

13 FOC

13.1 FOC 操作说明

13.1.1 简介

常规的做法，先配置寄存器再使能模块的做法对FOC模块是不行的！

FOC 作为一个独立的模块，在不工作的时候时钟停止。FOC_SET0 寄存器的 FOCEN 作为 FOC 模块的使能位，在操作 FOC 模块之前，必须将该位置一，否则 FOC 模块无法工作，FOC 相关寄存器处于复位状态，同时也无法写。

FOC 模块包含角度模块，PI 控制器，坐标转换模块，输出模块；可以采用内部角度估算模块实现无 HALL FOC 控制；也可以联合 MCU 处理 HALL 信号实现有 HALL FOC 控制。FOC 模块内部包含电流闭环，用户通过给定 ID,IQ 的参考值，就可以输出六路 PWM 驱动电机，同时 ADC 自动采集电流作电流闭环。

A) 无 HALL FOC 控制：采用角度估算模块估算角度用作坐标变换，同时输出角速度供 MCU 做速度闭环，反电动势做启动检测；

B) 有 HALL FOC 控制（单 HALL/双 HALL/三 HALL）：FOC 模块提供角度输入接口，MCU 采集 HALL 信号进行处理，得到角度，将角度值给到 FOC 模块即可。

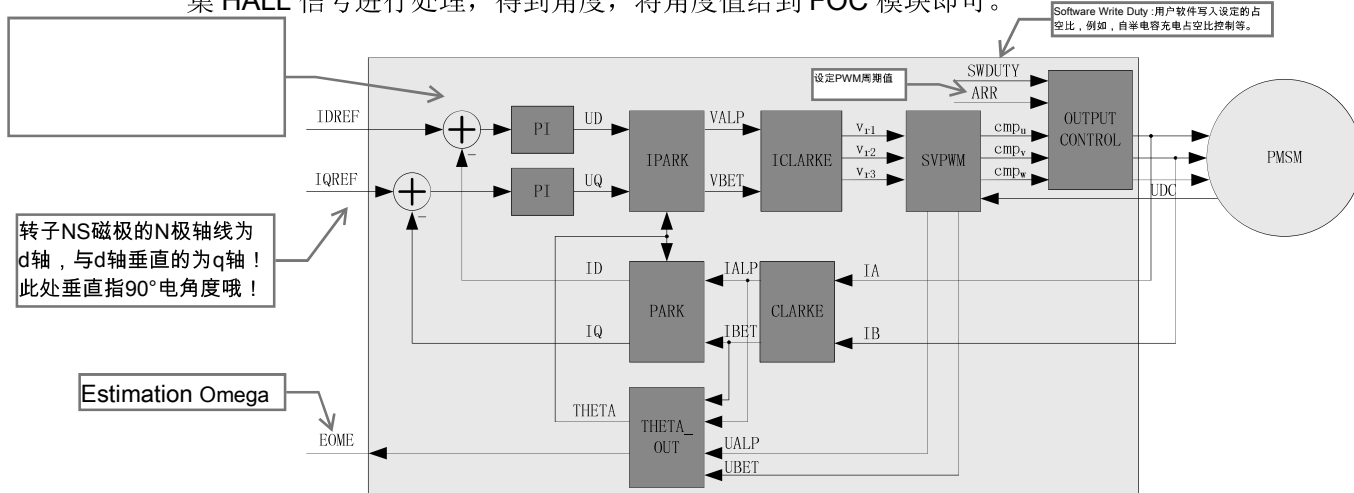


图 13-1 FOC 原理框图

13.1.2 参考输入

FOC 模块根据电流反馈作闭环控制，因此采用 D 轴电流(IDREF)和 Q 轴电流(IQREF)作为参考输入。假如需要实现速度-电流双闭环控制，需要根据 FOC 模块输出的速度 EOME 利用 MCU 或者 PI 模块对速度信号进行处理实现速度外环控制。

可以实现：
内环：电流闭环
外环：速度闭环控制。

13.1.3 PI 控制器

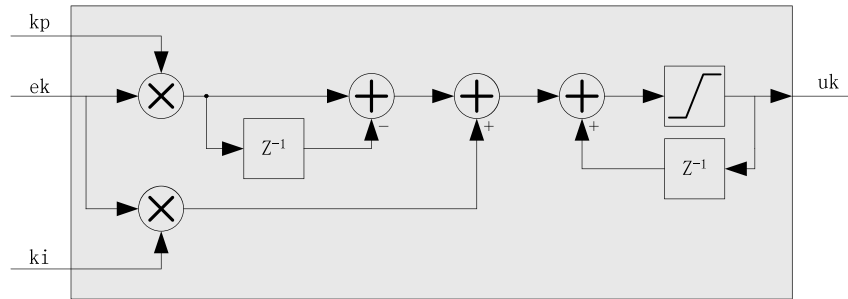


图 13-2 控制器原理框图

FOC 模块里使用 3 个 PI 控制器，分别应用于：

1、转子磁通控制：D 轴的 PI 控制器，参考电流 IDREF 减去反馈电流 ID 作为偏差输入，比例系数 DKP 和积分系数 DKI 调节 PI 控制器性能，DMAX 和 DMIN 对输出进行限幅，最后输出 D 轴电压 UD。

2、转子转矩控制：Q 轴的 PI 控制器，参考电流 IQREF 减去反馈电流 IQ 作为偏差输入，比例系数 QKP 和积分系数 QKI 调节 PI 控制器性能，QMAX 和 QMIN 对输出进行限幅，最后输出 Q 轴电压 UQ。

3、角度估算：估算器的 PI 控制器，比例系数 EKP 和积分系数 EKI 调节 PI 控制器性能，最终输出估算角度 ETHETA。

FOC_PIRAN 寄存器的 DQPIRAN 同时设置 D 轴和 Q 轴的 PI 控制器的结果截位，EPIRAN 单独设置估算器的 PI 控制器的结果截位。此功能相当于设置 PI 控制器的数据格式，默认截位 12 位，即数据格式为 Q12 格式。若设置截位 15 位，即数据格式为 Q15 格式，如此类推。

