

# STM32 FOC FW library v2.0 新功能



MCU Application  
Great China

Ver. 2.0  
Apr '09



# 课程



- ▣ GUI 概述
- ▣ 单电阻电流采样法
  - ▣ 硬件结构
  - ▣ 基本原理
  - ▣ 挑战
  - ▣ ST 专利方案: 有效矢量插入
  - ▣ 实现
  - ▣ 三电阻采样 vs 单电阻采样
- ▣ I-PMSM 驱动优化: MTPA
- ▣ 新的弱磁控制策略
- ▣ 前向电流调节



# FOC GUI 下载



STM32

Internet 下载地址： 版本V1.0

<http://www.st.com/stonline/products/support/micro/files/focgui.exe>

STM32 based PMSM FOC  
firmware library training

MCU Application

Apr '09

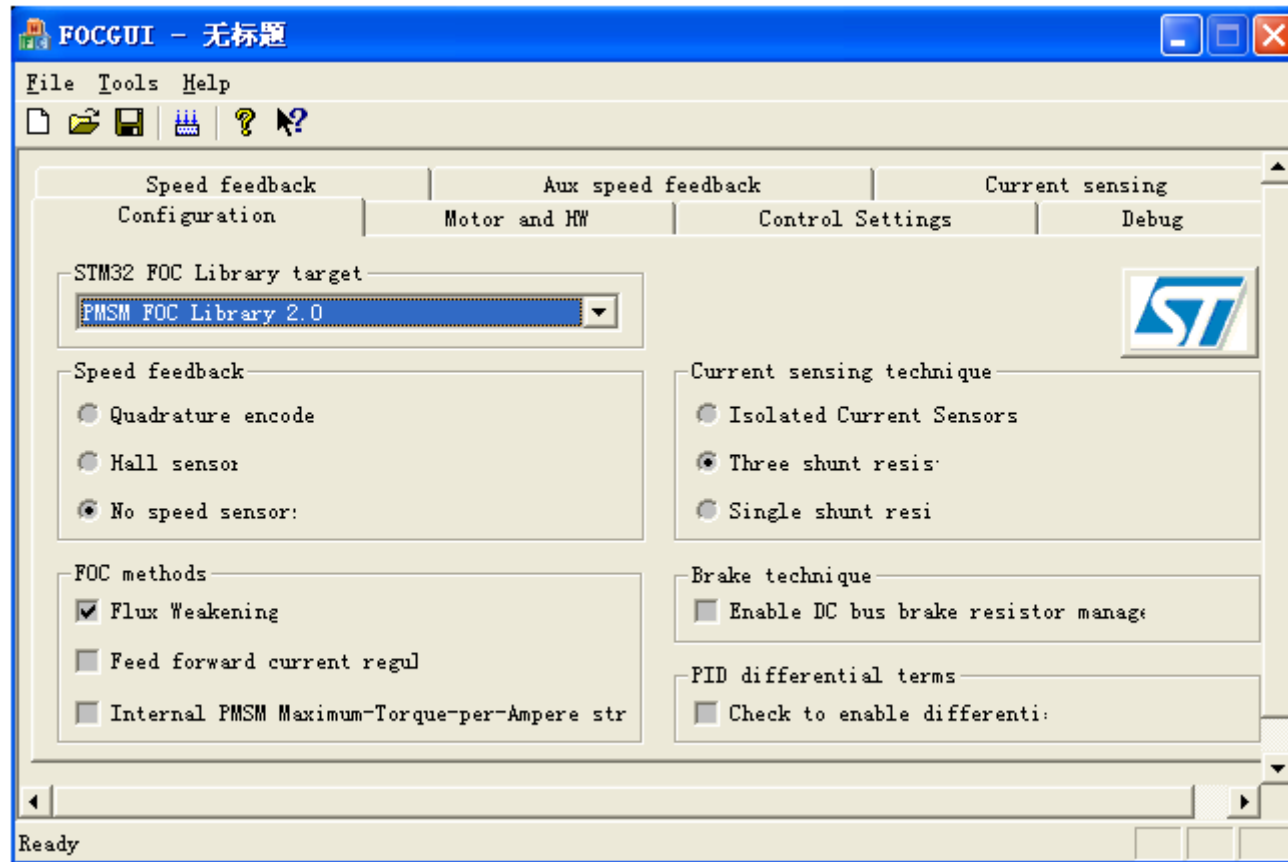


STM32 Releasing your creativity

# GUI 界面



STM32



STM32 based PMSM FOC  
firmware library training

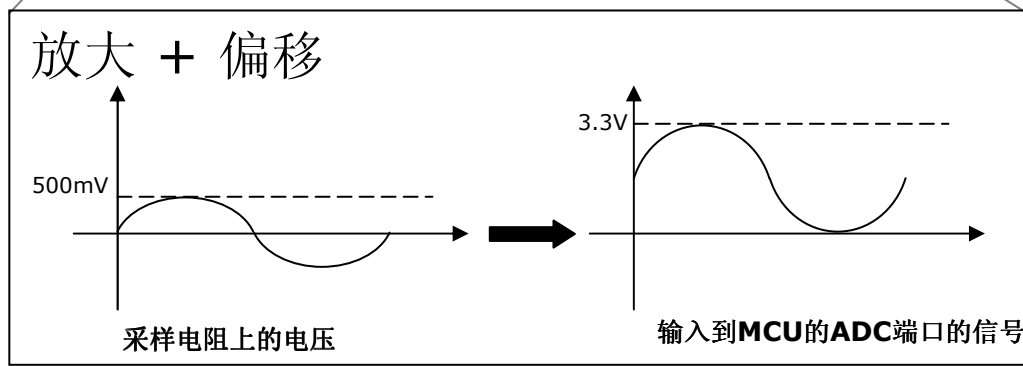
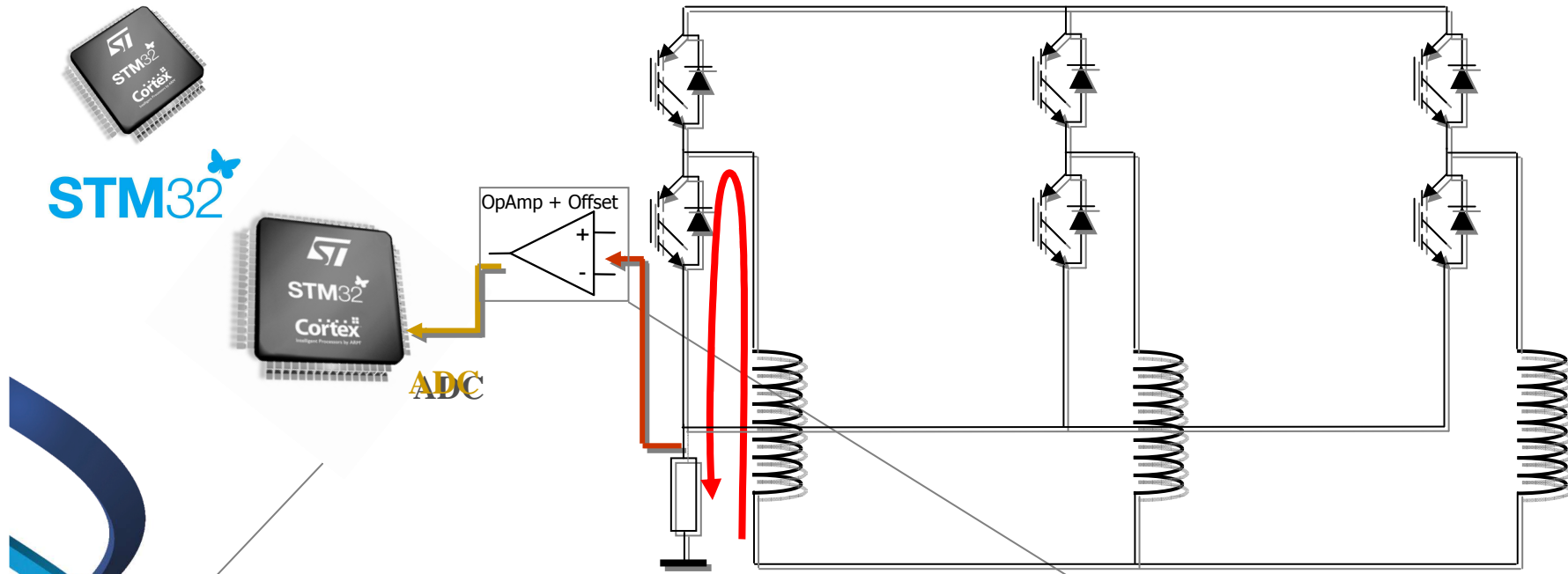
MCU Application

