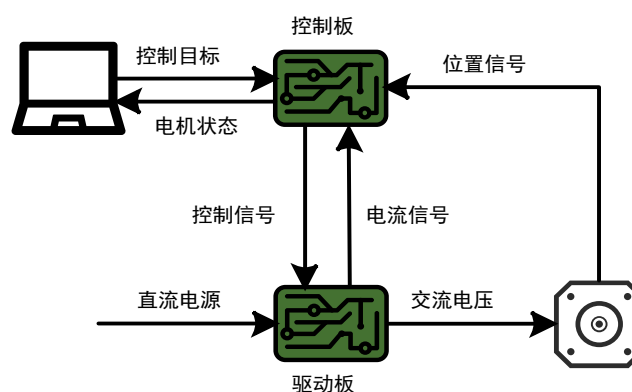


图 1：系统基本组成

2.2. 电机控制开发板概述

实验套件中的电机控制开发板包含有控制板和驱动板两部分。整体电路板各个功能模块拓扑图如下：

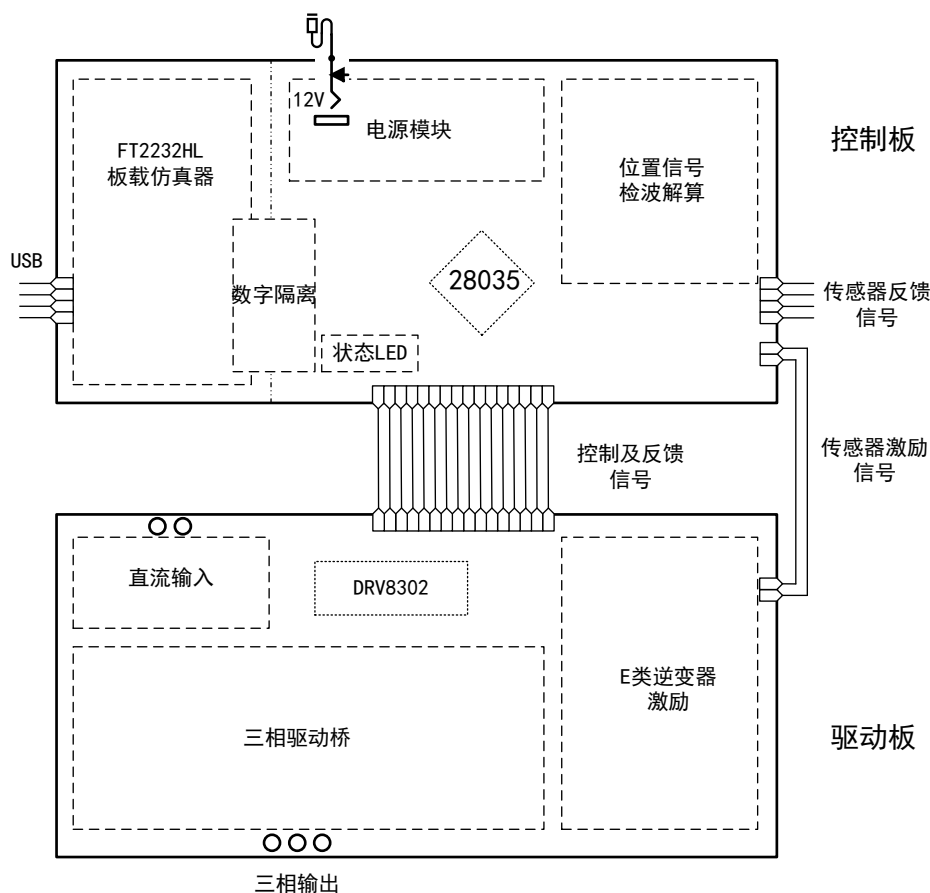


图 2：电机控制开发板原理框图

其中，控制板按照主要功能分类可以分为如下硬件组成：

- 微处理器：TI 的 TMS320F28035；
- 电源模块：使用两个开关电源，12V 直流电源输入逐级转换为 5V 以及 3.3V；
- 位置解算模块：实现电感式位置传感器信息的检波解算，反馈至微处理器；
- 板载仿真器模块：板载仿真器除了代替 TI 仿真器功能以外，也是微处理器和电脑进行数据交换的桥梁。

