



AT32电机库示范讲解

- FOC 无转子位置传感器控制

3.20 (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

2025.03.20 活动议程

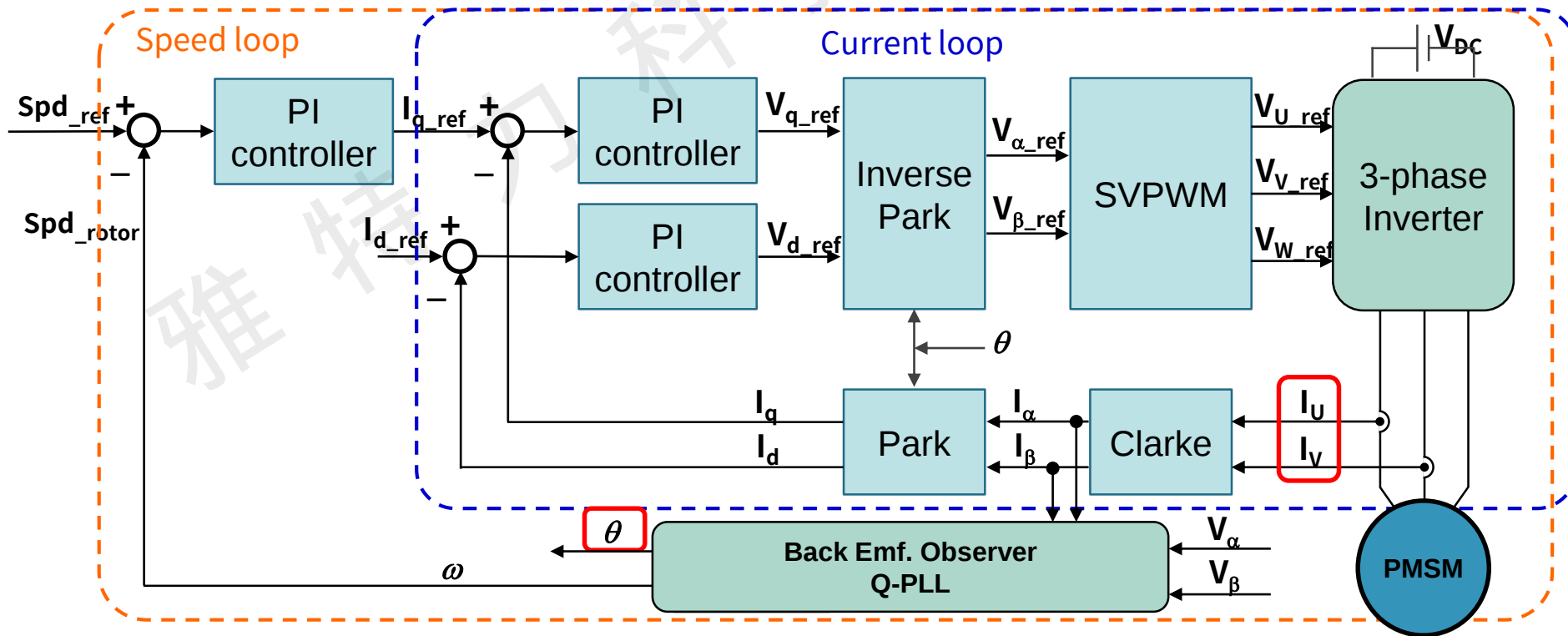
时间	主题	讲师
13:30 -14:30	永磁同步电机FOC无转子位置传感器控制解说	电机应用软件 资深工程师 林明赞 博士
中场休息		
14:40 -15:30	AT32 电机库FOC无转子位置传感器快速上手操作解说	电机应用软件 资深工程师 林明赞 博士

FOC无感控制原理介绍



FOC无感磁场导向控制系统

- 有感控制是利用连接转子的编码器或霍尔传感器获取转子角度
- 无感控制则是利用电机电压与电流估算反电势进而估算转子角度与速度



永磁同步电机数学模型

- 永磁同步电机电气方程式：

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_s p & 0 \\ 0 & r_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda_m \sin(\theta_e) \\ \omega_e \lambda_m \cos(\theta_e) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} r_s + L_s p & 0 \\ 0 & r_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

- 永磁同步电机反电势包含转子磁极位置信息
- 求得反电势即可推估转子磁极位置

永磁同步电机数学模型与估测器

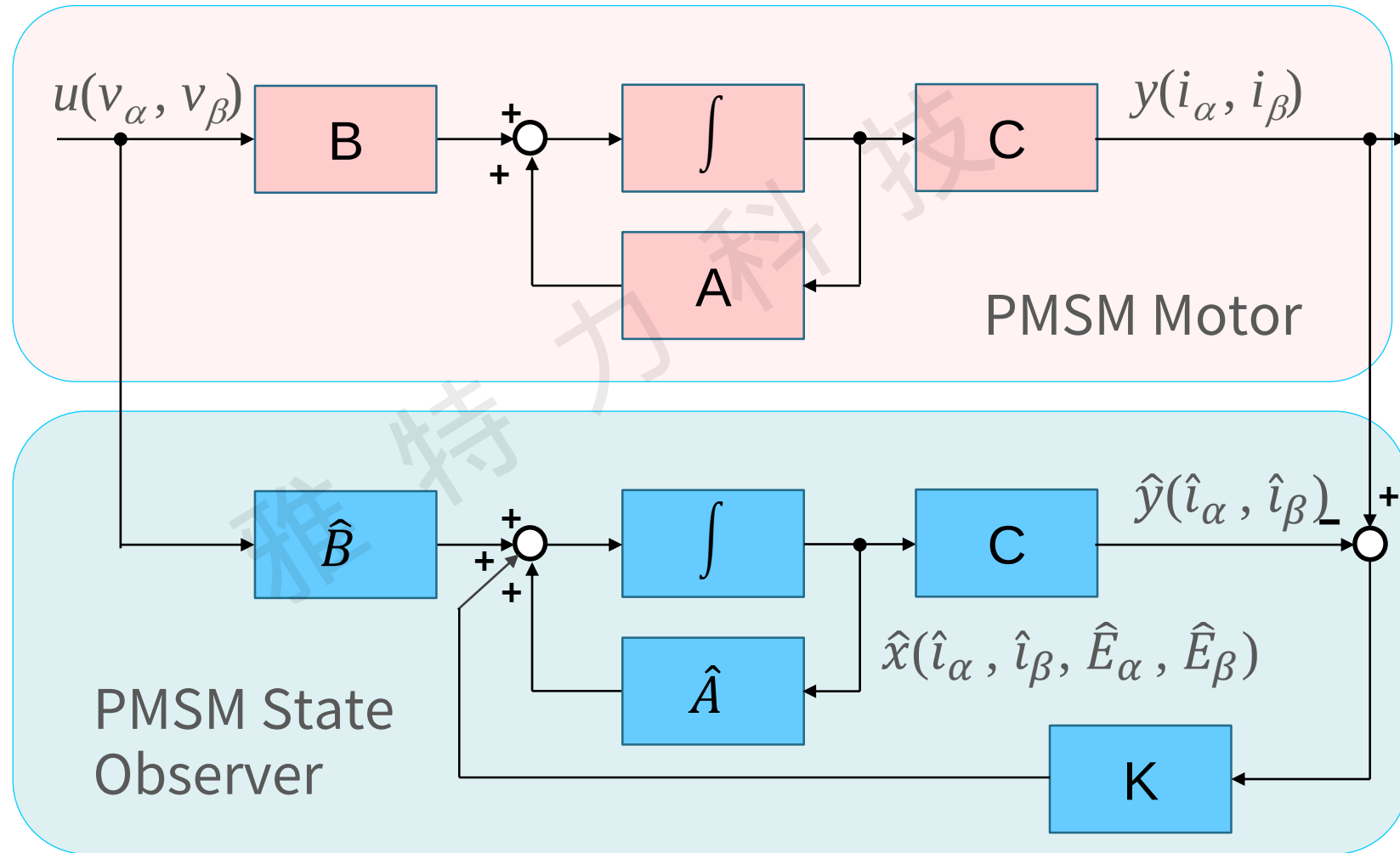
- 永磁电机数学模型可表示为：

$$\begin{bmatrix} p i_\alpha \\ p i_\beta \\ p E_\alpha \\ p E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{r_s}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_e \\ 0 & 0 & \omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

- 永磁电机电流/反电势估测器可设计为：

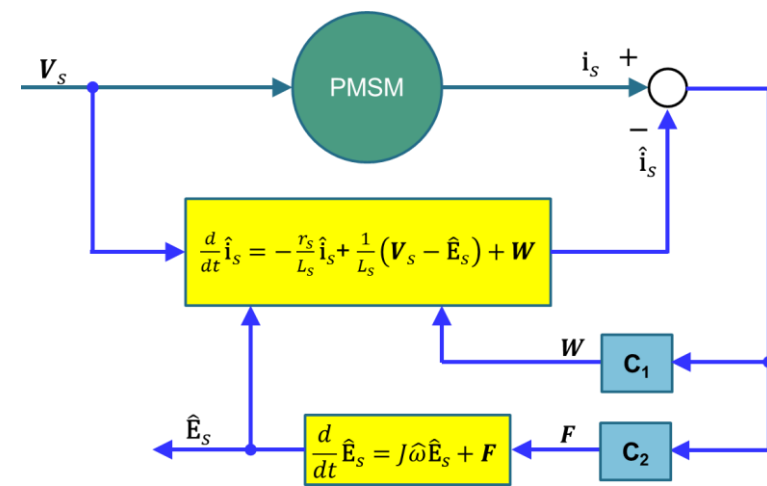
$$\begin{bmatrix} p \hat{i}_\alpha \\ p \hat{i}_\beta \\ p \hat{E}_\alpha \\ p \hat{E}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{r_s}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & -\hat{\omega}_e \\ 0 & 0 & \hat{\omega}_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \\ \hat{E}_\alpha \\ \hat{E}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(i_\alpha - \hat{i}_\alpha) \\ C_1(i_\beta - \hat{i}_\beta) \\ C_2(i_\alpha - \hat{i}_\alpha) \\ C_2(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

线性系统估测器



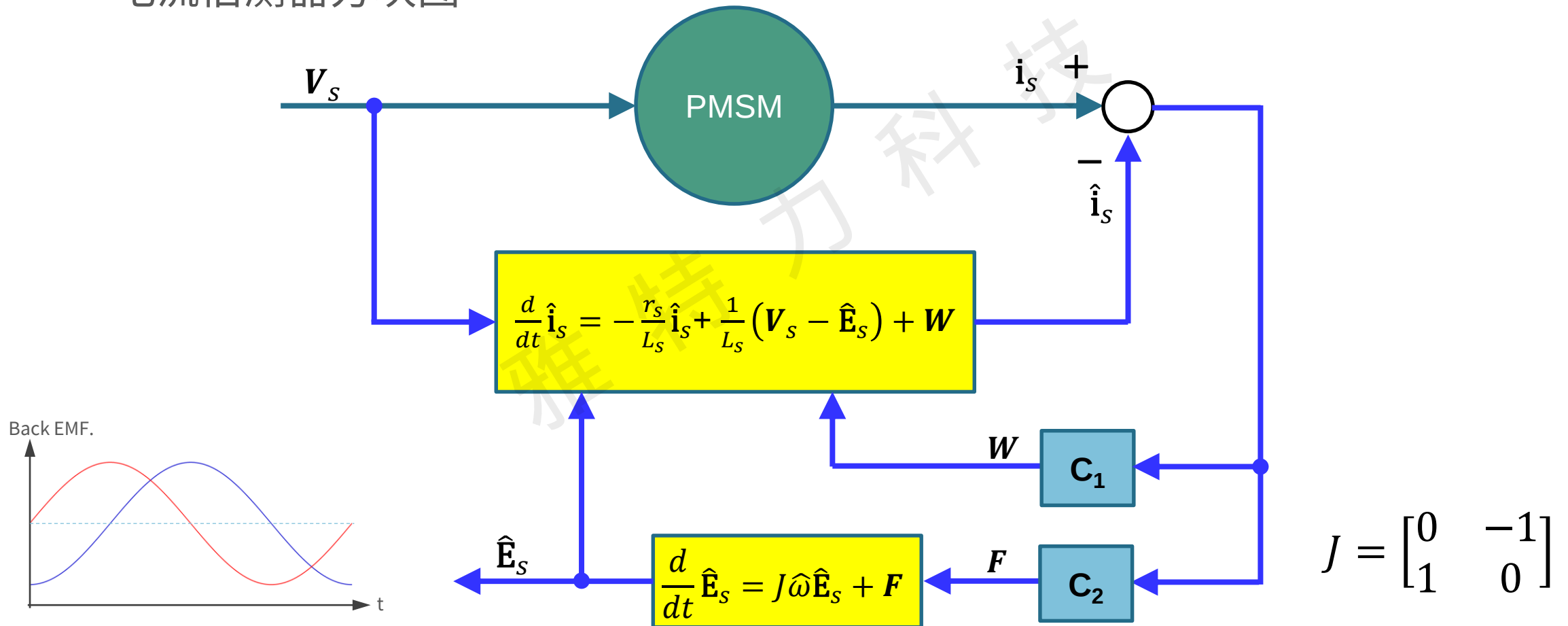
龙伯格(Luenberger)电流/反电势估测器

- 根据输入电压利用PMSM的 α - β 轴数学模型，估测电机反电势与电流，并计算与实际电流的误差，修正反电势与电流估计值
- 当电流误差接近零时，即可获得近似的电机反电势，从而计算转子位置/速度
- 优点
 - 结构简单、计算容易
 - 动态特性好、相位延迟小
- 缺点
 - 无法运作于极低速
 - 参数不准会影响高转速性能



