

AT32 PMSM FOC Hall Demo(E-Bike-Scooter)

前言

这篇应用笔记描述了怎么使用 AT32 MCU 搭配 AT-MOTOR-EVB 电机开发板(文档以 AT32F413RCT7 为例)，使用霍尔传感器矢量控制算法搭配 Shunt 电阻检测电路驱动三相永磁同步电动机（直流无刷电动机）应用于电动机车、电动脚踏车、电动滑板车等两轮控制模式并提供母线电流限制与 MOS 内阻自动校准等功能。这篇文档也描述了如何操作以及透过上位机 ArteryMotorMonitor.exe 实现电机控制与参数调试。

支持型号列表：

支持型号	AT32F413 系列
	AT32F415 系列
	AT32F403A 系列
	AT32F421 系列
	AT32F423 系列

目录

1	电机库算法概述.....	5
2	环境准备	6
	2.1 硬件环境准备.....	6
	2.2 软件环境准备.....	8
3	PMSM 电机库文档说明	10
4	电机控制状态机.....	19
	4.1 状态机描述	19
5	工程使用说明	23
	5.1 建立连接.....	23
	5.2 开环控制.....	23
	5.3 电压控制.....	24
	5.4 D 轴电流调试.....	24
	5.5 Q 轴电流调试.....	26
	5.6 电流环控制	27
	5.7 速度环控制	28
	5.8 位置环控制	28
	5.9 电机更换调试流程.....	28
6	文档版本历史	31

表目录

表 1. 电机参数表.....	6
表 2. 对应闪存存储空间之 ROM 配置表.....	8
表 3. 电机库文档总表	11
表 4. 模式宏定义.....	12
表 5. 控制参数宏定义	13
表 6. 驱动器参数宏定义.....	14
表 7. 电机参数宏定义	15
表 8. 相关外设配置(以 AT32F413RCT7 为例).....	16
表 9. 外设配置相关函数.....	17
表 10. 电机控制相关中断函数(以 AT32F413RCT7 为例).....	17
表 11. 各状态起始状态及切换条件(非转矩模式).....	20
表 12. 各状态起始状态及切换条件(转矩模式).....	21
表 13. 文档版本历史	31

图目录

图 1. 电机 JK42BLS01-X056ED.....	6
图 2. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB V1.x.....	7
图 3. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB V2.x.....	8
图 4. AT32F413RCT7 之 ROM 配置(AT32IDE).....	9
图 5. 电机库文档结构说明图	10
图 6. 电机控制工程结构.....	10
图 7. PMSM 反电势、霍尔状态与电气角的关系图(HALL_LEARN_DIR=0)	16
图 8. 状态机流程图(非转矩模式)	19
图 9. 状态机流程图(转矩模式).....	21
图 10. 连接操作说明	23
图 11. 控制模式选取开环控制.....	23
图 12. 开环控制相关参数.....	24
图 13. 控制模式选取开环控制	24
图 14. 电压控制相关参数.....	24
图 15. 步阶电流示意图	24
图 16. 控制模式选取 ID 电流环调试	25
图 17. PID 参数以及步阶电流参数	25
图 18. 调整通道监控参数(ID 电流环调试).....	25
图 19. 电流环调试波型	26
图 20. Q 轴电流 PID 参数以及步阶电流参数.....	26
图 21. 调整通道监控参数(IQ 电流环调试)	27
图 22. 目标电流值设置	27
图 23. 调整通道监控参数(电流环调试).....	27
图 24. 电流环控制波型	28
图 25. 电机线圈参数自动辨识	29
图 26. 电机线圈参数自动辨识	30
图 27. 电流 PI 控制参数自整定	30

1 电机库算法概述

这篇应用笔记使用电机库相关算法主要内容如下

目标电机：三相永磁同步电动机（直流无刷电动机）

控制模式：

- FOC 矢量控制

三相 PWM 调制模式：

- SVPWM

相电流检测模式：

- 三电阻电流检测
- 双电阻电流检测
- 单电阻电流检测和重构方式

转子位置检测模式：

- 霍尔效应位置传感器

有传感器 FOC 弦波控制模式：

- 电压矢量控制
- 转矩控制（电流矢量控制）
- 转速控制
- 弱磁控制

自动调试功能：

- 霍尔状态自学习(霍尔传感器专用)
- 电机线圈参数自动辨识
- 电流 PI 控制参数自整定

E-Bike-Scooter 控制模式：

- 母线电流限制
- MOS 内阻自动校准

2 环境准备

2.1 硬件环境准备

需要准备硬件项目主要包括 PMSM(BLDC)电机、AT-Link 或第三方调试下载器以及一块电机开发控制板 AT-MOTOR-EVB，相关硬件配置可参考 UM0011 低压电机控制开发板使用手册。

- PMSM(BLDC)电机：JK42BLS01-X056ED

图 1. 电机 JK42BLS01-X056ED



表 1. 电机参数表

型号	JK42BLS01-X056ED
极数	8
额定电压	DC 24V
额定转速	4000 RPM
额定转矩	0.0716 N.m.
空载电流	0.3 Amps
输出功率	30 W
线间电阻	1.8Ω
空载速度	6800 RPM
反电动势常数	4.36 V/Krpm
转矩常数	0.042 N.m/A
编码器分辨率	1000 P/R
绝缘等级	Class B
绕组连接方式	三角形

- 调试下载器
- 电机控制开发板：AT-MOTOR-EVB V1.x 或 V2.x 版 (选择以下任一转板 AT32F413RCT7、AT32F421C8T7、AT32F403ARCT7、AT32F415RCT7、AT32F423RCT7)

