

XC800 Family

基于英飞凌 XC836M 的直流无刷电机 无传感器磁场定向控制参考设计

AP98001

Application Note

V1.0 2012-10

Edition 2012-10

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

© 2012 Infineon Technologies AG

All Rights Reserved.

LEGAL DISCLAIMER

THE INFORMATION GIVEN IN THIS APPLICATION NOTE IS GIVEN AS A HINT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE INFINEON TECHNOLOGIES COMPONENT ONLY AND SHALL NOT BE REGARDED AS ANY DESCRIPTION OR WARRANTY OF A CERTAIN FUNCTIONALITY, CONDITION OR QUALITY OF THE INFINEON TECHNOLOGIES COMPONENT. THE RECIPIENT OF THIS APPLICATION NOTE MUST VERIFY ANY FUNCTION DESCRIBED HEREIN IN THE REAL APPLICATION. INFINEON TECHNOLOGIES HEREBY DISCLAIMS ANY AND ALL WARRANTIES AND LIABILITIES OF ANY KIND (INCLUDING WITHOUT LIMITATION WARRANTIES OF NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF ANY THIRD PARTY) WITH RESPECT TO ANY AND ALL INFORMATION GIVEN IN THIS APPLICATION NOTE.

Information

For further information on technology, delivery terms and conditions and prices, please contact the nearest Infineon Technologies Office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements, components may contain dangerous substances. For information on the types in question, please contact the nearest Infineon Technologies Office.

Infineon Technologies components may be used in life-support devices or systems only with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system or to affect the safety or effectiveness of that device or system. Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.

XC836M

Revision History: V1.0, 2012-10

Previous Version: none

Page	Subjects (major changes since last revision)

We Listen to Your Comments

Is there any information in this document that you feel is wrong, unclear or missing?

Your feedback will help us to continuously improve the quality of this document.

Please send your proposal (including a reference to this document) to:

mcdocu.comments@infineon.com



Table of Contents

1	方案概述.....5
1.1	应用对象.....5
1.2	系统构成.....5
1.3	功能与指标.....6
1.4	XC836M 简介.....6
2	硬件设计.....8
2.1	结构框图.....8
2.2	MCU 相关电路.....8
2.3	驱动电路.....9
2.4	逆变电路.....10
2.5	电流放大电路.....11
2.6	直流母线电压检测电路.....11
2.7	接口.....12
2.8	硬件实物图.....12
3	算法设计.....13
3.1	磁场定向控制.....13
3.2	转子位置估算.....13
3.3	SVPWM.....14
3.4	电流采样.....16
3.5	启动控制.....17
3.6	闭环控制.....20
4	软件设计.....21
4.1	XC836M 资源分配.....21
4.2	项目文件及程序说明.....25
4.3	定标.....26
4.4	程序流程图.....29
5	方案测试.....30
5.1	测试条件.....30
5.2	测试方法.....30
5.3	测试结果.....30
6	开发指南.....32
6.1	参数确认.....32
6.2	硬件电路参数修改.....32
6.3	运行参数计算及更新.....33
6.4	启动参数调整.....35
6.5	闭环运行参数调整.....36
6.6	保护参数调整.....36
6.7	程序编译及下载.....36
6.8	运行.....37
6.9	参数调试.....38
7	附件.....39
7.1	MCU 部分原理图.....39
7.2	逆变电路原理图.....40
7.3	XC836Minikit 原理图.....41
7.4	参考代码.....41

1 方案概述

1.1 应用对象

在当今节能减排的趋势下，电机作为耗能大户，其效率的提升一直是业界努力的方向，包括电机效率及控制器效率。英飞凌作为全球主要的半导体厂商，针对电机控制器，提供从微控制器、电源管理 IC、驱动电路及功率器件的整体解决方案。

直流无刷电机由于其效率高、体积小、可靠性高等优点，使用范围越来越广。通常采用梯形波控制，控制简单，但换向噪声较大，在一些特定应用领域无法满足要求，而正弦波控制可以实现较低的运行噪声。磁场定向控制(FOC)做为正弦波控制的一种，具有控制特性好，转速精度高，噪声低等特点，由于算法较复杂，通常需要 16 位或 32 位微控制器才能实现，而英飞凌的 8 位微控制器 XC836M 可以实现磁场定向控制，具有较高性价比。

本设计指导将介绍直流流无刷电机的无传感器磁场定向控制，及基于 XC836M 的风机应用参考设计。包括硬件，软件说明，开发流程介绍，并附相关原理图及参考代码。

1.2 系统构成

系统结构框图如 Figure 1 所示，由整流电路、开关电源、微控制器、逆变单元、驱动电路、电流采样及放大电路，下载及监控接口等部分组成。其中整流滤波、开关电源、RS232 电平转换等采用已有模块，本文不做详细介绍。

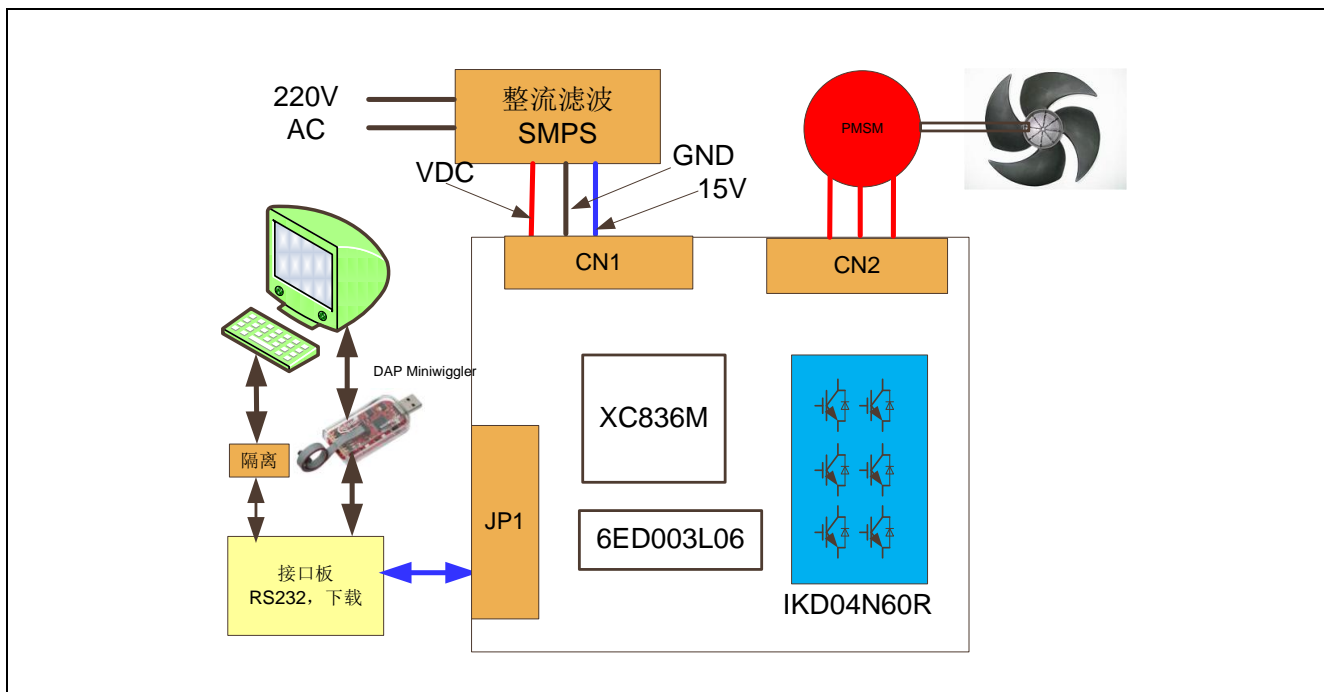


Figure 1 系统结构框图

XC836M 主要完成电机相电流采样，磁场定向控制，位置估算，PWM 生成，同时通过 UART(RS232)与上位机通讯，实现系统控制与实时信息监控。驱动电路采用英飞凌 6ED003L06，逆变电路采用英飞凌分立 IGBT IKD04N60R。

1.3 功能与指标

参考方案主要功能如下：

- 控制方式：无传感器磁场定向控制
- 电机类型：永磁同步电机（风机）
- 电流采样方式：双桥臂电阻采样
- 电机调速范围：300RPM – 1200RPM(4 对极)
- 微控制器：XC836M
- 启动方式：静止启动
- 保护方式：过流，过压、欠压，过载
- 转速控制：上位机软件、外部电压输入
- 软件开发环境：Keil C51 V9.03

硬件电路参数：

- 供电电压：310V DC
- 额定功率：100W

1.4 XC836M 简介

XC836M 为 XC800 微控制器最新产品，采用增强型 8051 内核，主频 24MHz，片上集成 8KByte Flash, 512 字节 RAM，内嵌 16 位矢量计算机单元(MDU, CORDIC)，可进行 16 位乘、除法，三角运算，大大提升了 8 位控制器的运算能力，片上集成了专用电机控制单元 CCU6，以及强大、灵活的 10 位 ADC，适应于直流无刷电机、永磁同步电机控制。

XC836M 主要特点如下：

- 高性能 XC800 内核
 - 兼容标准 8051 内核
 - 双机器周期指令结构
 - 双数据指针
- 片上存储器
 - 256 Bytes RAM
 - 256 Bytes XRAM
 - 4/8K Bytes Flash
- I/O 电压 2.5V-5.5V，内核电压：2.5V(内部调压器生成)
- 主频：24MHz
- 工作电压：2.5V - 5V
- 片上晶振(48MHz)
- 可编程 16 位 Window WDT，独立时钟源
- 三个 16 位通用定时器(T0、T1、T2)
- RTC 单元
- 16 位矢量计算单元，用于复杂算法实现
 - 乘除法单元，支持 16 位乘除法运算
 - CORDIC 单元，可用于三角运算如 $\sin(X)$, $\cos(X)$, $\tan^{-1}(X)$ 等
- 专用电机控制单元 CCU6
 - 两个 16 位专用定时器单元 T12、T13
 - T12 支持 3 组比较/捕获通道（三对互补 PWM）
 - T13 支持 1 路比较输出通道

- 集成死区时间生成单元，可输出互补 PWM 信号，防止功率级短路
- 定时器支持单次运行模式
- 支持类磁滞控制模式
- 专用霍尔传感器模式，硬件支持直流无刷电机的块交换控制
 - a) 自动进行霍尔信号的滤波、采样、比较以及输出换相操作
 - b) 自动检测电机速度
- 集成多通道模式，支持多相电机的控制
- 可与 A/D 单元进行联动，自动触发 A/D 转换操作
- 增强型 A/D
 - 8 个通道，8/10 位转换精度
 - 采样时间可编程，最小转换时间 $<1\mu\text{s}$
 - 支持差分输入
 - 4 个独立的结果寄存器
 - 支持自动扫描功能
 - 支持队列、扫描转换请求
 - 转换结果自动边界检测功能
 - 丰富的中断节点，优先级可配置
- 丰富的串行口单元
 - 全双工 UART
 - 高速 SSC (兼容 SPI)
 - I2C 接口
- 支持单线调试 SPD
- 封装: PG-TSSOP-28
- 温度: -40°C - 85°C

2 硬件设计

2.1 结构框图

硬件结构如 Figure 2 所示。包含 MCU 相关电路、驱动电路、逆变电路、电流采样及放大电路等。

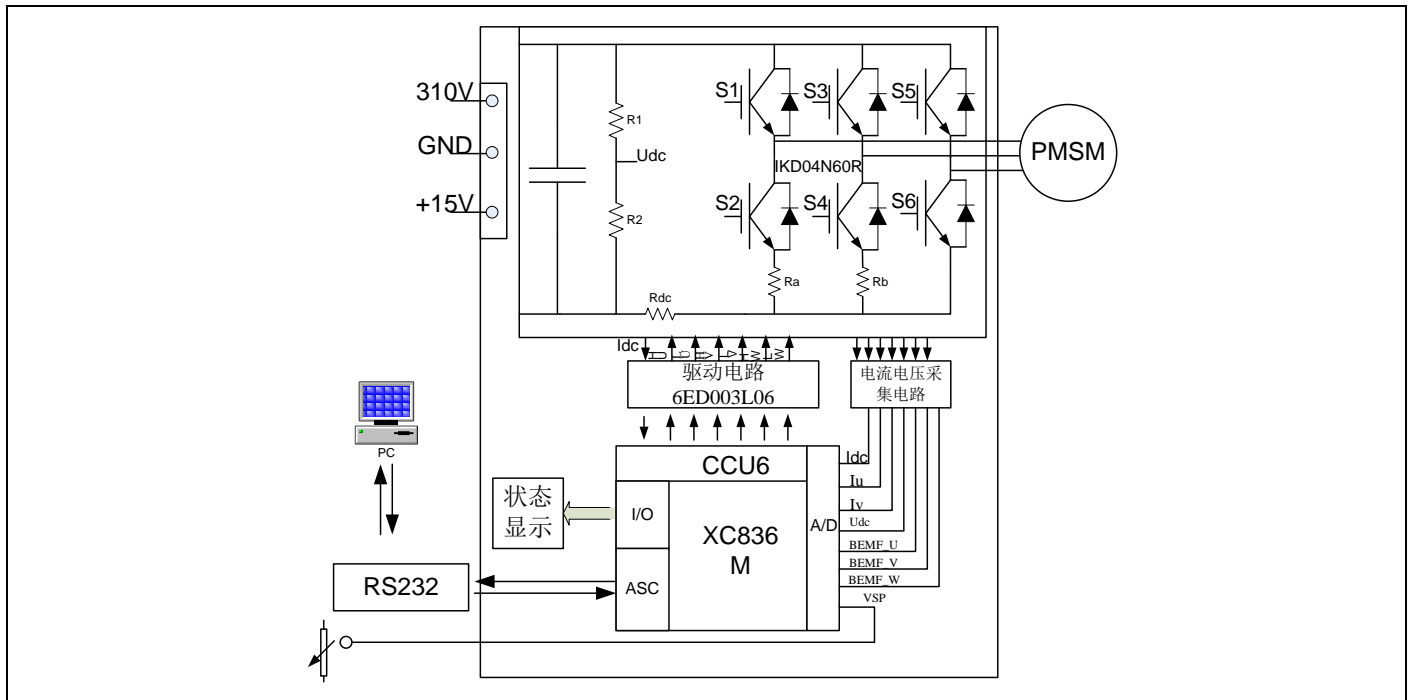


Figure 2 硬件结构框图

2.2 MCU 相关电路

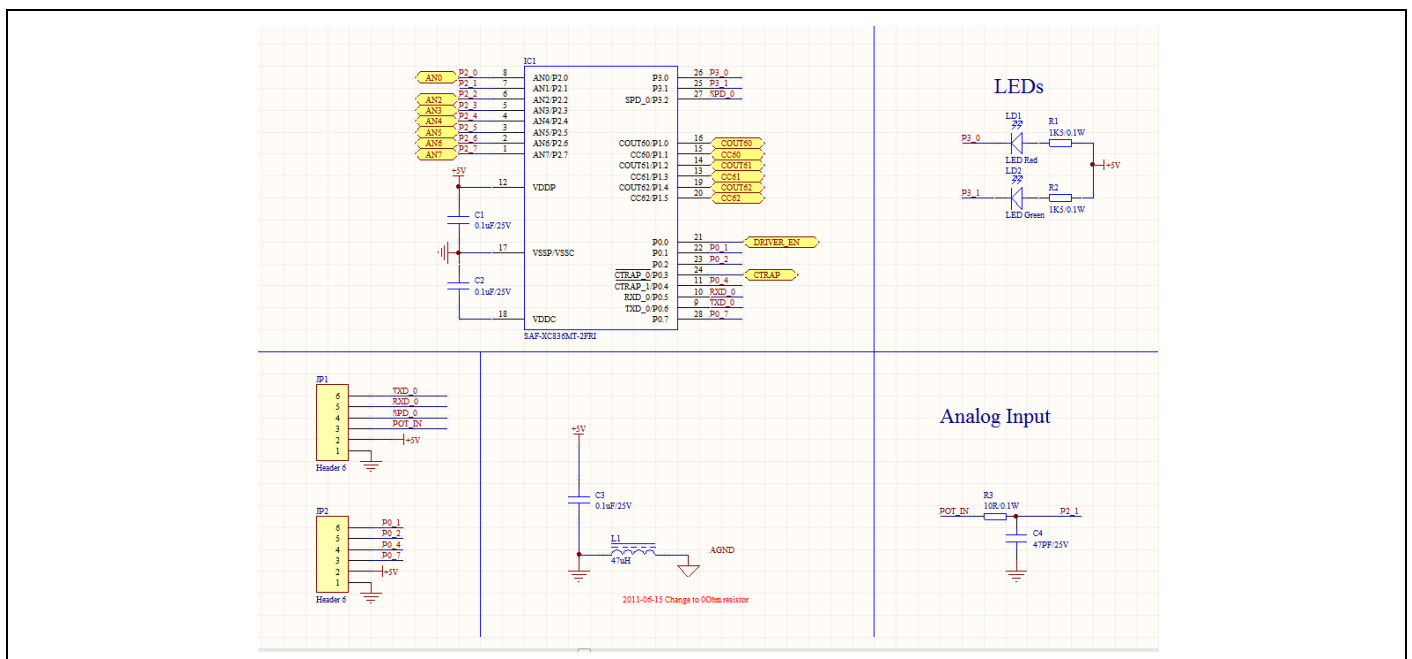


Figure 3 MCU 相关电路

LED1、LED2 用于系统状态显示，POT_IN 为外部速度指令输入，经过低通滤波后输入到 P2.1，JP1 为 SPD 程序下载及外部 RS232 通信接口，JP2 用于普通 I/O 接口，可用于外部功能扩展或系统调试。