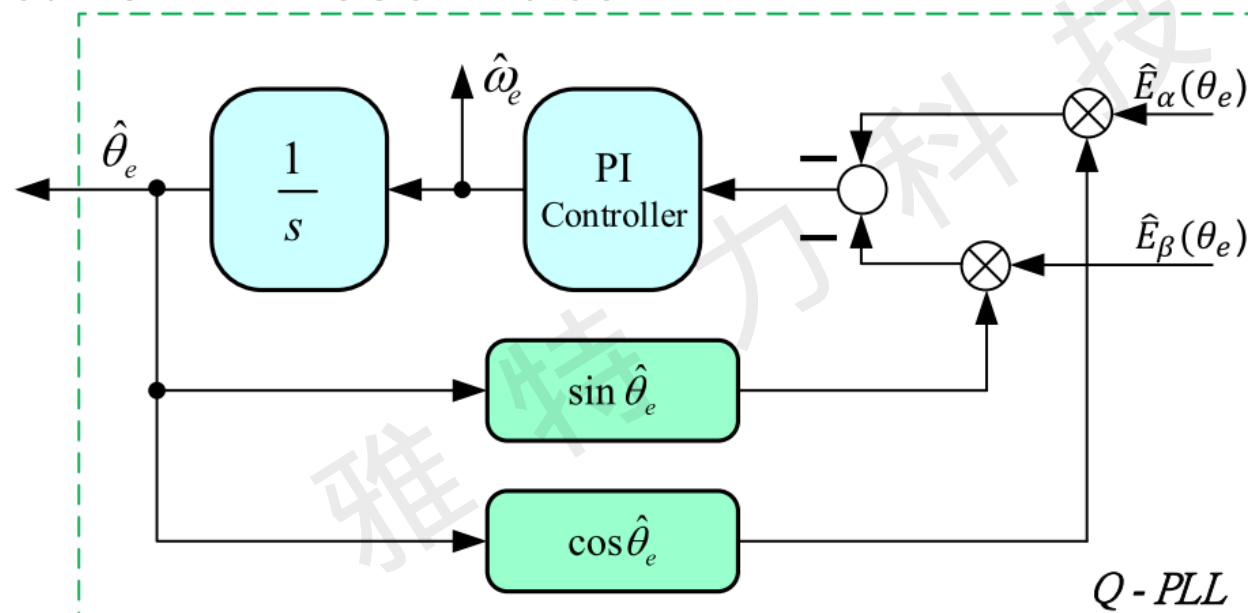
龙伯格(Luenberger)电流/反电势估测器

- 电流估测器方块图



角度/转速正交锁相回路估测器

- Quadrature-PLL estimator



$$\hat{E}_\alpha(\theta_e) = -\sin \theta_e$$

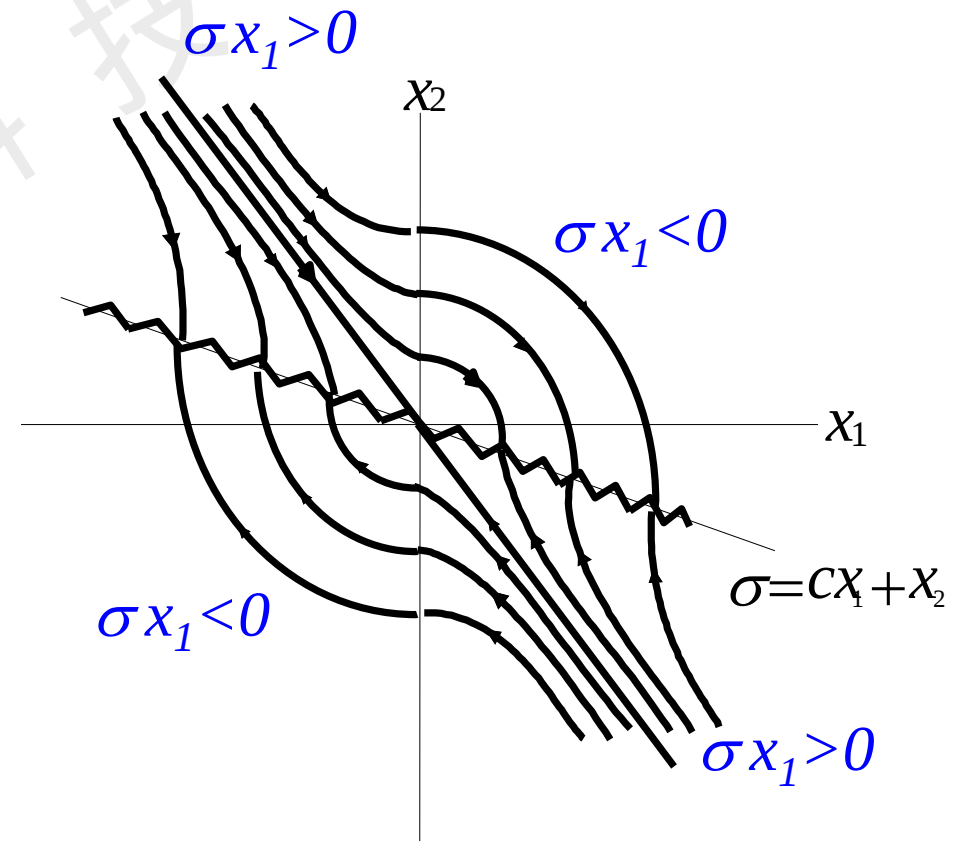
$$\hat{E}_\beta(\theta_e) = \cos \theta_e$$

估测法则： $-\hat{E}_\alpha(\theta_e)\cos\hat{\theta}_e - \hat{E}_\beta(\theta_e)\sin\hat{\theta}_e = \lambda_m\sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \approx \lambda_m\Delta\theta_e$

转移函数：
$$\frac{\hat{\theta}_e}{\theta_e} = \frac{\lambda_m(k_p s + k_i)}{s^2 + \lambda_m(k_p s + k_i)}$$

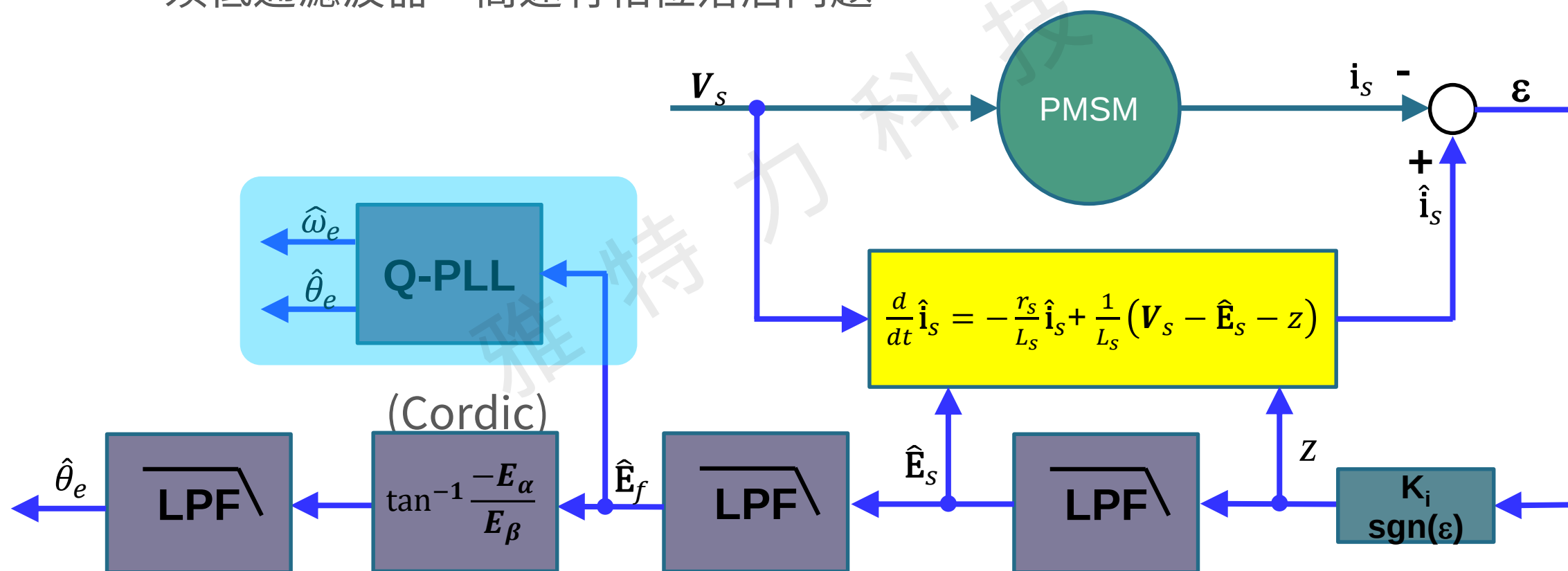
滑动模式(Sliding Mode)估测器

- 系统状态方程式 $\dot{X} = AX + BU$, $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$
- x_1 : 系统状态误差, $x_2 = \dot{x}_1$
- 设定滑动线方程式 $\sigma = cx_1 + x_2$
- 令 $U = K_i \cdot \text{sign}(x_1 \sigma)$
- 根据Lyapunov 稳定条件 $\lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma \dot{\sigma} \leq 0$
- 可求得使系统稳定的 K_i 数值范围



滑动模式电流估测器

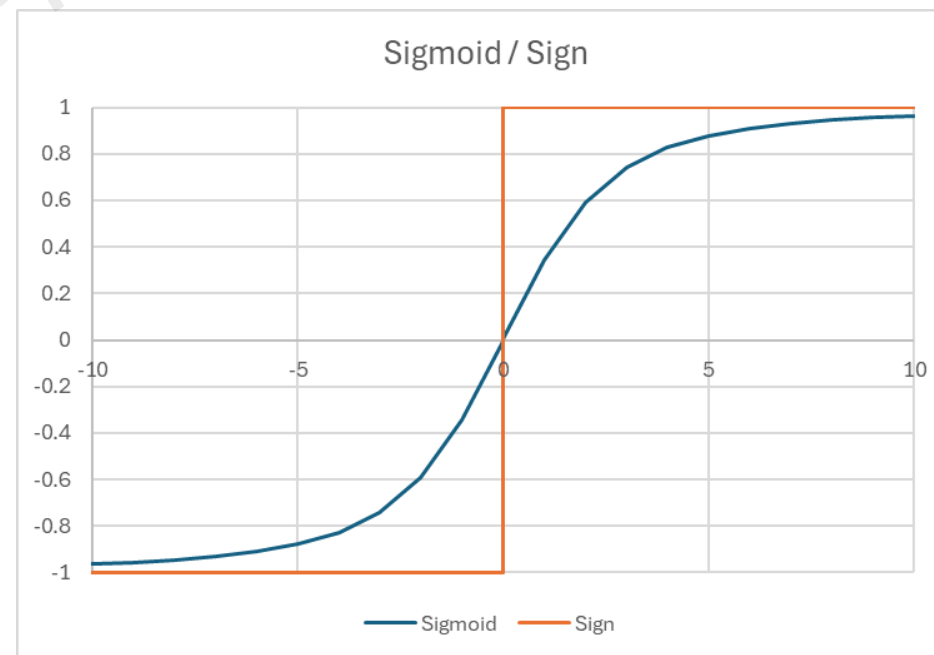
- 经由电流估测器获取反电势信息
- 须低通滤波器，高速有相位落后问题



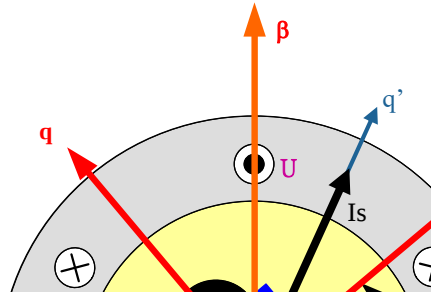
滑动模式估测器方块图

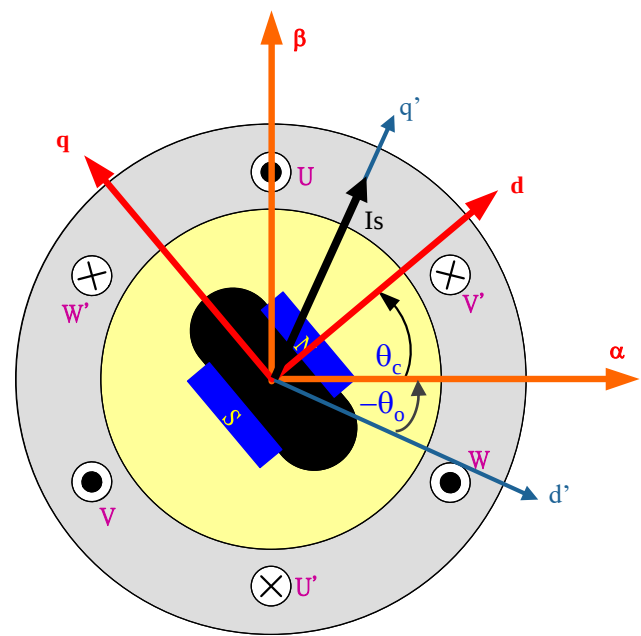
滑动模式估测器特性

- 优点
 - 结构简单且易于实现
 - 强抗干扰能力与鲁棒性、动态响应快
- 缺点
 - 抖振问题
 - 需低通滤波器，高速时需补偿相位
- 全阶滑模估测器
 - 采用sigmoid函数计算
 - 无抖动与低通滤波问题，但响应变慢
 - sigmoid函数计算较复杂