图 2. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB V1.x

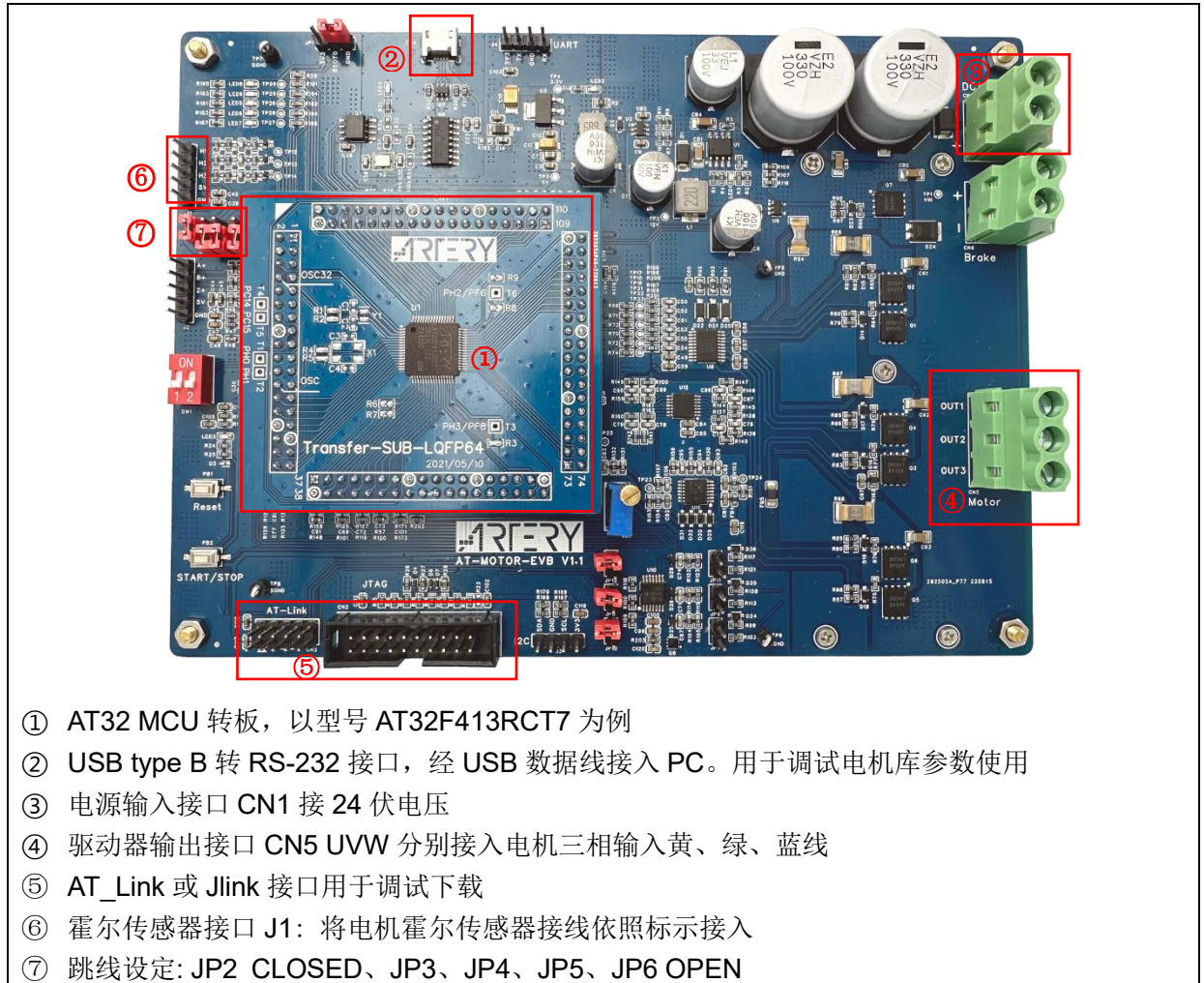
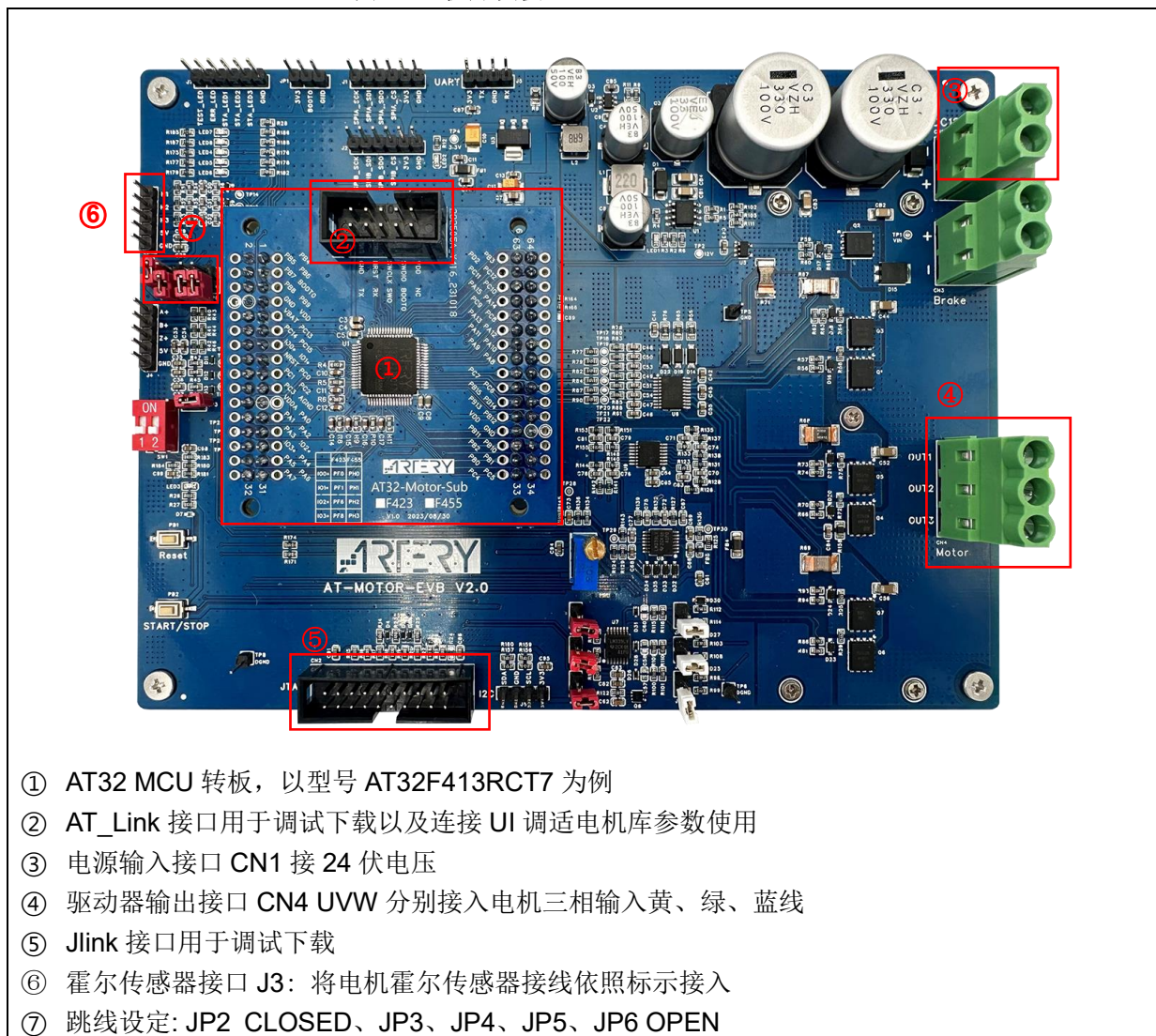