Apr '09

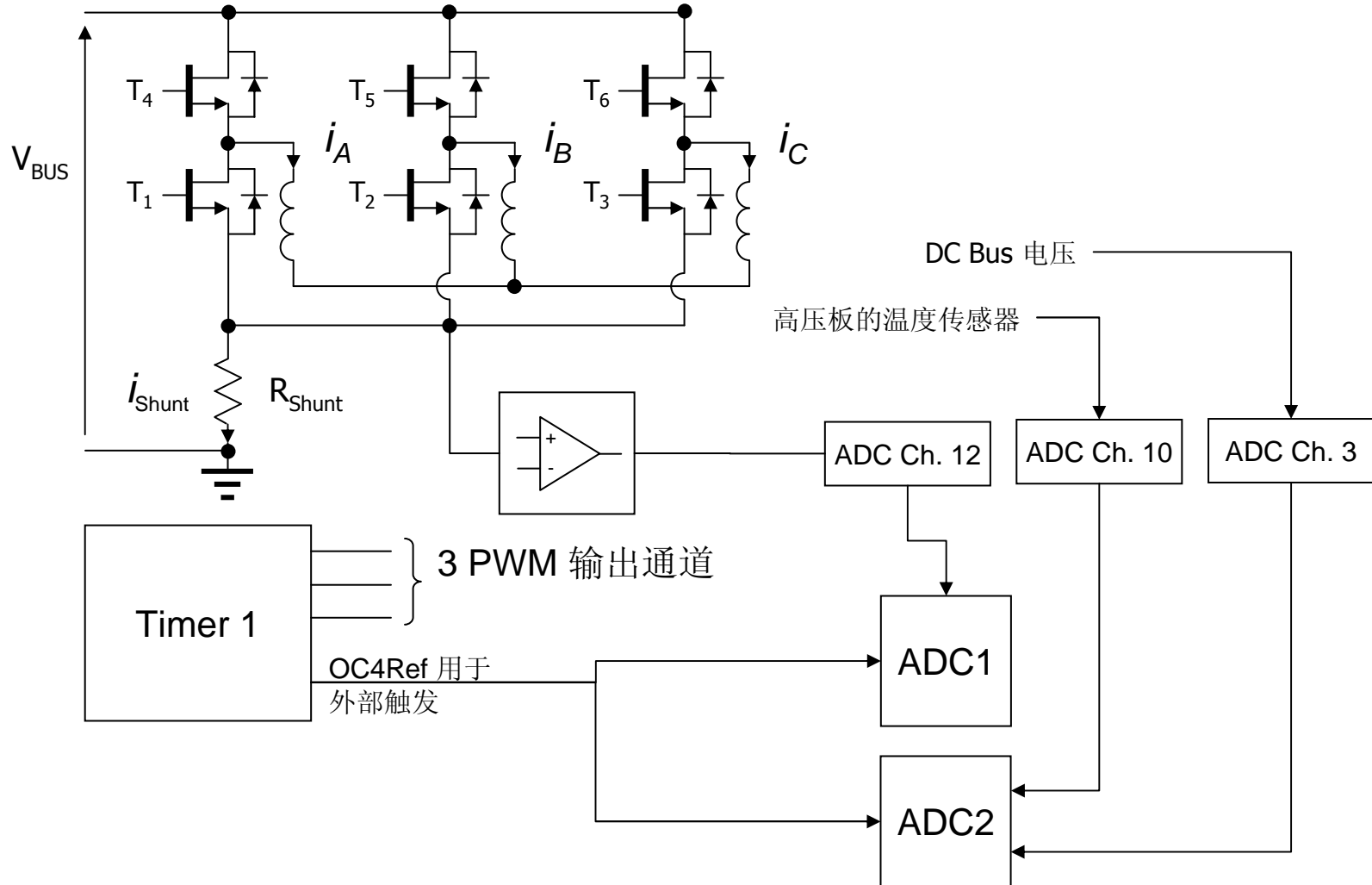


STM32 Releasing your creativity

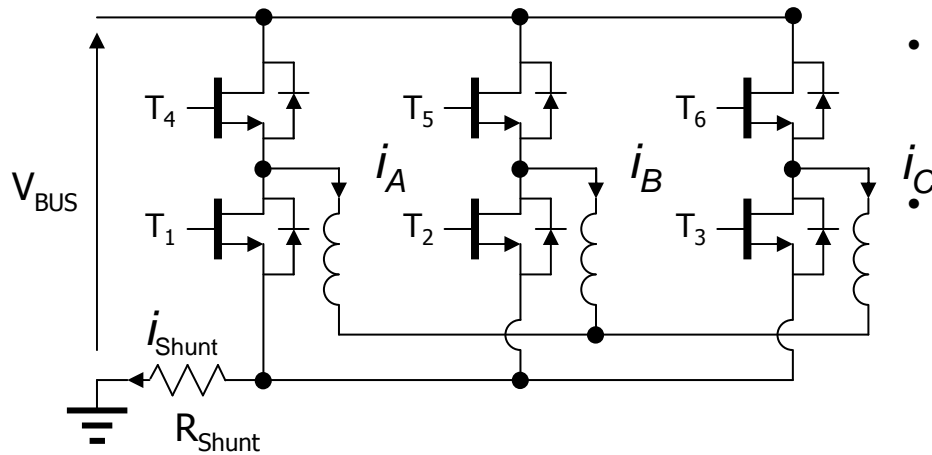
# 单电阻电流采样硬件结构



# STM32 配置



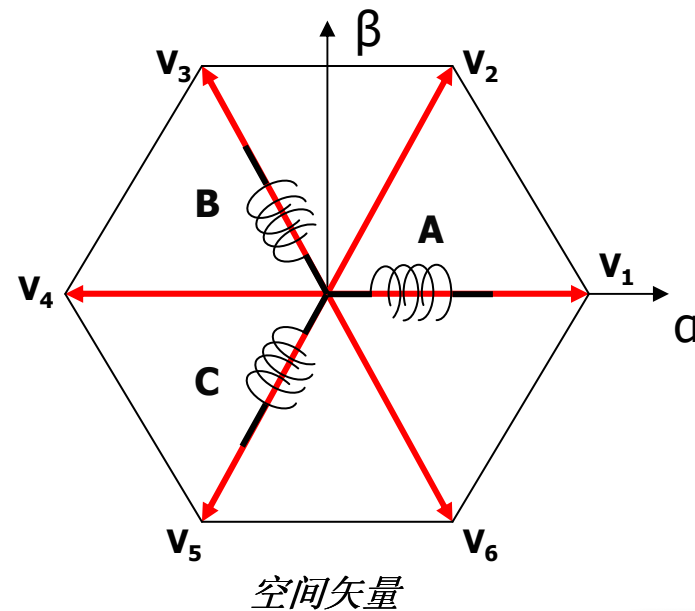
# 单电阻电流采样原理 1/2



- 对于下桥臂的每一个开关状态，其对应的流过采样电阻的电流如表1。T4, T5 及 T6 的开关状态与 T1, T2 及 T3 互补。
- 在表 1 中，值“0”表示开关管关闭，而“1”表示开关管打开。

表 1

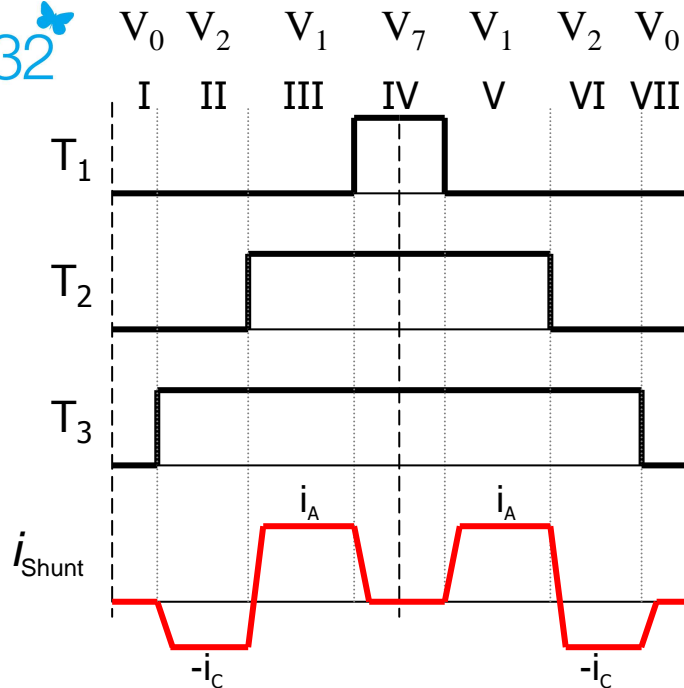
V	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	<i>i<sub>Shunt</sub></i>
V <sub>0</sub>	0	0	0	0
V <sub>1</sub>	0	1	1	<i>i<sub>A</sub></i>
V <sub>2</sub>	0	0	1	<i>-i<sub>C</sub></i>
V <sub>3</sub>	1	0	1	<i>i<sub>B</sub></i>
V <sub>4</sub>	1	0	0	<i>-i<sub>A</sub></i>
V <sub>5</sub>	1	1	0	<i>i<sub>C</sub></i>
V <sub>6</sub>	0	1	0	<i>-i<sub>B</sub></i>
V <sub>7</sub>	1	1	1	0



## 单电阻电流采样原理 2/2



STM32



- 使用中心对称模式，每个PWM 周期被分成7个时间段；
- 在其中的三个时间段 (I,IV,VII)，电阻中的电流为0；
- 在其余的时间段，由于PWM为中心对称模式，电阻中的电流是对称的；
- 如图所示，存在两种情况：
  - 时间段 II 及 VI,  $i_{Shunt} = -i_C$ ;
  - 时间段 III 及 V,  $i_{Shunt} = i_A$ ;
- 因此，此时有可能从采样值重建马达的三相电流：
  - 时间段 III 及 V,  $i_A = i_{Shunt}$
  - 时间段 II 及 VI,  $i_C = -i_{Shunt}$
  - $i_B = -i_A - i_C$



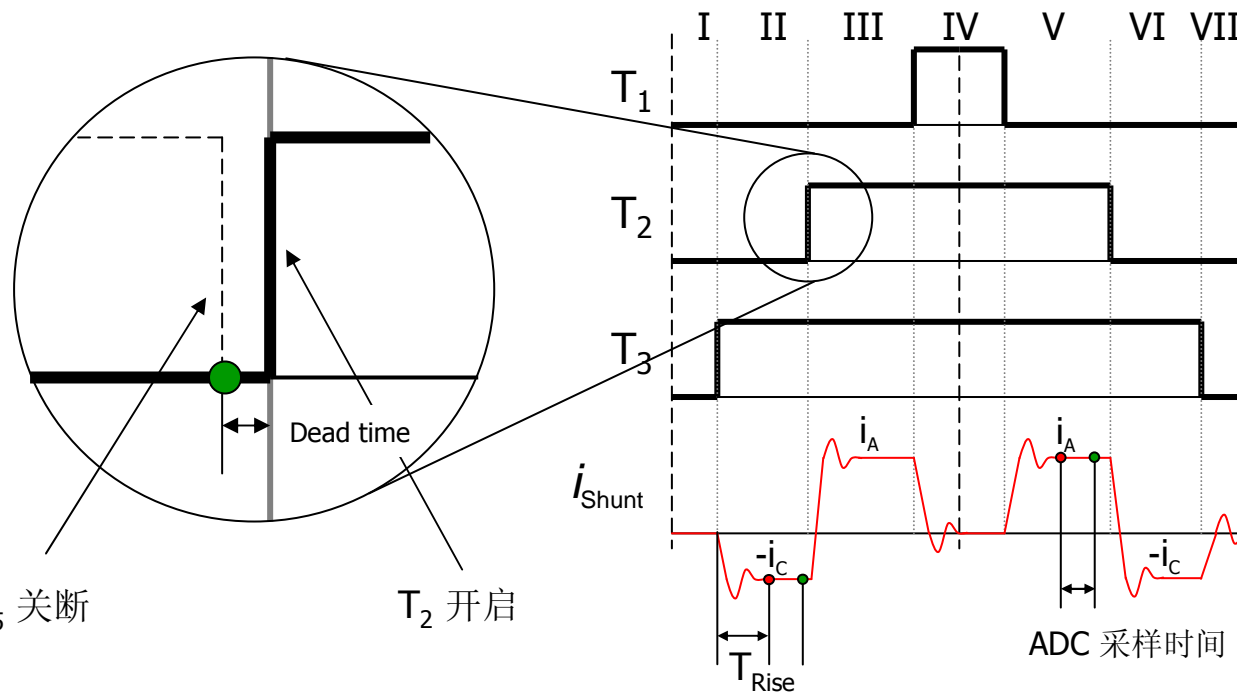


# $T_{min}$ 定义

- 定义 ' $T_{Rise}$ ': 任一管子开关后, ADC通道上的输入信号的稳定时间;
- 定义  $T_{min}$ : 执行电流采样所需要的时间: 等于  $T_{Rise}$  + ADC 采样时间 + 死区时间;
- 定义  $D_{MIN}$ :  $T_{MIN}$  的占空比的表达形式