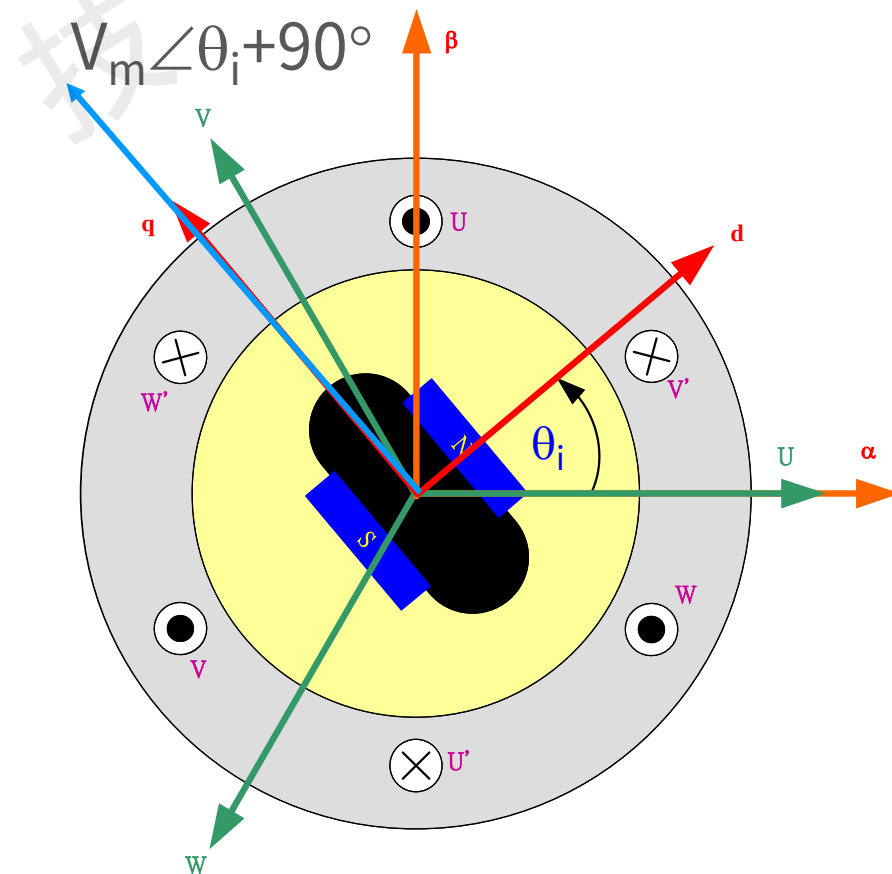
电流-频率(IF)开环启动

- 电流闭环：固定q轴电流、d轴电流为0
 - 频率斜坡递增：依频率产生递增角度，输出弦波电流
 - 电机加速：反电势逐渐变大，反电势估测器可正确估测角度
 - 修正递增角度接近估测角度
 - 到达设定的开环速度
 - 切入角度闭环
- 



初始角度定电压矢量启动

- 获取转子初始角度后，输出一超前90°固定电流矢量
- 转子因此转动，电机电压也随之变化
- 根据电机电压与电机电流估算反电势
- 进而经Q-PLL运算，估测电机转速与转子位置
- 已达估测转速或预设时间，切入闭回路无感控制
- 不须经开回路运转过程，加速启动时间



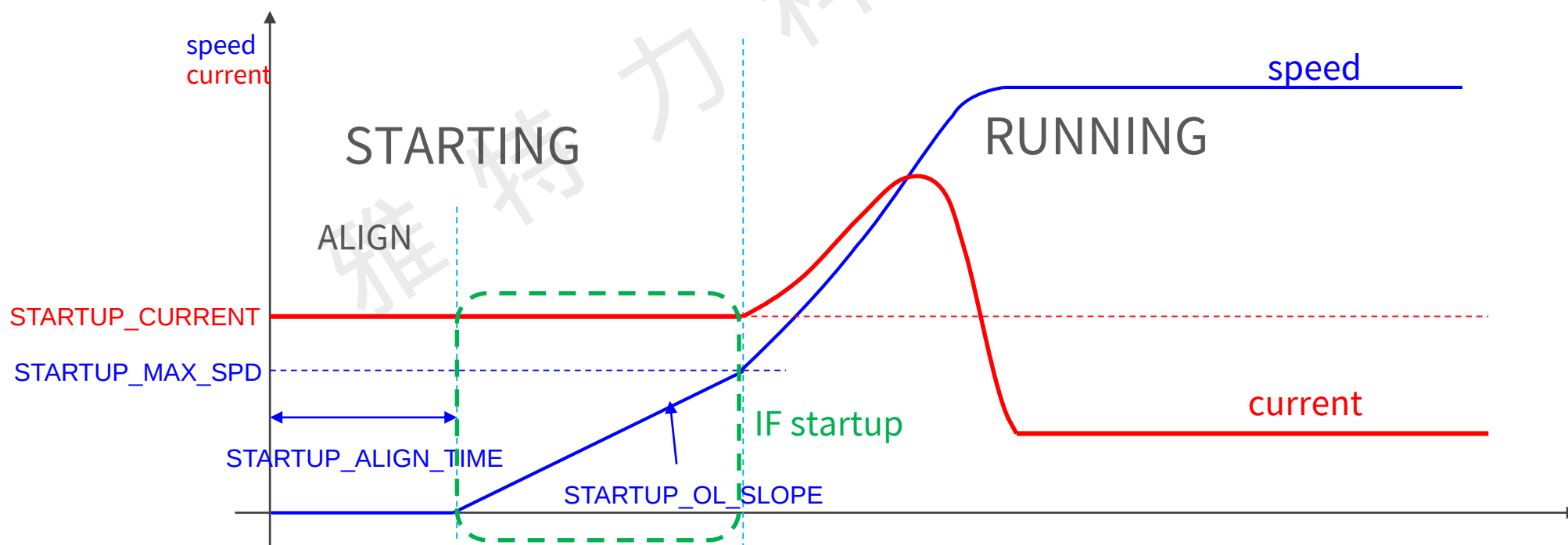
电机矢量坐标示意图

无感控制由静止状态启动方式

- IF开环启动
 - 电流闭环控制固定电流，逐步增加频率与角度递增量，推动转子加速
 - 当电机转速足够高、反电动势信号可用时，切换为角度闭环控制
- 转子对齐启动
 - 在特定线圈组施加直流电流，使转子朝向特定角度对齐
 - 再以IF开环或定电流矢量启动，让转速提高进入角度闭环
- 转子初始角度侦测
 - 利用转子磁极在不同位置时，测量各矢量对应的电流变化来估算初始位置
 - 再以IF开环或定电流矢量启动，让转速提高进入角度闭环

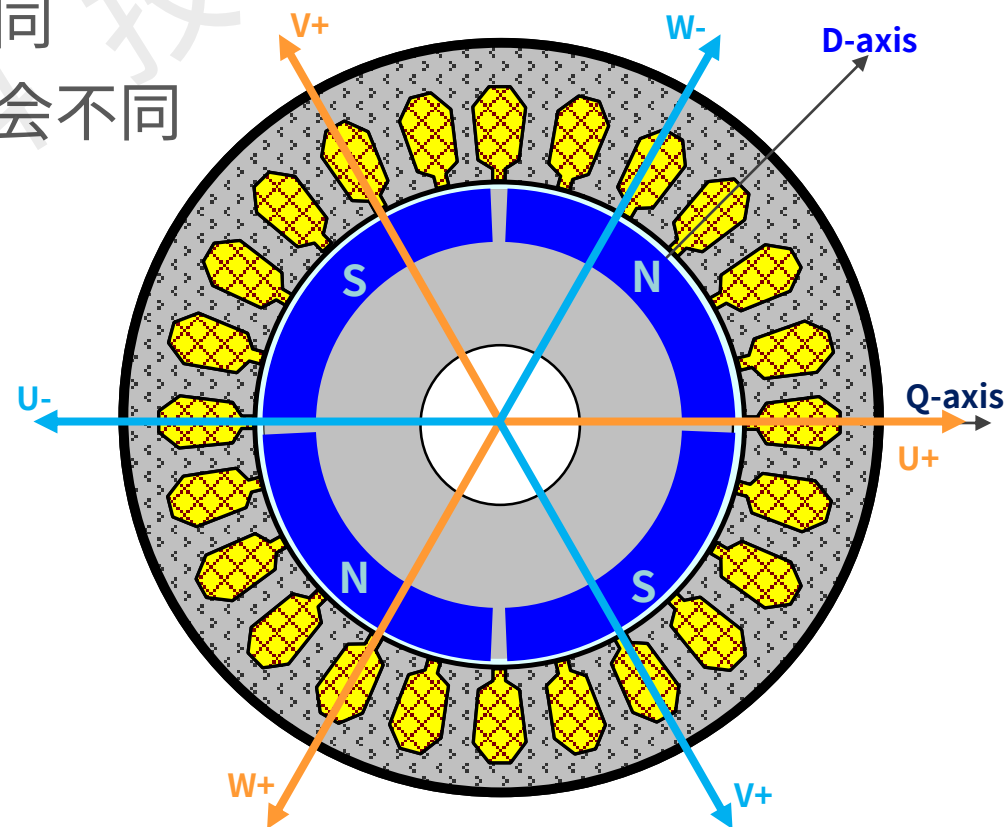
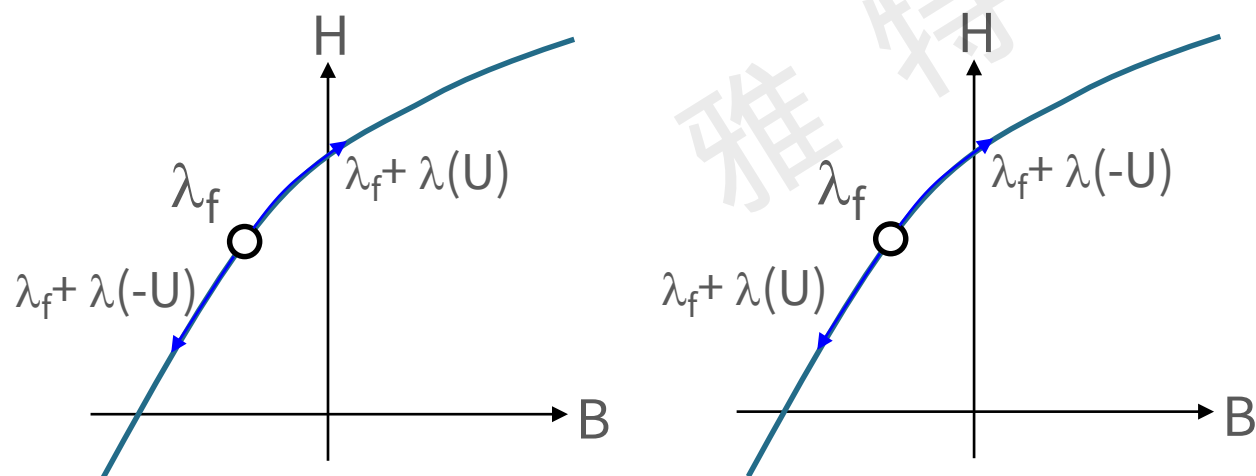
无感启动对应参数

