

基于STM32的 PMSM FOC软件库 培训



MCU Application
Great China

蒋建国

Shanghai,
March, 2008



Plan



- ▣ 直流无刷马达介绍
- ▣ FOC 基础
- ▣ Clark及Parke坐标系转换
- ▣ Circle limitation
- ▣ 磁链及力矩控制器
- ▣ 电流读取
 - ▣ 3电阻法
 - ▣ 电流传感器法
- ▣ 转子的速度/位置反馈:
 - ▣ Hall传感器
 - ▣ 正交编码器



直流无刷马达介绍

两种直流无刷马达

- ▣ **PMSM**：永磁同步马达

- ▣ **BLDC**：直流无刷马达

相似性

- ▣ 同步转矩；

- ▣ 转子为永磁体；

- ▣ AC定子电流

差异性

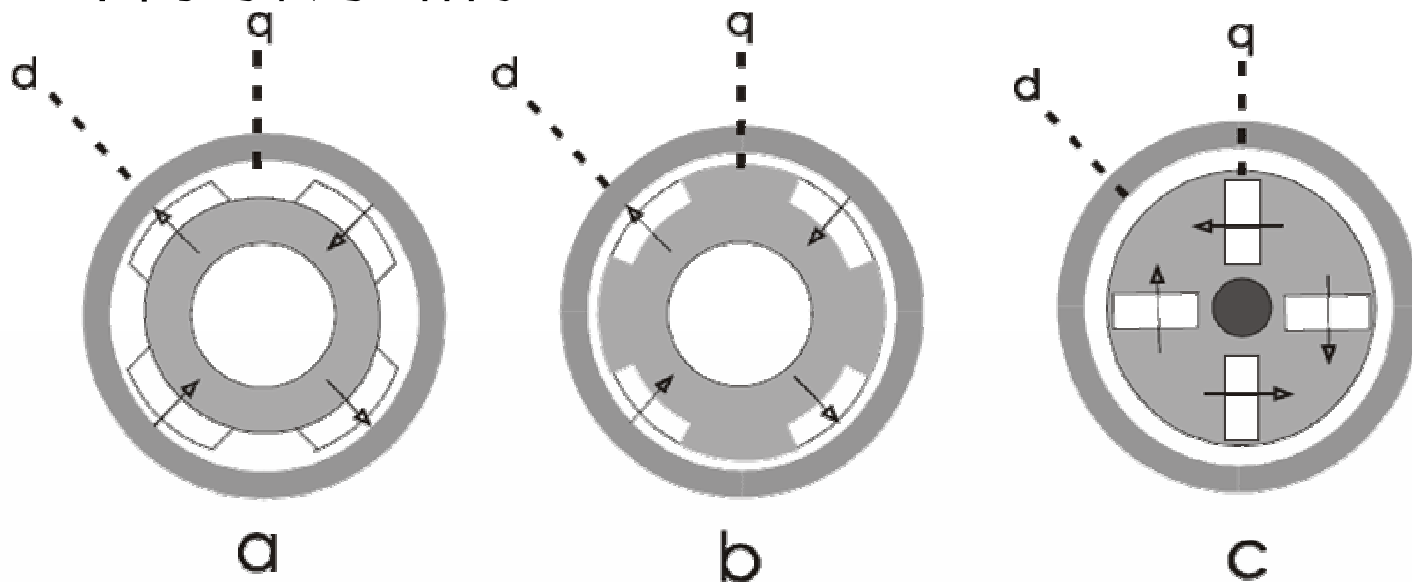
- ▣ PMSM的反电动势为正弦波，而BLDC的为梯形波；

- ▣ BLDC的电感较低；

- ▣ **PMSM需要正弦的定子电流来产生稳定的转矩，而BLDC的定子电流为梯形波**

PMSM: 永磁同步马达

不同的转子结构：



$$L_a < L_b < L_c$$

a) **SM-PMSM**: 表面贴式磁钢 ($L_d = L_q$) .

b) & c) **IPM-SM**: 内嵌式磁钢 ($L_d < L_q$) .

特别地， b) 内插式; c) 放射状内埋式

转子磁场定向控制 (FOC): 概述



STM32

数学理论应用于三相马达磁链及转矩的解耦控制

定子电流被分解成：
励磁电流信号

直轴电流 I_{ds} ：用于产生磁场，与转子的磁场叠加

交轴电流 I_{qs} ：用于控制转矩（其作用等同于直流电机的电枢电流）。

益处

马达转速可对负载的变化做出精确而快速的反应

效率优化

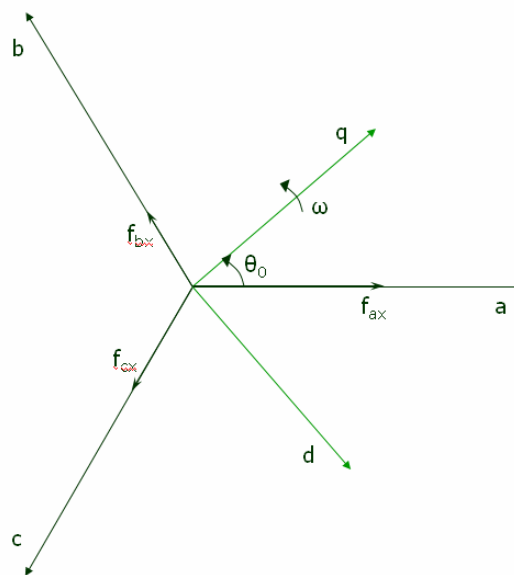
可进行位置控制（通过瞬时转矩控制）



坐标变换理论 (1/3)

坐标变换理论可以降低马达方程的复杂性，利用坐标变换把定子及转子变量变换到一个旋转坐标系中，该坐标系的转速为角速度 ω 。

假设 f_{ax} , f_{bx} , f_{cx} 为三相瞬时变量，位于相移120度的a,b,c坐标上， f_{qx} , f_{dx} , f_{0x} 为其变换变量，位于正交坐标d,q上：



坐标变换理论(2/3)

变换方程为：

$$f_{qdox} = \begin{pmatrix} f_{qx} \\ f_{dx} \\ f_{0x} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{ax} \\ f_{bx} \\ f_{cx} \end{pmatrix}$$

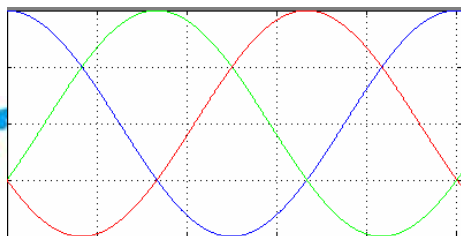
其中 $\theta = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0)$

3个变换方程用于PMSM矢量控制

- Clarke: $\omega=0, \theta(0)=0 \rightarrow \theta=0$; 故 $f_{qx}=f_{\alpha}=2/3(f_a-0.5*(f_b+f_c))=1/3f_a$
 $f_{dx}=f_{\beta}=2/3(1.732/2*(f_b-f_c))=1.732/3*(2f_a+f_b)$
- Park: $\omega=\omega_r, \theta(0)=\theta_r(0) \rightarrow \theta=\theta_r$; 该@r为@在以@r0为基础在某一时刻运行的角度, @r0则为dq轴相对于alfa轴, 的初始相对角度, 此角度可以人为设定, 一般为90度
- 反Park: $\omega=-\omega_r, \theta(0)=\theta_r(0) \rightarrow \theta=-\theta_r$; 若转速不变, 则Wr为定值, 则fqx,fdx,在转速不变时为定值

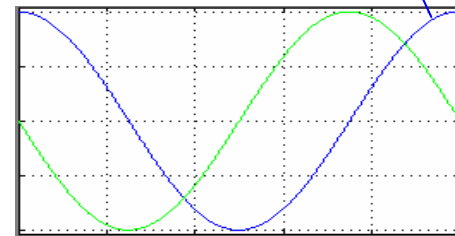
坐标变换理论(3/3)

Clarke变换应用于定子电流： i_{as}, i_{bs}, i_{cs} ：

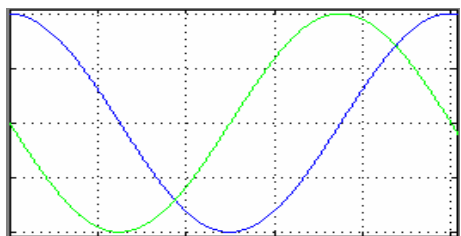


$$i_{\alpha} = i_{as}$$

$$i_{\beta} = -\frac{i_{as} + 2i_{bs}}{\sqrt{3}}$$

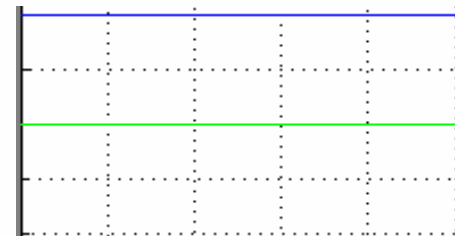


Park变换应用于定子电流： i_{α}, i_{β} ：

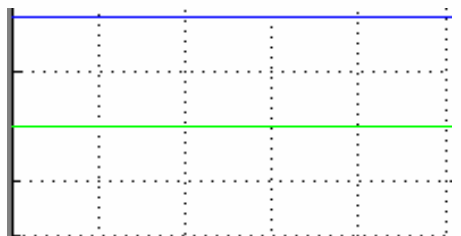


$$i_{qs} = i_{\alpha} \cos \theta_r - i_{\beta} \sin \theta_r$$

$$i_{ds} = i_{\alpha} \sin \theta_r + i_{\beta} \cos \theta_r$$

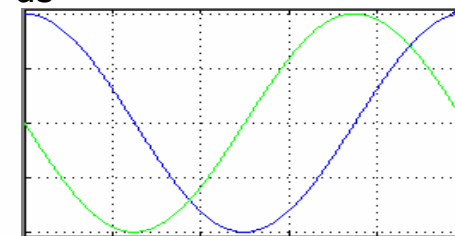


反Park变换应用于定子电压： v_{qs}, v_{ds} ：



$$v_{\alpha} = v_{qs} \cos \theta_r + v_{ds} \sin \theta_r$$

$$v_{\beta} = -v_{qs} \sin \theta_r + v_{ds} \cos \theta_r$$

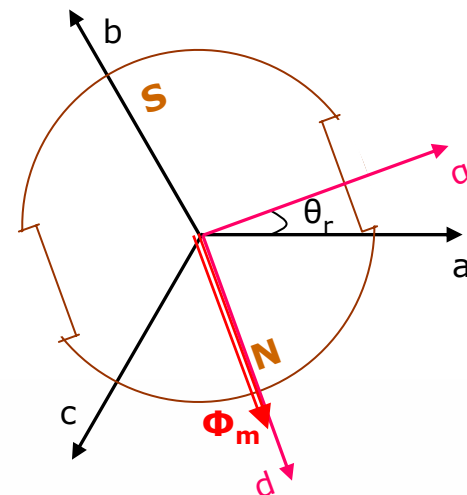


SM-PMSM FOC 1/3

参照右图，SM-PMSM马达的电压和磁链方程为：

$$v_{abc_s} = r_s i_{abc_s} + \frac{d\lambda_{abc_s}}{dt}$$

$$\lambda_{abc_s} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} i_{abc_s} + \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin \left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \Phi_m$$



SM-PMSM FOC 2/3



把上述的马达方程变换到与转子同步的d,q坐标系中，且使d轴定位在转子磁链轴上，可得到：

$$\begin{cases} v_{q_s} = r_s i_{q_s} + \frac{d\lambda_{q_s}}{dt} + \omega_r \lambda_{d_s} \\ v_{d_s} = r_s i_{d_s} + \frac{d\lambda_{d_s}}{dt} - \omega_r \lambda_{q_s} \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_{q_s} = L_s i_{q_s} \\ \lambda_{d_s} = L_s i_{d_s} + \Phi_m \end{cases}$$

磁链

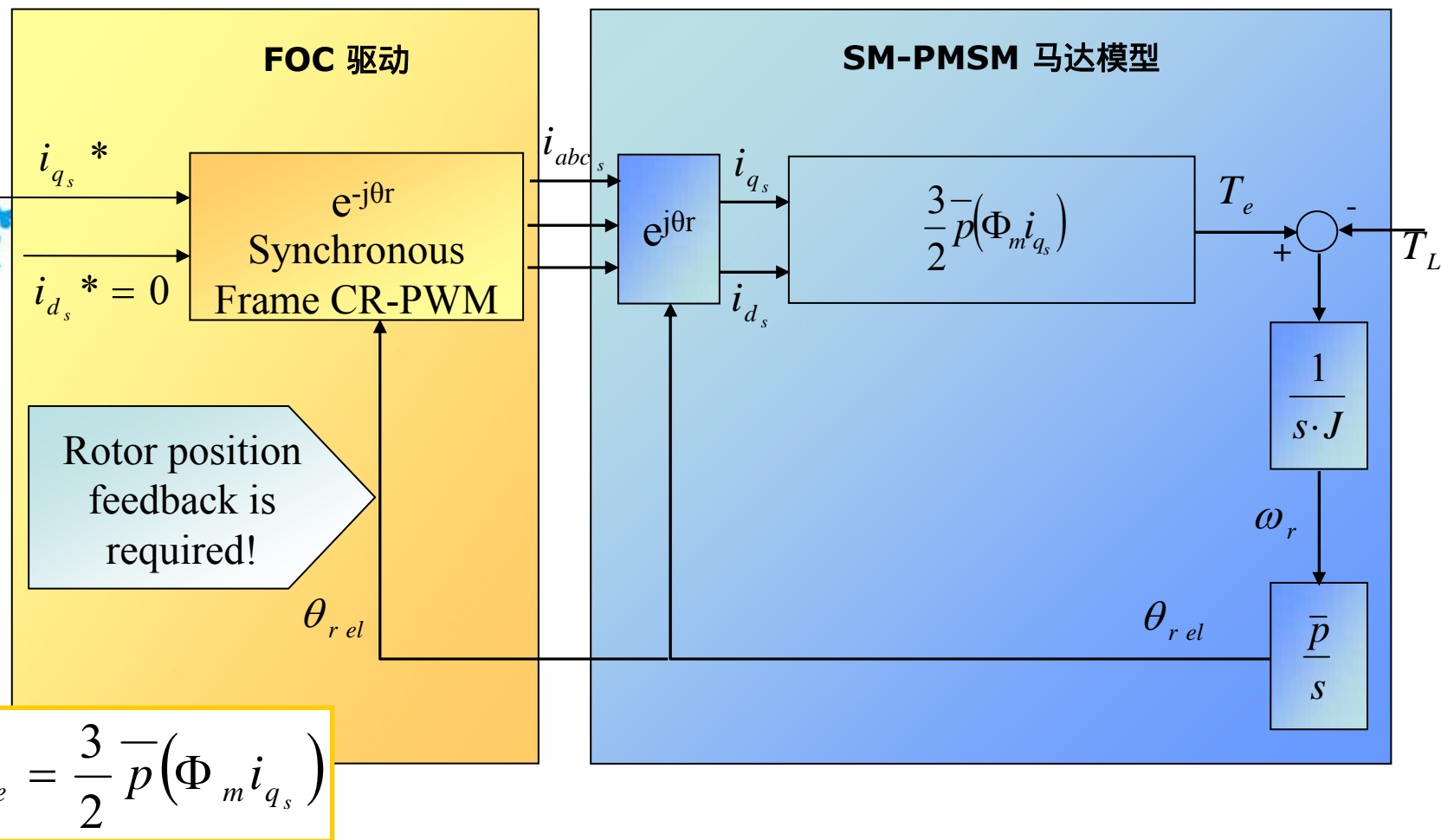
$$T_e = \frac{3}{2} \overline{p} (\lambda_{d_s} i_{q_s} - \lambda_{q_s} i_{d_s}) = \frac{3}{2} \overline{p} (L_s i_{d_s} i_{q_s} + \Phi_m i_{q_s} - L_s i_{q_s} i_{d_s})$$