驱动板按照主要功能分类可以分为如下硬件模块：

- 逆变器：采用三相桥式逆变器，将直流电源转换为三相交流电以驱动电机；
- 栅极驱动器：采用 TI 的集成式三相栅极驱动器 DRV8302 驱动逆变器工作；
- E 类逆变器：产生高频激励信号，输入至电机位置传感器。

与常用电压型逆变器相同，本实验套件中电压逆变采用了三相桥式逆变器，通过六个开关管的开通和关断实现对直流电源电压的变频和变压调制（详见教材第 7 章有关章节）。驱动板上的电压型三相脉宽调制（PWM）逆变电路原理图如下图所示：

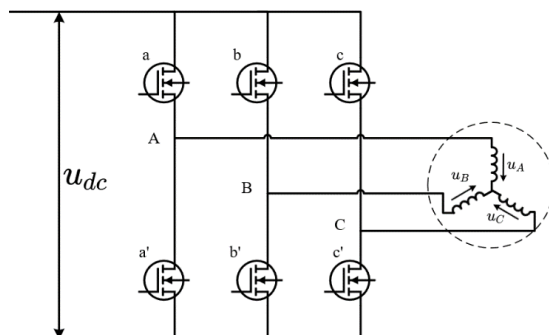


图 3：电压型逆变电路原理

2.3. 电机参数

实验套件的被控对象为一只 PMSM 电机（反电动势为方波），该电机参数如下：

型号	D2BLD150-24A-30S
功率/W	150
电压/V	24
极对数	2
空载转速/rpm	3300
额定转速/rpm	3000
额定电流/A	7.81
额定转矩/Nm	0.48
最大转矩/Nm	1.43
空载电流/A	<1.0A

3. 控制算法介绍

本实验套件软件部分主体是 PMSM 电机的磁场定向（FOC）控制算法及其实现。具体分为上位机程序和下位机程序，此两者通过串口通信的方式进行数据交互。

3.1. PMSM FOC 控制程序简介（下位机程序）

下位机程序主要实现两方面功能，一方面是实现 FOC（磁场定向矢量控制）算法；另一方面是完成与上位机的通信工作。

其中，FOC 算法是下位机程序的核心，其算法框图如下：

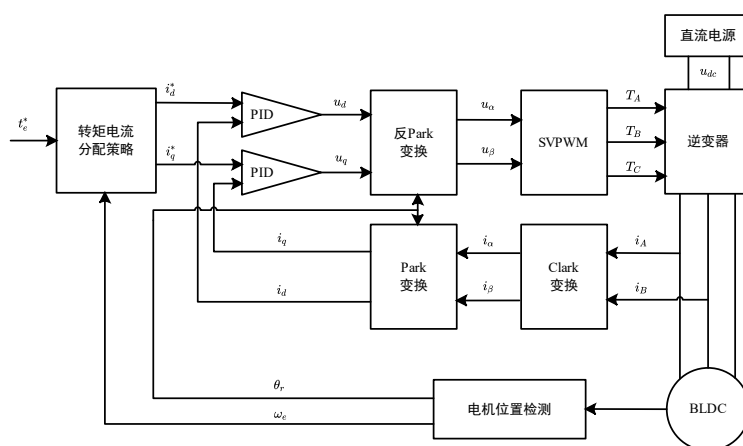


图 4：PMSM 电机 FOC 控制原理

PMSM 的磁场定向矢量控制步骤可以归纳如下（参见教材第 5 章有关章节）：

- 1) 根据电机的目标转矩,由转矩调节器的输出结合电流分配策略可以得到交轴电流给定值 i_d^* 和直轴电流给定值 i_q^* ;
- 2) 对电机三相定子绕组实际电流进行采样,并通过坐标变换得到实际的直轴和交轴电流 (i_d 、 i_q);
- 3) 基于直轴和交轴电流目标值和实际值,进行电流闭环反馈调节,得到定子绕组设定电压 (u_d 、 u_q);
- 4) 利用坐标变换,根据电压目标值得到静止坐标系下电压设定 (u_α 、 u_β);
- 5) 根据静止坐标系下的电压设定,经由 SVPWM 电压调制控制逆变器中功率开关器件的通断 (T_A 、 T_B 、 T_C),实现对相电流的控制;