STM32



- 噪声结束, 采样开始
- 采样结束, ADC转换开始

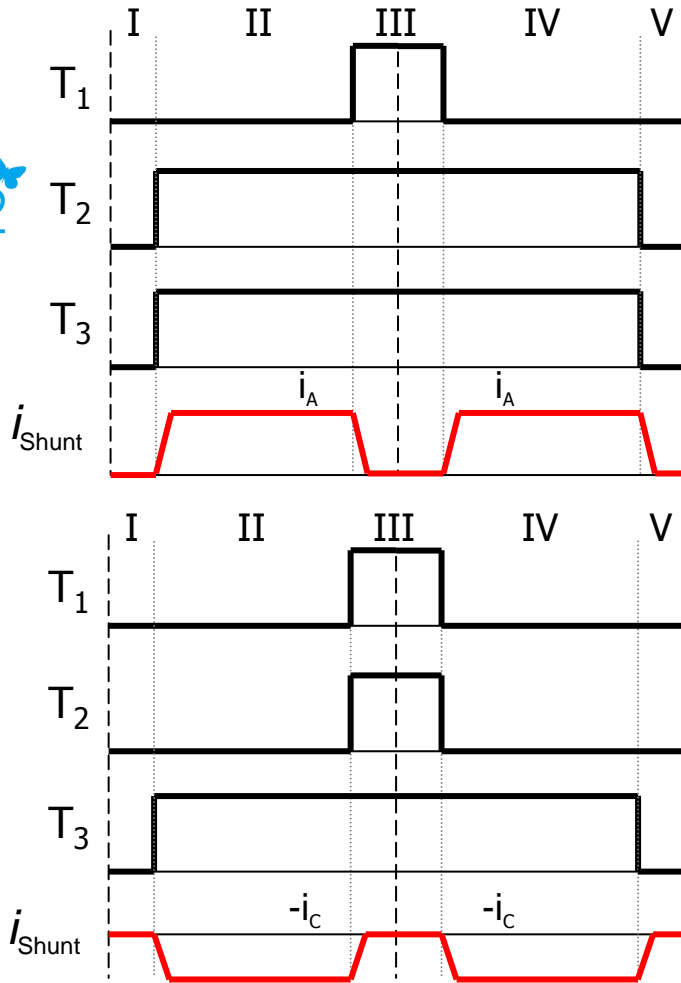


# 单电阻采样法的挑战:

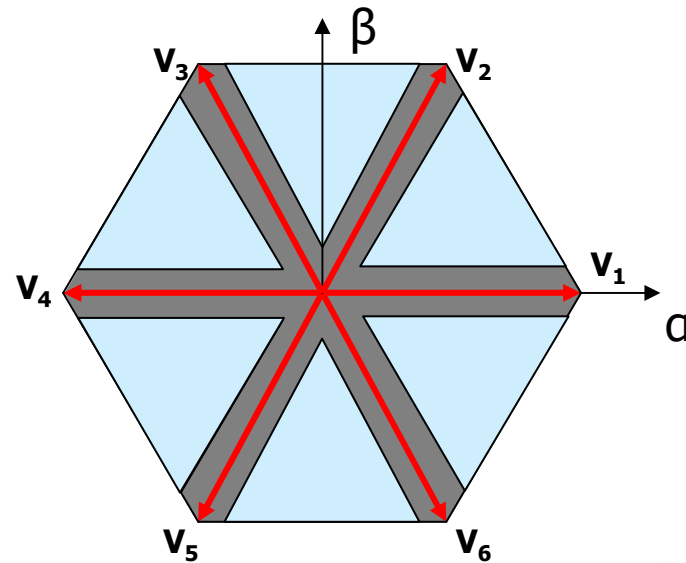
## 1. 相邻空间矢量扇区的边界区域



STM32



- 在相邻的两个空间矢量扇区的边界区域, 有两个桥臂的占空比几乎相同;
- 在这种情况下, 七个时间段变成了五个, 这样的后果为: 只可能采样到两个相电流中的一个;
- 因此, 如果电压矢量进入到下图的灰色区域, 就不能在同一个PWM周期中同时采样到两个相电流。

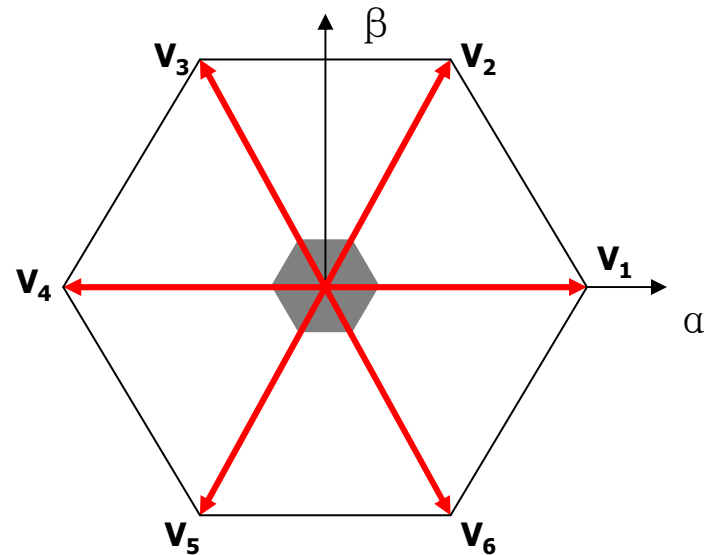
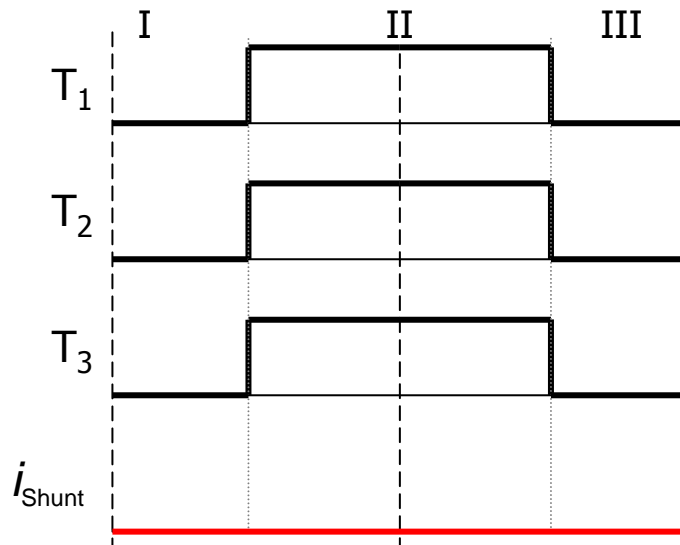


# 单电阻采样法的挑战:

## 2. 低调制比



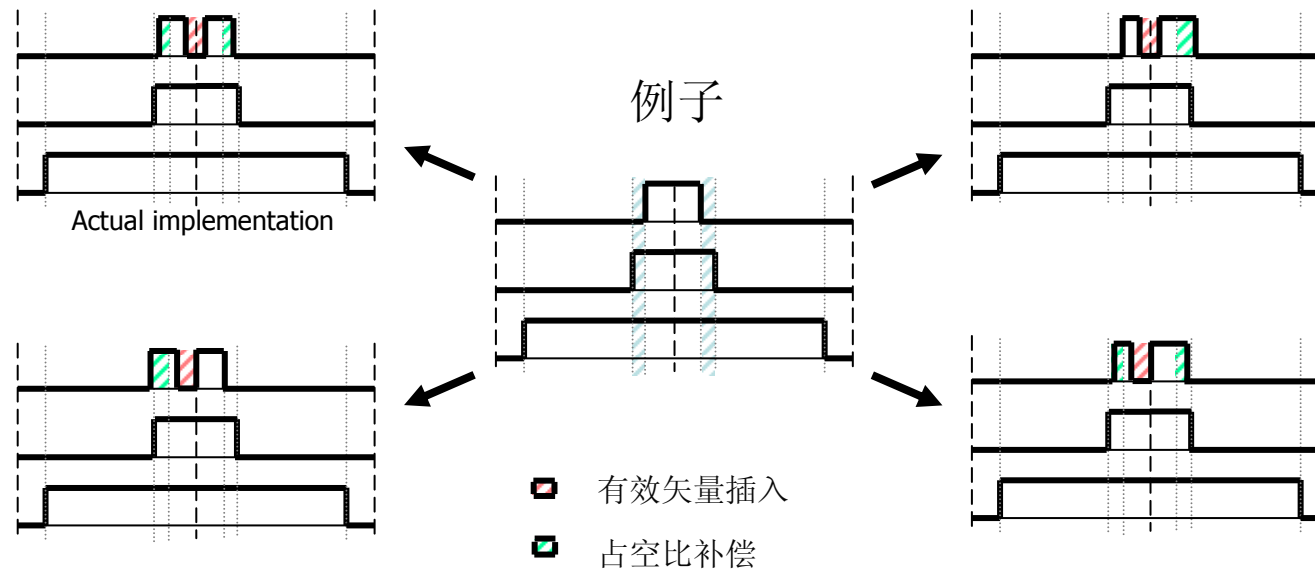
- 在低调制比的情况下，三个桥臂的占空比几乎相同；
- 在这种情况下，七个子时间段变成了三个；
- 在所有的三个时间段，流过采样电阻的电流为0；
- 这就意味着当电压矢量进入下列灰色区域时，无法采样到相电流。



# 1.相邻空间矢量扇区的边界区域的解决方法： 插入时间固定的有效空间矢量



- 当无法采样某一相电流时，可在时间段V0 或 V7中插入一个有效矢量，并同时保证三个桥臂的占空比不变；
- 为了减少插入有效矢量而引起的相电流谐波，插入的有效矢量的时间为  $T_{min}$ 。