当 $i_{q_s} = I_s$; $i_{d_s} = 0$ 时，转矩达到最大值

$$T_e = \frac{3}{2} \overline{p} (\Phi_m i_{q_s})$$

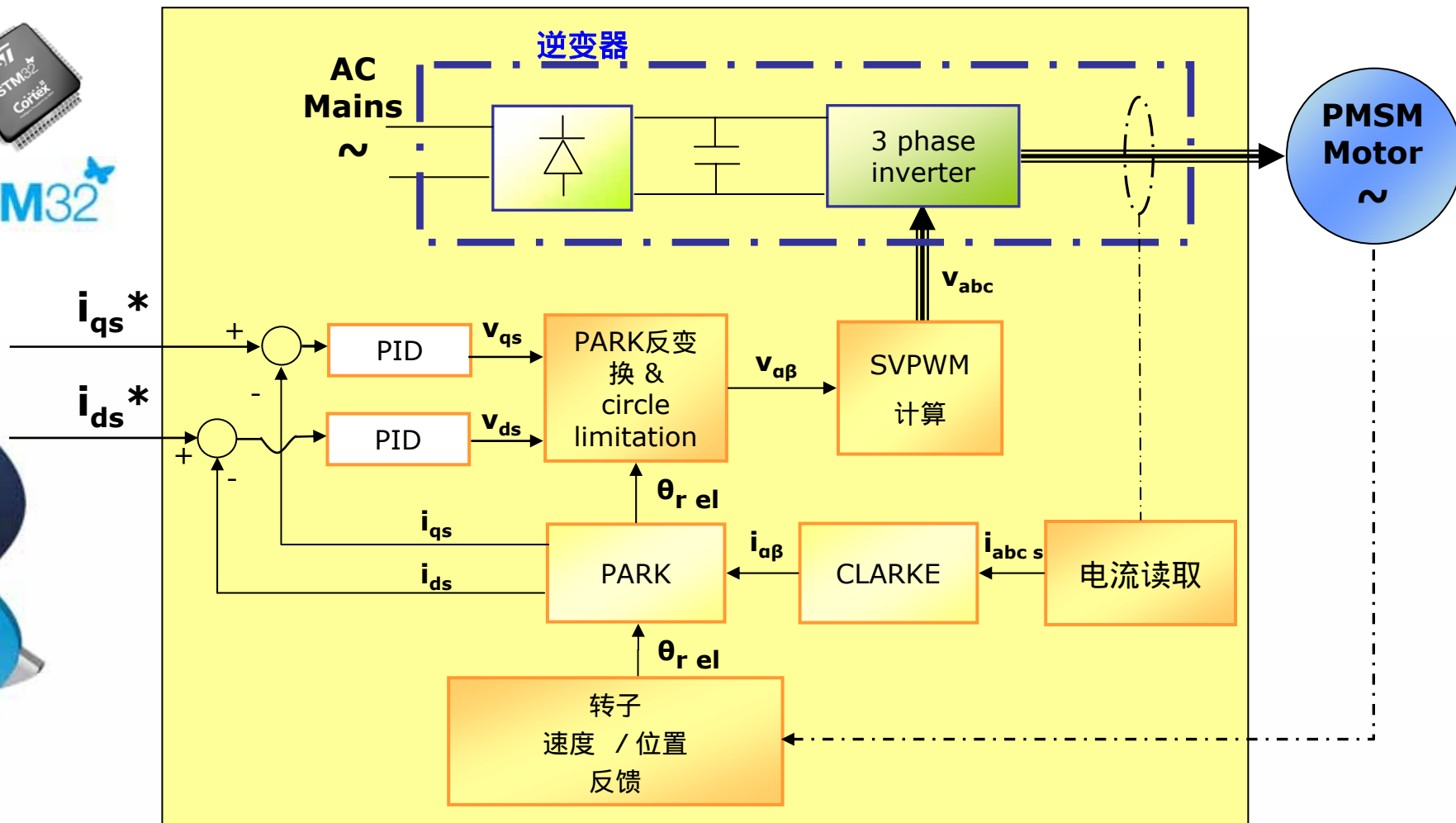


SM-PMSM FOC 3/3

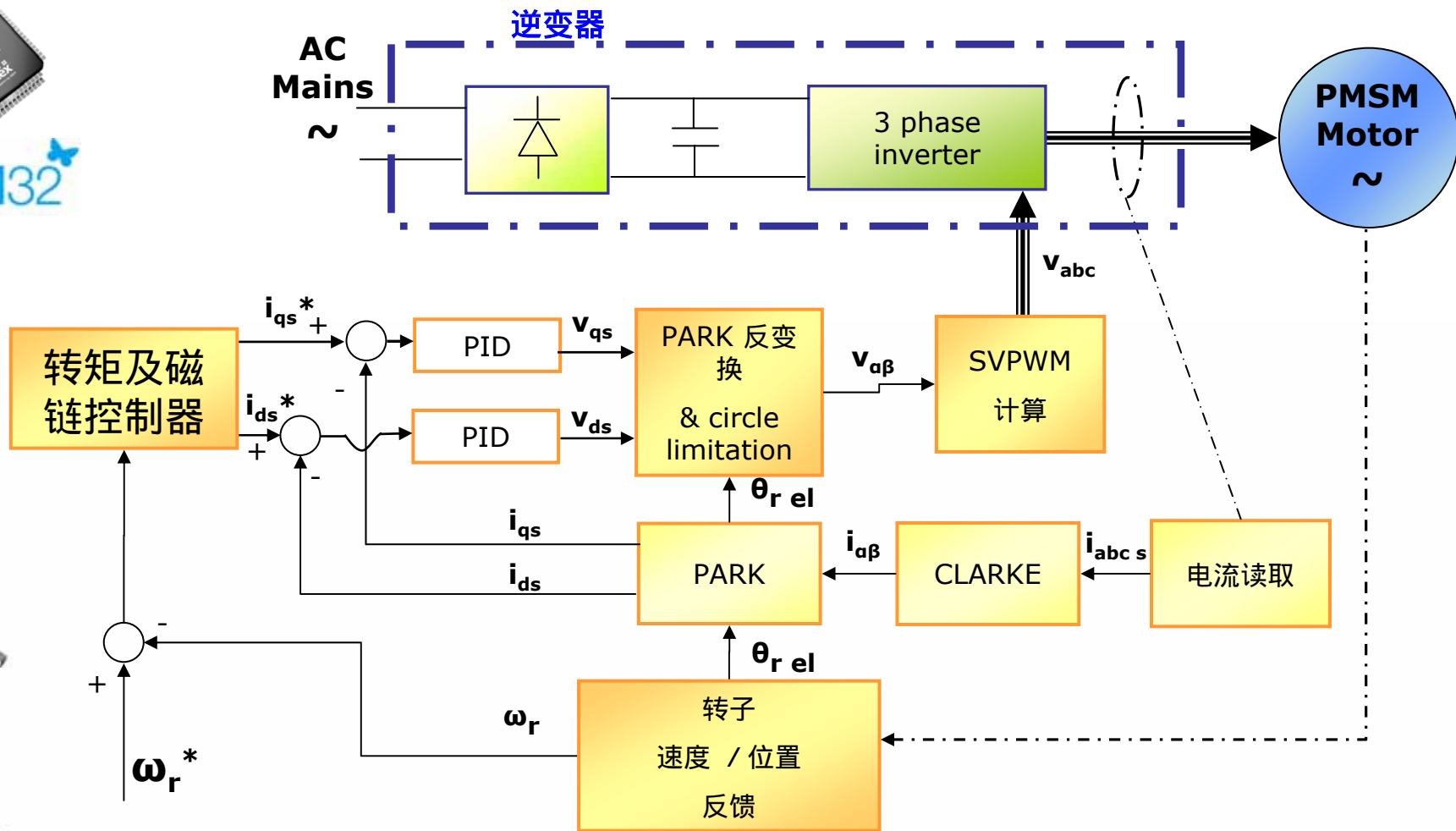


FOC 小结: 把定子电流分解为与转子磁链同相的直轴分量及正交的交轴分量

FOC 转矩控制



FOC 速度控制



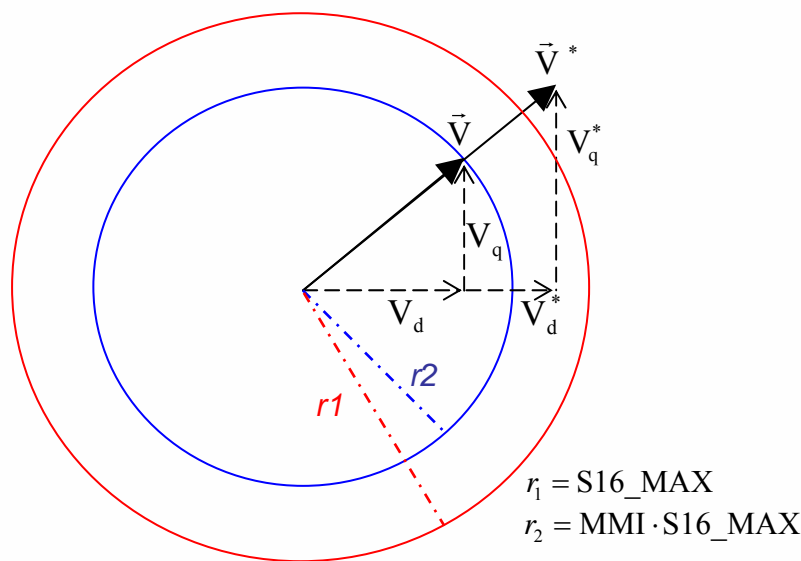
深入：circle limitation



STM32

从前面的分析可知： v_{qs} 与 v_{ds} 是由2个PID调节器单独计算的，因此需要正确计算电压矢量 \vec{V} ，使之输入到SVPWM模块

最大的电压幅值为：S16_MAX（即：32767），若使用3电阻法读取电流，它是PWM频率的函数（详见软件库中的MMI表）



$$V_q = \frac{V_q^* \cdot (\text{MMI} \cdot \text{S16_MAX})}{|\vec{V}^*|}$$

$$V_d = \frac{V_d^* \cdot (\text{MMI} \cdot \text{S16_MAX})}{|\vec{V}^*|}$$

$$\text{Look up table: } \frac{\text{MMI} \cdot \text{S16_MAX}^2}{|\vec{V}^*|}$$



深入：弱磁控制 1/3



STM32

~~很多应用需要使马达在额定转速以上运行：这可以通过弱磁控制的方法来实现。~~

额定转速是指马达能始终输出最高转矩的最高转速

可通过控制直轴电流 i_d 来降低磁通量，当然，代价是其同样降低了交轴电流 i_q ，最终输出转矩也降低。参见转矩方程：

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Phi_m i_{q_s})$$

而且，如果需要在弱磁控制区域运行，逆变器必须有刹车电阻或再生发电能力(昂贵的4象限AC-DC,...)



深入：弱磁控制 2/3



“转矩及磁链控制器” (FOC速度控制) 实时地提供：目标交轴电流 i_q (通过一个PID调节器实现) 及目标直轴电流 i_d (通过查MC_PMSM_Motor_param.h中的数据表实现)，以此来逼近目标转速。

该头文件由电子表格产生，在该表格中，需要填写如下参数：

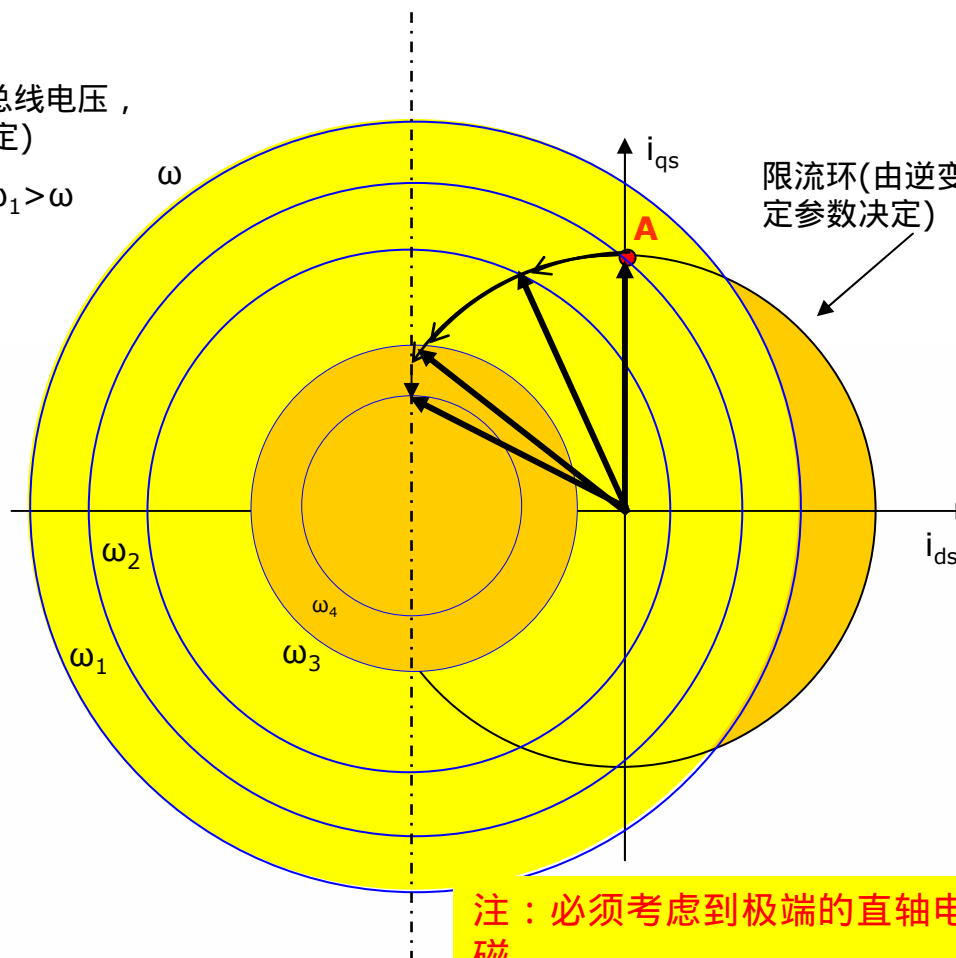
- 逆变器交流输入电压；
- R_s , 马达绕组电阻；
- L_s , 马达绕组电感；
- K_e , 马达反电动势常数；
- p , 极对数；
- I_n , 马达额定电流(< 逆变器额定电流)；
- MMI (它是PWM频率的函数)。

