

基于 MM32SPIN0280 的 PMSM 单电阻采样矢量控制方案

简介

该文档介绍了基于灵动微电子 MM32SPIN0280 的单电阻采样矢量控制方案，包括 MM32SPIN0280 芯片的资源、硬件的设计、软件的架构以及相关测试波形。永磁同步电机矢量控制的基本原理可以参考 AN6303。

表 1 适用系列型号

系列	型号
MM32SPIN0280	MM32SPIN0280D7P

目录

1	概述	4
1.1	项目背景.....	4
1.2	芯片资源介绍.....	4
1.3	缩略语和符号.....	5
2	硬件架构.....	7
3	软件架构.....	8
3.1	单电阻采样原理介绍.....	9
3.1.1	三相电流重构.....	9
3.1.2	单电阻采样 PWM 移相.....	11
3.2	数据标幺化.....	12
3.2.1	电压标幺化	12
3.2.2	电流标幺化	13
3.2.3	角度及速度标幺化.....	14
3.3	系统时序设计.....	14
3.4	工程代码架构.....	15
3.5	状态机介绍	17
4	核心参数配置.....	19
4.1	单电阻采样参数	19
4.2	系统参数配置.....	19
4.3	硬件参数配置.....	19
4.4	状态机参数配置	20
4.5	电机参数配置.....	20
5	修改记录	21

1 概述

1.1 项目背景

永磁同步电机（PMSM）因为具有结构简单、功率密度大、效率高、功率因数高的特点，被广泛的应用在各种工业控制领域。矢量控制全面提升了电机驱动性能，比如矢量控制实现了转矩和磁链的解耦控制、全转矩控制、效率更高且提高了系统的动态性能。

MM32SPIN0280 是灵动微电机针对电机控制推出的专用芯片，本设计基于 SPIN0280 设计了单电阻采样矢量控制方案，使用了闭环的滑模观测器估算方案，提升了系统稳定性和鲁棒性。具体设计规格如下表所示：

表 1-1 单电阻无传感器矢量控制方案设计规格

控制方式	无位置传感器磁场导向控制（FOC）
PWM 调制方式	SVPWM
角度估算	滑模观测器
PWM 频率	16KHz
快速环(电流环)控制频率	16KHz
慢速环(速度环)控制频率	1KHz
电机转速	400~4000RPM(2 对极)
起动方式	开环起动
保护功能	过压，欠压，过流，堵转
开发软件	Keil C
代码大小	10.25KBytes
代码运行时间	快速环 28us

1.2 芯片资源介绍

MM32SPIN0280 是灵动微电机新推出的针对电机控制市场的专用 MCU，该系列 MCU 搭载了 Arm®Cortex®-M0 内核，最高工作频率可达 96MHz，内置高速存储器，并集成了 I/O 端口和多种外设。MM32SPIN0280 系列 MCU 适用于各类电机应用场景，其典型应用包括风机、水泵、电动自行车、服务器风机、吊扇、电动工具、工业变频、伺服舵机、空调风机等。

芯片特色及资源图如下所示：

- MM32SPIN0280 主要特点：
- Arm® Cortex®-M0 内核，主频高达 96MHz
 - 高达 128KB Flash，8KB SRAM
 - 包含 2 个 12 位的 ADC，采样速度高达 3Msps
 - 5 个通用定时器、2 个针对电机控制的 PWM 高级定时器
 - 1 个 I2C 接口、2 个 SPI 接口、3 个 UART 接口
 - 针对电机应用内置 4 个运放、5 个比较器
 - 工作电压为 2.0V - 5.5V
 - 工作温度范围（环境温度）-40℃ - 105℃
 - 多种省电工作模式支持低功耗应用的需求
 - 提供 LQFP32、LQFP44、LQFP48、QFN48、LQFP64 封装

图 1-1 MM32SPIN0280 资源框图



1.3 缩略语和符号

表 1-2 缩略语

术语	含义
AC	交流电
ADC	模数转换器

API	应用程序接口
MM32	灵动微电子
BEMF	反电动势
BLDC	无刷直流电机
PMSM	永磁同步电机
DC	直流电
GPIO	通用目的输入/输出
OPA	运算放大器
ISR	中断服务程序
CMP	比较器
PWM	脉冲宽度调制
SVPWM	空间矢量脉宽调制
DCBus	直流母线
SMO	滑模观测器
PLL	锁相环

表 1-3 符号索引列表

符号	定义
d, q	正交旋转坐标系
α, β	正交静止坐标系
$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$	定子电压在静止正交坐标系下的分量
u_{sd}, u_{sq}	定子电压在旋转正交坐标系下的分量
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	a、b、c 相定子电流
i_{sd}, i_{sq}	定子电流在旋转正交坐标系下的分量
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	定子电流在静止正交坐标系下的分量
R_s	定子相电阻
L_s	定子相电感
p_p	电机极对数
T_e	电磁转矩
ω, ω_s	转子电气角速度/同步角速度