按照上述矢量控制算法的框架,下位机程序流程图如下:

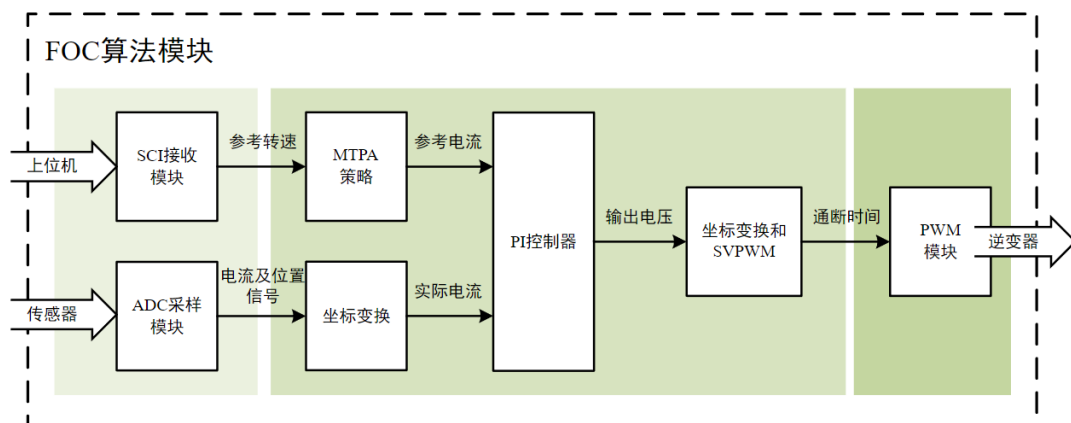


图 4：下位机中 FOC 的实现

与上一小节提及的完整 FOC 算法框图相比，控制模型中的算法不包含被控对象（即逆变器以及 PMSM）。换言之，微处理器仅通过 ADC 模块，采集电机运行过程中的电流和位置信息，与控制目标进行比较后调整 PWM 模块的输出波形，进而使逆变器随之变化，达到控制的闭环目的。微处理器作为运算模块，ADC 模块作为感知器，逆变器作为执行器，互相协调配合，最终实现完整的 FOC 算法。

下位机通信相关分为接收模块和发送模块。

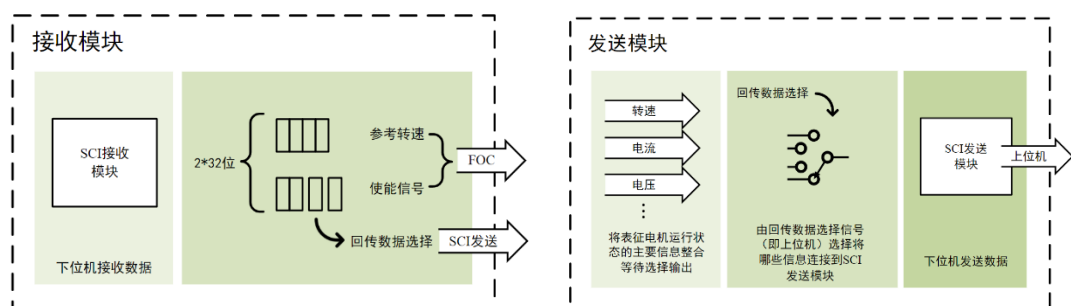


图 5：下位机的通讯模块

下位机的接收模块对应于上位机的发送模块，两者恰好是相反的执行逻辑。下位机接收到 2 个 32 位数据后，第一个 32 位数据将作为参考转速，传递至 FOC 算法；第二个 32 位数据首先被舍弃掉前 16 位；随后在剩余 16 位数据中，后 8 位作为使能信号，控制逆变器是否使能。而前 8 位作为回传数据选择信号，将参与到下位机发送模块的数据选择环节中。