- ALIGN：使用STARTUP_CURRENT电流，第一次锁定q轴、第二次锁定d轴
- 锁定d轴后以STARTUP_CURRENT进入IF开环启动



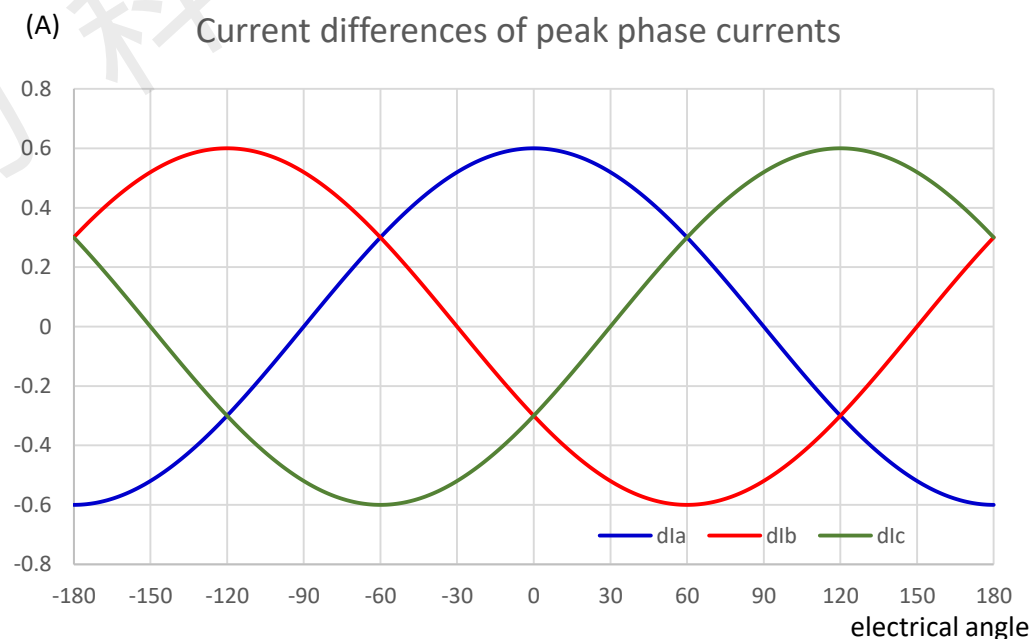
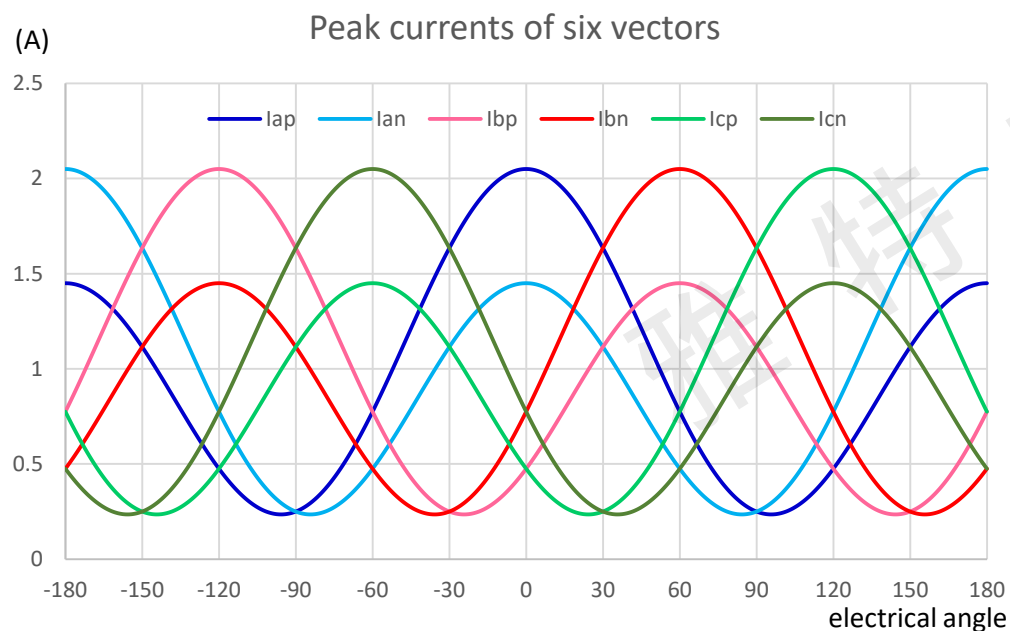
转子磁极初始位置侦测

- 三相线圈在电机空间中各相差 120° 电气角
- 转子位置不同，各线圈的静态磁通值也会不同
- 故外加不同电压相量脉波时，线圈电流值也会不同
- 根据三相电流值可以估算转子位置



转子磁极初始位置侦测 – 取得电流

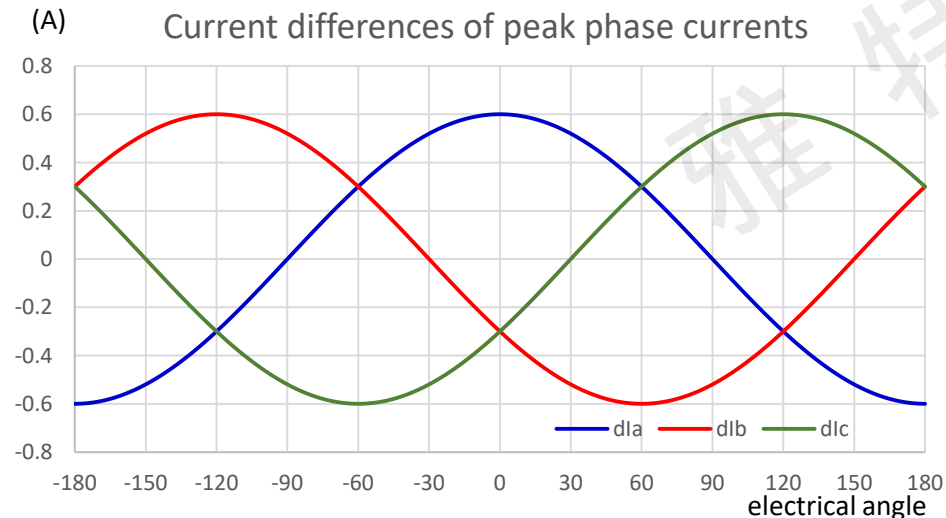
- 分别注入6个电压脉波矢量，取得6个电流变化值
- 计算同相的电流差值，可得电流与转子角度为弦波函数关系



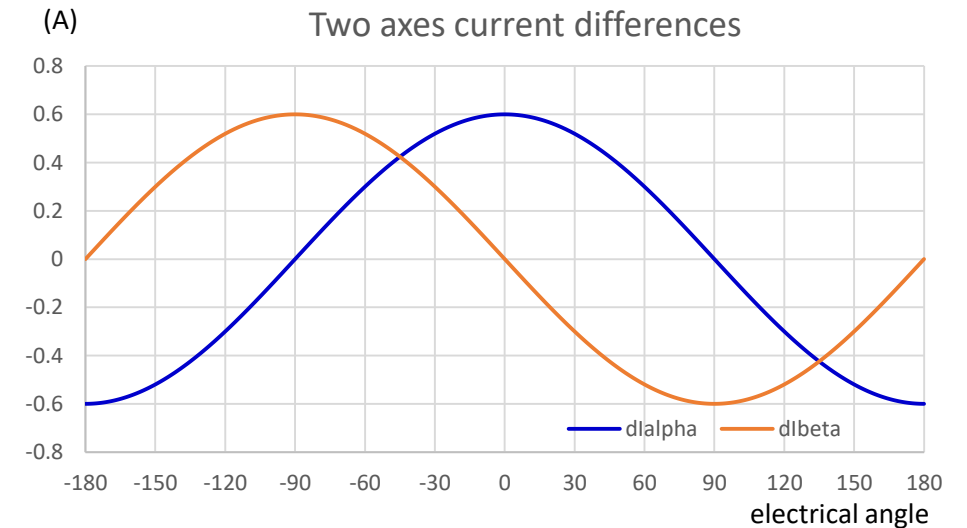
转子磁极初始位置侦测 – 计算角度

- 将三相电流差值经Clarke转换
- 获得正交轴上电流差值
- 取反正切函数计算转子位置

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-\Delta I_{\beta}}{\Delta I_{\alpha}}$$