图 3. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB V2.x



2.2 软件环境准备

- 1) 以 AT32F413 为例，开启下列路径范例工程 AT32F413_MC_Library_Project\motor_evb_2v0\at32f413\pmsm_foc_hall_sensor_E-Bike-Scooter(注[1])
- 2) 电机应用 PC 软件 ArteryMotorMonitor.exe（本软件不需安装，只需直接运行可执行程序）。
- 3) AT32IDE 的配置需根据各个 AT32 MCU 的闪存存储大小修改 Id 文件，详细参照表 2，例：AT32F413RCT7 的闪存存储大小为 256 K 字节，则其 IROM1 的起始位置为 0x8000000，大小为 0x3F800，其 IROM2 的起始位置为 0x803F800，大小为 0x320，IROM3 的起始位置为 0x803FB20，大小为 0x4E0，AT32F413RCT7 的修改范例如图 4 所示。

表 2. 对应闪存存储空间之 ROM 配置表

Flash size	1024K	512K	256K
IROM1(address)	0x8000000	0x8000000	0x8000000
IROM1(size)	0xFF800	0x7F800	0x3F800
IROM2(address)	0x80FF800	0x807F800	0x803F800
IROM2(size)	0x320	0x320	0x320

IROM3(adress)	0x80FFB20	0x807FB20	0x803FB20
IROM3(size)	0x4E0	0x4E0	0x4E0

Flash size	128K	64K	32K	16K
IROM1(adress)	0x8000000	0x8000000	0x8000000	0x8000000
IROM1(size)	0x1FC00	0x0FC00	0x07C00	0x03C00
IROM2(adress)	0x801FC00	0x800FC00	0x8007C00	0x8003C00
IROM2(size)	0x320	0x320	0x320	0x320
IROM3(adress)	0x801FF20	0x800FF20	0x8007F20	0x8003F20
IROM3(size)	0xE0	0xE0	0xE0	0xE0

注[1]: 此范例工程不支持同时设置 keil complier version 5 以及 O0 优化等级进行编译, 请使用 keil complier version 6 或优化等级 O1 进行编译。若使用 keil v5.33 版本, 因 AT32 BSP 源码不支持 V6.15 编译器, 请使用 keil complier version 5 版本以及 O1 优化等级进行编译。

图 4. AT32F413RCT7 之 ROM 配置(AT32IDE)

```

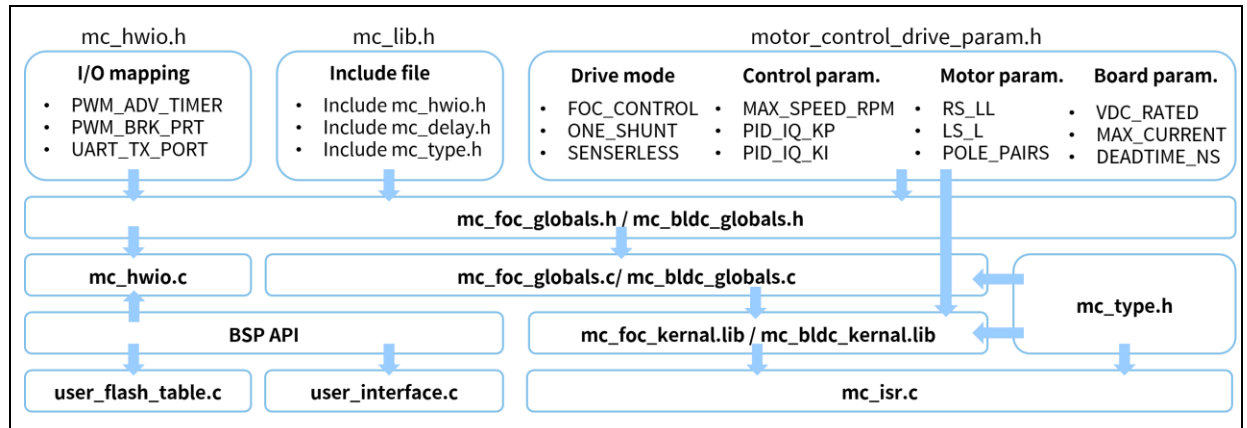
AT32F413xC_FLASH.ld ×
31 /* Specify the memory areas */
32 MEMORY
33 {
34 FLASH (rx) : ORIGIN = 0x08000000, LENGTH = 0x3F800
35 MC_DATA1 (r) : ORIGIN = 0x0803F800, LENGTH = 0x320
36 MC_DATA2 (r) : ORIGIN = 0x0803FB20, LENGTH = 0x4E0
37 RAM (xrw) : ORIGIN = 0x20000000, LENGTH = 32K
38 }
39
40 /* Define output sections */
41 SECTIONS
42 {
43 /* The startup code goes first into FLASH */
44 .isr_vector :
45 {
46 . = ALIGN(4);
47 KEEP(*(.isr_vector)) /* Startup code */
48 . = ALIGN(4);
49 } >FLASH
50
51 .mc_data1 :
52 {
53 . = ALIGN(4);
54 . = ORIGIN(MC_DATA1);
55 _MC_VectStoreAddr1 = .;
56 *(.MC_VectStoreAddr1);
57 . = ALIGN(4);
58 } >MC_DATA1
59
60 .mc_data2 :
61 {
62 . = ALIGN(4);
63 . = ORIGIN(MC_DATA2);
64 _MC_VectStoreAddr2 = .;
65 *(.MC_VectStoreAddr2);
66 . = ALIGN(4);
67 } >MC_DATA2
68
69 /* The program code and other data goes into FLASH */
70 .text :
71 {
72 . = ALIGN(4);
73 *(.text) /* .text sections (code) */
74 *(.text*) /* .text* sections (code) */
75 *(.glue_7) /* glue arm to thumb code */
76 *(.glue_7t) /* glue thumb to arm code */
77 *(.eh_frame)
78 }