13.1.4 坐标转换

13.1.4.1 PARK 逆变换

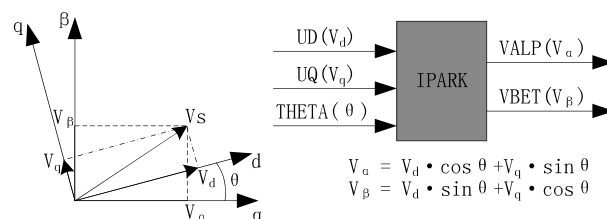


图 13-3 PARK 逆变换

经过 D 轴和 Q 轴的 PI 控制器后，可获得旋转 d-q 坐标系的电压矢量的两个分量 UD 和 UQ。

这时需要经过逆变换将其重新变换到 3 相电机电压。首先，使用 PARK 逆变换将电压矢量从 2 轴旋转 d-q 坐标系变换到 2 轴静止 α - β 坐标系。

13.1.4.2 CLARKE 逆变换

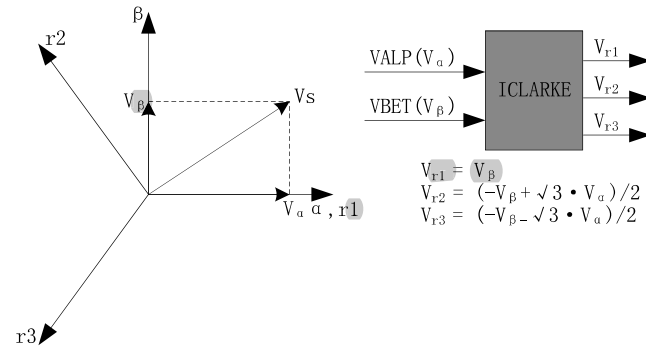


图 13-4 CLARKE 逆变换

通过 CLARKE 逆变换将电压矢量从静止 2 轴 α - β 坐标系变换到静止 3 轴 3 相定子参考坐标系。

13.1.4.3 CLARKE 变换

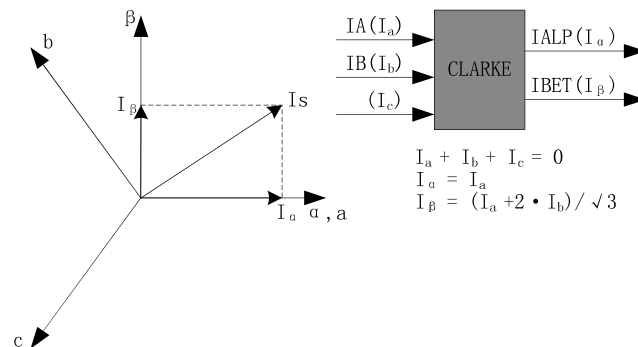


图 13-5 CLARKE 变换

CLARKE 变换将电流从一个 3 轴 2 维的定子坐标系变换到 2 轴 α - β 的定子坐标系。

13.1.4.4 PARK 变换

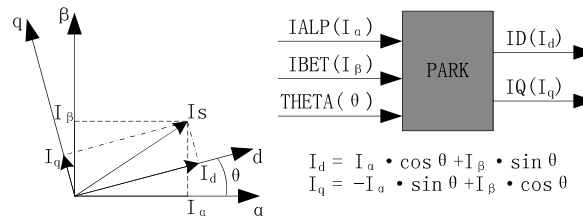


图 13-6 PARK 变换

PARK 变换将电流从 2 轴 α - β 的定子坐标系变换到随着转子磁通旋转的 2 轴 d-q 坐标系。

13.1.5 SVPWM

空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法是 FOC 控制的一个重要组成部分，其主要思路是采用逆变器空间电压矢量的切换以获得准圆形旋转磁场，能明显减少逆变器输出电流的谐波分量及电机的谐波损耗，降低转矩脉动，而且具有较高的利用率。

SVPWM 产生 3 相电机电压信号的脉宽调制信号，每相脉宽的产生过程都可简化为几个一次方程。三相逆变器的每相输出都可为两种状态之一，即逆变器输出可连接到正极性(+)母线端或负极性(-)母线端，这使得三相逆变器输出共存在 $2^3 = 8$ 种可能的状态。其中三相输出全部连接到正极性(+)母线端或负极性(-)母线端的两种状态被视为无效状态，因为此时任意两相之间都不存在线电压。这两种状态在 SVPWM 星型图中被绘制为原点。其余六种状态表示为每两个相邻状态间旋转间隔为 60 度的矢量。

电角度

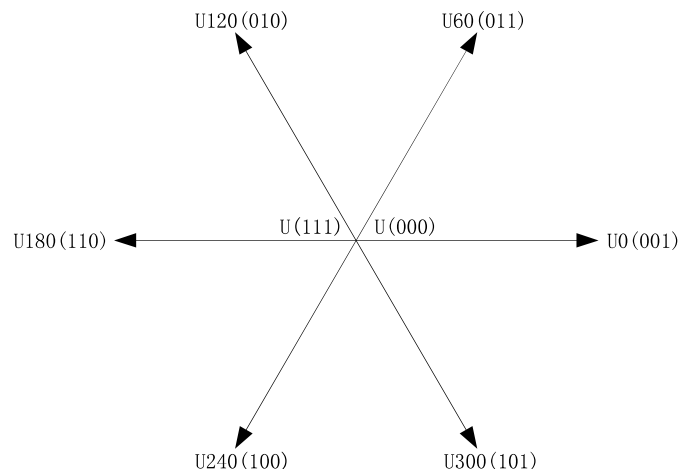


图 13-7 SVPWM 矢量控制

SVPWM 的过程允许通过两个相邻矢量各分量的和来表示任何空间电压矢量。假设 U_{OUT} 是期望的空间电压矢量，该矢量位于 U_{60} 和 U_0 之间的区间内。如果在给定 PWM 周期 T 期间， U_0 的输出时间为 $2T_1/T$ ，而 U_{60} 的输出时间为 $2T_2/T$ ，则整个周期的平均电压值为 U_{OUT} ， T_0 表示绕

组上无有效电压的时间，即施加了无效矢量。

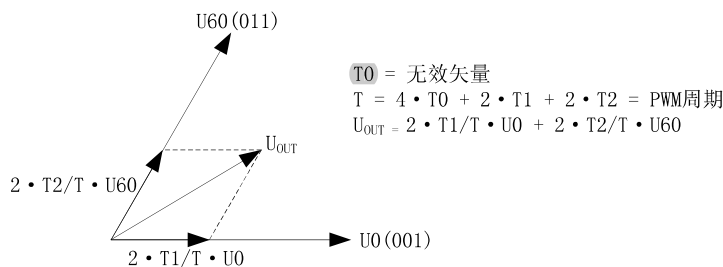


图 13-8 SVPWM 电压合成

表空间矢量调制逆变器状态

| C 相 | B 相 | A 相 | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | V_{ds} | V_{qs} | 矢量 |
|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | U(000) |
| 0 | 0 | 1 | V_{DC} | 0 | $-V_{DC}$ | $2/3V_{DC}$ | 0 | <u>U0</u> |
| 0 | 1 | 1 | 0 | V_{DC} | $-V_{DC}$ | $1/3V_{DC}$ | $1/3V_{DC}$ | U60 |
| 0 | 1 | 0 | $-V_{DC}$ | V_{DC} | 0 | $-1/3V_{DC}$ | $1/3V_{DC}$ | U120 |
| 1 | 1 | 0 | $-V_{DC}$ | 0 | V_{DC} | $-2/3V_{DC}$ | 0 | U180 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | $-V_{DC}$ | V_{DC} | $-1/3V_{DC}$ | $-1/3V_{DC}$ | U240 |
| 1 | 0 | 1 | V_{DC} | $-V_{DC}$ | 0 | $1/3V_{DC}$ | $-1/3V_{DC}$ | U300 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | U(111) |

13.1.5.1 七段式 SVPWM

在单电阻电流采样模式下，FOC 算法固定使用七段式 SVPWM 输出方式。双电阻电流采样模式下，配置 FOC_CR2 寄存器的 F5SEG=0，则选择七段式 SVPWM 输出方式。