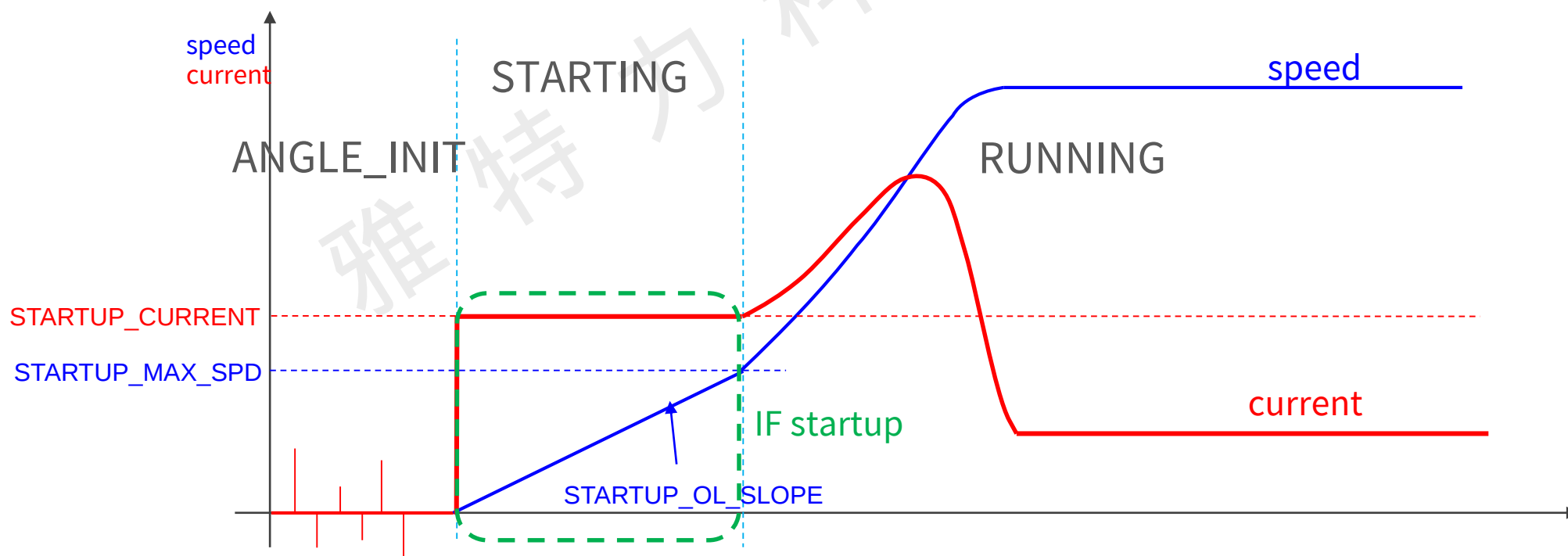


Clarke



初始角侦测无感启动对应参数

- 以DETECT_PULSE_WIDTH脉波宽度，发送六个电压矢量检测转子初始角
- 侦测转子初始角后，以IF开环方式启动



无感电机库 架构解说



电机库 – 无感 FOC

■ 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

■ 初始转子位置估测方法

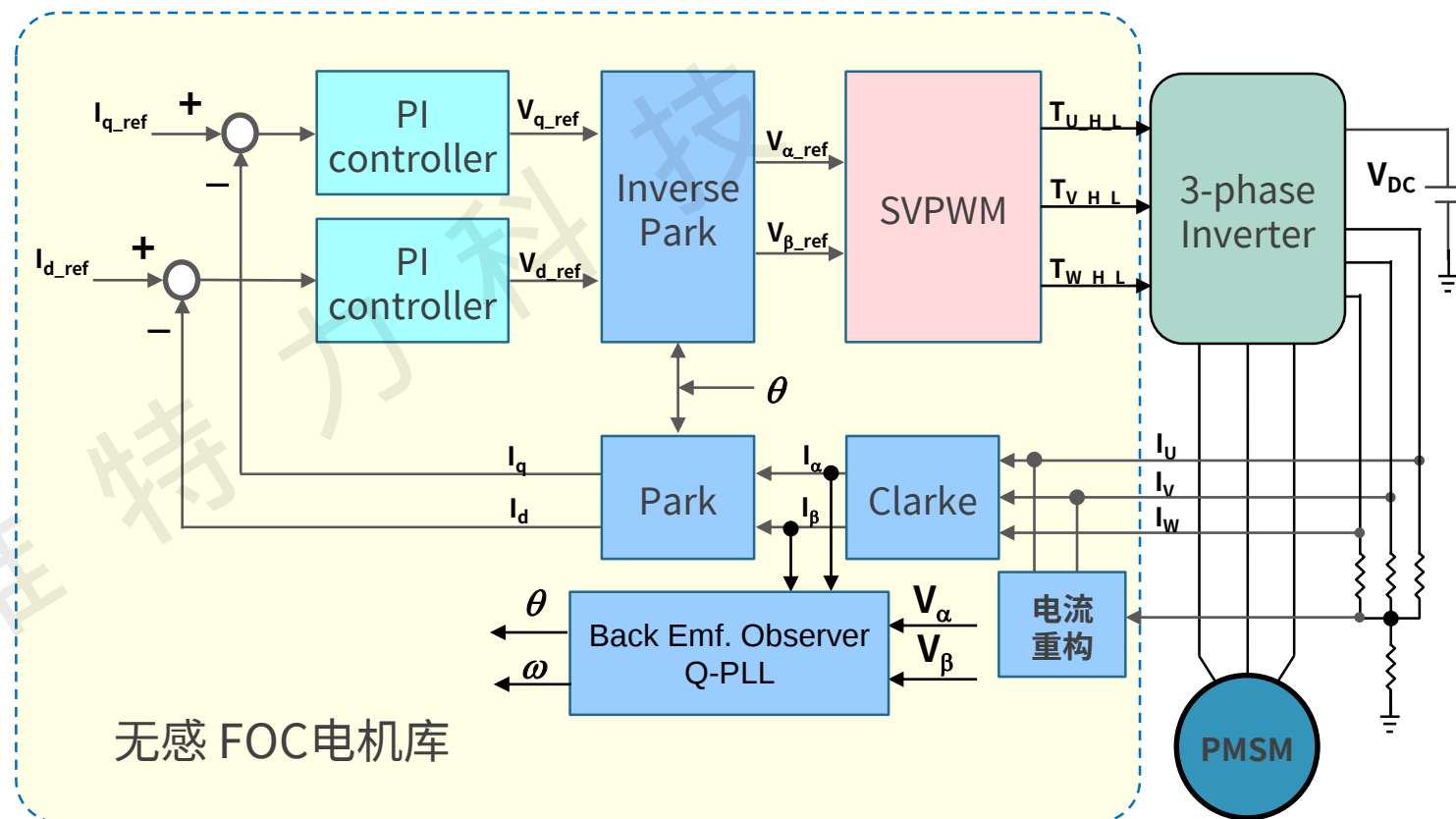
- 三相电压矢量转子初始角度估测

■ 转子位置估测方法

- 龙伯格估测器

■ 可实现无传感器弦波控制方法

- 转矩控制 (电流矢量控制)
- 转速控制
- 弱磁控制
- 回生刹车

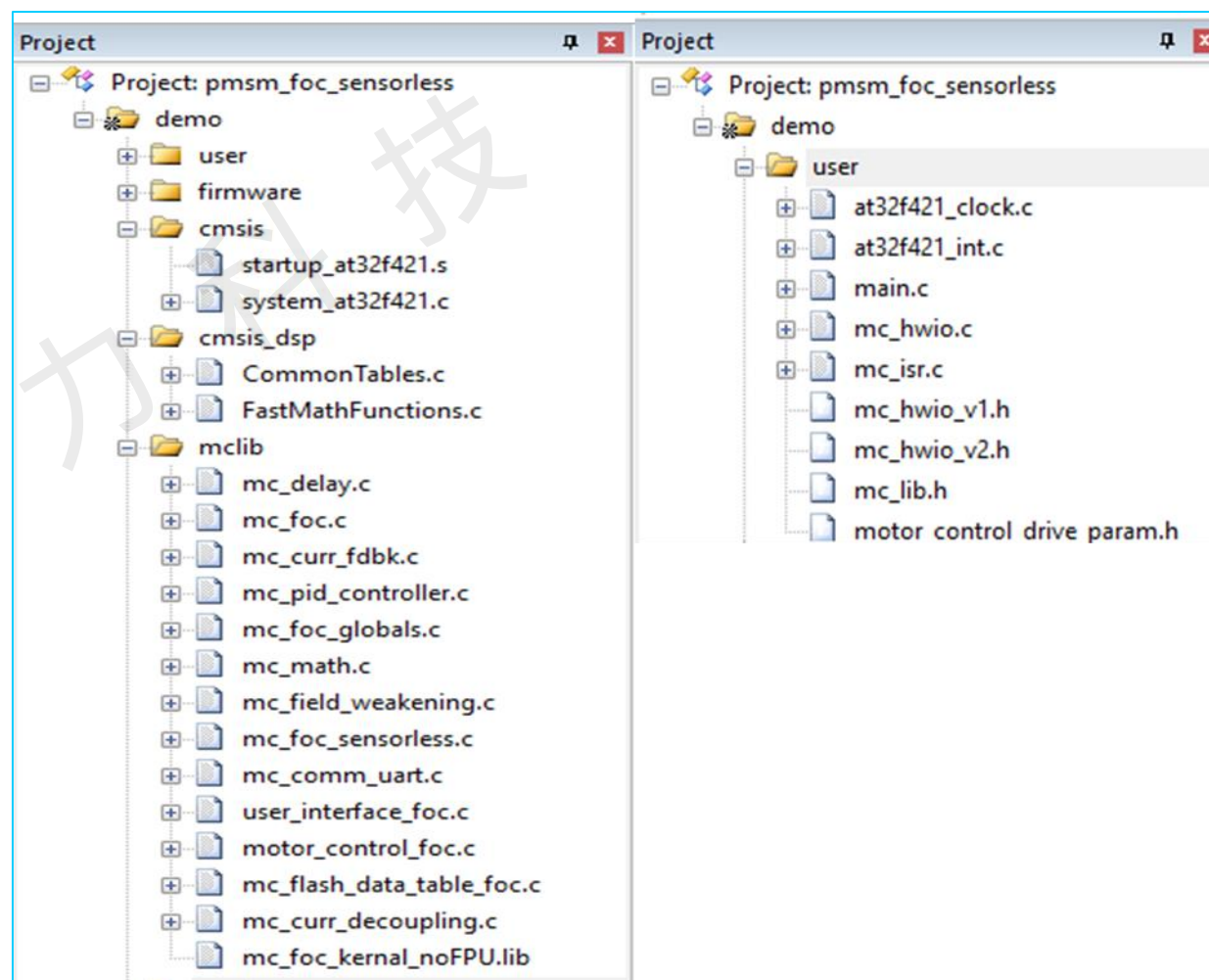


PMSM电机库控制技术与应用方案

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	●	●	●	●	●	●		

无感FOC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
 - 电机库程序包含PI控制函数、无感电机库函数、全局变量设定与通讯函数等等

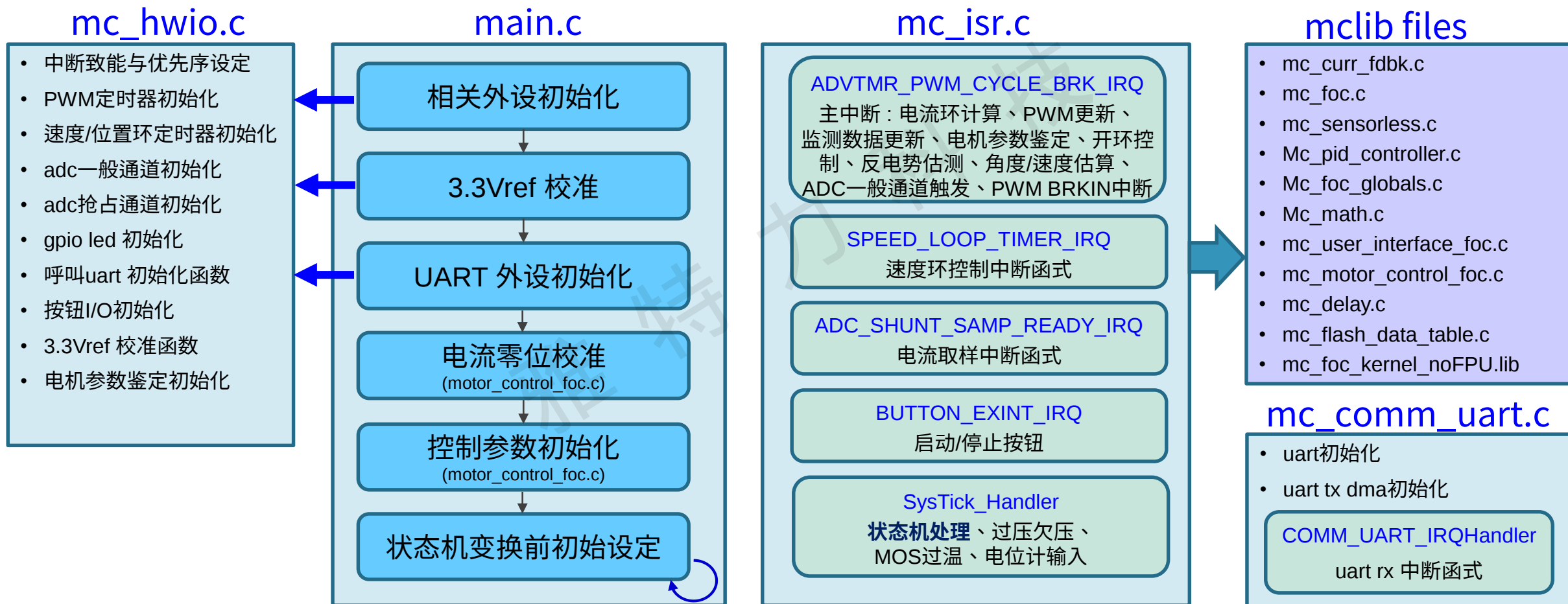


PMSM无感工程专案文件说明

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

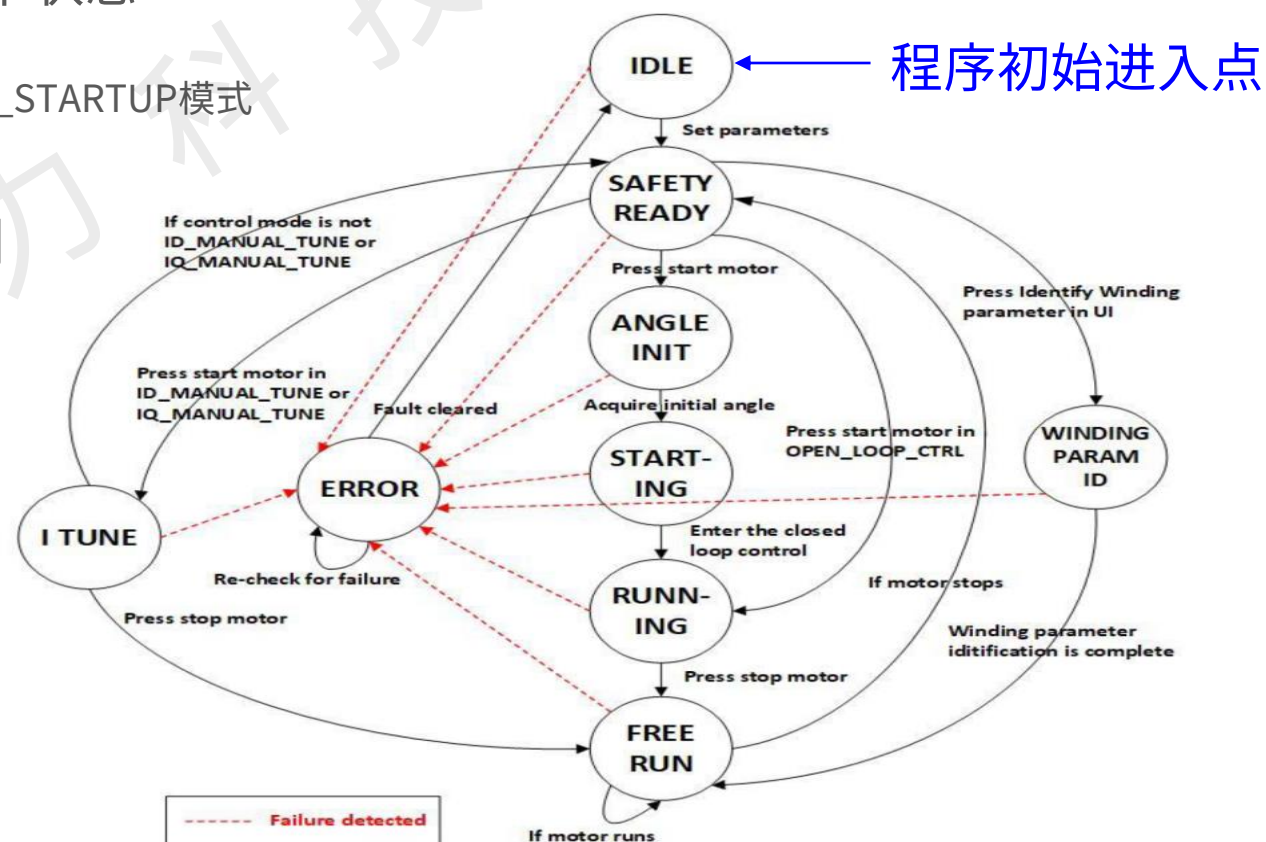
PMSM FOC无感专用文档	
mc_foc_kernal.lib	电机库核心函数(Keil专用)(适用于芯片有FPU)
mc_foc_kernal_noFPU.lib	电机库核心函数(Keil专用)(适用于芯片无FPU)
libmc_foc_kernal.a	电机库核心函数(AT32IDE专用)(适用于芯片有FPU)
libmc_foc_kernal_noFPU.a	电机库核心函数(AT32IDE专用)(适用于芯片无FPU)
mc_foc_kernal.h	电机库核心函数宣告
motor_control_foc.c	电机控制相关函数
motor_control_foc.h	电机控制相关函数宣告
mc_foc.c	FOC相关函数
mc_foc.h	FOC控制相关函数宣告
mc_sensorless.c	无感相关函数
mc_sensorless.h	无感相关函数宣告
mc_field_weakening.c	弱磁控制相关函数
mc_field_weakening.h	弱磁控制相关函数宣告
mc_foc_globals.c	全局变量定义与默认值设定、全局函数定义
mc_curr_decoupling.c	电流解耦控制相关函数
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