深入：弱磁控制 3/3



限压环 (由总线电压，
马达参数决定)

$$\omega_3 > \omega_2 > \omega_1 > \omega$$



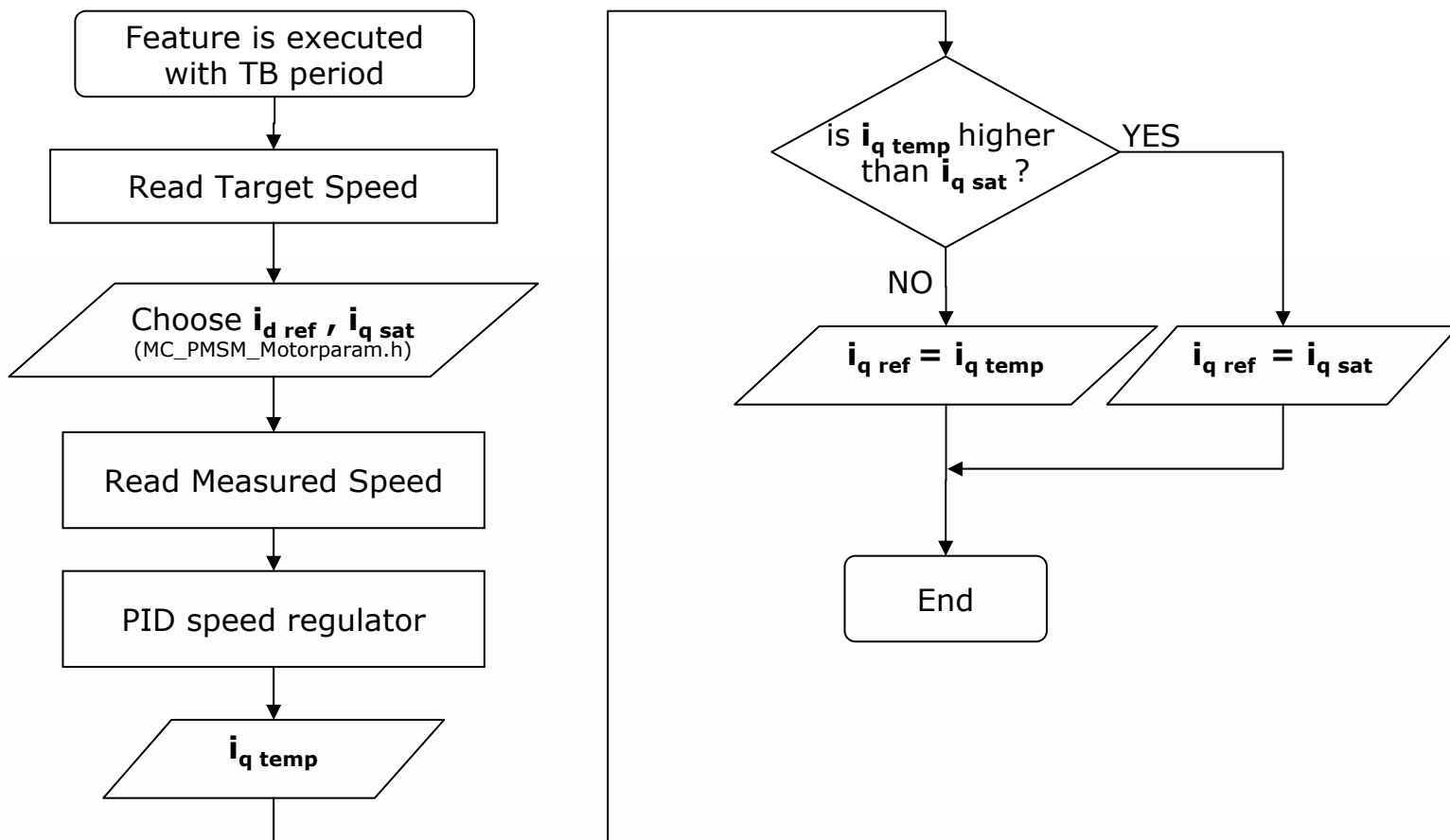
限流环 (由逆变器及马达的额
定参数决定)

注：必须考虑到极端的直轴电流 i_d 会导致永久性退磁。

深入：速度闭环调节

函数：

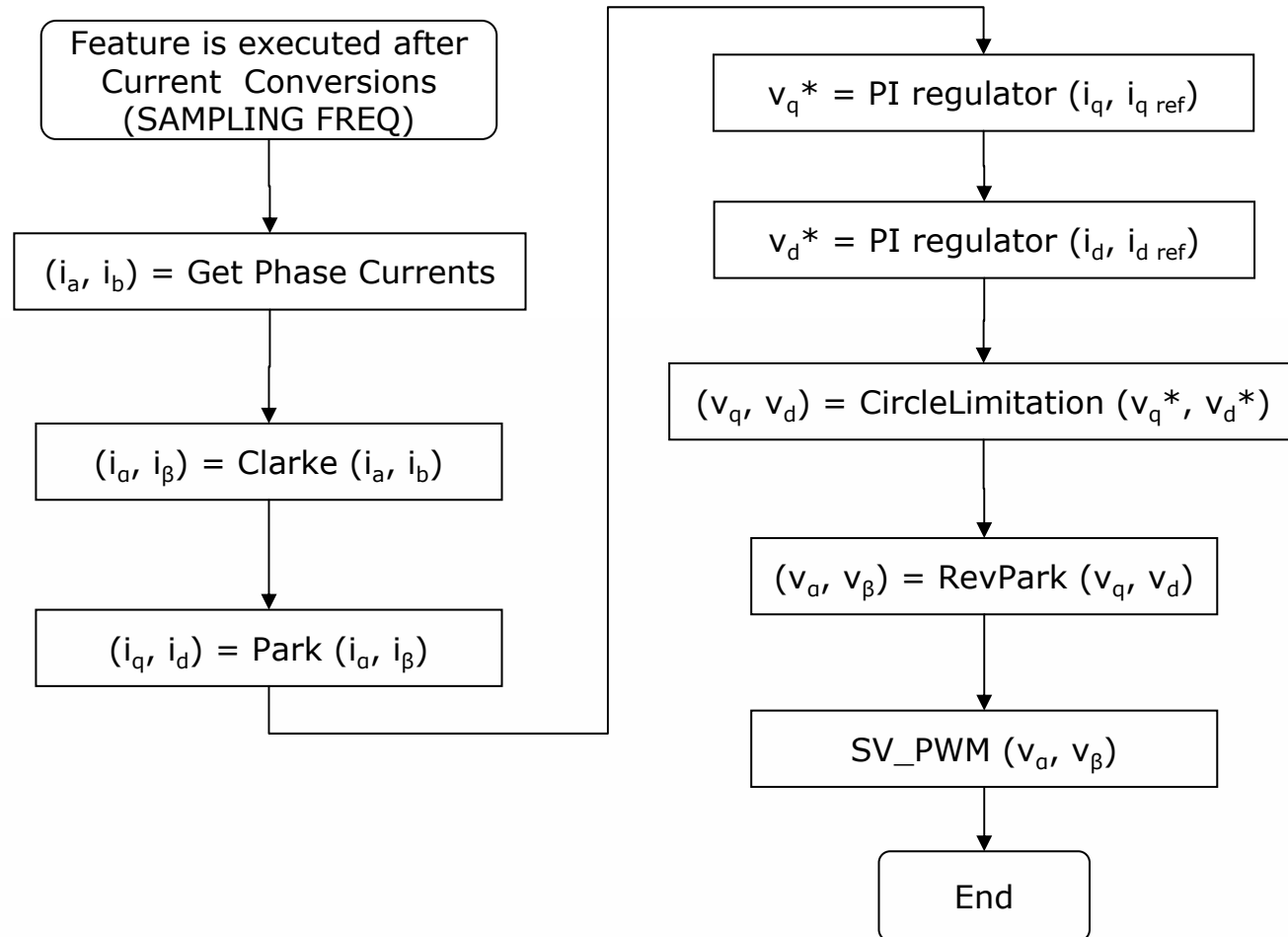
FOC_CalcFluxTorqueRef (MC_FOC_DRIVE.c)



FOC 实现

函数：

FOC_Model (MC_FOC_DRIVE.c)



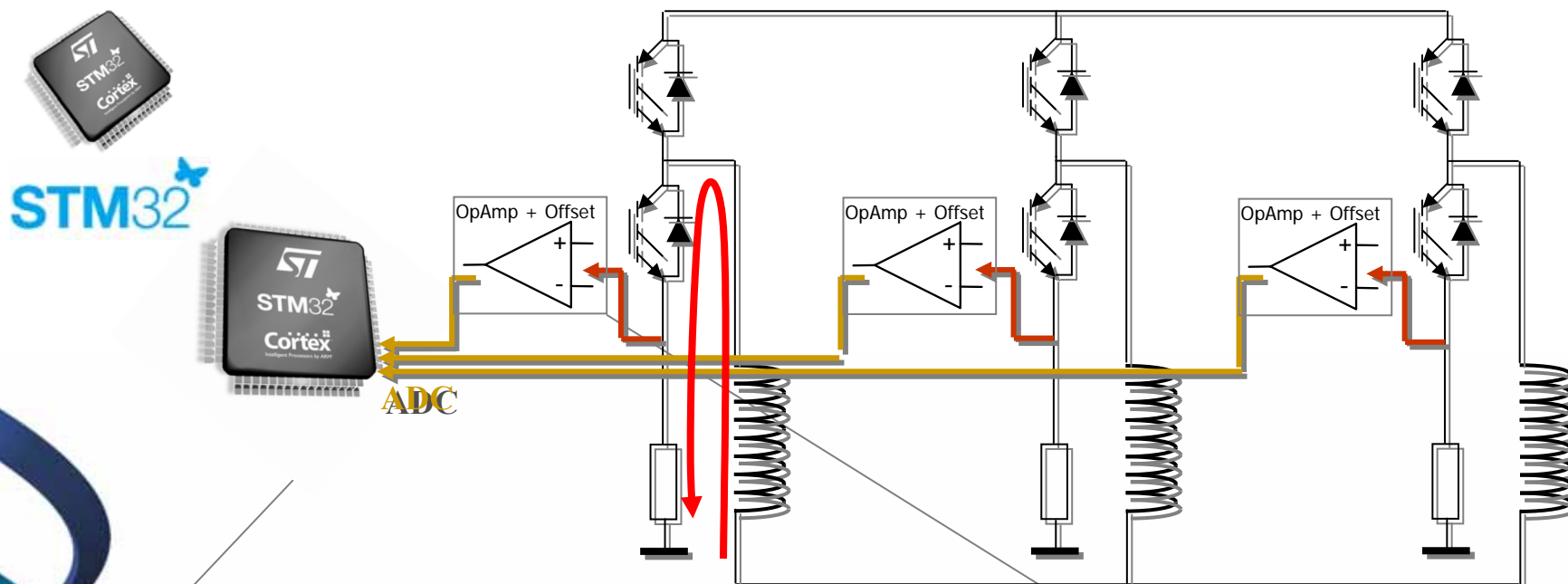
Plan



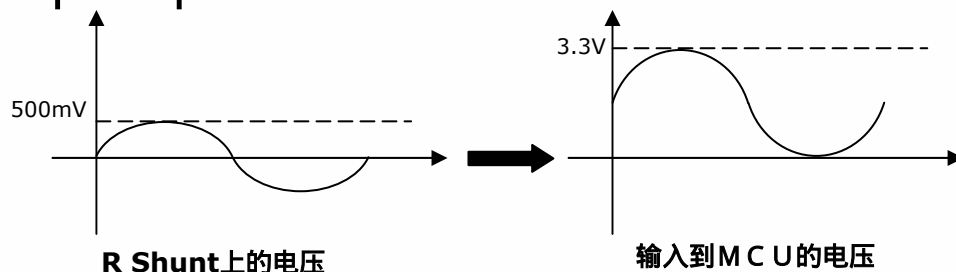
- ▣ 直流无刷马达介绍
- ▣ FOC 基础
- ▣ Clark及Parke坐标系转换
- ▣ Circle limitation
- ▣ 磁链及力矩控制器
- ▣ 电流读取
 - ▣ 3电阻法
 - ▣ 电流传感器法
- ▣ 转子的速度/位置反馈：
 - ▣ Hall传感器
 - ▣ 正交编码器



