AT32电机库示范讲解
- FOC 增量编码器有感控制

2.20 (四) 13:30-15:30 在线培训

主讲：电机应用软件资深工程师 林明赞 博士

雅特力 | AT32 MCU电机库应用培训

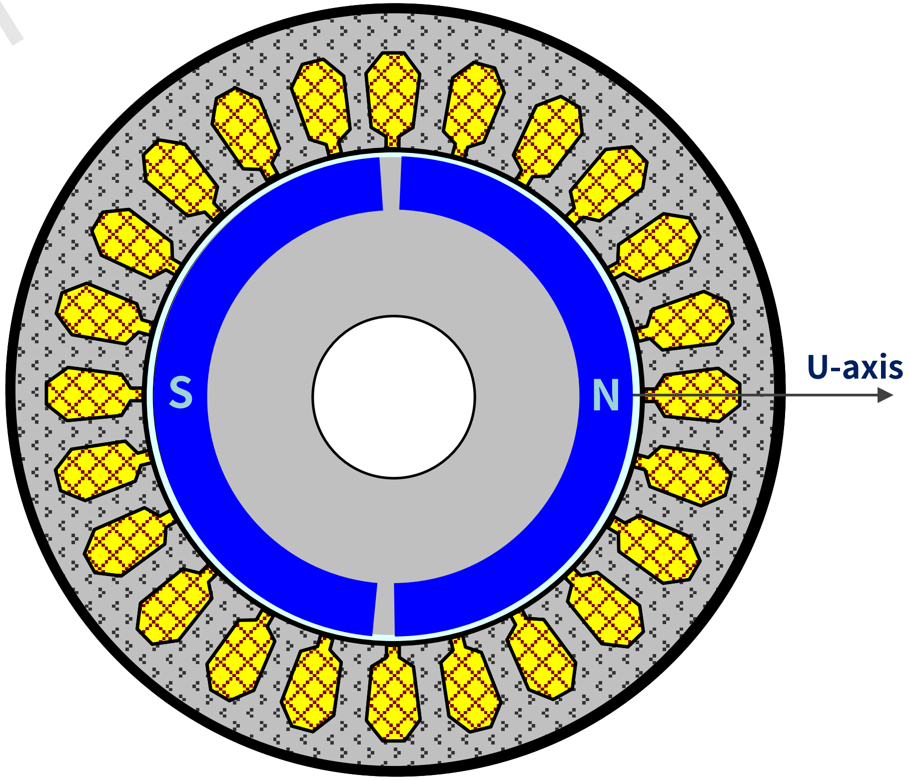
2025.02.20 活动议程

时间	主题	讲师
13:30 -14:30	永磁同步电机FOC增量编码器有感控制解说	电机应用软件 资深工程师 林明赞 博士
中场休息		
14:40 -15:30	AT32 电机库FOC增量编码器控制快速上手操作解说	电机应用软件 资深工程师 林明赞 博士

永磁同步电机
FOC控制原理

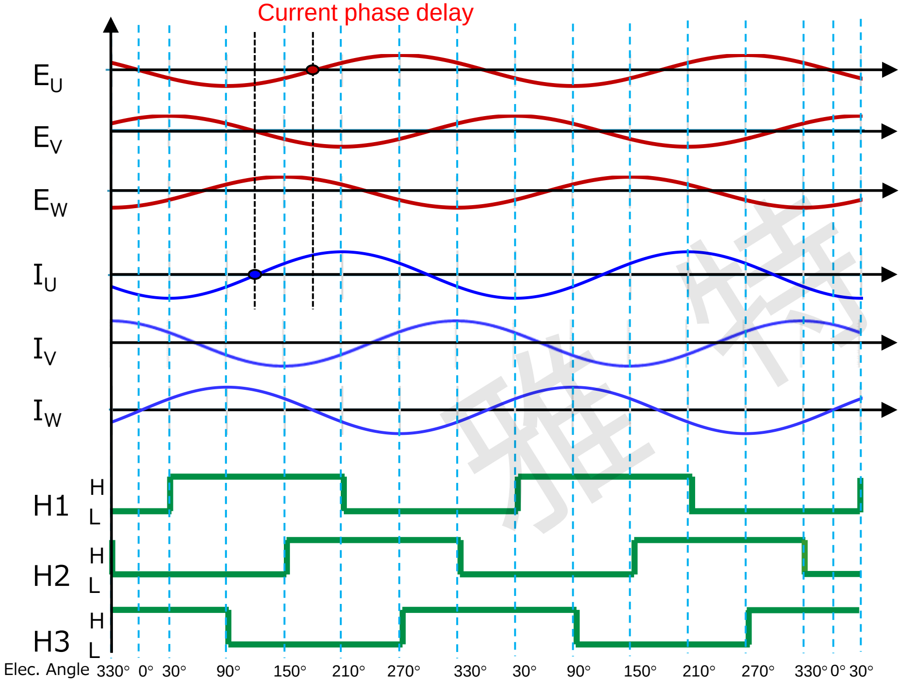
交流永磁同步电机介绍

- 定子为分布式绕组线圈，转子为表贴圆弧磁钢或内嵌式磁钢
- 反电势为正弦波，以三相弦波电流驱动
- 优点
  – 弦波电流构成空间均匀旋转磁场
  – 可输出稳定连续扭力
  – 搭配FOC控制，精确控制扭矩
  – 运转噪音小，效率高，响应快
- 缺点
  – 控制法则较复杂

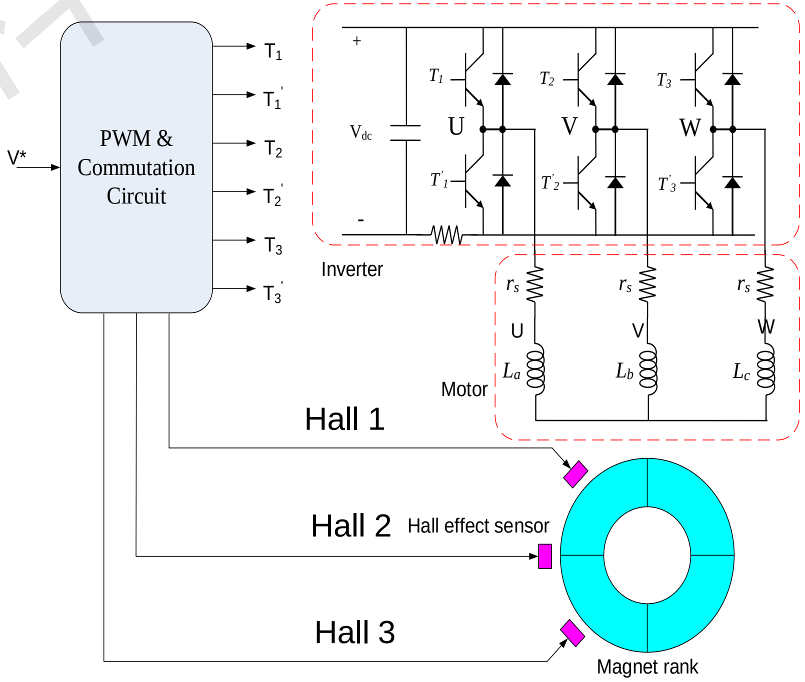


弦波电压控制技术 (电压矢量)

- 根据编码器/霍尔传感器，估算磁极角度，再依据角度产生三相弦波电压
- 因马达电感效应，电流落后反电势，造成马达扭力变小



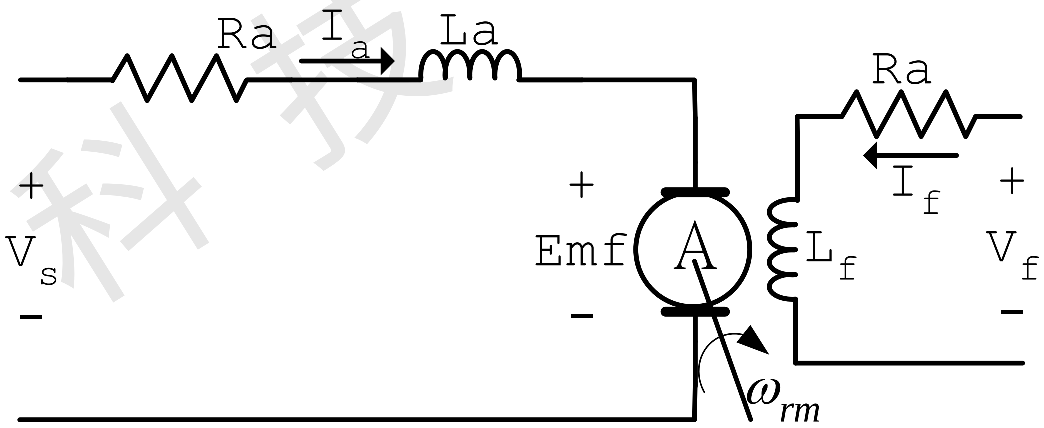
PMSM驱动电压/电流



PMSM 驱动电路

直流有刷电机控制

- 直流有刷电机转矩输出线性，控制方法简单
- 经FOC控制可将三相弦波矢量转换为两轴直流矢量
- 使交流电机可类比于直流电机控制



电磁转矩方程式

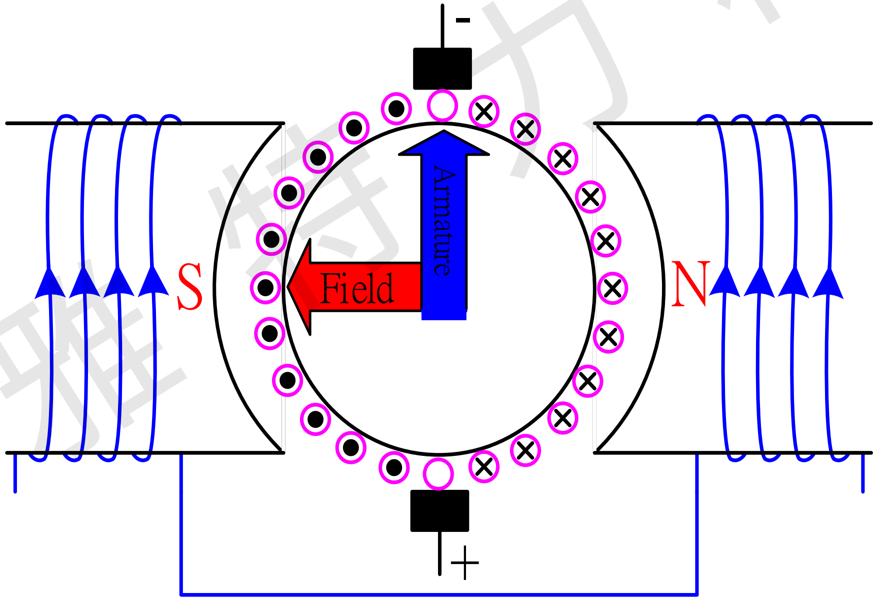
$$T_e = K_a I_a \left(K_f I_f\right) = K_t I_a I_f$$

转矩动态方程式

$$\frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J_s}\left(T_e - T_l - B_m \omega\right)$$

矢量控制 (电流矢量)

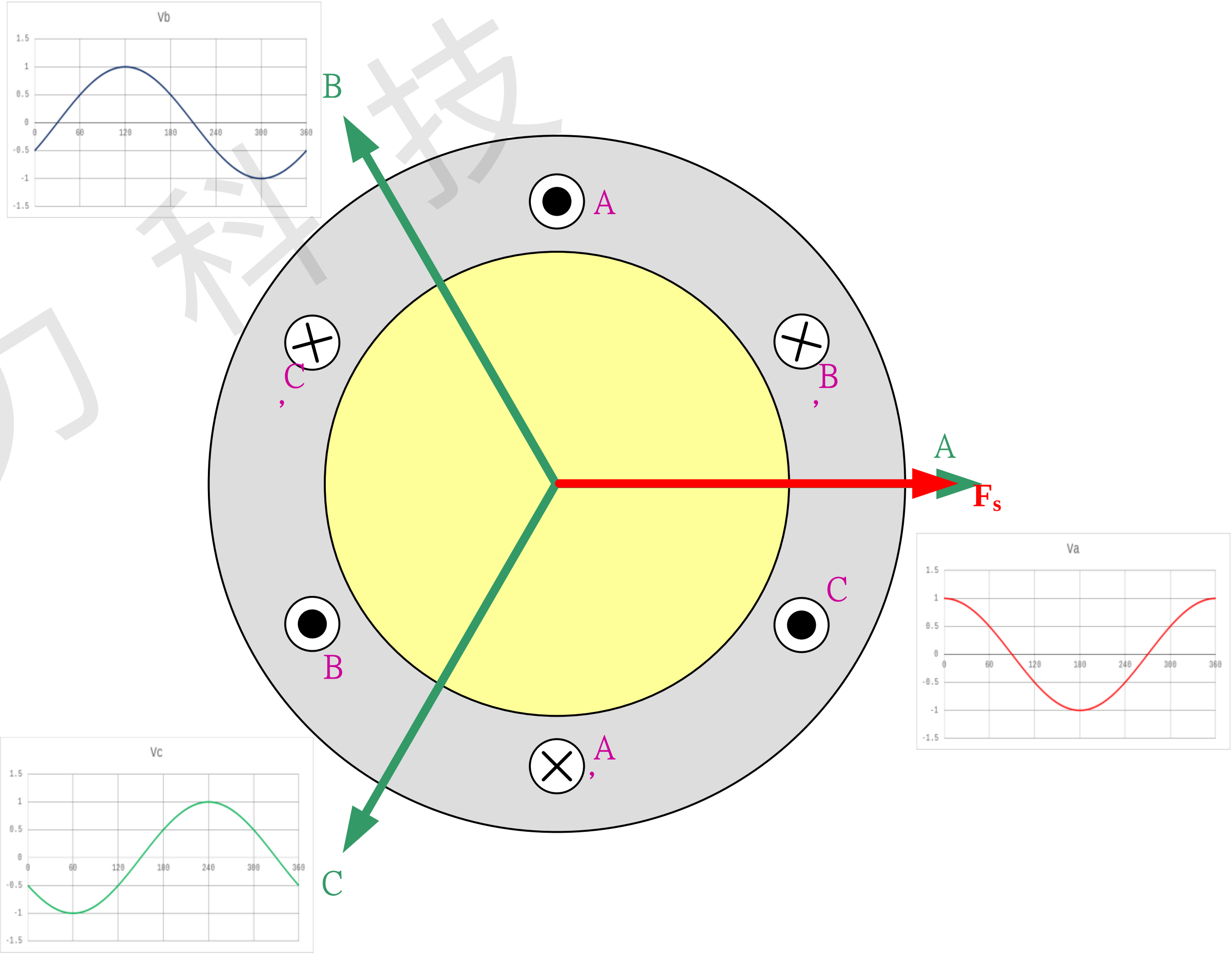
- 电机矢量：**磁场磁通**、**电枢磁通**
- 直流有刷马达藉由碳刷与换相片之间的机械作用，变换线圈电流极性
- 使得定子**磁场磁通**与转子**电枢磁通**垂直正交，产生扭力



直流有刷电机示意图

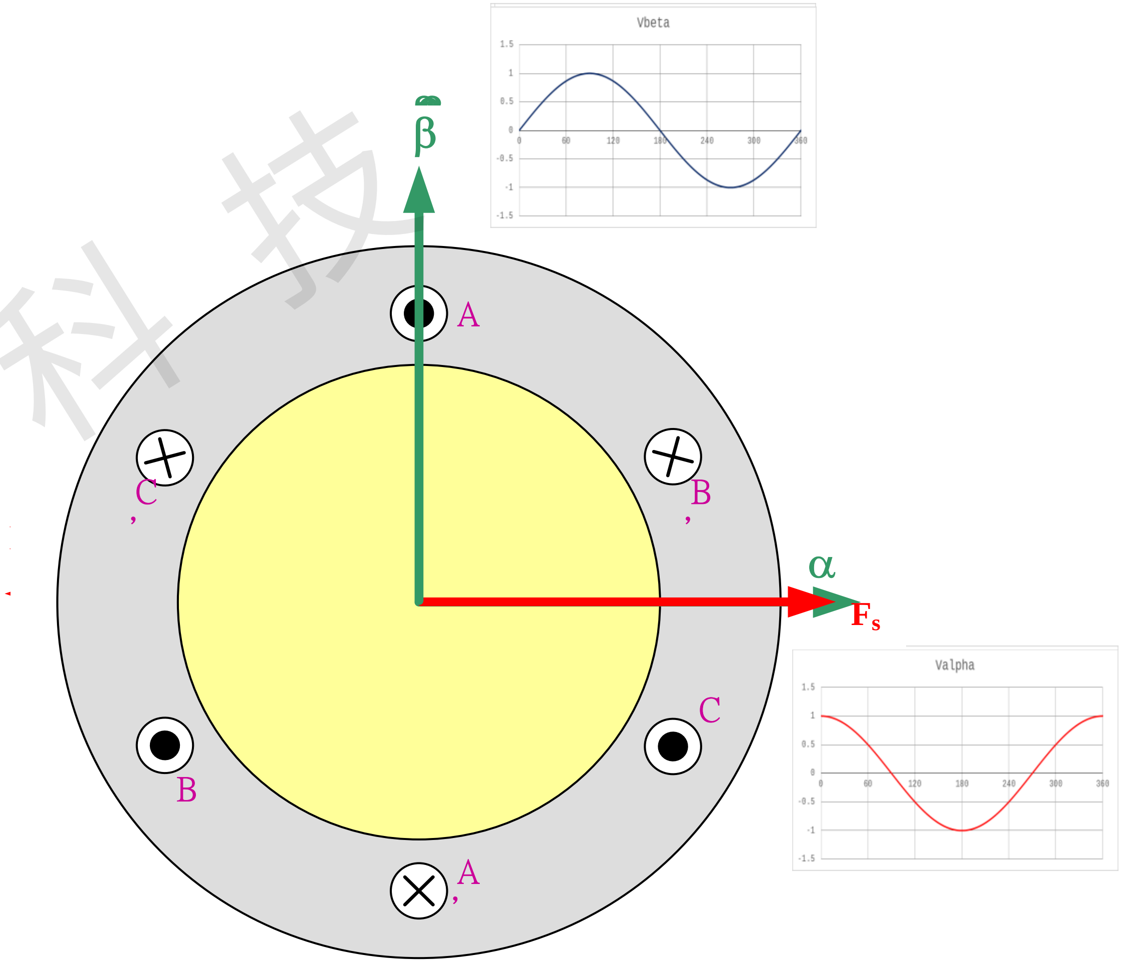
三相静止座标

- 三相a-b-c座标于空间中相位差120°
- 三相座标的弦波分量为电机中旋转矢量(电压/电流)的投影
- 三相弦波信号彼此相差120°
- 因位于同平面，可用两相座标表示该旋转矢量



两相垂直静止座标

- 两相α-β座标于空间中相位差90°
- 两相座标的弦波分量为电机中旋转矢量(电压/电流)的投影
- 两相弦波信号为正交相差90°
- 三相静止座标可用Clarke转换至两相静止座标
- 两相静止座标可用Inv-Clarke转换至三相静止座标



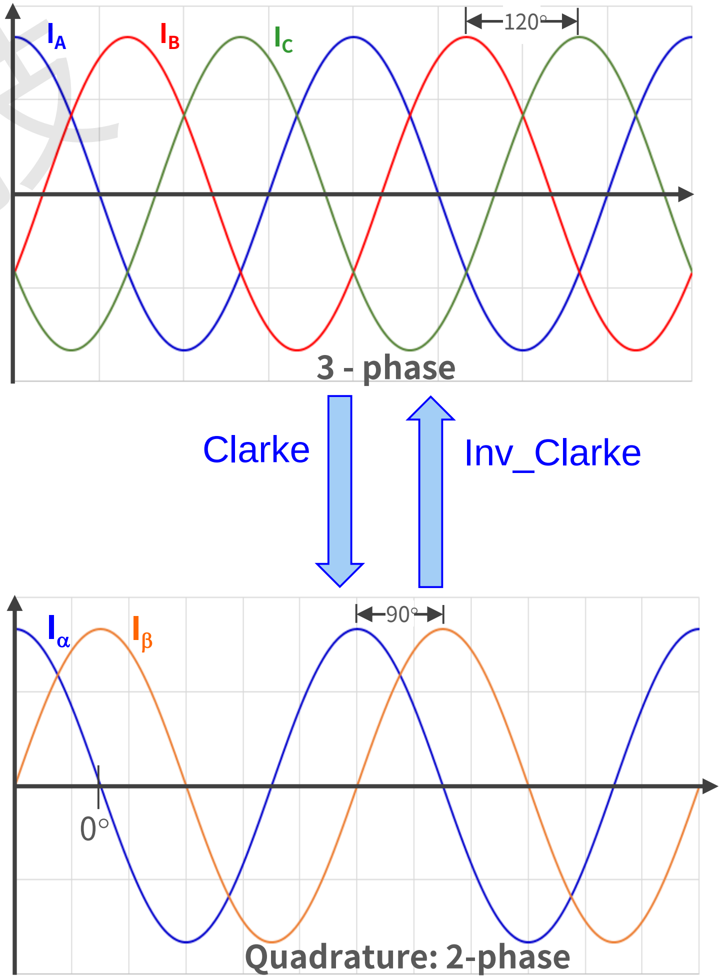
Clarke转换与Inv-Clarke转换

- **Clarke转换 (同幅值转换)**

$$\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}}\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ 0\end{bmatrix}=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2}\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix}$$

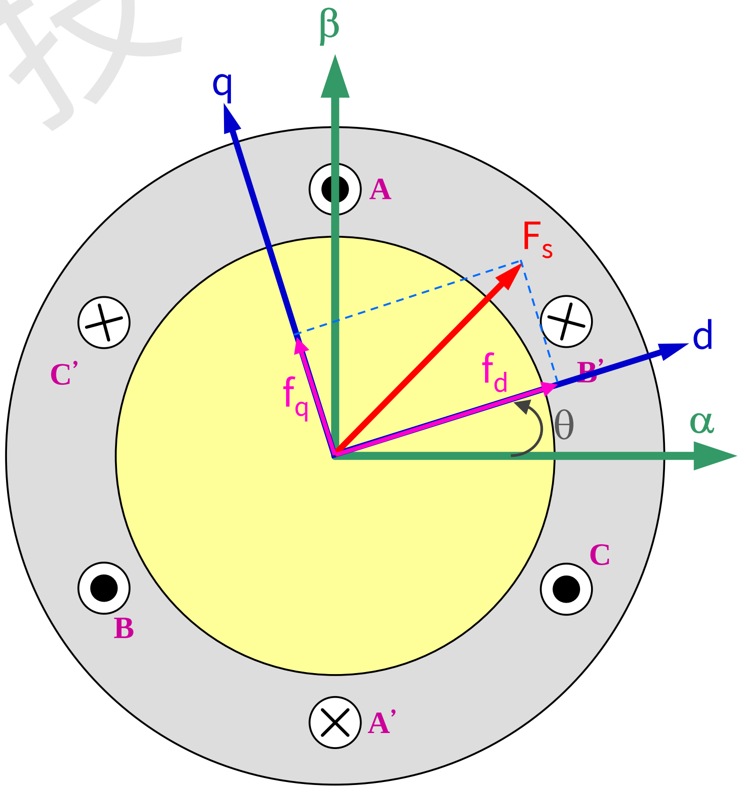
- **Inv-Clarke转换 (同幅值转换)**

$$\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{3}{2}\\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{3}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ 0\end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 1\\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1\\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ 0\end{bmatrix}$$



两相旋转座标

- 两相d-q旋转坐标随着电机中旋转矢量(电压/电流)同步旋转
- 旋转矢量投影到两相旋转坐标的分量为定值
- 两相α-β静止座标可用Park转换变换至两相d-q旋转坐标
- 两相d-q旋转坐标可用Inv-Park转换变换至两相α-β静止座标
- 将静止坐标的弦波矢量变换为旋转坐标的直流矢量