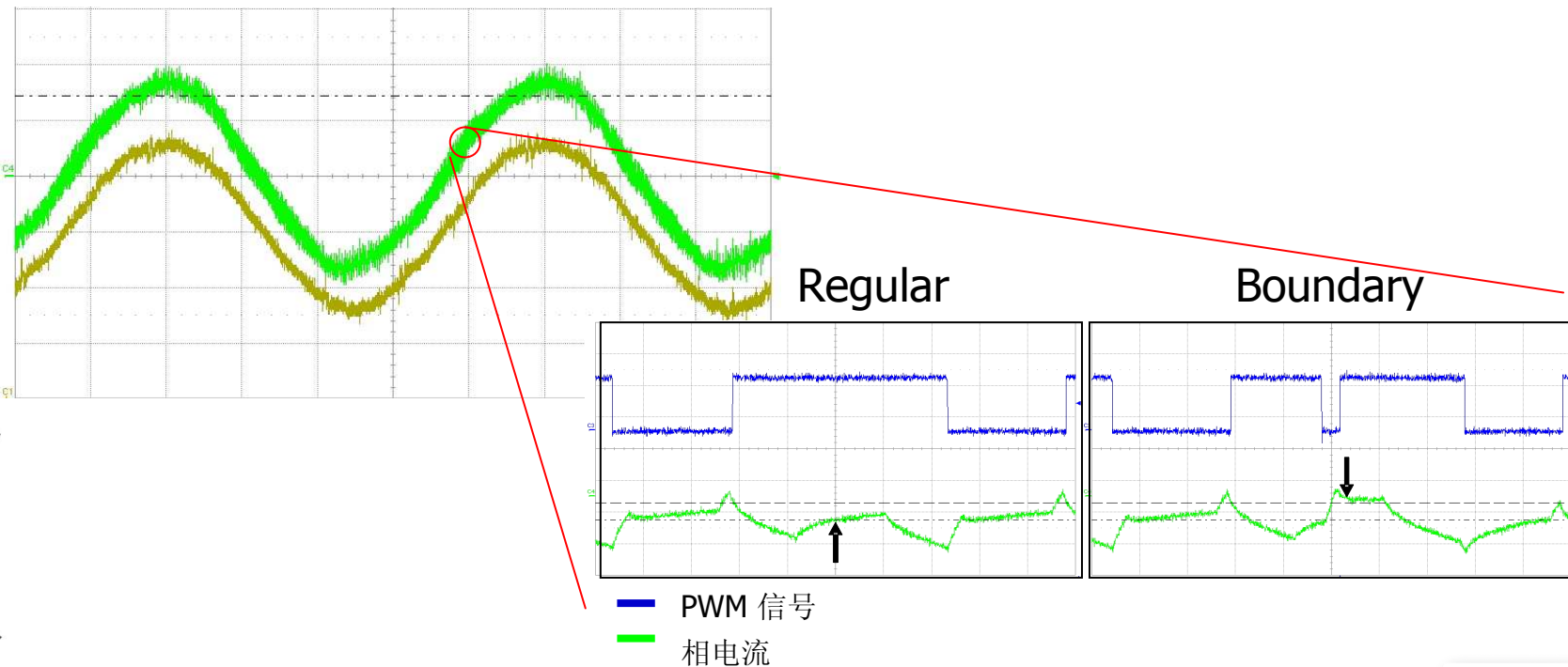




## 有效矢量插入： 电流失真的补偿



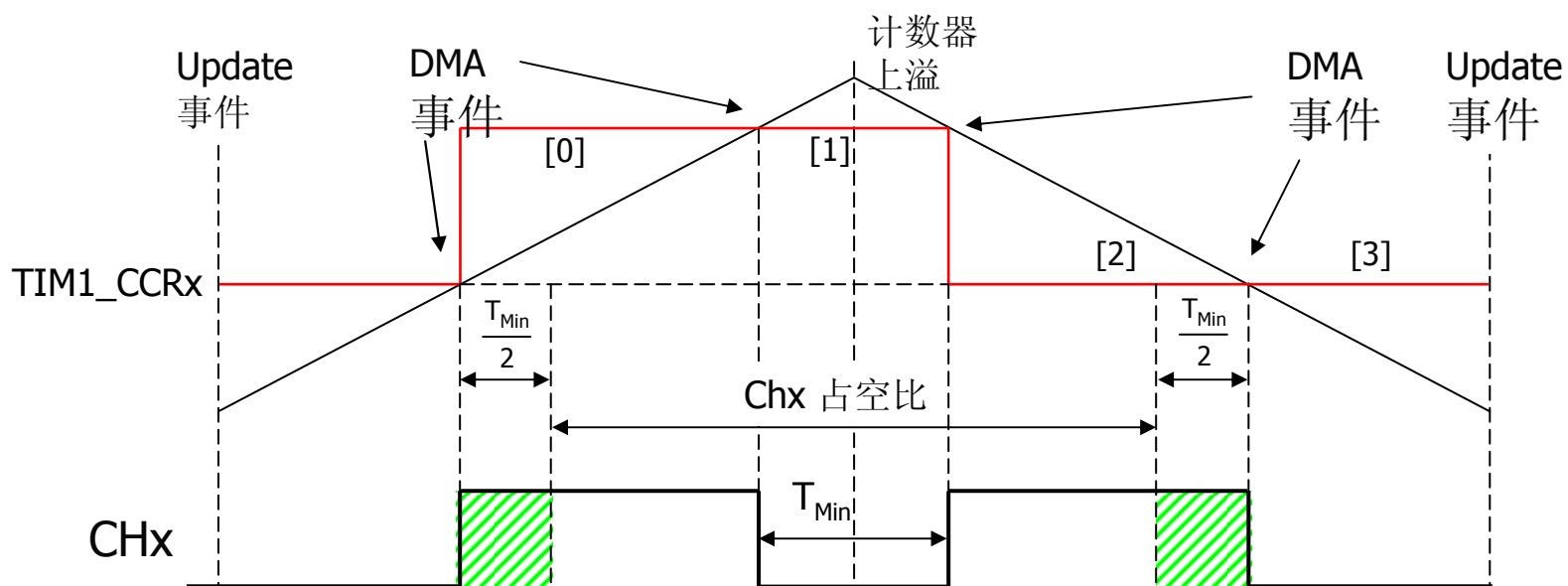
- ❏ PWM的失真会在相应的一相中导致电流失真，但是可以对此进行补偿；
- ❏ 当PWM开关模式在“常规”模式与“边界”模式间切换时，电流测量值的变化被存储；
- ❏ 在PWM模式进入到相同的边界区域后，通过加上或减去这个变化值，电流的测量值得到了补偿。



## PWM 变形：有效矢量插入的实现



- 为了实现有效矢量的插入，三对PWM信号(CHx)中的一对必须变形；
- 因此，CHx 必须配置为'toggle'模式；
- 并且，输出比较事件(计数器的值与TIM1\_CCRx相同)触发DMA，用于更新TIM1\_CCRx自己的值；
- 在PWM信号变形期间，TIM1\_CCRX预载功能禁止，因此，写入TIM1\_CCRx寄存器的新值立即起作用；
- 使用'DMA burst' 传输模式(由计数器的下溢事件触发)，两个TIM1\_CCRx寄存器的写入时间差大约为100ns。

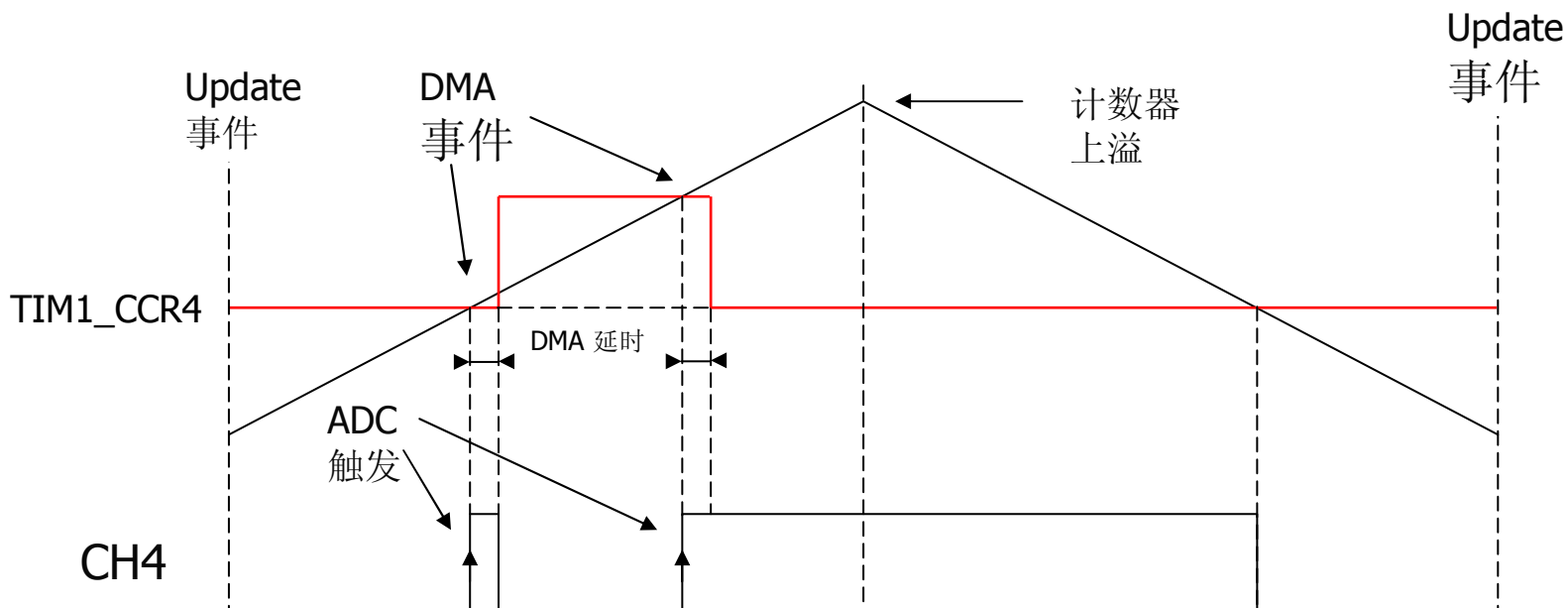




## PWM 无变形时的ADC 同步



- TIM1 CH4用于ADC 的同步 (CH4 配置为'PWM模式1', 直接访问模式)
- 由输出比较事件触发的DMA 用于更新 TIM1\_CCR4 的内容, 其允许在PWM的前半周期就完成两次ADC 转换;
- 由DMA 传输而引起的延时足以产生ADC的触发信号.

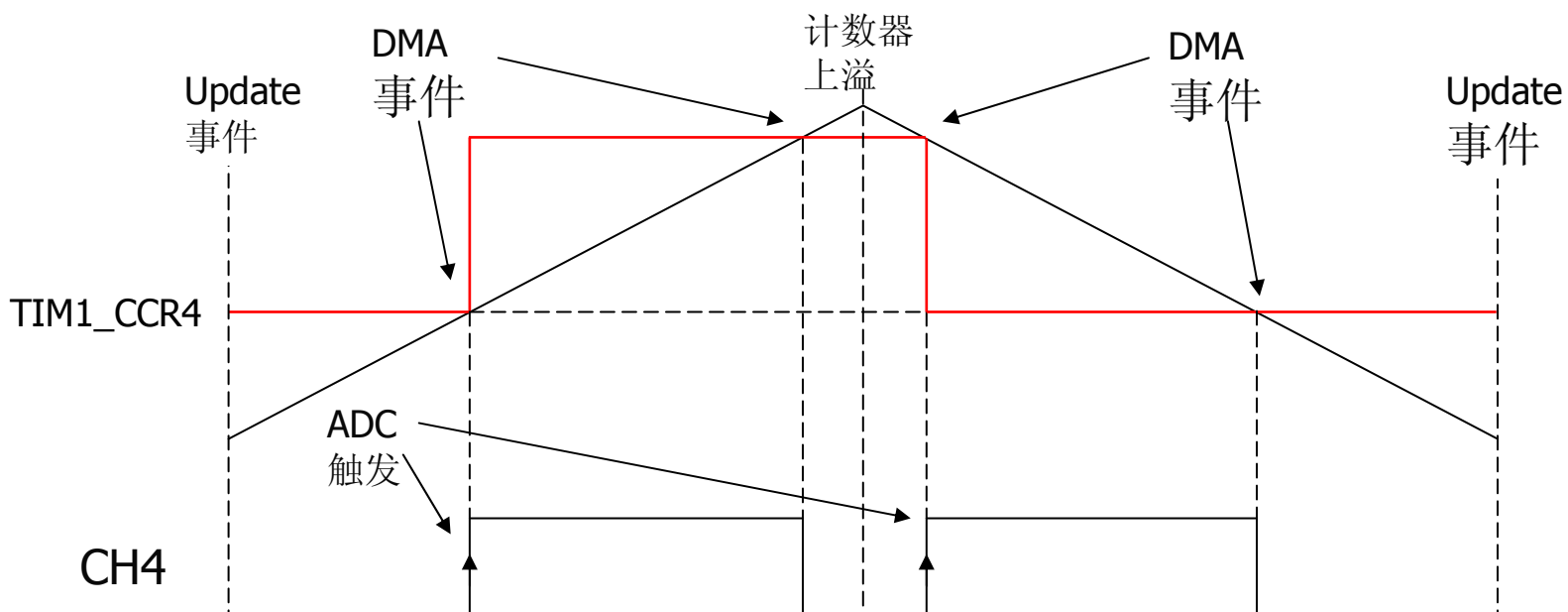




## PWM 变形时的ADC 同步



- 在PWM有变形的情况下, CH4 配置为'toggle 模式' (此时, TIM1\_CCR4直接访问);
- 此时, 仍然由DMA 来更新 TIM1\_CCR4 寄存器;
- 在中心对称模式下, 有可能在PWM的前半周期触发一次 ADC 转化而在后半周期触发另一次 ADC 转化。