电流读取硬件结构（3电阻法）

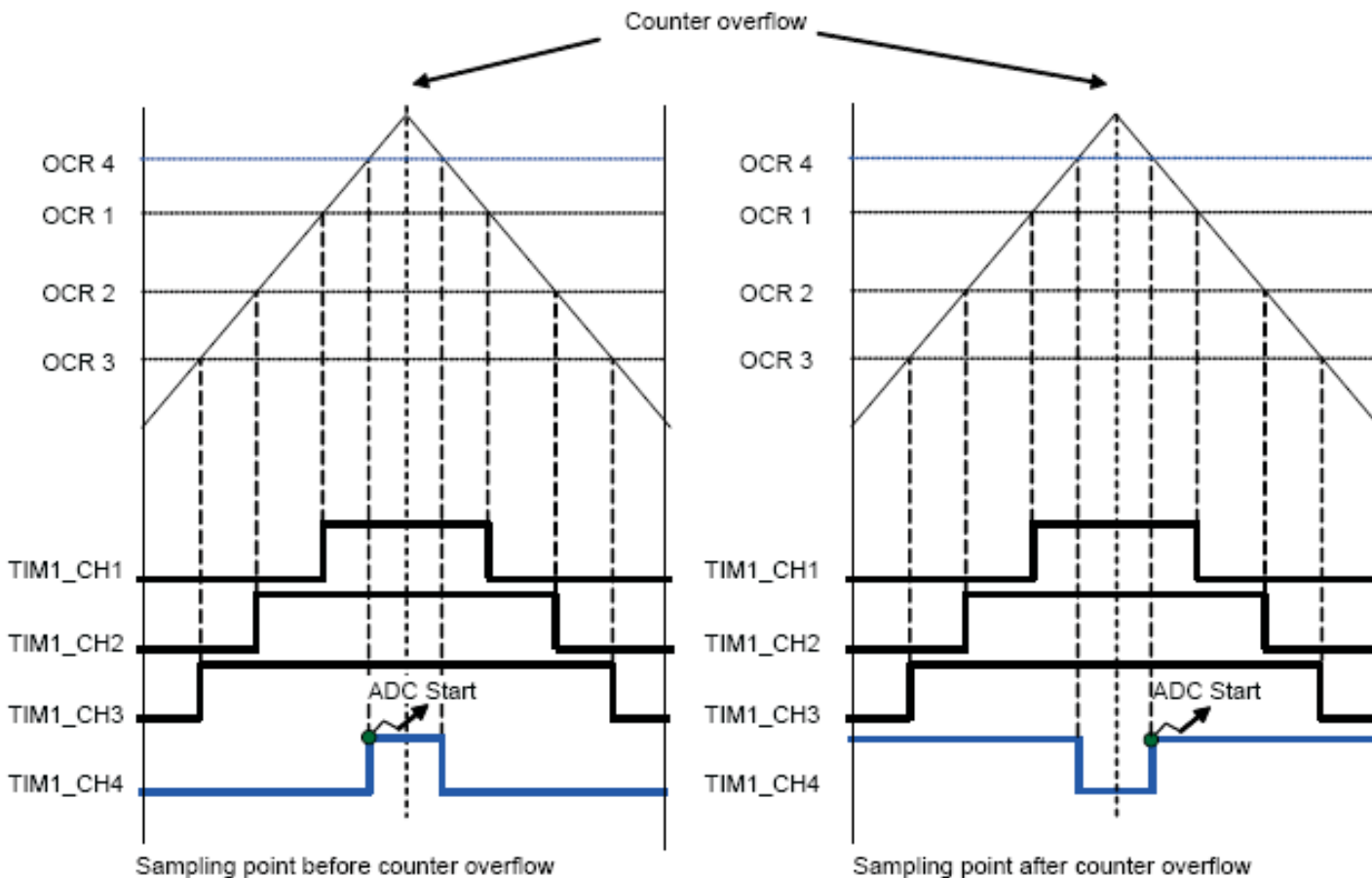


OpAmp + Offset




采样点 由TIM1的CH4输出触发采样

Figure 34. PWM and ADC synchronization



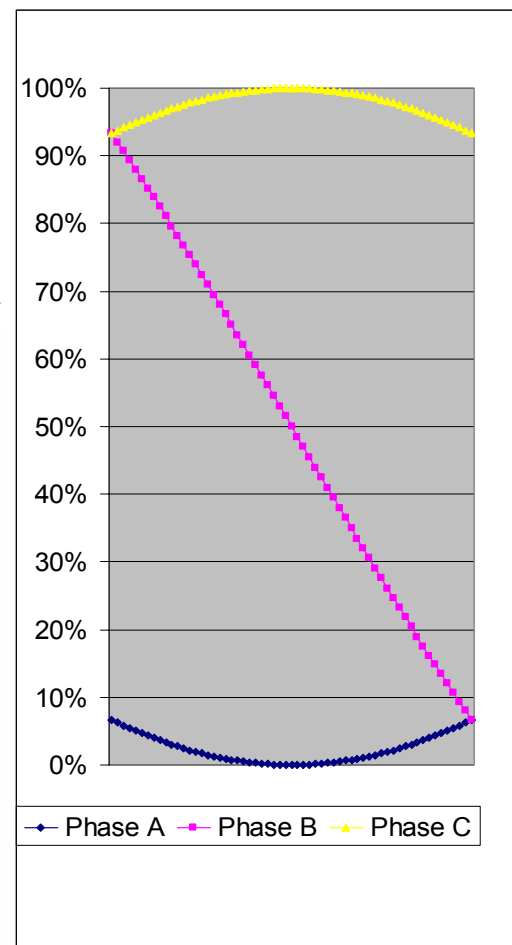
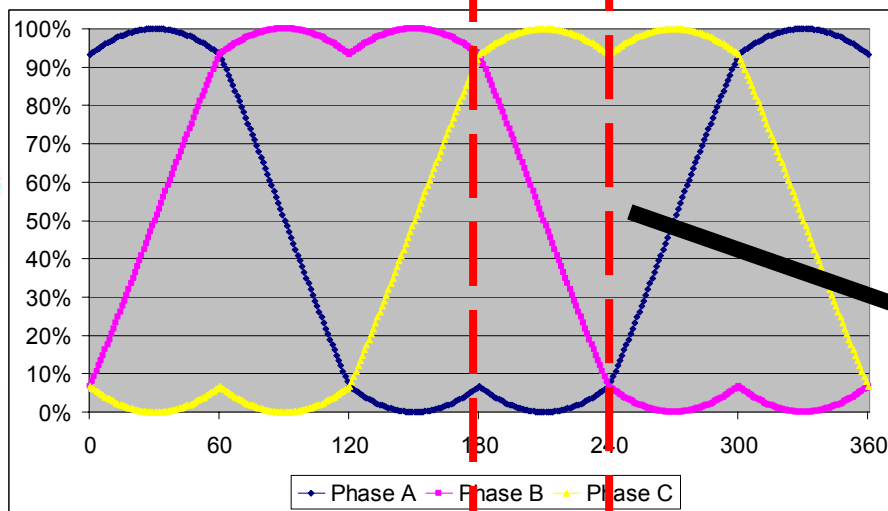
ai14835

注意事项

- 
- ❑ 必须读取两相的定子电流：由SVPWM的当前扇区决定该读哪两相电流；
 - ❑ 只有在下桥臂打开时，才能读到该相电流；
 - ❑ 每次桥臂开关状态有变化时，会在shunt电阻上的电压产生一个电子干扰，假设该干扰的时间长度为 T_{Noise} ；
 - ❑ 当下桥臂打开后，需要等待一段时间来使shunt电阻上的电压达到稳定值，假设该干扰的时间长度为 T_{Rise} ；
 - ❑ 在 T_{Noise} 及 T_{Rise} 期间不能读相电流；
 - ❑ 由于STM32 ADC/TIM1的高性能，我们可以在PWM周期的任意时刻读取电流。当然，我们希望在SVPWM的不同扇区，电流采样点无大的变化。

与SVPWM相关的问题

图：三相下桥臂的duty cycle



- 对于每个SVPWM扇区，总有 2 相桥臂的duty cycle 变化很小而另 1 相的duty cycle变化很大；
- 在下述的介绍中，我们假设C相下桥臂的duty cycle 最大，A相下桥臂的duty cycle最小，而B相下桥臂的duty cycle变化最大，如右图。

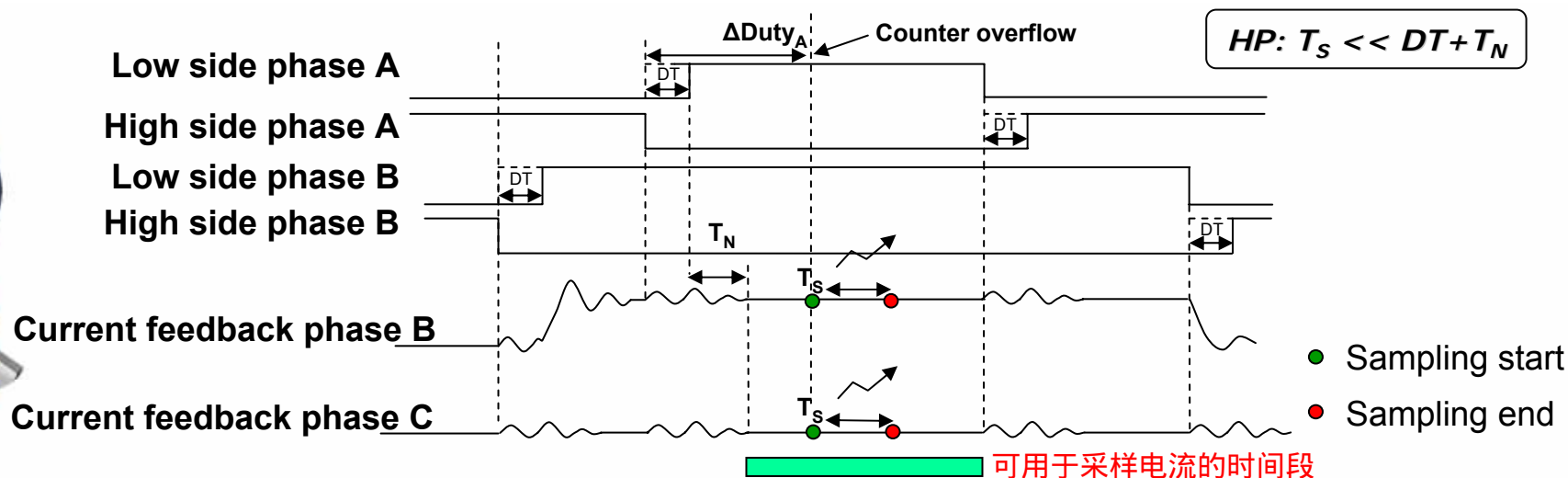
采样点的定义（1/4）：低调制系数



STM32

若 $\Delta\text{Duty}_A > D_T + T_N$ ：可以把采样点设在定时器的上溢处。

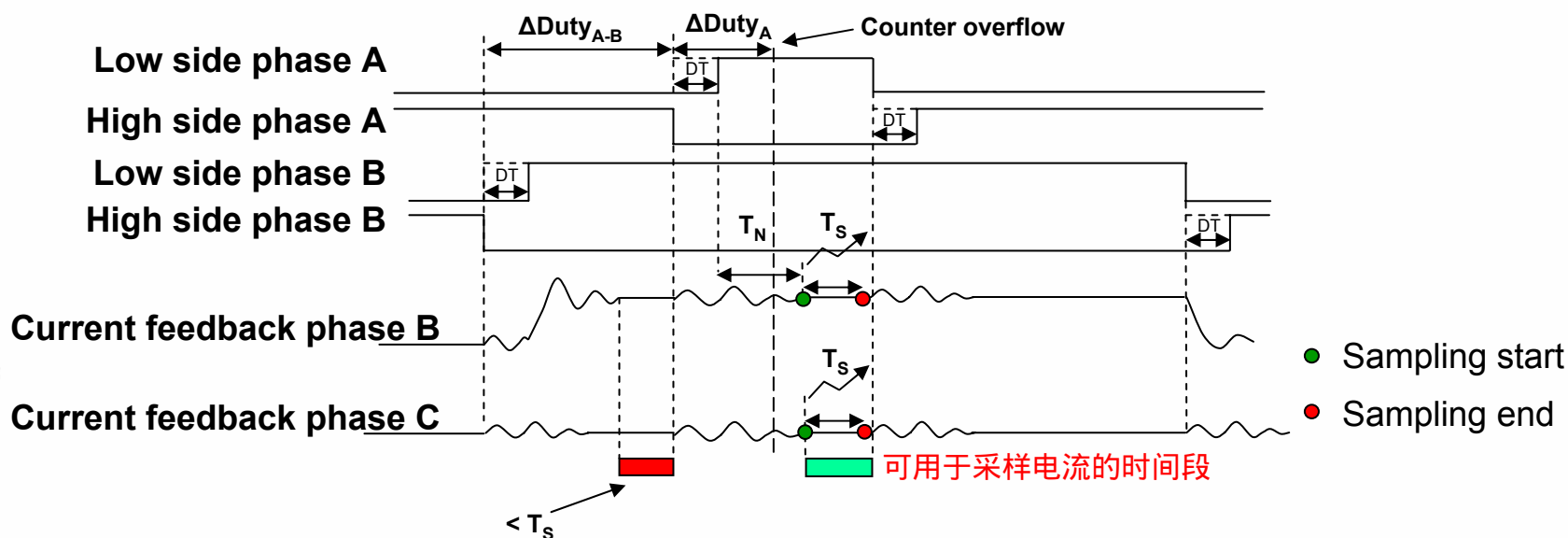
随着调制系数的增大，只要保证 $\Delta\text{Duty}_A > D_T + T_N$ ，则始终可以把采样点设在定时器上溢处。



采样点的定义（2/4）：高调制系数

若 $(DT + T_N + T_S)/2 < \Delta Duty_A < DT + T_N$ & $\Delta Duty_{A-B} < DT + T_R + T_S$:

可以把采样点设在A相下桥臂打开后 $T_N \mu s$ 处

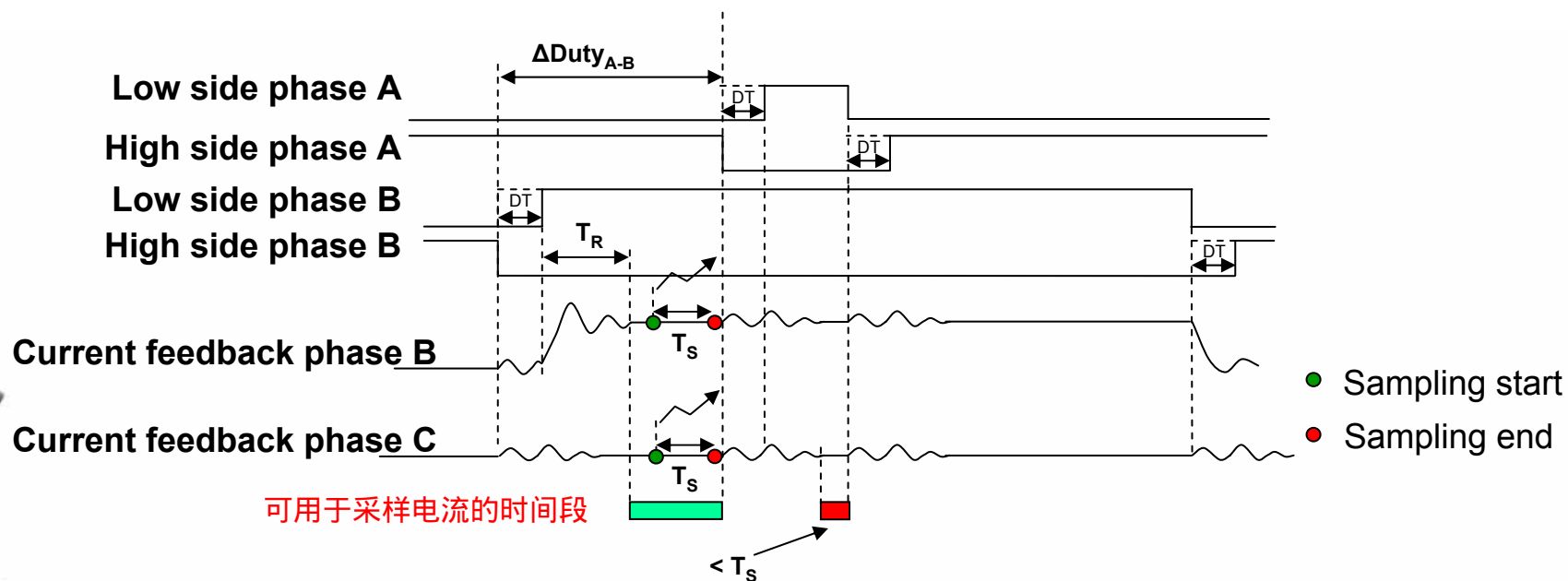


采样点的定义 (3/4) : 高调制系数



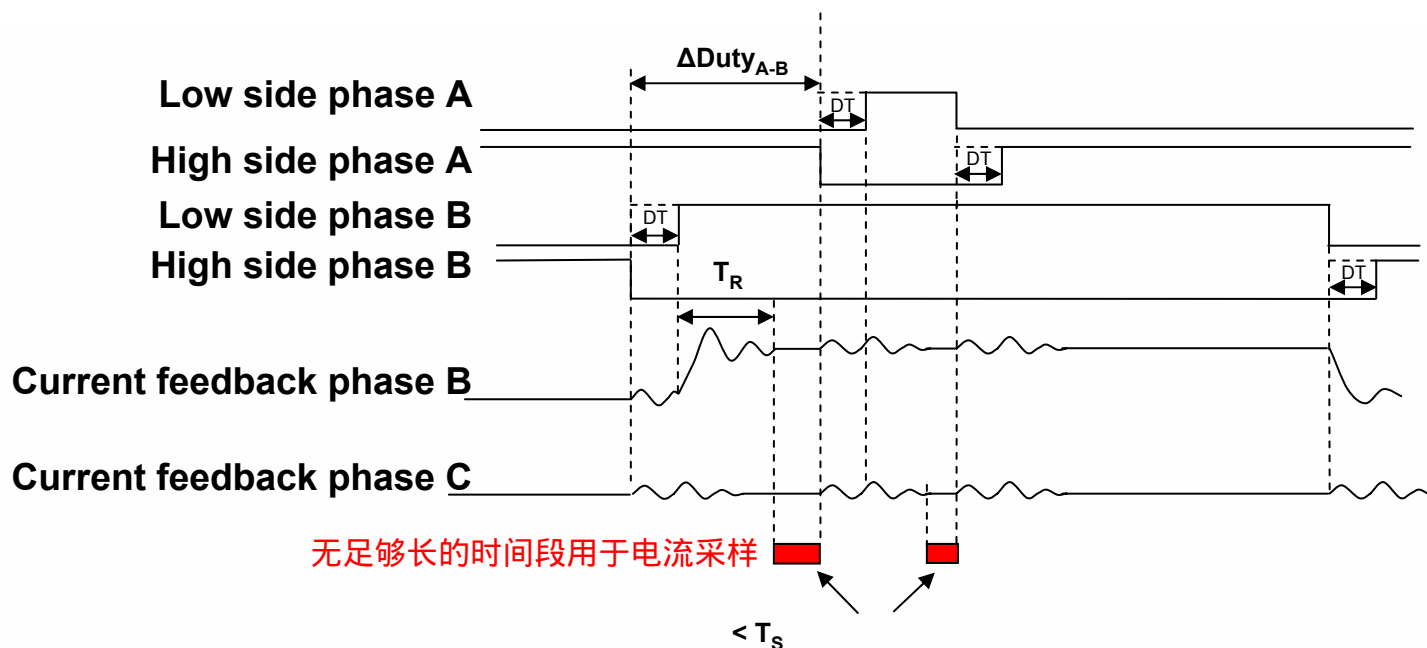
STM32

若 $\Delta \text{Duty}_A < (\text{DT} + T_N + T_S)/2$ & $\Delta \text{Duty}_{A-B} > \text{DT} + T_R + T_S$:
可以把采样点设在A相上桥臂关断前 T_S μs 处。