下位机的发送模块使用一个选择开关，回传数据选择信号的数值根据索引决定哪些信号占用当前发送通道传输回上位机。

3.2. 上位机程序简介

上位机程序主要负责监控和通讯，通讯部分同样分为接收模块和发送模块两部分：

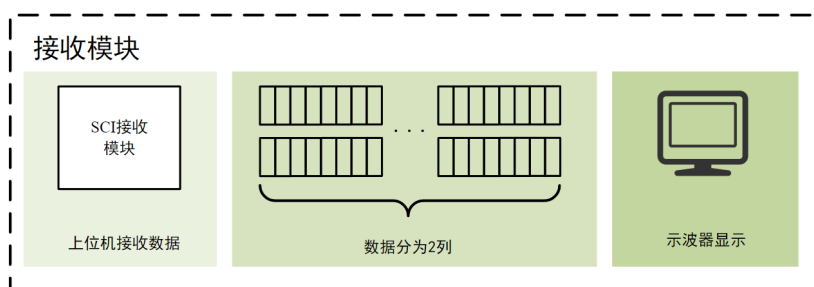


图 6：上位机接收模块

由于控制板中的微处理器 F28035 运行使用定点数，因此，在串口通信模块中，将数据收发类型统一设置为 int32。接收模块在固定采样时间中每次接收两列长度为 300 的（缓存）数据，并分别将两列数据传输至 simulink 的示波器模块显示。

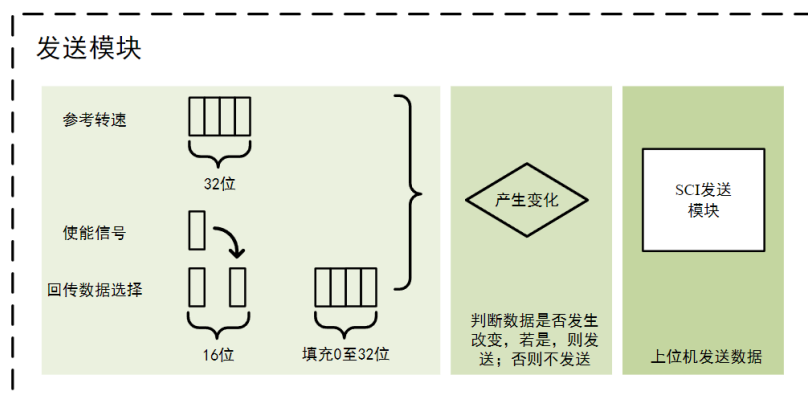


图 7：上位机发送模块

上位机共设置“参考转速”、“电机使能信号”以及“回传数据选择”三个参数发送给下位机。其中“参考转速”采用 32 位定点数，而“使能信号”和“回传数据选择信号”分别占据 8 位字节，通过移位运算将两个变量拼接在一个 16 位数据中，前 8 位代表“回传数据选择信号”，后 8 位代表“电机使能信号”，最终通过补充空位将其转换为 32 位数据。上位机通过检测模型运行过程中是否有参数变化来触发发送动作，每当参数变化时，控制参数将被打包由 SCI 发送模块发送至下位机。

特别注意，上位机使用前，需在“设备管理器”中查询对应端口号，并在“SCI HOST SETUP”模块中进行正确设置方可正常实现通信。

3.3. 代码编写和编译软件支持

本开发套件下位机软件参考了 MATLAB2021a 版本中更新的 Motor Control Blockset 以及 Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors，配合实验套件并支持 C 代码自动生成的矢量控制模型。

正式使用前，需要先建立好支持 C2000 系列 DPS 由 Simulink 模型代码生成的整个工具链。进行模型搭建以及代码生成功能所前，需要先下载 MATLAB 及 TI 的第三方软件安装包，详细信息（软件名及对应版本号供参考）见下表。