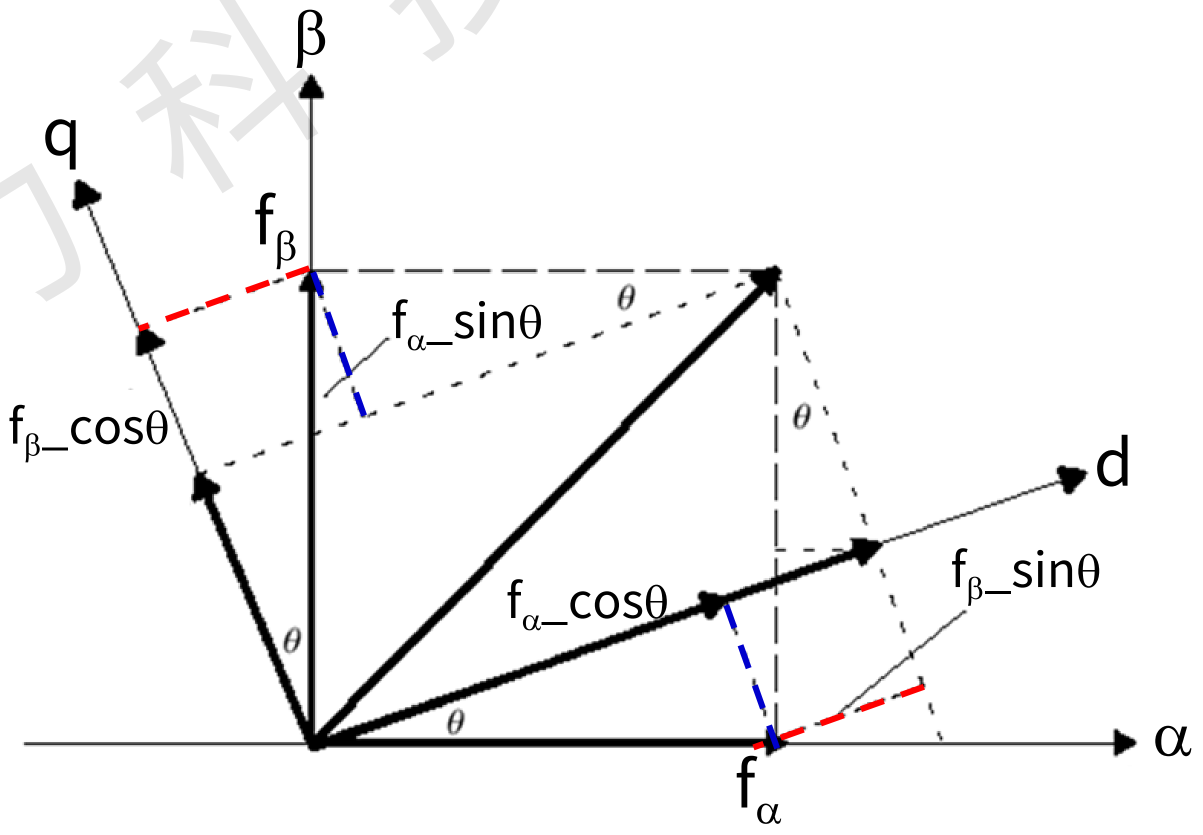
Park转换与Inv-Park转换

- Park 转换

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\theta) & sin(\theta) \\ -sin(\theta) & cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

- Inv-Park 转换

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\theta) & -sin(\theta) \\ sin(\theta) & cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$



交流永磁同步电机数学模型

- 三相静止座标表示的数学模型
  - 三相电气方程式

$$v_a = r_s i_a + d\lambda_a / dt$$
$$v_b = r_s i_b + d\lambda_b / dt$$
$$v_c = r_s i_c + d\lambda_c / dt$$

  - 磁通链方程式

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + \lambda_m \sin\theta$$
$$\lambda_b = L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c + \lambda_m \sin\left(\theta - \tfrac{2\pi}{3}\right)$$
$$\lambda_c = L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c + \lambda_m \sin\left(\theta + \tfrac{2\pi}{3}\right)$$

  - 线圈自感方程式

$$L_{aa} = L_{ls} + L_A + L_B cos2\theta_r$$
$$L_{bb} = L_{ls} + L_A + L_B cos(2\theta_r + 2\pi/3)$$
$$L_{cc} = L_{ls} + L_A + L_B cos(2\theta_r - 2\pi/3)$$

  - 线圈互感方程式

$$L_{ab} = L_{ba} = -\tfrac{1}{2} L_A + L_B cos(2\theta_r - 2\pi/3)$$
$$L_{bc} = L_{cb} = -\tfrac{1}{2} L_A + L_B cos2\theta_r$$
$$L_{ca} = L_{ac} = -\tfrac{1}{2} L_A + L_B cos(2\theta_r + 2\pi/3)$$

交流永磁同步电机数学模型

- 两相旋转座标表示的数学模型
  - 三相电气方程式

$$v_d = r_s i_d + \left(L_{ls} + L_{md}\right) di_d / dt - \omega_e L_{mq} i_q$$

$$v_q = r_s i_q + \left(L_{ls} + L_{mq}\right) di_q / dt + \omega_e L_{md} i_d + \omega_e \lambda_m$$

  - d-q轴耦合电感方程式

$$L_{md} = \tfrac{3}{2}\left(L_A - L_B\right)$$

$$L_{mq} = \tfrac{3}{2}\left(L_A + L_B\right)$$

  - 电磁转矩方程式

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{Pole}{2}\left(\lambda_m i_q + \left(L_d - L_q\right) i_d i_q\right)$$

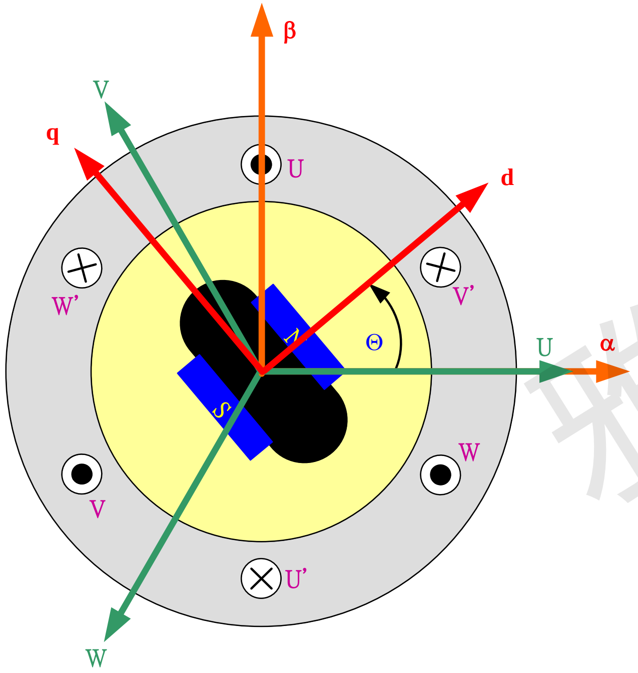
  - 转轴动态方程式

$$d\omega_r / dt = \left(T_e - T_l - B\omega_r\right) / J$$

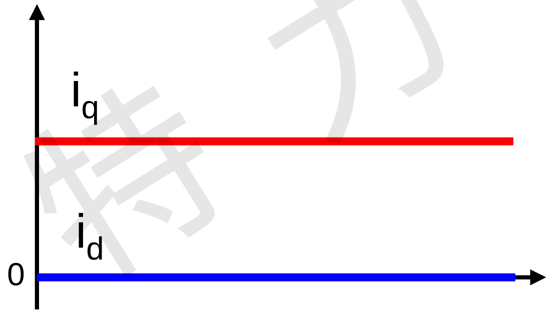
$$\omega_e = \frac{Pole}{2}\omega_r$$

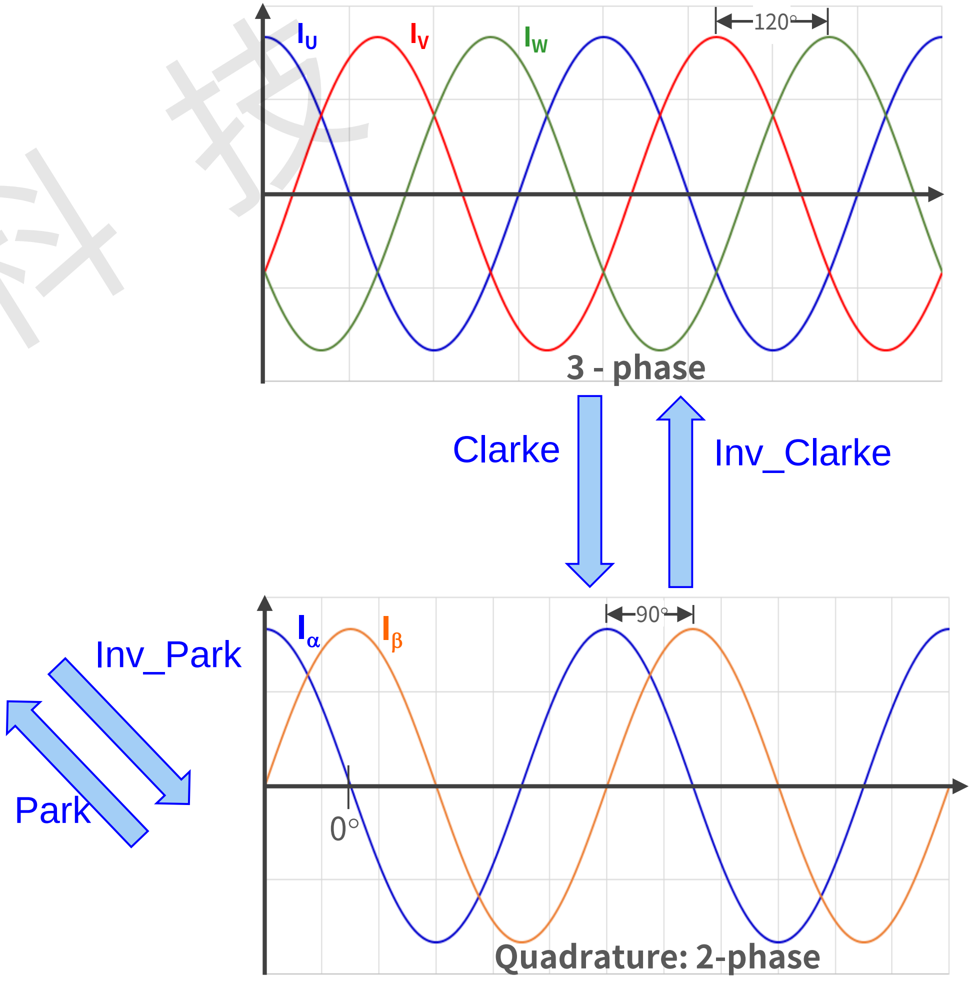
矢量控制技术

- 藉由坐标转换将交流讯号转换成直流讯号
- I_d：磁场电流，I_q：电枢电流
- 须感知两相电流与磁极位置信息



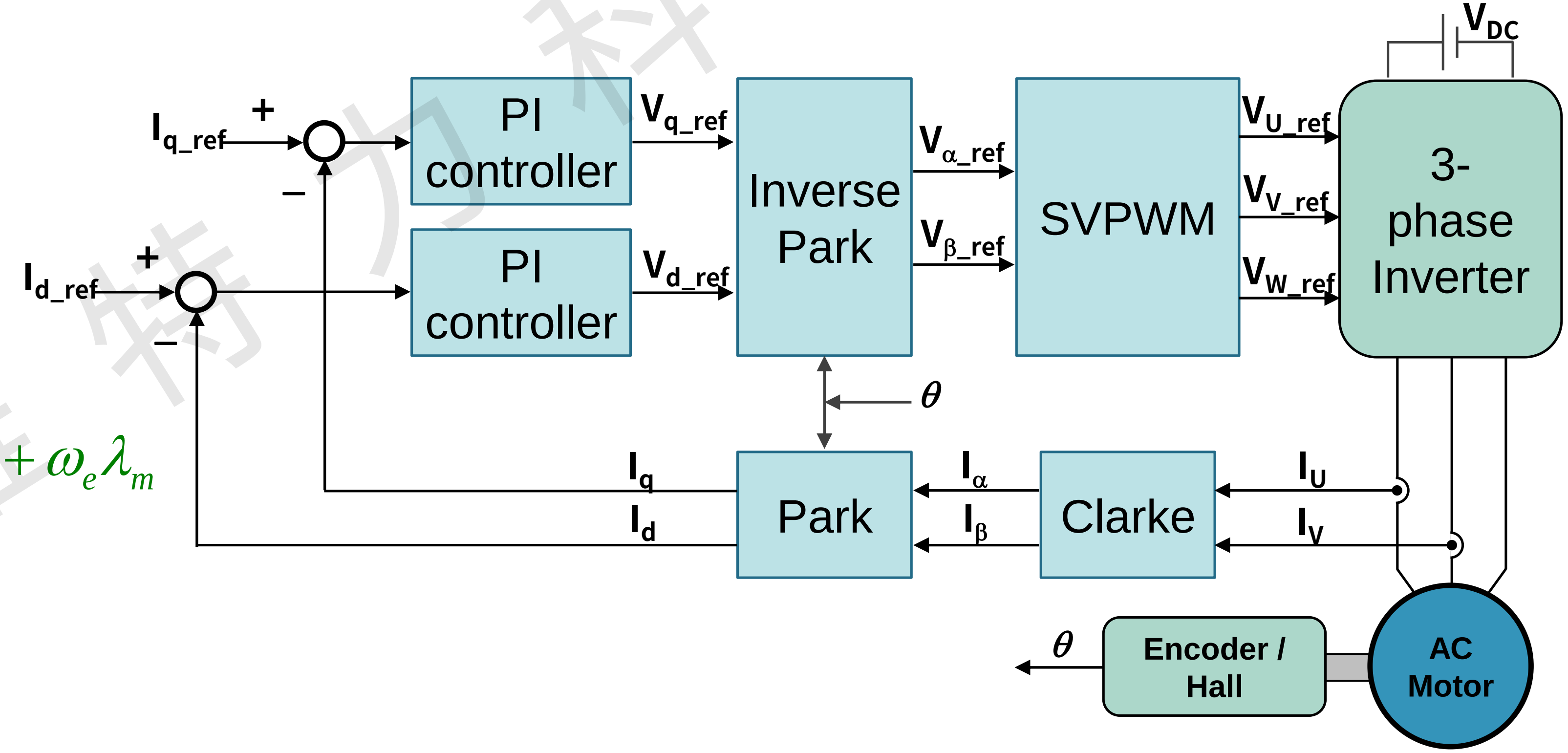
电机矢量坐标示意图





磁场导向控制(Field Oriented Control)技术

- 藉由两个PI控制器调整马达d-q轴电压，使马达电流追随电流命令
- 控制马达电流即可控制马达扭力



永磁电机电气方程式

$$v_d = r_s i_d + \left(L_{ls} + L_{md}\right) di_d/dt - \omega_e L_{mq} i_q$$

$$v_q = r_s i_q + \left(L_{ls} + L_{mq}\right) di_q/dt + \omega_e L_{md} i_d + \omega_e \lambda_m$$

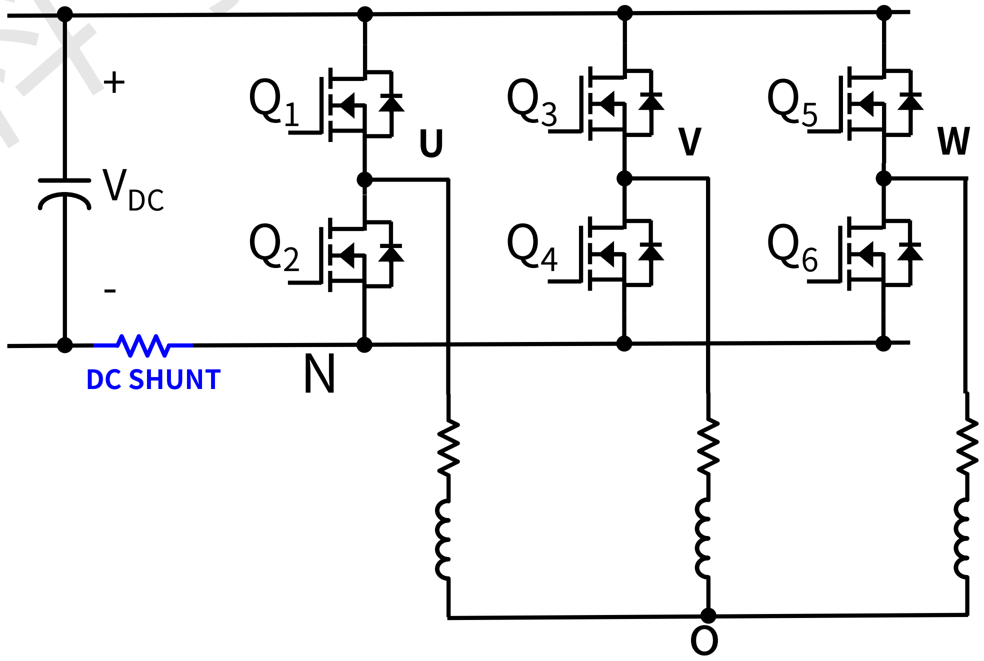
转子转矩方程式

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{Pole}{2}\left(\lambda_m i_q + \left(L_d - L_q\right) i_d i_q\right)$$

三相电压源全桥驱动电路

- 切换状态与电压矢量表

State / Mode	Q_1 (Q_2)	Q_3 (Q_4)	Q_5 (Q_6)	Voltage Vector
Mode 0	0 (1)	0 (1)	0 (1)	V_0
Mode U^+	1 (0)	0 (1)	0 (1)	V_1
Mode W^-	1 (0)	1 (0)	0 (1)	V_2
Mode V^+	0 (1)	1 (0)	0 (1)	V_3
Mode U^-	0 (1)	1 (0)	1 (0)	V_4
Mode W^+	0 (1)	0 (1)	1 (0)	V_5
Mode V^-	1 (0)	0 (1)	1 (0)	V_6
Mode 0	1 (0)	1 (0)	1 (0)	V_0



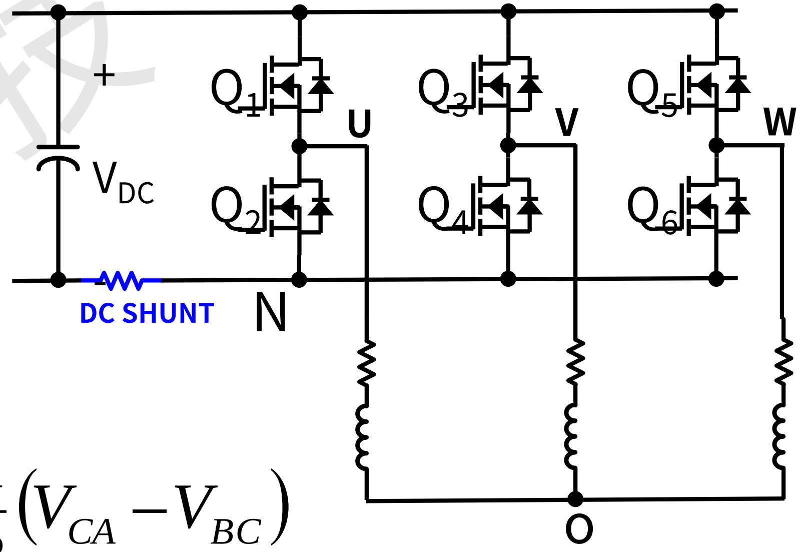
三相电压源全桥瞬时电压

- 三相线电压

$$V_{AB}=V_{AN}-V_{BN}=V_{AO}-V_{BO}$$
$$V_{BC}=V_{BN}-V_{CN}=V_{BO}-V_{CO}$$
$$V_{CA}=V_{CN}-V_{AN}=V_{CO}-V_{AO}$$

- 因 $V_{AO}+V_{BO}+V_{CO}=0$
- 可得 $V_{AO}=\frac{1}{3}(V_{AB}-V_{CA})$ $V_{BO}=\frac{1}{3}(V_{BC}-V_{AB})$ $V_{CO}=\frac{1}{3}(V_{CA}-V_{BC})$
- 故 $V_{AO}=\frac{1}{3}(2V_{AN}-V_{BN}-V_{CN})$ $V_{BO}=\frac{1}{3}(2V_{BN}-V_{AN}-V_{CN})$

$$V_{CO}=\frac{1}{3}(2V_{CN}-V_{AN}-V_{BN})$$

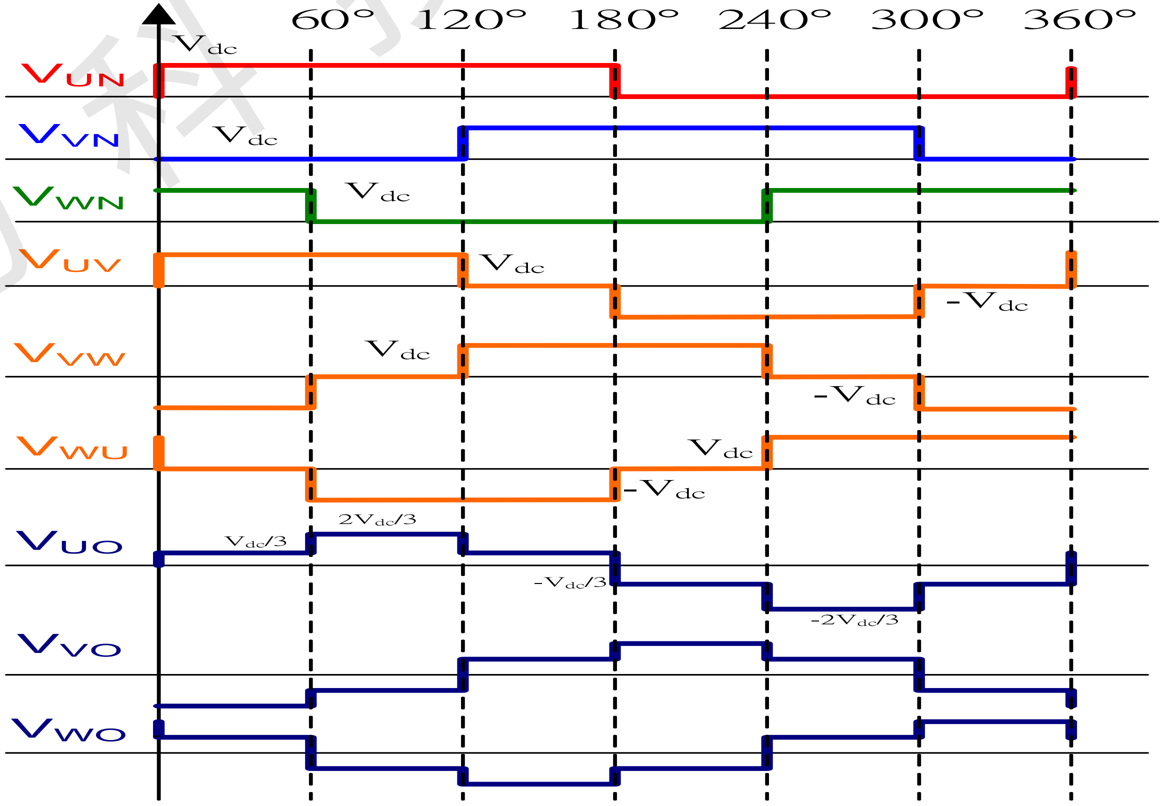


六步方波电压向量

相电压与线电压矢量表

W	V	U	V_{UO}	V_{VO}	V_{WO}	V_{UV}	V_{VW}	V_{WU}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	V_{dc}	0	$-V_{dc}$
0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	V_{dc}	0
0	1	1	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	0	V_{dc}	$-V_{dc}$
1	0	0	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	$-V_{dc}$	V_{dc}
1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	V_{dc}	$-V_{dc}$	0
1	1	0	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	0	V_{dc}
1	1	1	0	0	0	0	0	0