即可以设定使用七段式也可以使用五段式 SVPWM。

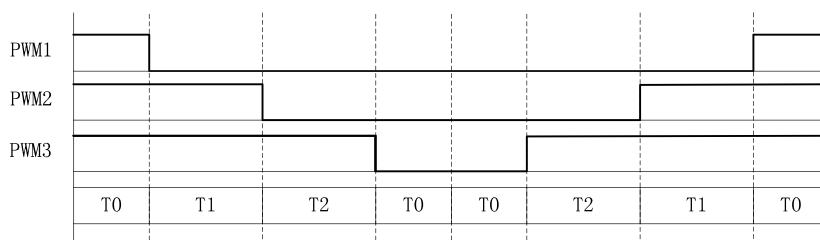


图 13-9 七段式 SVPWM 输出电平

13.1.5.2 五段式 SVPWM

五段式 SVPWM 输出方式只能在双电阻电流采样模式下使用，需要配置 FOC_CR2 寄存器的 F5SEG=1。

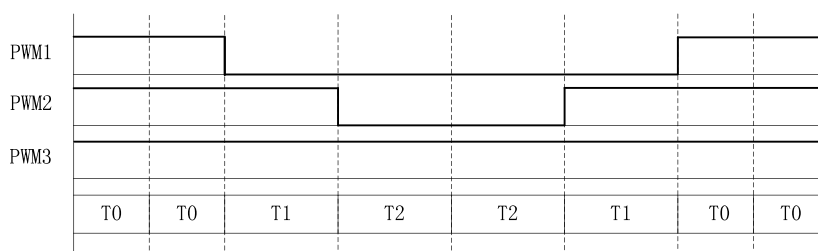


图 13-10 五段式 SVPWM 输出电平

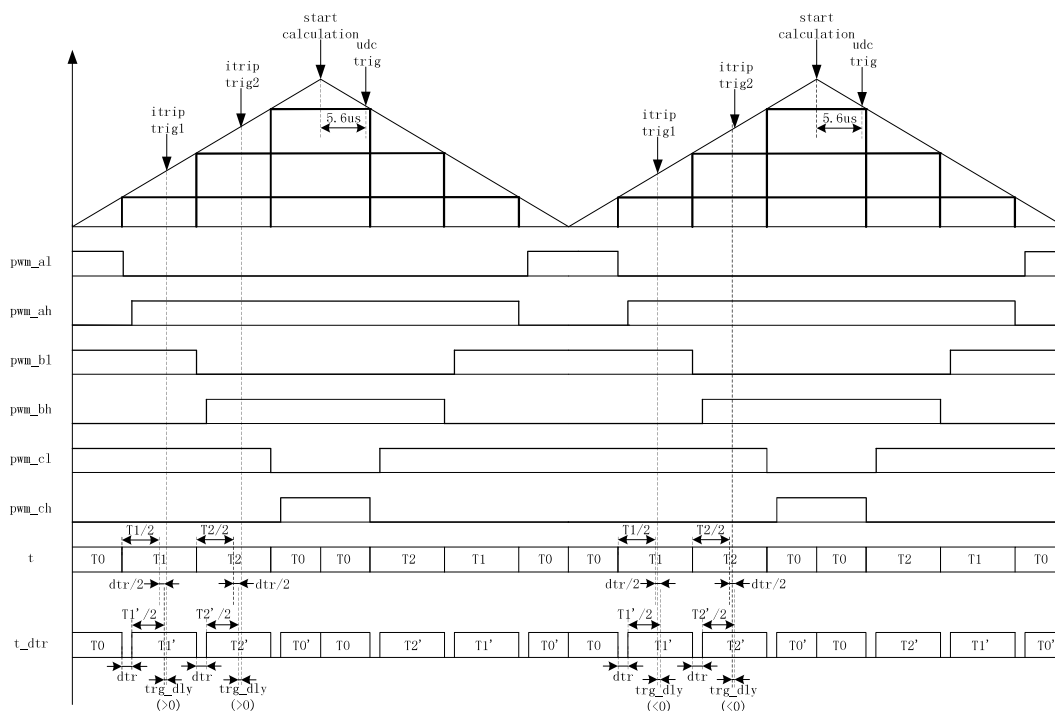
13.1.6 电流电压采样

FOC 模块需要采集电机的母线电压和三相电流的其中两相，另外一相可以通过运算得出。当 FOC 模块工作之前，需要使能 ADC（配置 ADC_STA 寄存器的 ADCEN=1）和运放，并配置相关设置寄存器，但是不需要配置 ADC 通道和扫描方式。根据 FOC_CR1 寄存器的 CSM 可以选择单电阻电流采样或者双电阻电流采样。在单电阻电流采样模式下默认通道 4 为母线电流 itrip 的采样通道；在双电阻电流采样模式下默认通道 0 为 ia 的采样通道，通道 1 为 ib 的采样通道。配置 FOC_CHC 寄存器的 UCH 可以选择通道作为母线电压的采样通道，但默认通道为通道 2。

Current Sample Mode

Channel Config

13.1.6.1 单电阻采样模式



Current Sample Mode

图 13-11 单电阻采样

配置 FOC_CR1 寄存器的 CSM=0，即选择单电阻电流采样模式。在单电阻电流采样模式下，

FOC 模块在计数器向上计数的区间对母线电流 **itrip**（通道 4）进行两次采样，在计数器向下计数的区间当 FOC 模块运算完成后对母线电压进行采样。

死区时间会影响电流采样的时间，FOC 模块会自动根据用户设置的死区时间对采样时间进行调整，保证在实际通电时间 **T1', T2'** 的中间采样，同时，用户可以设置 **TRG_DLY** 寄存器对采样时间进行提前或者延迟。假设 MCU 时钟为 24MHz(41.67ns)， $TRGDLY = 5$ ，则延迟 $41.67 \times 5 = 208\text{ns}$ ；**TRGDLY** 为-5，则提前 208ns。

单电阻采样会存在采样窗口不够宽的情况，因此需要人为地凑出最小采样窗口，用户通过设置 **TS** ($TS = \text{最小窗口时间} + \text{死区时间}$)，FOC 模块根据 **TS** 对 PWM 波形进行调整。