无感控制程序流程图



程序状态机流程图

- 参数初始化后进入SAFETY_READY状态
- 按下启动电机后，根据启动方式选择下一个状态
 - ANGLE_INIT：INIT_ANGLE_STARTUP模式
 - STARTING：OPENLOOP_STARTUP/ALIGN_AND_GO_STARTUP模式
- 于STARTING状态进行IF开环启动
- 到达开环速度后，进入RUNNING闭环控制
- 按下停止电机后进入FREE RUN状态
- 回到SAFETY_READY状态



电机库下载

①

ARTERY | 雅特力科技 关于雅特力 产品讯息 技术与开发支持 应用方案 新闻中心 联系雅特力 21ic LCSC 天猫

应用文件支持

②

设计资源
电机控制
USB应用
以太网应用
训练中心

③

电机控制

USB应用

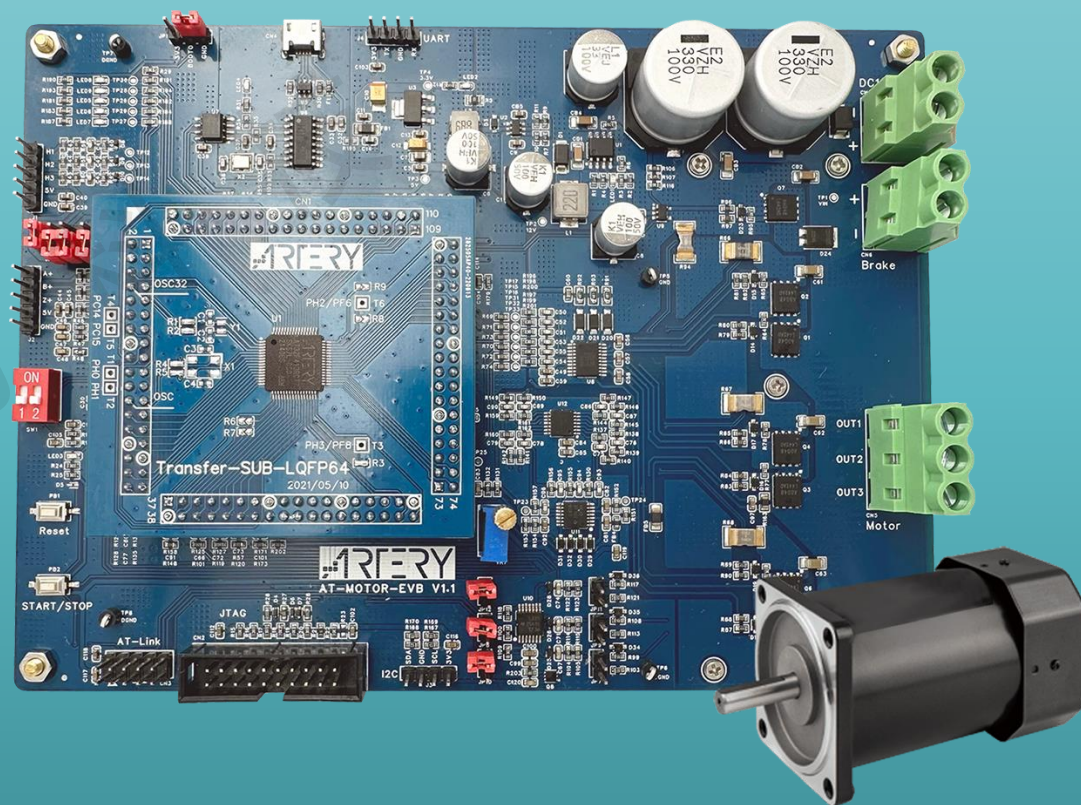
以太网应用

Quick Start Guide(快速入门指南)

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电机库调适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电机库调适不同型号带霍尔传感器的电机运转并应用在电动自行车、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电机库调适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

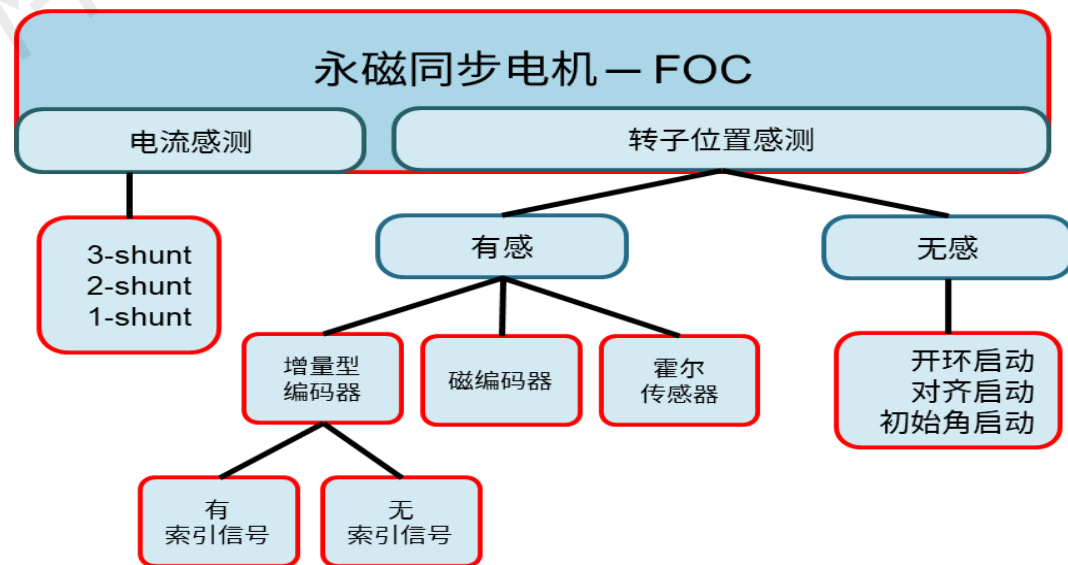
网址：https://www.arterytek.com/cn/support/motor_control.jsp?index=0

AT32 电机库 无感FOC 快速上手 操作讲解



PMSM FOC无感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无感控制专案的说明可参阅(AN0168)
- FOC无感控制快速入门指南(AN0220)



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
/* gate driver low side inverting 1
#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

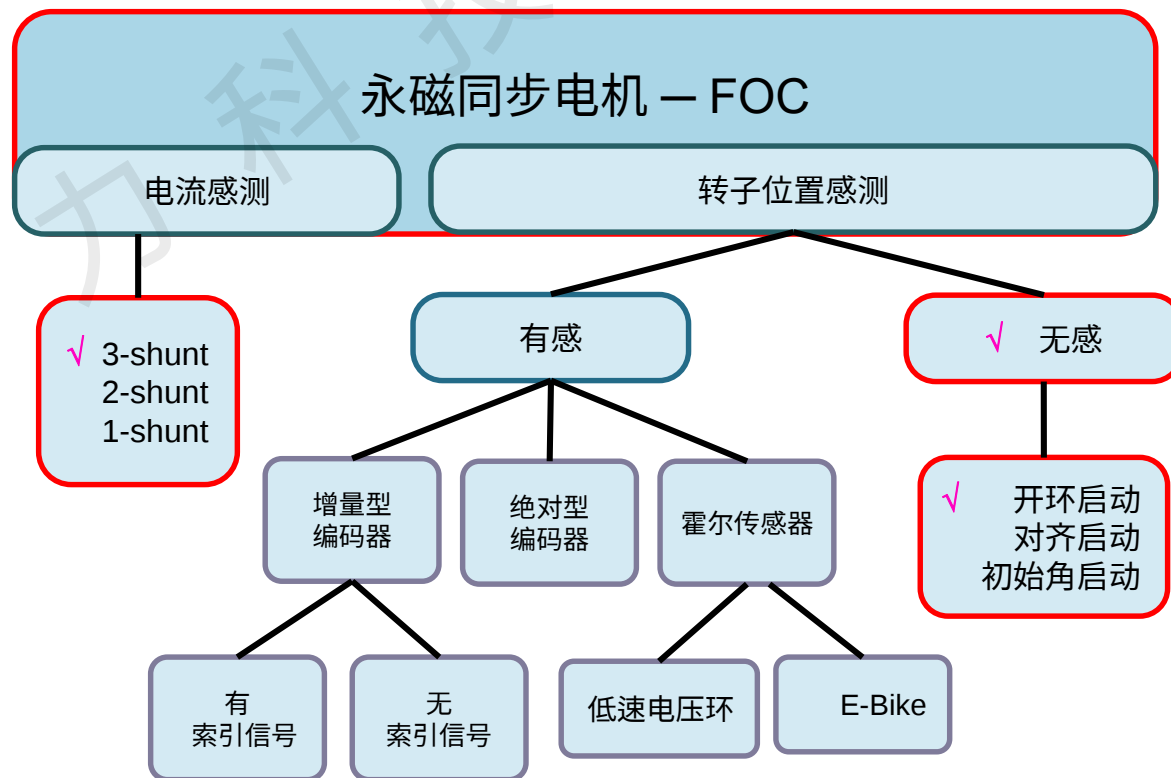
#define SENSORLESS

#ifdef THREE_SHUNT || defined
#define CURRENT_LP_FILTER 0
#elif defined ONE_SHUNT
#define CURRENT_LP_FILTER 1
#endif

#ifdef SENSORLESS
#define OPENLOOP_STARTUP
// #define ALIGN_AND_GO_STARTUP
// #define INIT_ANGLE_STARTUP
#endif

#ifdef SENSORLESS
#define VOLT_SENSE 0
#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 parameter *****/
#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)

/* hall learn table */
#define HALL_LEARN_DIR (0)
#define HALL_LEARN_0_STATE (1)
#define HALL_LEARN_1_STATE (5)
#define HALL_LEARN_2_STATE (4)
#define HALL_LEARN_3_STATE (6)
#define HALL_LEARN_4_STATE (2)
#define HALL_LEARN_5_STATE (3)
```

- 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

参数头文件 – 驱动器相关参数

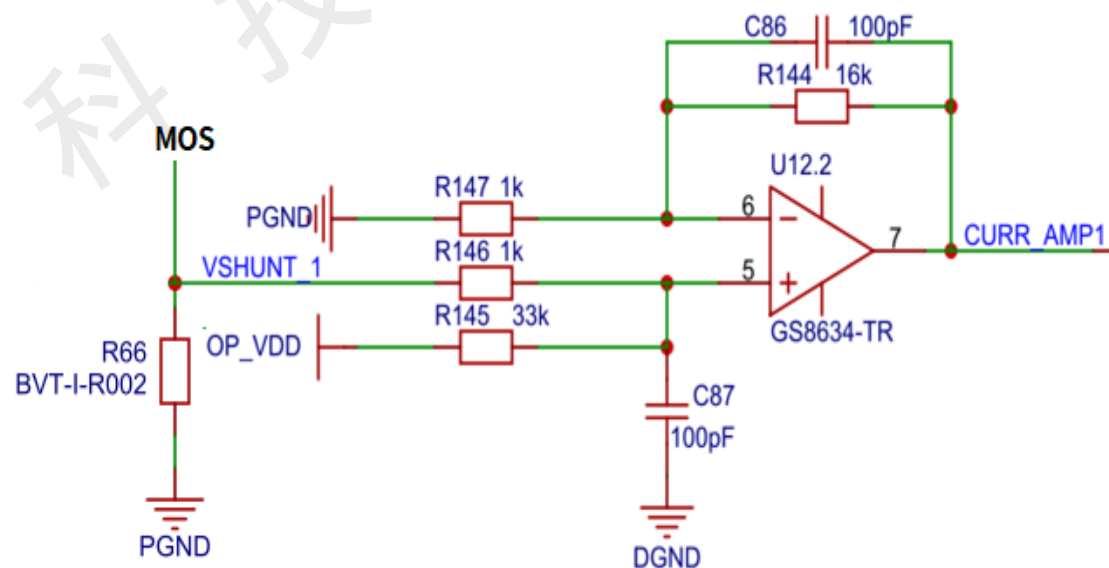
motor_control_drive_param.h

驱动器参数 (Drive-related parameter)