六步方波电压

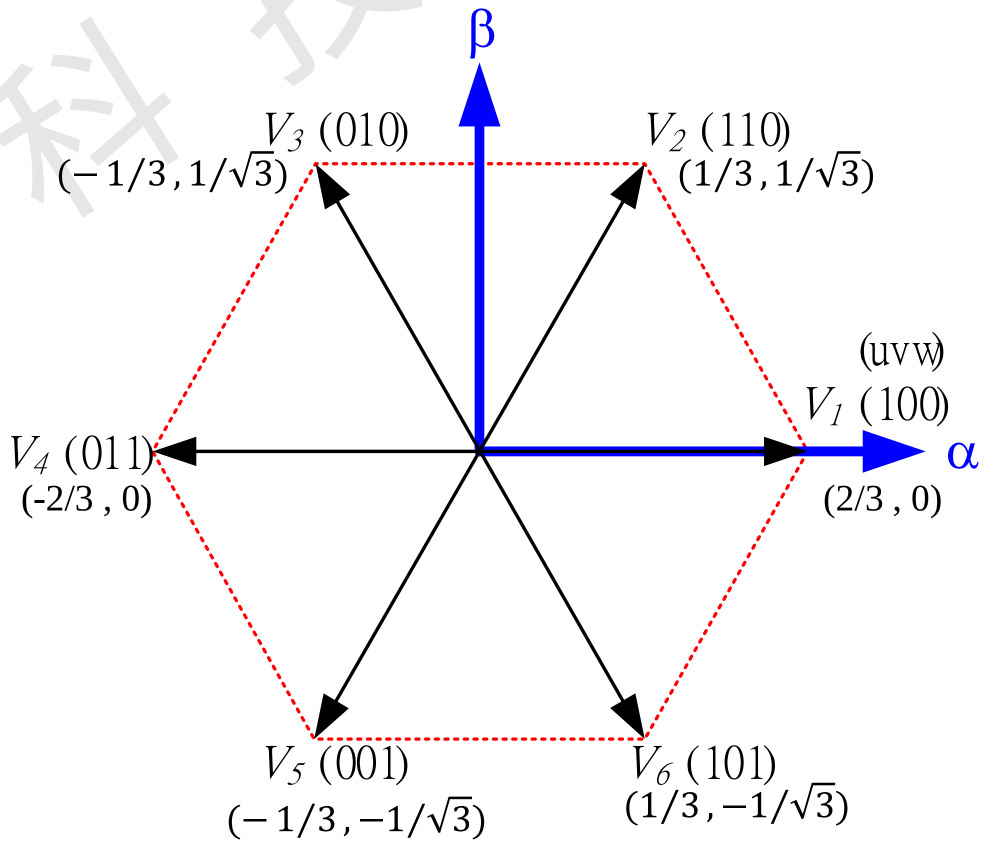


两相坐标下电压矢量

- 电压矢量表

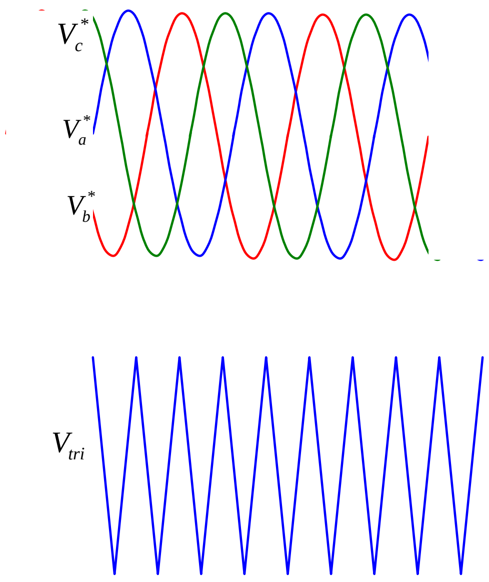
U	V	W	V_α	V_β
0	0	0	0	0
1	0	0	$2V_{dc}/3$	0
0	1	0	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/\sqrt{3}$
1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/\sqrt{3}$
0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/\sqrt{3}$
1	0	1	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}/\sqrt{3}$
0	1	1	$-2V_{dc}/3$	0
1	1	1	0	0

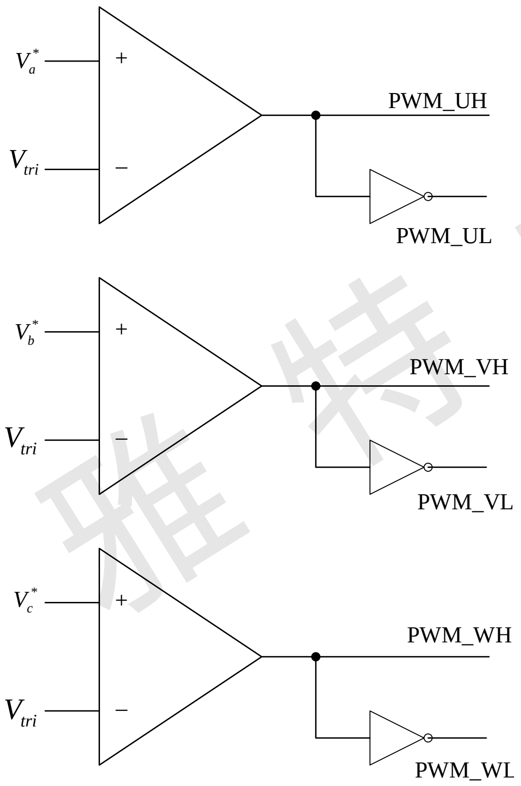
空间电压矢量



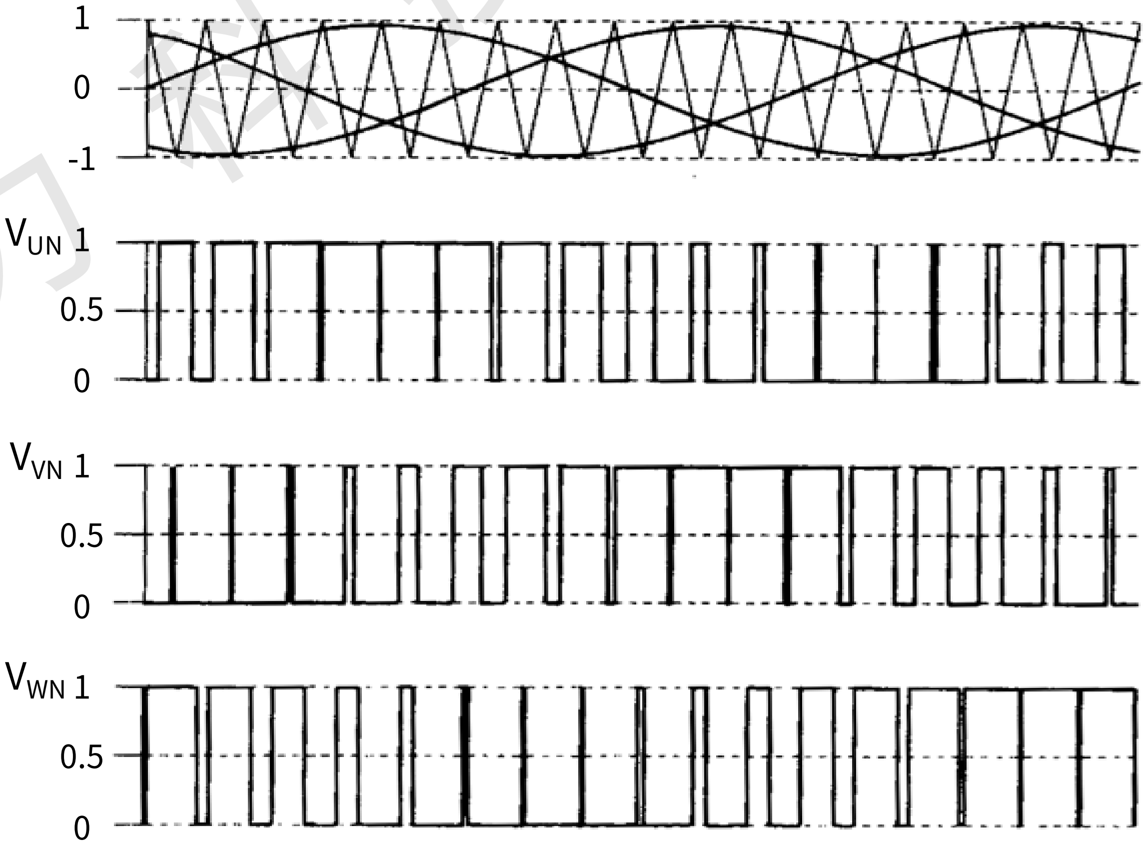
正弦脉波宽度调变(SPWM)

- 将三相弦波与调变三角波比较





三相SPWM输出电压



SPWM输出电压限制

- 调变指数　　截波比例

$$M = \frac{V_{\sin}}{V_{tri}} \qquad R = \frac{f_{tri}}{f_{\sin}}$$

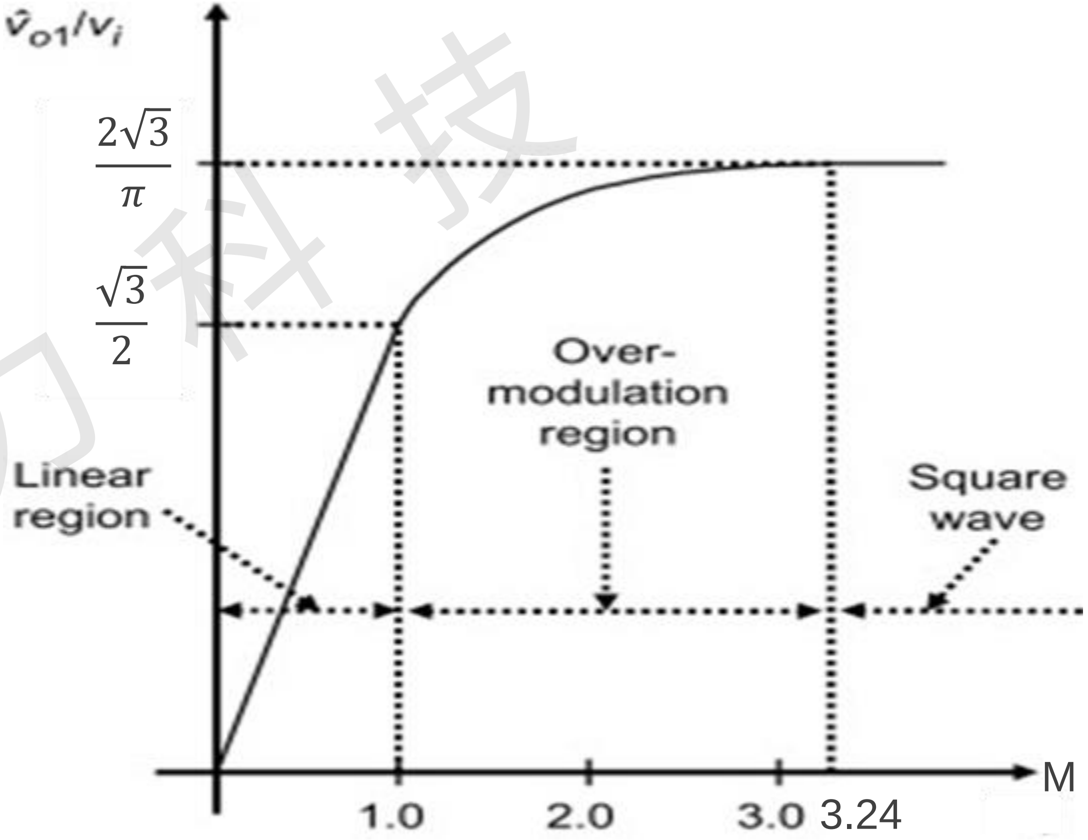
- 相电压基本波

$$V_{AN1} = M\, V_{DC} / 2$$

- 线电压基本波

$$V_{LL1} = \sqrt{3} V_{AN1}$$

$$= \sqrt{3} M \frac{V_{dc}}{2} \cong 0.866\, M V_{dc}$$



最大输出电压仅有母线电压的0.866倍

空间矢量脉波宽度调变(SVPWM)

- 通过选择相邻的两个有效矢量和零矢量，经一定时间比例组合，合成目标电压矢量
- 合成的目标电压矢量可以平滑地旋转，从而生成接近正弦波的输出电压
- 电压正规化

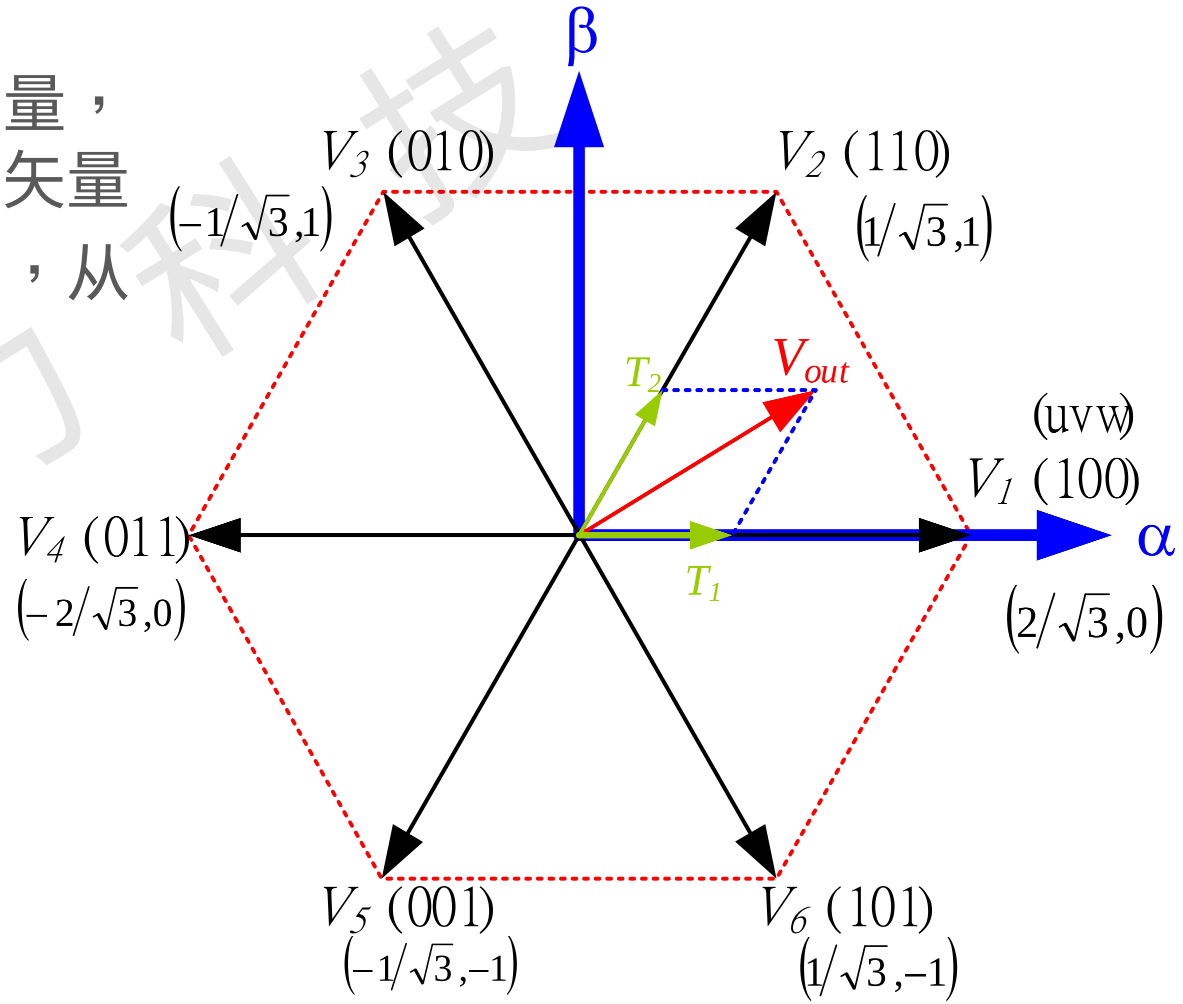
$$V_{LL(\max)} = V_{DC}$$

$$V_{ph(\max)} = V_{DC} / \sqrt{3}$$

$$V_{ph(norm)} = V_{ph} / V_{ph(\max)}$$

$$= \left(\frac{2}{3} V_{DC}\right) \Big/ \left(\frac{1}{\sqrt{3}} V_{DC}\right)$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}}$$



SVPWM空间矢量合成

- 空间合成向量

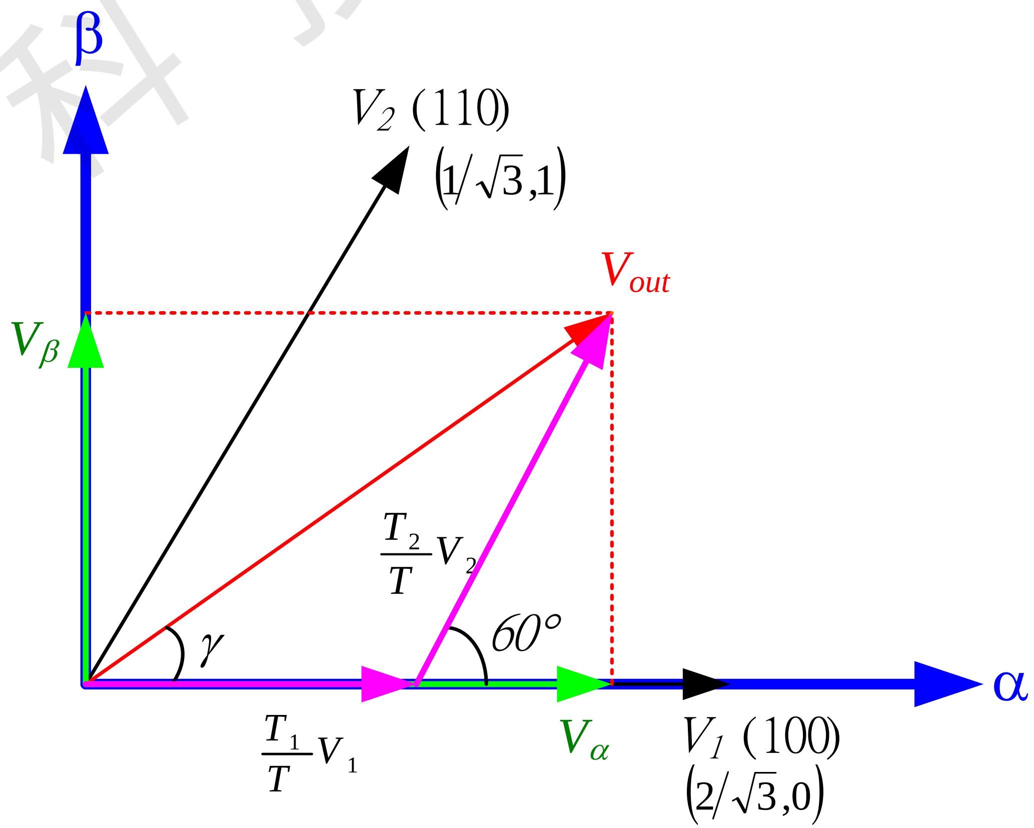
$$\begin{cases} T = T_1 + T_2 + T_0 \\ V_{out} = \dfrac{T_1}{T} V_1 + \dfrac{T_2}{T} V_2 + \dfrac{T_0}{T} V_{0(7)} \end{cases}$$

- 两轴垂直分量

$$\begin{cases} V_\beta = V_{out} \sin\gamma = \dfrac{T_2}{T} |V_2| \sin 60^\circ \\ V_\alpha = V_{out} \cos\gamma = \dfrac{T_1}{T} |V_1| + \dfrac{T_2}{T} |V_2| \cos 60^\circ \end{cases}$$

- 向量输出时间

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{T}{2}\left(\sqrt{3} V_\alpha - V_\beta\right) \\ T_2 = T V_\beta \\ T_0 = T - T_1 - T_2 \end{cases}$$



简易SVPWM计算

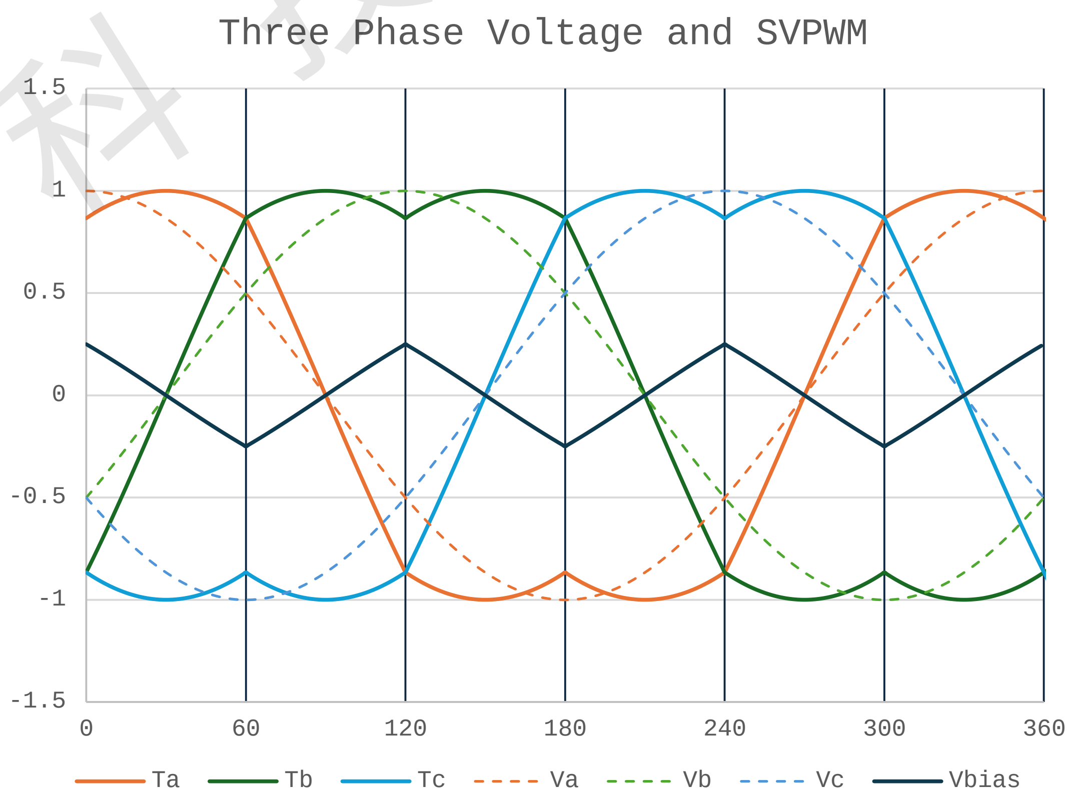
- 取每60°区间中最大电压与最小电压之平均，求得电压偏移点V_{bias}
- 将各相电压扣除电压偏移点V_{bias}后除以√3得出以0为基准点的半幅占空比
- 再加上1/2占空比即得各相输出占空比
- 以0° ~60°区间为例

$$V_{bias} = (V_a + V_c)/2$$

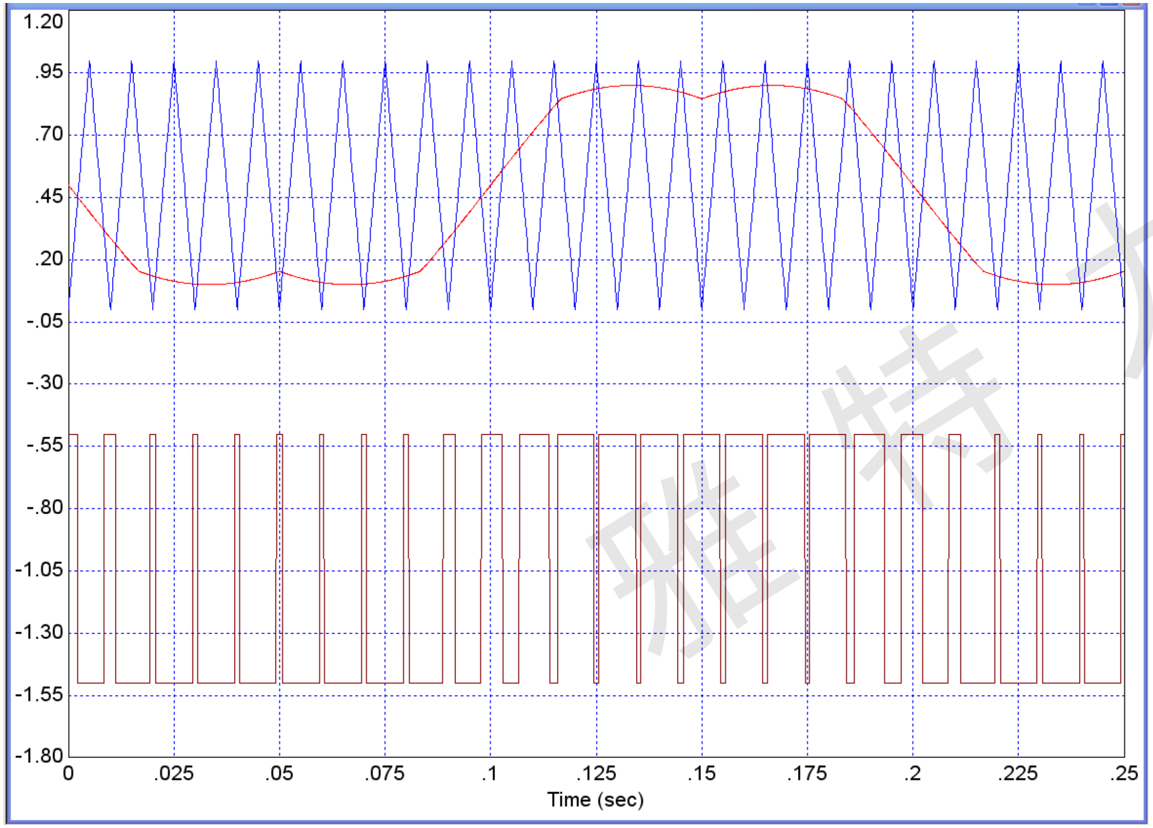
$$V_{a\_duty} = (V_a - V_{bias})/\sqrt{3} + full\_duty/2$$