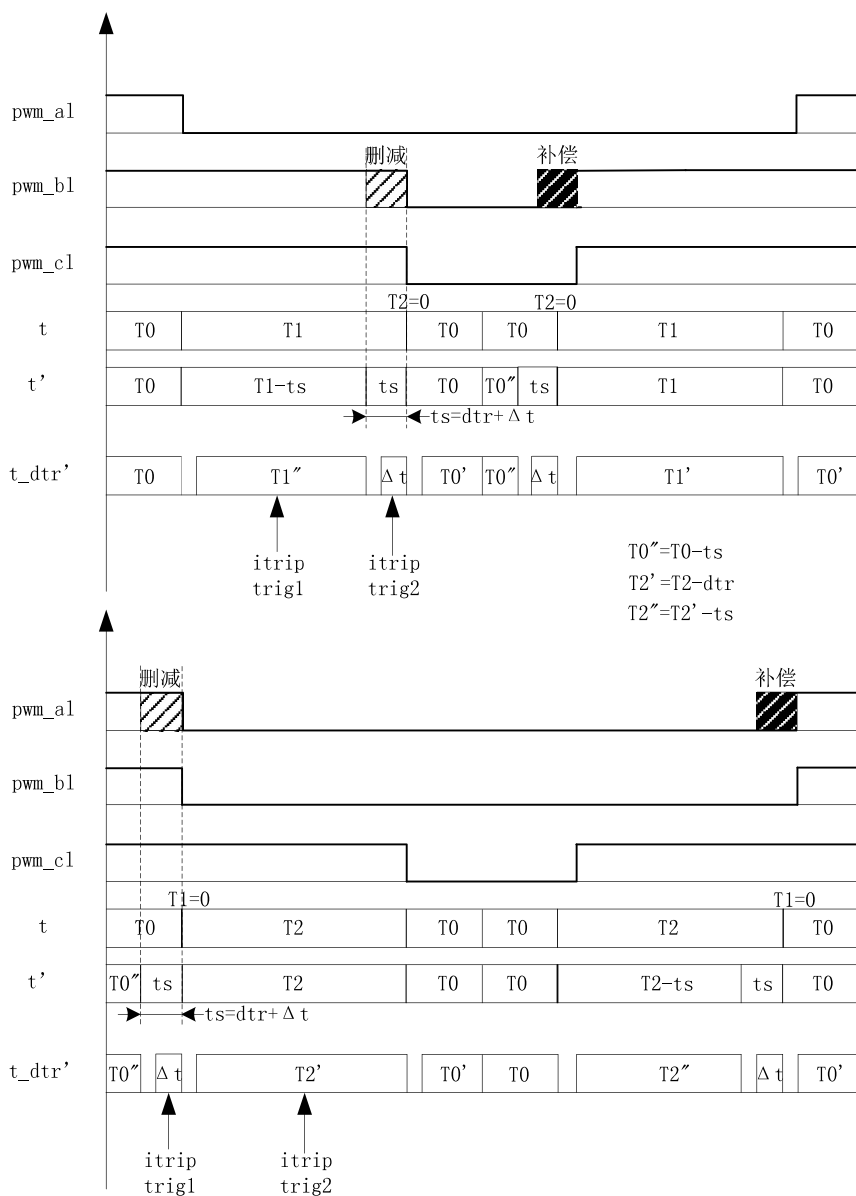


图 13-12 单电阻采样时间补偿

13.1.6.2 双电阻采样模式

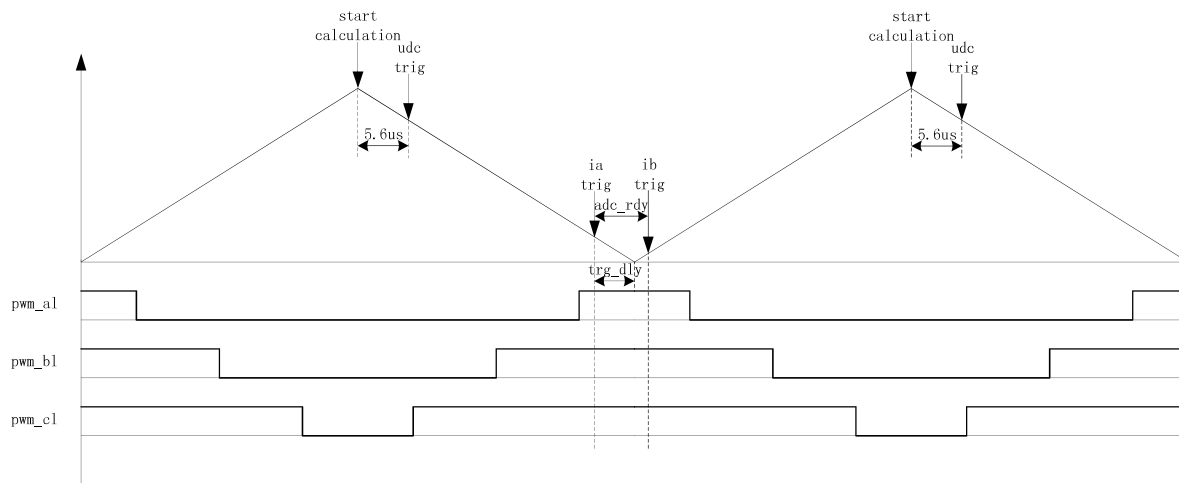


图 13-13 双电阻电流顺序采样模式

Data Sample Sequence

配置 FOC_CR1 寄存器的 CSM=1 和 FOC_CR2 寄存器的 DSS=0, 即选择双电阻电流顺序采样模式。在双电阻电流顺序采样模式下, 通过 TRG_DLY 寄存器设置对电流 ia (通道 0) 的采样时机, 当 ia 采样完毕后迅速对 ib (通道 1) 进行采样, 在计数器向下计数的区间当 FOC 模块运算完成后对母线电压进行采样。需要注意的是电流采样时机的设置应该使 ia 和 ib 采样点均在零矢量区间 (即 pwm_al.pwm_bl.pwm_cl=111)。假设 MCU 时钟为 24MHz(41.67ns), TRGDLY = 0x8032, 则当 FOC 计数器向下计数, 在下溢事件前 $41.67 \times 50 = 2.08\mu s$ 对 ia 采样, ia 采样完毕后对 ib 采样。

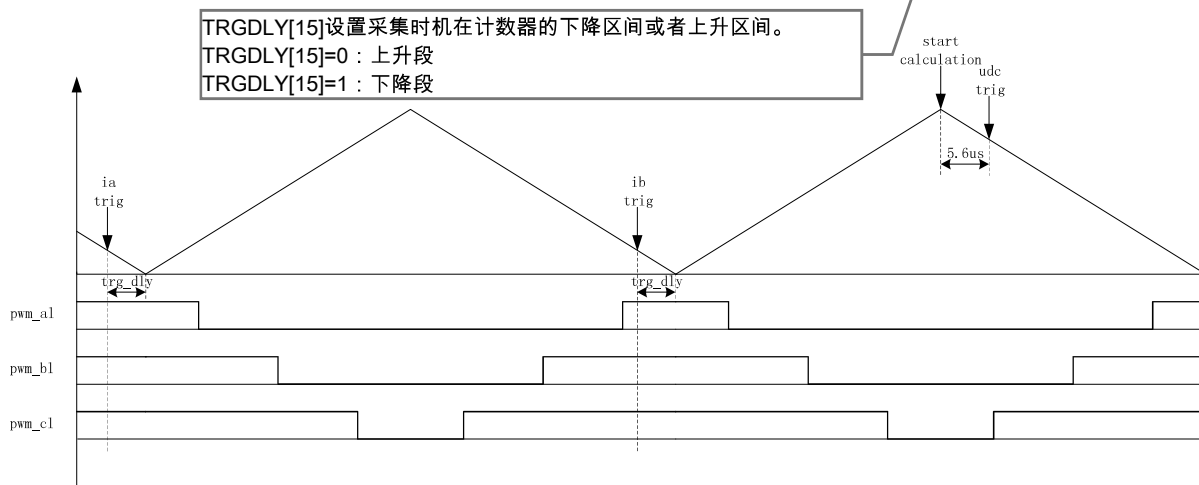


图 13-14 双电阻电流交替采样模式

配置 FOC_CR1 寄存器的 CSM=1 和 FOC_CR2 寄存器的 DSS=1, 即选择双电阻电流交替采样模式。在双电阻电流交替采样模式下, 两个载波周期为一次运算周期, 每个载波周期只对一相电流进行采样, 第一个载波周期采集 ia, 第二个载波周期采集 ib, 如此交替对 ia, ib 进行电流采集, 采集 ib 后在下次计数器的上溢点开始 FOC 模块运算, 当 FOC 模块运算完成后对母线电压进行采样。通过 TRG_DLY 寄存器设置对电流 ia (通道 0), ib (通道 1) 的采样时机, 需要注意的是电流采样

时机的设置应该使 ia 和 ib 采样点均在零矢量区间（即 $\text{pwm_al}, \text{pwm_bl}, \text{pwm_cl}=111$ ）。假设 MCU 时钟为 24MHz(41.67ns)， $\text{TRGDLY} = 0x8032$ ，则当 FOC 计数器向下计数，在下溢事件前 $41.67 \times 50 = 2.08\mu\text{s}$ 对电流采样。