```

3 PMSM 电机库文档说明

图 5 为电机库文档结构说明图，说明电机库文档中各文件之间的关系，其中 `motor_control_drive_param.h` 头文件提供用户自行输入电机控制型式、电机参数、控制板参数、控制器参数等，以及 `mc_hwio.h` 头文件可根据 MCU 外设与控制板连结的接脚对应关系，设定 MCU 外设规划参数。相关的设定参数于 `mc_foc_globals.h` (`mc_bldc_globals.h`) 整合后，于 `mc_foc_globals.c` (`mc_bldc_globals.c`) 中的函数设定变量初值，提供电机库函数使用。而在 MCU 外设规划部分，则由 `mc_hwio.c` 文件执行相关外设初值化设定。

图 5. 电机库文档结构说明图



范例工程的文档工程结构如图 6 所示。`user` 文件夹为自撰程序包含主程序、外设规划程序、参数存入 `flash` 程序以及参数定义头文件。`firmware` 文件夹为 BSP 程序文件,电机库程序放置在 `mclib` 文件夹,包含延时函数、通讯函数、全局变量设定与电机库函数等。详细电机库函数说明可参考 AN0064 电机库使用指南。

图 6. 电机控制工程结构

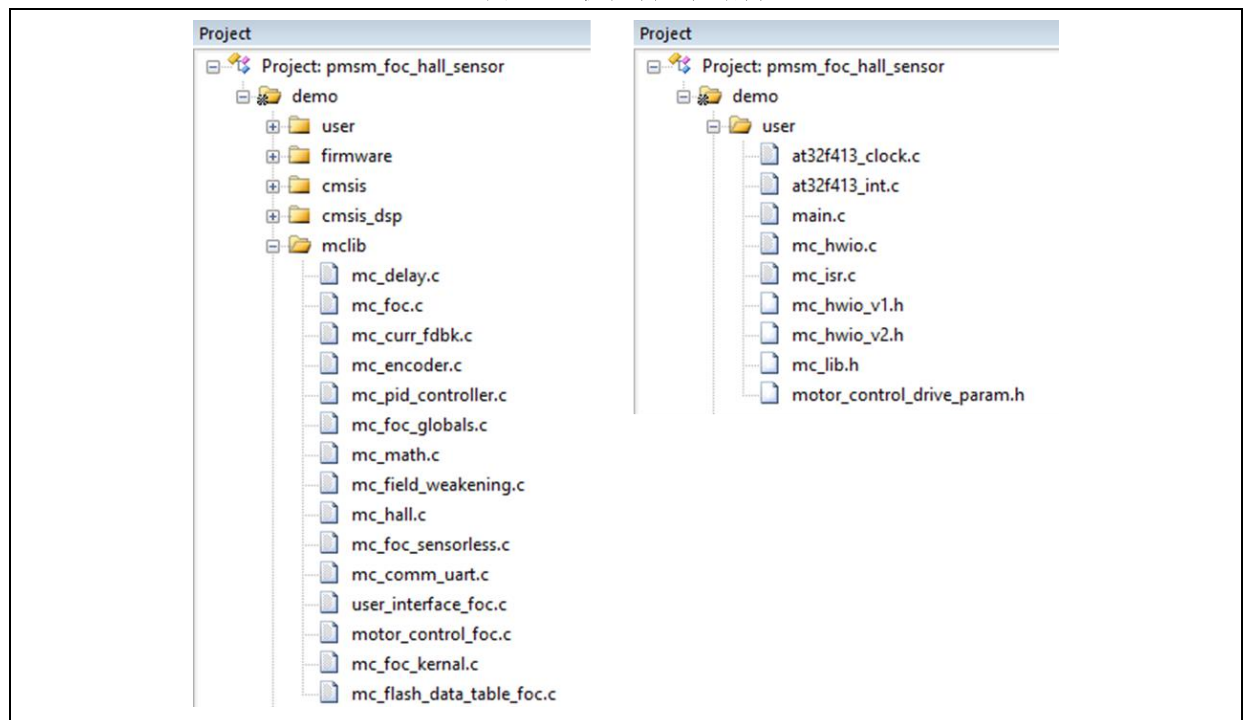


表 3 即为电机库文档说明总表，以下对于不同文档分别进行说明。

表 3. 电机库文档总表

文档名称	描述
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 (电流采样模式、传感器模式…)、控制相关参数、驱动器相关参数、电机相关参数
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_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
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	时间延迟相关函数声明
mc_comm_uart.c	通讯界面相关外设配置
mc_comm_uart.h	通讯 uart 相关函数声明、配置
mc_pid_control.c	PID 控制器相关函数
mc_pid_control.h	PID 控制器相关函数声明
mc_curr_fdbk.c	电流检测相关函数
mc_curr_fdbk.h	电流检测相关函数声明
mc_math.c	滤波器相关函数
mc_math.h	滤波器相关函数声明
mc_hall.c	霍尔传感器相关函数
mc_hall.h	霍尔传感器相关函数声明
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	电机库核心函数声明
motor_control_foc.c	电机控制相关函数
motor_control_foc.h	电机控制相关函数声明
mc_foc.c	矢量控制相关函数
mc_foc.h	矢量控制相关函数声明
mc_encoder.c	编码器相关函数
mc_encoder.h	编码器相关函数声明
mc_field_weakening.c	弱磁相关函数

mc_field_weakening.h	弱磁相关函数声明
mc_foc_sensorless.c	无传感器相关函数
mc_foc_sensorless.h	无传感器相关函数声明
mc_foc_globals.c	全局变量定义与默认值、全局函数声明
mc_foc_globals.h	全局变量、全局函数声明、宏定义
user_interface_foc.c	通讯界面相关函数
user_interface_foc.h	通讯界面相关函数声明