XC836M 资源分配见 Table 1。

Table 1 XC836 资源分配表

功能分类	引脚名称	所属模块	说 明
电机驱动 PWM 信号输出	P1.0/ COUT60	CCU6	U 相下管
	P1.1/ CC60		U 相上管
	P1.2/ COUT61		V 相下管
	P1.3/ CC61		V 相上管
	P1.4/ COUT62		W 相下管
	P1.5/ CC62		W 相上管
保护输入	P0.3		过流保护
控制输出	P0.0	I/O	Driver IC 使能信号
模拟信号输入	P2.6	A/D	相电流 IV
	P2.7		相电流 IU
	P2.5		直流母线电流 IDC
	P2.4		直流母线电压
	P2.3		V 相反电势
	P2.2		U 相反电势
	P2.1		调速信号输入
	P2.0		W 相反电势
通讯	P0.5	UART	RXD
	P0.6		TXD
调试	P3.2	SPD	调试接口

2.3 驱动电路

IGBT 驱动采用英飞凌 6ED003L06, 电路图见 Figure 4。

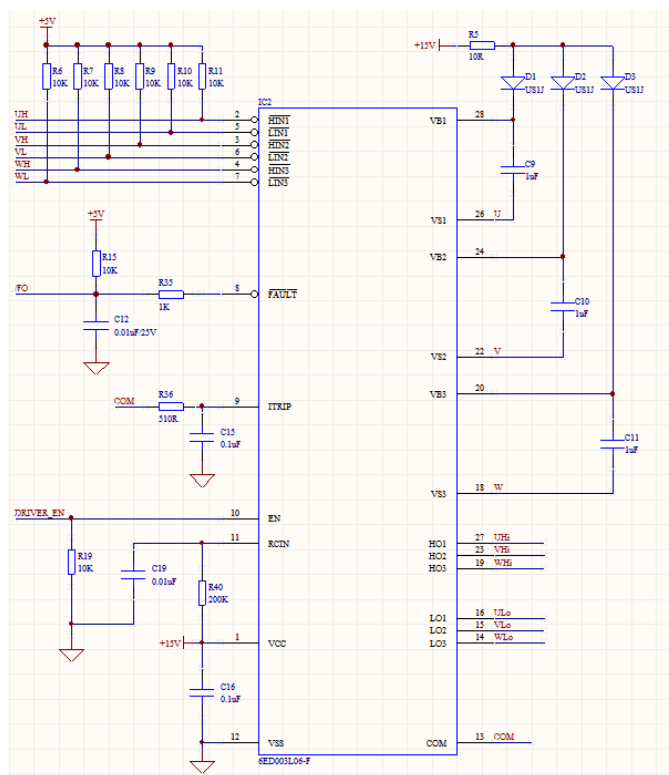


Figure 4 驱动电路原理图

其中/FO 为保护信号输出，当功率管发生过流时，COM 脚电平大于限值(0.46V, 参见 6ED003L06-F.pdf)，6ED 会自动封锁 PWM 输出，且/FO 会输出低电平，通知微控制器关闭 PWM 输出。

实际过流保护值计算公式如下： $I_{trip} = \frac{0.46V}{R_{39}} I_{trip} = \frac{0.46V}{R_{37}}$

2.4 逆变电路

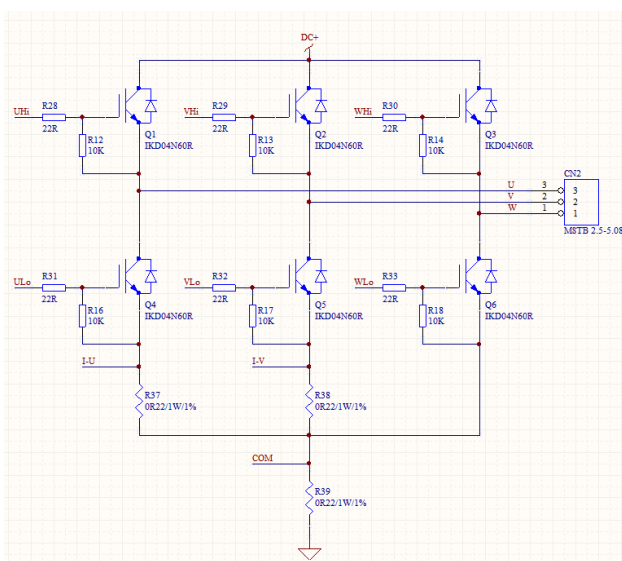


Figure 5 逆变电路原理图

逆变电路功率管采用 IKT04N60R，R37、R38 为 0.22ohm 电阻，用于桥臂电流采样。R39 用于短路保护检测，CN2 为电机线端子。

2.5 电流放大电路

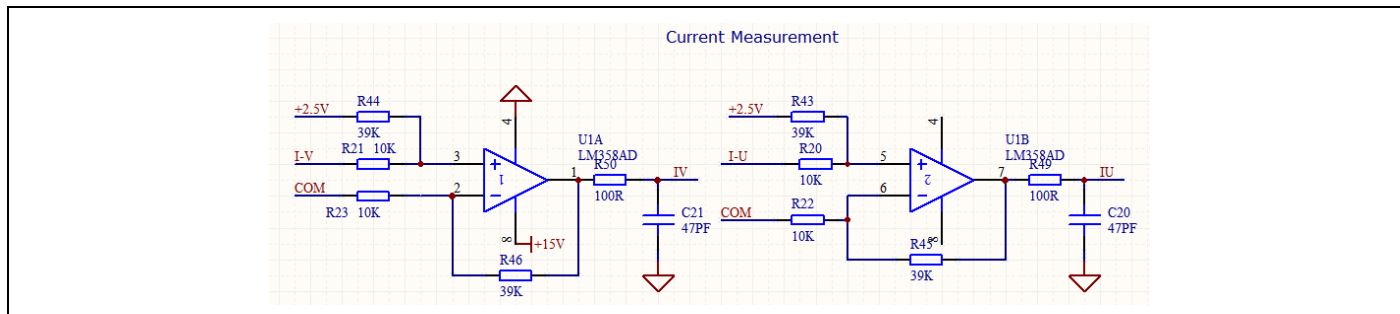


Figure 6 电流放大电路原理图

U1A、U1B 用于相电流信号放大，由于通过桥臂电阻采样到的电压信号有可能为负值，为了能得到所有信息，增加 2.5V 偏置电路。2.5V 电压由 IC6 LM1117 产生。U2A, U2B 用于直流母线及母线电压放大。

经过放大的电流采样信号 V 与电机相电流 I 之间的关系为(以 U 相电流为例):

$$V_{IU} = 2.5V + ((-I_U) * R_{37}) * \frac{R_{45}}{R_{22}};$$

$$\text{电流放大倍数: } K = \frac{R_{45}}{R_{22}} = 3.9.$$

实际参数计算中需要考虑运算放大器的输出范围，在本方案中由于 LM358 的输出限制，参数计算式 V_{IU} 应小于 3.7V。

2.6 直流母线电压检测电路

直流母线电压经过分压、滤波电路、跟随电路输入 MCU。

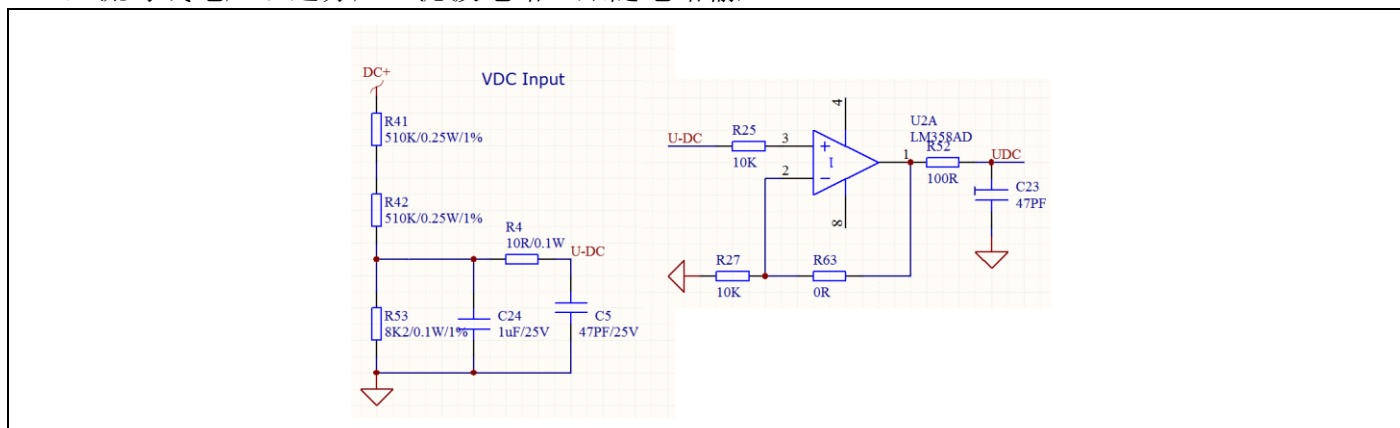


Figure 7 直流母线电压采样原理图

$$U_{DC} = VDC * \frac{R_{53}}{R_{53} + R_{42} + R_{41}}$$

相关参数选择需要考虑直流母线电压值 VDC ，及运放电路的输出限制（此方案中使用的 LM358 最大输出电压 3.7V）。

2.7 接口

Table 2 硬件接口说明

接口	说明
CN1	Power Input: 310V, 15V, GND
CN2	Motor Connection: U,V,W
JP1	通信, 模拟量输入 (TXD, RXD, SPD, POT)
JP2	I/O 输出, 调试用

2.8 硬件实物图

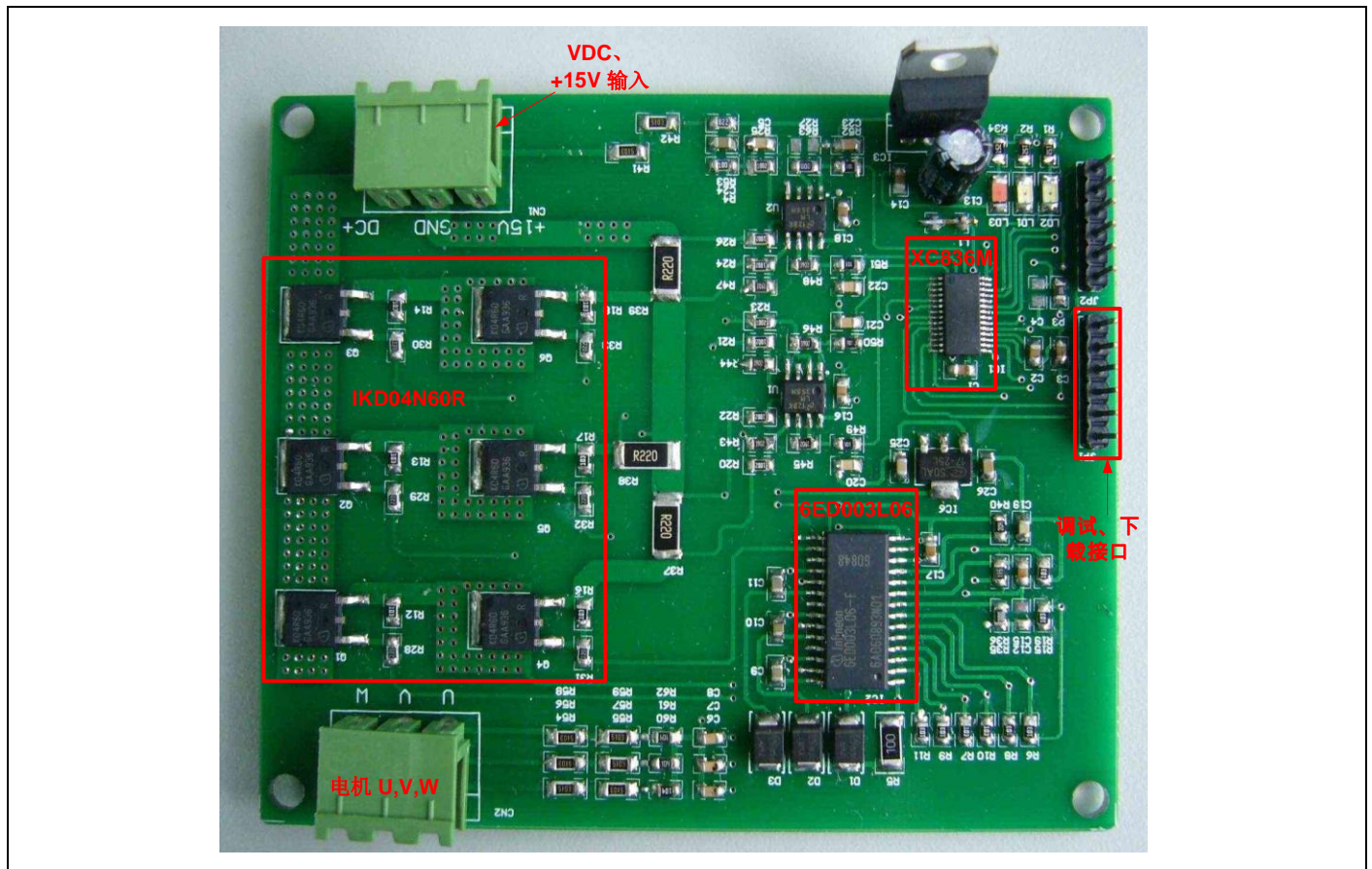


Figure 8 硬件实物图

测试电路板, 仅供参考。

3 算法设计

3.1 磁场定向控制

磁场定向控制是永磁同步电机及交流异步电机中广泛使用的一种控制方式，通过坐标变换，将复杂的交流电机模型转换为简单的直流机模型，实现励磁电流与转矩电流的解耦，使交流电机可以达到直流电机的控制效果，其结构框图见 Figure 9。

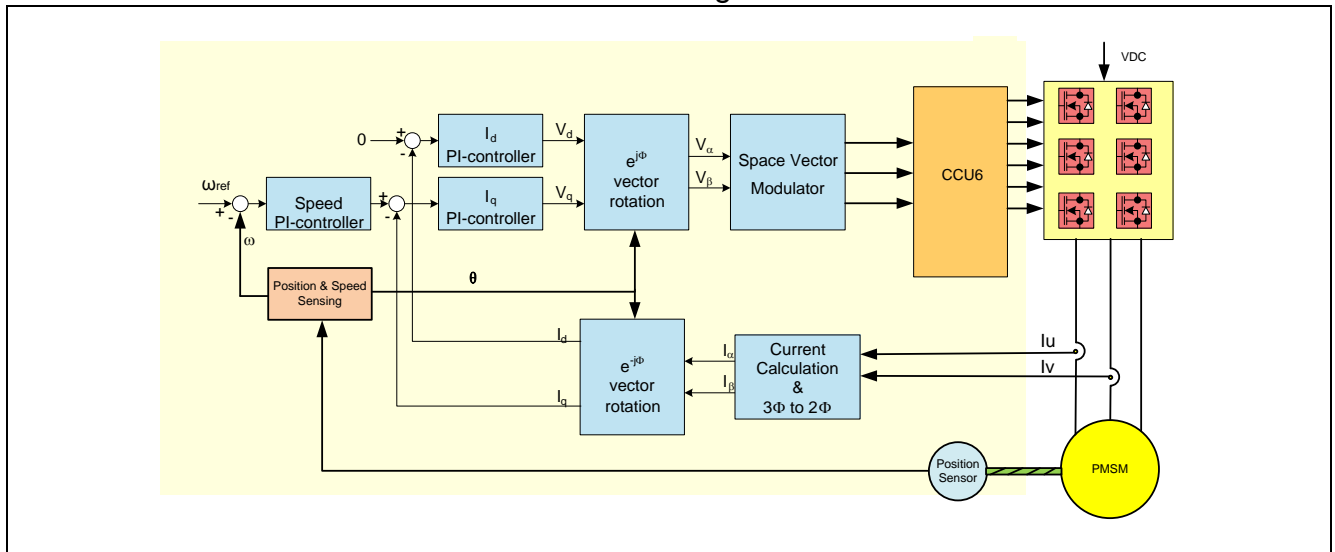


Figure 9 磁场定向控制原理图

相电流 i_a, i_b 通过 Clark 变换，由三相定子坐标系转换到两相定子坐标系 (i_α, i_β)，通过 Park 变换，由两相定子坐标系变换到两相旋转坐标系 (i_d, i_q)，在 park 变换中会用到转子的位置信息 θ 。 i_d 为励磁电流分量， i_q 为转矩电流分量。转矩电流 PI 调节器调整转矩电流，励磁电流 PI 调节器用于调整励磁电流。通常对于 PMSM 电机，励磁电流的给定值为 0，如果需要弱磁，励磁电流的给定值通常为负值。转矩电流的给定值通常为速度 PI 调节器的输出。速度 PI 调节器根据速度给定及速度反馈来控制转矩电流 i_q 的大小，转矩电流 PI 调节器的输出 V_q ，励磁电流 PI 调节器的输出 V_d ，经过 Park 逆变换转换到两相定子坐标系 (V_α, V_β)，然后通过 SVPWM 模块，输出到逆变器。

由 FOC 的原理可见，在磁场定向控制中，需要利用转子位置信息进行坐标变化。通常位置信息可以通过转子位置传感器（增量式编码器等）获得。对于无传感器控制，位置信息需要通过一定的算法进行估算。