13.1.6.3 电流采样基准

准确的表达方式：输入零信号时，输出电压为2.5V。

因为相电流存在正负，所以 ADC 采样前需要将输入电流提高量程的一半，因此在运算的时候要减去基准值，FOC 模块默认是 0x4000，但是因为 ADC 基准的偏差和硬件板的偏差会导致默认值与实际值存在偏差，因此用户可以对基准值进行校准。校准方法如下：在 FOC 模块不工作，三相输出尚没有电流的时候对相应的通道进行多次采样，求平均后写进基准寄存器 FOC_CSO。假设 ADC 的电压范围 0~5V，基准为 2.5V，则 $\text{FOC_CSO} = 2.5/5V \times 32768 = 16384(0x4000)$ 。

- 1、当 $\text{FOC_CHC}[\text{CSOC}]=00/11$ 时，写 FOC_CSO 是修改 ITRIP 的基准；
- 2、当 $\text{FOC_CHC}[\text{CSOC}]=01$ 时，写 FOC_CSO 是修改 IA 的基准；
- 3、当 $\text{FOC_CHC}[\text{CSOC}]=10$ 时，写 FOC_CSO 是修改 IB 的基准。

母线电流

相电流1

相电流2

13.1.7 角度模式

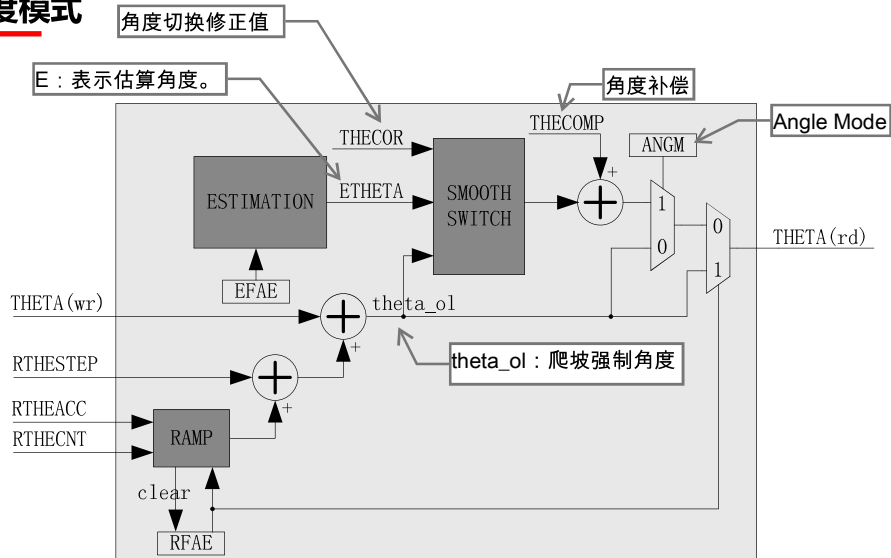


图 13-15 角度模块原理框图

角度模块包含角度估算模块，爬坡模块，估算角度平滑切换模块。角度的来源分四种情况：

- 1、爬坡强制角度
- 2、强拉角度
- 3、估算器估算角度
- 4、估算器强制角度

Estimate Force Angle Enable

表 13-1 角度来源

| RFAE | ANGM | EFAE | 角度来源 |
|------|------|------|--------|
| 1 | x | x | 爬坡强制角度 |
| 0 | 0 | x | 强拉角度 |

| | | | |
|---|---|---|--|
| 0 | 1 | 0 | 估算器估算角度 |
| 0 | 1 | 1 | 估算速度 > EFREQMIN: 估算器估算角度 估算速度 < EFREQMIN: 估算器强制角度 |

13.1.7.1 爬坡强制角度

Ramp : 斜坡
Theta : 角度
Accelerate : 加速度

爬坡强制角度由角度 THETA, 速度 RTHESTEP, 加速度 RTHEACC, 爬坡计数器 RTHECNT 组成。爬坡公式为:

速度 RTHESTEP(32bit) = 速度 RTHESTEP(32bit) + 加速度 RTHEACC(32bit, 高 16bit 恒为 0, 低 16bit 可配);

角度 THETA(16bit) = 角度 THETA(16bit) + 速度 RTHESTEP(高 16bit)

爬坡强制角度的优先级最高，配置 FOC_CR1 寄存器的 RFAE = 1，使能爬坡功能。爬坡模块每个运算周期进行一次爬坡运算，爬坡计数器加一，当计数值达到 RTHECNT，RFAE 硬件清零，爬坡结束。爬坡结束后，根据 FOC_CR1 寄存器的 ANGM 的配置，ANGM=1，角度来自估算器；ANGM=0，角度来自强拉角度。

13.1.7.2 强拉角度

强拉角度由角度 THETA, 速度 RTHESTEP 组成。公式为:

角度 THETA(16bit) = 角度 THETA(16bit) + 速度 RTHESTEP(高 16bit)

强拉角度分两种情况:

1、FOC_CR1 寄存器的 RFAE = 1，FOC_CR1 寄存器的 ANGM = 0，即爬坡功能后切换强拉模式，此时的速度 RTHESTEP 为爬坡结束当时的累加的速度。此模式可实现无角度反馈匀速强拉功能。

2、FOC_CR1 寄存器的 RFAE = 0，FOC_CR1 寄存器的 ANGM = 0，即不经过爬坡模块，角度直接来自强拉角度，此时的速度 RTHESTEP 为软件写寄存器的初始速度。当速度 RTHESTEP = 0，可实现预定位功能；当速度 RTHESTEP != 0，可实现 HALL FOC 控制（HALL FOC 控制原理：HALL 信号到来，MCU 算出当前角度和速度，写进 THETA 和 RTHESTEP 来进行修正）。

13.1.7.3 估算器角度

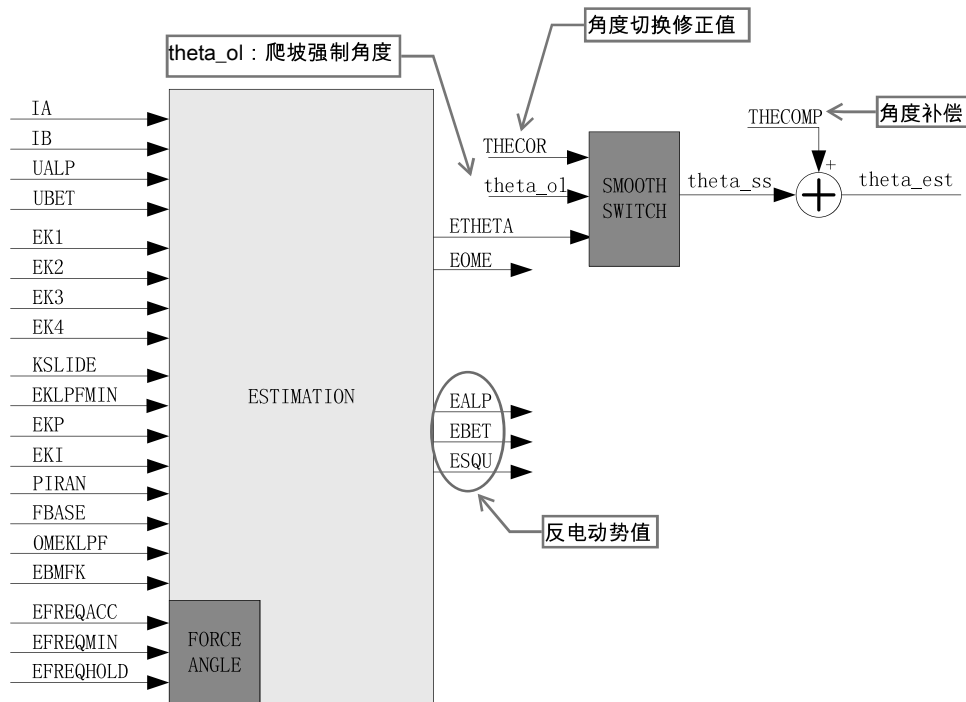


图 13-16 估算器原理框图

估算器采集的电机电流和电压，根据用户输入的电机参数和控制参数，输出角度、速度和反电动势数据。

1、估算器估算角度

估算器根据用户输入的电机参数和控制参数构建电机模型，同时采集的电机电流和电压对估算值进行修正，输出与实际情况相符合的角度。估算器可选择 **PLL 模式** 和 **滑模模式**，通过 **FOC_CR1** 寄存器的 **ESEL** 进行配置。