1) motor_control_drive_param.h 文档

- 此文档主要分成四个部份，提供用户自行输入电机控制型式、电机参数、控制板参数、控制器参数等分别说明如下：
- 表 4 为模式宏定义，基于用户的硬件与电机配置，可定义适当的模式。此范例的位置传感器为霍尔位置传感器，电流采样需根据硬件设置来进行配置，三电阻、双电阻与单电阻择一定义。弱磁控制则视需求选择使用与否。

表 4. 模式宏定义

宏定义名称	描述
FOC_CONTROL	矢量控制模式
THREE_SHUNT	三电阻电流采样
TWO_SHUNT	双电阻电流采样
ONE_SHUNT	单电阻电流采样
U_V_SHUNT	电路使用 U 以及 V shunt 电阻(TWO_SHUNT 专用)
V_W_SHUNT	电路使用 V 以及 W shunt 电阻(TWO_SHUNT 专用)
U_W_SHUNT	电路使用 U 以及 W shunt 电阻(TWO_SHUNT 专用)
AT_MOTOR_EVB_V1	适用于电机板 V1.x 版本
AT_MOTOR_EVB_V2	适用于电机板 V2.x 版本
GATE_DRIVER_LOW_SIDE_INVERT	开启下臂 MOS 反向输出
HALL_SENSORS	霍尔传感器
FIELD_WEAKENING	弱磁控制
CURRENT_LP_FILTER	获得 d/q 轴电流低通滤波的信号(矢量控制)
INTERNAL_CLOCK_SOURCE	使用 MCU 内部晶振
MOTOR_PARAM_IDENTIFY	电机线圈参数自动辨识
E_BIKE_SCOOTER	电动机车/脚踏车/滑板车专用模式
DC_CURRENT_LIMIT	母线电流限制(E_BIKE_SCOOTER 专用) (注[2])
RDS_AUTO_CALIBRATION	MOS 内阻自动校正(E_BIKE_SCOOTER 专用) (注[2])

注[2]: 使用 AT-MOTOR-EVB 电机开发板，定义 DC_CURRENT_LIMIT 或 RDS_AUTO_CALIBRATION 功能时无法使用 one-shunt 电流采样且需将以下元件替换，AT-MOTOR-EVB V1.x : R148=10k Ω 、C91=0.1 μ F；AT-MOTOR-EVB V2.x : R154=10k Ω 、C80=0.1 μ F。此外，若定义 RDS_AUTO_CALIBRATION 功能必需将电流采样电路修改三相 MOS 内阻电流采样。

- 相关电机的控制参数定义如表 5 说明。根据不同的硬件、电机需求与控制特性，可定义相对应的参数。亦可进行调试，如：电流 d、q 轴 PI 控制器、速度 PI 控制器等，在此仅列出此工程范例相关参数定义。

表 5. 控制参数宏定义

宏定义名称	描述
PWM_FREQ	PWM 输出频率 (unit: Hz)
MOTOR_CONTROL_MODE	电机控制模式(转速控制、转矩控制等……详见 type.h 里的 motor_control_mode)
CTRL_SOURCE	命令来源设置(外部来源控制/软件控制)
UI_UART_BAUDRATE	电机应用工具串口波特率。
TUNE_TARGET_CURRENT	调控 PI 参数时的目标电流大小(unit: ampere)
TUNE_CURRENT_TOTAL_PERIOD	调控 PI 参数时的总周期(unit: ms)
TUNE_CURRENT_STEP_PERIOD	调控 PI 参数时步阶周期(unit: ms)
SPEED_LOOP_FREQ	转速环控制频率 (unit: Hz)
MAX_SPEED_RPM	电机最高速度 (unit: rpm)
MIN_CONTROL_SPEED	电机转速控制环可控的最低速度(unit: rpm)
STABLE_SPEED_RPM	电机稳定速度 (unit: rpm) (霍尔传感器专用)
SLICK_SPEED_RPM	电机顺滑速度 (unit: rpm) (霍尔传感器专用)
ACC_SPD_SLOPE	加速度斜率 (unit: rpm/ms, 当 systick 频率=1kHz)
DEC_SPD_SLOPE	减速度斜率 (unit: rpm/ms, 当 systick 频率=1kHz)
SP_MAX_VOLT	外部命令来源的最大电压(unit: voltage)
SP_THRESHOLD	外部命令来源的最小有效电压(unit: voltage)
SP_RUN_VALUE	外部命令来源模式，开始驱动的最低电压值(unit: voltage)
SP_STOP_VALUE	外部命令来源模式，停止驱动的最大电压值(unit: voltage)
PID_SPD_KP_DIV	转子速度比例增益除数 (Q16 mode)
PID_SPD_KI_DIV	转子速度积分增益除数 (Q16 mode)
PID_SPD_KP_DEFAULT	转子速度比例增益 (Q15 mode)
PID_SPD_KI_DEFAULT	转子速度积分增益 (Q15 mode)
PID_ID_KP_DEFAULT	d 轴电流比例增益 (Q15 mode)
PID_ID_KI_DEFAULT	d 轴电流积分增益 (Q15 mode)
PID_ID_KP_GAIN_DIV	d 轴电流比例增益除数 (Q16 mode)
PID_ID_KI_GAIN_DIV	d 轴电流积分增益除数 (Q16 mode)
PID_IQ_KP_DEFAULT	q 轴电流比例增益 (Q15 mode)
PID_IQ_KI_DEFAULT	q 轴电流积分增益 (Q15 mode)
PID_IQ_KP_GAIN_DIV	q 轴电流比例增益除数 (Q16 mode)
PID_IQ_KI_GAIN_DIV	q 轴电流积分增益除数 (Q16 mode)