```
#define VDC_RATED (24.0f)
#define BAT_LOW_VOLT (12.0f) /*!< minimum allowable battery voltage*/
#define V_SENSE_GAIN (10/(3.9f+180+10)) // 0.05157
#define ADC_REFERENCE_VOLT (3.3f)
#define ADC_DIGITAL_SCALE_12BITS (4095.0f)
/* Clock */
#if defined AT32F413xx
#define SYSTEM_CORE_CLOCK (200000000)
#elif defined AT32F421xx
#define SYSTEM_CORE_CLOCK (120000000)
#endif

#define TMR_CLK (SYSTEM_CORE_CLOCK) //system_core_clock
#define DEADTIME_CLK_SFT_BITS ((tmr_clock_division_type) 2)
#define DEADTIME_NS ((uint16_t)300) /* in nsec; check the MOSFET datasheet */
#define MIN_INTERVAL_TIME (2500) /* ns; pwm shift time for one shunt */
#define ADC_TRIG_DELAY_TIME (0.0) /* us; adc trigger delay time for gain */
/* Current */
#define MAX_CURRENT (5.0f)
#define MIN_CURRENT (-MAX_CURRENT)
#define DC_MAX_CURRENT (10.0f)
#define CURRENT_SPAN_SHIFT ((uint8_t) 1)
#ifdef ONE_SHUNT
#define R_SHUNT (0.005f)
#define OP_GAIN (39.0f/(1+39)*(1+9.1/1))
#define CURR_OFFSET_VOLT (ADC_REFERENCE_VOLT*(1.0f/(1+39)*(1+9.1/1)))
#else
#define R_SHUNT (0.002f)
#define OP_GAIN (33.0f/(1+33)*(1+16/1))
#define CURR_OFFSET_VOLT (ADC_REFERENCE_VOLT*(1.0f/(1+33)*(1+16/1)))
#endif
```

● 根据驱动器电路，设定相关电气参数



3-shunt/
2-shunt参数设定

参数头文件 – 控制环相关参数

motor_control_drive_param.h

控制参数 (Control-related parameter)

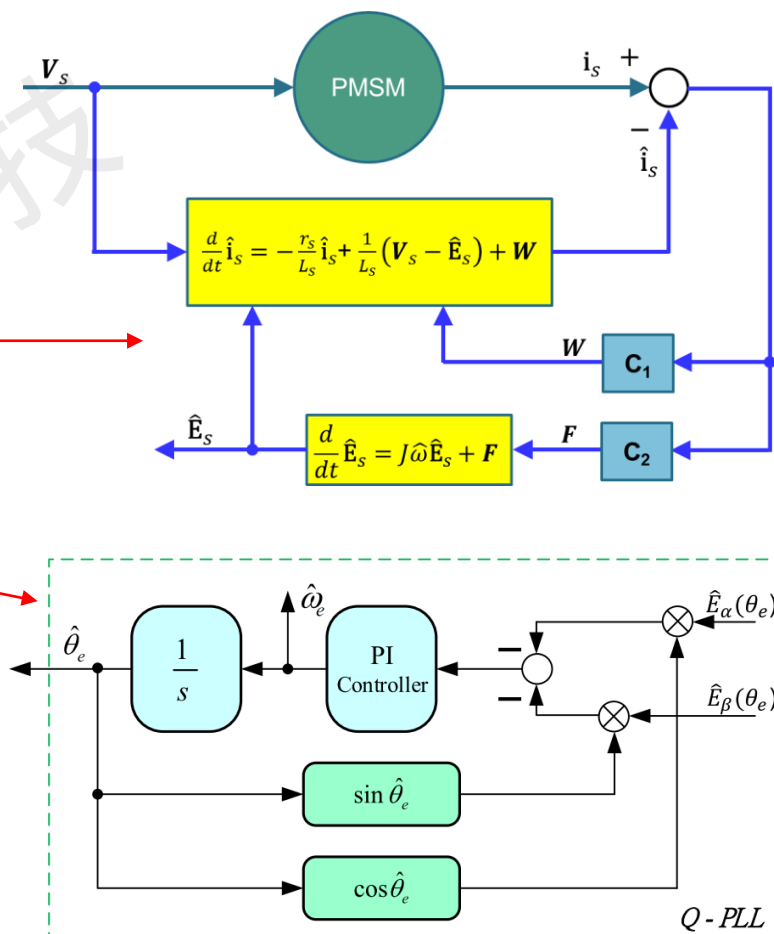
```
/* SPEED */
#define SPEED_LOOP_FREQ          (1000) /* Hz */
#define MAX_SPEED RPM            (6000)
#define MIN_CONTROL_SPEED       (200)
#define ACC_SPD_SLOPE           (5) /* (rpm/ms) */
#define DEC_SPD_SLOPE           (5)

/* State observer parameter */
#define OBS_GAIN1                (20000)
#define OBS_GAIN2                (-20000)

/* PLL gains */
#define PLL_KP_GAIN              (3000)
#define PLL_KI_GAIN              (5)
#define PLL_KP_GAIN_DIV          (32768)
#define PLL_KP_GAIN_DIV_LOG      (LOG2(PLL_KP_GAIN_DIV))
#define PLL_KI_GAIN_DIV          (32768)
#define PLL_KI_GAIN_DIV_LOG      (LOG2(PLL_KI_GAIN_DIV))

/* start-up parameter */
#define STARTUP_CURRENT          (0.5f) /* A */
/* Open loop startup */
#define STARTUP_MAX_SPD          (400) /* rpm */
#define STARTUP_OL_SLOPE         (800) /* rpm/s */
/* Fixed alpha-axis startup */
#define STARTUP_ALIGN_TIME       (1000) /* ms */
#define STARTUP_START_TIME       (10) /* ms */
/* Angle init parameter */
#define DETECT_PULSE_WIDTH       (20.0f) /* us; range [1...10000] */

/* Detect the startup error parameter */
#define DETECT_DELAY_TIME        (500) /* msec; A startup error is
#define DETECT_REVERSE_SPEED     (10) /* rpm; A startup error is t
#define DETECT_MAX_SPEED         (MAX_SPEED RPM*1.5) /* rpm; A startup
```



外设定义头文件 – 外设参数定义

外设定义参数 (mc_hwio.h)

控制器MCU pin map