采样点的定义（4/4）：高调制系数

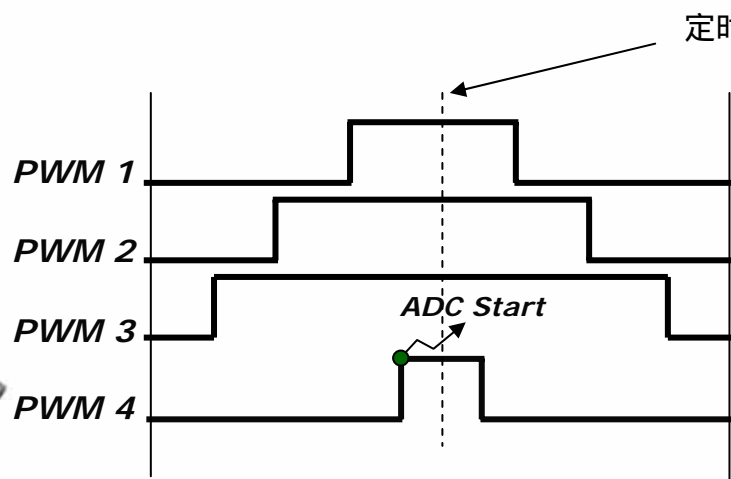
- 若 $\Delta \text{Duty}_A < (\text{DT} + T_N + T_S)/2$ & $\Delta \text{Duty}_{A-B} < \text{DT} + T_R + T_S$:
则无法采样相电流。为了避免此情况，必须降低调制系数（MMI）或PWM 频率。



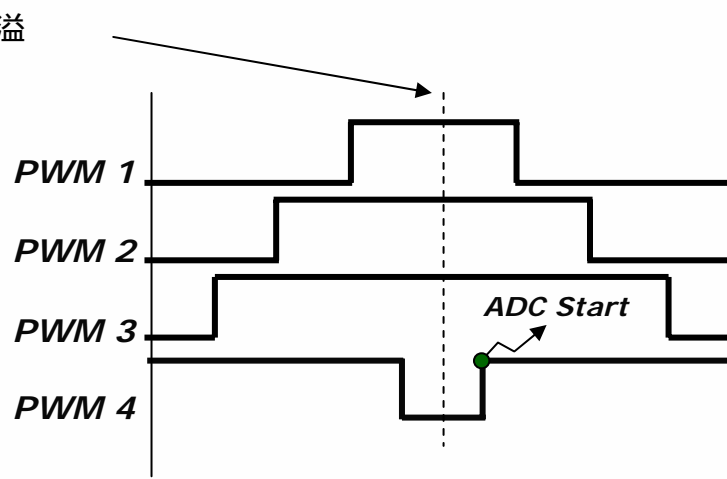
采样点的实现



- TIM1的PWM1, 2,3 用于驱动逆变器；
- 为了设置采样点，需要用到ADC外设的外部触发能力；
- 相电流的ADC转换由PMW4上升沿触发；
- 为了在定时器上溢后采样相电流，要求反转PWM4信号的极性

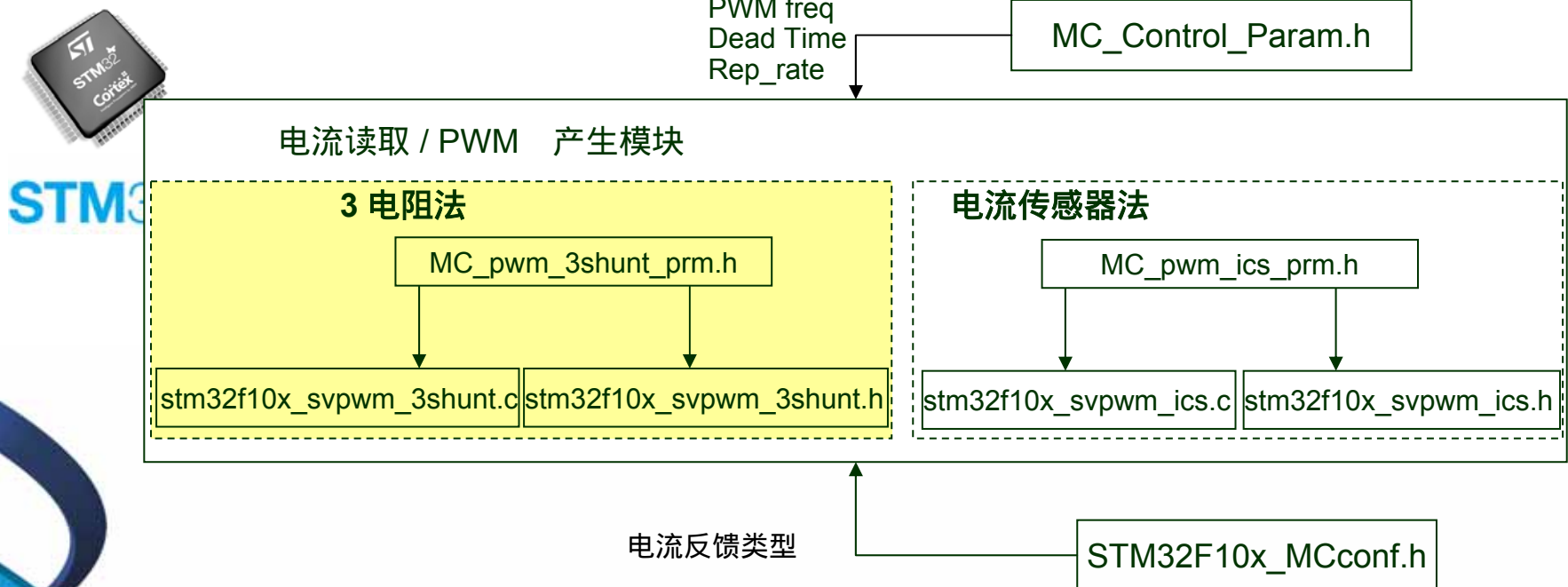


采样点在定时器上溢前



采样点在定时器上溢后

软件结构



- ❑ **STM32F10x_MCconf.h** : 定义用于选定的电流反馈类型 ;
- ❑ **MC_Control_Param.h** : 定义**PWM** 频率 (及MMI- 最大调制系数), 死区时间(ns) 及寄存器更新率**REP_RATE** ;
- ❑ **MC_pwm_3shunt_prm.h** : 定义采样时间 T_s , T_{Noise} 及 T_{Rise} (ns)。

定制 1/2



STM32F10x_MCconf.h

```
/* Current sensing by ICS (Isolated current sensors) */  
// #define ICS_SENSORS  
/* Current sensing by Three Shunt resistors */  
#define THREE_SHUNT
```

MC_Control_Param.h

```
/* Power devices switching frequency */  
#define PWM_FREQ ((u16) 12500) // in Hz  
/* Deadtime Value */  
#define DEADTIME_NS ((u16) 800) // in nsec; range is [0...3500]  
/* Uncomment the Max modulation index */  
/* corresponding to the selected PWM frequency */  
// #define MAX_MODULATION_100_PER_CENT // up to 11.4 kHz PWM frequency  
// #define MAX_MODULATION_99_PER_CENT // up to 11.8 kHz  
// #define MAX_MODULATION_98_PER_CENT // up to 12.2 kHz  
#define MAX_MODULATION_97_PER_CENT // up to 12.9 kHz  
...  
/* ADC IRQ-HANDLER frequency, related to PWM */  
#define REP_RATE (1)
```



定制 2/2

MC_pwm_3shunt_prm.h

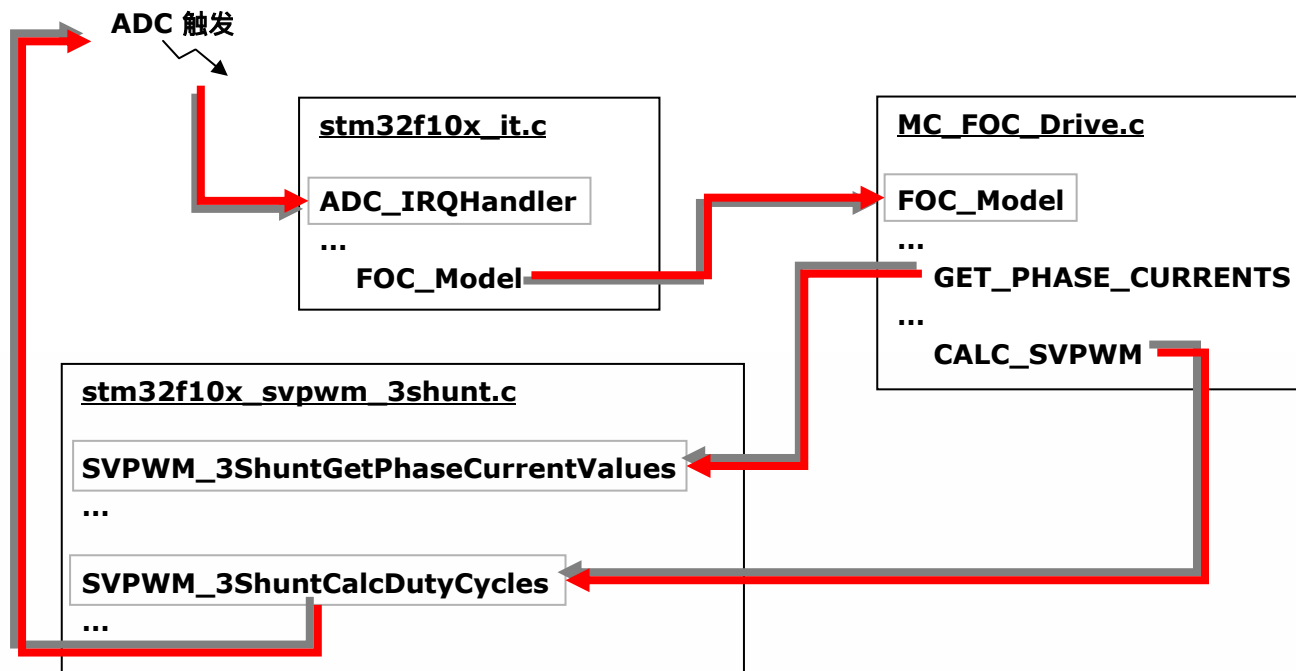


STM32

```
#define SAMPLING_TIME_NS (u16)(700) //0.7usec  
#define TNOISE_NS (u16)(2550) //2.55usec  
#define TRISE_NS (u16)(2550) //2.55usec
```



3 电阻法程序流程

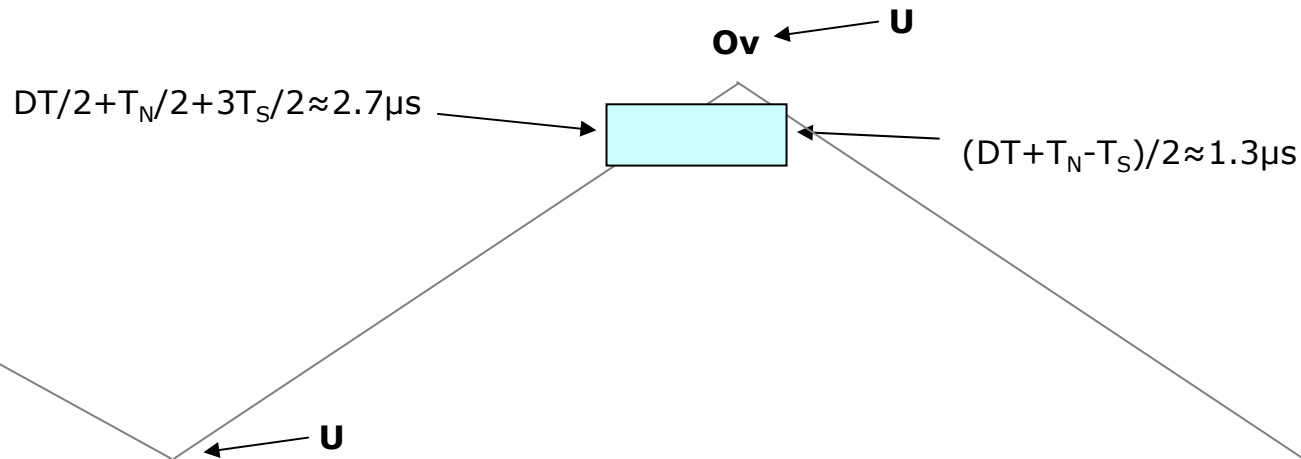


■ 触发ADC，并随之调用ADC_IRQ。

U(Update) 事件



- 从上述可知：ADC转换在定时器上溢的附近被触发；
- ADC转换可在定时器上溢前 $DT/2 + T_N/2 + 3T_S/2$ 到定时器上溢后 $(DT + T_N - T_S)/2$ 的时间段触发；
- 如果在定时器上溢处产生U事件，不可能在定时器上溢前触发ADC；
- 因此，必须在定时器下溢处产生U事件。

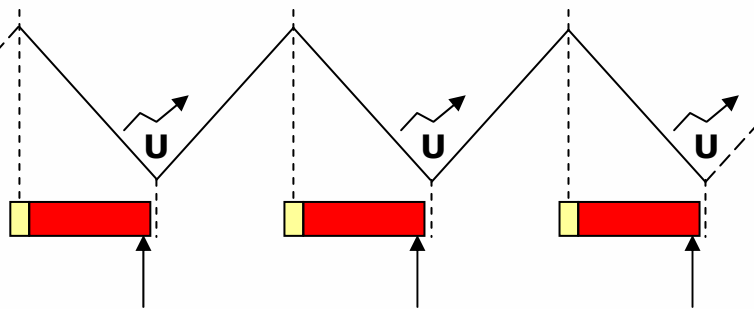


REP_RATE 定义

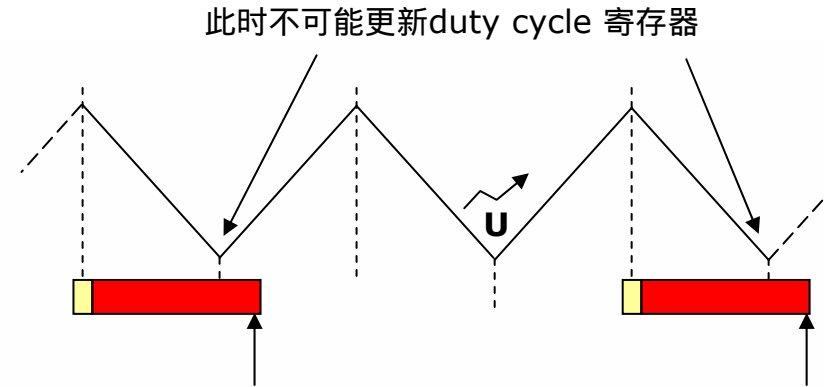


STM32

如果PWM频率太高，则有可能在下个U事件到来之前，FOC所计算的新的duty cycle得不到更新。因此，这种情况下必须增大REP_RATE。



REP_RATE = 1



REP_RATE = 3

电流采样时间段

FOC 周期

新的duty cycle已准备好



性能



PWM frequency	Max Duty Cycle	Max Modulation Index	REP_RATE
Up to 11.4kHz	100%	100%	1
12.2kHz	99%	98%	1
12.9kHz	98.5%	97%	1
13.7kHz	98%	96%	1
14.4kHz	98%	96%	1
15.2kHz	97%	94%	1
16kHz	96.5%	93%	1
16.7kHz	96.5%	93%	3
17.5kHz	95.5%	91%	3