3.2 转子位置估算

本参考方案中采用无传感器控制，通过转子磁链法估算转子位置信息，结构框图见 Figure 10。

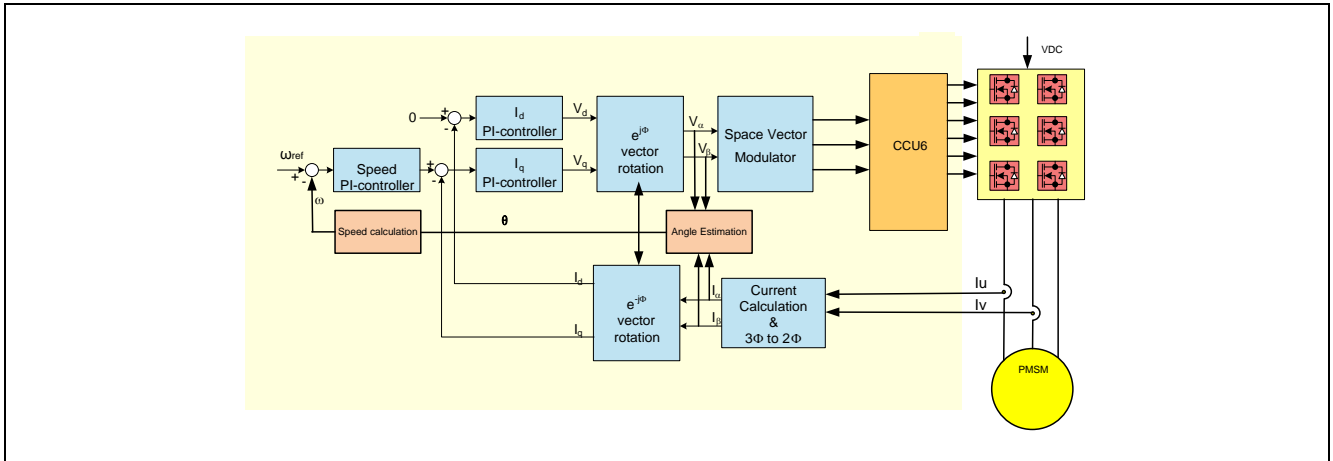


Figure 10 无传感器磁场定向控制框图

根据两相定子坐标系下的电压方程，得到转子磁链信息，电压方程如下：

$$\begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{f\alpha} \\ \Psi_{f\beta} \end{bmatrix};$$

$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ 为定子磁链， $\Psi_{f\alpha}, \Psi_{f\beta}$ 为转子磁链， $L_s * i_{s\alpha}, L_s * i_{s\beta}$ 为电感电势。转子位置角 θ_{re} 可以通过以下公式得到：

$$\begin{aligned} \Psi_{f\alpha} &= \Psi_m * \cos(\theta_{re}) \\ \Psi_{f\beta} &= \Psi_m * \sin(\theta_{re}) \\ \theta_{re} &= \tan^{-1} \left(\frac{\Psi_{f\beta}}{\Psi_{f\alpha}} \right) \end{aligned}$$

反正切运算 \tan^{-1} 的实现有多种方法，在本方案中采用 PLL 形式实现，用户亦可利用 XC836M 的 CORDIC 模块进行相关运算。

注：在程序中位置估算部分以库函数形式提供。相关文件及函数见 Table 3。

Table 3 FOC.lib 库函数程序列表

文件	相关函数	注释
FOC_lib.h	void SnlCAL(SNL_structure *p, int vol, int curt);	转子磁链估算
	void Pll(int iPLLINC, int iPLLVFILTER);	PLL 角度计算
	void PllCompCal(int iSpdRef, int iPLLATAN);	PLL 补偿
FOC_lib.lib	库函数文件	

3.3 SVPWM

SVPWM 是磁场定向控制中常用的 PWM 调制方式。其原理如下：三相全桥电路中六个开关管存在 8 种开关状态，在此定义为 8 个矢量 ($V_0 - V_7$)，其中 6 个有效矢量 ($V_1 - V_6$)，2 个无效矢量 (V_0, V_7)，六个矢量与 a,b,c 坐标系及 α, β 坐标系的关系如 Figure 11 所示。设计一个旋转矢量 $V_{\alpha\beta}$ ，当 $V_{\alpha\beta}$ 旋转时，在 a,b,c 坐标系上的投影 V_a, V_b, V_c 为正弦电压。控制 $V_{\alpha\beta}$ 的幅值，频率即可控制 V_a, V_b, V_c 的幅值及频率。将 α, β 坐标系分为六个扇区， $V_{\alpha\beta}$ 可以利用所在扇区的相邻两个矢量进行合成。控制矢量的施加时间即可控制合成矢量的幅值、角度。

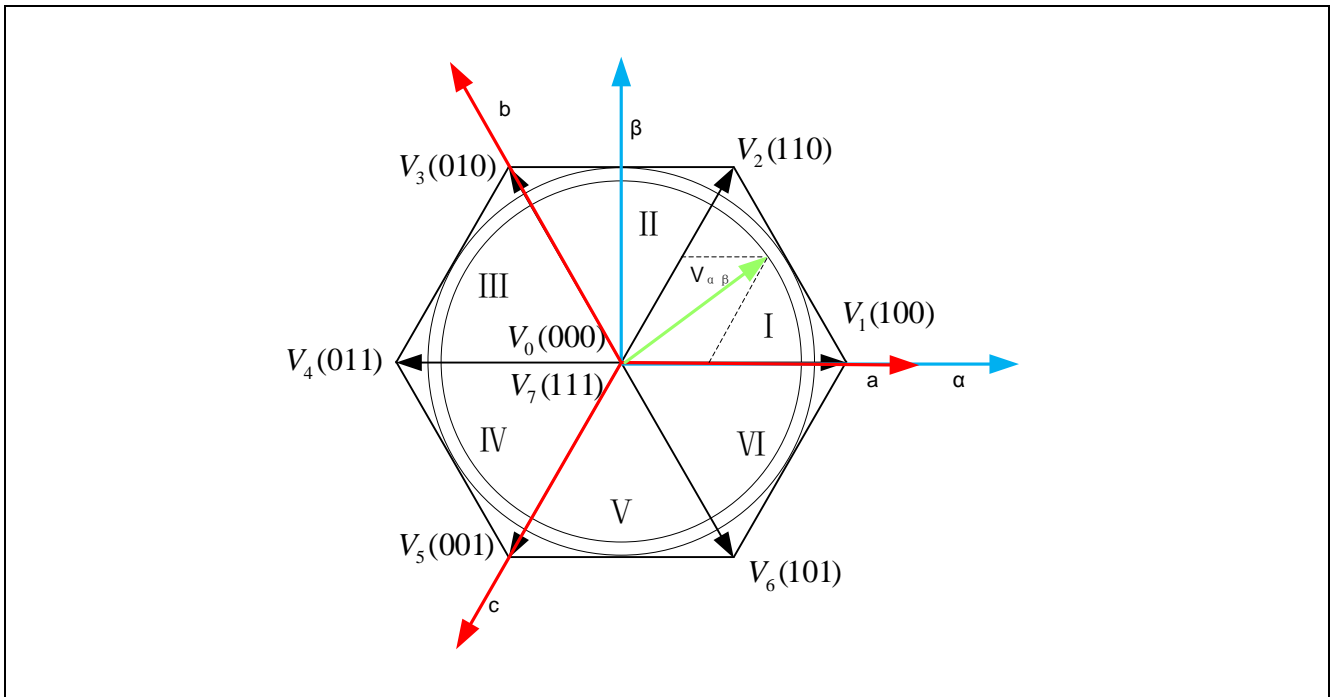


Figure 11 SVPWM 示意图

详细的矢量合成方法，请参见英飞凌相关应用手册：AP16084(FOC of PMSM)。

在 SVPWM 的实现中，零矢量的分配对于最终 PWM 输出形式及运行效果有一定影响，常见的为五段式及七段式 SVPWM，两种 SVPWM 的差别在于无效矢量施加的位置及时间不同。具体比较见 Table 4。

Table 4 SVPWM 零矢量差异

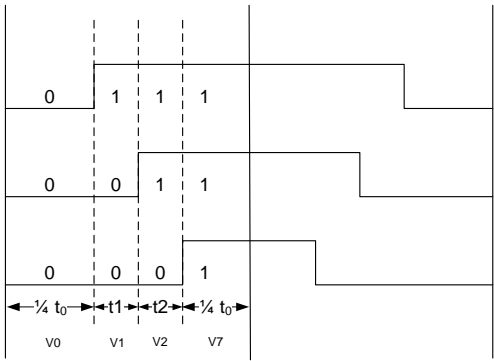
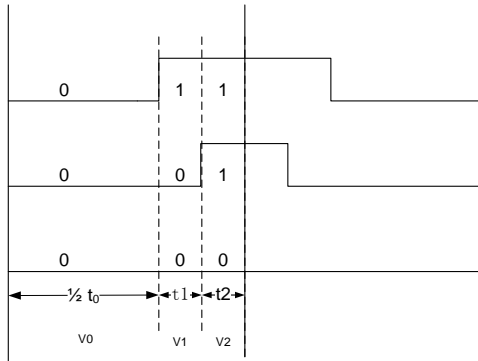
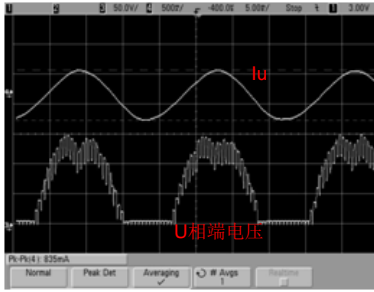
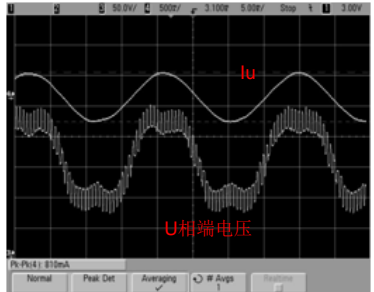
七段式 SVPWM	五段式 SVPWM
	

Table 4 中，七段式 SVPWM 中 V_0, V_7 分别施加了 $\frac{1}{4}t_0$ ，而在五段式 SVPWM 中， V_0 施加 $\frac{1}{2}t_0$ ， V_7 施加时间为 0，同时可以看出，对于七段式 SVPWM，一个 PWM 周期中开关管开关 6 次，而五段式 SVPWM 一个 PWM 周期中开关管仅开关 4 次，开关次数较少 1/3。因此五段式 SVPWM 开关损耗较小，在一些对开关损耗（效率）有要求的应用场合可以使用。

在本方案中两种 SVPWM 均有实现，可通过“configure.h”中相应宏来选择。

Table 5 两种 SVPWM 对比

SVPWM 类型	五段式 SVPWM	七段式 SVPWM
configure.h 宏定义	#define TWO_PHASE_SVPWM	#define THREE_PHASE_SVPWM
代码实现	$t_a = \frac{T}{2} - \frac{(t_1 + t_2)}{2}$ $t_c = \frac{T}{2} + \frac{(t_1 + t_2)}{2}$ $t_b = t_a + t_1 \text{ (扇区1,3,5)}$ $t_b = t_a + t_2 \text{ (扇区2,4,6)}$	$t_a = T - (t_1 + t_2)$ $t_c = T$ $t_b = t_a + t_1 \text{ (扇区1,3,5)}$ $t_b = t_a + t_2 \text{ (扇区2,4,6)}$
波形图		

从 Figure 5 中的 U 相端电压可以发现，在一个电流周期内，采用五段式 SVPWM 调制时，U 相功率管仅开关 240°，因此与七段 SVPWM 相比，开关损耗可以较少 1/3。

3.4 电流采样

从 FOC 的原理可以看出，FOC 首先需要准确的采样电机相电流信息(I_a , I_b)，电机相电流可以通过多种方法得到，如电流传感器或电阻形式电流采样。前者使用简单，但成本较高，后者成本较低。通常有单直流母线电阻，及桥臂电阻电流采样。直流母线电阻采样仅需一个采样电阻，但实现相对复杂，且需要灵活的 A/D 触发机制配合，同时还有采样死区的限制。在本方案中使用了双桥臂电阻进行采样，实现简单。以全桥为例，原理如 Figure 12 所示。

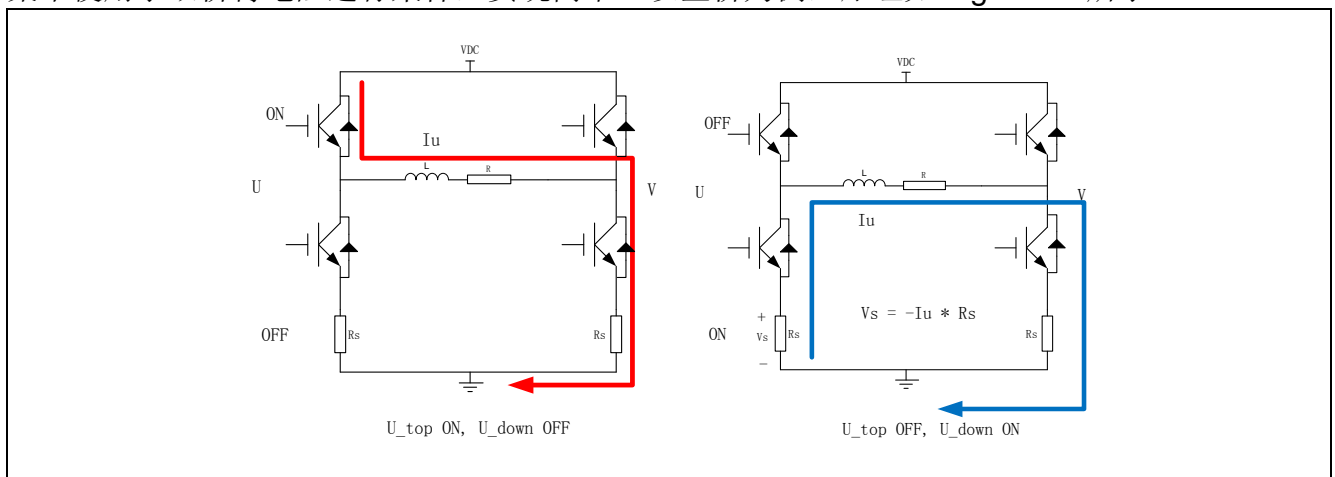


Figure 12 母线电阻采样电流示意图

当下管开通时，流经下管（或续流二极管）的电流 I 等于相电流 I_U 。通过增加采样电阻，即可采集到此电流信息。 R_s 两端电压 $V_s = (-I_U) * R_s$ 。为了采集三相电流，需要两个采样电阻 R_{sa} , R_{sb} 。

为了能准确采样到此信息，需要在下管开通期间进行电流采样。通常 PWM 定时器工作为中心对齐模式，因此最佳采样点为 PWM 定时器的过零点。在 XC836M 中可以通过 T12 定时器的过零中断触发多通道模式，然后触发 A/D 的队列转换，依次采样并转换 I_u, I_v ，见 Figure 13。

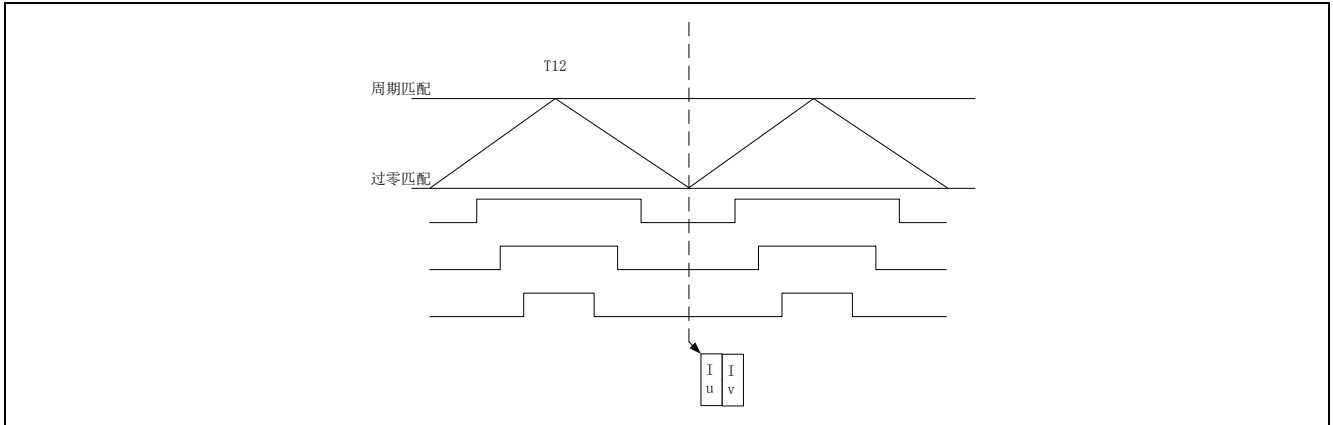


Figure 13 A/D 采样触发点选择

3.5 启动控制

对于无传感器磁场定向控制，电机低速时，反电势比较小，位置估计误差较大，因此通常以开环形式启动，当电机达到一定速度后，估算得到的转子位置比较准确，利用此信息可实现位置闭环。本方案中启动过程为电流闭环、位置开环形式。