	软件名称	版本号（供参考）
MATLAB 基础产品	MATLAB	2021a
	工具包（Toolbox）	Simulink
		Embedded Coder
		MATLAB Coder
		Simulink Coder
TI 编译器	TI Code Composer Studio	10.2.0.00009
	TI controlSUITE	3.4.9
	TI C2000Ware	3_02_00_00
MATLAB 硬件支持包	C2000 硬件支持包	21.1.2
	Motor Control Blockset	1.2

需要注意的是，下表中软件出现顺序即为推荐安装的顺序，安装过程简述如下：

安装 MATLAB 及工具包后，请进入 MATLAB 附加功能管理器，确认是否已安装下列工具包，如果在 MATLAB 安装过程中未勾选上述扩展功能中的工具包，也可以手动安装，对应工具包参考图示如下：



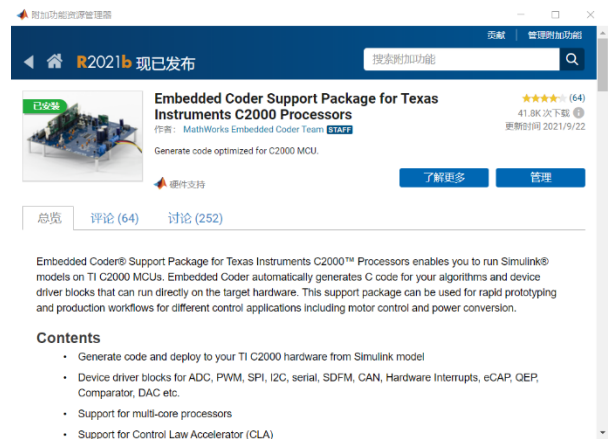
图：MATLAB 工具包图示

随后请安装 TI 编译器相关软件，对应下载地址见下：

- 1) TI Code Composer Studio: [CCSTUDIO_11.0.0.00012 | TI.com](#)
- 2) TI controlSUITE: [CONTROLSUITE Driver or library | TI.com](#)

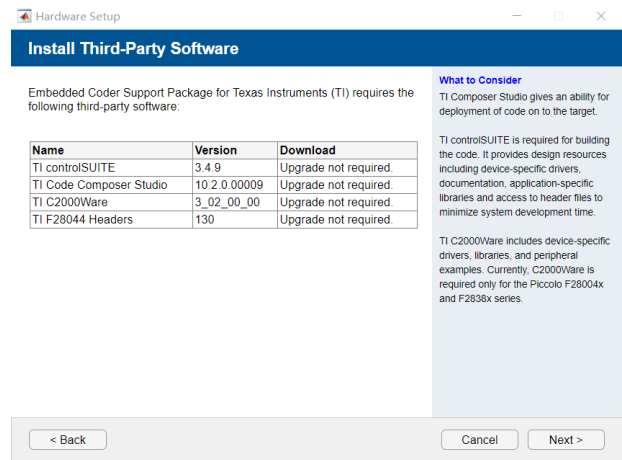
3) TI C2000Ware: [C2000WARE_4.00.00.00](https://www.ti.com/tool/C2000WARE_4.00.00.00) | [TI.com](https://www.ti.com)

确认安装上述工具包后，在附加功能管理器中安装 C2000 硬件支持包。



图：C2000 硬件支持包

硬件支持包安装完毕后，点击“管理”进入硬件支持包的配置界面。按照提示步骤进行第三方软件关联即可完成配置。配置完成后重新打开配置界面，可以验证是否配置成功。



图：编译器关联，完成配置界面（供参考）

最后，在附加功能管理器中安装 Motor Control Blockset 工具包，即可完成全部软件配置



图：Motor Control Blockset

4. 基础实验项目

根据实验原理及难度，实验项目分为基础项目和提升项目两部分。所述试验均要求试验前读懂理解算法实现细节。

4.1. 开环电压矢量激励下电机稳态运行

一、实验目的

- 1) 熟悉实验套件使用流程，初步了解上位机与下位机通信方式及 FOC 算法框架；
- 2) 设定旋转电压矢量，（电流）开环拖动电机，并体会电机运行过程中不同空间矢量的关系。