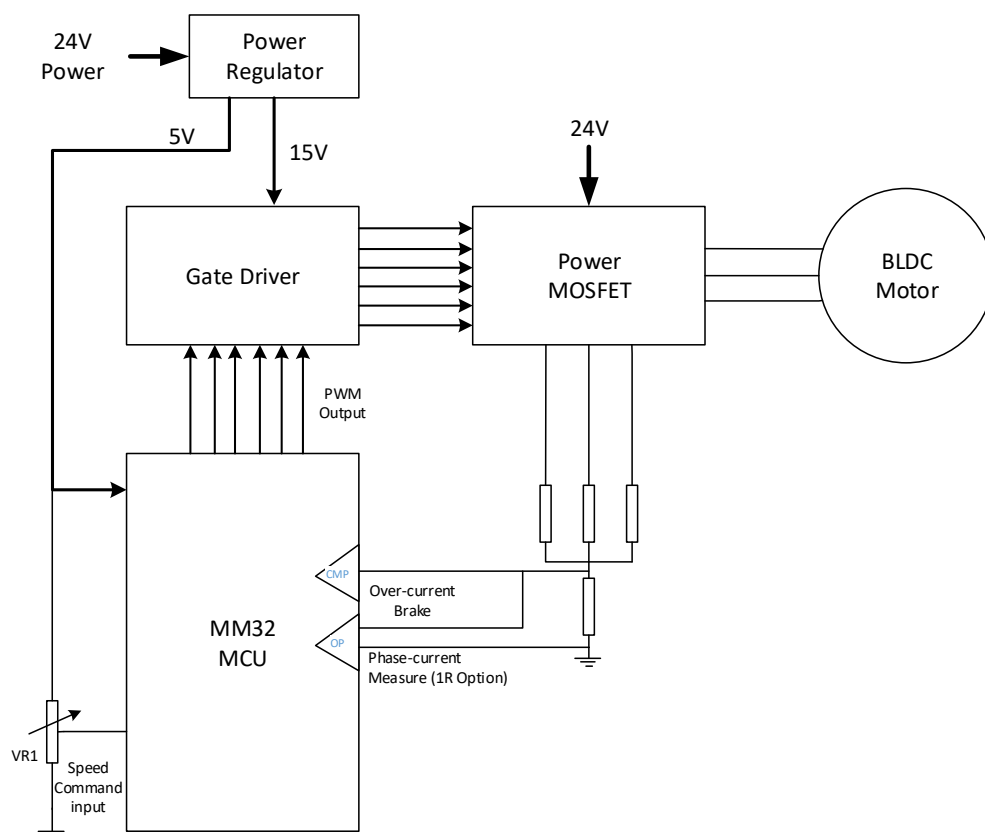
2 硬件架构

硬件系统由外部 24V 电源供电，经过电源降压转换后提供 15V、5V 电压，并将此二个电源电压输出分别给予 Gate driver IC，及 MM32 SPIN 系列微处理器。功率开关管则直接使用 24V 电源。

此方案采用 0~5V 的电压输入作为速度命令的来源，以控制电机转速。用户转动可变电阻旋钮可以改变此输入电压值，当输入电压值超过起动阈值（可在程序中配置）时电机将会启动，当电压值低于阈值时电机将会关闭。

电机启动后，将会通过 MCU 内置的运算放大器量采样得知母线电流，然后根据相电流重构算法重构出三相的相电流 I_a 、 I_b 、 I_c ，并将此信息经过坐标轴的转换后控制电机的力矩电流大小及相位。经过 FOC 控制计算环节后由 MCU 的 PWM 外设 TIM1 输出三相占空比控制逆变器的开关元器件，母线电流采样电阻连接到 MCU 内部的比较器，比较器负端通过内部的 DAC 设置比较阈值，比较器的输出从 MCU 内部连接到 PWM 外设做过流保护，硬件框图如图 2-1 所示。

图 2-1. 硬件框图



系统实物图如图 2-2 所示，其中主要分为四个接口：

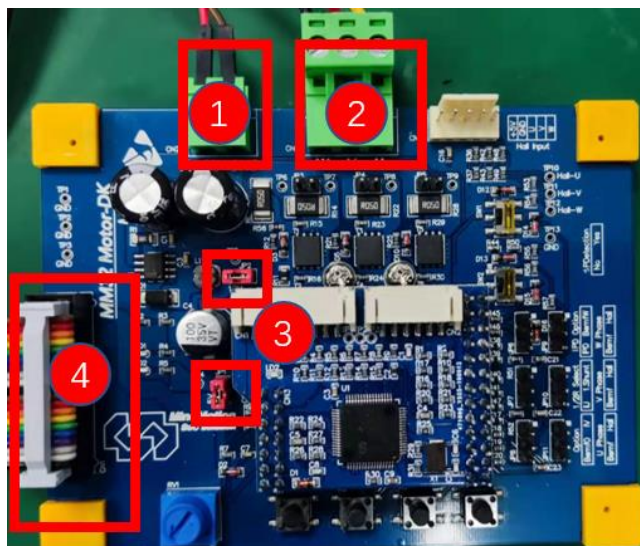
- 1) 电源输入接口（接入24V，注意正负）

- 2) 三相电机接口（相序只会影响旋转方向）
- 3) Jumper 设定 JP1（5V电源）, JP2（12V电源）

Note: SPIN0280采用内部运放采样母线电流，因此不需要设置Motor DK板上对应的电流跳帽

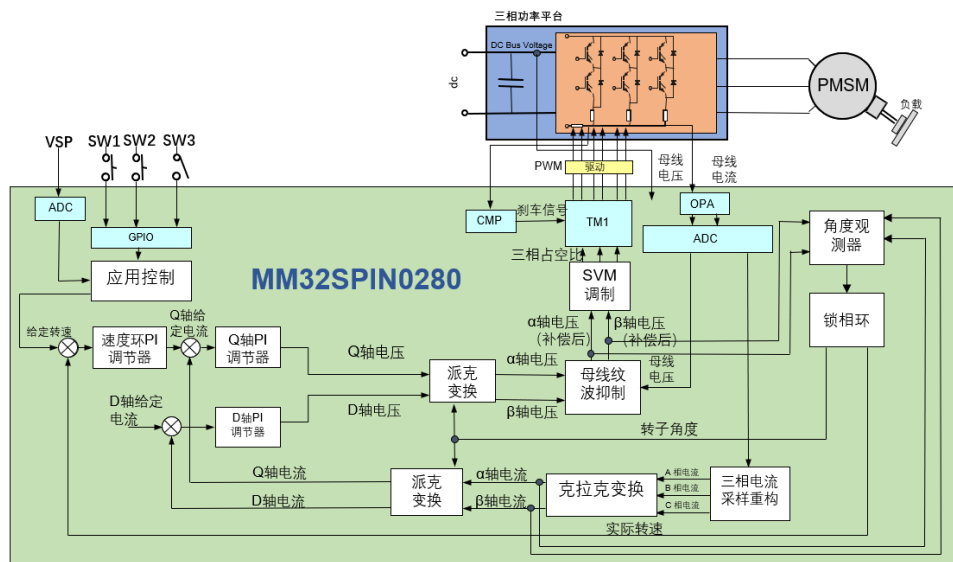
- 4) 仿真器接口

图 2-2. 硬件实物图



根据矢量控制原理及系统硬件架构，设计的系统软硬件框图如图 2-3 所示，其中 MM32SPIN0280 作为控制芯片，与外部硬件的接口为 GPIO、PWM、ADC、CMP、OPA 等外设。