启动流程包括：初始定位，开环运行，闭环运行。流程图见 Figure 14。

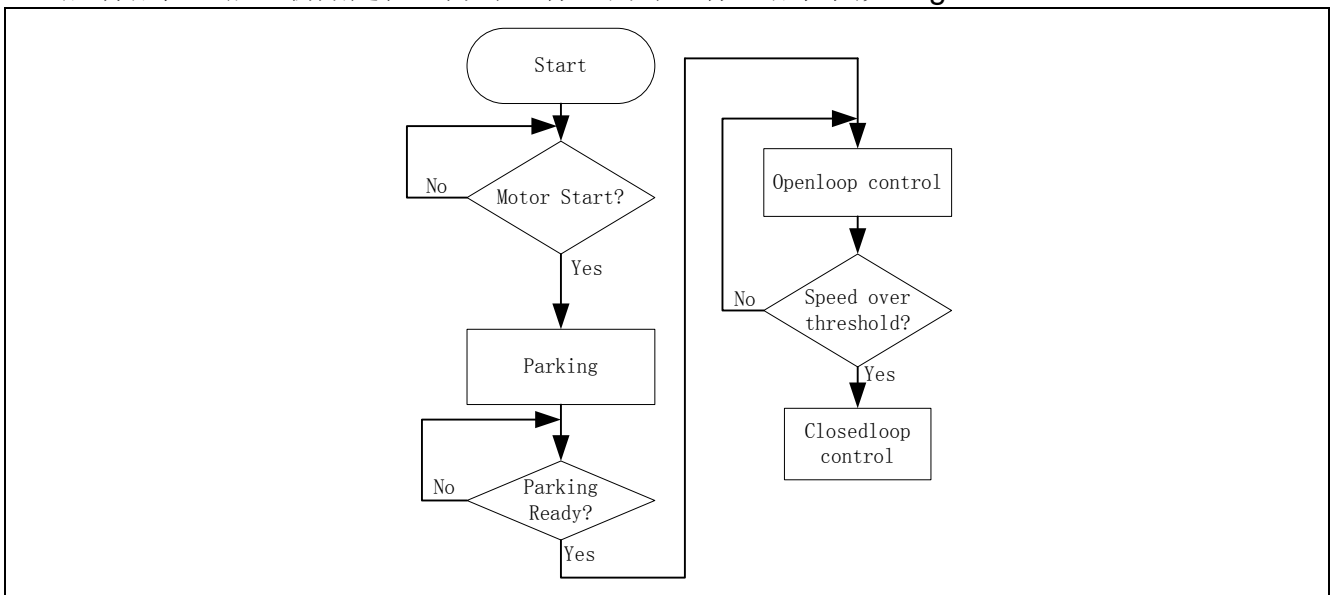


Figure 14 启动流程图

3.5.1 初始定位

启动时，由于无法获得转子位置，直接运行的话，转子有可能反转，有启动失败的可能。通常对转子进行预定位。通过施加固定角度的电流矢量，将转子吸引到某个固定位置，然后从此位置进行开环启动。电流大小和负载特性相关。为了较少电流冲击，电流缓慢增加至给定值。

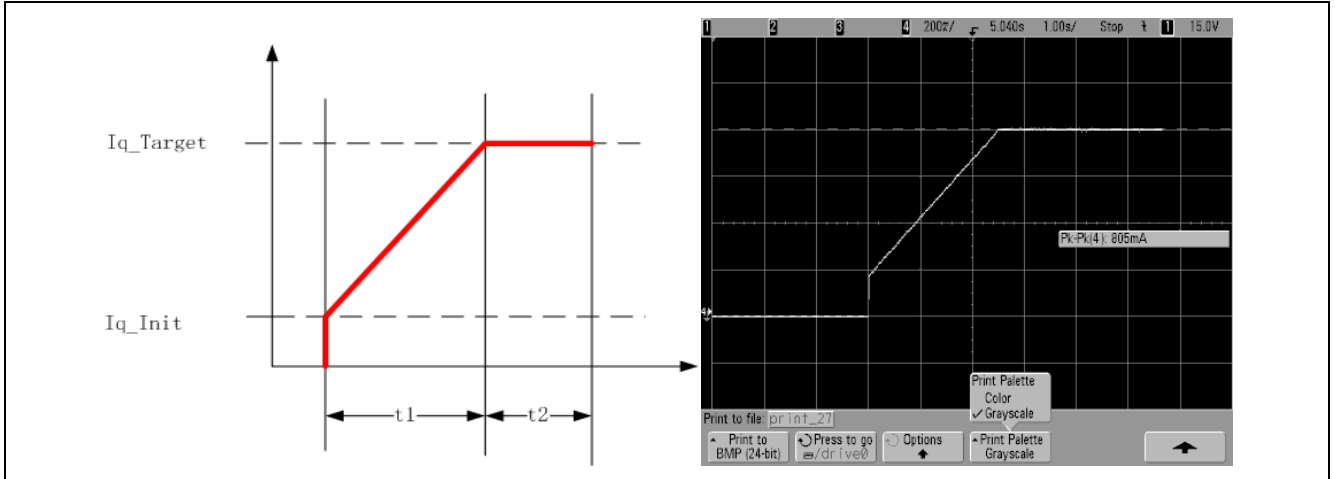


Figure 15 初始定位示意图

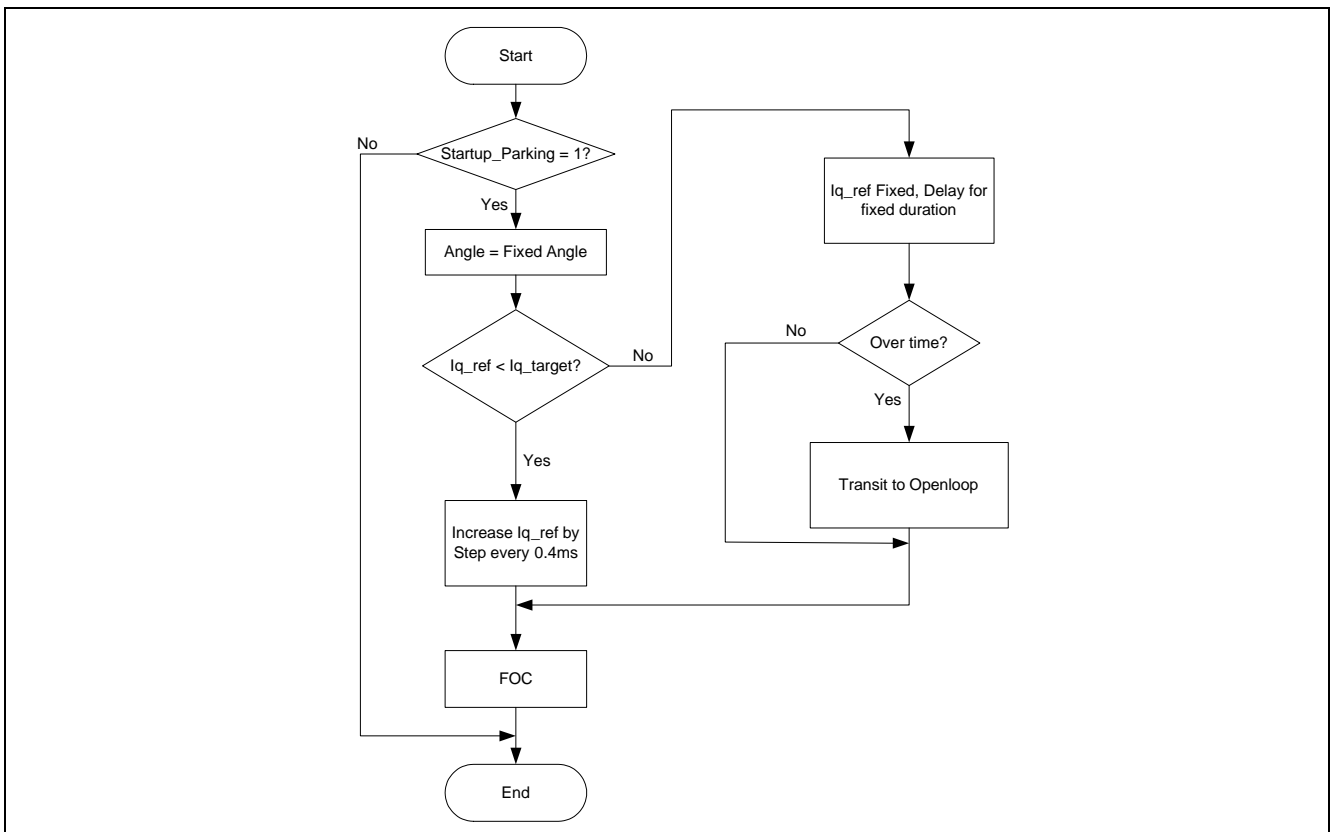


Figure 16 初始定位流程图

3.5.2 开环运行

开环运行时，假定转子位置，通过磁场定向控制，驱动电机运行，并采用恒加速度形式进行加速，当速度达到给定值以后，便可根据是否满足切换条件，切入闭环运行。

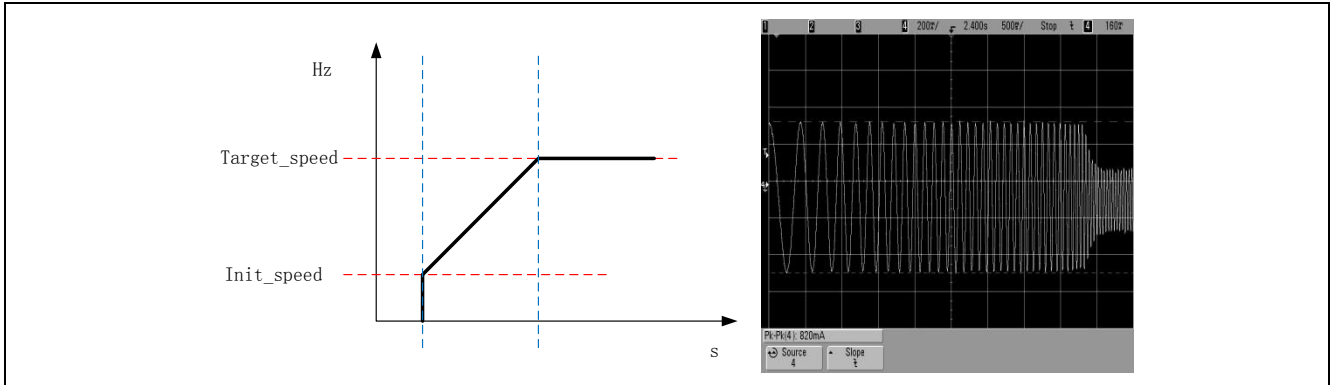


Figure 17 开环运行示意图及相电流波形

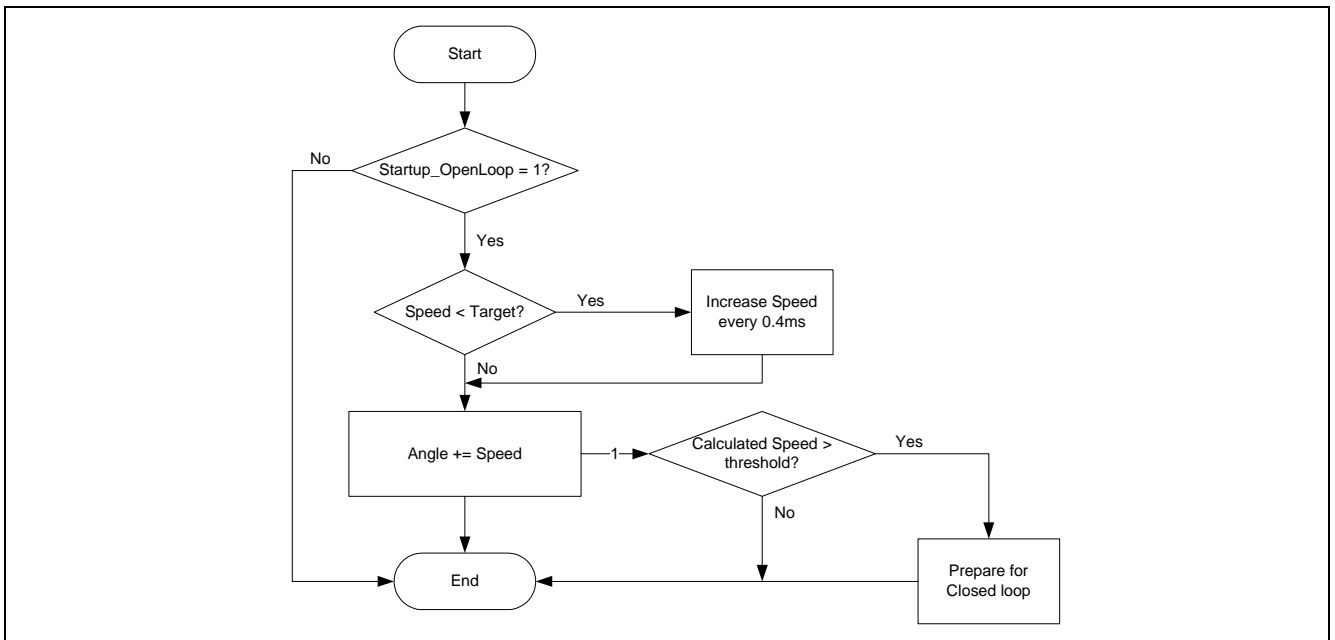


Figure 18 开环运行流程图

3.5.3 开环闭环切换

当转速达到切换转速，且位置估算信息准确后，便可切入闭环运行。根据估算得到的转子位置信息，进行位置闭环运行。由于开环运行时，磁场定向控制使用假定的位置角，而切换后采用实时计算得到的转子位置角，因此切换前后会有角度差，如果直接切换，会造成电流畸变，产生噪声，严重的时候会导致切换失败。在本方案中，采用平滑过渡，逐步减少切换角度差。