二、实验原理

根据电机运行的电压矢量方程

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + j\omega_s L_s \mathbf{i}_s + j\omega_s \psi_f$$

当以较低转速稳态运行时，可忽略与转速相关的运动电动势项，电机类似一个纯阻性负载，电压矢量和电流矢量的夹角 ϕ 近似为 0，即

$$\mathbf{u}_s \approx R_s \mathbf{i}_s$$

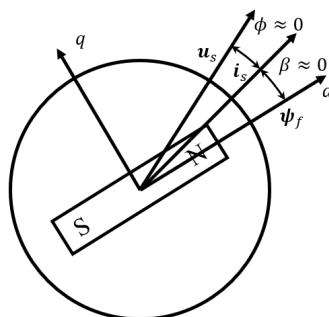
$$\phi \approx 0$$

同时，根据转矩公式

$$t_e = \frac{3}{2} p_0 \psi_f i_s \sin\beta$$

空载低速状态下，电磁转矩和负载转矩均可视作近似为 0，即转矩角 $\beta \approx 0$ 。

经上述初步分析，开环空载低速运行状态，转子 d 轴近似保持与设定定子电压矢量对齐。



三、实验步骤

- 1) 在下位机程序中修改模型，产生 0~1 之间的锯齿波用来模拟定子电压矢量的旋转

归一化电角度。并设置 d-q 轴电压占空比为较小值（建议为 0.1 左右），最后烧录程序；

- 2) 运行上位机程序，令电机开环匀速运行，读取 d-q 轴电流，并观察此开环拖动状态下 dq 轴电流曲线，分析该曲线特点及分析其机理。

四、实验报告撰写要求

- 1) 撰写实验报告，分析开环运行过程中的电流电压关系。
- 2) 记录开环运行曲线，并解释关键参数和指标。

4.2. FOC 稳态过程分析

一、实验目的

- 1) 实现 FOC 控制算法的转速闭环控制；
- 2) 分析稳态下电机运行状态。

二、实验原理

稳态下，PMSM 的电流矢量和电压矢量幅值恒定，换算至同步旋转坐标系下，dq 轴电流及电压都为恒定值。

三、实验步骤

- 1) 首先将下位机程序调整至闭环控制模式，并将程序烧录至微处理器；
- 2) 在上位机中设置参考转速（如：300rpm），启动控制电机运行；
- 3) 通过选择回传数据，可以分别观察电机相电流、同步旋转坐标系下的电流及电压波形。

四、实验报告撰写要求

- 1) 撰写实验报告，记录稳态下电机相电流及同步坐标系下电流和电压矢量曲线；
- 2) 绘制同步坐标系下，电压、电流稳态矢量图。
- 3) 对于关键数据给出定量分析解释。

绘制矢量图相关命令可参考 ‘vector_figure_demo.m’ 脚本文件。

4.3. FOC 动态过程分析

一、实验目的

- 1) 在 FOC 闭环控制状态下，实现电机转速的阶跃响应；
- 2) 体会 PMSM 不同转速下运行的矢量变化规律。

二、实验原理

根据同步坐标系下定子绕组电压方程

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \psi_f) \end{cases}$$

可以看出，当 dq 轴电流不变时，随着转速升高，d 轴电压下降，q 轴电压上升。

三、实验步骤

- 1) 在上位机中首先以初始参考转速（如：300rpm）启动电机，转速稳定后，将参考转速改变（如：800rpm）；
- 2) 观察在不同转速下，PMSM 在同步旋转坐标系下的电流和电压曲线。

四、实验报告撰写要求

- 1) 记录转速变化前后 dq 轴电流及电压曲线，分析产生如此变化的原因；
- 2) 对比转速变化前后 dq 轴电压、电流曲线，尝试绘制不同转速下电压和电流矢量图。
- 3) 结合矢量图解释其中关键变量之间的定量关联关系。