# 固件结构

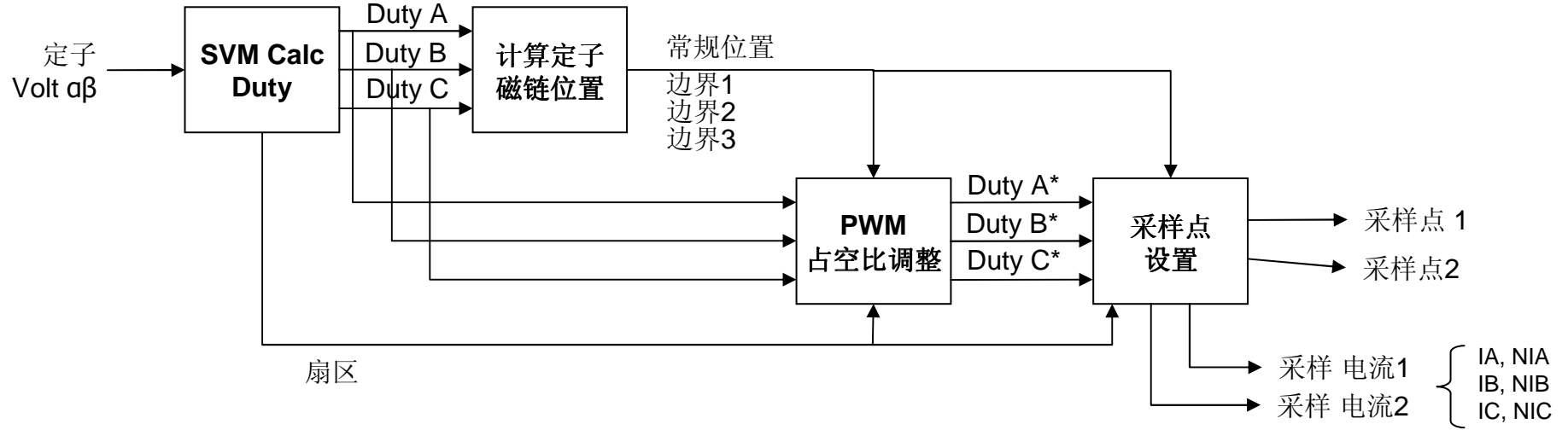


函数名	描述	调用时刻
SVPWM_1ShuntInit	初始化PWM 及 ADC 外设	MCU复位后
SVPWM_1ShuntCurrentReadingCalibration	存储零电流时采样电路的ADC值	马达启动命令后
SVPWM_1ShuntGetPhaseCurrentValues	计算相A 及 相B的电流值	在ADC转换完成后及FOC 子程序之前
SVPWM_1ShuntCalcDutyCycles	计算占空比值，配置下一次电流采样时的ADC及定时器模式。	FOC 子程序之后
SVPWMUpdateEvent	在Update 事件的 ISR 中执行的子程序	在 Update 事件的 ISR 中
SVPWMEOCEvent <sup>1)</sup>	在ADC转换结束事件的 ISR 中执行的子程序	在ADC转换结束事件的 ISR 中

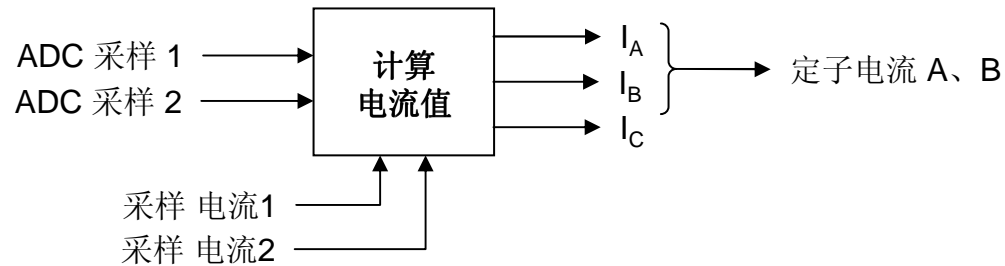
1) 在该子程序中，还更新了DC BUS 的电压值及温度传感器值且分别存入变量 'h\_ADCTemp' 及 'h\_ADCBusvolt' 中。



# 占空比计算



# 计算电流值

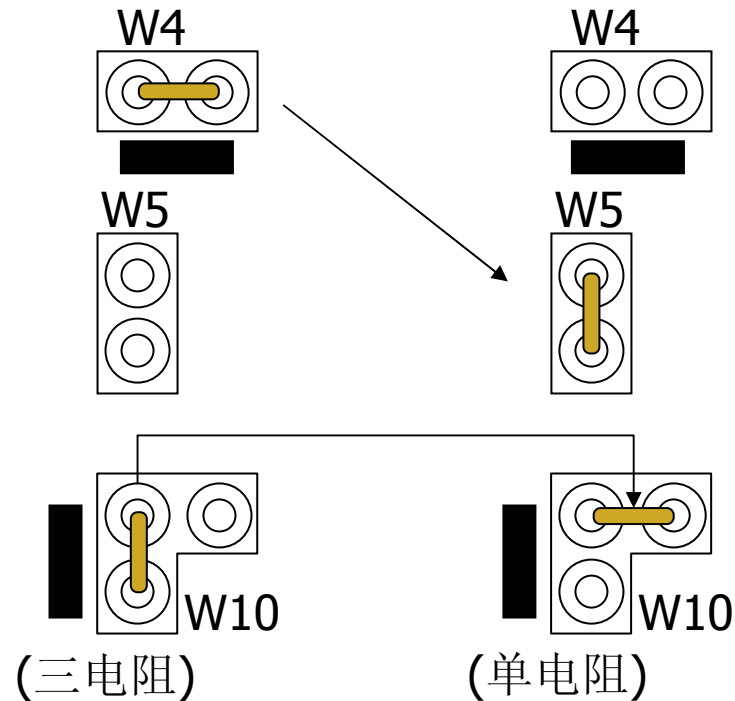


## 高压板的设置 (MB459B)



MB459B设置成单电阻电流采样模式的方法为：

- W4 打开；
- W5 闭合；
- W10 闭合 1-2 (非丝印位置)



# 用户设置



## STM32F10x\_MCconf.h

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

## MC\_Control\_Param.h

```
**** Power devices switching frequency ****/
#define PWM_FREQ ((u16) 12500) // in Hz

****      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)
```

## MC\_pwm\_1shunt\_prm.h

```
#define DEADTIME_NS ((u16) 800) //0,8usec
#define SAMPLING_TIME_NS ((u16)(700)) //0.7usec
#define TRISE_NS ((u16)(2550)) //2.55usec
```



# 性能 1/2



STM32

PWM 频率	最大调制比 三电阻	最大 FOC 执行速率	最大调制比 单电阻	最大 FOC 执行速率
低于 11.4kHz	99%	1	99%	1
12.2kHz	98%	1	98%	1
12.9kHz	97%	1	97%	1
13.7kHz	96%	1	96%	1
14.4kHz	95%	1	95%	1
15.2kHz	94%	1	94%	1
16kHz	93%	1	93%	1
16.7kHz	93%	1	92%	2
17.5kHz	92%	1	91%	2

最大 FOC 执行速率表示为PWM的周期数

前提:

$T_R = 2,55 \mu s$

$T_S = 0,7 \mu s$

$DT = 0,8 \mu s$

$T_N = 2,55 \mu s$  (三电阻)

STM32 based PMSM FOC  
firmware library training

MCU Application

Apr '09



STM32 Releasing your creativity

## 性能 2/2



PWM 频率	最大调制比 三电阻	最大 FOC 执行速率	最大调制比 单电阻	最大 FOC 执行速率
低于 11.4kHz	100%	1	100%	1
12.2kHz	100%	1	100%	1
12.9kHz	100%	1	100%	1
13.7kHz	100%	1	100%	1
14.4kHz	100%	1	100%	1
15.2kHz	100%	1	99%	1
16kHz	99%	1	99%	1
16.7kHz	98%	1	98%	2
17.5kHz	97%	1	97%	2

前提:

$T_R=1,5 \mu s$

$T_S=0,7 \mu s$

$DT=0,8 \mu s$

$T_N=1,5 \mu s$  (三电阻)

最大 FOC 执行速率表示为PWM的周期数

STM32 based PMSM FOC  
firmware library training

MCU Application

Apr '09



STM32 Releasing your creativity

## 三电阻 vs. 单电阻



STM32

		三电阻	单电阻
负荷		<b>20% at 10kHz</b>	<b>33% at 10kHz</b>
代码长度 <i>带 LCD 及 KEYS 管理</i>		<b>≈25kB</b>	<b>≈27kB</b>
纯代码长度		<b>≈12.2kB</b>	<b>≈14.5kB</b>
硬件成本		<b>3 采样电阻 3 运放</b>	<b>1 采样电阻 1 运放</b>
最大 FOC 执行速率		<b>≈21kHz</b>	<b>≈16kHz</b>
相电流失真*	$I_{PH}(rms)$ 0.17A	<b>THD: 2.8</b>	<b>THD: 4.2</b>
	$I_{PH}(rms)$ 0.44A	<b>THD: 2.4</b>	<b>THD: 2.7</b>

\*) 该数据是验证时在最恶劣的情况下测得。电流失真与马达及负载特性(定子电感, 负载力矩, 速度)有很大关系。





# 课程



- ▣ GUI 概述
- ▣ 单电阻电流采样法
  - ▣ 硬件结构
  - ▣ 基本原理
  - ▣ 挑战
  - ▣ ST 专利方案: 有效矢量插入
  - ▣ 实现
  - ▣ 三电阻采样 vs 单电阻采样
- ▣ I-PMSM 驱动优化: MTPA
- ▣ 新的弱磁控制策略
- ▣ 前向电流调节