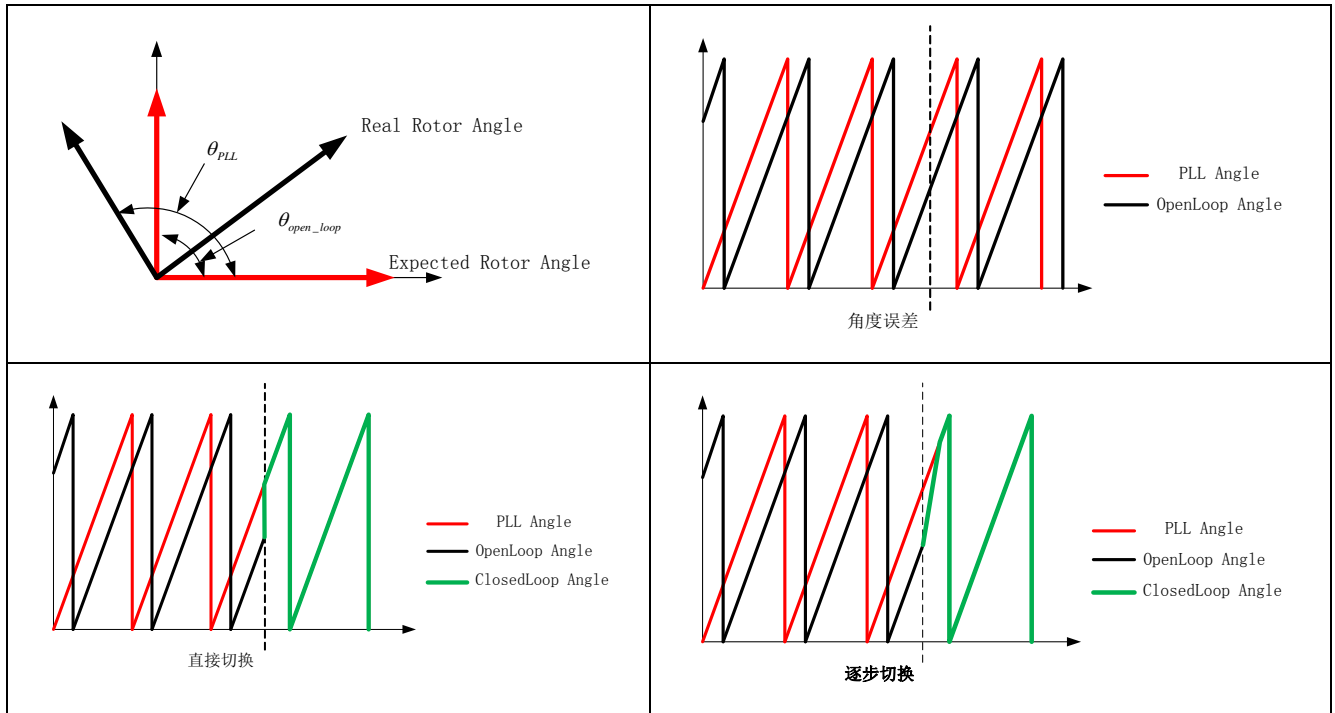


Figure 19 角度切换示意图

3.6 闭环控制

进入闭环控制后，根据估算得到的转子位置信息，进行磁场定向控制，同时速度环开始运行，流程图见 Figure 20。

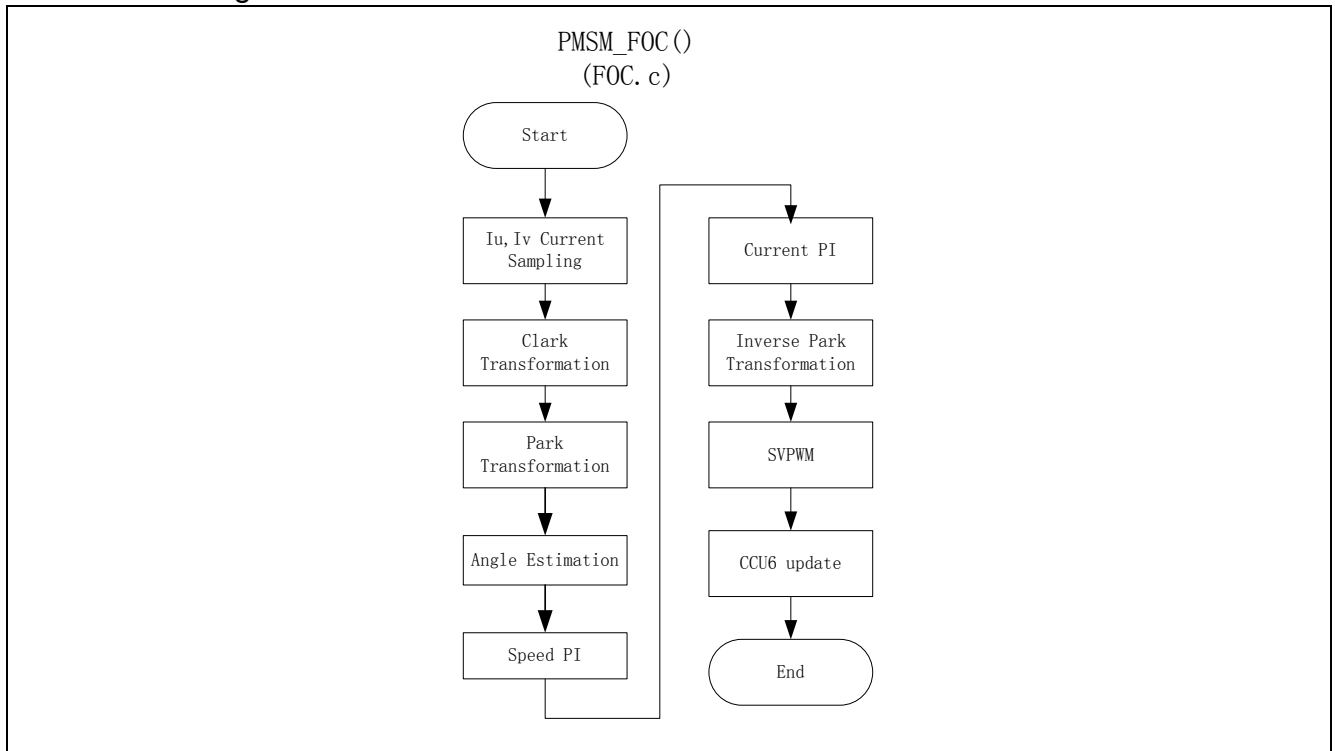


Figure 20 闭环控制流程

4 软件设计

4.1 XC836M 资源分配

4.1.1 电机控制单元 CCU6

CCU6 用于生成三相互补 PWM，集成硬件死区时间。支持应急关断，当外部 TRAP 信号有效时，硬件封锁所有 PWM 输出，同时触发中断。

程序中 T12 工作于中心对称模式，频率 18KHz，用于互补 PWM 生成。T13 工作于单次触发模式，用作定时器，444us 定时。由 T12 周期中断触发，周期中断中使能 T12 周期中断。T12、T13 运行关系如 Figure 21 所示。

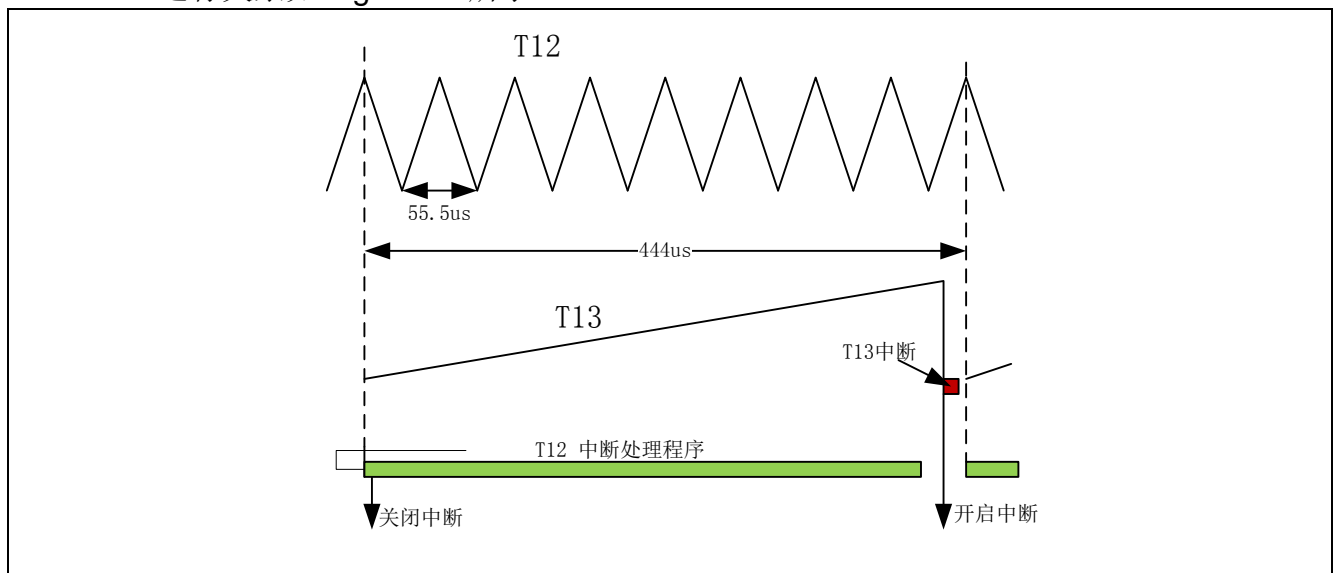


Figure 21 T12, T13 运行关系图

中断资源分配：

1. T12 周期中断：主中断，执行电流信息采样，转子位置估算，FOC 运算等操作。

由于 XC836 运算能力的限制，所有运算需约 300us ~ 400us，单次中断无法完成所有计算。具体实现中，当进入 T12 周期中断处理程序后，禁止 T12 周期中断产生，直至完成全部计算工作。

2. T13 周期中断：

中断处理程序中重新使能 T12 周期中断

3. Trap 中断

置位保护标志，电机停止运行。

4.1.2 A/D

通道及寄存器分配见 Table 6。

Table 6 A/D 通道及寄存器分配

通道号	信号说明	结果寄存器
7	IU	RES0
6	IV	RES1
5	IDC	Not Used
4	VDC	RES2
3	BEMF_V	RES3
2	BEMF_U	RES1
1	POT	RES3
0	BEMF_W	RES0

FOC 控制中，A/D 采样采用队列请求模式，不同控制阶段（初始化，启动，闭环控制）的队列内容不同，见 Table 7。

Table 7 A/D 采样通道分配

工作模式	队列内容
电流偏置采样	AN7, AN6(refill)
初始状态检测	AN4, AN3, An2, AN0 (refill)
空闲状态	AN4(Refill)
其他工作状态	AN7, AN6, AN4(refill)

磁场定向阶段阶段，A/D 队列转换请求由 T12 过零中断触发。由于 XC836 中 T12 过零事件(T12ZM)无法直接触发 A/D，因此通过多通道模式（MCM）中断作为过渡，实际触发关系为：T12ZM 触发 MCM，MCM 触发 A/D，配置程序如下。

```

SFR_PAGE(_cc2, noSST);    // switch to page 2
CCU6_MCMCTR = 0x03;        // transfer on T12 one match, SWSEL = 011
                             // direct transfer, SWSYN = 0

SFR_PAGE(_cc0, noSST);    // switch to page 0
CCU6_MCMOUTSL = 0xCF;

SFR_PAGE(_ad4, noSST);    // switch to page 4
ADC_ETRCR = 0x05;         // load external trigger control register
SFR_PAGE(_ad0, noSST);    // switch to page 0

```

为了减少 CPU 负荷，利用 XC836M A/D 队列自动重载特性。当队列中转换的通道配置为重载模式时，通道转换完成后，自动重新加载，等待下个触发事件的到来。初始化配置程序如下：

```

ADC_QINR0 = 0xA7; // Ch3, triggered by T13 compare match, refill - IU
ADC_QINR0 = 0x26; // Ch2, refill IV
ADC_QINR0 = 0x24; // Ch1, refill VDC
ADC_QINR0 = 0x21; // VSP

```

配置完成后，A/D 运行无需软件介入，只需在转换完成后读取结果即可。

4.1.3 CODRIC&MDU

XC836M 中 CORDIC 与 MDU 工作频率设置为 48MHz，通过设置工作模式，实现不同的计算功能，详细介绍请参考 XC836 用户手册 “XC83x_um_V1_1.pdf”

1. MDU

通过配置 MDU_MDUCON 寄存器选择工作模式。

MDU_MDUCON¹⁾
MDU Control Register
RMAP:0, PAGE:x

(B1 _H)							Reset Value: 00 _H
7	6	5	4	3	2	1	0
IE	IR	RSEL	START	OPCODE			
rw	rw	rw	rwh	rw-			

¹⁾ 参考 XC836 用户手册

Table 8 MDU 使用方法及例程

模式	计算公式	例程
乘法	unsigned 16-bit multiplication	<pre>// Clark Transform MDU_MD0_16 = (Ialpha>>1) + CurtPhB; //i(A)/2 + i(B) MDU_MD4_16 = 0x49E6; // 1/sqr(3) MDU_MDUCON = 0x14; while(MDU_BSY==1); Ibeta = (MDU_MR2_16<<2);</pre>
乘法	signed 16-bit multiplication	<pre>// SVPWM MDU_MD4=CD_CORDZL; MDU_MD5=CD_CORDZH; MDU_MDUCON=0x10; while(MDU_BSY==1); guc_sector=MDU_MR2; //Sector sector_angle=MDU_MR1; //Angle</pre>

2. CORDIC:

通过配置 CD_CON 寄存器，来选择 CORDIC 工作模式。

CD_CON¹⁾
CODRIC Control Register
RMAP:0, PAGE:x

RMAP:0, PAGE:x						(A1 _H)	Reset Value: 62 _H
7	6	5	4	3	2	1	0
MPS		X_USIGN	ST_MODE	ROTVEC	MODE		ST
rw		rw	rw	rw	rw		rwh

¹⁾ 参考 XC836 用户手册

在程序中使用了三种工作模式，见 Table 9。

Table 9 程序中 CORDIC 工作模式及例程

模式	计算公式	例程
circular Rotation mode	$X_{final} = K \frac{[X \cos(Z) - Y \sin(Z)]}{MPS}$ $Y_{final} = K \frac{[X \cos(Z) - Y \sin(Z)]}{MPS}$ $Z_{final} = 0$	Park 逆变换 //Inverse Park CD_STATC=0; CD_CON=0x4A; //Gain: 1.64676/2 CORDZ=rAngleNow; CORDY=VqRef; CORDX=VdRef; while (CD_BSY==1); Vbeta=CORDY; Valpha=CORDX;
circular vector mode	$X_{final} = K \frac{\sqrt{(X^2 + Y^2)}}{MPS}$ $Y_{final} = 0$ $Z_{final} = Z + \tan^{-1} \frac{Y}{X}$	SVPWM 幅值计算 CD_STATC=0; CD_CON=0x42; //Gain: 1.64676/2 CORDZ=0; CORDY=Vbeta; CORDX=Valpha;
hyperbolic Vector mode	$X_{final} = K \frac{\sqrt{(X^2 - Y^2)}}{MPS}$ $Y_{final} = 0$ $Z_{final} = Z + \tanh^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right)$	

4.1.4 定时器

Table 10 定时器运行模式说明

定时器	功能
T0	3ms 定时，定时向上位机发送通讯数据
T1	5ms 定时，通用定时器
T2	5ms 定时，过压、欠压检测，调速命令输入

4.1.5 UART

用于与上位机监控软件通讯，工作模式：19200、8-N-1。

通讯协议采用修改过的 USPY 协议，(USPY 为英飞凌推出的测试用串行通讯工具)。协议相关内容位于 USpyBench.c，在此不做详细介绍。

4.1.6 中断函数及优先级设置

Table 11 中断分配

中断类型	函数名	优先级
T0 周期中断	void T01_viTmr0(void)	低
T1 周期中断	void T01_viTmr1(void)	低
T2 周期中断	void T2_viTmr2(void)	低
UART 中断	void SHINT_viUARTIsr(void)	低
T12 周期中断	void CC6_viNode0(void)	高
T13 周期中断	void SHINT_viXINTR12Isr(void)	中
TRAP 中断	void SHINT_viXINTR11Isr(void)	最高

各中断优先级配置，可从 DAVE 配置中查看。

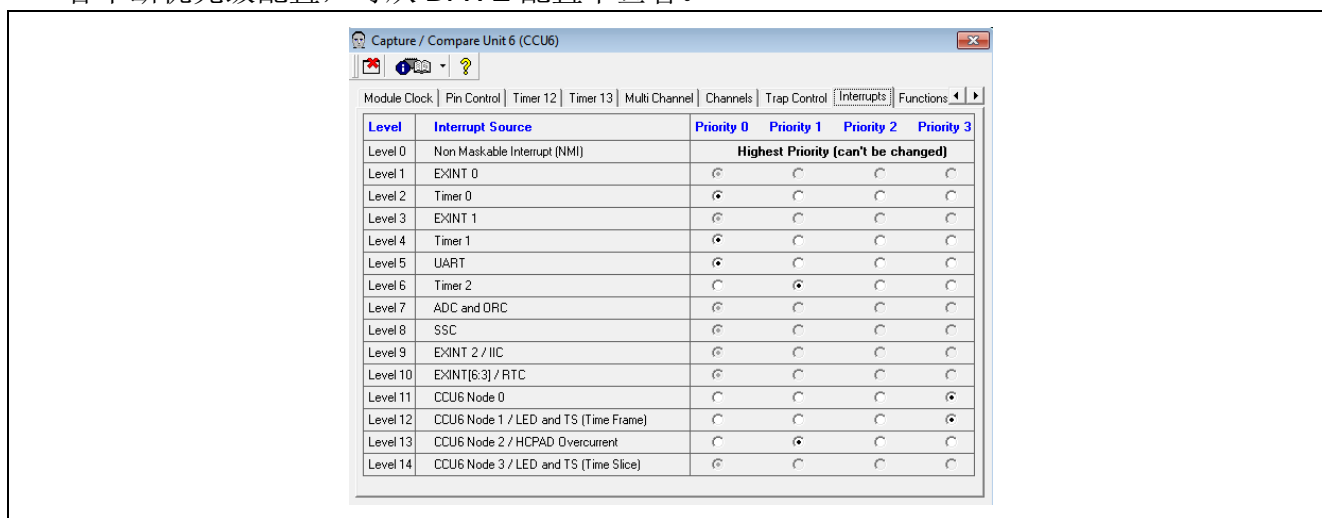


Figure 22 DAVE 中断优先级配置界面

4.2 项目文件及程序说明

参考程序中主要项目文件说明见 Table 12。

Table 12 项目文件说明

文件名	说明
main.c	主程序
Shared_int.c	T13PM, TRAP 中断程序
CCU6.c	T12PM 中断处理程序
T01.c	T0, T1 周期中断处理程序
T2.c	T2 周期中断处理程序
VPICONTROLLER.c	电流环、PLL PI 调节器
SVTAB.c	SVPWM 所需正弦表
ASM.c	速度环 PI 调节器
USpyBench.c	上位机通讯相关函数
FOC.c	FOC 控制相关函数
FOC_Lib.lib	位置估算库函数
configure.h	系统主要参数配置文件

Configure.h 中包含了一些重要的系统配置信息，如启动参数，位置估算参数等，详细参数说明见“Configure_H_Parameters.xls”

主要自定义程序说明见 Table 13。

Table 13 自定义程序说明

函数名	文件名	功能说明
int Pli(PI_structure idata * p, int pi_ref, int pi_fdb)	VPICONTROLLER.c	电流环 PI 调节器
int Plp(PI_structure idata * p, int pi_err)	VPICONTROLLER.c	PLL PI 调节器
int PI(PI_structure idata * p, int pi_ref, int pi_fdb)	ASM.c	速度环 PI 调节器
void SHINT_viUARTIsr(void) interrupt UARTINT	USpyBench.c	上位机通讯接收中断
void SP_USPYInit(void)	USpyBench.c	上位机通讯参数初始化
void ADCurtOfT(void)	FOC.c	电流采样偏置计算
void InitPI(PI_structure idata * p, kpVal, kiVal, satVal)	FOC.c	PI 调节器初始化
void SysInit()	FOC.c	控制参数初始化
void MotorStart()	FOC.c	电机启动
void MotorStop()	FOC.c	电机停止
void SpdRefFresh()	FOC.c	速度指令更新
void SVPWM(void)	FOC.c	SVPWM 计算
void PMSM_FOC()	FOC.c	FOC 计算
void PARK_FWD_Perplnit(void)	FOC.c	Park 初始化
void StartupParalnit(void)	FOC.c	启动参数初始化
void SniCAL(SNL_structure *p, int vol, int curt);	FOC_Lib.lib	位置估算
void Pll(int iPLLINC, int iPLLVFILTER);	FOC_Lib.lib	锁相环计算
void PllCompCal(int iSpdRef, int iPLLATAN);	FOC_Lib.lib	锁相环补偿

4.3 定标

4.3.1 定点小数

由于常见的微控制器为定点类控制器，而在电机控制中为了实现控制精度，需要进行小数运算，如果直接采用浮点小数形式的计算，则会消耗很大的运算资源，通常采用定点小数形式进行小数计算。

定点小数即利用整数来实现小数运算，且小数点位置固定，但存储的时候还是以整数形式存储。定点小数通常用 Q 格式来定义 Q_N ，N 代表小数点的位置。 Q_{15} 则表明小数点在第 15 位。

Q 格式数据与其表示的小数关系如下：

$$X = -b_{15-k} \cdot 2^{15-k} + b_{14-k} \cdot 2^{14-k} + \dots + b_0 + b_{-1} \cdot 2^{-1} + b_{-2} \cdot 2^{-2} + \dots + b_{-k} \cdot 2^{-k}$$