宏定义名称	描述
CURRENT_BANDWIDTH	电流 PI 控制器带宽(电流 PI 参数自整定专用)
CURR_LP_BANDWIDTH	电流低通滤波器带宽(unit: Hz)
OLC_ANGLE_INC	开环控制角度增加量(每 PWM 输出频率)
OLC_VOLT	开环控制电压输出 (unit: voltage)
ALIGN_VOLT	HALL 自学习时的对齐电压 (unit: voltage)
LEARN_OLC_VOLT	HALL 自学习时的开环电压 (unit: voltage)
LEARN_OLC_ANGLE_INC	HALL 自学习时的角度增加量 (每 PWM 输出频率)
LEARN_TIME	HALL 自学习的时间 (unit: ms)
LEARN_ALIGN_TIME	HALL 自学习时的对齐时间 (unit: ms)
FW_MAX_ID_CURR	弱磁控制最大 d 轴电流 (unit: ampere)
FW_KP_GAIN	弱磁控制比例增益 (Q15 mode)
FW_KI_GAIN	弱磁控制积分增益 (Q15 mode)
FW_KP_GAIN_DIV	弱磁控制比例增益除数 (Q16 mode)
FW_KI_GAIN_DIV	弱磁控制积分增益除数 (Q16 mode)
REVERSE_MAX_SPEED_RPM	最大反转速度(unit: rpm) (E_BIKE_SCOOTER 专用)
REVERSE_CURRENT	反转电流命令(unit: ampere) (E_BIKE_SCOOTER 专用)
BRAKING_CURRENT	刹车电流命令(unit: ampere) (E_BIKE_SCOOTER 专用)(注[3])

注[3]:若电机不需要刹车功能, 将 **BRAKING_CURRENT** 设为 0, 电机则会自然减速不带刹车功能。

- 关于驱动器的相关参数定义, 如死区时间、电流检测电阻、电流放大增益…等等。在此仅列出此工程范例相关参数定义如表 6 所示, 若使用不同电机驱动板, 则需修改相对应的参数。

表 6. 驱动器参数宏定义

宏定义名称	描述
VDC_RATED	直流母线电压值
V_SENSE_GAIN	电压回授的比例
ADC_REFERENCE_VOLT	ADC 参考电压(unit: voltage)
ADC_DIGITAL_SCALE_12BITS	ADC 分辨率
SYSTEM_CORE_CLOCK	系统频率速度 (unit: Hz)
TMR_CLK	时钟频率速度 (unit: Hz)
DEADTIME_CLK_SFT_BITS	死区频率除频位移数
DEADTIME_NS	死区时间 (unit: ns)
MIN_INTERVAL_TIME	PWM 位移时两相信号最小间隔时间 (unit: ns)
MAX_CURRENT	电机最大电流 (unit: ampere)
MIN_CURRENT	电机最小电流 (unit: ampere)
DC_MAX_CURRENT	母线最大电流 (unit: ampere) (DC_CURRENT_LIMIT 专用)
CURRENT_SPAN_SHIFT	电流标么化所需的位移数

宏定义名称	描述
R_SHUNT	Shunt 电阻 (unit: Ω)
OP_GAIN	电流放大增益
CURR_OFFSET_VOLT	零电流偏移量 (unit: voltage)
RDC_SHUNT	母线 Shunt 电阻 (unit: Ω) (DC_CURRENT_LIMIT 专用)
DC_OP_GAIN	母线电流放大增益(DC_CURRENT_LIMIT 专用)
IDC_OFFSET_VOLT	母线零电流偏移量 (unit: voltage) (DC_CURRENT_LIMIT 专用)
OVER_CURRENT_VREF	过电流临界点 (unit: voltage)
OVER_VOLT_THRESHOLD	过电压临界点 (unit: voltage)
UNDER_VOLT_THRESHOLD	欠电压临界点 (unit: voltage)
V0_V	NTC 的电压与温度关系的近似曲线之参数 V0(注[4])
T0_C	NTC 的电压与温度关系的近似曲线之参数 T0(注[4])
dV_dT	NTC 的电压与温度关系的近似曲线之参数 dV/dT(注[4])
OVER_TEMP_THRESHOLD	过温临界点 (unit: Celsius degrees)
MC_ERROR_MASK	保护检测遮蔽