图 2-3. 系统软硬件框图



3 软件架构

软件架构对嵌入式工程至关重要，本应用的软件开发环境使用集成开发工具 **Keil**，整个软件是用 **C** 语言实现的，并调用了灵动微电子的嵌入式软件库。该软件库包括各种数学运算库、电机控制算法库、观测器库等。本章节首先介绍下单电阻采样的算法原理，从数据标幺化、工程代码架构、系统时序、状态机等方面介绍工程的软件架构。

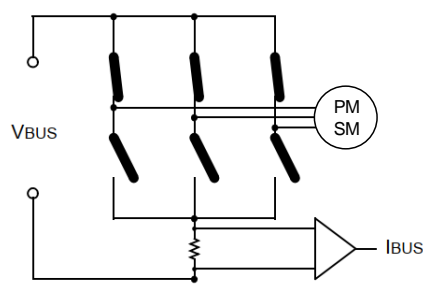
3.1 单电阻采样原理介绍

矢量控制需要实时采样电机的相电流，目前电阻采样在矢量控制中比较常见，电阻采样方法又分三电阻采样、双电阻采样及单电阻采样，其中单电阻采样方式通过采样母线电流重构出三相相电流，成本最低，因此在一些对噪音要求不是很高的场合应用比较广泛。

3.1.1 三相电流重构

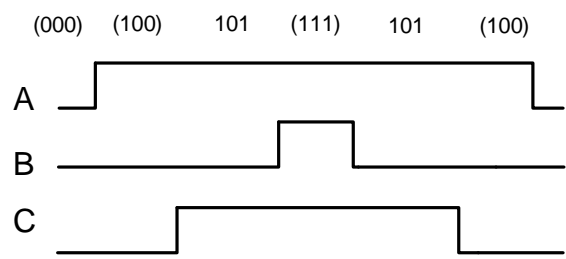
单电阻采样的硬件示意图如图 3-1 所示：

图 3-1. 系统软硬件框图



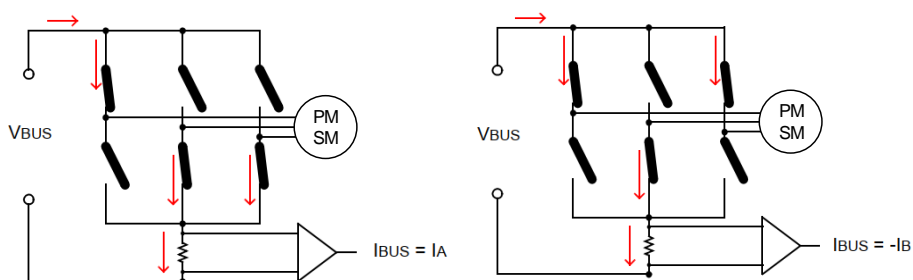
以 SVM 扇区 6 为例，此时三相桥臂上管的 PWM 驱动波形如图 3-2 所示

图 3-2. 6 扇区 SVM 上管 PWM 驱动波形



在此扇区下，存在两个有效矢量 **100** 和 **101**，在这两个矢量作用于三相电机时刻，母线电流和相电流的对应关系如下图所示：

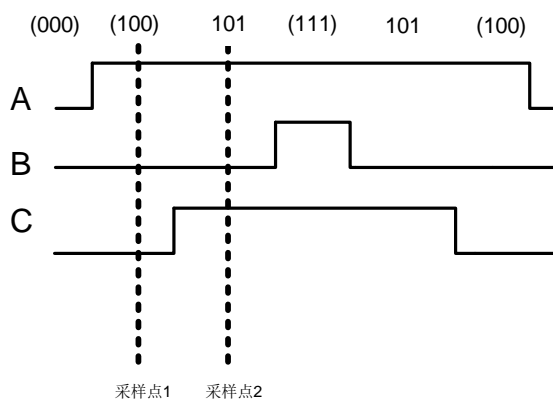
图 3-3. 6 扇区 SVM 上管 PWM 驱动波形



由图可知 100 矢量作用于电机时, $I_{dc1} = I_A$, 101 矢量作用于电机时, $I_{dc2} = -I_B$ 。

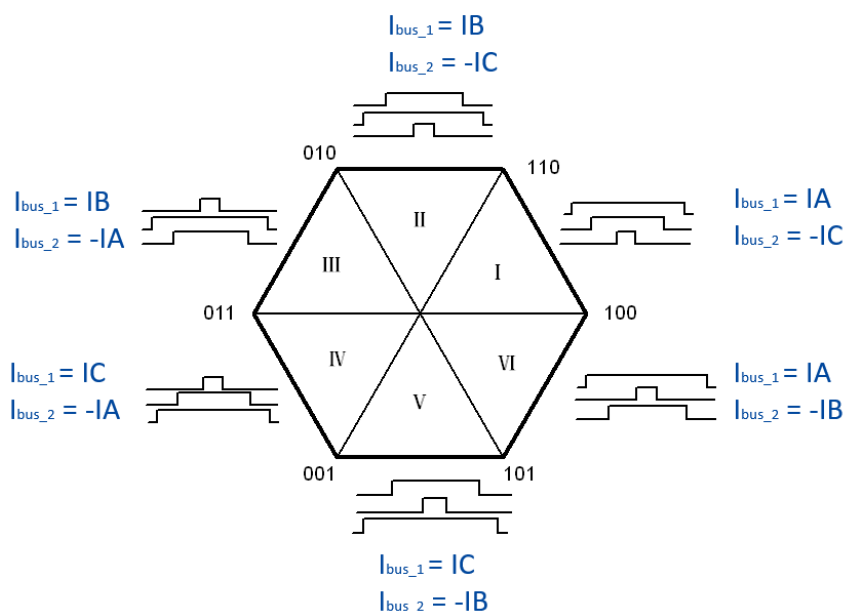
(注: 定义流入电机绕组的电流方向为正方向) 因此可以选择在有效矢量的中心点处采样, 如图 3-4 所示:

图 3-4. 单电阻采样时间点



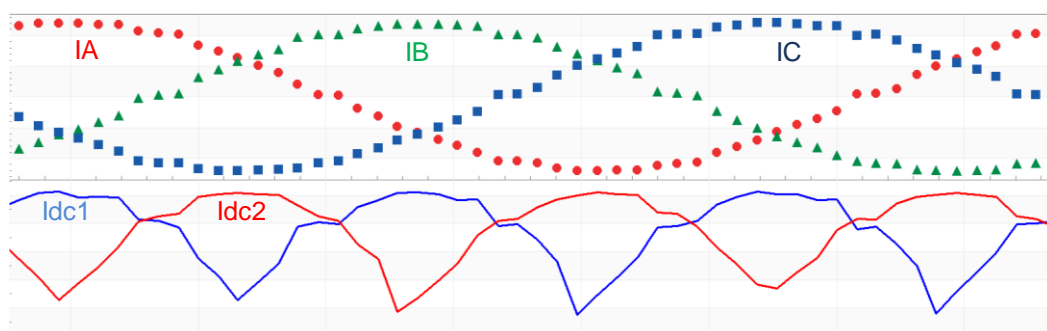
结合 SVPWM 各个扇区的波形, 可以推导得到各个扇区内 I_{dc1} 、 I_{dc2} , 如图 3-5 所示:

图 3-5. 单电阻采样与 SVPWM 扇区对应关系



最终重构出的三相电流波形和两个采样点时刻采样的母线电流波形对应关系如图 3-6 所示

图 3-6. 三相电流重构波形



3.1.2 单电阻采样 PWM 移相

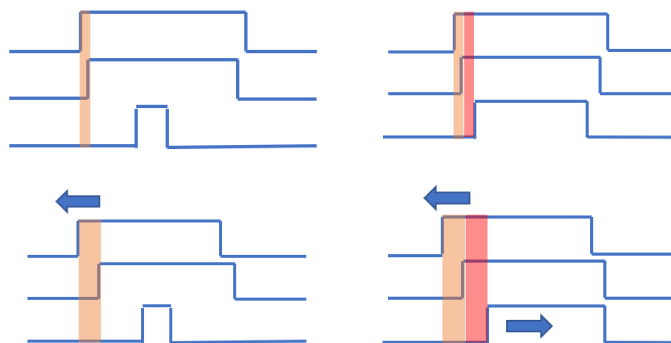
根据单电阻采样的原理可知，母线电流的采样点在两个有效矢量的中点，那么必然会存在一下两种情况，导致有效矢量的时间过短，单电阻采样无法在规定的时间内获取有效的母线电流来重构三相相电流。如图 3-7 所示：

图 3-7. 单电阻采样盲点



在这种情况下，需要采用额外的策略来重构相电流，在本应用中采用 PWM 移相的方法来“凑足”足够的时间实现单电阻采样，如图 3-8 所示

图 3-8. 单电阻采样 PWM 移相



3.2 数据标幺化

描述一个变量的大小分为两种方法，一种是用仪器仪表测量出的测量值，也称为有名值，采用国际单位制（SI），如电压单位为（V），电流（A）等。一种为相对值，也称为标幺值，计算方式为有名值/基准值。采用标幺单位制（p.u）

采用标幺值可以对变量的大小有更直观的判断，且比较契合定点 MCU 的运算，可以防止数据溢出等风险。

对于一个 N 比特位的有符号数字，其标幺化的定点小数表示形式为 $1.[N-1]$ 。其中最高一位是符号位，剩余 N-1 位是小数位。

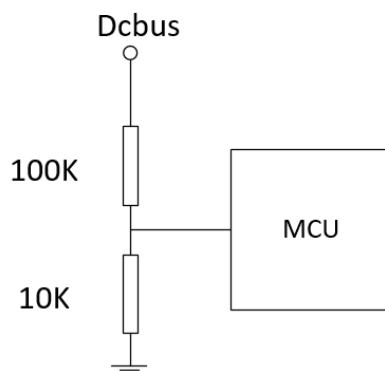
对于字型和长字型的变量，其可以表示的最小负数为-1，内部表示格式分别为 0x8000 和 0x80000000。字型变量可以表示的最大正值是 $2^{15}-1$ ，对应的内部格式为 0x7FFF；长字型变量可以表示的最大正值是 $2^{31}-1$ ，对应的内部格式为 0x7FFFFFFF。