$$V_{b\_duty} = (V_b - V_{bias})/\sqrt{3} + full\_duty/2$$

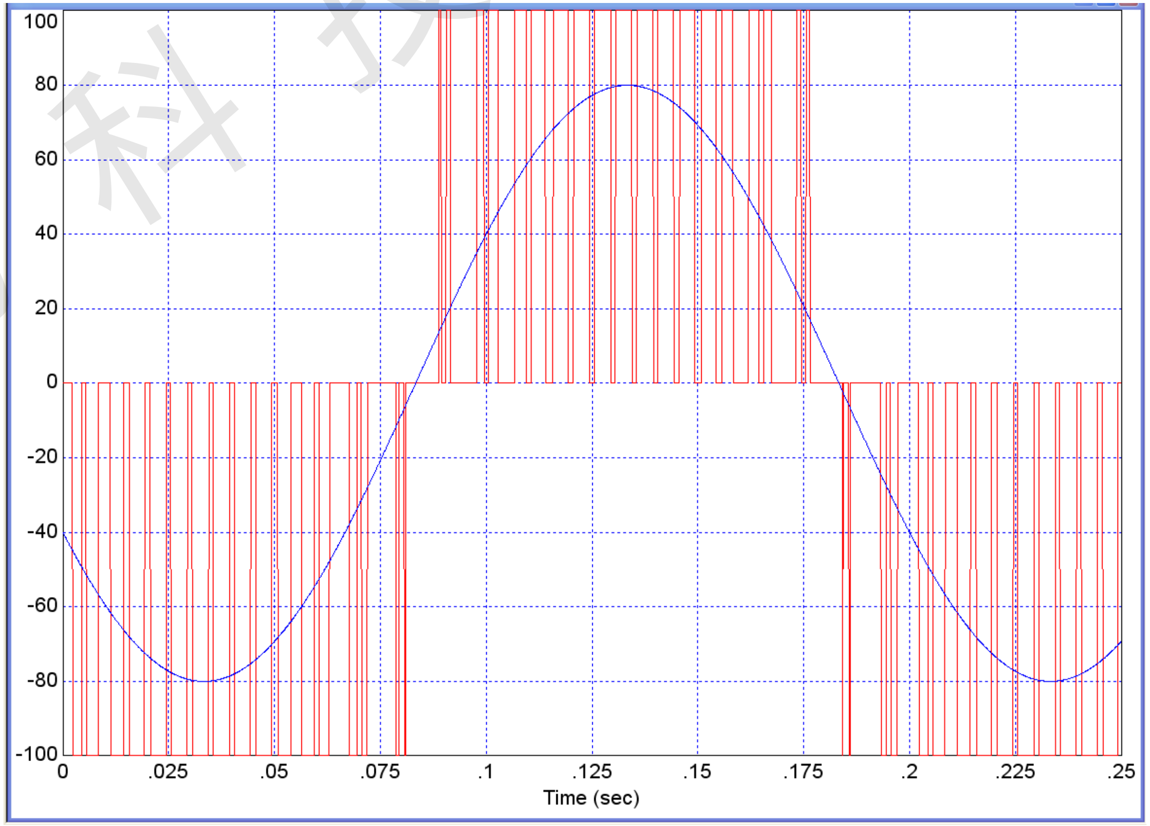
$$V_{c\_duty} = (V_c - V_{bias})/\sqrt{3} + full\_duty/2$$



SVPWM输出波形



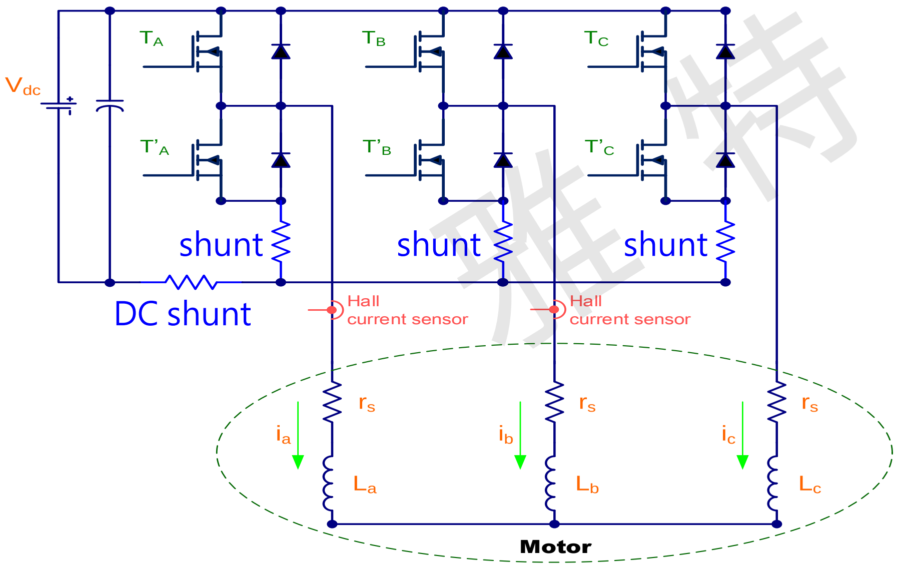
相电压PWM



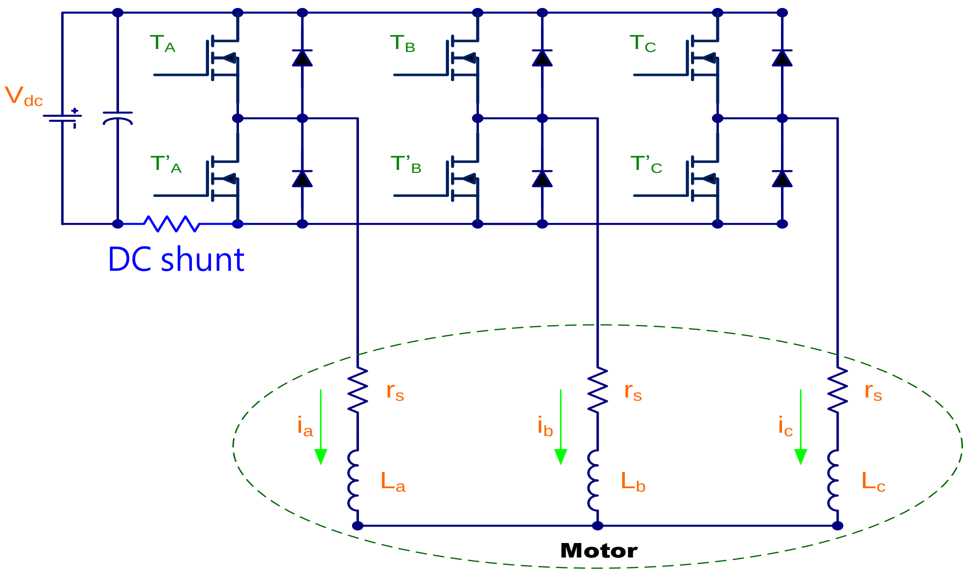
线电压PWM

驱动电路架构

- 一般FOC三相全桥电路
  - 使用3-shunt or 2-shunt 电流感测，或Hall电流传感器，感测两相电流
  - DC shunt 侦测过电流
  - 大电流驱动器，shunt电阻功率消耗大

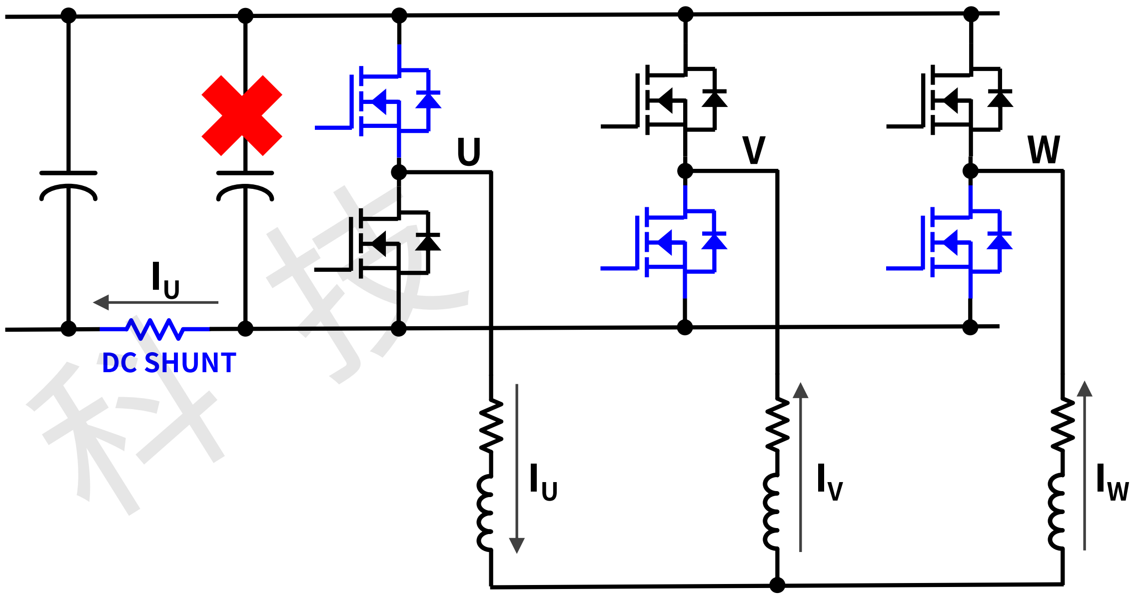


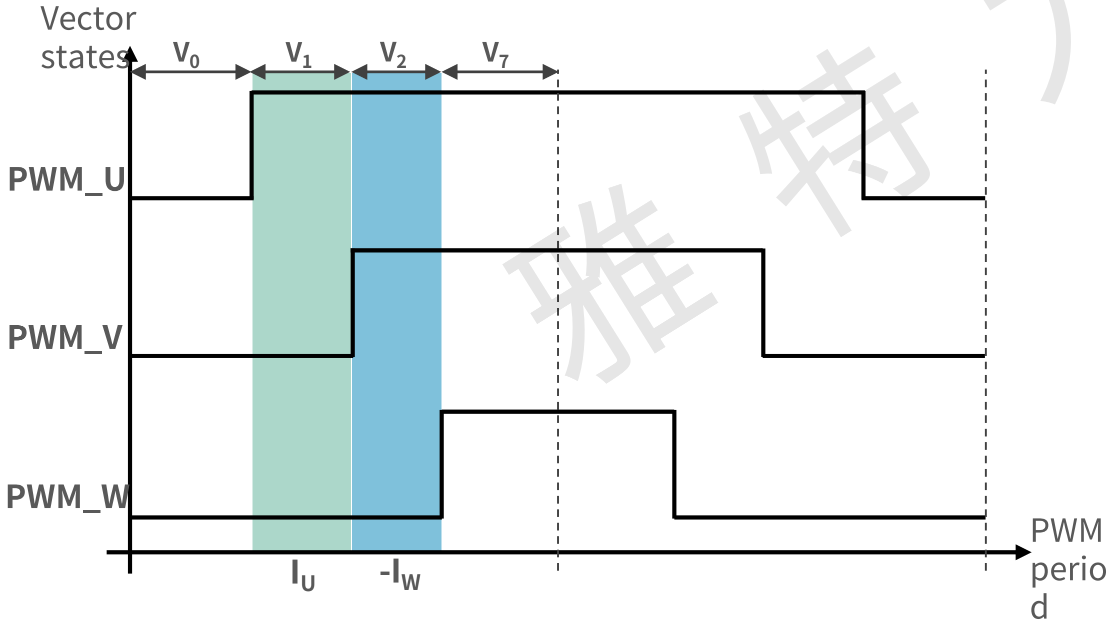
- 简化FOC三相全桥电路
  - 与BLDC驱动电路相同
  - 使用DC shunt 侦测两相电流与过流
  - 感测电流方式比较复杂



单电阻电流感测技术

- 利用每个PWM周期中的两种不同开关切换状态，可分别侦测两相电流
- 但每个开关切换状态时间不可过小，否则来不及取样，必须将PWM适当位移

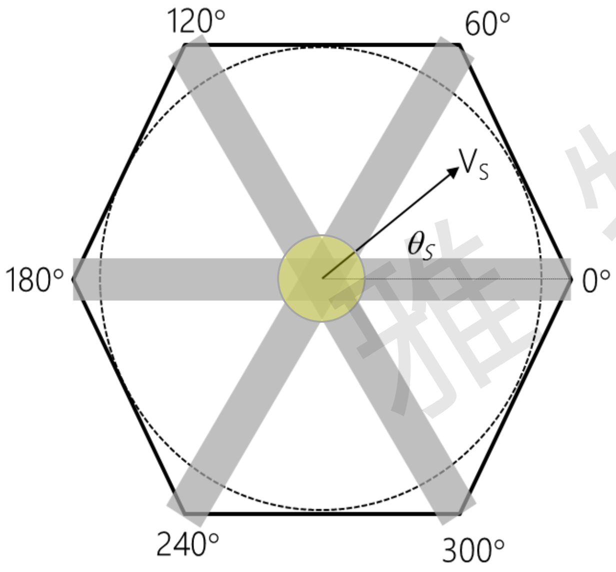




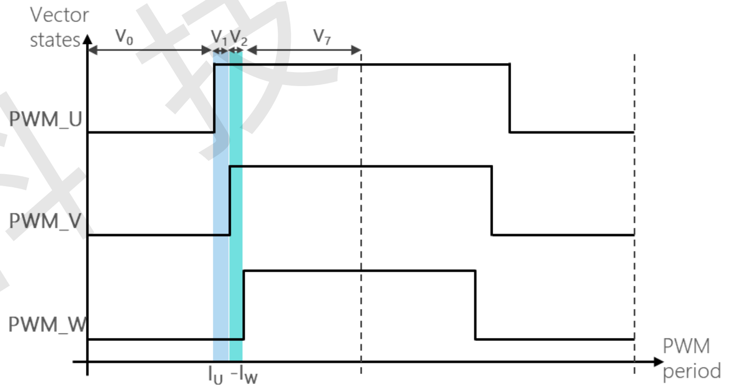
Voltage Vector	DC-Link Current
V_0 (0 0 0)	0
V_1 (1 0 0)	$+I_U$
V_2 (1 1 0)	$-I_W$
V_3 (0 1 0)	$+I_V$
V_4 (0 1 1)	$-I_U$
V_5 (0 0 1)	$+I_W$
V_6 (1 0 1)	$-I_V$
V_7 (1 1 1)	0

单电阻电流感测难以取样区域

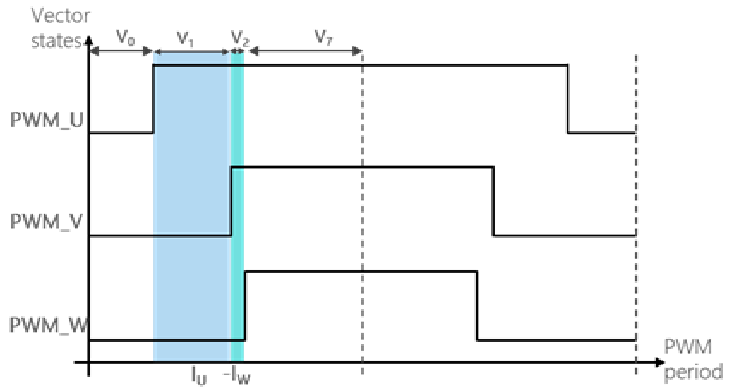
- 空间向量集中于单一电压向量区间时
- 低电压时有效电压向量的输出时间均太短
- 须进行脉波宽度调变位移



单电阻电流感测难以取样区域



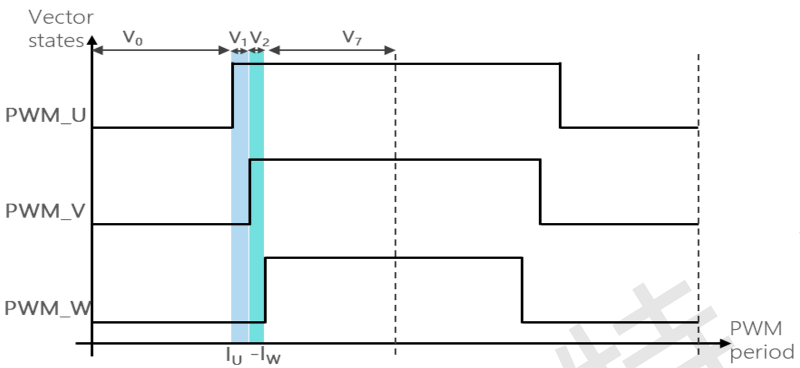
SVPWM输出低电压矢量示意图



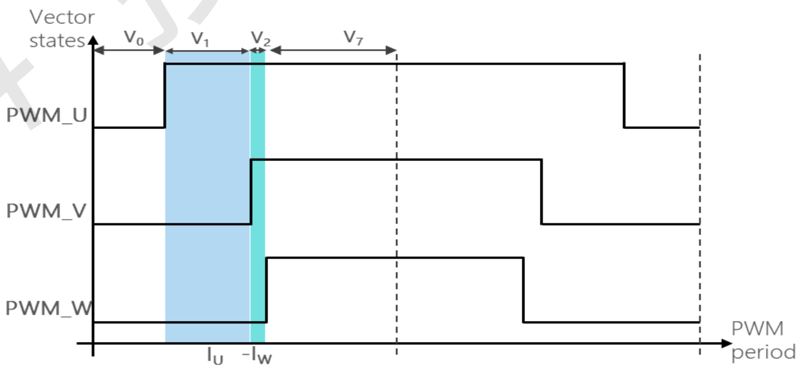
V_2向量时间太短无法取样示意图

PWM电压位移电流取样

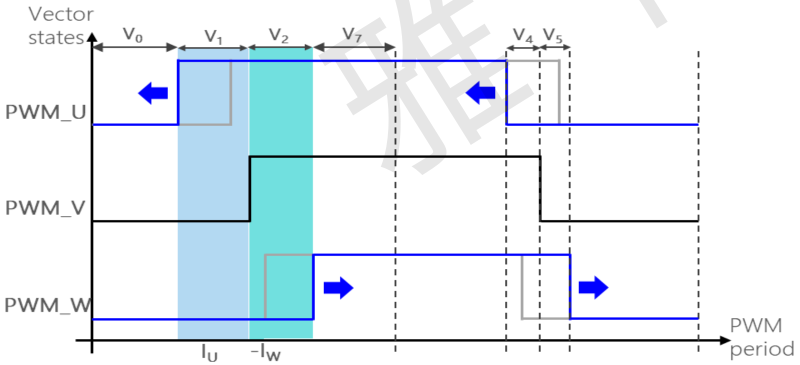
- 当某个电压矢量波宽太窄，小于电流取样时间时，须进行PWM脉宽位移



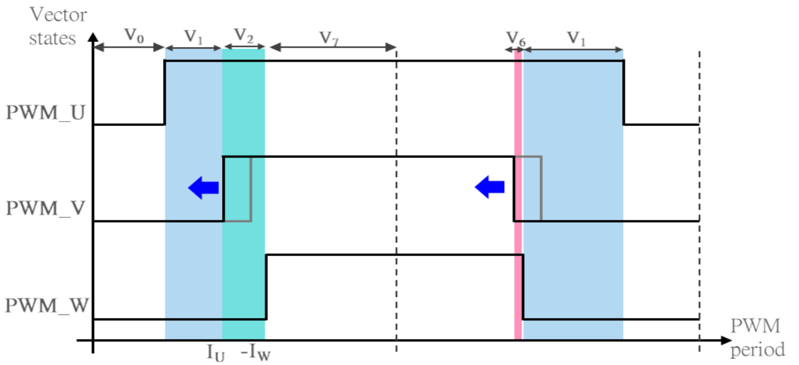
SVPWM输出低电压矢量示意图



V_2向量时间太短无法取样示意图



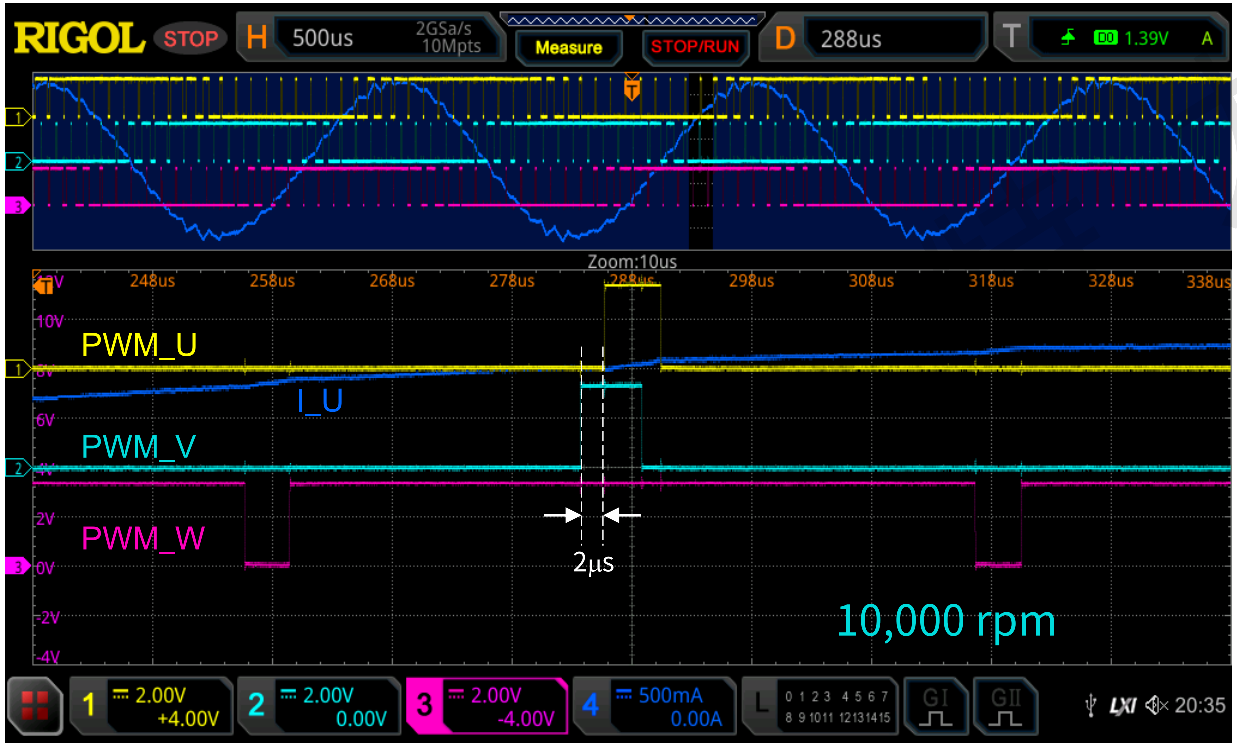
低电压调变PWM矢量位移示意图

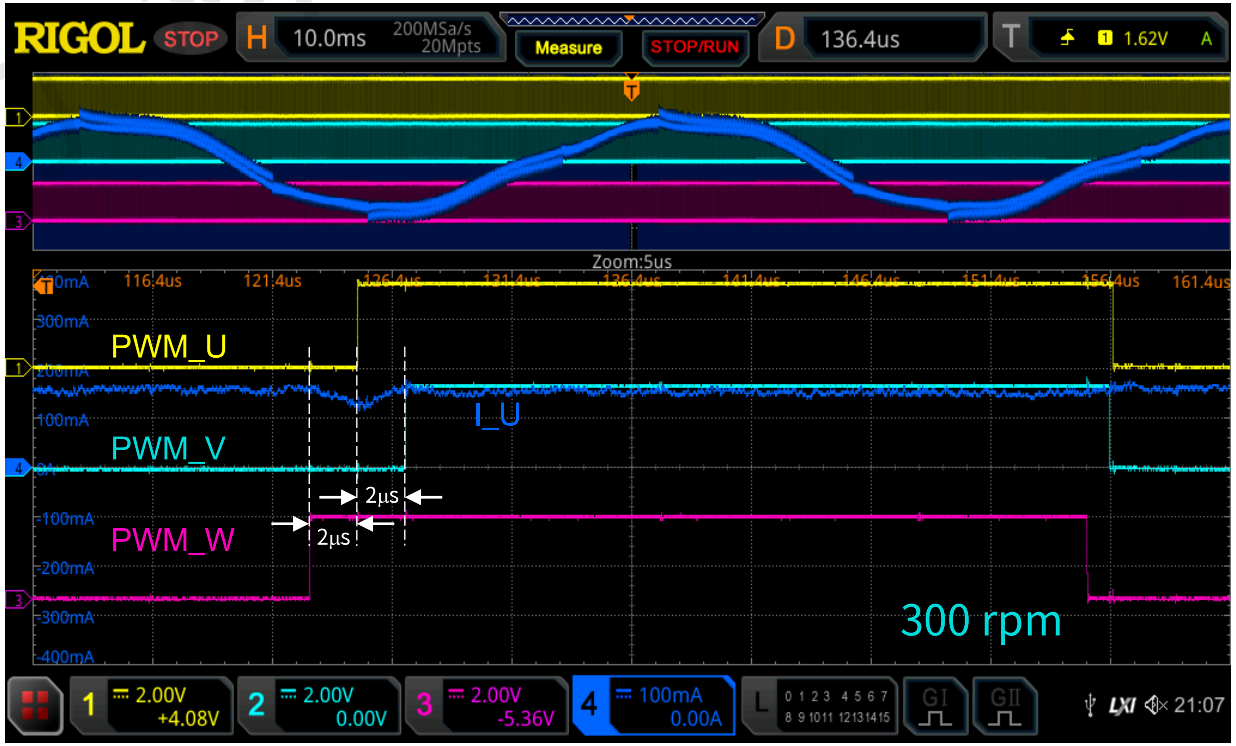


扩展V2电压矢量之PWM位移示意图

单电阻电流感测之电流响应

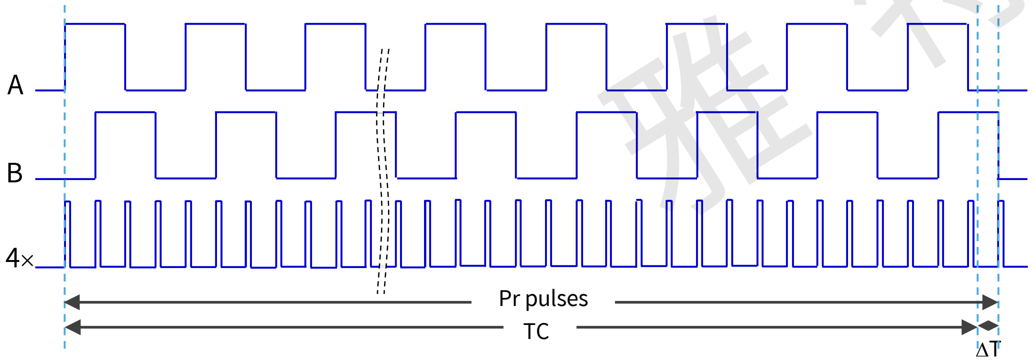
- 得利于快速ADC取样，小幅度偏移PWM相位即可采样电流
- 在高/低电压输出时，输出电流均平顺无转折，谐波成分小