注[4]: 电压与温度关系之近似曲线方程式 $V[V]=V0+dV/dT[V/Celsius]*(T-T0)[Celsius]$

- 相关电机参数的宏定义，如极对数、编码器参数、霍尔传感器参数等。在此仅列出此工程范例相关参数，如表 7 所示。

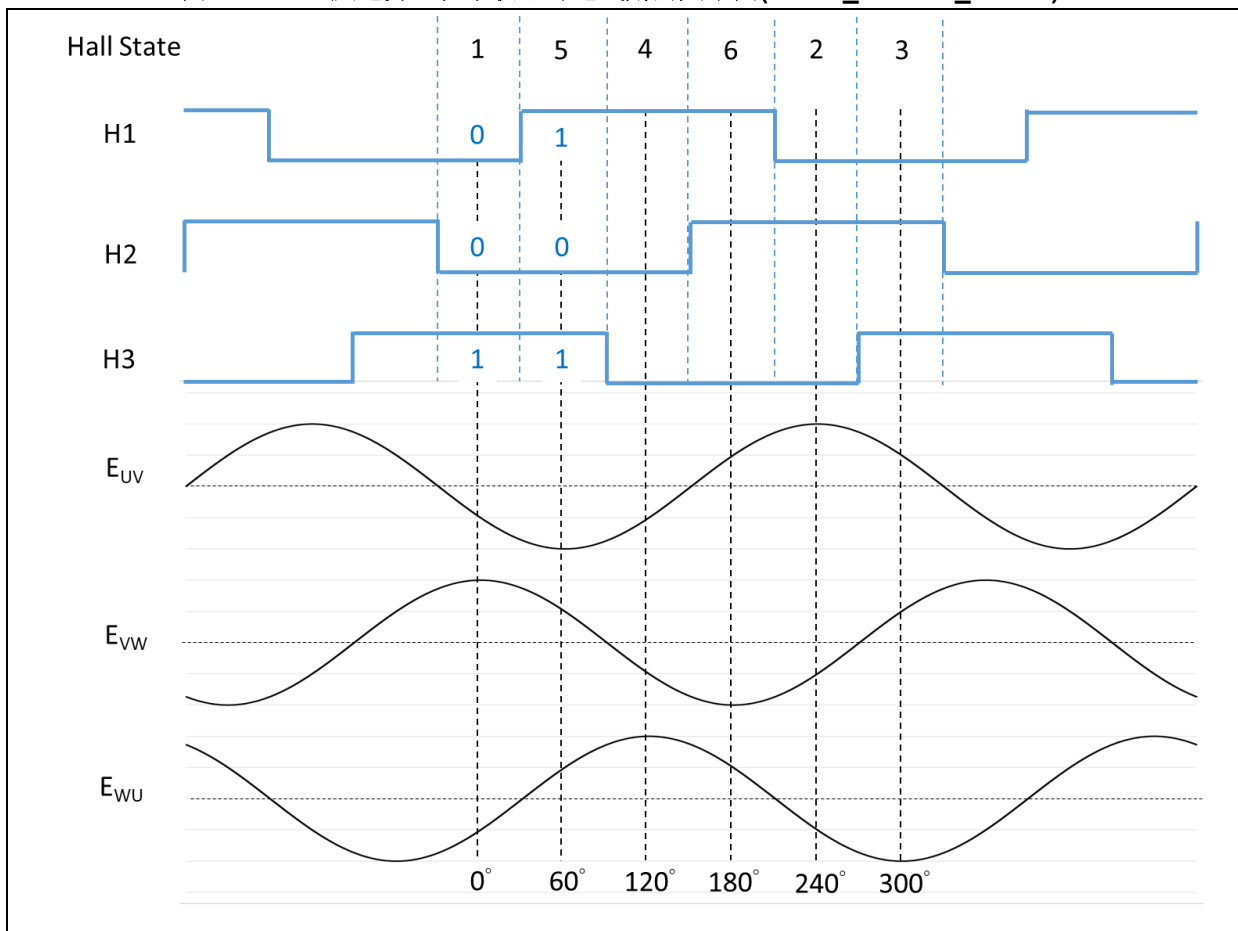
表 7. 电机参数宏定义

宏定义名称	描述
POLE_PAIRS	极对数
NOMINAL_CURRENT	电机额定电流 (unit: ampere)
HALL_LEARN_DIR	HALL 自学习后的电机转向
HALL_LEARN_0_STATE	HALL 自学习后电气角 0 度的霍尔状态(注[3])
HALL_LEARN_1_STATE	HALL 自学习后电气角 60 度的霍尔状态(注[3])
HALL_LEARN_2_STATE	HALL 自学习后电气角 120 度的霍尔状态(注[3])
HALL_LEARN_3_STATE	HALL 自学习后电气角 180 度的霍尔状态(注[3])
HALL_LEARN_4_STATE	HALL 自学习后电气角 240 度的霍尔状态(注[3])
HALL_LEARN_5_STATE	HALL 自学习后电气角 300 度的霍尔状态(注[3])

注[5]. 根据电机反电势与霍尔状态的对应可设置霍尔状态顺序与对应的电气角。

图 7 为 JK42BLS01-X056ED 电机反电势、霍尔状态与电气角在 HALL_LEARN_DIR=0 时的关系图。电机三相的线间反电势需对齐此图，电气角 0 度对应 VW 线间反电势的最大值，电气角 60 度则对应 UV 线间反电势的最小值...以此类推，根据不同霍尔状态值可对应不同的电气角。用户不需自行对应，使用电机库的霍尔自学习功能可自动对应相对的霍尔状态值，只要将学习后的霍尔状态值填入对应的霍尔宏定义即可，霍尔自学习功能使用说明请参照章节 5.9。

图 7. PMSM 反电势、霍尔状态与电气角的关系图(HALL_LEARN_DIR=0)



2) mc_hwio.h 文档

- 此文档主要根据用户的硬件 IO 接口、周边进行宏定义配置。同时也包含 mc_hwio.c 文件的函数声明。此工程范例相关外设配置包含外设 ADC、TMR、USART、EXINT 等配置与中断函数以及 DMA 通道的对应关系如表 8 所示。

表 8. 相关外设配置(以 AT32F413RCT7 为例)

外设名称	中断函数	DMA 通道	描述
ADC1	N/A	DMA1_CH1	ADC1 普通通道转换(BUS 电压、MOS 温度、外部转速/转矩命令、三相反电动势电压)
ADC1	ADC1_2_IRQn	N/A	ADC1 抢占通道转换(相电流或母线电流)
TMR1	TMR1_OVF_TMR10_IRQn	N/A	电机 FOC 控制中断
TMR1	TMR1_BRK_TMR9_IRQn	N/A	PWM 输出禁能
TMR1_CH4	N/A	DMA1_CH4	单电阻模式时用于配置采样时间
TMR3	TMR3_GLOBAL_IRQn	N/A	捕获霍尔传感器讯号
TMR11	TMR1_TRG_HALL_TMR11_IRQHandle	N/A	速度控制环中断

USART1_TX	N/A	DMA1_CH2	USART1 TX 传输数据
USART1_RX	N/A	DMA1_CH3	USART1 RX 接收数据
EXINT	EXINT15_10_IRQn	N/A	启动 HALL 自学习中断函数、 START/STOP 按钮(启动/停止电机)

3) mc_hwio.c 文档

- 此文档主要依据用户的硬件周边进行配置。如 TMR、ADC、DMA、GPIO...等等，可根据不同的硬件来进行配置。同时也包含按钮、LED 灯、指拨开关等函数。在此仅列出此工程范例相关函数定义如表 9 所示。

表 9. 外配置相关函数

函数名称	描述
nvic_config	中断优先级配置
tmr_pwm_init	PWM 输出相关时钟(tmr)、crm clock、GPIO、DMA 配置
hall_timer_init	霍尔传感器时钟(tmr)、crm clock、GPIO 配置
adc_ordinary_config	ADC 普通通道相关之 ADC、DMA、GPIO 配置
adc_preempt_config	ADC 抢占通道相关之 ADC、DMA、GPIO 配置
speed_timer_init	速度控制时钟(tmr)、crm clock 配置
uart_init	UART 相关 crm clock、GPIO、UART 配置
button_exint_init	按钮中断事件 EXINT 设置
led_config	LED 初始 GPIO、crm clock 配置
led_on	LED 灯亮
led_off	LED 灯灭
led_toggle	LED 翻转(灯亮变灯灭或灯暗变灯亮)
led_init	LED 初始状态设置
led_blink	LED 闪烁
mode_switch_init	指拨开关外配置
motor_parameter_ID_config	电机线圈参数自动辨识相关 tmr、ADC 配置