2、估算器强制角度

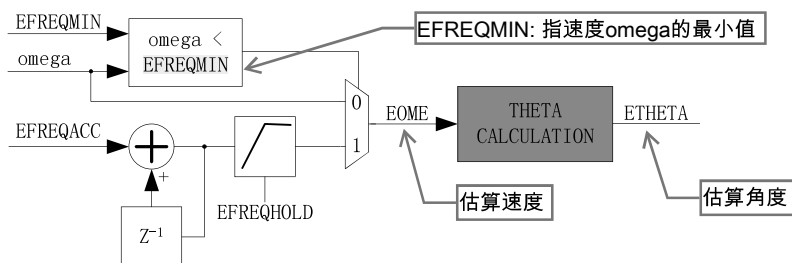
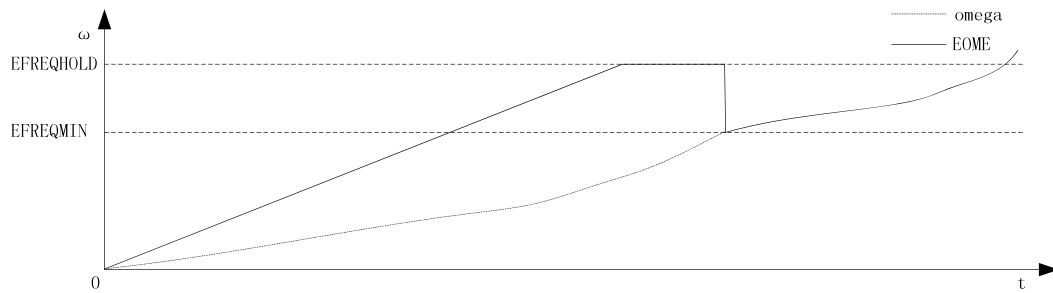


图 13-17 估算器强制角度原理框图

此功能与爬坡功能类似。由于电机启动时，电机的输出较小，导致采集的电流小，估算器模型估算的角度和速度存在较大的误差，可能令电机启动失败，所以在这种情况下，估算器输出强制角度，保证电机顺利启动。



EFREQMIN: 指速度 ω 的最小值

图 13-18 估算器强制角度模式下的速度曲线

配置 FOC_CR1 寄存器的 **EFAE = 1**，当估算器的估算速度 ω 小于用户设定的最小值 **EFREQMIN**，功能启动，强制速度从 0 开始，每个运算周期与速度增量 **EFREQACC** 相加，同时根据 **EFREQHOLD** 进行最大值限幅，输出强制速度作为最终速度 **EOME** 供角度计算模块算出估算器角度 **ETHETA**；当 ω 大于等于 **EFREQMIN** 时，输出估算速度 ω 作为最终速度 **EOME**。

3、角度平滑切换

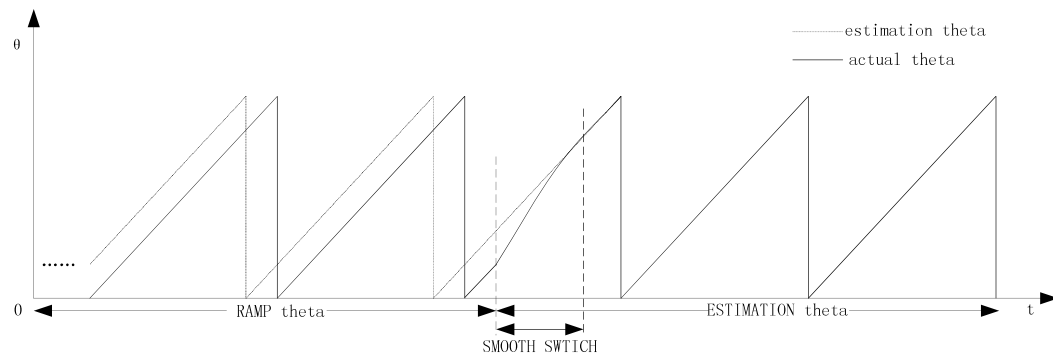


图 13-19 角度平滑切换曲线

假如配置 FOC_CR1 寄存器的 **RFAE = 1**，**ANGM = 1**，即采用爬坡功能启动电机，爬坡结束后切换估算器模式，在爬坡的过程中，估算器也在估算角度，但是估算角度通常与爬坡强制角度存在偏差，爬坡结束后，如果角度从爬坡强制角度直接切换成估算角度，可能由于角度的突变引起电机抖动，因此需要平滑切换模块。

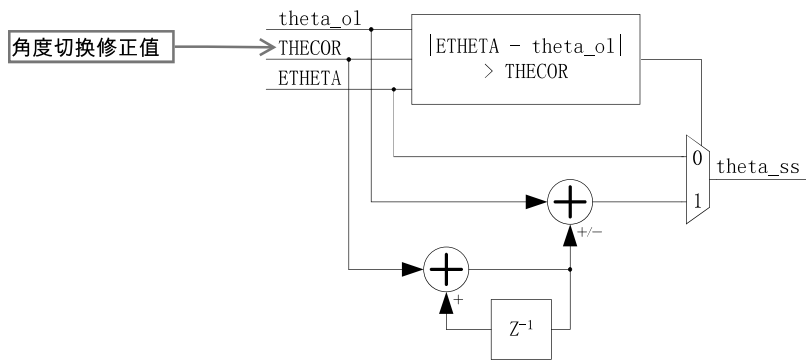


图 13-20 角度平滑切换原理框图

爬坡结束时，假如估算角度 $ETHETA$ 和爬坡强制角度 $theta_ol$ 的偏差小于等于 $THECOR$ ，则认为角度偏差较小，直接选择 $ETHETA$ 作为角度输出；假如偏差大于 $THECOR$ ，则每个运算周期 $theta_ol$ 向 $ETHETA$ 的值靠拢，以 $THECOR$ 的步长进行平滑修正并输出，当偏差小于 $THECOR$ ，直接选择 $ETHETA$ 作为角度输出。

4、角度补偿

补偿值 $THECOMP$ 对估算角度进行补偿输出， $THECOMP$ 的最高位为 1，为负补偿；最高位为 0，为正补偿。

输出模块

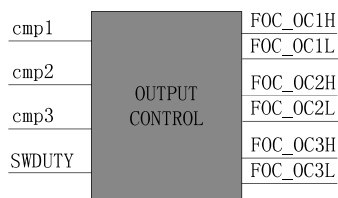


图 13-21 输出模块框图

FOC_OC1H/FOC_OC1L 、 FOC_OC2H/FOC_OC2L 、 FOC_OC3H/FOC_OC3L 是 FOC 的三对互补输出，支持死区插入，其中 FOC_OCxL 是下桥输出，与 $OCxREF$ 同相； FOC_OCxH 是上桥输出，为 $OCxREF$ 的互补输出。通过配置 FOC_CMR 寄存器的 $CCxEH$ 和 $CCxEL$ ，可以选择输出模式为无效电平或者插入死区的互补输出。 FOC_CMR 寄存器的 $CCPH$ 和 $CCPL$ 配置输出的极性。