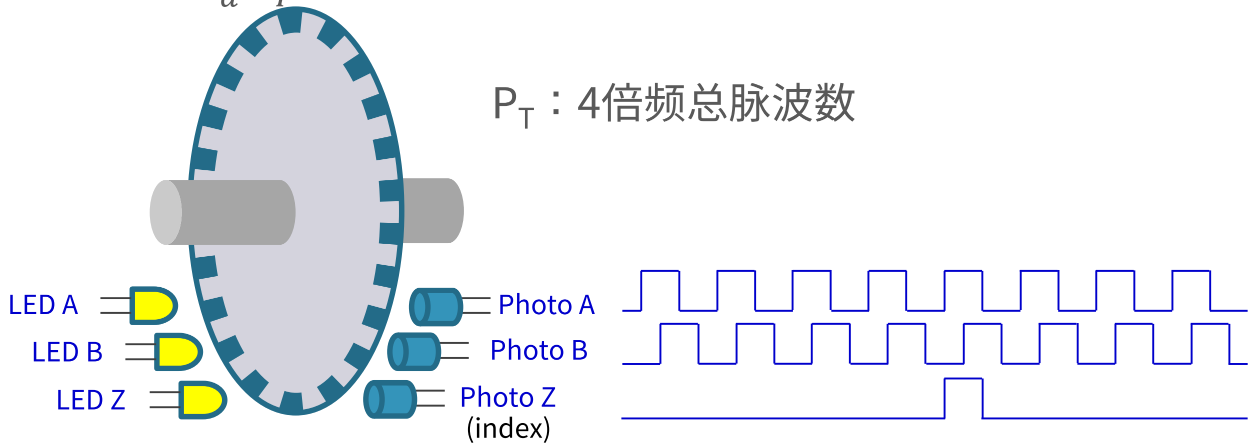




增量编码器感测转子角度与估测转速

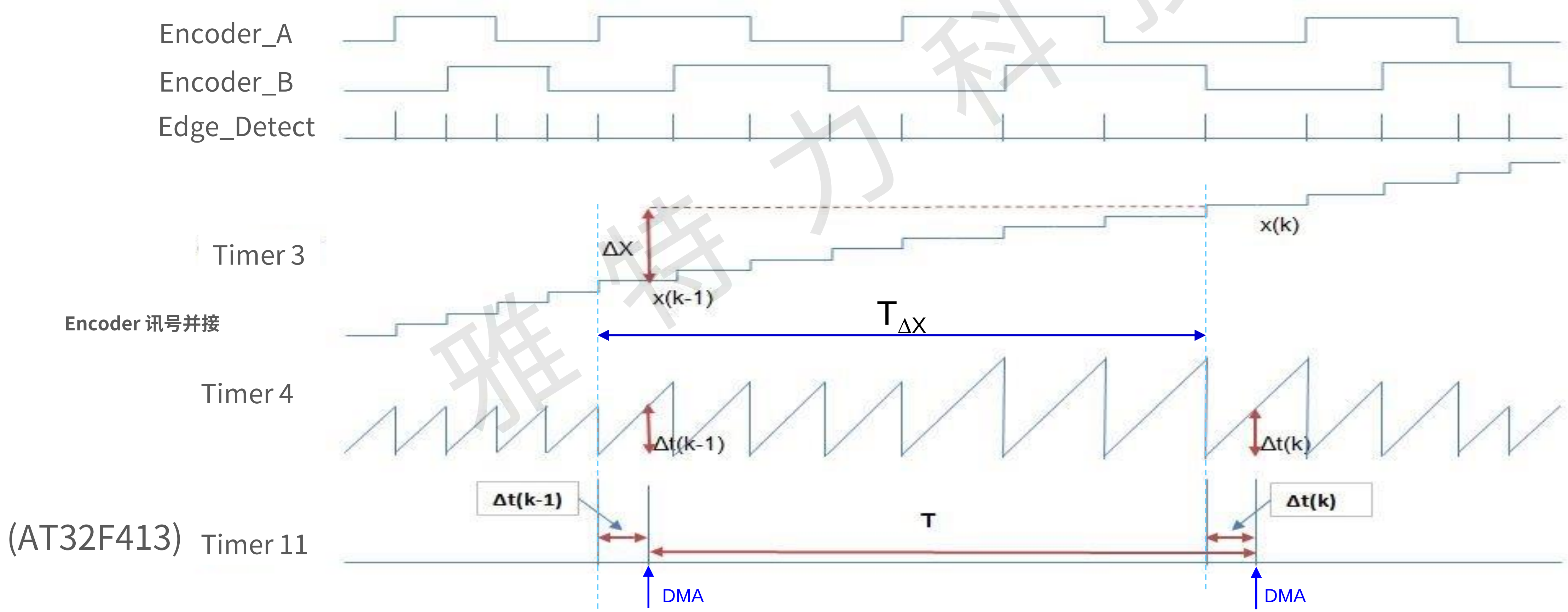
- 增量编码器角度计算$\theta_r=P_r/P_T\times360°$, P_T为编码器一圈脉波数
- 增量编码器转速估测方法
  - M模式估测：在一个固定的取样时间T_S内计数编码器脉波数，speed=$\frac{60\cdot P_r}{T_s\cdot P_T}$ *rpm*, 不适合低速
  - T模式估测：计算两个数编码器脉波之间的时间 T_r ，speed=$\frac{60}{T_r\cdot P_T}$ *rpm*, 不适合高速
  - M/T模式估测：在一个固定计时间Tc内取得脉波计数值(P_r)，再计算Tc期间与完整的脉波数时间差ΔT，根据Td=Tc+ΔT与脉波数P_r计算速度，speed=$\frac{60\cdot P_r}{T_d\cdot P_T}$*rpm*, 需专用硬体或使用三个以上计时器





增量编码器M/T 模式转速估测

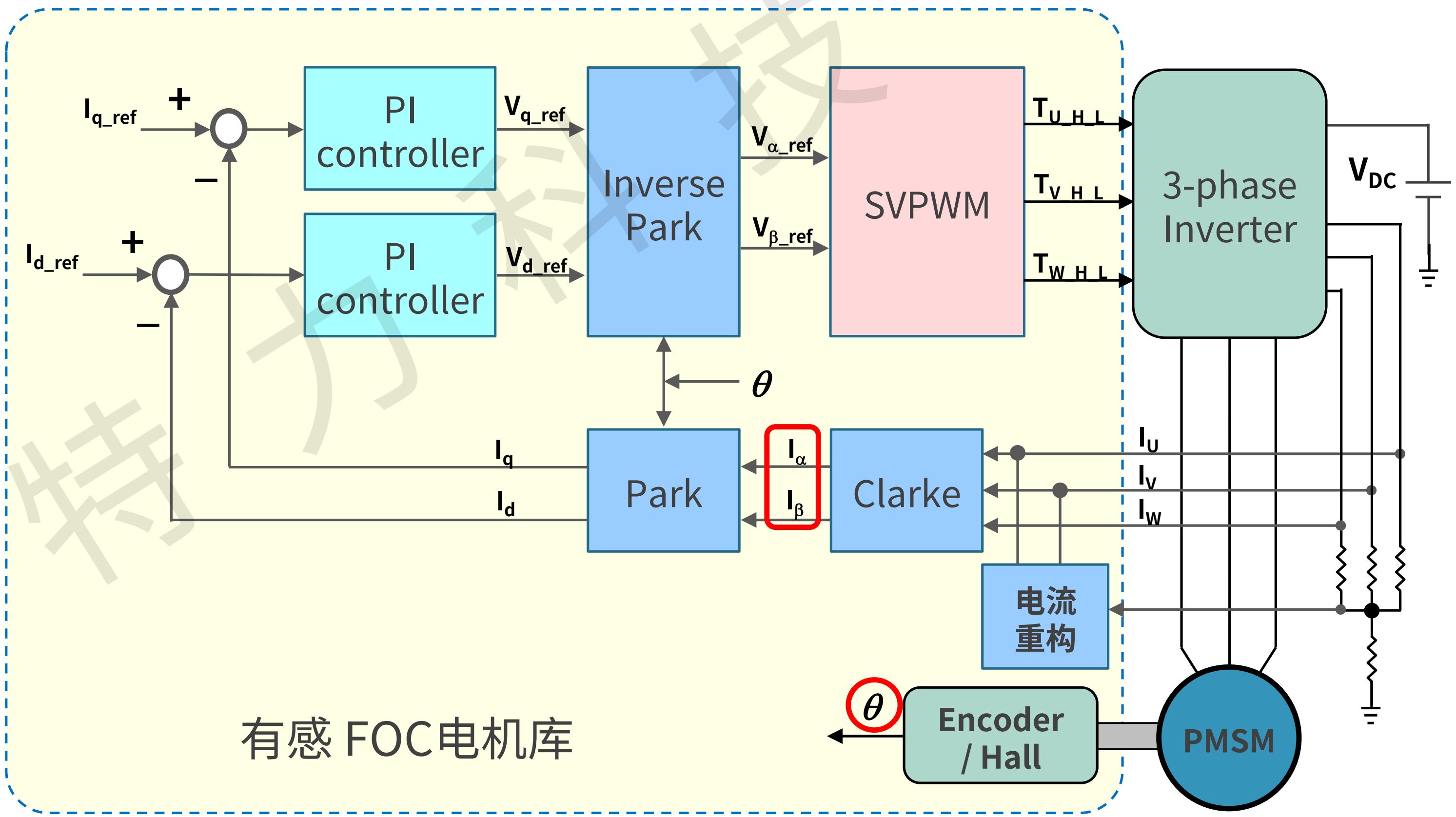
- 计算完整的ΔX脉波数时间$T_{\Delta X}=T+\Delta t(k-1)-\Delta t(k)$



PMSM有感电机库架构解说

电机库 – 有感 FOC

- 转子位置检测方式
  - 霍尔效应位置传感器
  - 增量型编码器
  - 绝对位置磁编码器
- 相电流检测方法
  - 三电阻电流检测
  - 双电阻电流检测
  - 单电阻电流检测与电流重构
- 可实现有传感器弦波控制方法
  - 电压矢量控制
  - 转矩控制 (电流矢量控制)
  - 转速控制
  - 弱磁控制
  - 定位控制
  - 回生刹车



PMSM电机库控制技术与应用方案

应用产品		高速风机	低速风机	压缩机	电动工具	滑板车 电动自行车	电摩	定位云台	轮式机器人
矢量技术	磁场导向控制 FOC	●	●	●	●	●	●	●	●
	弱磁控制			●	●	●	●	●	●
控制回路	转矩/速度控制	●	●	●	●	●	●	●	●
	定位控制							●	●
电流感测	3 or 2电阻电流感测	●	●	●	●	●	●	●	●
	单电阻电流感测	●	●	●	●	●		●	●
有传感器	霍尔传感器	●	●		●	●	●		●
	增量编码器				●		●		●
	磁编码器							●	●
无传感器	转子初始角度侦测	●	●	●	●				
	反电势角度估测	●	●	●	●	●	●		

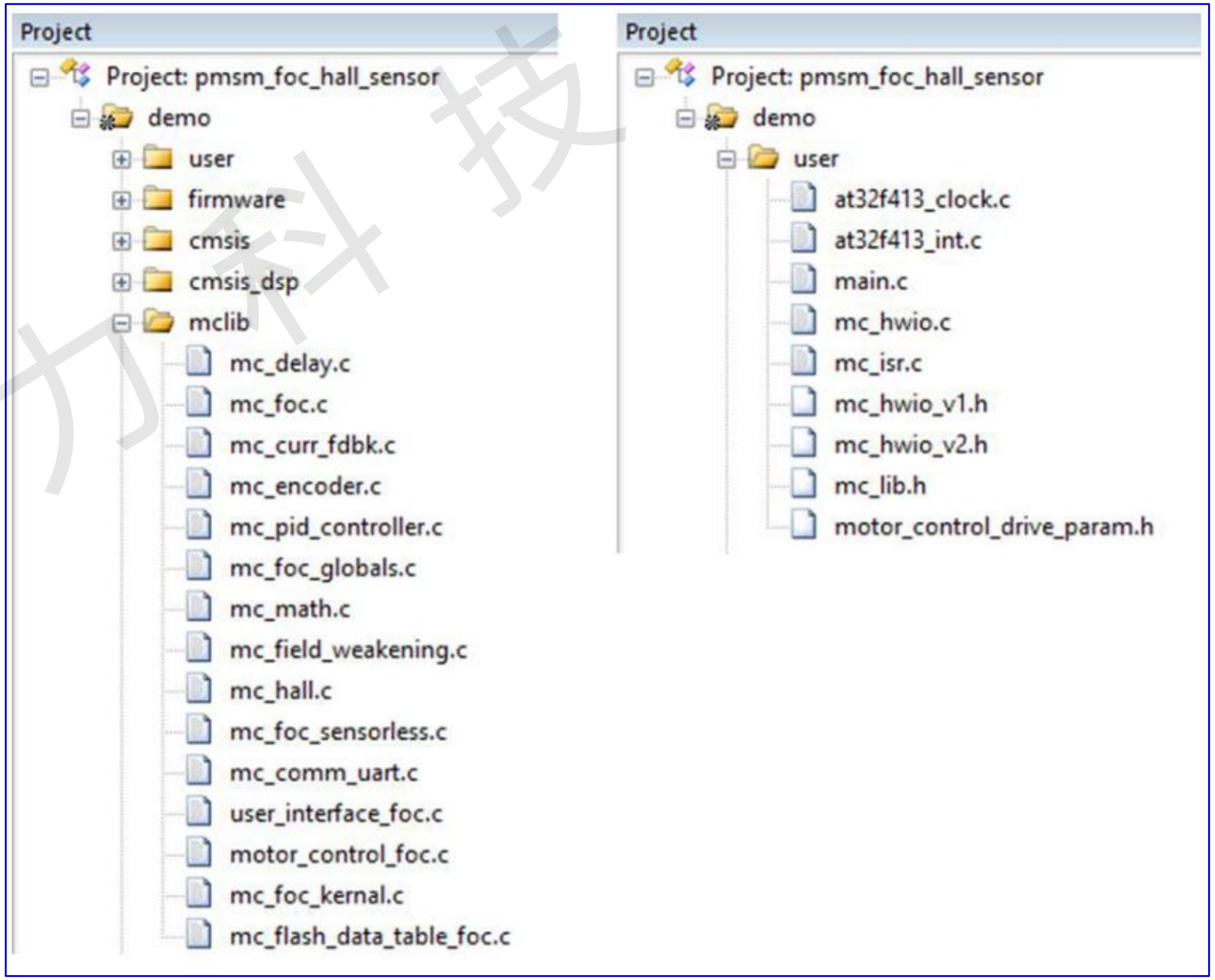
PMSM有感工程专案文件说明

PMSM FOC/BLDC 共通文档	
mc_lib.h	头文件统一管理
motor_control_drive_param.h	用户定义电机驱动架构模式 、电机参数、控制参数、驱动器参数
mc_hwio.c	硬件外设配置
mc_hwio_v1.h	硬件IO接口宏定义配置(电机开发版AT-MOTOR-EVB V1.x)
mc_hwio_v2.h	硬件IO接口宏定义配置(电机开发版AT-MOTOR-EVB V2.x)
mc_isr.c	相关电机控制中断函数
mc_type.h	全局变量类型定义、枚举定义
mc_delay.c	时间延迟相关函数
mc_delay.h	时间延迟相关函数宣告
mc_comm_uart.c	通讯界面相关外设配置
mc_comm_uart.h	通讯uart相关函数宣告、配置
mc_pid_control.c	PID控制器相关函数
mc_pid_control.h	PID控制器相关函数宣告
mc_curr_fdbk.c	电流检测相关函数
mc_curr_fdbk.h	电流检测相关函数宣告
mc_math.c	滤波器相关函数
mc_math.h	滤波器相关函数宣告
mc_hall.c	霍尔传感器相关函数
mc_hall.h	霍尔传感器相关函数宣告

PMSM FOC专用文档	
mc_foc_kernal.lib	电机库核心函数(Keil专用)(适用于芯片有FPU)
mc_foc_kernal_noFPU.lib	电机库核心函数(Keil专用)(适用于芯片无FPU)
libmc_foc_kernal.a	电机库核心函数(AT32IDE专用)(适用于芯片有FPU)
libmc_foc_kernal_noFPU.a	电机库核心函数(AT32IDE专用)(适用于芯片无FPU)
mc_foc_kernal.h	电机库核心函数宣告
motor_control_foc.c	电机控制相关函数
motor_control_foc.h	电机控制相关函数宣告
mc_foc.c	FOC相关函数
mc_foc.h	FOC控制相关函数宣告
mc_encoder.c	编码器相关函数
mc_encoder.h	编码器相关函数宣告
mc_foc_sensorless.c	无传感器相关函数
mc_foc_sensorless.h	无传感器相关函数宣告
mc_foc_globals.c	全局变量定义与默认值设定、全局函数定义
mc_foc_globals.h	全局变量、全局函数宣告、宏定义
user_interface_foc.c	通讯界面相关函数
user_interface_foc.h	通讯界面相关函数宣告
mc_flash_data_table_foc.c	写入flash参数表
mc_flash_data_table_foc.h	写入flash参数表的相关配置

PMSM感控制专案工程结构

- user 文件夹
  - 主程序、外设规划程序以及参数定义头文件
- firmware 文件夹
  - MCU 外设驱动程序
- cmsis文件夹
  - CMSIS DSP函数程序
- mclib 文件夹
  - 为电机库程序包含PI控制函数、有感电机库函数、全局变量设定与通讯函数等等



FOC有感控制程序流程图

mc_hwio.c

- 中断致能与优先序设定
- PWM定时器初始化
- 编码器I/O初始化
- 编码器定时器初始化
- 速度/位置环定时器初始化
- adc一般通道初始化
- adc抢占通道初始化
- gpio led 初始化
- 呼叫uart 初始化函数
- 按钮I/O初始化
- 3.3Vref 校准函数
- 电机参数鉴定初始化

main.c

相关外设初始化

3.3Vref 校准

UART 外设初始化

电流零位校准
(motor_control_foc.c)

控制参数初始化
(motor_control_foc.c)

状态机变换前初始设定

mc_isr.c

ADVTMR_PWM_CYCLE_BRK_IRQ
主中断：电流环计算、PWM更新、监测数据更新、电机参数鉴定、编码器角度换算、ADC一般通道触发

SPEED_LOOP_TIMER_IRQ
位置环/速度环控制中断函式

ADC_SHUNT_SAMP_READY_IRQ
电流取样中断函式

EXINT_ENCODER_IDX_IR
编码器归零点触发中断函式

SysTick_Handler
状态机处理、过压欠压、MOS过温、电位计输入

mclib files

- mc_curr_fdbk.c
- mc_foc.c
- mc_encoder.c
- mc_pid_controller.c
- mc_foc_globals.c
- mc_math.c
- mc_user_interface_foc.c
- mc_motor_control_foc.c
- mc_delay.c
- mc_flash_data_table.c
- mc_foc_kernel_noFPU.lib