5. 提升项目要求

C2000 硬件支持包和 Motor Control Blockset 将矢量控制过程中常见计算封装成了函数，例如：坐标变换，SVPW 等。完成上述基础项目要求后，还可以尝试在 Simulink 中实现下列功能。

5.1. SVPWM 实现方法分析

尝试在 Simulink 中搭建 SVPWM 模块，并对其工作原理进行分析。原理参考教材 7.1 节。

5.2. 电流滤波和坐标变换

尝试在 Simulink 中搭建简单一阶 IIR 数字滤波器，对电流信号、位置信号进行滤波，对比滤波前后波形；搭建 Clark 变换和 Park 变换模块，加深对坐标变换规律的理解。参考教材第 4.5 节。

5.3. 转速和电流环 PI 整定

下位机中的 FOC 算法使用了转速和电流的闭环控制，其中转速环和电流环均采用了 PI 控制器进行对参考输入的跟踪。

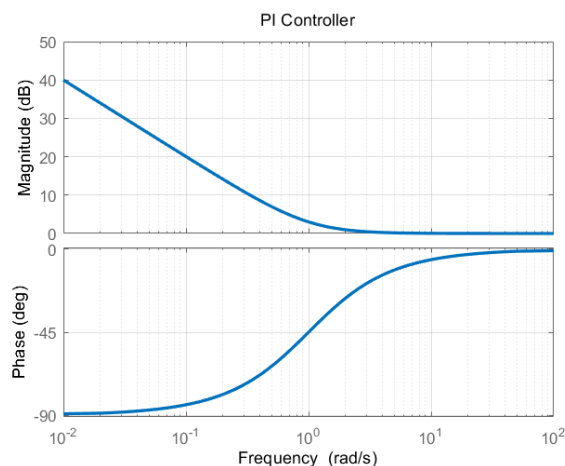
尝试对转速环和电流环的 PI 控制器参数进行调整，并观察控制效果的变化。

5.4. 电流比例谐振控制器

PI 控制器传递函数可以表示为

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

$K_p = 1, K_i = 1$ 时，绘制其伯德图如下



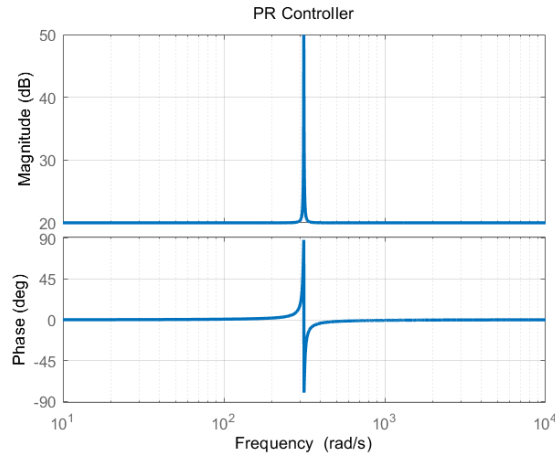
从图中可以看出，随着频率升高，PI 控制器的增益降低。理想情况下，PI 控制器在频

率为 0Hz 时增益为无穷大,因此 PI 控制器对于直流控制对象可以实现无静差的跟踪。然而。PMSM 稳态运行过程中, dq 轴电流除直流分量外, 还叠加有较高频率的谐波, 传统的 PI 控制器无法针对特定频率误差进行跟踪, 因此引入比例谐振控制器 (PR 控制器)。