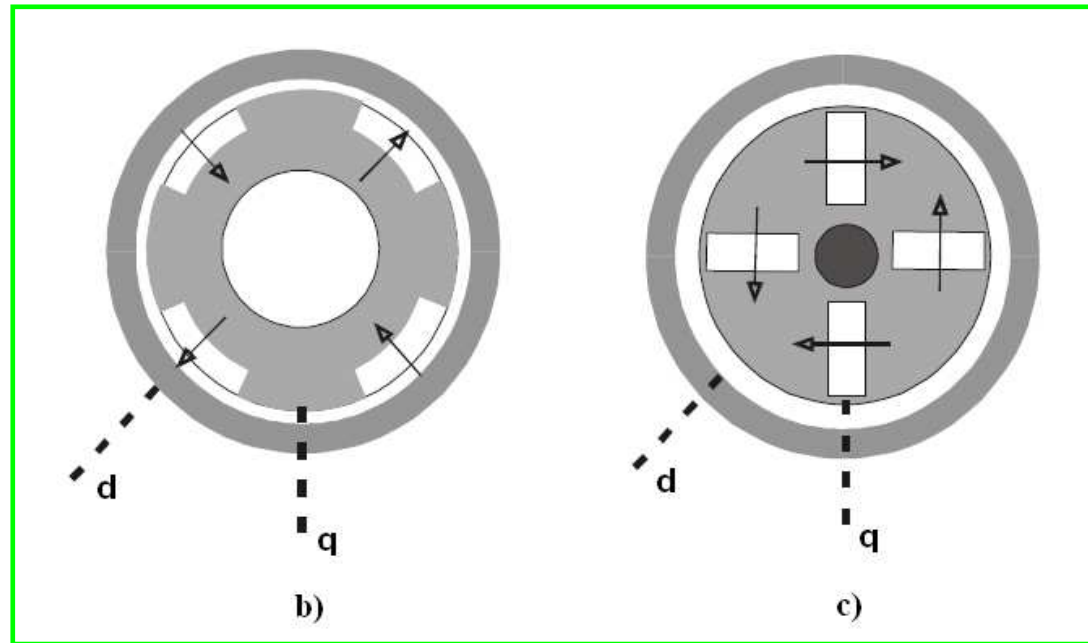
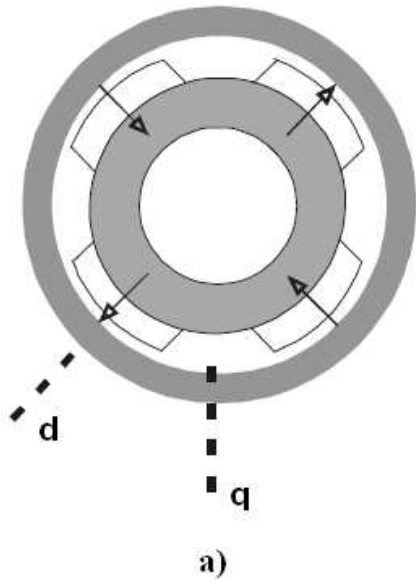


# PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor

PMSM的不同转子结构:



STM3

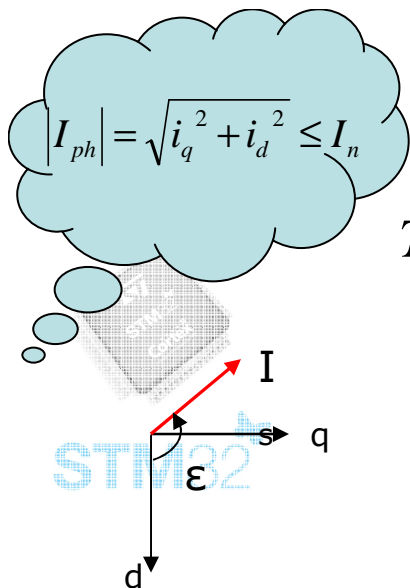


a) **SM-PMSM**: 永磁体标贴 ->  $L_d = L_q$

b) & c) **I-PMSM**: 永磁体内嵌 ->  $L_d < L_q$

尤其是: b) 内插式; c) 弧行内埋式.

# I-PMSM: MTPA 控制策略



$$T_e = \frac{3}{2} \bar{p} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \bar{p} \left[ \overset{\text{同步力矩}}{\Phi_m i_{qs}} + \overset{\text{磁阻力矩}}{(L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}} \right]$$

$$\begin{aligned} i_{qs} &= I_s \sin \varepsilon \\ i_{ds} &= I_s \cos \varepsilon \end{aligned} \implies T_e = \frac{3}{2} \bar{p} \left( \overset{\text{同步力矩}}{\Phi_m I_s \sin \varepsilon} + \overset{\text{磁阻力矩}}{\frac{I_s^2}{2} (L_d - L_q) \sin 2\varepsilon} \right)$$

❑ MTPA: 控制 '力矩/电流比' 最大化:

$$\frac{\partial T_e}{\partial \varepsilon} = \frac{3}{2} \bar{p} \left( \Phi_m I_s \cos \varepsilon + I_s^2 (L_d - L_q) \cos 2\varepsilon \right) = 0$$

$$\cos \varepsilon = \frac{-\Phi_m + \sqrt{\Phi_m^2 + 8[I_s(L_d - L_q)]^2}}{4I_s(L_d - L_q)}$$

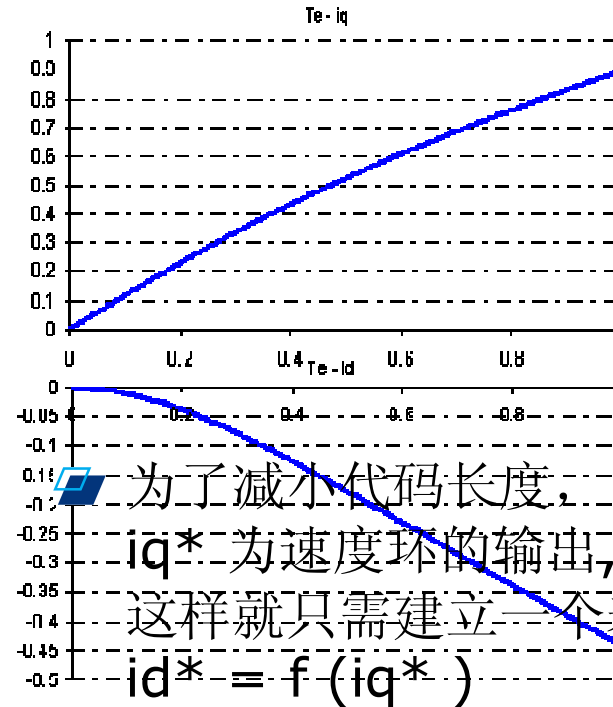
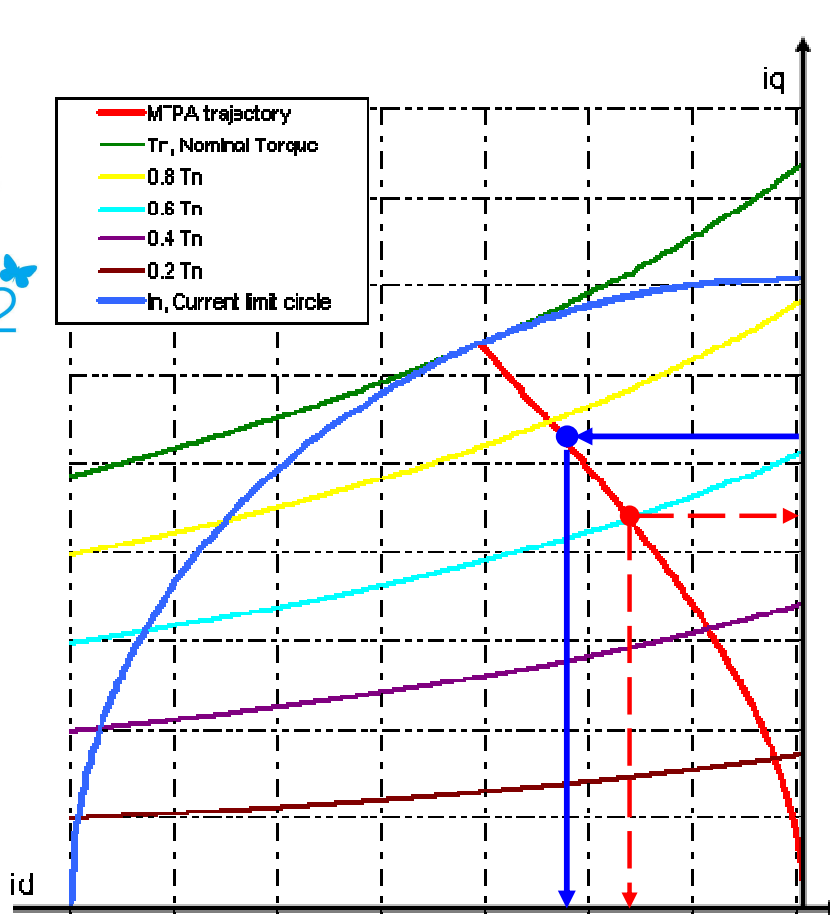
❑ 最优化轨迹决定了下列关系:

$$(I_s, \cos \varepsilon) \rightarrow (i_q^*, i_d^*) \rightarrow T_e$$

# I-PMSM : MTPA 控制的实现 (1/2)



STM32



为了减小代码长度, 使  $i_q^*$  为速度环的输出, 这样就只需建立一个表:  $i_d^* = f(i_q^*)$

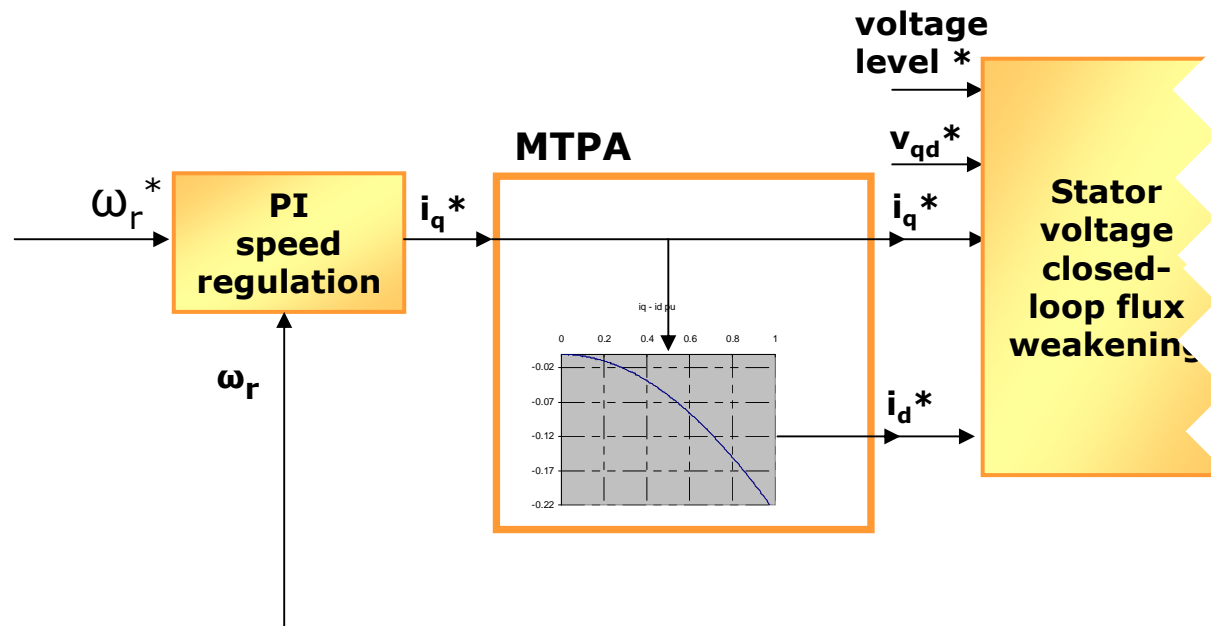


## I-PMSM: MTPA 控制的实现 (2/2)

同样，可以对下列方程执行线性插值：

$$i_d^* = f(i_q^*).$$

当马达的速度高于其额定值时，MTPA 控制就由弱磁控制代替。



# MPTA的使能及用户设置



STM32

## STM32F10x\_MCconf.h

```
/****** FOC methods *****/
/*Internal Permanent Magnet Motors Maximum-Torque-per-Ampere strategy*/
#define IPMSM_MTPA

/* Flux weakening operations allowed */
//#define FLUX_WEAKENING

/* Feed forward current regulation based on known motor parameters */
//#define FEED_FORWARD_CURRENT_REGULATION
```