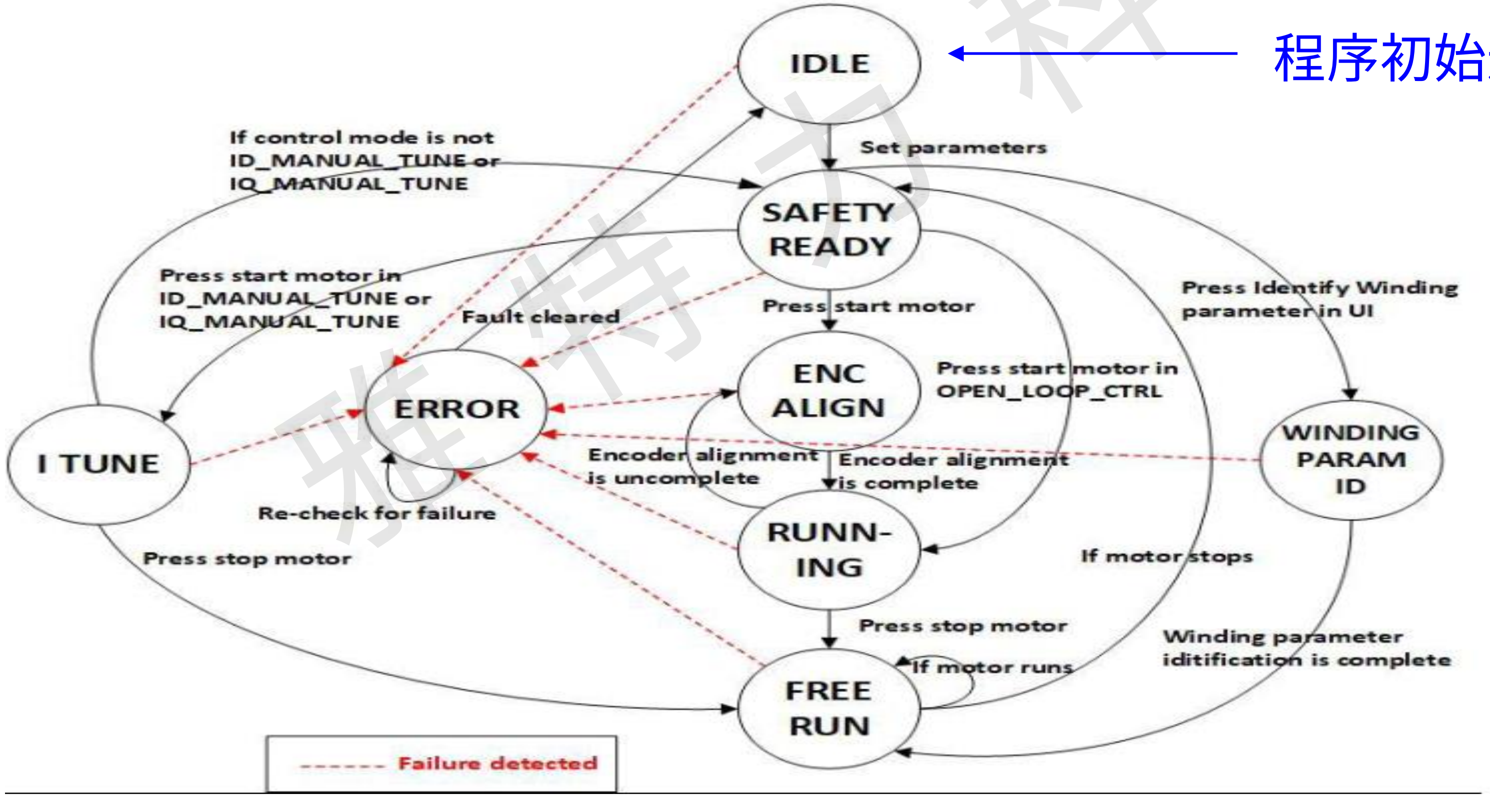
mc_comm_uart.c

- uart初始化
- uart tx dma初始化

COMM_UART_IRQHandler
uart rx 中断函式

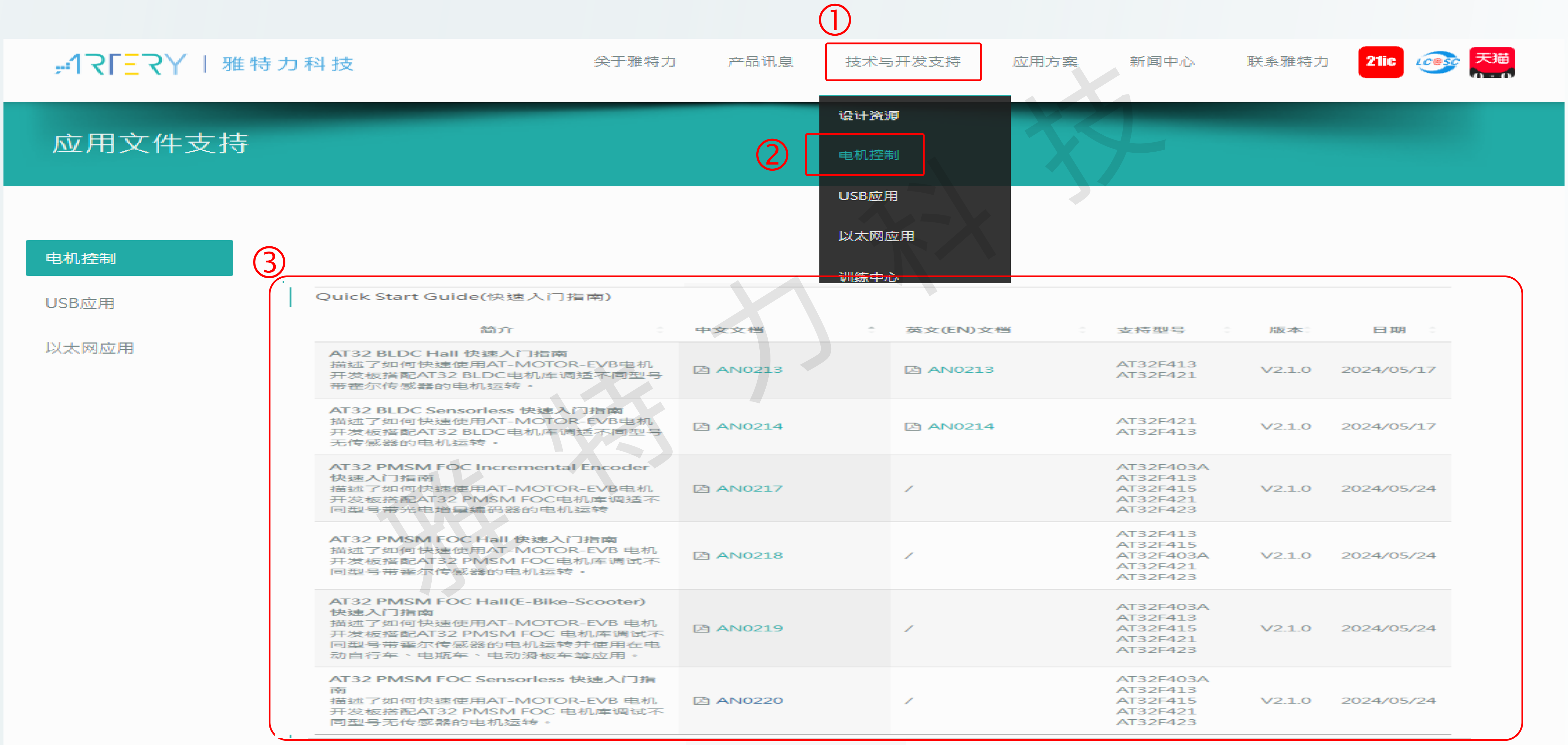
程序状态机流程图

- 程序初始时须做编码器零位校准
- 主要工作于Running运转模式，用户可于UI界面实时调整参数或用外部电位计改变命令



程序初始进入点

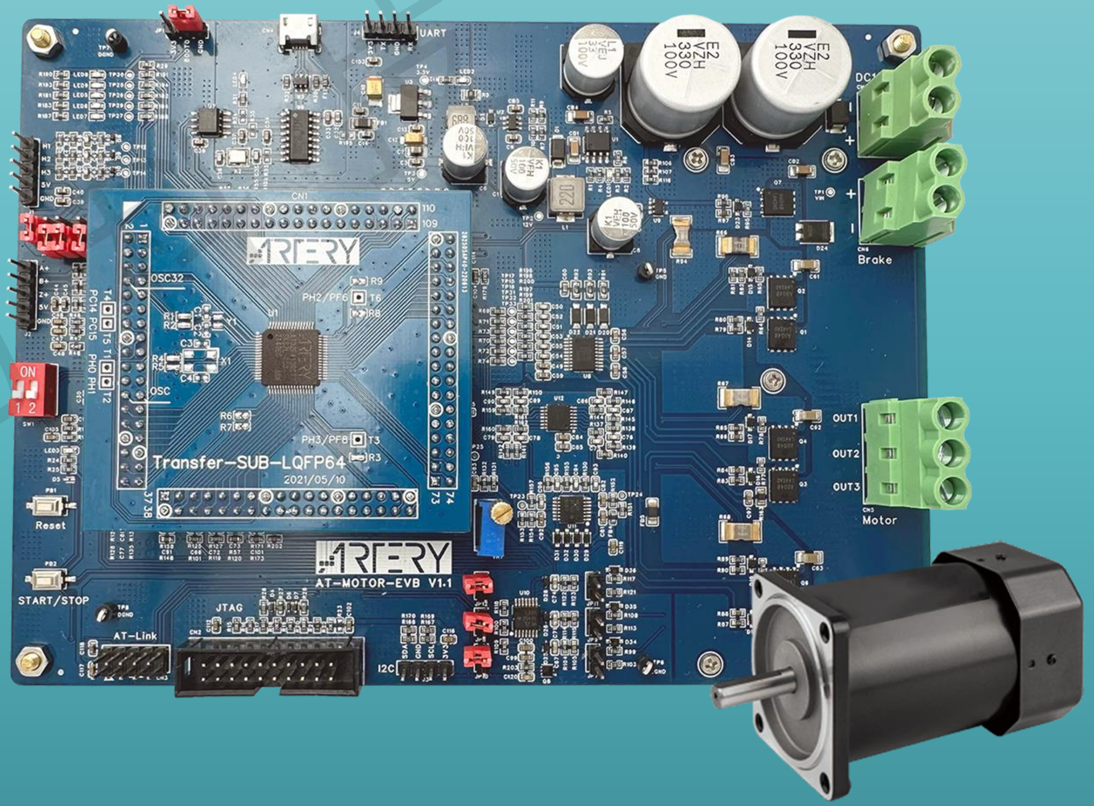
电机库下载



简介	中文文档	英文(EN)文档	支持型号	版本	日期
AT32 BLDC Hall 快速入门指南 描述了如何快速使用AT-MOTOR-EVB电机开发板搭配AT32 BLDC电机库调适不同型号带霍尔传感器的电机运转。	AN0213	AN0213	AT32F413 AT32F421	V2.1.0	2024/05/17
AT32 BLDC Sensorless 快速入门指南 描述了如何快速使用AT-MOTOR-EVB电机开发板搭配AT32 BLDC电机库调适不同型号无传感器的电机运转。	AN0214	AN0214	AT32F421 AT32F413	V2.1.0	2024/05/17
AT32 PMSM FOC Incremental Encoder 快速入门指南 描述了如何快速使用AT-MOTOR-EVB电机开发板搭配AT32 PMSM FOC电机库调适不同型号带光电增量编码器的电机运转	AN0217	/	AT32F403A AT32F413 AT32F415 AT32F421 AT32F423	V2.1.0	2024/05/24
AT32 PMSM FOC Hall 快速入门指南 描述了如何快速使用AT-MOTOR-EVB 电机开发板搭配AT32 PMSM FOC电机库调试不同型号带霍尔传感器的电机运转。	AN0218	/	AT32F413 AT32F415 AT32F403A AT32F421 AT32F423	V2.1.0	2024/05/24
AT32 PMSM FOC Hall(E-Bike-Scooter) 快速入门指南 描述了如何快速使用AT-MOTOR-EVB 电机开发板搭配AT32 PMSM FOC 电机库调试不同型号带霍尔传感器的电机运转并使用在电动自行车、电瓶车、电动滑板车等应用。	AN0219	/	AT32F403A AT32F413 AT32F415 AT32F421 AT32F423	V2.1.0	2024/05/24
AT32 PMSM FOC Sensorless 快速入门指南 描述了如何快速使用AT-MOTOR-EVB 电机开发板搭配AT32 PMSM FOC 电机库调试不同型号无传感器的电机运转。	AN0220	/	AT32F403A AT32F413 AT32F415 AT32F421 AT32F423	V2.1.0	2024/05/24

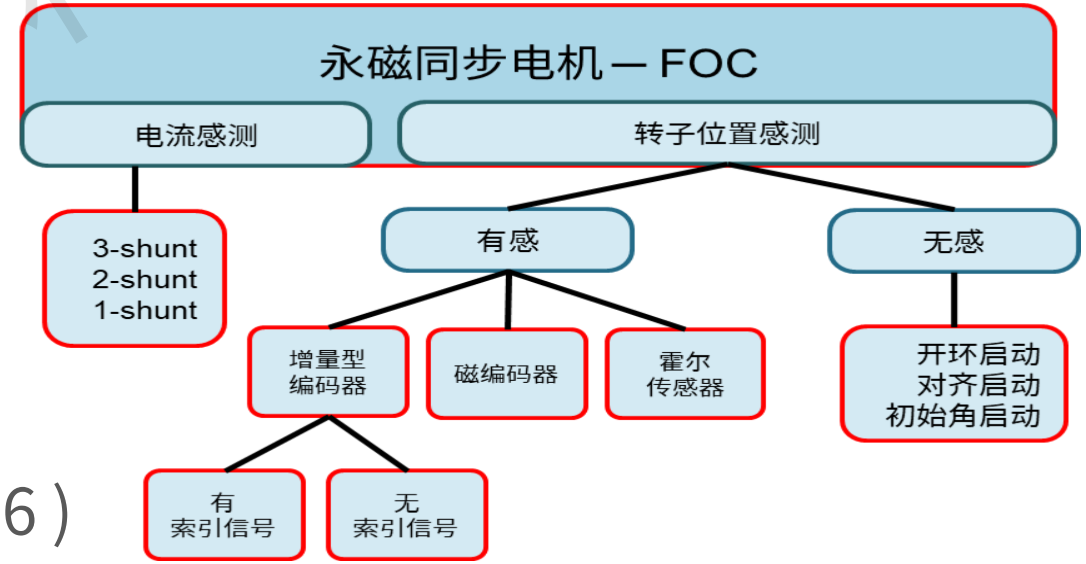
网址：https://www.arterytek.com/cn/support/motor_control.jsp?index=0

AT32 电机库
FOC 快速上手
操作讲解



PMSM FOC电机控制函式库支持

- 支援FOC控制
- 提供AT32F421、AT32F413、AT32F415 、AT32F407 、AT32F403A 、AT32F423 、AT32F435/437 、AT32L021应用范例
- 支持免费AT32IDE编译环境
- 只须设定mc_hwio_v2(v1).h 和 motor_control_drive_param.h头文件
- 宏定变量的说明可参阅 AT32 电机库使用指南(AN0064)
- FOC增量编码器专案的说明可参阅(AN0166)
- PMSM FOC增量编码器快速入门指南(AN02174)



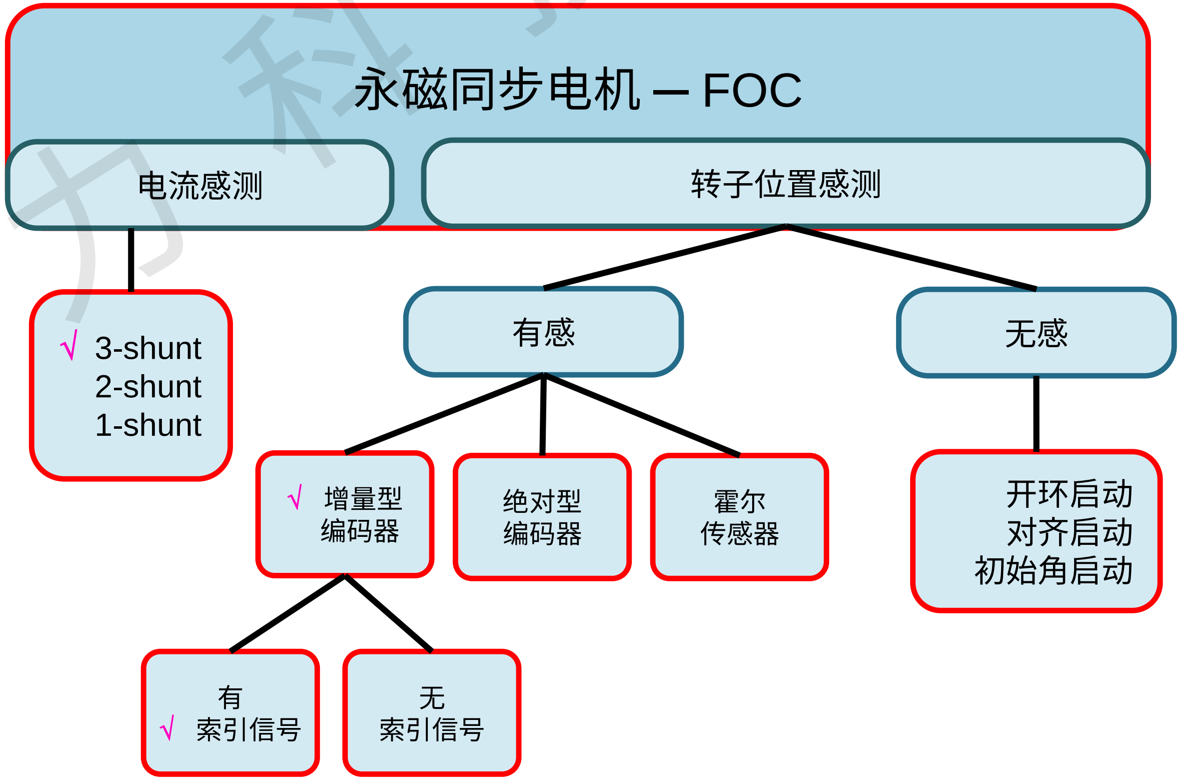
参数头文件 – 电机控制形式 (FOC)

motor_control_drive_param.h

控制型式

```
#define AT_MOTOR_EVB_V2
//#define AT_MOTOR_EVB_V1

/* gate driver low side inverting logic input or non-inverting
#define GATE_DRIVER_LOW_SIDE_INVERT


#define FOC_CONTROL

#define THREE_SHUNT
//#define TWO_SHUNT
//#define ONE_SHUNT


#ifdef TWO_SHUNT
#define U_V_SHUNT
//#define V_W_SHUNT
//#define U_W_SHUNT
#endif

#define INCREM_ENCODER

#if defined INCREM_ENCODER || defined MAGNET_ENCODER_W_ABZ
//#define REVERSE_ENCODER_COUNT
#endif

#ifdef INCREM_ENCODER
#define ABZ
//#define AB
#endif

#if defined INCREM_ENCODER || defined MAGNET_ENCODER_W_ABZ
#define M_METHOD
#endif
```

- **选择宏定义宣告项目，完成电机控制形式设定**



参数头文件 – 电机参数

motor_control_drive_param.h

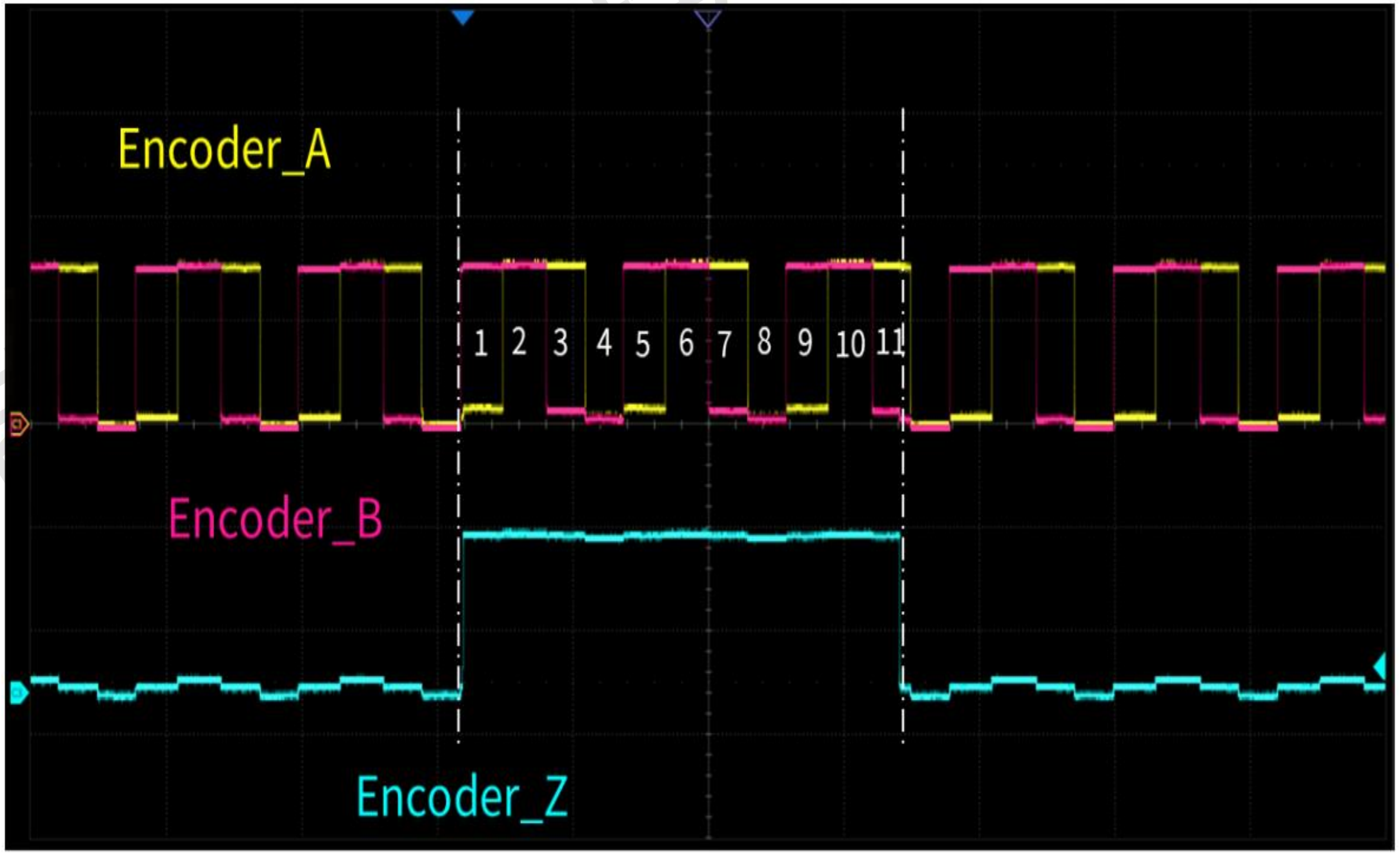
电机参数 (Motor-related parameter)

```
/************************************ Motor-related para
#define POLE_PAIRS                    (8/2)
#define RS_LL                         (1.89f)
#define LS_LL                         (0.002387f)
#define LD_LQ_RATIO                   (1.0f)
#define KE                            (0.003437f)
#define NOMINAL_CURRENT               (1.7f)

/*** Quadrature encoder ***/
#define ENCODER_PPR                   (1000)
#define ENC_IDX_COUNT                 (11)
#define ENC_STALL_TIME                (1000)
```

- POLE_PAIRS : 电机极对数
- RS_LL : 绕组线对线电阻值
- LS_LL : 绕组线对线电感值
- NOMINAL_CURRENT : 额定电流
- ENC_IDX_COUNT : 编码器归零点脉宽
- ENC_STALL_TIME : 编码器无脉波判定故障延时时间

编码器零位信号宽度

- ENC_IDX_COUNT
  编码器零位信号宽度
- Z 信号的上升沿到下降沿的宽度对齐于 AB 信号为 11 个 count 数
- 则定义 ENC_IDX_COUNT 为 11