PR 控制器传递函数为:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_r^2}$$

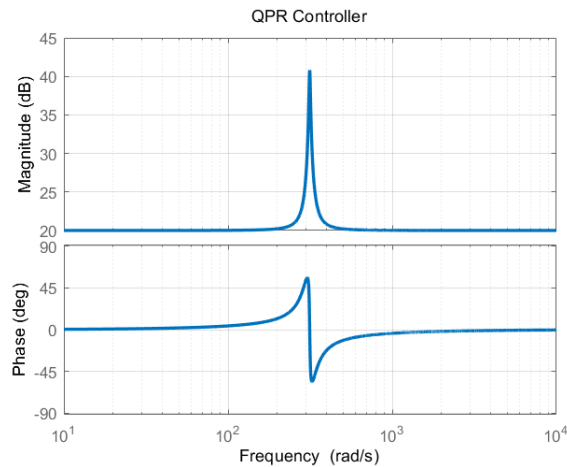
$K_p = 10, K_r = 100, \omega_r = 100\pi(50Hz)$ 时, 绘制其伯德图如下



在 ω_r 处, 幅频曲线增益为无穷大, 因此比例谐振控制器可以无静差地跟踪指定频率上的信号。但是往往参考给定的频率不是一个固定的常数, 为了提高控制器作用范围, 往往会采用准比例谐振控制器:

$$G_{QPR}(s) = K_p + \frac{2\omega_i K_r s}{s^2 + 2\omega_i s + \omega_r^2}$$

$K_p = 10, K_r = 100, \omega_r = 100\pi(50Hz), \omega_i = \pi$ 时, 绘制其伯德图如下



可见, 引入 ω_i 后, 降低了谐振频率处的增益, 但是却产生了一个具有较大增益的频带,

由此可以减小频率偏移带来的影响。

尝试建立比例谐振控制器抑制 dq 轴电流上的谐波抖动。

5.5. 位置标定

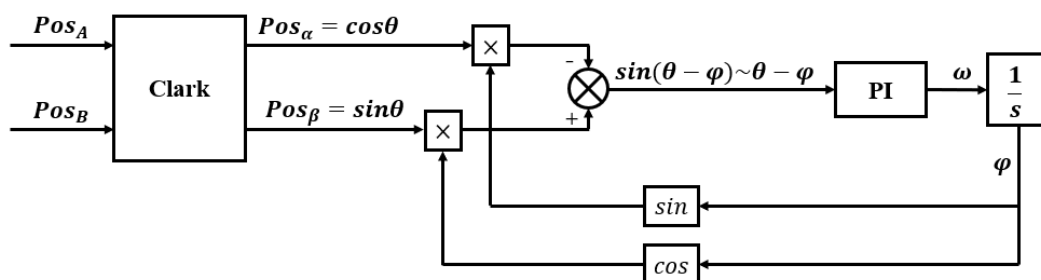
被控电机上的“高频互感式位置传感器”包括转子和定子两部分,其中定子与机座固连,转子随电机轴同步旋转。传感器转子与电机交直轴的相对位置不固定,因此在使用前需要对位置传感器零点进行标定。

具体标定原理为:

- 1) 在开环情况下,设定定子 q 轴电压占空比为 0, d 轴占空比为—较小值(建议为 0.1 左右),并输入模拟位置始终为初始位置 0。此时使能逆变器,电机转子将被牵引到固定位置;
- 2) 读取此时位置传感器返回的电角度,该电角度即为位置传感器偏移量。

5.6. 位置解算(锁相环方法)

现版本下位机位置解算基于反正切运算得到,位置解算还可以使用锁相环方法实现,其原理框图如下:



位置传感器返回相位差为 120° 的正弦波信号经过 Clark 变换,可以得到电机转子位置电角度正余弦值 $\sin \theta, \cos \theta$ 。设期望电机转角为 φ ,则可以根据三角函数公式构建出

$$\sin \theta \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi = \sin (\theta - \varphi)$$

当 $\theta - \varphi$ 足够小时,可以视 $\sin (\theta - \varphi) \approx \theta - \varphi = \Delta$ 。将角度误差 $\Delta = \theta - \varphi$ 输入至 PI 控制器,该 PI 控制器输出电机转子电角速度 ω ,经过一次积分,得到电机转子的电角度 $\varphi = \theta$ 。实现了电机转子位置解算。

请尝试实现上述锁相环算法,完成电机转子电角度以及角速度解算。