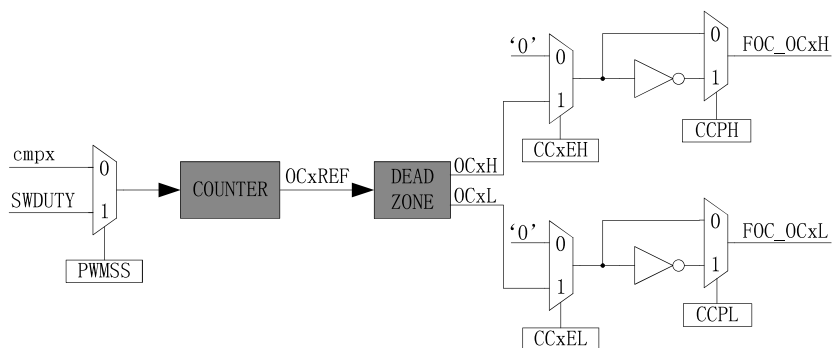


图 13-22 FOC 输出模式框图

FOC 三路互补输出的占空比通过 FOC_CR1 寄存器的 PWMSS，可以选择来自 FOC 内部的 SVPWM 模块的 CMP1/CMP2/CMP3 或者用户给定的 SWDUTY，送至计数器比较后得到三路原始 PWM 信号 OCxREF。当计数值 cntn 小于目标值，OCxREF 输出高电平，反之，输出低电平。

1、配置 FOC_CR1 寄存器的 PWMSS=0，选择 SVPWM 模块输出的三路比较值 cmp1/cmp2/cmp3 与计数值比较，生成 OC1REF/OC2REF/OC3REF。

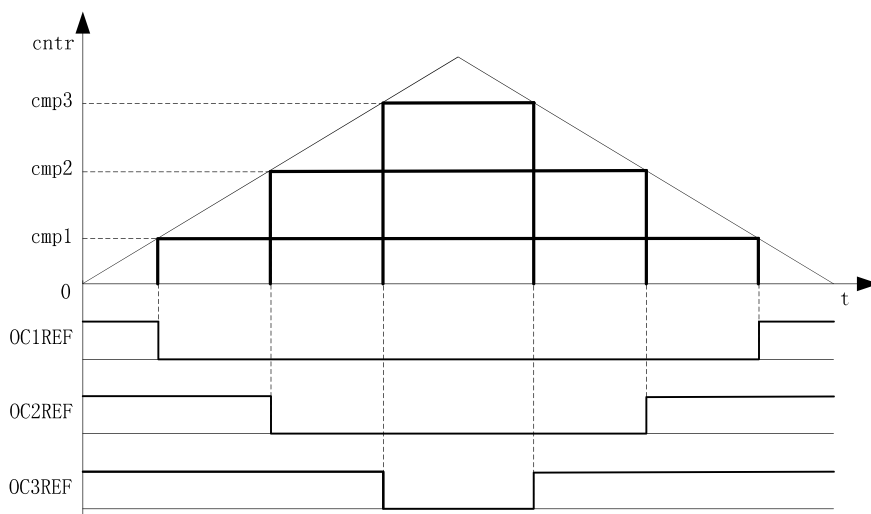


图 13-23 PWM 生成图

2、配置 FOC_CR1 寄存器的 PWMSS=1，选择用户给定的 SWDUTY 与计数值比较，生成三路占空比相同的 OC1REF/OC2REF/OC3REF。

占空比 = $\text{SWDUTY} / \text{ARR} \times 100\%$ (假设 ARR=750, SWDUTY=375, 则占空比=50%)

配合 FOC_CMRR 寄存器的 CCxEH 和 CCxEL 可实现预充电和刹车等功能, SWDUTY 控制 PWM 占空比, CCxEH 和 CCxEL 控制六路输出方式。

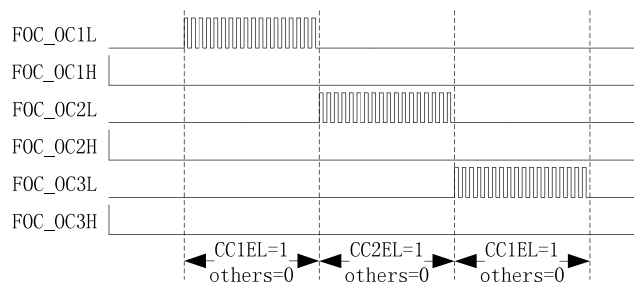


图 13-24 预充电图

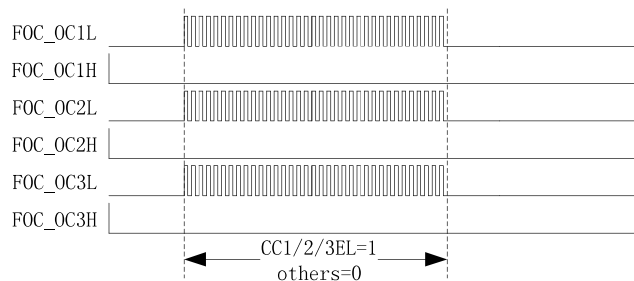


图 13-25 刹车图

对于互补输出，如果 **FOC_DTR** 寄存器不等于 0，就使能了死区插入。每个通道都有一个 8bit 的死区发生器。三个通道的死区延时相同，由同一个寄存器（**FOC_DTR**）配置。当 **OCxREF** 上升沿发生时，**OCxL** 的实际输出高电平比 **OCxREF** 的上升沿延迟 **TIM0_DTR** 设定的时间；当 **OCxREF** 下降沿发生时，**OCxH** 的实际输出高电平比 **OCxREF** 的下降沿延迟 **TIM0_DTR** 设定的时间。如果延迟时间大于实际输出的脉宽，那么对应的通道脉宽不延迟，相反的通道脉宽不产生。

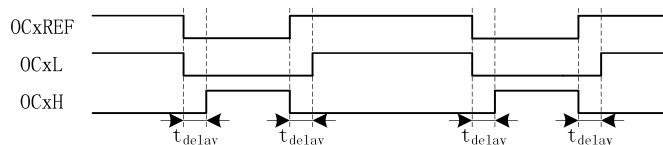


图 13-26 带死区插入的互补输出

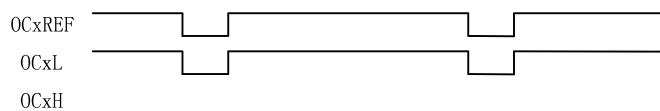


图 13-27 死区时间大于负电平

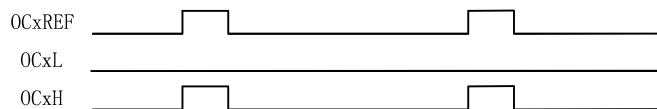


图 13-28 死区时间大于正电平

13.1.8 电机实时参数

FOC 模块在运算的过程中，用户可以查看实时角度值 THETA 和估算速度 EOME，还可以查看电机的其它实时参数，用户可以根据参数判定电机的实时状态。FOC 模块提供以下实时参数：