3.2.1 电压标幺化

SAR ADC 的工作机制意味着在定点 MCU 中比较适合来定义标幺化的基准值，比如程序中的电压标幺的基准值一般可以用 MCU 能采样得到的最大母线电压来定义。

母线电压的电阻分压采集电路如图 3-9 所示：

图 3-9. 母线电压采样



假设如本案例中一致，MCU 的 ADC 参考电压为 5V，可知当 ADC 管脚上的电压为 5V 时对应的最大母线电压为 55V。因此电压的基准值为 55V。

假设母线供电为 24V，根据以下步骤可以得到最终程序中电压标么化的值：

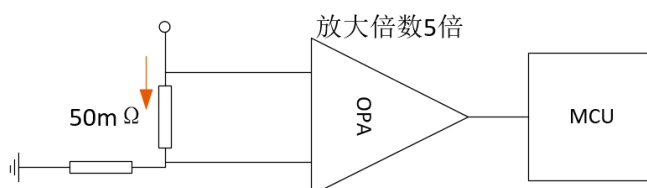
3-10. 电压标么化

实际母线电压	ADC管脚上的电压	标么显示的电压	MCU程序中的值
—— 55v	—— 5v	—— 1	—— 32767
- - - - 24v	- - - - 2.18v	- - - - 0.4364	- - - - 14230
—— 0	—— 0	—— 0	—— 0
		—— -1	—— -32768

3.2.2 电流标么化

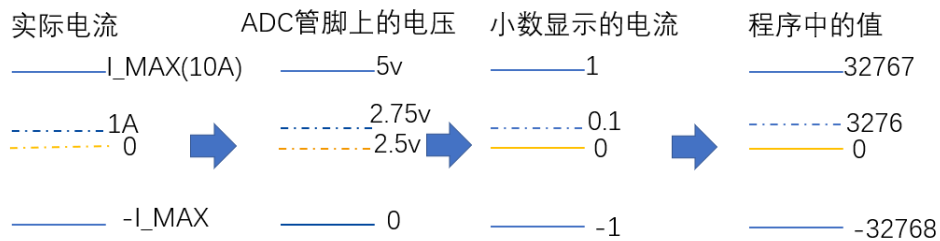
电流的标么化和电压标么化类似，都是采用 SAR ADC 采样电流的最大值作为标么值的基准，区别是电机电流是交流，实际采样中需要加入偏置电压保证 ADC 管脚上的电压始终为正，本案例中使用的电流采样示意如图 3-11 所示，通过示意图可以计算出 ADC 偏置电压为 2.5V 时采样得到的最大电流为 10A，以此作为电流定标的基准值。

3-11. 电流采样示意图



假设电流为 1A，根据以下步骤可以得到最终程序中电流标么化的值：

3-12. 电流标么化



3.2.3 角度及速度标么化

转子位置的角度也是用 16 位的有符号的小数表示的，其范围为 $(-1, 1)$ ，对应的角度范围是 $(-\pi, \pi)$ 。例如用 16 位有符号整数表示 $-\pi$ 和 π 分别为：

$$\pi = 0x7FFF$$

$$-\pi = 0x8000$$

速度的标么化和角度一致，在本案例中，定义正转速度为正，反转速度为负，速度的基准值可以参考使用电机的最大额定转速标定，对应如下：

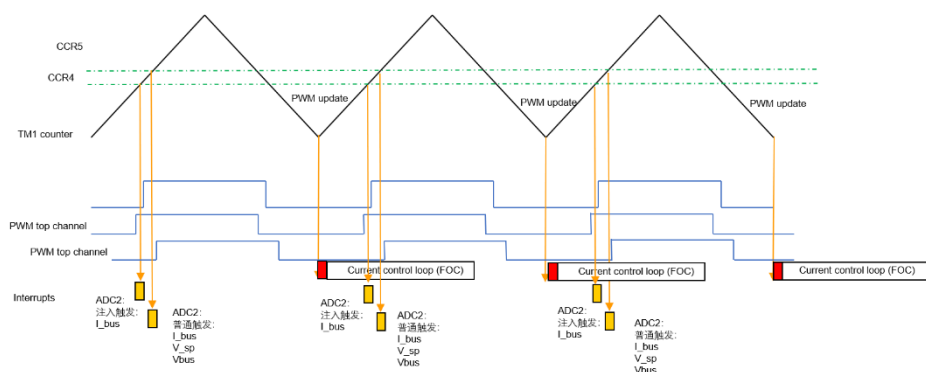
$$\text{SpeedMax} = 0x7FFF$$

$$-\text{SpeedMax} = 0x8000$$

3.3 系统时序设计

嵌入式程序的设计中最重要的就是时序的设计，永磁同步电机矢量控制的执行需要在嵌入式系统中的定时中断中定期执行，本单电阻采样程序中，利用了 ADC 的注入触发模式和普通轮询模式配合来实现不同时刻点的母线电流的采样。注入触发模式拥有独立的触发源配置和结果寄存器，在本例程中，注入触发模式由 TIM1 的 CCR4 信号触发，采样第一个时刻点的母线电流；普通采样模式由 TIM1 的 CCR5 信号触发，采样第二个时刻点的母线电流，最后在 TIM1 的下溢中断中执行 FOC 的计算。FOC 计算完毕后需要将下一个 PWM 周期的 ADC 采样点信息放入固定数组，然后进行下一个周期的采样点的配置。如图 3-13 所示：