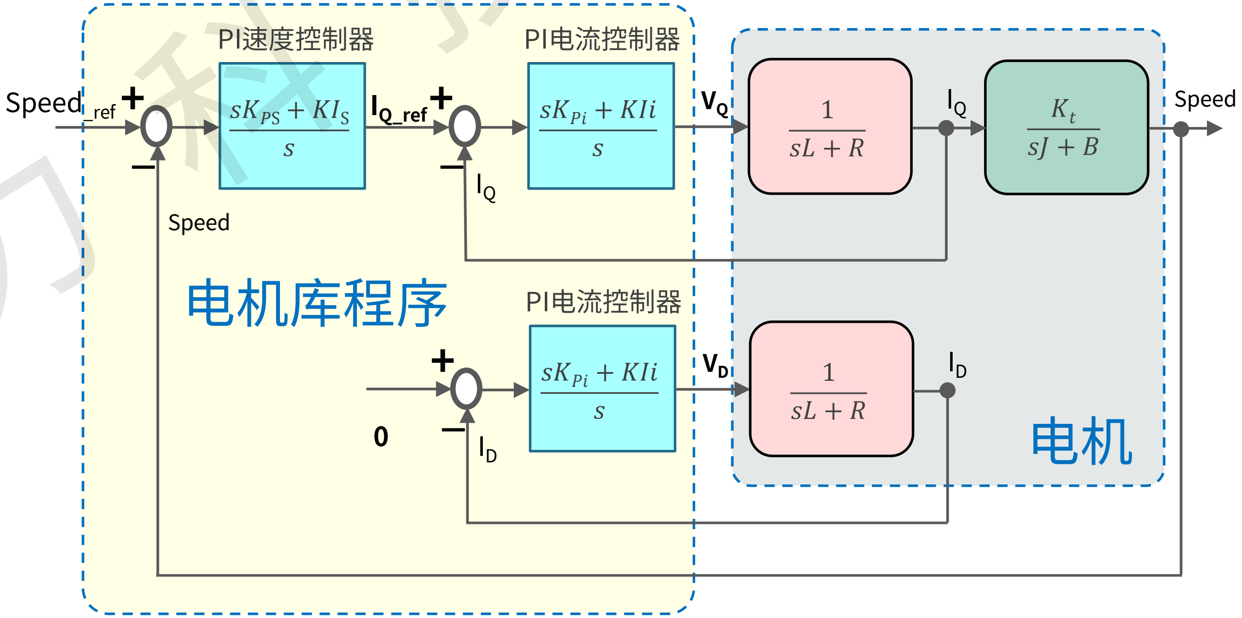


参数头文件 – 控制环相关参数

motor_control_drive_param.h

控制参数 (Control-related parameter)

```
#define PWM_FREQ                        (16000)  /* Hz */
#define MOTOR_CONTROL_MODE              (OPEN_LOOP_CTRL)
#define CTRL_SOURCE                     (CTRL_SOURCE_SOFTWARE)
#define UI_UART_BAUDRATE                (1500000UL)

/* SPEED */
#define SPEED_LOOP_FREQ                 (1000)  /* Hz */
#define MIN_SPEED_RPM                   (10)
#define MAX_SPEED_RPM                   (6000)
#define MIN_POSCTL_SPD                  (100)
#define MIN_CONTROL_SPEED               (200)
#define ACC_SPD_SLOPE                   (5)      /* (rpm/ms) */
#define DEC_SPD_SLOPE                   (5)

/* POSITION */
#define POSITION_LOOP_FREQ              (200)      /* Hz */
#define MAX_POSITION_ANGLE              (360000)    /* Degree */
#define MIN_POSITION_ANGLE              (-MAX_POSITION_ANGLE)
#ifdef HALL_SENSORS
#define CMD_TO_VAL_GAP                  (20000)    /* hall eletric ar
#else
#define CMD_TO_VAL_GAP                  (1000)     /* counts (ex: enc
#endif
#define SMALL_POS_CMD_GAP               (100)
#define ROTOR_LOCK_ANGLE_GAP            (120.0f)

/* encoder parameter */
#define ALIGN_VOLT                      (0.8f)      /* (V) */
#define ENC_OFFSET                      (0)

/* current pid auto-tune */
#define CURRENT_BANDWIDTH               (3500)      /* 2*pi*freq */

/* Id/Iq pid parameter */
#define PID_ID_KP_DEFUALT               (7500)
#define PID_ID_KI_DEFUALT               (6000)
#define PID_ID_KP_GAIN_DIV              (512)
#define PID_ID_KP_GAIN_DIV_LOG          (LOG2(PID_ID_KP_GAIN_DIV))
#define PID_ID_KI_GAIN_DIV              (8192)
#define PID_ID_KI_GAIN_DIV_LOG          (LOG2(PID_ID_KI_GAIN_DIV))
```



ID_Kp = PID_ID_KP_DEFUALT / PID_ID_KP_DIV

ID_Ki = PID_ID_KI_DEFUALT / PID_ID_KI_DIV

外设定义头文件 – 外设参数定义

外设定义参数 (mc_hwio.h)

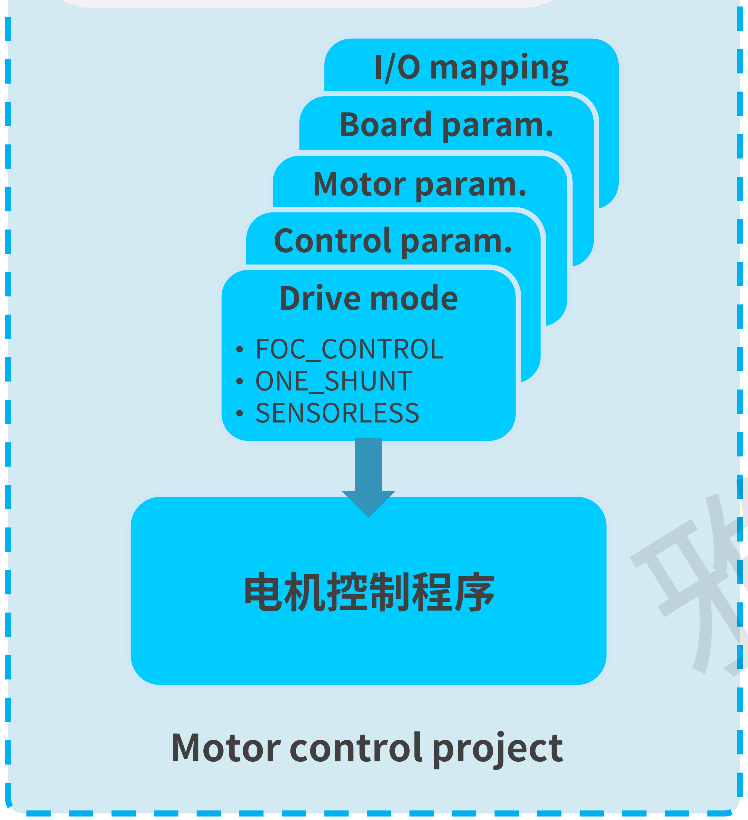
```c
/* adc reading pin definition */
#define ADC_CONVERTER                    ADC1
#define ADC_CONVERTER_CRM_CLK            CRM_ADC1_PERIPH_CLOCK
#define ADC_CONVERTER_CRM_CLK_DIV        CRM_ADC_DIV_8
#define ADC_SHUNT_SAMP_READY_IRQ         ADC1_2_IRQHandler
#define ADC_SHUNT_SAMP_READY_IRQn        ADC1_2_IRQn
#define ADC_ORDINARY_CH_LEN              6

/* dma1 ch1 for adc ordinary conversion */
#define ADC_ORDINARY_DMA_CRM_CLK         CRM_DMA1_PERIPH_CLOCK
#define ADC_ORDINARY_DMA_CHANNEL         DMA1_CHANNEL1
#define ADC_ORDINARY_DMA                 DMA1
#define ADC_ORDINARY_DMA_FLEX            DMA_FLEXIBLE_ADC1
#define ADC_ORDINARY_DMA_FLEX_CH         FLEX_CHANNEL1

#define CURR_PHASE_A_ADC_CH              ADC_CHANNEL_0
#define CURR_PHASE_A_ADC_GPIO_CRM_CLK    CRM_GPIOA_PERIPH_CLOCK
#define CURR_PHASE_A_ADC_PORT            GPIOA
#define CURR_PHASE_A_ADC_GPIO_PIN        GPIO_PINS_0

#define CURR_PHASE_B_ADC_CH              ADC_CHANNEL_1
#define CURR_PHASE_B_ADC_GPIO_CRM_CLK    CRM_GPIOA_PERIPH_CLOCK
#define CURR_PHASE_B_ADC_PORT            GPIOA
#define CURR_PHASE_B_ADC_GPIO_PIN        GPIO_PINS_1

#define CURR_PHASE_C_ADC_CH              ADC_CHANNEL_2
#define CURR_PHASE_C_ADC_GPIO_CRM_CLK    CRM_GPIOA_PERIPH_CLOCK
#define CURR_PHASE_C_ADC_PORT            GPIOA
#define CURR_PHASE_C_ADC_GPIO_PIN        GPIO_PINS_2
```

控制器MCU pin map

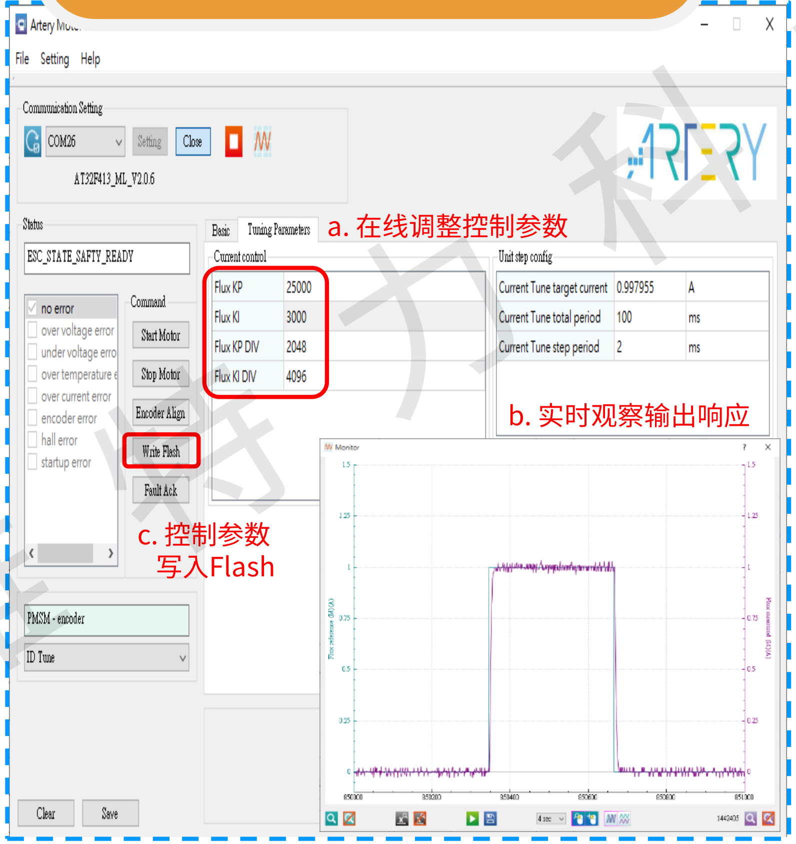
Peripheral function	AT32F421C8T6		AT32F413RCT7	
VBAT	1	VBAT	1	VBAT
STATUS_LED1	2	PC13	2	PC13
STATUS_LED2	3	PC14	3	PC14
STATUS_LED3	4	PC15	4	PC15
ENCODER_A+			18	TMR5_CH1(PF4)
ENCODER_B+			19	TMR5_CH2(PF5)
MODE_SW1	35	PF6	47	PF6
MODE_SW2	36	PF7	48	PF7
OSC_IN	5	OSC_IN	5	OSC_IN
OSC_OUT	6	OSC_OUT	6	OSC_OUT
RESET	7	NRST	7	NRST
SPEED_VR(F413)			8	ADC12_IN10(PC0)
			9	ADC12_IN11(PC1)
			10	ADC12_IN12(PC2)
			11	ADC12_IN13(PC3)
VSSA	8	VSSA	12	VSSA
VDDA	9	VDDA	13	VDDA
CURR_FDBK1	10	ADC_IN0(PA0)	14	ADC_IN0(PA0)
CURR_FDBK2	11	ADC_IN1(PA1)	15	ADC_IN1(PA1)
CURR_FDBK3	12	ADC_IN2(PA2)	16	ADC_IN2(PA2)
IBUS_FDBK	13	ADC_IN3(PA3)	17	ADC_IN3(PA3)
BEMF1_LF	14	ADC_IN4(PA4)	20	ADC_IN4(PA4)
BEMF2_LF	15	ADC_IN5(PA5)	21	ADC_IN5(PA5)
BEMF3_LF	16	ADC_IN6(PA6)	22	ADC_IN6(PA6)
VBUS	17	ADC_IN7(PA7)	23	ADC_IN7(PA7)
ENCODER_Z+			24	PC4
			25	ADC_IN15(PC5)

UI程序与电机控制调校

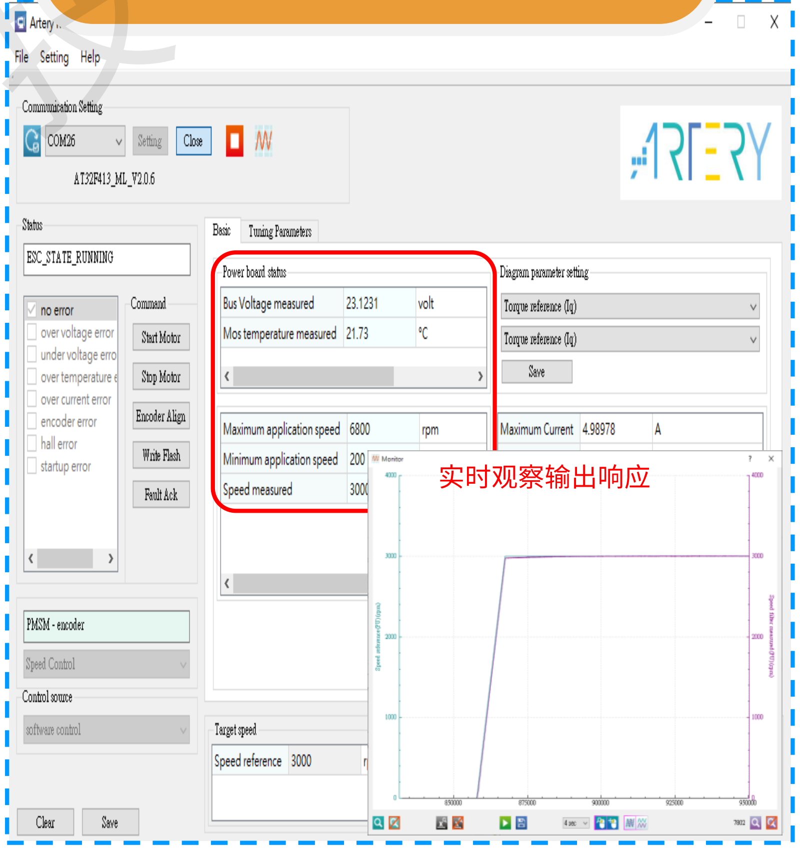
定义头档相关参数



UI程序调校PID控制参数



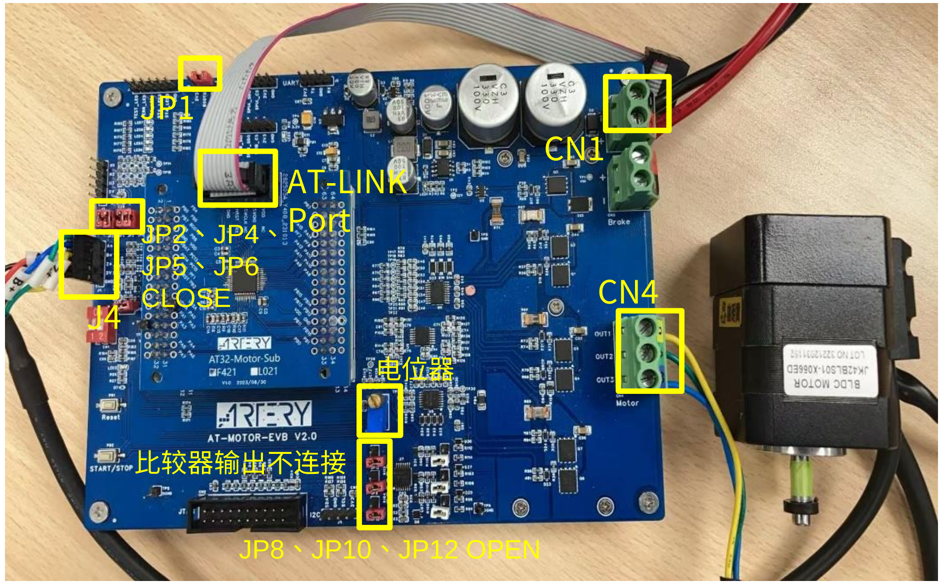
实时监看响应特性与数据



AT32 MOTOR开发板接线

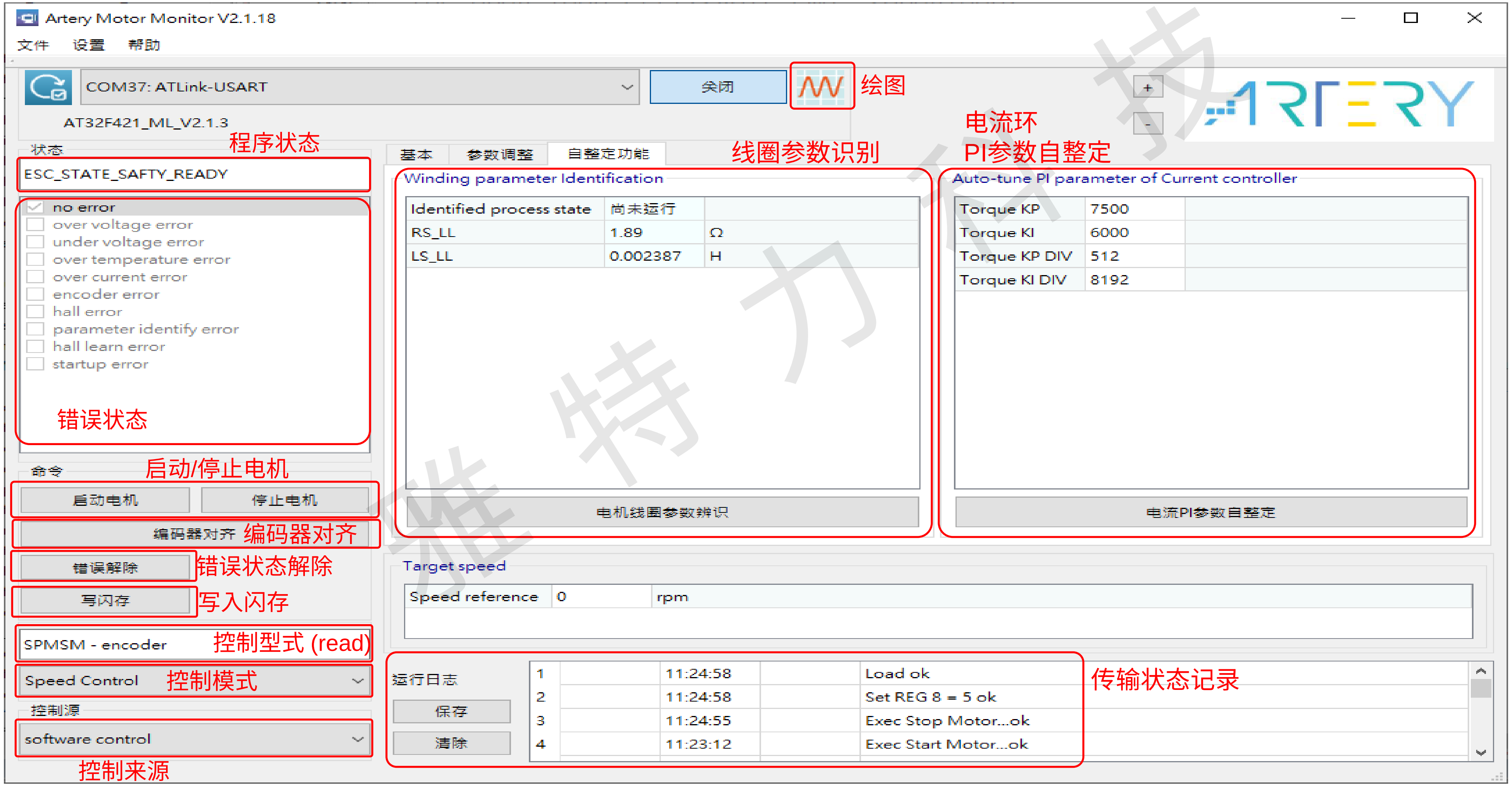
- 检查JP1 Boot0是否接地(GND)
- 将编码器排线连接到J4
- 将JP2、 JP4、JP5、JP6短接，将编码器信号连接至MCU 接脚
- 将JP8、JP10、JP12段开
- 将AT-LINK连接到小板
- 连接电机线到CN4 (依线色)
- 连接电源供应器电源接线到CN1 (依标示)
- 设定电源供应器电压24V / 3A
- 开启电源供应器输出
- PC端执行上位机程序后建立联机

(ArteryMotorMonitor.exe)