此数据为测试所得

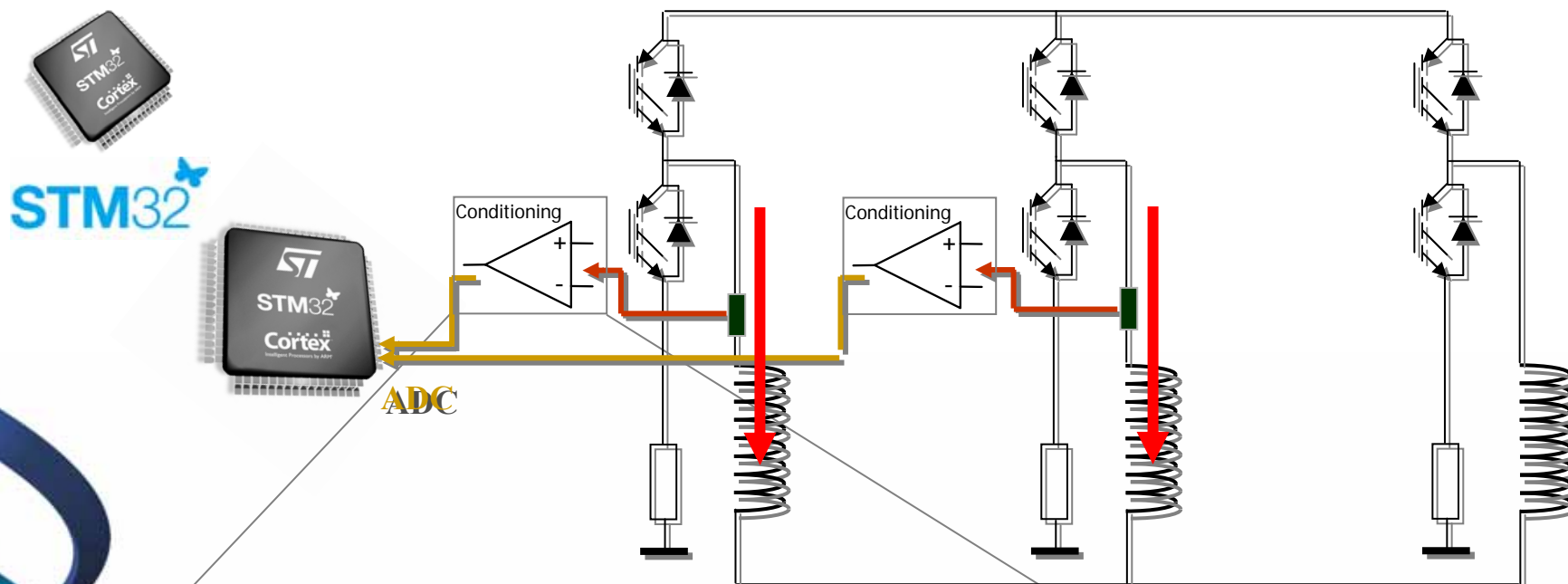
这些参数来自**MB459**

$T_N = T_R = 2,55 \mu s$

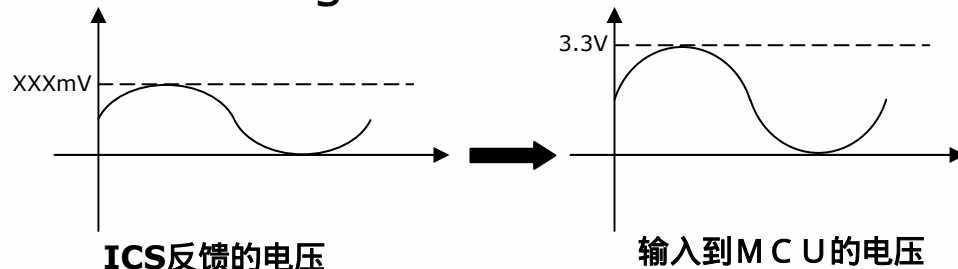
$T_S = 0,7 \mu s$

$DT = 0,8 \mu s$

电流读取硬件结构(电流传感器法)



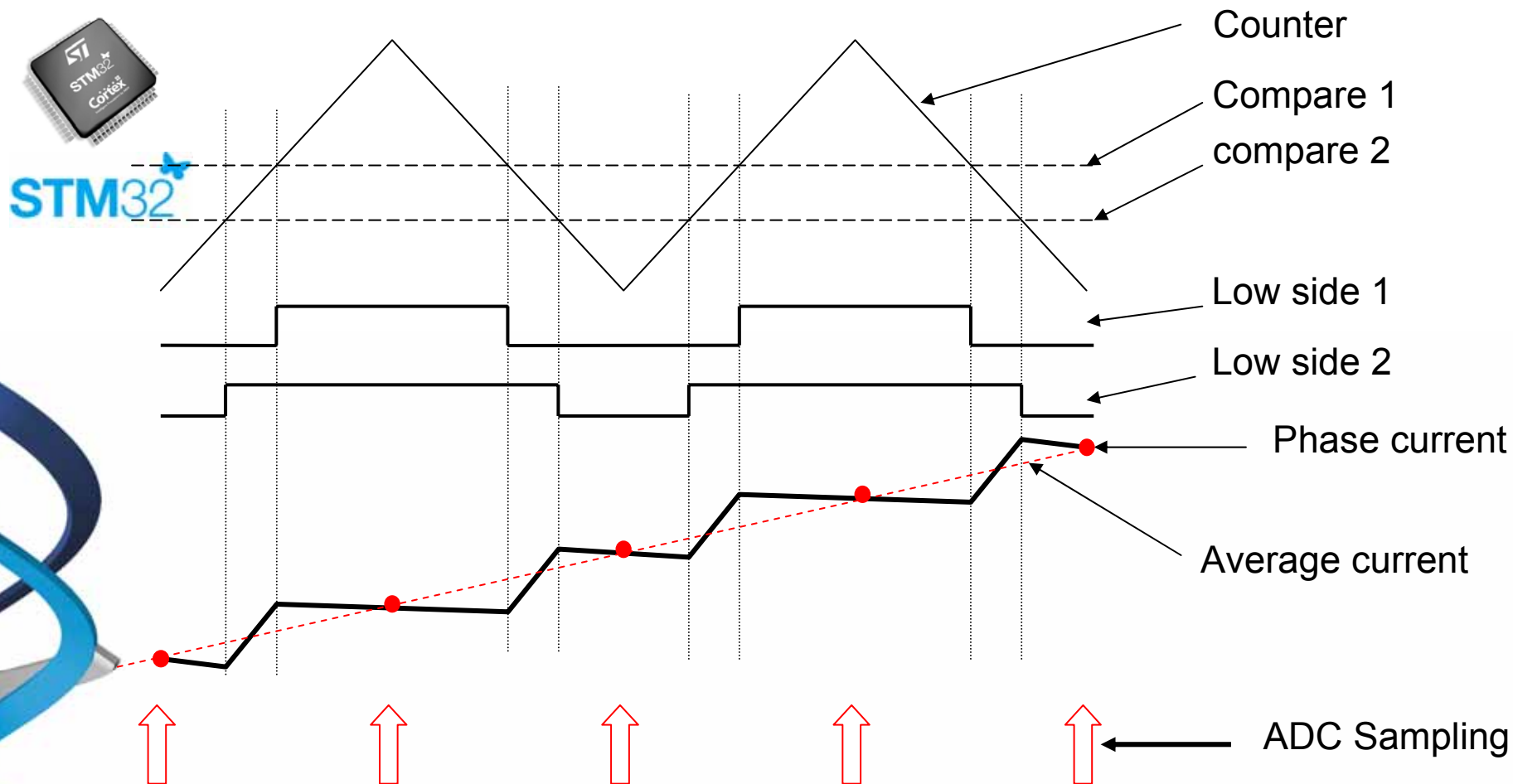
Conditioning Network



此硬件网络应根据传感器的特性设计，一般来说，不需要加offset。

必须保证：电流流出逆变器时，ICS产生正的电压

采样点

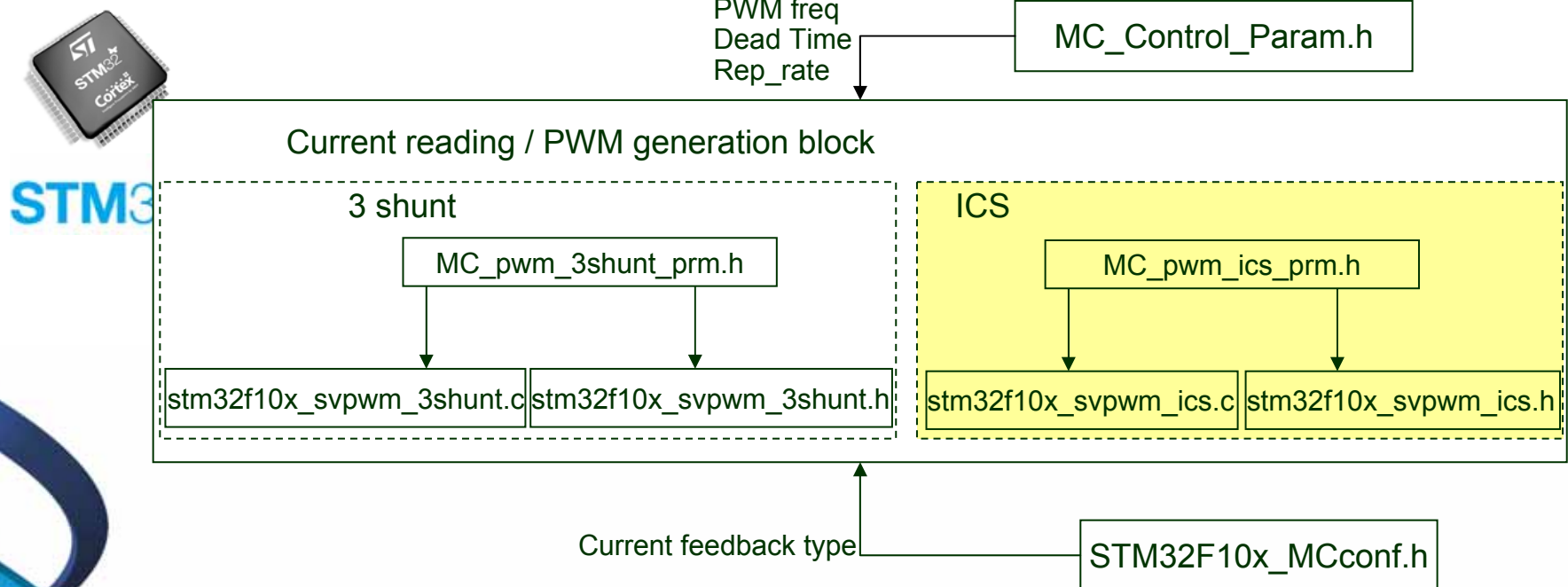


注意事项



- 只需读取固定的两相定子电流(如：A 相和 B相)；
- 不需要在下桥臂打开时读该相电流；
- 在逆变器开关状态变化时，不需要等待 T_{noise} 或 T_{rise} 后才采样电流；
- 因此，始终可以用U事件来触发ADC，且duty cycle一直可以达到100%。

软件结构



- **STM32F10x_MCconf.h** : 定义用于选定的电流反馈类型 ;
- **MC_Control_Param.h** : 定义**PWM** 频率 (及MMI- 最大调制系数), 死区时间(ns) 及寄存器更新率**REP_RATE** ;

定制



STM32F10x_MCconf.h

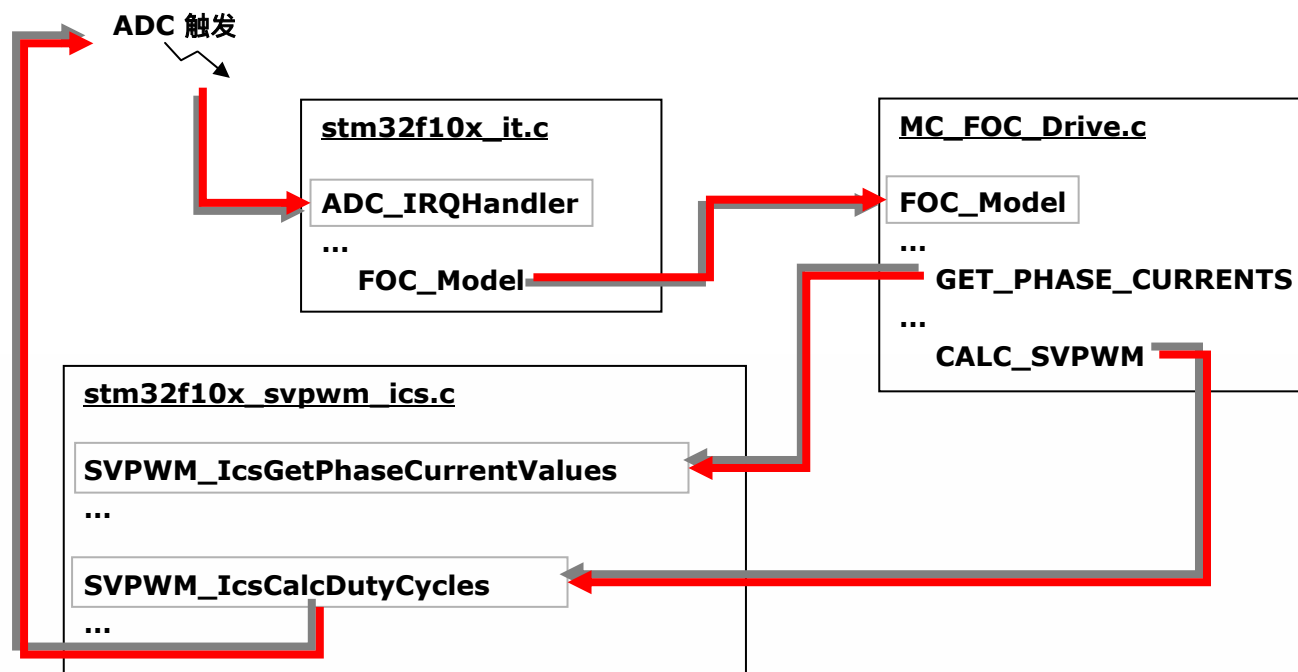
```
/* Current sensing by ICS (Isolated current sensors) */
#define ICS_SENSORS
/* Current sensing by Three Shunt resistors */
// #define THREE_SHUNT
```

MC_Control_Param.h

```
/* Power devices switching frequency */
#define PWM_FREQ ((u16) 14400) // in Hz
/* Deadtime Value */
#define DEADTIME_NS ((u16) 800) // in nsec; range is [0...3500]
/* Uncomment the Max modulation index */
/* corresponding to the selected PWM frequency */
#define MAX_MODULATION_100_PER_CENT // up to 11.4 kHz PWM frequency
// #define MAX_MODULATION_99_PER_CENT // up to 11.8 kHz
// #define MAX_MODULATION_98_PER_CENT // up to 12.2 kHz
// #define MAX_MODULATION_97_PER_CENT // up to 12.9 kHz
...
/* ADC IRQ-HANDLER frequency, related to PWM */
#define REP_RATE (3)
```



ICS 电流读取程序流程



在FOC模块之后，调用宏**CALC_SVPWM(SVPWM_IcsCalcDutyCycles)**，其功能为：计算下个更新周期的duty cycle

Plan



- ▣ 直流无刷马达介绍
- ▣ FOC 基础
- ▣ Clark及Parke坐标系转换
- ▣ Circle limitation
- ▣ 磁链及力矩控制器
- ▣ 电流读取
 - ▣ 3电阻法
 - ▣ 电流传感器法
- ▣ 转子的速度/位置反馈:
 - ▣ Hall传感器
 - ▣ 正交编码器