3-13. 单电阻采样系统时序

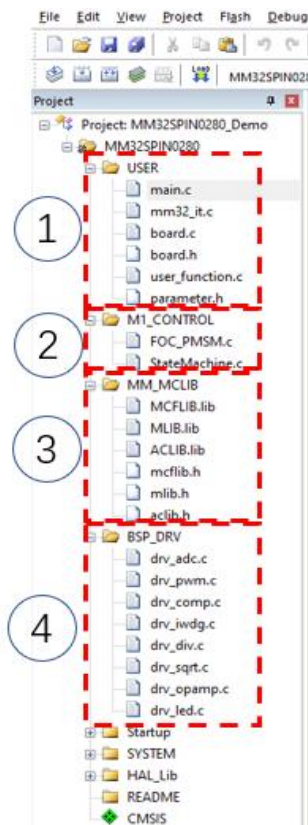


从图中可以看出，在本程序中 FOC 控制周期和 PWM 周期一致。

3.4 工程代码架构

此项目代码架构主要分为四层，用户层、应用算法层、外设驱动层及电机算法库函数层，如图 3-14 所示。各个层的分支功能如下：

3-14. 系统时序



1. 用户层 (User层)：

Main.c: 主函数入口，初始化及 while 循环

Mm32_it: 所有的中断函数，ADC 中断函数

Board.c/board.h 中包含了用户硬件板相关的配置

Parameter.h 中包含了整个工程所有需要调节的配置参数

2. 应用算法层：

FOC_PMSM: FOC 控制相关的算法函数。

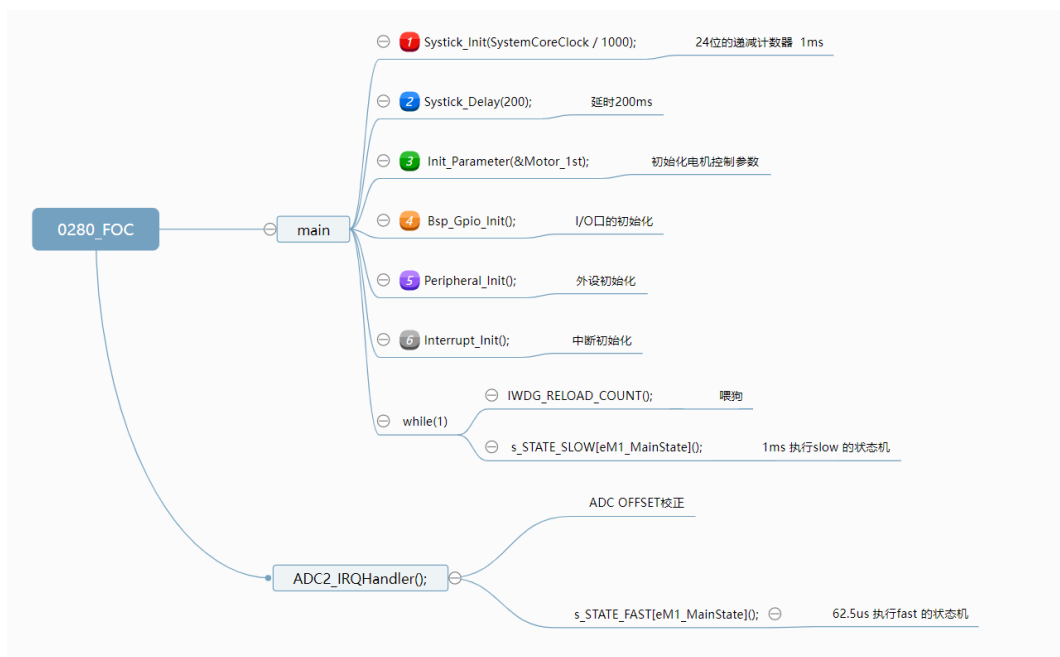
StateMachine: 系统状态机函数

3. 电机算法库：矢量控制相关函数，数学库，PMSM转子位置观测等库函数。

4. 外设驱动层：芯片外设驱动函数及配置。

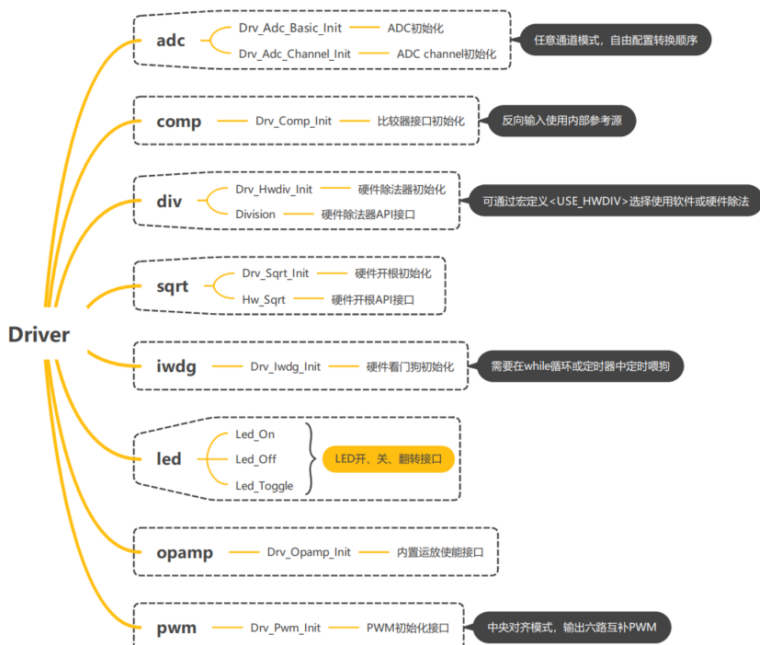
用户层的软件架构框图如图 3-15 所示：

3-15. 用户层的软件流程图



由图可知，系统上电复位后，先执行一段延时函数，等待系统稳定后开始初始化系统外设及参数，最后使能对应的中断，在 `while` 循环中执行喂狗及 1ms 一次的慢速环状态机，FOC 控制的快速环在与 PWM 频率相同的 ADC 中断中执行，执行状态机之前还需要先执行相电流的 Offset 校准功能，以保证相电流采样的精度。系统驱动层主要包含常用的电机外设的配置，包括 GPIO、PWM、ADC、CMP、OPA 等，驱动层的软件结构图 3-16 所示：

3-16. 外设驱动层的软件框架



3.5 状态机介绍

本案例中使用了主状态机嵌套子状态机的结构，

其中 INIT、STOP、FAULT、RUN 为四个主状态

run-calib、run-ready、run-align、run-startup、run-spin、run-freewheel 等 6 个子状态为主状态机 RUN 的子状态。

对主状态机的描述如下：

- **Fault:** 当系统有错误发生时一直处于此状态，直到错误的标志位被清除后回延时一段时间，然后从Fault状态跳转到STOP状态等待起动命令
- **Init:** 此主状态执行变量初始化。
- **Stop:** 系统完成初始化等待速度命令。此状态内 PWM 输出被禁止。直流母线电压被采样并滤波处理。
- **Run:** 系统处于运行状态，当有 Stop 命令时可以停止系统的运行。Run 的子状态在此状态内被调用。