- 对于给定的马达参数，软件包中的电子表格能够马上给出MTPA轨迹，然后得出8段线性插值的系数；

## MC\_PMSM\_motor\_param.h

```
#define IQMAX (s16)(23687)
#define SEGDIV (s16)(2921)
#define ANGC {-1412,-2572,-4576,-5200,-5564,-10551,-12664,-15567}
#define OFST {0,105,463,632,764,3012,4162,5997}
```



# 课程



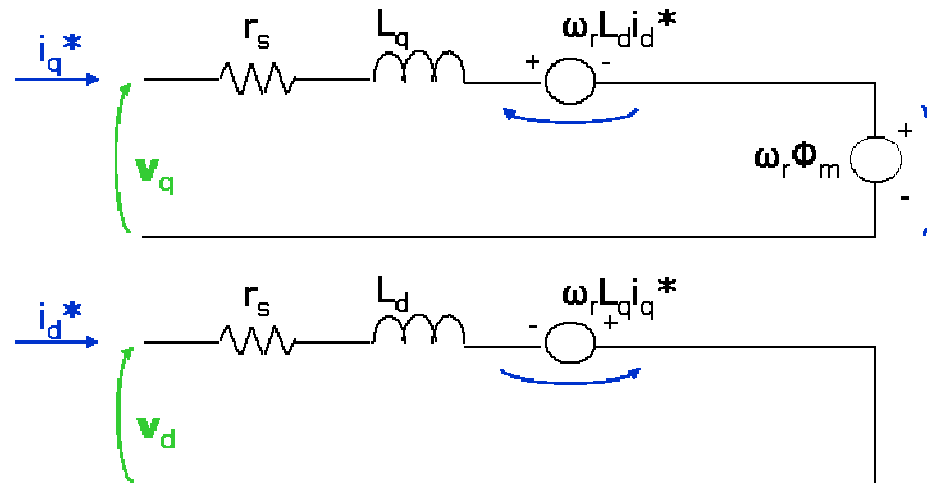
- ▣ GUI 概述
- ▣ 单电阻电流采样法
  - ▣ 硬件结构
  - ▣ 基本原理
  - ▣ 挑战
  - ▣ ST 专利方案：有效矢量插入
  - ▣ 实现
  - ▣ 三电阻采样 vs 单电阻采样
- ▣ I-PMSM 驱动优化：MTPA
- ▣ 新的弱磁控制策略
- ▣ 前向电流调节



## 弱磁：工作原理 1/2



- 许多应用需要马达工作在高于额定转速的范围内：这可由弱磁控制实现；
- 额定转速：马达能够发出最大力矩时对应的最大速度；
- PMSM q-d 轴变换的等效电路如下：



where 
$$|V_{ph}| = \sqrt{v_q^2 + v_d^2} \leq \frac{V_{BUS}}{\sqrt{3}}$$





## 弱磁：工作原理 2/2



- 磁链可以通过改变直轴电流  $i_d$  的值来实现弱化；
- 代价：减小了交轴电流  $i_q$  的值。因为：

$$|I_{ph}| = \sqrt{i_q^2 + i_d^2} \leq I_n$$

因此，可得到的电磁力矩  $T_e$ ：

### I-PMSM

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Phi_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}]$$

任何背离 MTPA 的动作会使  
 $T_e$  降低

### SM-PMSM

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

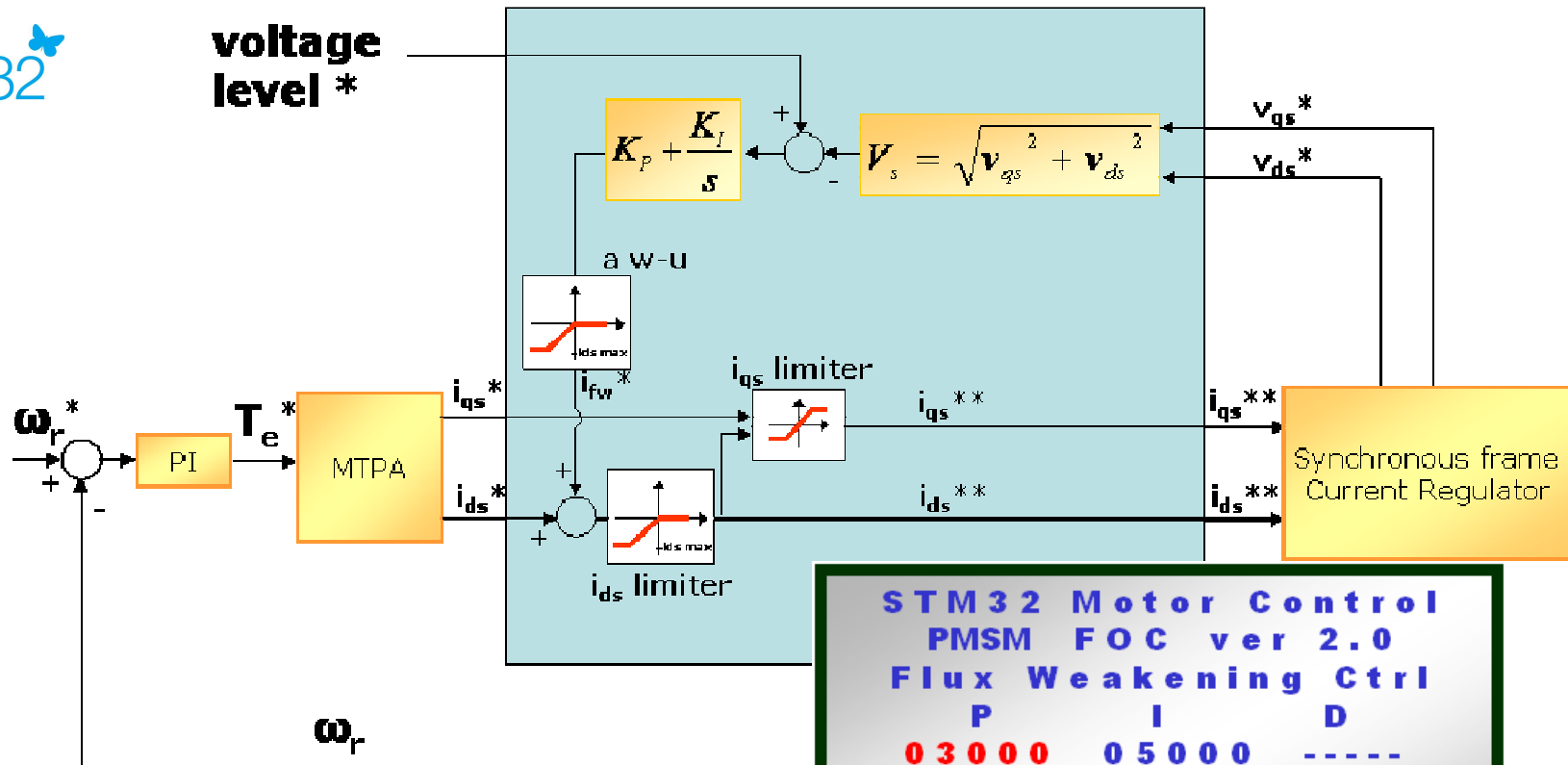


# 闭环弱磁方案

实现了闭环的弱磁控制方案：这样就无须知道马达的精确参数



STM32



```

STM32 Motor Control
PMSM FOC ver 2.0
Flux Weakening Ctrl
P      I      D
03000  05000  -----

Target      0098.5 (Vs %)
Measured    0000.0 (Vs %)

←→ Move    ↑↓ Change
    
```

STM32 based PMSM FOC firmware library training MCU

STM32 Releasing your creativity

# 弱磁控制



❏ 闭环的弱磁控制方案：这样就无须知道马达的精确参数；

❏ 控制环基于定子电压的监视（见前页的图）：

电流环的输出 ' $V_s$ ' 由一个固定的限制值控制(voltage level\*)；如果其高于该值，就进入弱磁区，通过闭环调节得到了信号 ' $i_{fw}$ '，其被加到MTPA 控制器的输出信号 ' $i_{ds}^*$ ' 上。其积分项（系数为  $K_I$ ）有 ' $anti-windup$ '（抗积分饱和）特性；

如果  $V_s$  小于该值，那么  $i_{fw} = 0$ ，MTPA 控制器会自动接管控制；

MTPA 控制器的输出信号 ' $i_{qs}^*$ ' 必须用信号 ' $i_{ds}^{**}$ ' 校验，以便使定子电流保持在额定值。



# 弱磁使能及用户设置



## STM32F10x\_MCconf.h

```
/****** FOC methods *****/
/*Internal Permanent Magnet Motors Maximum-Torque-per-Ampere strategy*/
#define IPMSM_MTPA

/* Flux weakening operations allowed */
#define FLUX_WEAKENING

/* Feed forward current regulation based on known motor parameters */
#define FEED_FORWARD_CURRENT_REGULATION
```

LCD界面上有专门的菜单来对弱磁的PI参数进行调节；

## MC\_PMSM\_motor\_param.h

```
#define MOTOR_MAX_SPEED_RPM (u32)3600 //maximum speed required
#define ID_DEMAG -NOMINAL_CURRENT //demagnetization current

#define FW_VOLTAGE_REF (s16)(985) //Vs reference, tenth of a percent
#define FW_KP_GAIN (s16)(3000) //proportional gain-flux weakening ctrl
#define FW_KI_GAIN (s16)(5000) //integral gain - flux weakening ctrl
#define FW_KP_DIV ((u16)(32768)) //flux weak ctrl P gain scaling factor
#define FW_KI_DIV ((u16)(32768)) //flux weak ctrl I gain scaling factor
```