```
/* 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
```

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

I/O mapping

Board param.

Motor param.

Control param.

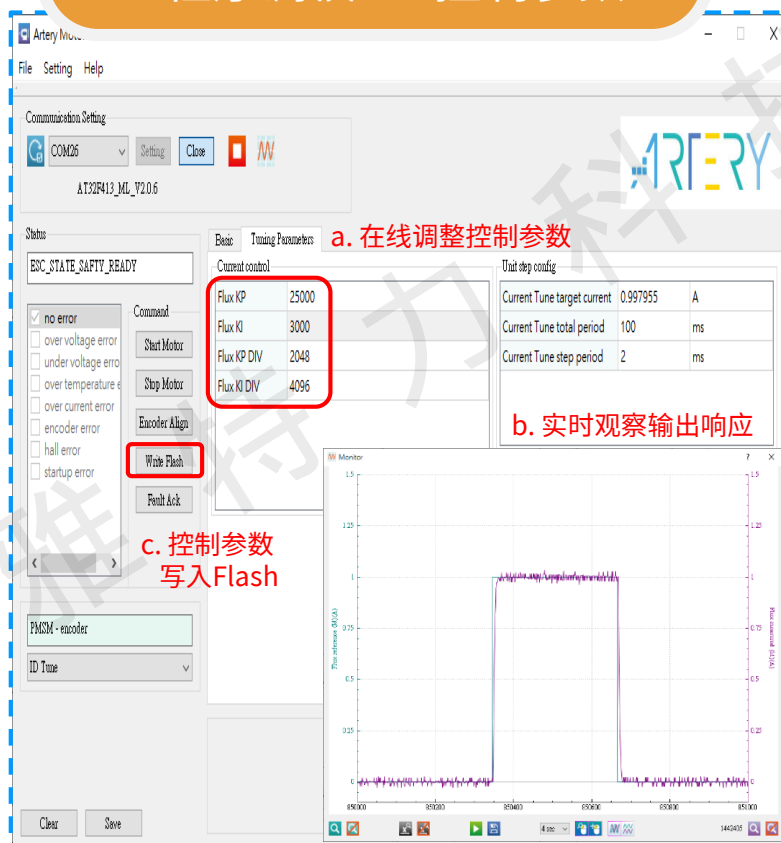
Drive mode

- FOC_CONTROL
- ONE_SHUNT
- SENSORLESS

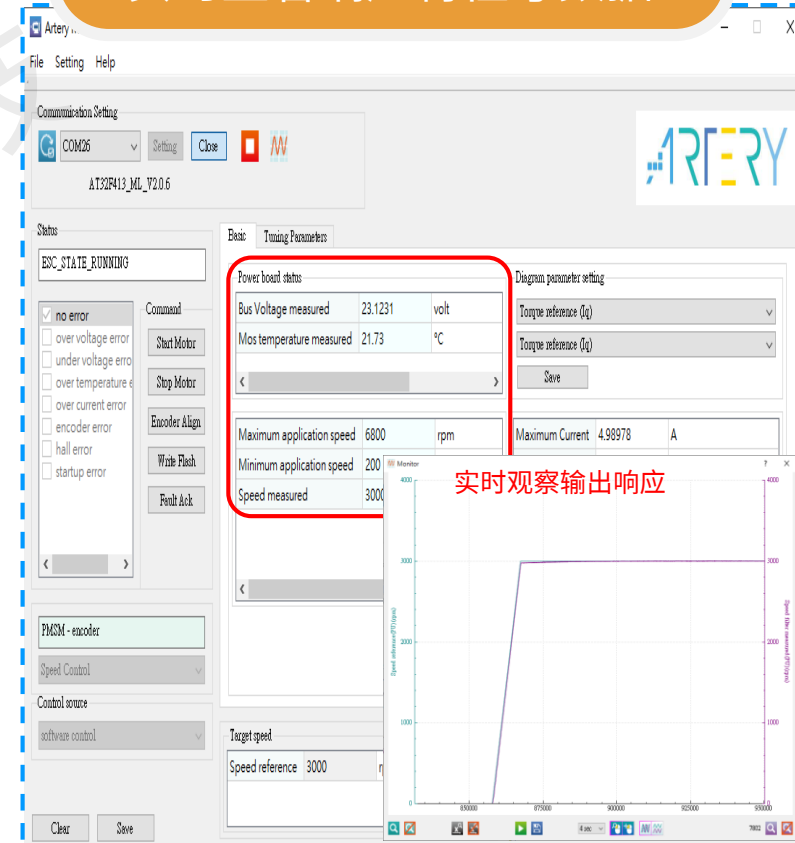
电机控制程序

Motor control project

UI程序调校PID控制参数

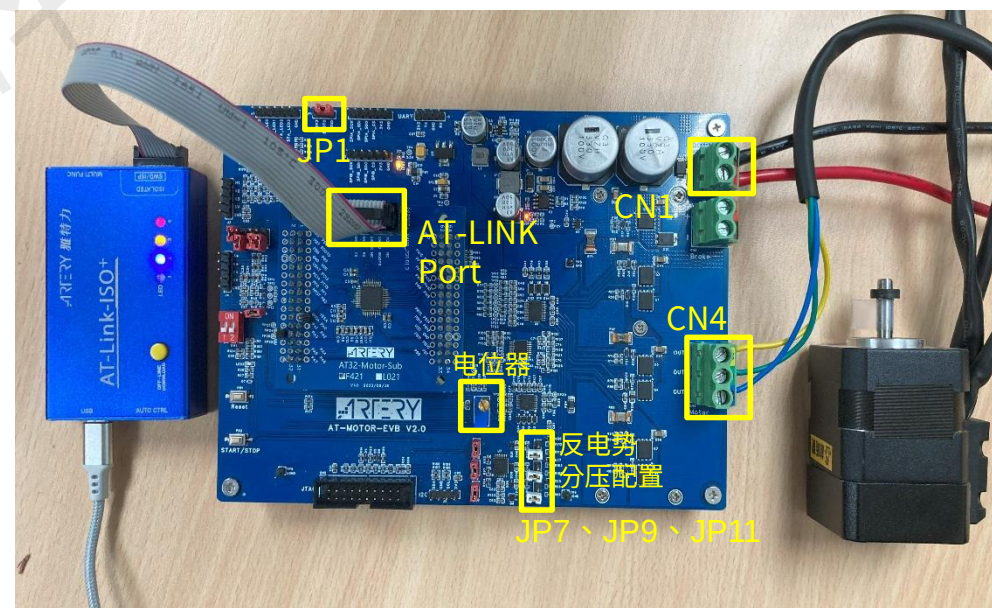


实时监控看响应特性与数据



控制器接线

- 检查JP1 Boot0是否接地
- 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 - 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
- 在开环环境中调试粗略的估测器参数

控制型式 (read)

The screenshot displays the Artery Motor Monitor V2.1.18 software interface. The main window is divided into several sections:

- Top Bar:** Includes a menu bar (文件, 设置, 帮助), a COM port selection dropdown (COM7: ATLink-USART), a close button (关闭), a waveform icon (绘图), and the Artery logo.
- Left Panel:**
 - 状态 (Status):** Shows the current state as ESC_STATE_SAFETY_READY. Below it, a list of error states with checkboxes: no error (checked), over voltage error, under voltage error, over temperature error, over current error, encoder error, hall error, parameter identify error, hall learn error, and startup error.
 - 命令 (Commands):** Includes buttons for 启动电机 (Start Motor), 停止电机 (Stop Motor), 编码器对齐 (Encoder Alignment), 错误解除 (Error Clear), 写闪存 (Write Flash), and 保存 (Save).
 - 控制型式 (Control Mode):** A dropdown menu currently set to SPMSM - sensorless (Open Loop).
- Right Panel:**
 - 基本 (Basic):** Contains the Open loop control section with fields for Open Loop Voltage (0.000 V) and Open Loop Angle Increments (0).
 - 参数调整 (Parameter Adjustment):** Contains the Start up section with fields for Startup Start Current (0.499 A), Startup Max. Speed (400 rpm), and Startup Open Loop Slope (800 rpm/s).
 - 自整定功能 (Self-tuning Function):** Contains the Sensor-less observer+PLL section with fields for Observer C1 (20000), Observer C2 (-20000), PLL KP (3000), PLL KI (5), PLL KP DIV (32768), and PLL KI DIV (32768).
- Bottom Panel:**
 - 运行日志 (Run Log):** A table showing log entries with timestamps and descriptions.
 - 传输状态记录 (Transmission Status Record):** A section for recording transmission status.

监控界面软件运行操作 - 自整定功能

Artery Motor Monitor V2.1.18

文件 设置 帮助

COM7 : ATLink-USART

关闭

绘图

+

-

ARTERY

程序状态

ESC_STATE_SAFETY_READY

☒ no error

☐ over voltage error

☐ under voltage error

☐ over temperature error

☐ over current error

☐ encoder error

☐ hall error

☐ parameter identify error

☐ hall learn error

☐ startup error

错误状态

启动/停止电机

启动电机

停止电机

编码器对齐

错误解除

错误状态解除

写入闪存

写入闪存

控制型式 (read)

SPMSM - sensorless (Open Loop)

Open Loop control

控制模式

基本 参数调整 自整定功能

线圈参数识别

Winding parameter Identification

Identified process state	尚未运行	
RS_LL	1.89	Ω
LS_LL	0.002387	H

电机线圈参数辨识

电流环PI参数自整定

Auto-tune PI parameter of Current controller

Torque KP	7500	
Torque KI	6000	
Torque KP DIV	512	
Torque KI DIV	8192	

电流PI参数自整定

运行日志

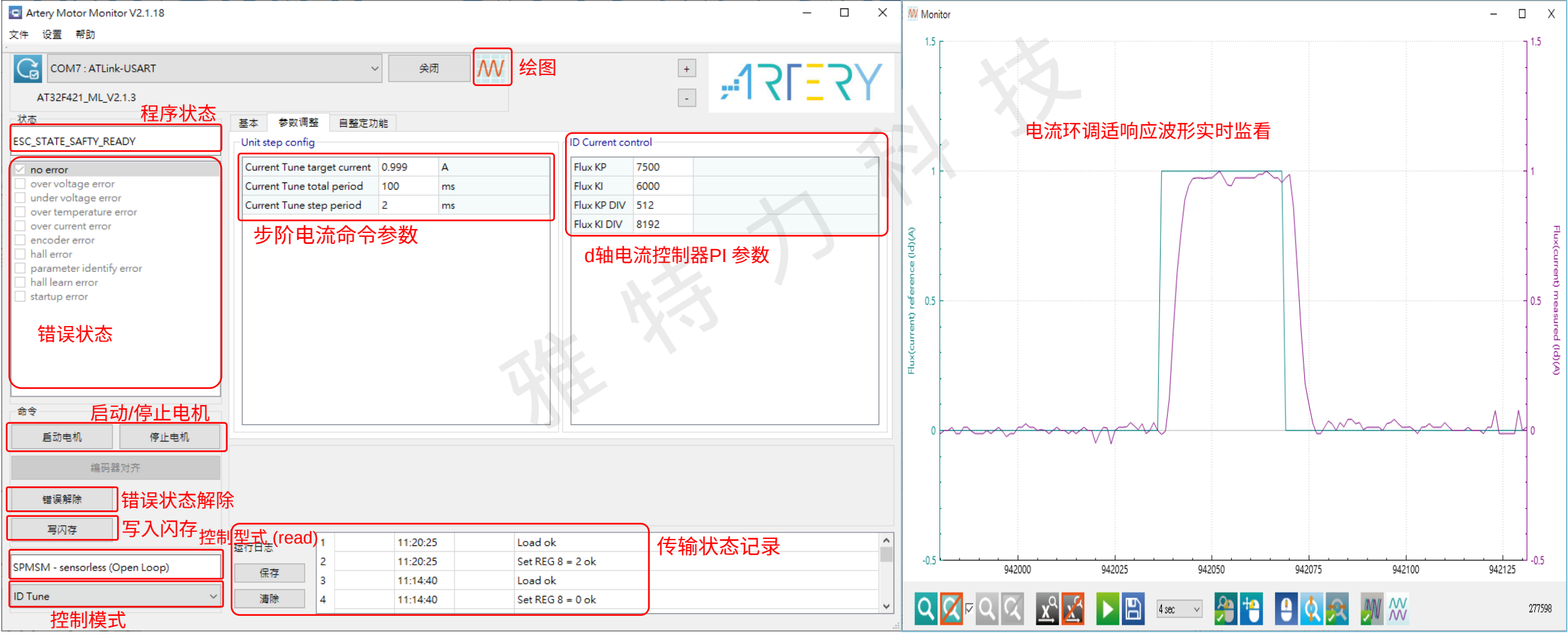
保存

清除

1		11:14:40		Load ok
2		11:14:40		Set REG 8 = 0 ok
3		10:32:20		Exec Stop Motor...ok
4		10:31:45		Load ok

传输状态记录

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

Artery Motor Monitor V2.1.18

文件 设置 帮助

COM7 : ATLink-USART

关闭

绘图

AT32F421_ML_V2.1.3

状态

程序状态

ESC_STATE_SAFETY_READY

☒ no error

☐ over voltage error

☐ under voltage error

☐ over temperature error

☐ over current error

☐ encoder error

☐ hall error

☐ parameter identify error

☐ hall learn error

☐ startup error

错误状态

命令

启动/停止电机

启动电机

停止电机

编码器对齐

错误解除

错误状态解除

写闪存

写入闪存

控制型式 (read)

SPMSM - sensorless (Open Loop)

Torque Control

控制模式

控制源

software control

控制来源

基本 参数调整 自整定功能

Start up

Startup Start Current	0.499	A
Startup Max. Speed	400	rpm
Startup Open Loop Slope	800	rpm/s

开环IF参数设定

Sensor-less observer+PLL

Observer C1	20000
Observer C2	-20000
PLL KP	3000
PLL KI	5
PLL KP DIV	32768
PLL KI DIV	32768

无感估测器参数设定

Torque control

Torque(current) reference (Iq)	0.000	A
Flux(current) reference (Id)	0.000	A

d-q轴电流命令

运行日志

1		11:21:39	Load ok
2		11:21:39	Set REG 8 = 4 ok
3		11:20:25	Load ok
4		11:20:25	Set REG 8 = 2 ok

传输状态记录

IQ Current control

Torque KP	7500
Torque KI	6000
Torque KP DIV	512
Torque KI DIV	8192

q轴电流PI控制参数设定

ID Current control

Flux KP	7500
Flux KI	6000
Flux KP DIV	512
Flux KI DIV	8192

d轴电流PI控制参数设定

监控界面软件运行操作 – 速度控制

Artery Motor Monitor V2.1.18

文件 设置 帮助

COM7 : ATLink-USART

关闭

绘图

AT32F421_ML_V2.1.3

状态

程序状态

ESC_STATE_SAFETY_READY

☒ no error

☐ over voltage error

☐ under voltage error

☐ over temperature error

☐ over current error

☐ encoder error

☐ hall error

☐ parameter identify error

☐ hall learn error

☐ startup error

错误状态

命令

启动/停止电机

启动电机

停止电机

编码器对齐

错误解除

错误状态解除

写闪存

写入闪存

控制型式 (read)

SPMSM - sensorless (Open Loop)

Speed Control

控制模式

控制源

software control

控制来源

基本 参数调整 自整定功能

Start up

Startup Start Current	0.499	A
Startup Max. Speed	400	rpm
Startup Open Loop Slope	800	rpm/s

开环IF参数设定

Sensor-less observer+PLL

Observer C1	20000
Observer C2	-20000
PLL KP	3000
PLL KI	5
PLL KP DIV	32768
PLL KI DIV	32768

无感估测器参数设定

速度PI控制参数设定

Speed control(With current control loop)

Speed KP	2000	
Speed KI	50	
Speed KP DIV	4096	
Speed KI DIV	32768	
Speed acceleration	5	rpm/ms
Speed deceleration	5	rpm/ms

弱磁控制参数设定

Flux weakening tuning

Max. Flux weakening Current	0.499	A
Flux weakening KP	10	
Flux weakening KI	2000	
Flux weakening KP DIV	2048	
Flux weakening KI DIV	32768	

Target speed

d-q轴电流命令

Speed reference	0	rpm
-----------------	---	-----

运行日志

保存

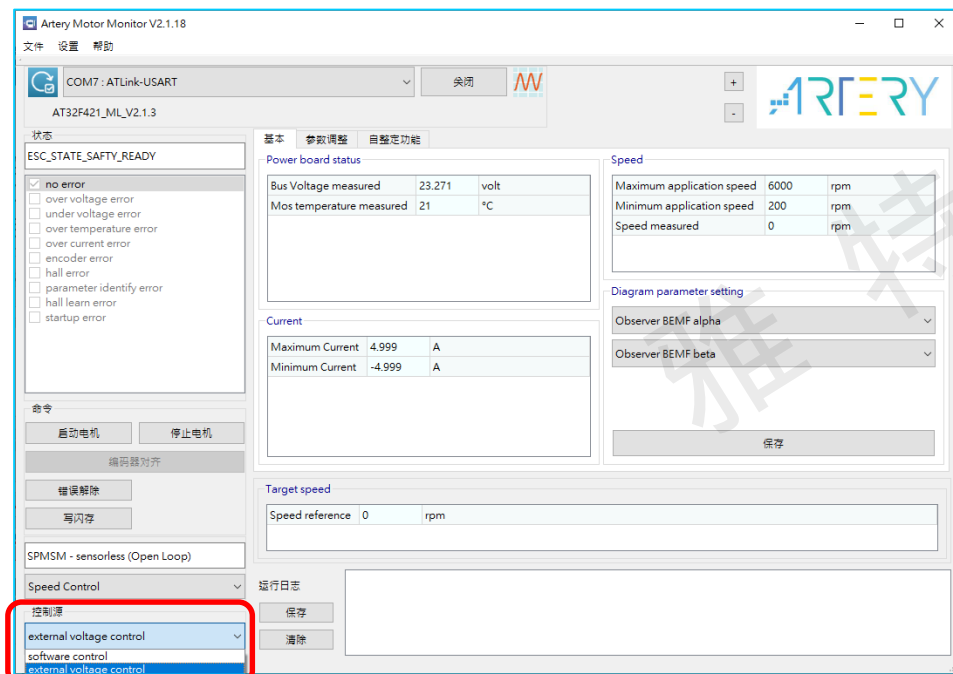
清除

1		11:28:48	Load ok
2		11:28:48	Set REG 8 = 5 ok
3		11:21:39	Load ok
4		11:21:39	Set REG 8 = 4 ok

传输状态记录

外部命令控制

- 在控制源选择外部电压控制，或在motor_control_drive_param.h头文件中定义'CTRL_SOURCE'为'CTRL_SOURCE_EXTERNAL'
- 设定后按'启动电机'按钮，最低转速200 rpm



外部控制源



提问时间

10分钟

Q & A

ARTERY 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!