在这些主状态内还有如下过渡函数。

- **Init -> Stop:** 系统完成初始化后向Stop状态切换。
- **Stop -> Run:** 当施加速度命令生效时，系统将进入Run状态。
- **Fault -> Stop:** 错误标志被清除时，系统将切换到Stop状态。
- **Stop, Run -> Fault:** 状态中发生错误时，系统将切换到Fault状态。

当主状态机在 Run 状态时，Run 子状态机就会被调用，Run 子状态机如下所述。

- **Calib:** 可以执行电流偏置 ADC 自校准功能。执行完此状态后系统将切换到 Ready 状态。在此状态内，采样直流母线电压并滤波处理。PWM 占空比设为 50% 且禁止输出。本案例的 ADC 校准在上电时刻执行一次，因此 Calib 中并无 ADC 校准功能，会直接跳转进入 ready 子状态。

- **Ready:** PWM 占空比设为 50%且使能输出。采样电流，进行 fault 检测。

- **Align:** 采样电流，调用转子定位算法，更新 PWM。在指定时间内执行完此状态，系统将切换到 Startup 子状态。采样直流母线电压并滤波处理。

- **Startup:** 采样电流，采用 IF 方式开环起动电机，调用转子位置观测器算法估计转子转速和位置。调用 FOC 算法，更新 PWM。如果起动成功，系统将切换到 Spin 子状态。采样直流母线电压并滤波处理。对估计的转速进行滤波处理。

Spin: 采样电流，调用转子位置观测器算法估计转子转速和位置。调用 FOC 算法，更新 PWM。电机开始旋转，采样直流母线电压并滤波处理。对估计的转速进行滤波处理。调用转速斜坡函数、弱磁控制、转速环控制器算法。

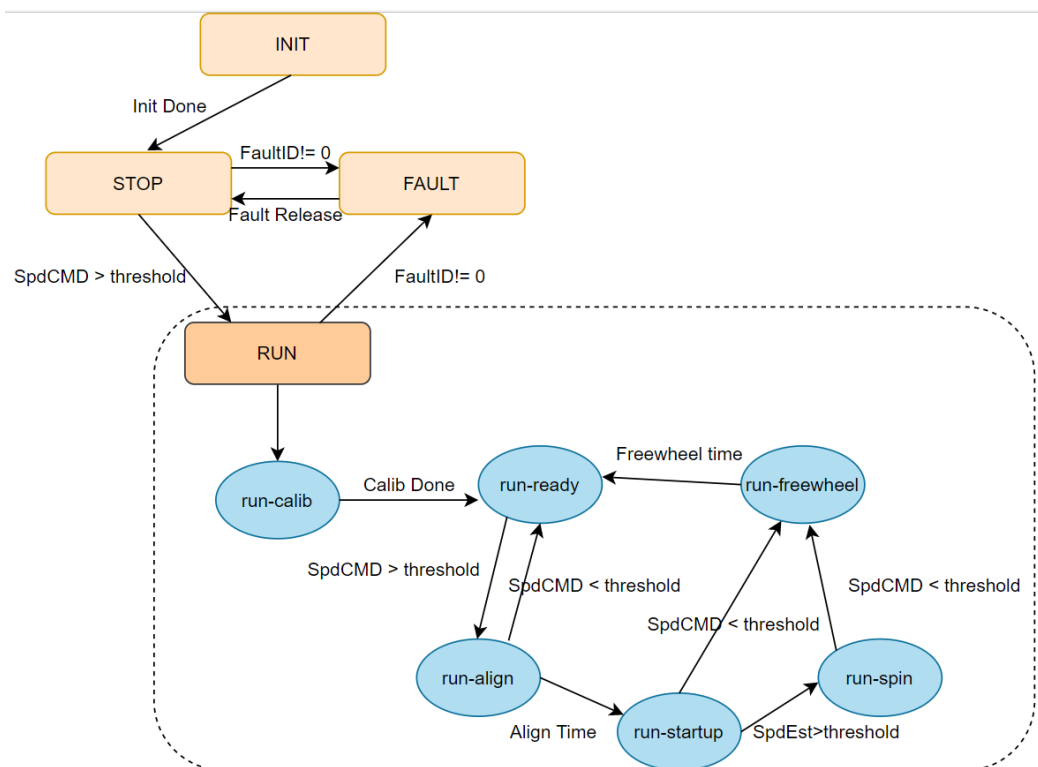
- **Freewheel:** PWM 占空比设为 50%且禁止输出。采样电流，采样直流母线电压并滤波处理。由于转子惯性，系统将在此子状态等待一段时间，即等到转子静止为止。然后系统将评估现有条件，以确定切换到 Ready 状态。如果有错误发生，系统将进入 Fault 状态。

Run 子状态机也有对应的过渡函数，在子状态相互切换前调用。过渡子状态函数描述如下。

- Calib → Ready: 自校准完成，进入 Ready 状态。
- Ready → Align: 当 Ready 状态出现非零转速命令且大于设定阈值时，将准备进入 Align 子状态。初始化一些变量（电压、转速、位置），确定对齐时间。
- Align → Ready: 当 Align 状态时出现零转速命令，将进入 Ready 子状态。电压和电流相关的变量清零。PWM 占空比设为 50%。
- Align → Startup: 定位完成后系统将进入 Startup 子状态。初始化滤波器和相关的控制变量。PWM 占空比设为 50%。
- Startup → Spin: 起动成功后，将进入闭环 Spin 子状态。
- Startup → Freewheel: 在起动状态时如果起动失败，将进入 Freewheel 子状态。初始化相关变量（电压、转速、位置），起动计数设为 1。确定自由停车的时间。
- Spin → Freewheel: 在 Spin 状态，当出现零转速命令时，将进入 Freewheel 子状态。初始化一些变量（电压、转速、位置），确定自由停车的时间。
- Freewheel → Ready: 在 Freewheel 子状态，当转速命令还是零时，系统将进入 Ready 子状态，对一些控制变量进行复位。