- 1、 角度值 THETA
- 2、 估算器角度 ETHETA，估算速度 EOME
- 3、 D 轴电压 UD， Q 轴电压 UQ
- 4、 D 轴电流 ID， Q 轴电流 IQ
- 5、 IPARK 模块坐标转换的 ALPHA 轴电压 VALP， BETA 轴电压 VBET
- 6、 母线电压计算模块算出的 ALPHA 轴电压 UALP， BETA 轴电压 UBET
- 7、 两相电流 IA,IB
- 8、 CLARKE 模块坐标转换的 ALPHA 电流 IALP（即 IA）， BETA 轴电流 IBET
- 9、 ALPHA 轴反电动势 EALP， BETA 轴反电动势 EBET
- 10、 反电动势平方 ESQU ← E square
- 11、 功率 POW

13.1.8.1 顺风逆风检测

FOC 提供专用的顺风逆风检测模块，配置 FOC_CR2 的 ESCMS=1，同时配置参考电流输入 IDREF,IQREF 均为 0，并启动 FOC 模块，可以通过读取估算角度 ETHETA 和估算速度 EOME 的值判断电机的状态，当 ETHETA 向下递减或者 EOME 为负值，则为逆风转动状态，需要先刹车，再以强制角度模式启动电机；当 ETHETA 向上递增或者 EOME 为正值，则为顺风转动状态，可直接切换估算器角度启动电机。

13.1.8.2 反电动势检测

估算器根据输入的电机参数估算出 α 轴反电动势 EALP 和 β 轴反电动势 EBET，由此输出 E_{α}^2 和 E_{β}^2 即 ESQU。用户可根据 ESQU 的值判定启动的状态，可实现堵转保护，缺相保护等功能。

13.1.8.3 功率

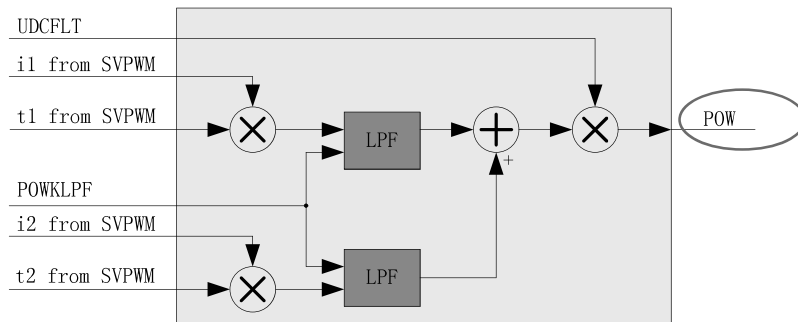


图 13-29 功率模块原理框图

通过由 FOC 内部的 SVPWM 模块得到电流和通电时间，以及滤波后的母线电压，经过计算得到功率。

13.1.9 中断

13.1.9.1 下溢中断

FOC Underflow Interrupt Enable

当 FOC 内部计数器向下计数至 0 时，产生下溢事件。配置 FOC_CR2 寄存器的 FUIE 使能中断，FUIE 可选择中断产生周期，即产生 1/2/3/4 次下溢事件后产生中断，下溢中断标记 FUIF 硬件置 1。软件对 FUIF 写 0 可清中断标记，写 1 无效。

FOC Underflow Interrupt Mode

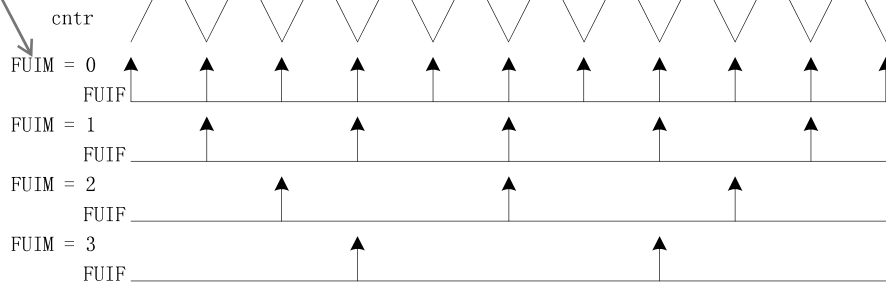


图 13-30 FOC 下溢中断

13.1.9.2 比较匹配中断

FOC Compatible Interrupt Mode

设置 FOC_CR3 寄存器的 FCIM 配置向上计数或者向下计数时进行比较匹配，设置比较匹配值 FOC_COMR，当 FOC 内部计数器的计数值等于 FOC_COMR，符合 FCIM 的设置则产生中断事件。配置 FOC_CR2 寄存器的 FCIE 使能中断，下溢中断标记 FCIF 硬件置 1。软件对 FCIF 写 0 可清中断标记，写 1 无效。

比较匹配

FOC Compatible Interrupt Flag

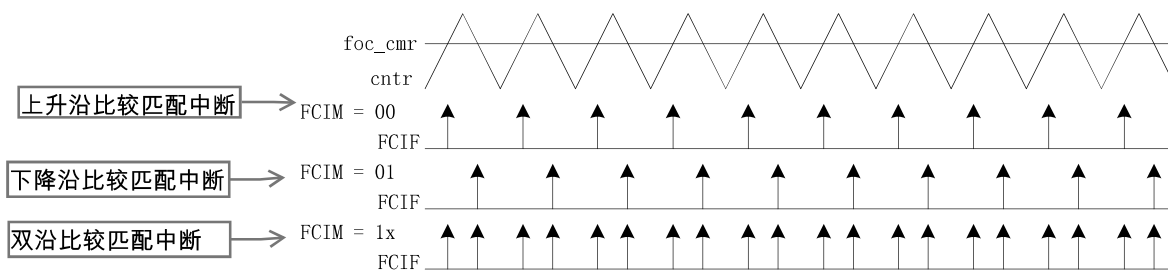


图 13-31 FOC 比较匹配中断

13.1.10 FOC 观测器

DeBug ENable

FOC 观测器将电机的实时变量以 **SPI** 的模式发送至上位机实时显示。通过配置 FOC_CR2 寄存器的 DBEN=1 使能 FOC 观测功能，FOC 观测开启时，SPI 接口会被占用。用户只需根据 FOC_FDS 寄存器配置选择每个通道需要发送的数据，FOC 观测器自动发送数据。FOC 观测器有 4 个通道，分成两组，通道 1 和通道 2 为一组，通道 3 和通道 4 为一组。

表 13-2 FOC 观测器输出变量表

| FDS12/FDS34 | 通道 1/3 | 通道 2/4 | 寄存器值 | 通道 1/3 | 通道 2/4 |
|-------------|---------------------|-------------|------|---------------------|--------------------------------|
| 0000 | THETA_SS (带软切换估算角度) | EOME (估算速度) | 1000 | EALP | IALP |
| 0001 | THETA (实际输出角度) | EOME 估算速度) | 1001 | ESQU | POW |
| 0010 | UD (D 轴电压) | UQ (Q 轴电压) | 1010 | IA | IB |
| 0011 | ID (D 轴电流) | IQ (Q 轴电流) | 1011 | IB | IC |
| 0100 | <u>UALP</u> | UBET | 1100 | UDCFLT (滤波母线电压) | RTHESTEP (爬坡步进值) |
| 0101 | <u>IALP</u> | IBET | 1101 | UALP | VALP |
| 0110 | EALP | EBET | 1110 | THETA_SS (带软切换估算角度) | ETHETA (估算角度) |
| 0111 | VALP | VBET | 1111 | IALP | IALP_EST (估算 <u>IALPHA</u> 电流) |