# 课程



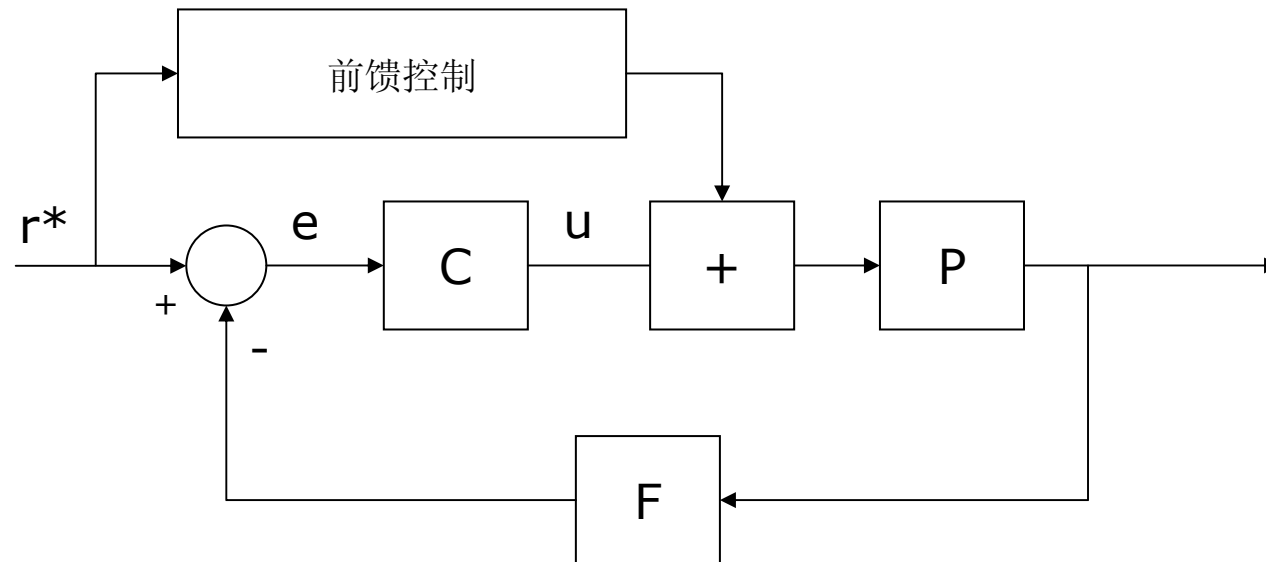
- ▣ GUI 概述
- ▣ 单电阻电流采样法
  - ▣ 硬件结构
  - ▣ 基本原理
  - ▣ 挑战
  - ▣ ST 专利方案: 有效矢量插入
  - ▣ 实现
  - ▣ 三电阻采样 vs 单电阻采样
- ▣ I-PMSM 驱动优化: MTPA
- ▣ 新的弱磁控制策略
- ▣ 前向电流调节



## 前馈电流调节：工作原理

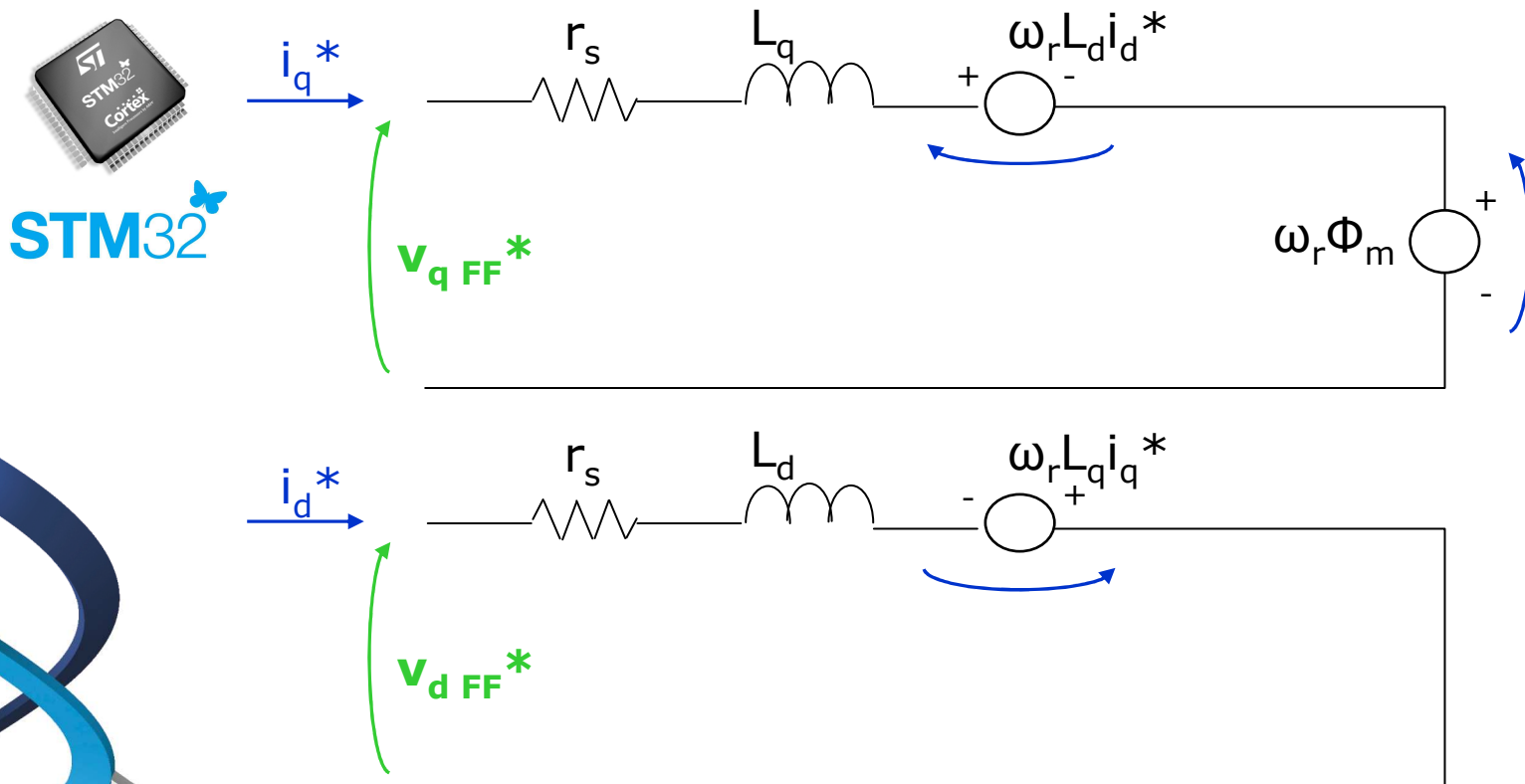


- 相对于单反馈控制而言，当一个大的扰动在其未影响系统输出的情况下能被测到，则前馈控制联合反馈控制可以明显地改善控制性能



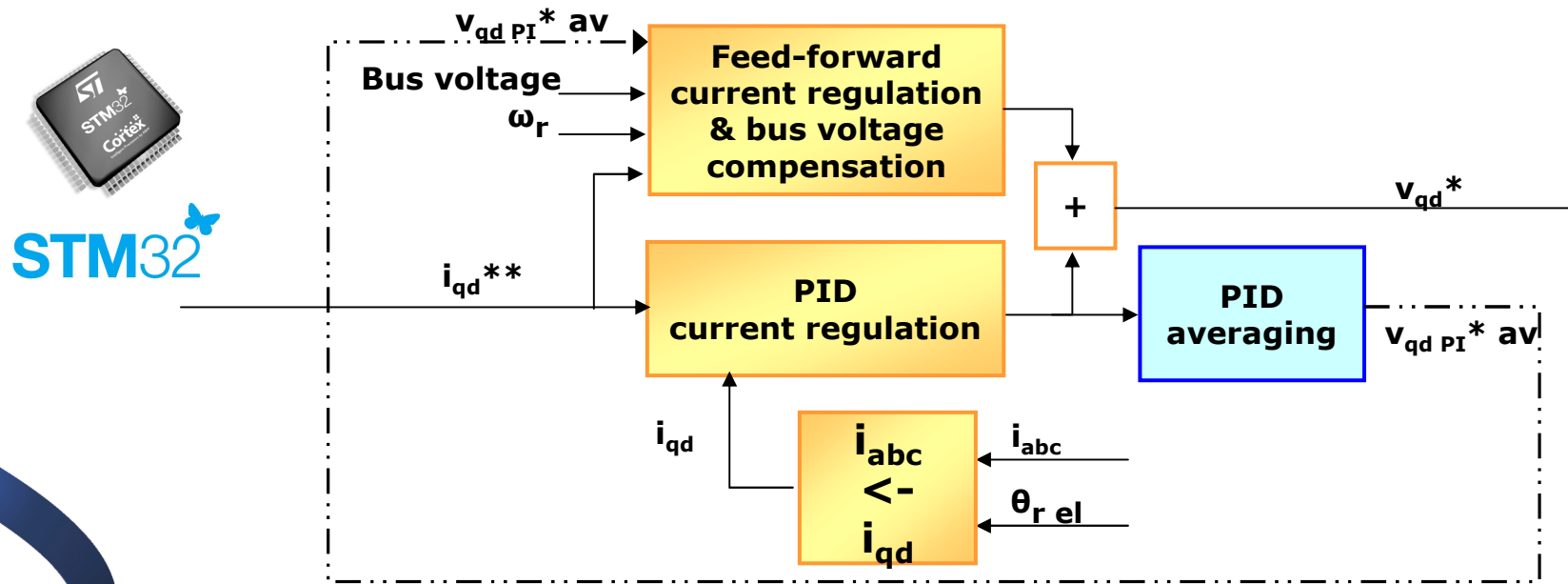
# 前馈电流调节 & BUS 电压补偿

▣ 交差耦合的影响及 b-emf 的消除



▣ 估算电压值  $V_{q FF}^*$  及  $V_{d FF}^*$  被转化成电压命令，通过BUS电压的测量，可实现对DC BUS 纹波的补偿

## 前馈：参数不确定性的校正



- 由于马达参数的不确定性或由于工作条件的变化而引起的马达参数的变化，该前馈模块可因此而受影响；
- 因此，PID 电流调节器必须执行两个任务：
  - 高速瞬间的电流调节；
  - 前馈校正：因为其平均值代表了计算误差



# 前馈的使能及用户设定



## STM32F10x\_MCconf.h

```
/****** FOC methods *****/  
/*Internal Permanent Magnet Motors Maximum-Torque-per-Ampere strategy*/  
//#define IPMSM_MTPA  
  
/* Flux weakening operations allowed */  
//#define FLUX_WEAKENING  
  
/* Feed forward current regulation based on known motor parameters */  
#define FEED_FORWARD_CURRENT_REGULATION
```

- 对于给定的马达参数，软件包中的电子表格能够马上给出前馈的系数

## MC\_PMSM\_motor\_param.h

```
#define CONSTANT1_Q (s32)(6215)  
#define CONSTANT1_D (s32)(6215)  
#define CONSTANT2 (s32)(6962)
```



# STM32 PMSM 驱动框图