综上所述，系统的状态机流程图如图 3-17 所示。

3-17. 系统状态机流程图



4 核心参数配置

系统中所有的参数均在用户层的 `parameter.h` 中进行配置，主要分为系统参数、硬件板相关参数、状态机相关参数、电机相关参数等。下面详细介绍下各个参数的意义。

4.1 单电阻采样参数

参数名称	参数说明	参考设定值
MIN_SHIFT_WIDTH	最小移相宽度	3.0 (us)
TRIG_DELAY	PWM 硬件延时	0.8(us)

4.2 系统参数配置

参数名称	参数说明	参考设定值
SYS_REFV	系统供电电压	5.0 (V)
SYSCLK_HSI_96MHz	系统主频	96000000 (Hz)
PWMFREQ	PWM 频率（同时也是快速环控制频率）	16000 (Hz)
SLOWLOOP_FREQ	慢环控制频率	1000 (Hz)
DEAD_TIME	PWM 死区时间	1.0 (us)

4.3 硬件参数配置

参数名称	参数说明	参考设定值
ADC_REFV	ADC 参考电压，与 SYS_REFV 一致	5.0 (V)
R_SHUNT	采样电阻阻值	0.05 (Ω)
CURRENT_OPA_GAIN	电流采样运放放大倍数	5.0
I_MAX	电流标么化基准值（根据公式计算得到）	10 (A)
UDC_MAX	电压标么化基准值（根据母线采样分压得到，参考标么化章节）	55.0 (V)
U_MAX	相电压标么化基准值（建议设置为电压	31.75 (V)

	基准值/ $\sqrt{3}$)	
DCBUS_OVER	过压报警阈值	30 (V)
DCBUS_UNDER	欠压报警阈值	15 (V)

4.4 状态机参数配置

参数名称	参数说明	参考设定值
PRECHARGE_TIME	自举电容充电时间	500.0 (ms)
STOP_TO_RUN_SPEED	从 Stop 跳转到 Run 状态的速度命令阈值	500.0 (rpm)
STARTUP_TO_SPIN_SPEED	从 Startup 跳转到 Spin 状态的实际速度阈值	400.0 (rpm)
FREEWHEEL_SPEED	转速命令低于此阈值后停机	400.0 (rpm)
IQ_ALIGN	Align 状态下的 IQ 命令值	1.0 (A)
MAXSTARTUP_SPEED	开环旋转的最大速度	500 (rpm)
STARTUP_SPEED_RAMP	开环旋转下速度命令斜率值	500 (rpm/s)
SPEED_TO_THETA	速度到角度的积分增益	自动计算得到
STARTUP_TIME	开环旋转时间	1.0 (s)
RAMP_UP	RUN 状态下的速度上升斜率	2000.0 (RPM/s)
RAMP_DOWN	RUN 状态下的速度下降斜率	1000.0 (RPM/s)
FREEWHEEL_TIME	自由停机时间	5.0 (s)
FAULTRELEASE_TIME	错误状态退出计时	20.0 (s)

4.5 电机参数配置

参数名称	参数说明	参考设定值
Rs	电机相电阻	0.5 (ohm)
Ls	电机相电感	0.001 (H)
POLEPAIRS	电机极对数	2.0 (unit)
SPEED_MAX	速度定标值 (最大速度值)	20000.0 (rpm)
MAX_DUTY	最大占空比	0.92 (unit)
D_PI_LIMIT	D 轴电流 PI 控制器限幅值	14.0 (V)

Q_PI_LIMIT	Q 轴电流 PI 控制器限幅值	14.0 (V)
SPD_PI_LIMIT	速度环 PI 调节器限幅值	3.0 (A)
M1_IQ_KP	Q 轴电流环 KP 参数	Q16_15(0.0275)
M1_IQ_KI	Q 轴电流环 KI 参数	Q16_15(0.0034)
M1_ID_KP	D 轴电流环 KP 参数	Q16_15(0.0275)
M1_ID_KI	D 轴电流环 KI 参数	Q16_15(0.0034)
M1_SPEED_KP	速度环 KP 参数	Q15(0.6)
M1_SPEED_KP_SHIFT	速度环节 KP 参数移相值 (正为左移, 负数为右移)	3
M1_SPEED_KI	速度环 KI 参数	Q15(0.5)
M1_SPEED_KI_SHIFT	速度环节 KI 参数移相值 (正为左移, 负数为右移)	-7
SMO_ERR_MAX	滑模观测器最大电流误差	Q15(0.3)
SLIDE_GIAN	滑模观测器增益	Q15(0.3)
IERR_GIAN	滑模电流误差增益	Q15(0.5)
IERR_GIAN_SHIFT	滑模电流误差增益移相值 (正为左移, 负数为右移)	1
M1_TO_KP_GAIN	锁相环 KP 增益	Q15(0.6528)
M1_TO_KP_SHIFT	锁相环 KP 增益移相值 (正为左移, 负数为右移)	1
M1_TO_KI_GAIN	锁相环 KI 增益	Q15(0.988)
M1_TO_KI_SHIFT	锁相环 KI 增益移相值 (正为左移, 负数为右移)	-9
M1_TO_THETA_GAIN	锁相环速度到角度的积分增益	Q15(0.666667)
M1_TO_THETA_SHIFT	锁相环积分增益移相值 (正为左移, 负数为右移)	-3

5 修改记录

表 5.1 修改记录

日期	版本	内容
2022/04/20	1.0	AN6415 初始版本发布
2022/06/20	1.1	新增硬件实物图及跳帽配置 改动了单电阻采样的时序设计