Q 格式数据表征的小数范围为： $Q_k : \{-2^{15-k} \sim +2^{15-k}\}$

以 Q_{15} 为例，其数据定义为：

$$X = -b_0 \cdot 2^0 + b_{-1} \cdot 2^{-1} + b_{-2} \cdot 2^{-2} + \dots + b_{-15} \cdot 2^{-15}, b_x = \{0, 1\}$$

所以 Q_{15} 表征小数范围为 $\{-1, +1\}$ 。举例：0.6453 对应的 Q_{15} 格式数据为：

$$0.101001111000000_2 = 53C0_{16} = 2^{-1} + 2^{-3} + 2^{-6} + 2^{-8} + 2^{-9} \text{ (approx. 0.6543)}.$$

实际应用中 Q_N 可以根据所表征的数据范围来确定 N 值。

定点小数的运算法则：

加减法： $Q_P + Q_P = Q_P$

乘除法： $Q_P * Q_Q = Q_{P+Q}$

运算中常用到乘法，对于两个Q₁₅ 格式数的乘法，直接相乘的结果为一个Q₃₀的数据，为了保证计算结果也为Q₁₅ 格式数据，需要左移一位，然后取高 16 位。

例如：Z=A*B; A,B,Z 为 Q15 格式数据，则 Z=((A*B)<<1) >> 16;

XC836M 中，利用 MDU 模块进行Q₁₅乘法运算时，其中一种模式支持运算结果左移一位，见 Table 14。

Table 14 MDU 工作模式

Operation ¹⁾	Result
Signed 16-bit x 16-bit with single left shift	32-bit

¹⁾参考 XC836 用户手册

4.3.2 标么处理

在 FOC 控制中，需要用到电压、电流、定子电阻、电感等信息，而这些信息是有量纲的，为了保证控制精度并方便计算，通常进行标么处理。标么化即将物理量通过实际物理值与其基准值的比值来表示。

$$X_{pu} = \frac{X}{X_{base}} \quad (X \text{ 实际物理量}, X_{base} \text{ 为基值}, X_{pu} \text{ 为标么值})$$

标么值通常以 Q 格式数据表示， $X_{pu(Q_k)} = \frac{X}{X_{base}} * 2^k$ ，K 为数据长度。

举例：

电流：I=0.5A, I_{base}=2A, Q₁₅ 格式标么值为：I_{pu(Q₁₅)} = $\frac{0.5}{2} * 32768 = 0x1FFF$

I=(-1)A 时，对应的标么值为：I_{pu(Q₁₅)} = $\frac{-1}{2} * 32768 = 0xC000$

方案中的标么处理如下

1. 电流基值

$$M_{Iab} = \frac{2.5}{R_a * K_a} = \frac{2.5}{3.9 * 0.22} = 2.913A$$

$$M_{Idq} = \frac{2.5}{R_a * \frac{K_a}{K_{cor}}} = \frac{2.5}{3.9 * \frac{0.22}{1.64676}} = 3.54A$$

例如，在 d、q 坐标系中，开环电流I_q为

#define OPENLOOP_NOR_IQ_INIT 0x0F00

则对应的物理值为I_q = $\frac{0xF00}{0x7FFF} * 3.52A = 0.412A$ ，通过示波器测量得到实际电流I_q的峰值为 0.413A，与期望值相同。

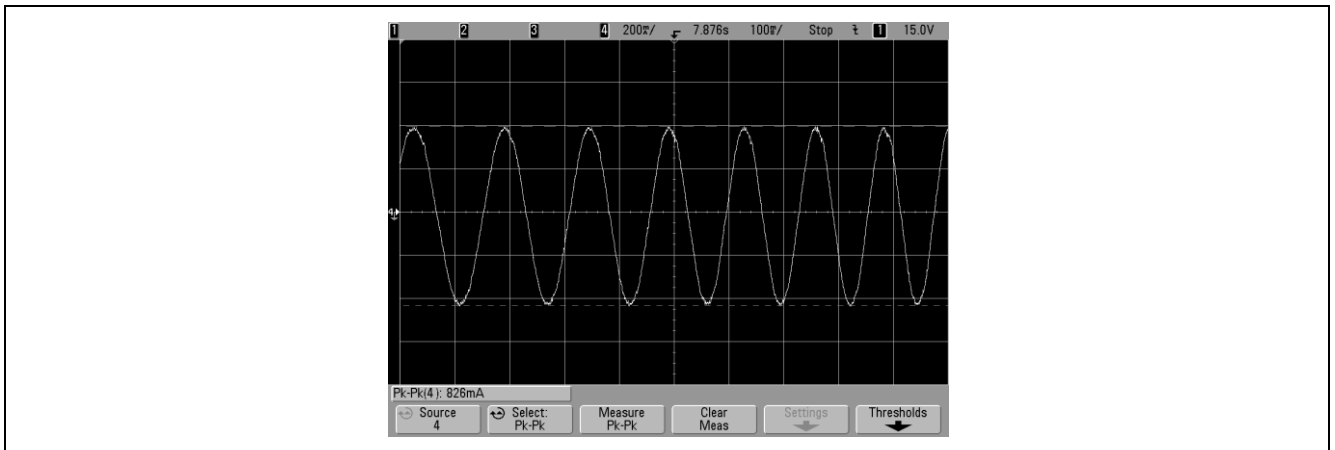


Figure 23 开环电流波形

2. 电压基值

$$M_{Uab} = \frac{VDC}{2 * K_{cor}} = \frac{300}{2 * \frac{1.64676}{2}} = 182V$$

$$M_{Udq} = \frac{VDC}{2 * K_{cor}} * K_{cor} = \frac{300}{2} = 150V$$

3. 速度基值 M_{Speed}

可通过" FOC Para v1.0.exe" 设定，默认值 1500RPM，因此程序中用到的速度指令与实际物理量之间的关系为：

$$Speed(RPM) = \frac{Speed_{RPM}}{32767} * M_{speed}$$

例如 configure.h 中

```
#define SPD_400RPM      0x2222          // 400RPM
```

对应计算过程为：

$$SPD_{400RPM_{digital}} = \frac{400RPM}{1500RPM} * 32767 = 0x2222$$

4.4 程序流程图

Main.c 程序流程图见 Figure 24。

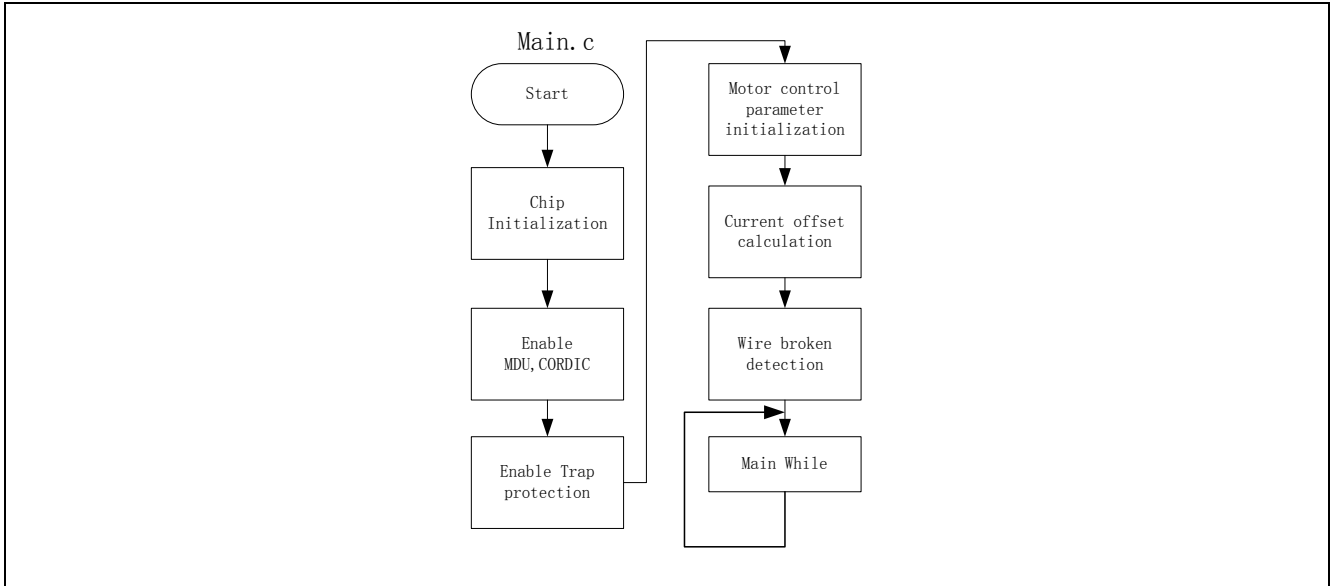


Figure 24 主程序流程图

PMSM_FOC()程序流程见 Figure 25。

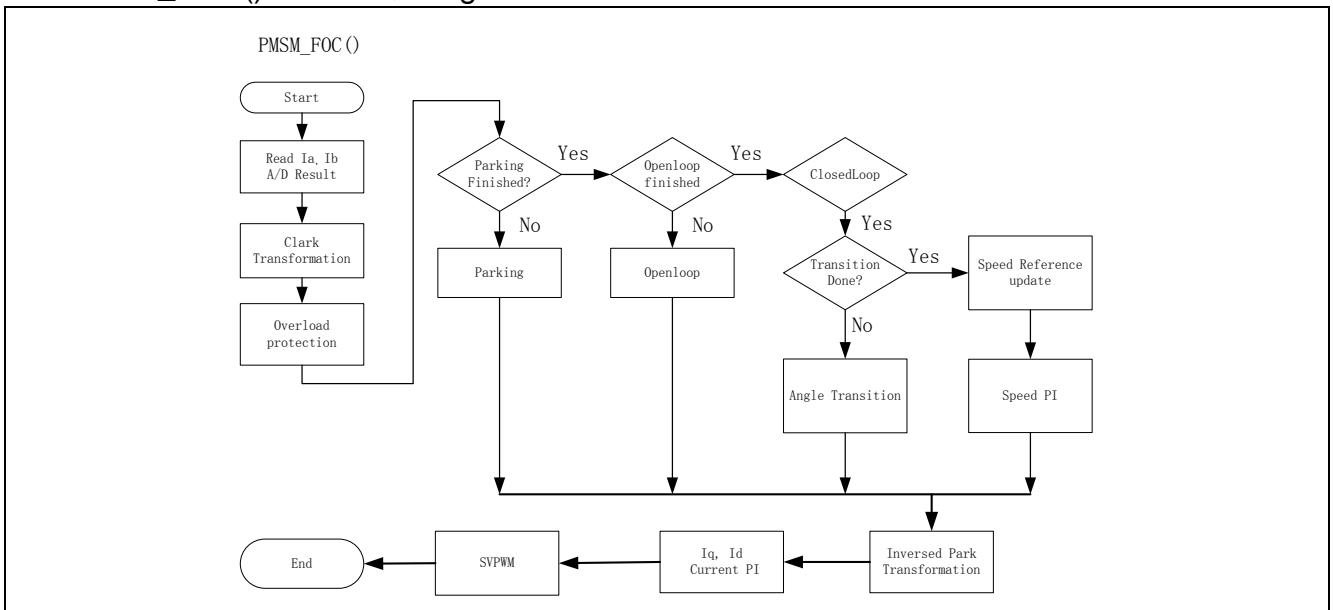


Figure 25 PMSM_FOC()流程图

5 方案测试

5.1 测试条件

实际测试用直流无刷风机：额定电压 310V，额定功率：40W，额定电流：0.17A，相电阻：27.5ohm，相电感：150mH。额定转速：800RPM。示波器型号：Agilent MSO6054A。

5.1.1 硬件连接

由于本文档介绍的硬件电路仅集成 MCU，逆变电路，驱动电路。实际使用时需要连接包含整流滤波电路，辅助电源，外部通讯（RS232）接口。连接示意图见 Figure 1。

程序下载可以通过串行口或 DAP Miniwiggler，注意下载时请断开 220V 交流输入，额外给系统供 15V 以驱动 XC836M，进行程序下载，接口板原理图可参考附件中 AdaptBoard 部分。

5.2 测试方法

通过隔离 RS232 与上位机通讯，通过上位机控制电机的启动、停止，同时可以通过上位机示波器功能观测一些关键变量（电流，速度等），电机转速 800RPM。注意：如果需要使用 DAP miniwiggler 进行程序调试，系统勿连接 310VDC。