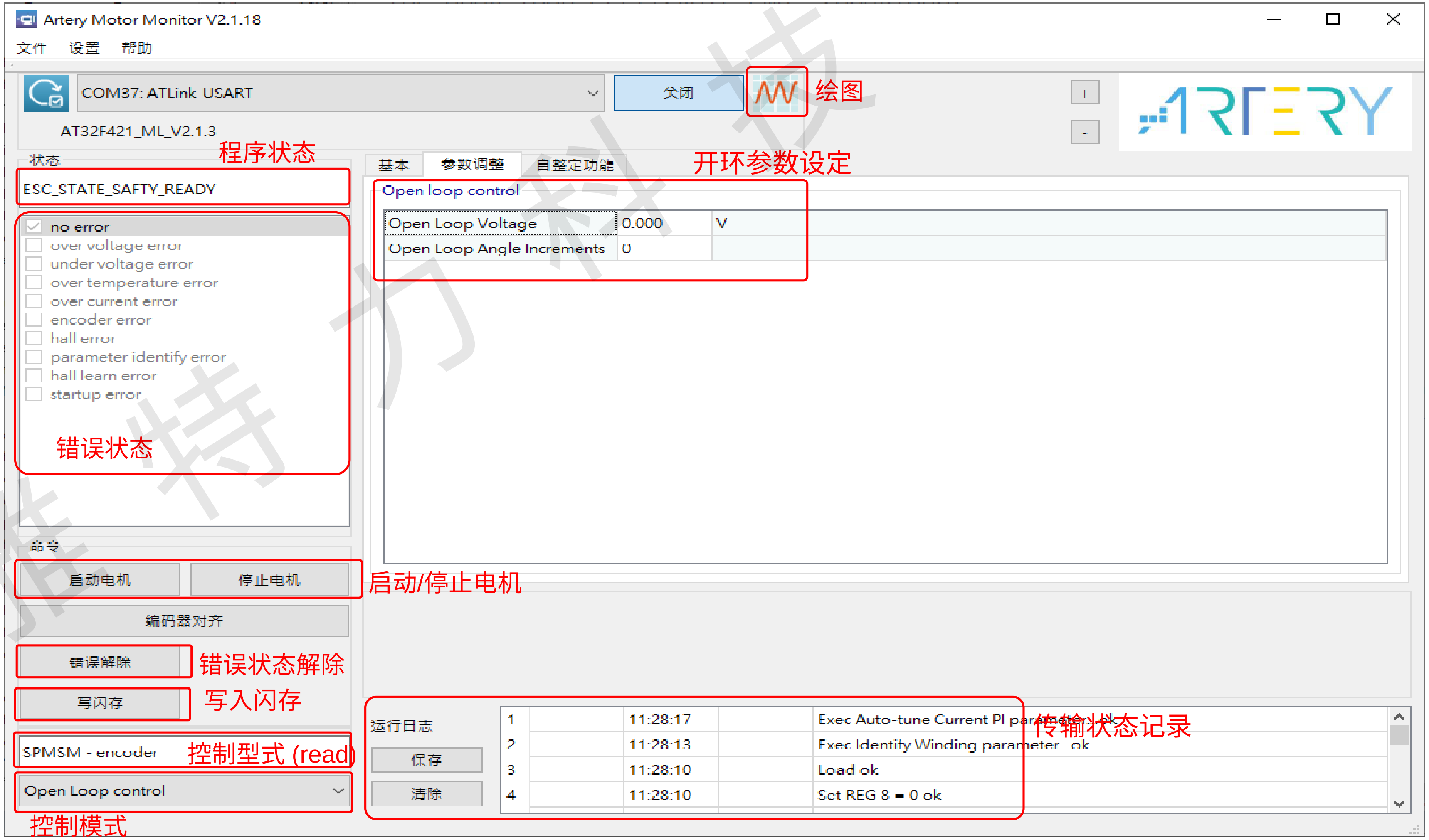
电机与开发板接线图

监控界面软件运行操作 –自整定功能



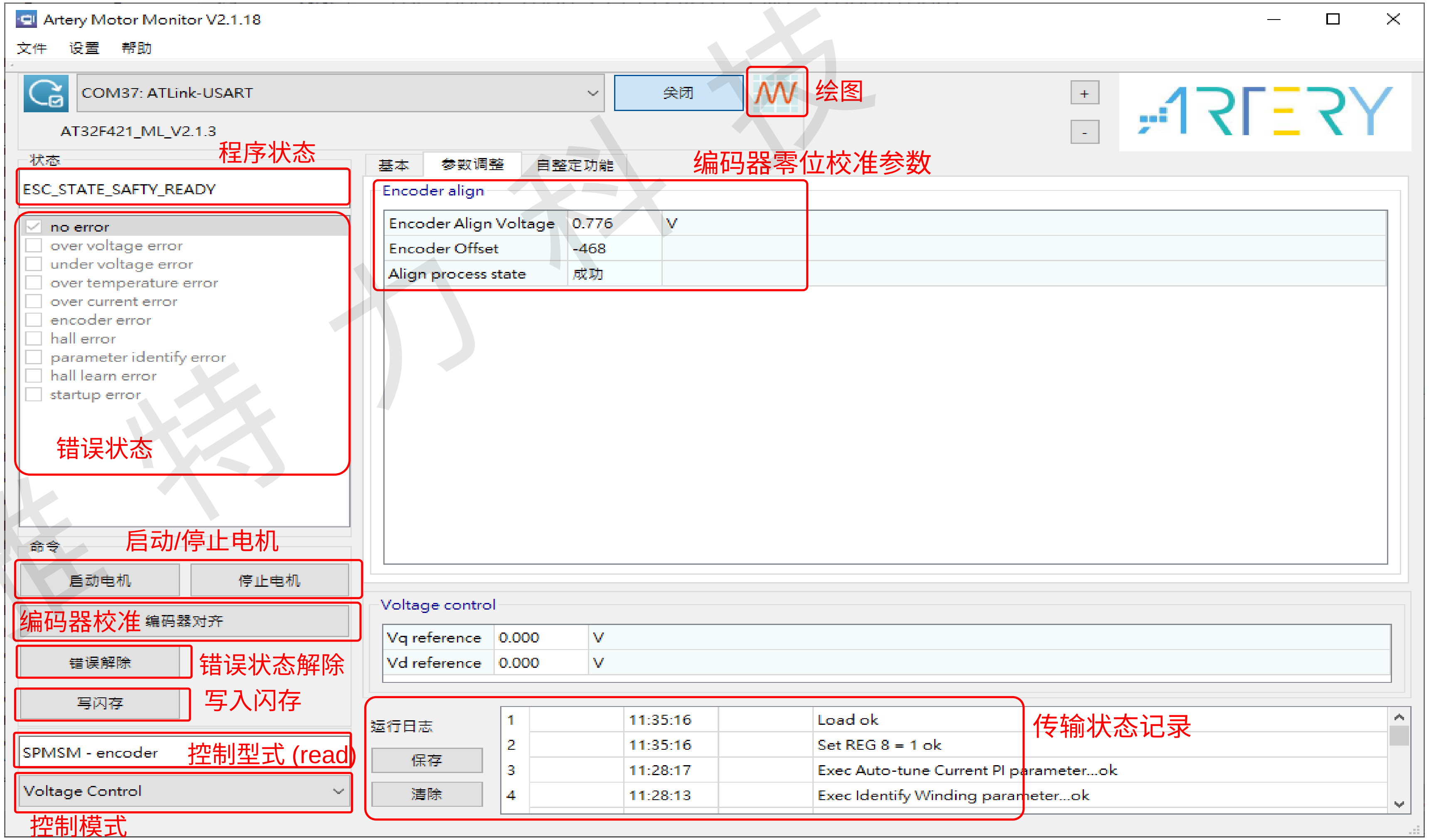
监控界面软件运行操作 –开环控制

- 设定初始开环电压
- 设定初始开环角度递增值
- 增加一点开环电压
- 增加一点角度递增值
- 依次递增电压与角度递增值，逐步拉高转速



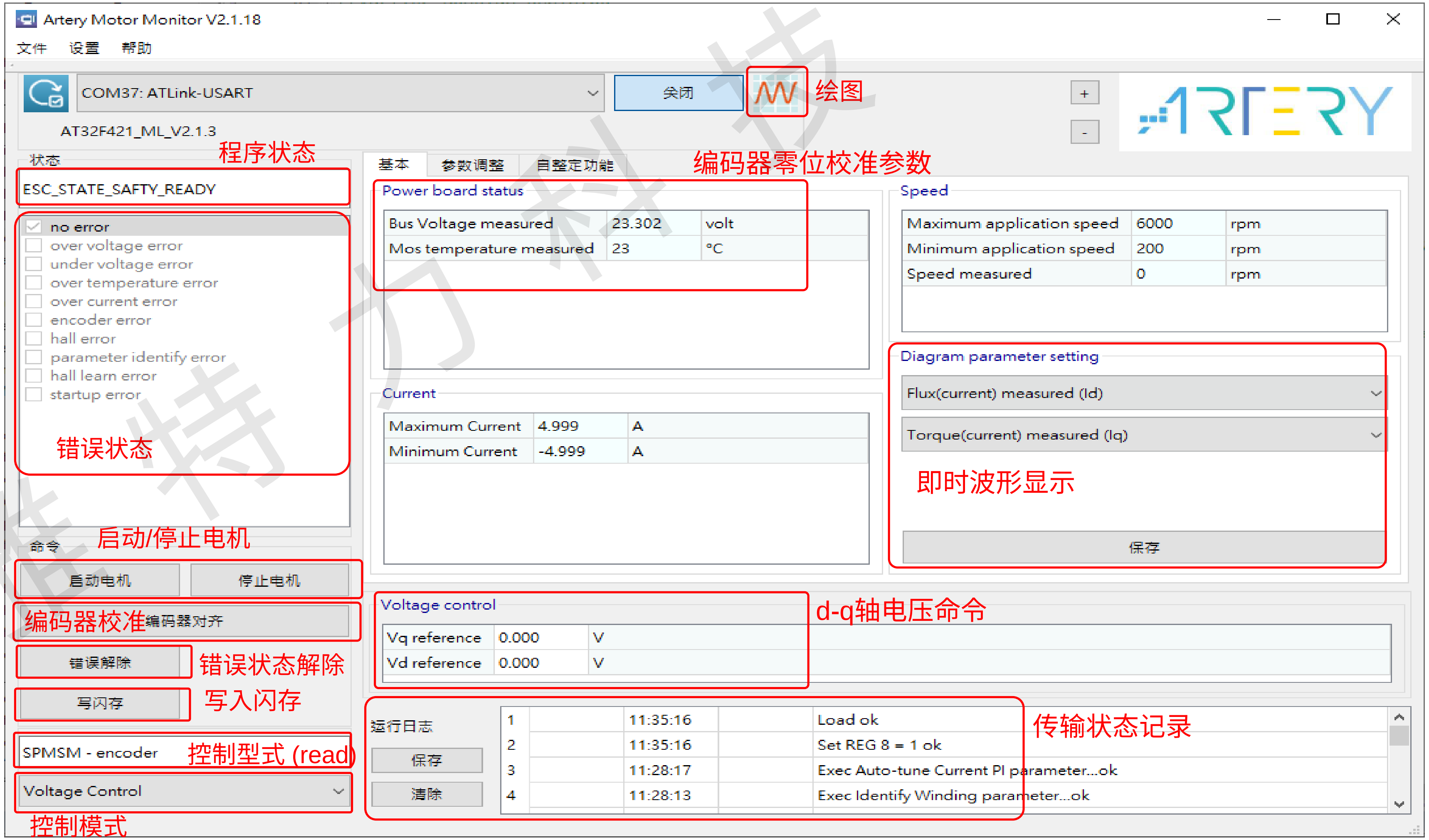
监控界面软件运行操作 – 编码器零位校准

- 将控制模式设为非开环模式的其中一种
- 设定编码器零位校准参数
- 启动编码器零位校准
- Align process state 显示成功即可

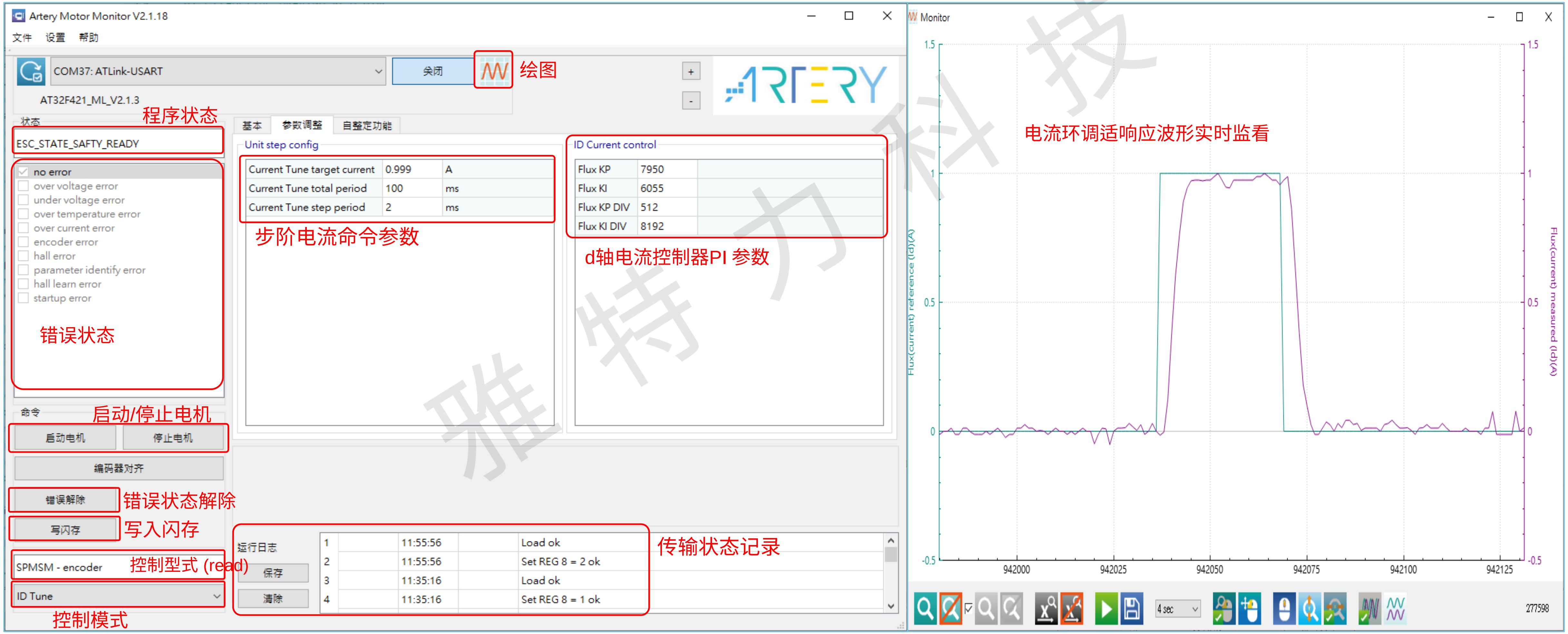


监控界面软件运行操作 – 电压控制

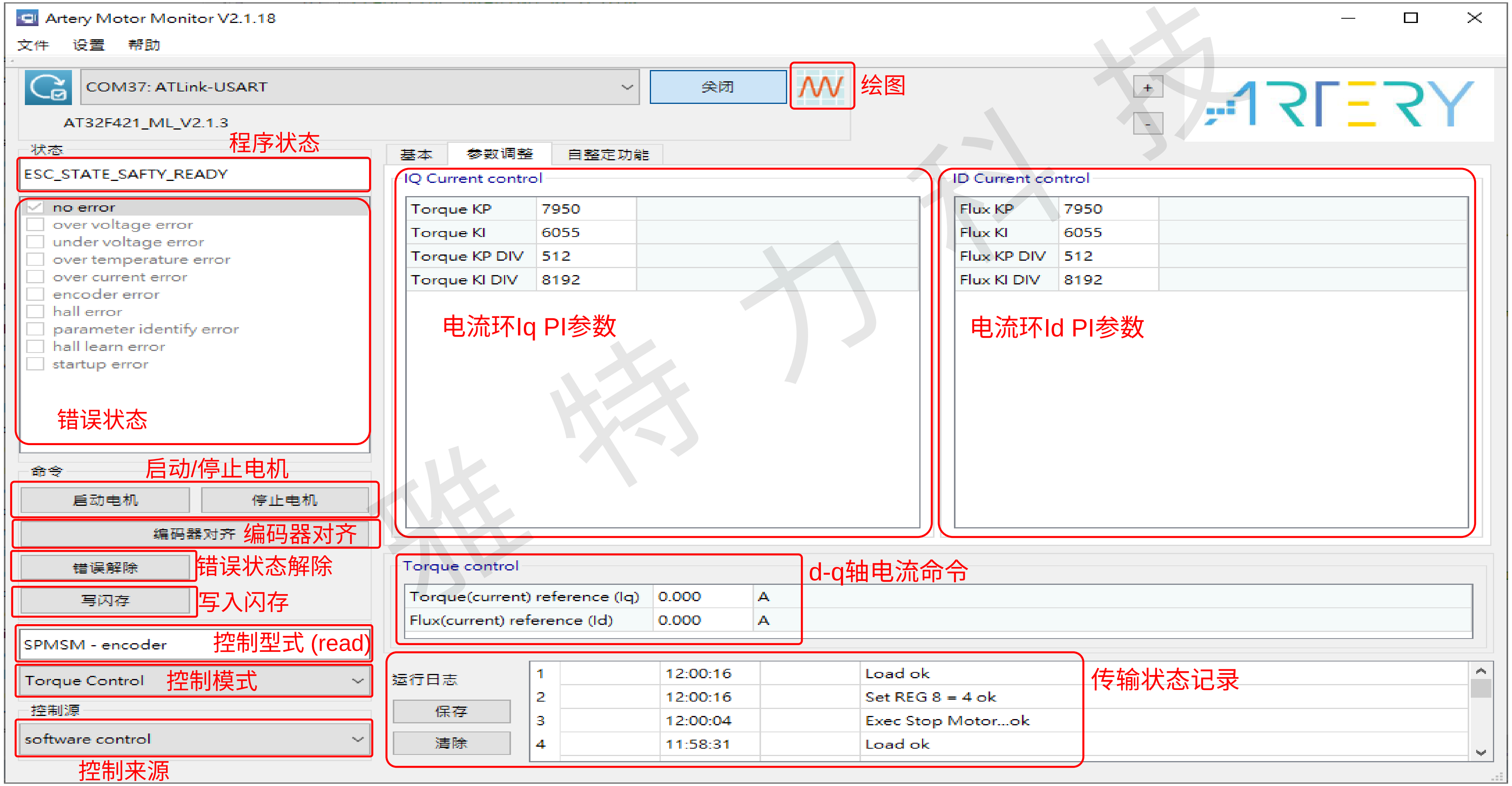
- 设定q轴电压Vq
- 启动电机即可运转
- 逐步增加Vq电压
- 可观测Id与Iq电流
- 适当调整d轴电压Vd使Id电流接近于0
- 在电流环未适当调整时，可在电压模式观察电流回授状态



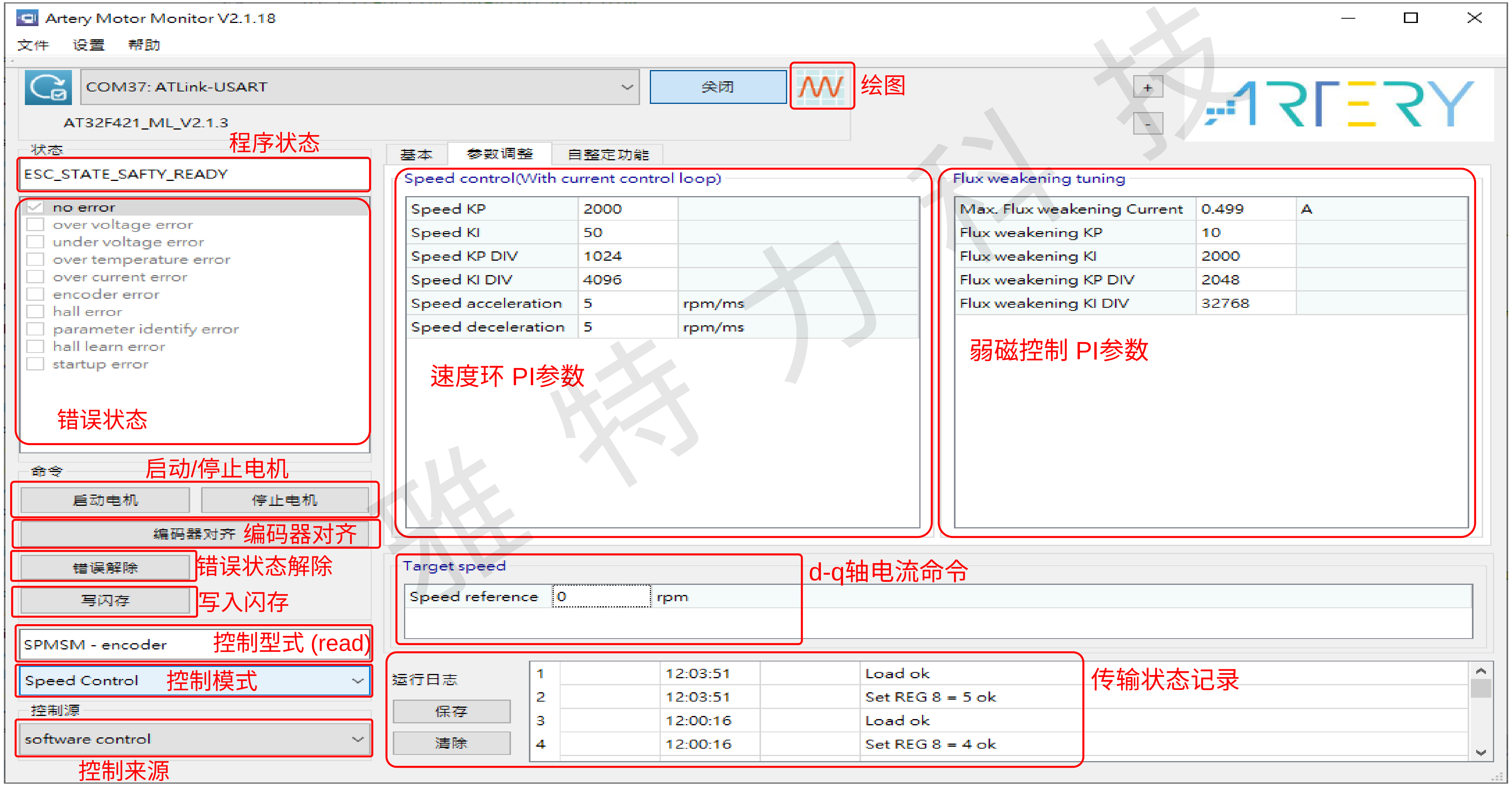
监控界面软件运行操作 – 电流环参数实时调整



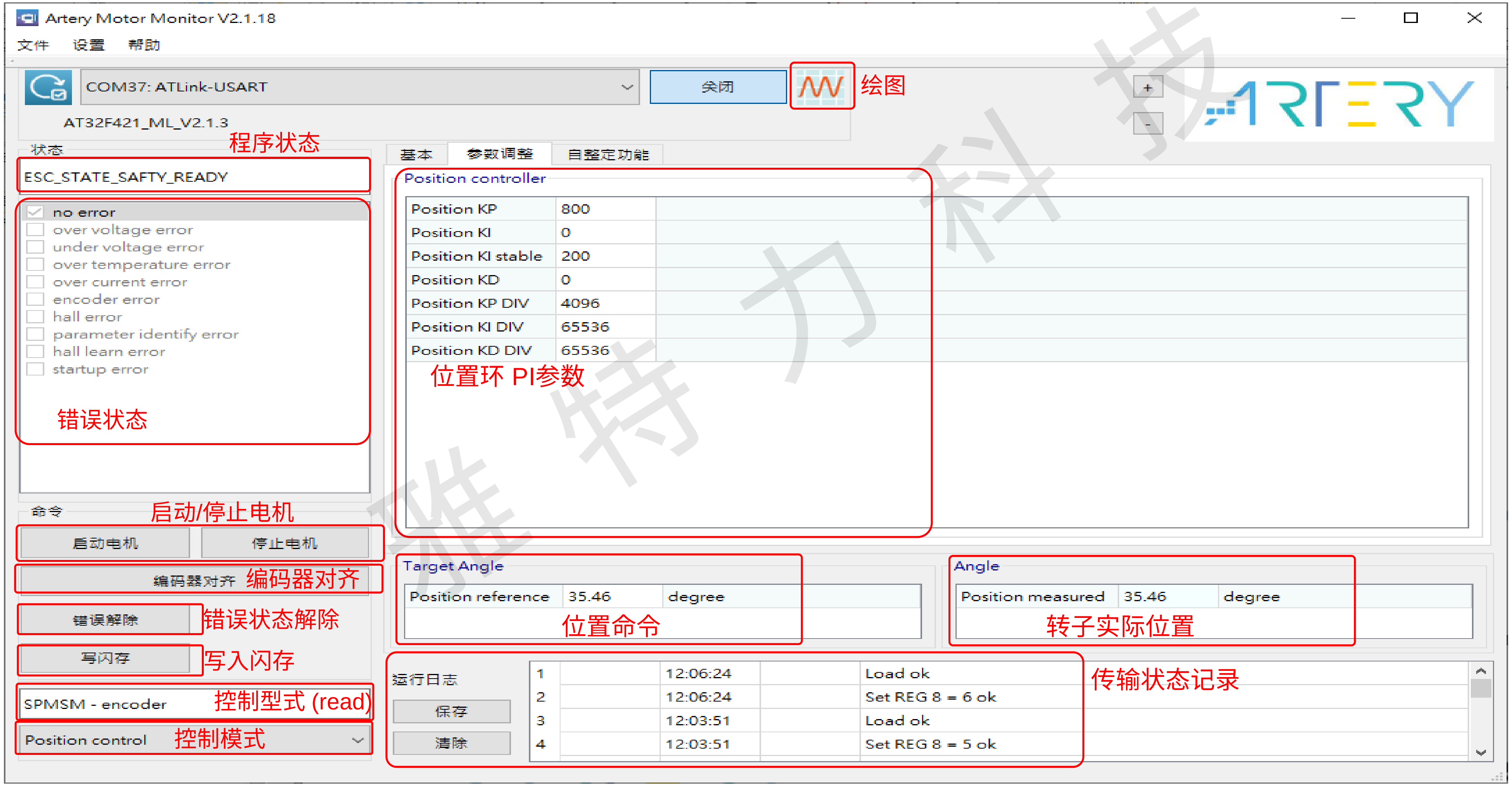
监控界面软件运行操作 – 转矩控制



监控界面软件运行操作 – 速度控制

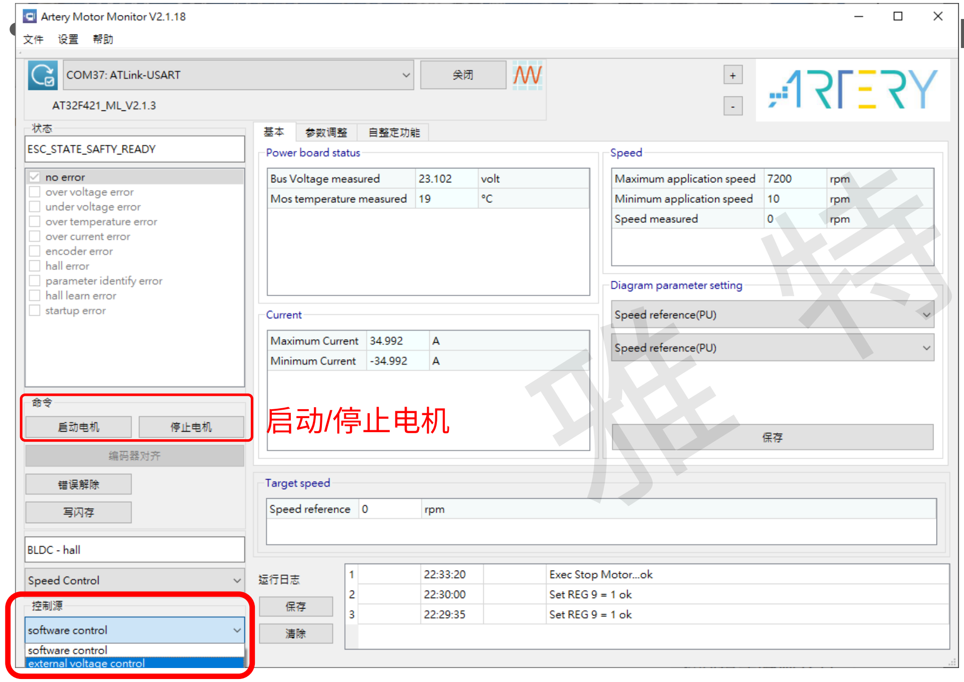


监控界面软件运行操作 – 定位控制



外部命令控制

- 在控制源选择外部电压控制，只能正转
- 或在motor_control_drive_param.h头文件中定义’CTRL_SOURCE’为’CTRL_SOURCE_EXTERNAL’



外部控制源

提问时间

10分钟

Q&A

Promotion Limited

联系我们

中文官网

English Website

微信公众号

Linkedin

- 销售咨询 sales_artery@arterytek.com
- 技术服务 support_artery@arterytek.com

Thank you!