转子的速度/位置反馈



- 如前所述，Park变换的执行需要知道转子的位置
- “转子的速度/位置反馈” 模块为FOC算法提供了转子的角度信号并且为速度外环提供了速度信号（在速度控制模式下）
- 当前的库文件支持三种转子的速度/位置反馈：
 - 3 Hall 传感器 (60° or 120°)
 - 正交编码器
 - 无传感器

速度变量格式

在库文件中使用了两种格式：

- $F_{0.1\text{Hz}}$ ，该格式供速度环PID（在速度控制模式下）及用户界面层使用
- Digit Per PWM (F_{dpp})，其表示每个PWM周期转子角度的变化量 (s16)。该格式可直接累加从而得到转子的位置。 $F_{0.1\text{Hz}}$ 与 F_{dpp} 的关系为：

$$F_{\text{dpp}} = F_{0.1\text{Hz}} \frac{65536}{10 \cdot F_{\text{PWM}}(\text{Hz})}$$

Hall 传感器

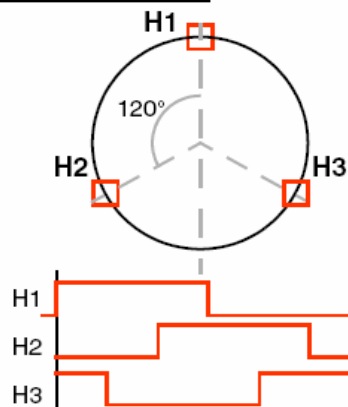
■ Hall 传感器可感知转子磁场的极性

■ 一般地，在三相永磁马达中：

■ 三个Hall 传感器用于反馈转子的位置信号；

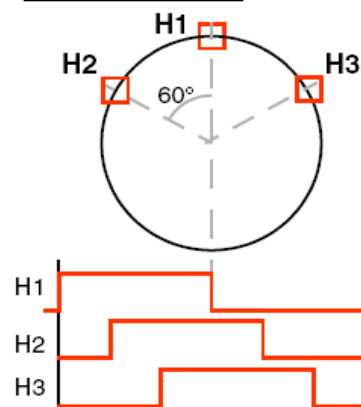
■ 该三个Hall 传感器可以是120°或60°放置的。

3 Sensor 120°



State5 → State1 → State3 →
State2 → State6 → State4 → ...

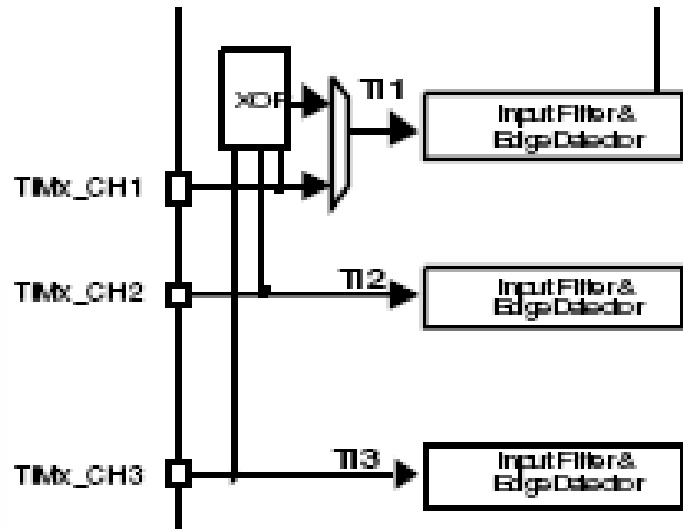
3 Sensor 60°



State1 → State3 → State7 →
State6 → State4 → State0 → ...

STM32的Hall 传感器接口

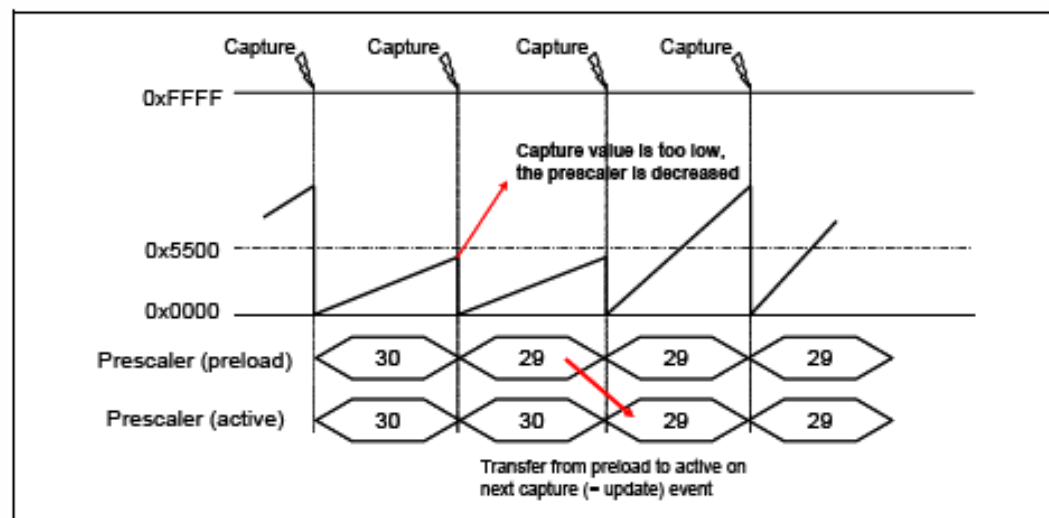
- STM32的定时器在发送Hall信号到输入捕捉逻辑模块之前对这三个信号进行异或；



- 当输入捕捉发生时，计数器的值先保存而后计数器被硬件清0 (clear-on-capture) ；
- 注意：库文件中的输入捕捉极性是异或信号的下降沿。

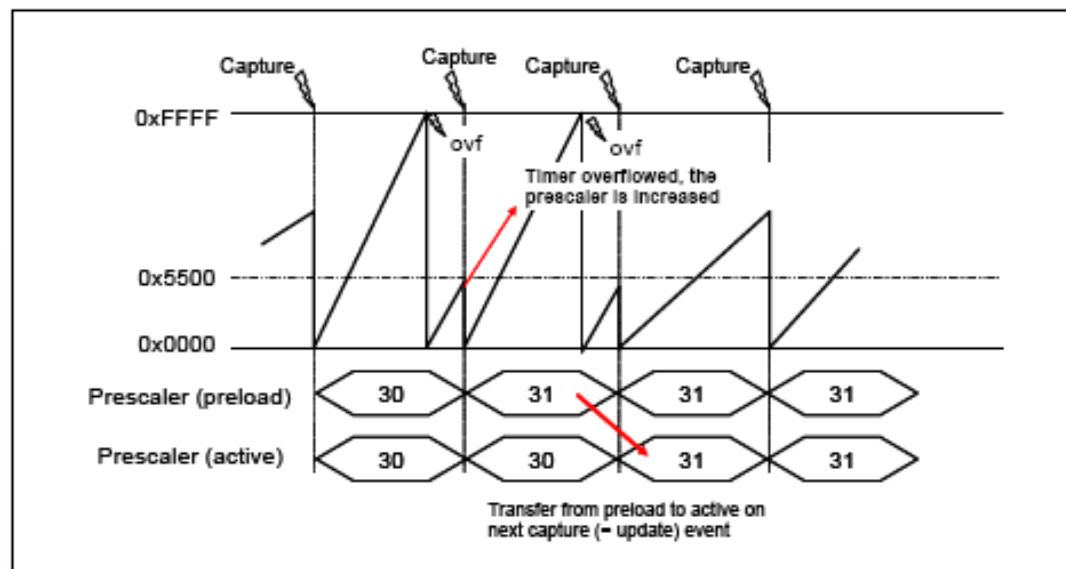
速度检测 1/2

- 转动方向的确定：基于Hall信号的当前及前一次状态；
速度绝对值的确定：基于输入捕捉寄存器及预分频器的值。
- 为了保持测量精度，定时器的预分频器须根据捕捉值不断地进行调整
- 若计数器值太小，预分频器(为预装载寄存器)被减小：



速度检测 2/2

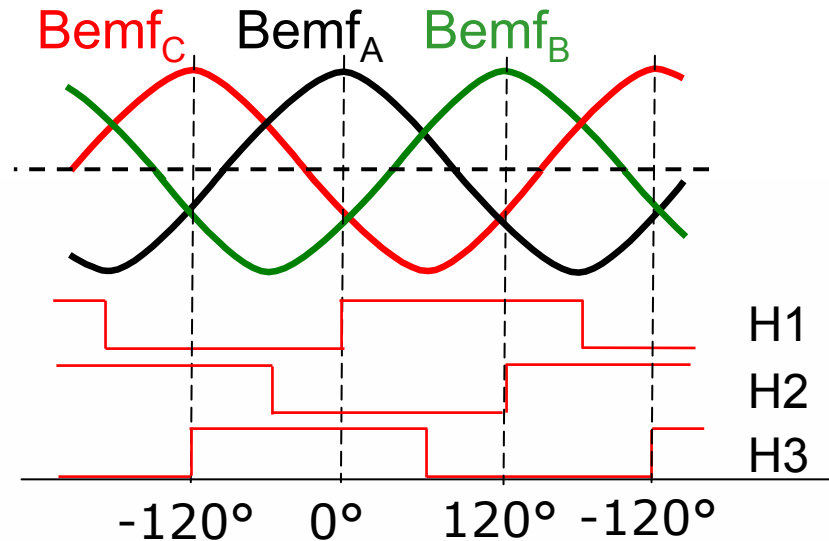
相反，若计数器值上溢，预分频器(为预装载寄存器)被增大：



由于预分频器寄存器为预装载的，其新的值仅在下一个捕捉事件时起作用，这样就不会干扰测量。

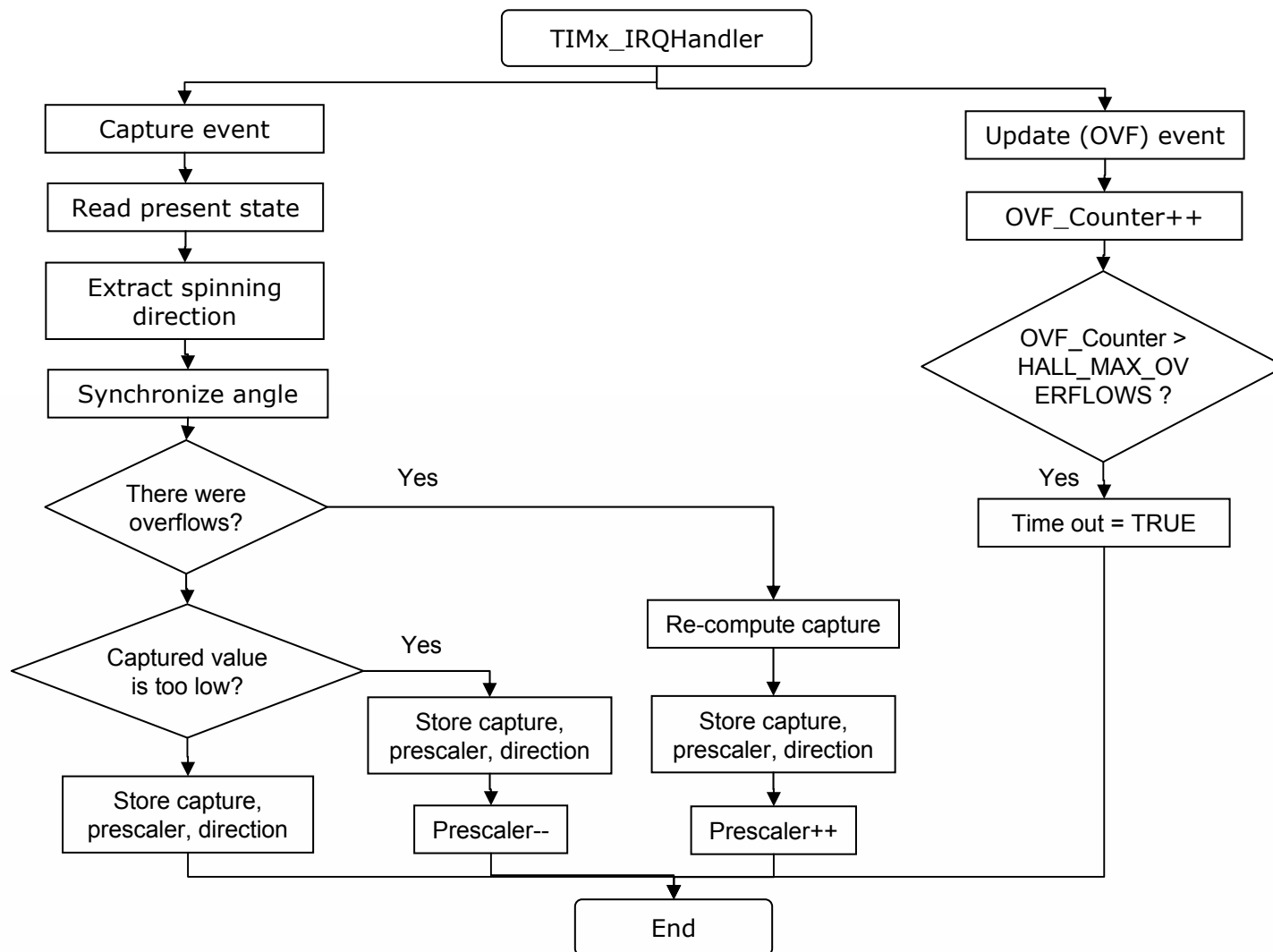
电角度的计算

- 根据Hall的当前状态及转动方向，每次输入捕捉发生时，电角度被同步：



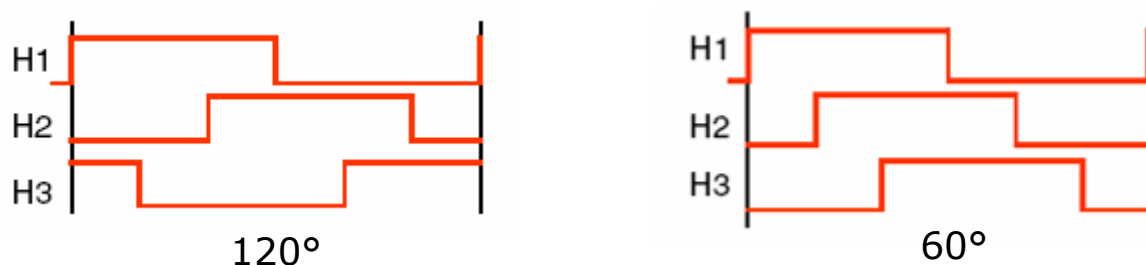
- 每次FOC算法执行时，转子电角度被更新：仅需要对 F_{dpp} 进行积分

stm32f10x_hall.c

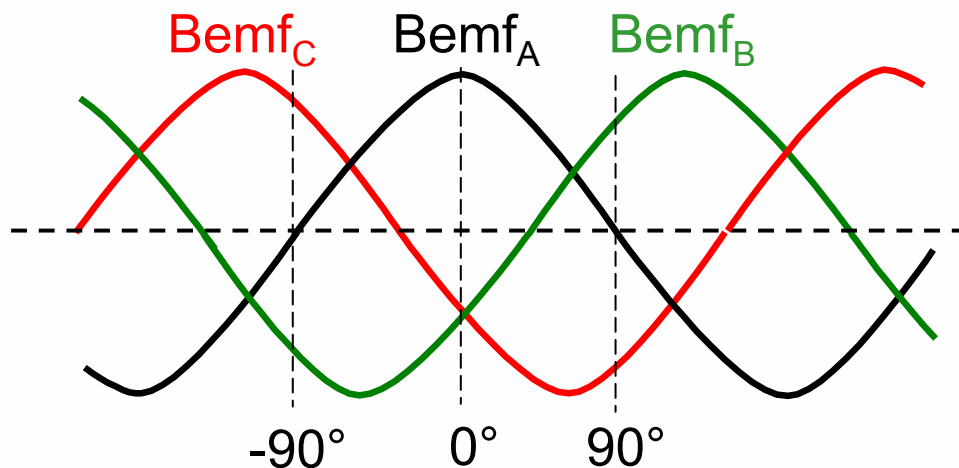


规定


库文件要求：H1，H2及H3信号在正转时的时序如下：



在库文件中，角度 0° 的位置解释为A相的反电动势最大处：



怎样连接Hall传感器到MB459板 1/2



■ 任选一个马达的相作为参考，把它插入A相插槽 (J5-2)；

■ 用手朝你规定的正方向转动马达，用示波器测量三个相端与虚拟中心点间的反电动势波形；

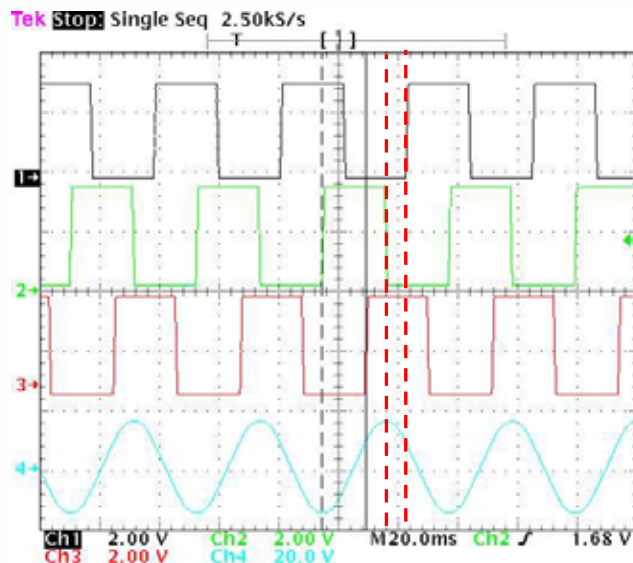
■ 与A相的反电动势相差 $+120^\circ$ 的相为B相(J5-3)，另一相则为C相 (J5-1)。