5.3 测试结果

上位机控制界面如下，串行口设置：19200，8-N-1。

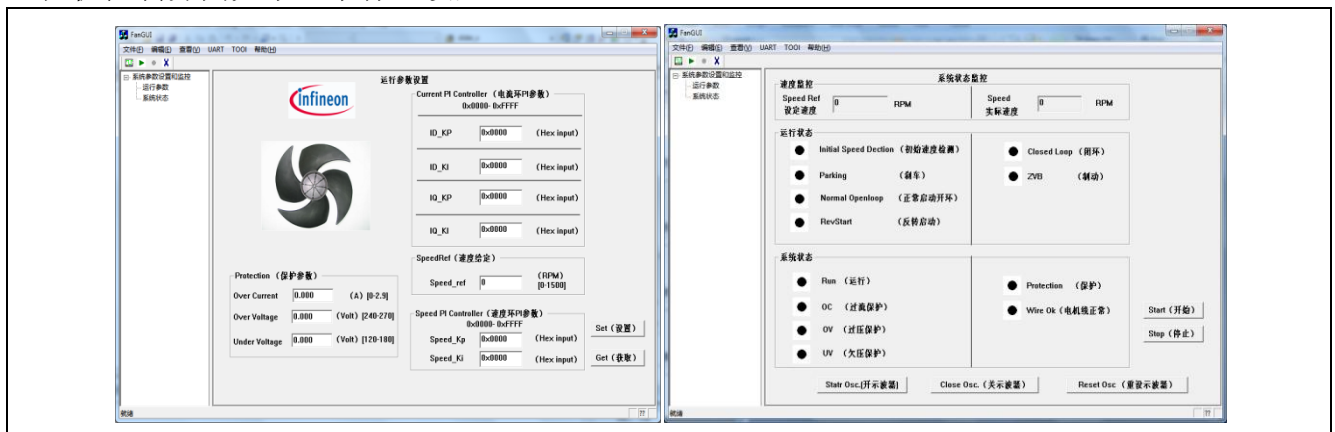


Figure 26 上位机程序界面

通过示波器功能可以观测目标板上的内部运行参数。电机运行不同阶段电流波形见 Figure 27。

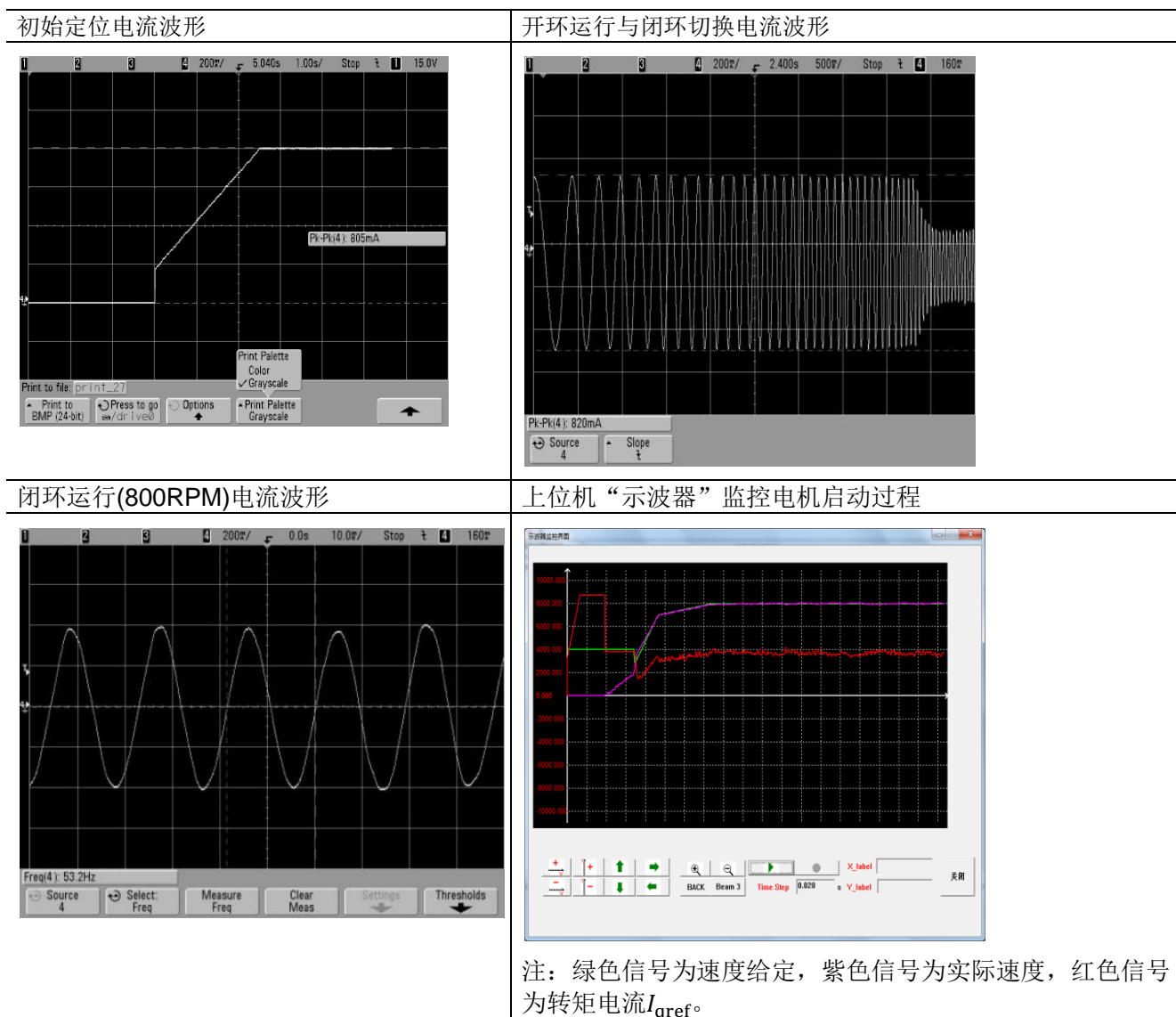


Figure 27 各阶段运行电流波形图

6 开发指南

由于不同应用中电机规格不同、负载类型不同，因此在进行项目开发时，需要根据实际应用条件调整电机参数，使用本参考方案进行项目开发的流程如 Figure 28。

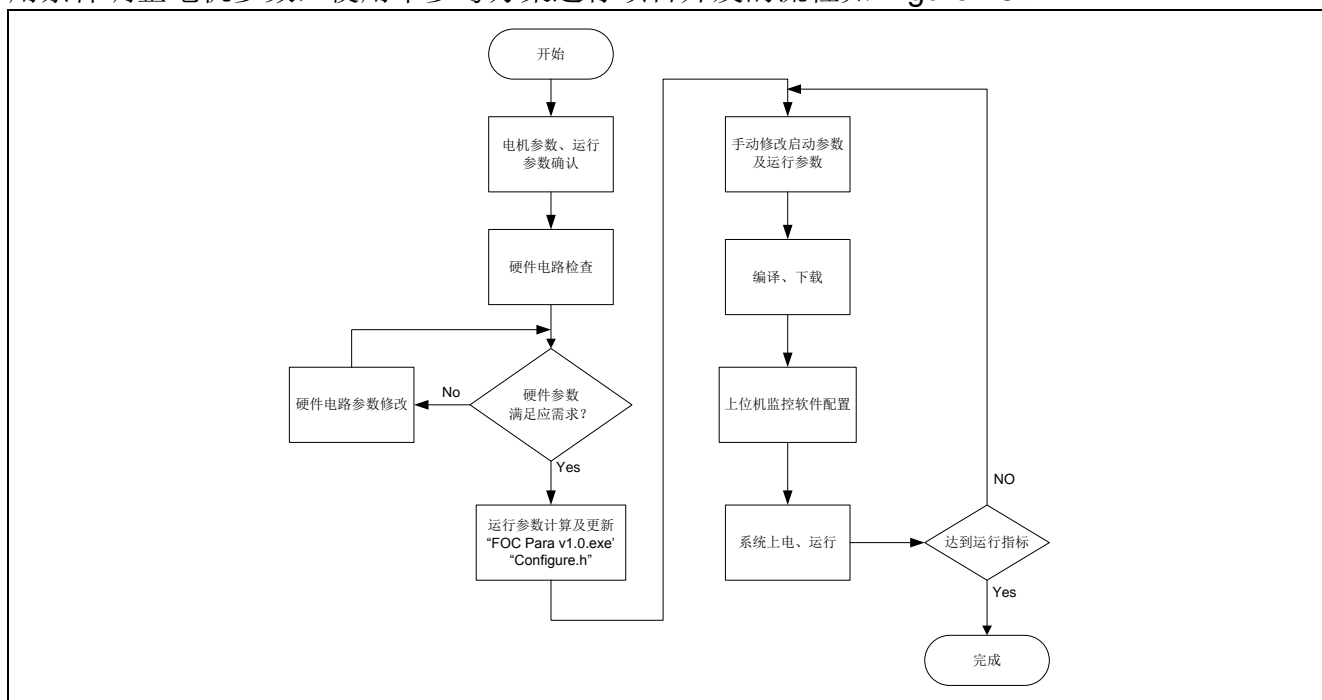


Figure 28 开发流程图

6.1 参数确认

方案中用到的参数及确认方法如下：

- 电机额定电压，电流，额定转速
可从电机铭牌得知。
- 电机极对数
可从电机铭牌得知，或利用示波器测量得知。
- 定子电阻

相电阻值，可以利用万用表电阻档测量电机两相线之间的电阻值(线电阻)，线电阻除以 2 即为相电阻。

- 定子电感 L_d 、 L_q

可利用 LCR 表测量两相之间的电感值，频率 1KHz，旋转电机转子，测量最大与最小值。 $L_q = \text{最大值}/2$ ， $L_d = \text{最小值}/2$ 。对于常见的表面磁钢电机， $L_d = L_q$ ，本例程中使用的电机 $L_d = L_q = 150\text{mH}$ 。

6.2 硬件电路参数修改

需要根据电机的额定参数修改以下参数：

- 直流母线电压值
根据电机额定电压选择 CN1 的 VDC 输入值。

● 采样电阻及电流放大倍数

参考 2.5 章节的介绍，根据电机额定电流、运算放大器最大输出电压选择相应的电流采样电阻 R37、R38，及放大电路参数：R43、R44、R45、R46、R20、R21、R22、R23。

6.3 运行参数计算及更新

首先根据电机电阻、电感、母线电压、额定转速等信息，输入“FOC Para v1.0.exe”计算相关参数。计算界面如图 29。

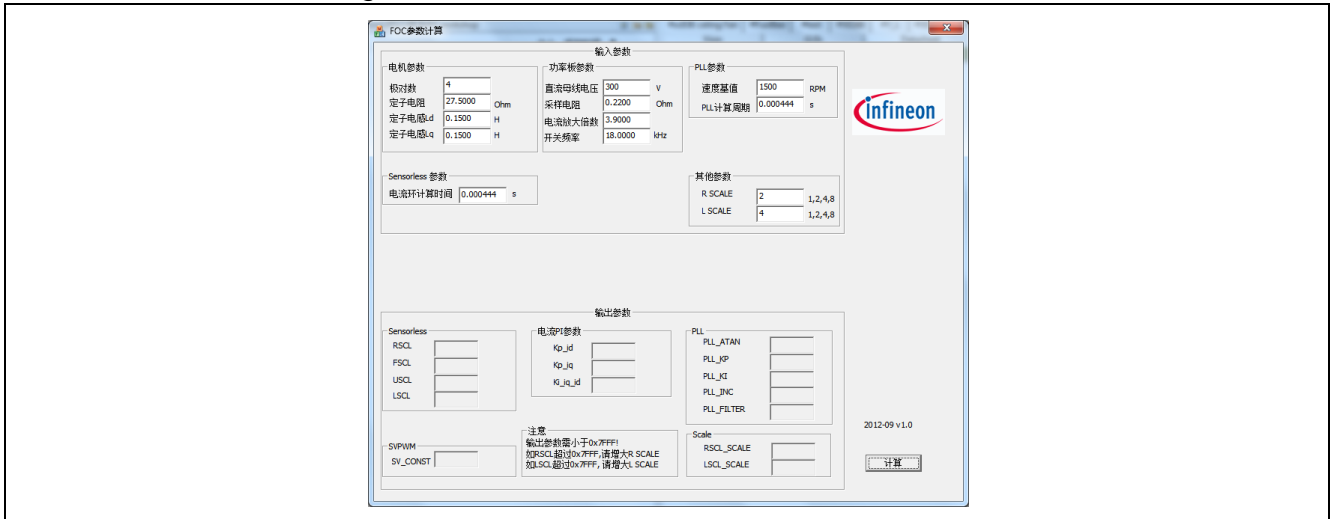


Figure 29 参数计算界面

相关输入参数，具体说明如下：

1. 电机参数

- 电机极对数
- 定子电阻
- 定子电感 Ld、Lq

2. 功率板参数

- 直流母线电压
- 采样电阻
- 电流放大倍数
- 开关频率

根据实际需要修改，注意此处使用 18KHz，注意如需修改开关频率，需要修改项目对应的 Dave 文件，重新生成 CCU6 的初始化参数。

3. Sensorless 参数

- 电流环计算时间
固定使用 0.000 444s，请勿修改。

4. PLL 参数

- 速度基值
根据电机运行的转速范围确定，需大于等于最大转速。
- PLL 计算周期
固定使用 0.000 444s，请勿修改。

5. 其他参数

- ◇ R_SCALE

输出参数 RSCL 的缩小比例，如果计算得的 RSCL 大于 0x7FFF，软件会提示错误，请适当增大此参数。

● L_SCALE

输出参数 LSCL 的缩小比例，如果计算得的 RSCL 大于 0x7FFF，软件会提示错误，请适当增大此参数。

输入相关参数后，点击“计算”，得到计算结果，如 Figure 30 所示。

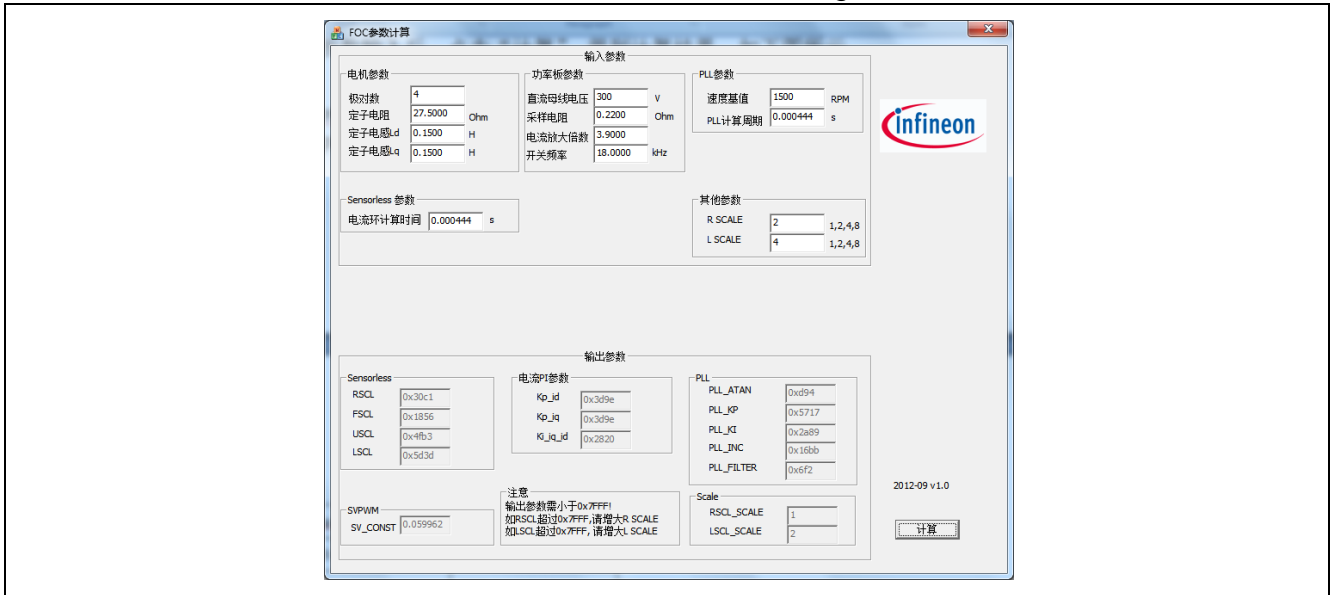


Figure 30 计算结果界面

“FOC Para v1.0.exe” 输出参数与 Configure.h 中对应参数关系见 Table 15。

Table 15 参数关系表

configure.h	FOC Para v1.0.exe
SNL_R	RSCL
SNL_F	FSCL
SNL_U	USCL
SNL_L	LSCL
SNL_R_SCALE	RSCL_SCALE
SNL_L_SCALE	LSCL_SCALE
PIpKP	PLL_Kp
PIpKI	PLL_Ki
PLLINC	PLL_INC
PLLVFITLER	PLL_Filter
PLLATAN	PLL_ATAN
SVConst	SV_CONST
PIiKPD	KP_ID
PIiKID	KI_IQ_ID
PIiKPQ	KP_IQ
PIiKIQ	KI_IQ_ID

6.4 启动参数调整

由于电机参数、负载特性的不同，需要手动修改 `configure.h` 中的启动相关参数，以使系统可靠启动，顺利切入闭环。修改的参数包括：

6.4.1 初始定位参数

根据 Figure 15 所示，初始定位阶段需要调整的参数与“`configure.h`”中参数关系如 Table 16 所示。

Table 16 初始定位参数对应表

初始定位参数	“ <code>configure.h</code> ”中对应参数	对应关系
Iq_Init	PARK_IQ_INIT	$I_{q_Init(A)} = \frac{PARK_IQ_INIT}{32767} * M_{Idq}$
Iq_Target	PARK_IQ_TGT	$I_{q_Target(A)} = \frac{PARK_IQ_TGT}{32767} * M_{Idq}$
t1	PARK_IQ_INC	$t1 = \frac{PARK_IQ_TGT - PARK_IQ_INIT}{PARK_IQ_INC} * 0.444ms$
t2	PARK_NOR_DURATION	$t2 = PARK_NOR_DURATION * 0.444ms$

6.4.2 开环运行参数

根据 Figure 17 所示，开环运行阶段，对应的参数有电流指令及速度指令需要调整的参数与“`configure.h`”中参数关系如 Table 17 所示。

Table 17 开环参数对应表

开环运行参数	“ <code>configure.h</code> ”中对应参数	对应关系
Init_speed	OPENLOOP_NOR_ANGINC_INIT	$Init_speed(Hz) = \frac{1}{\frac{65536}{OPENLOOP_NOR_ANGINC_INIT} * 0.000444}$
Target_speed	OPENLOOP_NOR_ANGINC_TGT	$Target_speed(Hz) = \frac{1}{\frac{65536}{OPENLOOP_NOR_ANGINC_TGT} * 0.000444}$
加速度参数 1	OPENLOOP_NOR_ANGINC_STEP	$A(Hz/T) = \frac{OPENLOOP_NOR_ANGINC_STEP}{65536 * 0.000444 * OPENLOOP_NOR_DURATION}$
加速度参数 2	OPENLOOP_NOR_DURATION	
开环电流 Iq	OPENLOOP_NOR_IQ_INIT	$I_{q_Openloop(A)} = \frac{OPENLOOP_NOR_IQ_INIT}{32767} * M_{Idq}$

6.4.3 开环闭环切换参数

切入闭环阶段，需要调整的参数与“configure.h”中参数关系如 Table 18 所示。

Table 18 切入闭环阶段参数对应表

运行参数	“configure.h”中对应参数	对应关系
闭环 Iq 初始值	CLOSEDLOOP_NOR_SPD_LOOP_IQ_INIT	$I_{q_{closedLoop_init}}(A) = \frac{OPENLOOP_NOCLOSEDLOOP_NOR_SPD_LOOP_IQ_INITR_IQ_INIT}{32767} * M_{Idq}$
角度差切换速度	ANGLE_TRANSITION_STEP	$\Delta angle = \frac{ANGLE_TRANSITION_STEP}{65536} * 2\pi$
速度阈值	SPDFOC_OPEN_TO_CLOSED	$speed = \frac{SPDFOC_OPEN_TO_CLOSED}{32767} * M_{speed}$

6.5 闭环运行参数调整

Table 19 闭环运行参数对应表

闭环运行参数	“configure.h”中对应参数	对应关系
闭环加速度 1	SPD_REF_INC_1	$A(RPM/T) = \frac{SPD_REF_INC_1}{32767} * \frac{M_{Speed}}{8 * 0.000444}$
闭环加速度 2	SPD_REF_INC_2	$A(RPM/T) = \frac{SPD_REF_INC_2}{32767} * \frac{M_{Speed}}{8 * 0.000444}$
默认闭环运行速度	STUPCLDSPD_DEFAULT	$speed_default = \frac{STUPCLDSPD_DEFAULT}{32767} * M_{speed}$

6.6 保护参数调整

根据电压、电流采样电路参数及系统保护需求，利用“Protection.xls”计算过流、过压、欠压保护值，并修改“configure.h”中相关参数

Table 20 保护相关参数对应表

“Protection.xls”参数	“configure.h”参数
OV_Voltage_HEX	HIGHVoltage
UV_Voltage_HEX	LOWVoltage
Over Current Hex	HIGHCurt

6.7 程序编译及下载


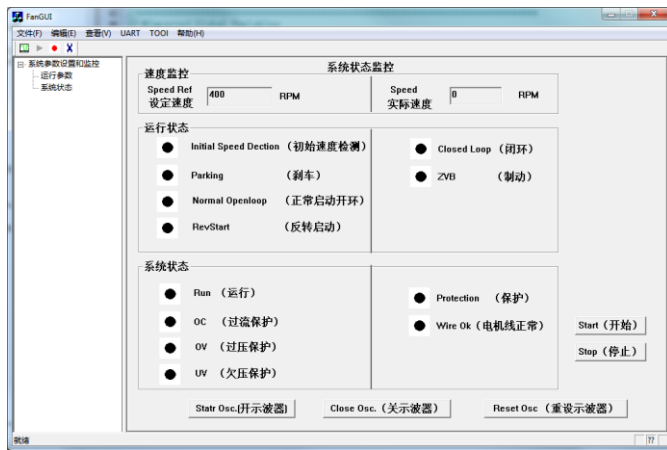
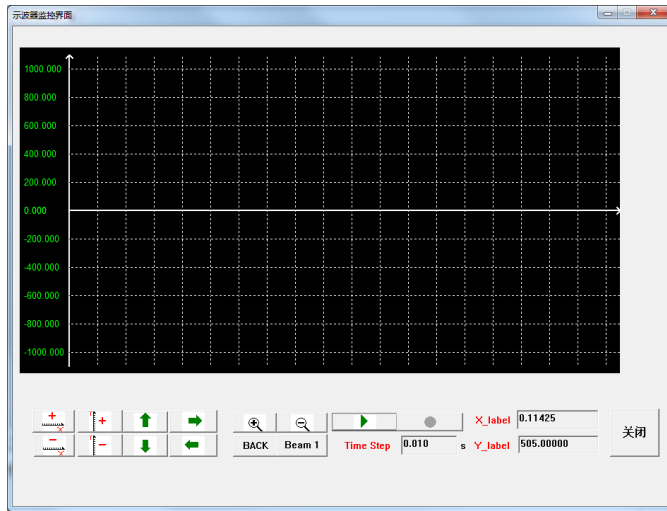
利用 Keil 进行编译，编译成功后，可以在 Keil 环境中利用 DAP-Miniwiggler 进行下载，亦可利用 Fload 通过串行口下载程序。XC836 下载时需要配置 BMI 参数。关于 BMI，在此不详细介绍，详见 XC836 用户手册及相关应用手册（AP0810810）。

特别注意：下载时，系统请勿连接 310V VDC，请使用外部 15 V 供电

6.8 运行

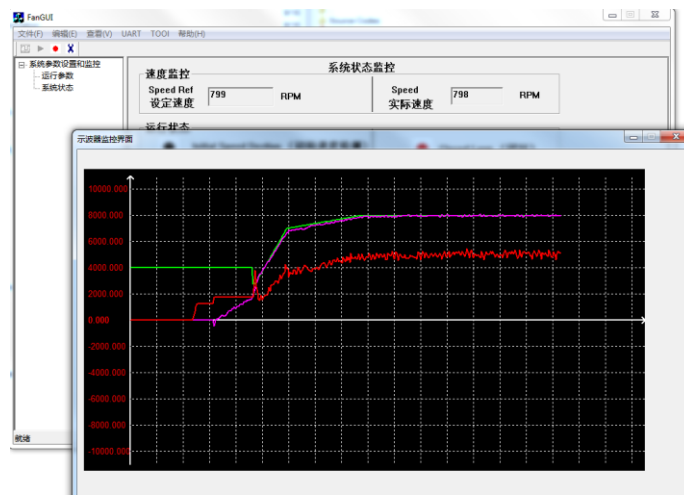
按照 Figure 1 进行系统连接，请注意需要使用 RS232 隔离器进行通讯隔离。运行 “Fan GUI v2.exe”，操作流程见 Table 21。

Table 21 上位机操作示意图

Steps	操作界面
<p>Step1:</p> <p>打开运行界面，点击串口配置。如打开程序出现错误，请参考附件 “OCX Registration” 安装相关控件</p>	
<p>step2:</p> <p>电机连接，成功连接后界面</p>	
<p>step3:</p> <p>打开“示波器功能”</p> <p>点击相关按钮,调整时间轴及信号幅值</p>	

Step4:

返回“系统状态”界面，点击“start”，电机开始运行，并通过“示波器功能”观察现相关参数



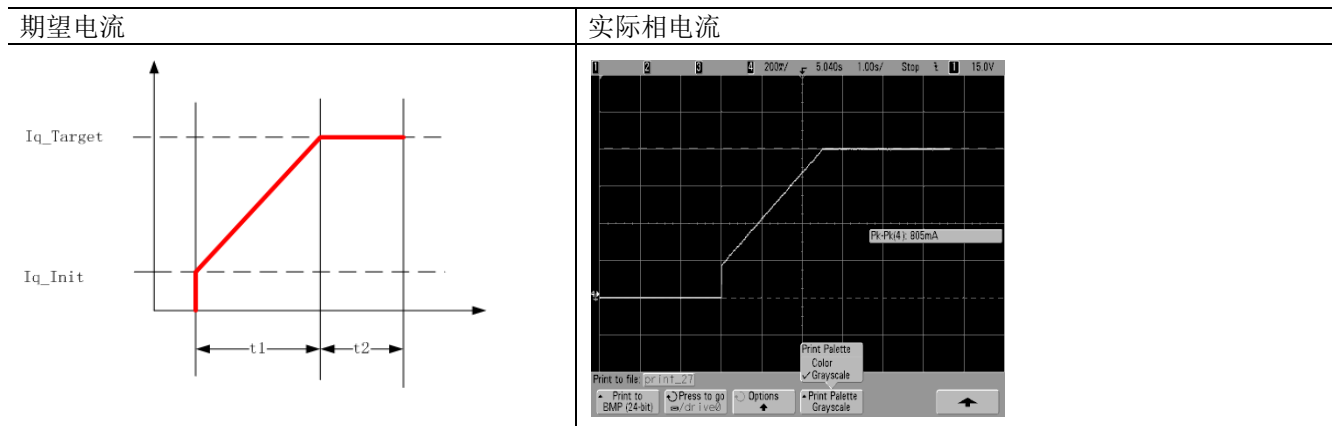
6.9 参数调试

根据不同的电机特性，需要相关启动、运行参数以保证可靠切入闭环。

● 电流闭环参数调整

首先要保证电流闭环参数正确，如果系统硬件没有问题，且程序中使用了” FOC Para v1.0.exe”计算的得到的参数，应该可以很好的电流闭环。可通过检查初始定位阶段的相电流来确认电流是否闭环。如果电流闭环成功，则初始定位阶段相电流会按照设计的变化曲线变化，参考 Table 22，否则需修改硬件参数或查看电流环参数是否正确，排除原因。

Table 22 理想电流闭环示意图



● 开环参数调整

调整开环参数，使电机能顺利启动，进入开环运行，如果负载比较大，则适当增加开环电流 OPENLOOP_NOR_IQ_INIT，并减小加速度。

● 闭环切入参数调整

选择适当的切入闭环速度 SPDFOC_OPEN_TO_CLOSED，及切入后的电流 I_q 初值 CLOSEDLOOP_NOR_SPD_LOOP_IQ_INIT。

如果切入闭环失败，可修改切入闭环速度阈值 SPDFOC_OPEN_TO_CLOSED 及切换角度步长 ANGLE_TRANSITION_STEP。使电机能达到足够的转速以切入闭环。

● 闭环参数调整

切入闭环后，根据应用需求修改速度环参数 K_p , K_i 及速度指令。

7 附件

7.1 MCU 部分原理图

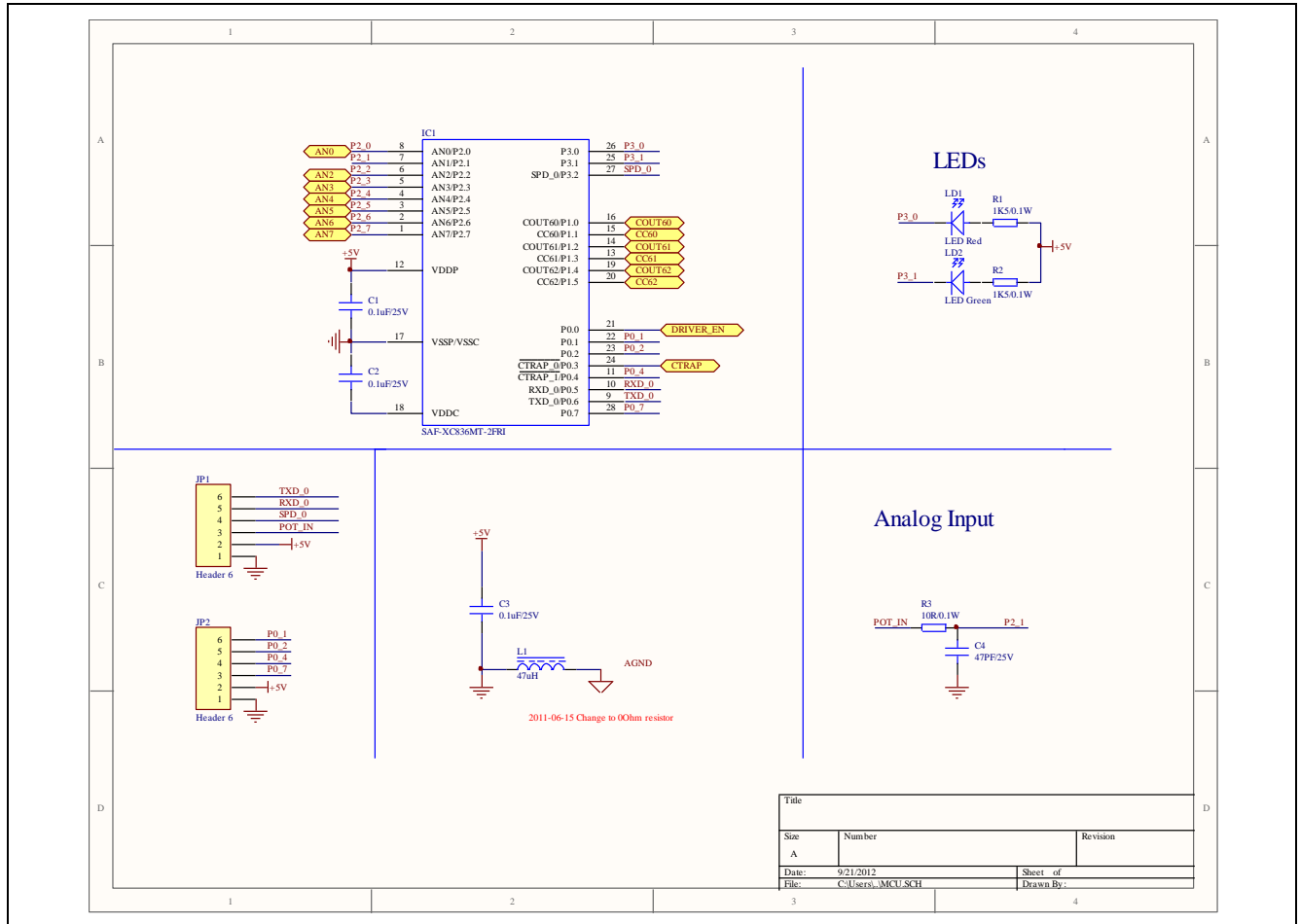


Figure 31 MCU 部分原理图

7.2 逆变电路原理图

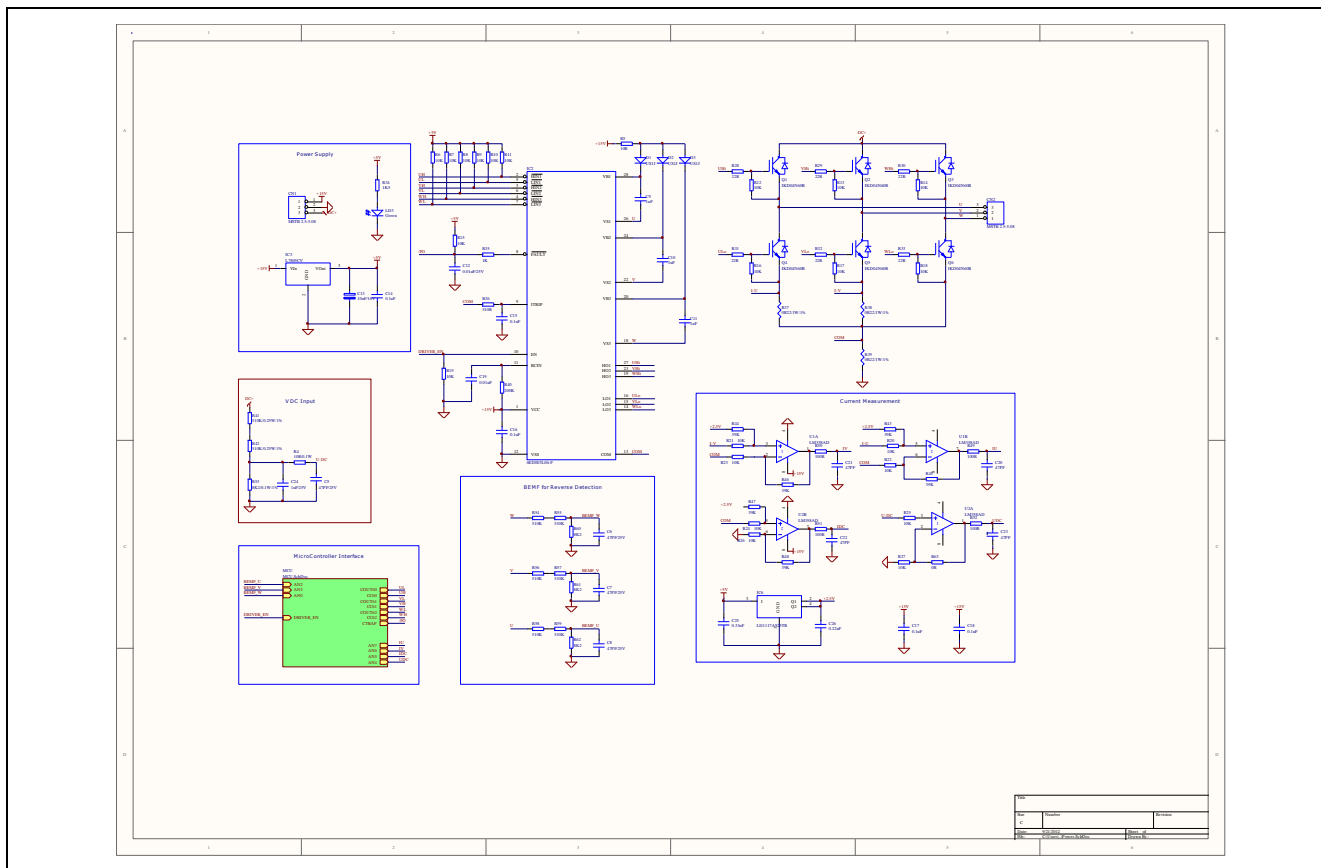


Figure 32 逆变电路原理图

7.3 XC836Minikit 原理图

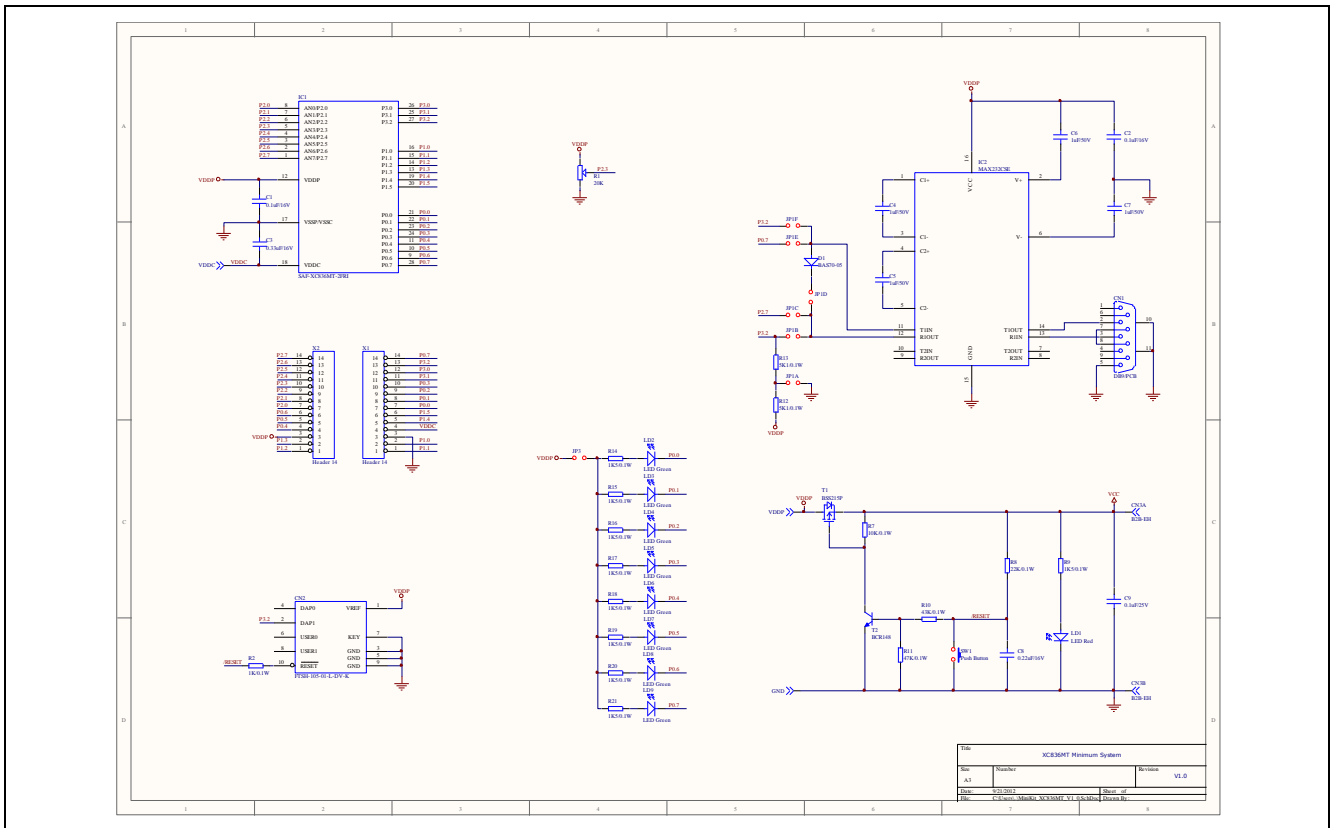


Figure 33 XC836Minikit 原理图

7.4 参考代码

本设计手册对应的参考代码请见与本文档对应的样例程序。

www.infineon.com