怎样连接Hall传感器到MB459板 2/2

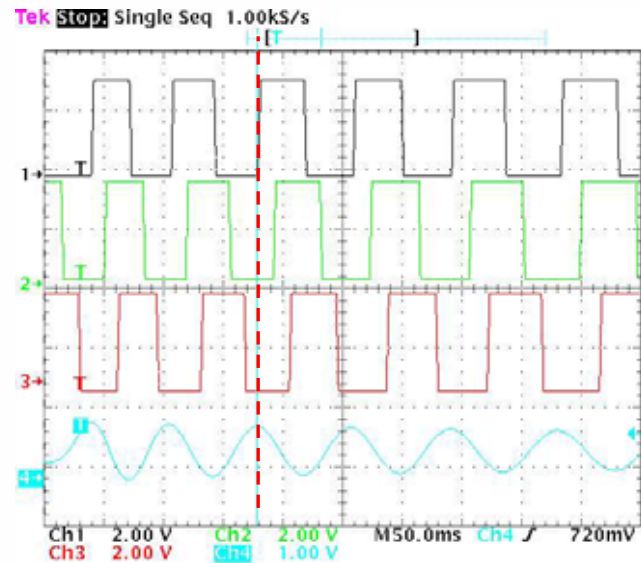


STM32

- 检测三个Hall信号的输出(如有可能, 使用三个上拉电阻) 及A相的反电动势(使用差分探头);
- 按照H1, H2及H3信号的规定, 测量A相反电动势的最大处与H1上升沿的相移:



120°



60°



MC_hall_prm.h

- 
- 
- ❏ 当“stm32f10x_MCconf.h”中定义了“HALL_SENSORS”或“VIEW_HALL_FEEDBACK”，须填写下列内容：
 - ❏ **TIMERx_HANDLES_HALL**: 定义用于检测HALL的定时器；
 - ❏ **HALL_SENSORS_PLACEMENT**: 120° 或60° (DEGREES_120 或 DEGREES_60)
 - ❏ **HALL_PHASE_SHIFT**: 电角度相移(degrees)，即：0°与TIMERx输入信号CC1上升沿之间的电角度(STM32 MC-KIT上的H1信号)；
 - ❏ **HALL_MAX_SPEED_FDBK_RPM**: 转子机械转速(rpm)，当大于它时，认为速度反馈错误；
 - ❏ **HALL_MAX_SPEED**: 检测到速度大于HALL_MAX_SPEED_FDBK_RPM时，由函数HALL_GetSpeed返回的值(单位：0.1Hz)；
 - ❏ **HALL_MAX_PSEUDO_SPEED**: 检测到速度大于HALL_MAX_SPEED_FDBK_RPM时，由函数HALL_GetRotorFreq返回的值(单位：dpp)；
 - ❏ **HALL_MIN_SPEED_FDBK_RPM**: 转子机械转速(rpm)，当小于它时，认为速度反馈错误；
 - ❏ **HALL_MAX_RATIO**: 定义了最大的预分频系数(可避免在马达停机时，过多增大预分频系数)，其限制了最小的可检测转速；
 - ❏ **HALL_MAX_OVERFLOW**: 定时器连续溢出的次数，当达到该值时，报告“Speed feedback”故障；
 - ❏ **HALL_SPEED_FIFO_SIZE**: 速度FIFO的长度，该FIFO用于平均检测的转速。

正交编码器



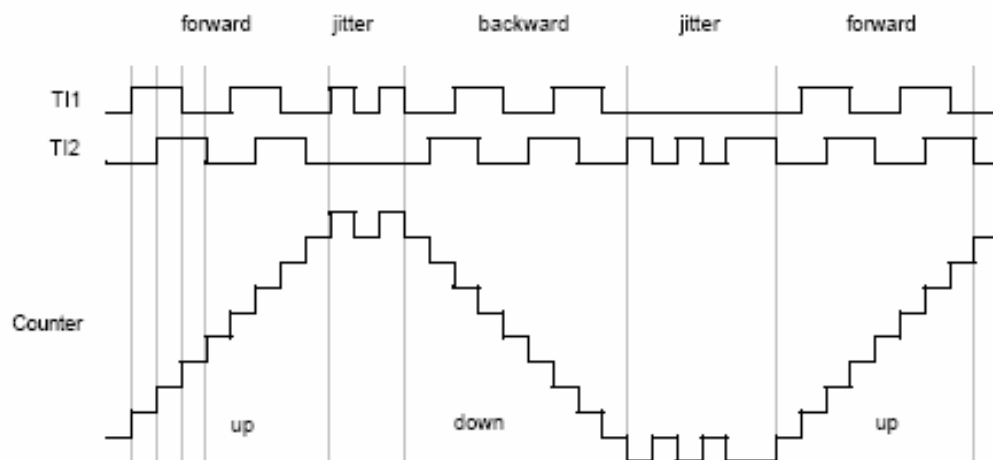
- ❑ 正交编码器产生两个方波信号，它们相差 $\pm 90^\circ$ ，其符号由转动方向决定；
- ❑ 它提供了转子的位置信号，其值非常精确，但它是个**相对位置值**；
- ❑ 由于STM32具有正交编码器接口，在转子位置与正交编码器接口的定时器之间可以建立一对一的关系；
- ❑ 为了同步上述两者的关系，在第一次上电的起动前需要定位，而以后的起动则不再需要，除非MCU再次上电或发生故障。

STM32的正交编码器传感器接口



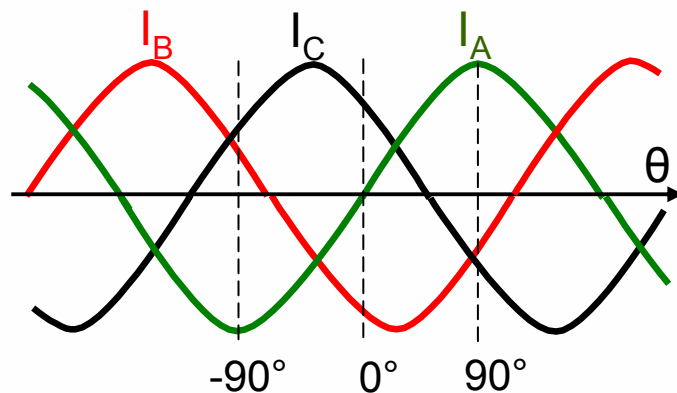
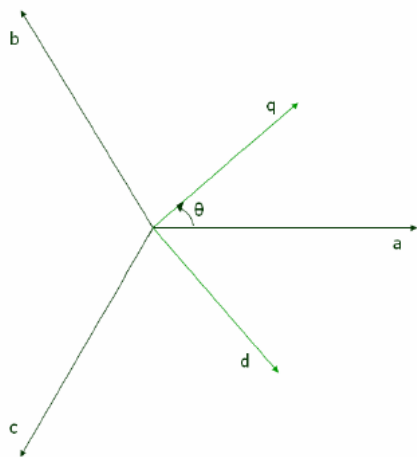
STM32

- 定时器的两个输入TI1和TI2用于与增量式正交编码器接口；
- 这两个信号的边沿作为计数器的时钟(4x)，而ARR寄存器初始化为： $(4 * \text{PULSE_PER_REVOLUTION}) - 1$ ；
- 根据这两个信号时序的关系，计数器向上或向下计数



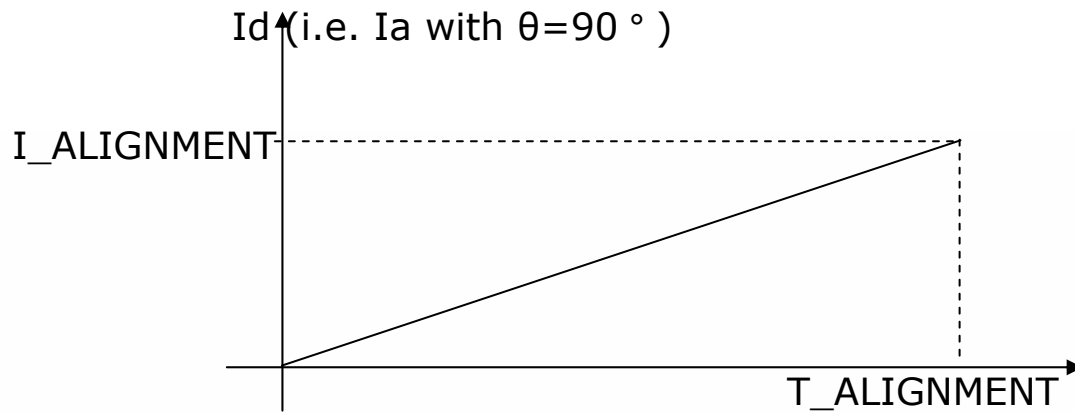
转子定位规律

- 在MCU复位或发生故障后的第一次起动，才需要转子定位；
- 通过在定子中加入一个以下的磁链来实现：
 - 幅值呈线性增加且受控的(I_d)；
 - 选择一个转子角度。
- I_a , I_b , I_c 及磁链定向的关系如下图，它是 θ 角的函数：



定位参数

“I_ALIGNMENT”及“T_ALIGNMENT”必须选择合适的值，以致于当计数器的初始化结束时，转子无任何震荡：



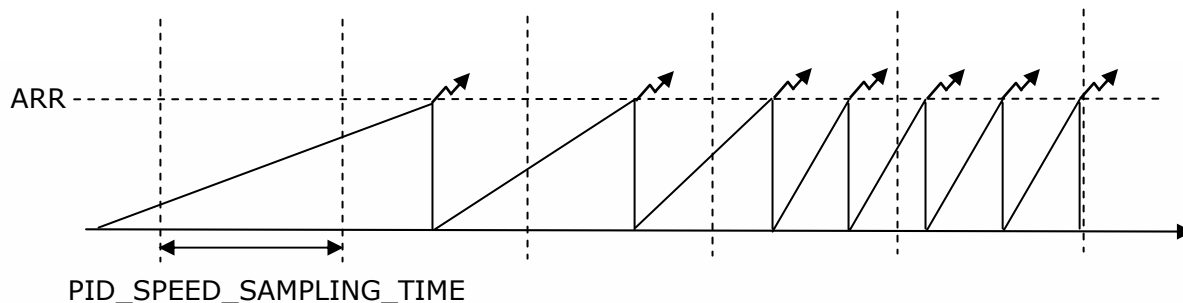
$$I(\text{digit}) = \frac{I(A) \cdot R_{\text{shunt}} \cdot A_V}{3.3} \cdot 65536$$

$$A_V = 2.57 \text{ on MB459B}$$

速度检测



- 相对于Hall传感器信号是检测“周期”，此时应检测编码器信号的频率；
- 在每个“PID_SPEED_SAMPLING_TIME”周期后，检测定时器计数器值的变化；



- 由于该时基由SysTick定时器提供(低优先级)，可能会存在最大30us的延时；
- 如果每2ms检测一次速度，其最大延时可小于1.5%


电角度的计算

- 在定位后，计数器的值给出了确切的转子电角度；
- 因此，提供给FOC算法的电角度由下式给出：

$$El\ angle = \frac{65536 \cdot \text{Timer counter}}{4 \cdot ENCODER_PPR * POLE_PAIRS_NUM}$$

它由函数“*ENC_Get_Electrical_Angle()*”给出。

怎样连接正交编码器到MB459板

- 
- ❏ 当输入正向的三相电流到马达时，库文件希望读到的速度值也为正的(即：定时器是向上计数的)；
 - ❏ 手动地转动马达，使之向着假定的正方向运行，检测反电动势，以确定马达的相序连接正确：J5 2-3-1对应于相序A，B，C；
 - ❏ 连接编码器的输出到J8 H1-H2，跳线W17及W18应装上，库文件运行在编码器模式下。手动地转动马达，使之向着假定的正方向运行，检查测量到的速度值：
 - ❏ 若其 > 0 ：说明连接OK (即：TI1领先于TI2)
 - ❏ 若其 < 0 ：你需要交换编码器的信号线(以保证TI1领先于TI2) 或修改代码stm32f10x_encoder.c 的164行：

把：`TIM_ICPolarity_Rising, TIM_ICPolarity_Rising`);

改为：

`TIM_ICPolarity_Rising, TIM_ICPolarity_Falling`);

MC_encoder_param.h

- 
- 
- 当“stm32f10x_MCconf.h”定义了“ENCODER”或“VIEW_ENCODER_FEEDBACK”，应填写以下内容：
 - TIMERx_HANDLES_ENCODER**: 定义了接口编码器的定时器；
 - ENCODER_PPR**: 编码器每转一周，单个通道产生的脉冲数；
 - MINIMUM_MECHANICAL_SPEED_RPM**: 转子机械转速 (rpm)，当小于它时，认为速度反馈错误。此时，错误计数器会加1；
 - MAXIMUM_MECHANICAL_SPEED_RPM**: 转子机械转速 (rpm)，当大于它时，认为速度反馈错误。此时，错误计数器会加1；
 - MAXIMUM_ERROR_NUMBER**: 连续速度错误的次数，当达到该值时，报告“Speed feedback”故障；
 - SPEED_BUFFER_SIZE**: 速度FIFO的长度，该FIFO用于平均检测的转速；
 - T_ALIGNMENT**: 定位周期 (单位：ms)；
 - ALIGNMENT_ANGLE**: 定子磁链的定位角 (单位：度)
 - I_ALIGNMENT**, 最终的Id幅值(digit)；