4) mc_isr.c 文档

- 此文档主要为中断函数，包含 ADC、TMR、SYSTICK 等中断。此仅列出此工程范例相关中断函数如表 10 所示。

表 10. 电机控制相关中断函数(以 AT32F413RCT7 为例)

函数名称	描述
ADVTMR_PWM_CYCLE_IRQ (TMR1_OVF_TMR10_IRQHandler)	TIMER1 更新中断函数: 获取角度、矢量控制、开环控制、电压环控制、电流环控制
ADVTMR_PWM_BRK_IRQ	TMR1 刹车输入中断函数: PWM 输出禁能

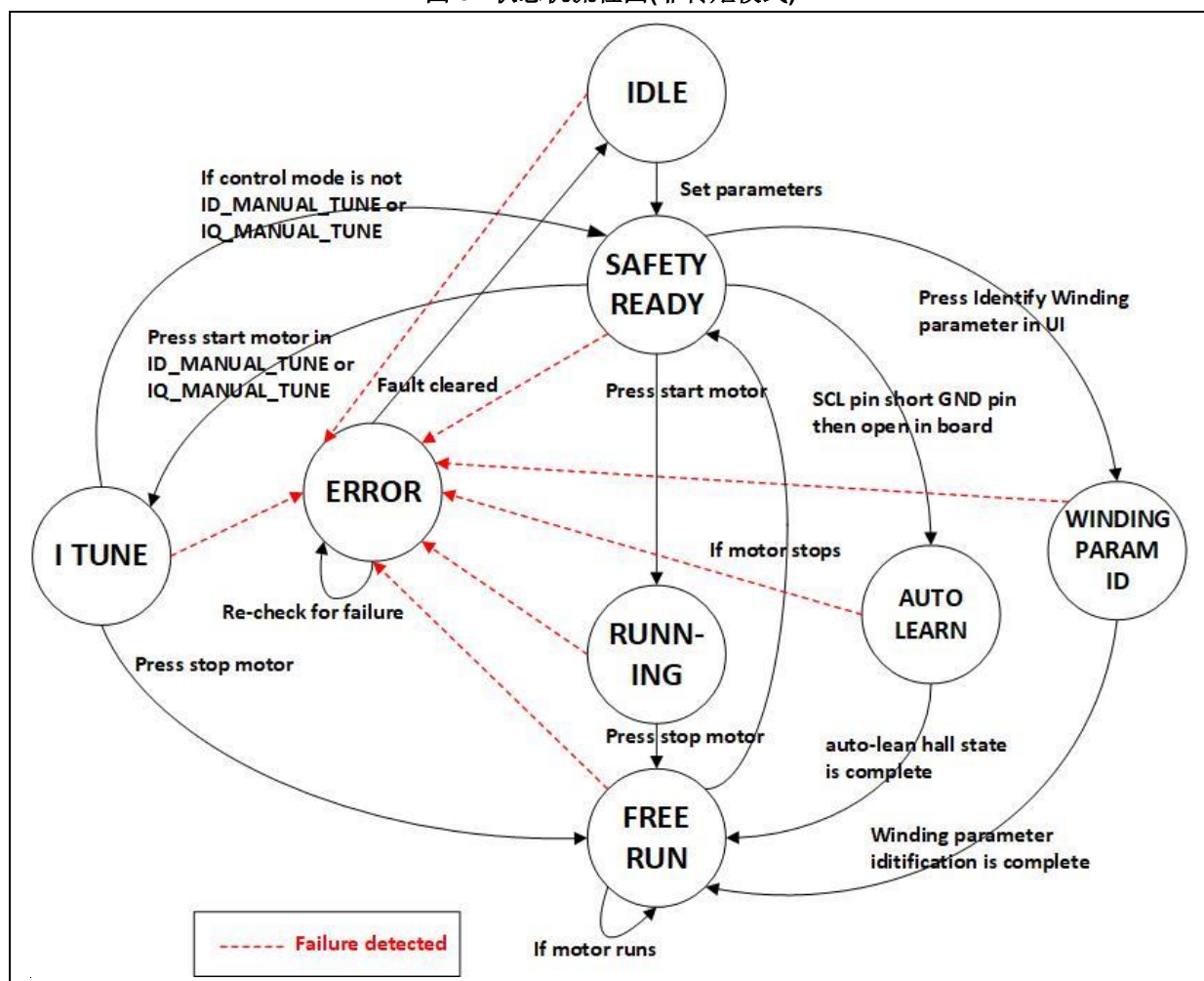
(TMR1_BRK_TMR9_IRQHandler)	
ADC_SHUNT_SAMP_READY_IRQ (ADC1_2_IRQHandler)	ADC1 中断函数: 完成电流采样
HALL_CAPTURE_IRQ (TMR3_GLOBAL_IRQHandler)	捕获中断函数: 霍尔信号输入捕获、获取转速
SPEED_LOOP_TIMER_IRQ (TMR1_TRG_HALL_TMR11_IRQHandler)	速度控制环中断函数
SysTick_Handler	系统中断函数(1ms): 状态机切换状态流程
BUTTON_EXINT_IRQHandler (EXINT15_10_IRQHandler)	外部 IO 中断函数: 启动 HALL 自学习中断函数、START/STOP 按钮(啟動/停止電機)

4 电机控制状态机

4.1 状态机描述

各个状态机的初始设置由主程序(Main)不断的循环检查，当状态改变时则设置新状态的初始设定。此外，状态机的运行在 **Systick Handler** 中断函数里，每一微秒运行一次以确保实时检查状态机。在每个状态进行故障检测，一旦发生故障状态机则进入 **Error** 状态停止驱动以免发生电机或电机驱动板损毁，直到故障被清除电机才能再次运行。由于 **E-Bike-Scooter** 工程范例的状态流程分成转矩模式与非转矩模式，其状态的流程、起始条件与结束条件皆不相同，在此分成两个状态流程图，图 8 为非转矩模式的状态机流程图，而各状态起始状态及切换条件如表 11 所示。

图 8. 状态机流程图(非转矩模式)



它由以下状态组成：Idle、Safety ready、Running、Braking、Reverse run、Free run、I_tune 以及 Error。各个状态的描述如下：

Idle

此为状态机的初始状态，此状态下马达为静止状态，遇警示状况解除后也会回到此状态。

Safety ready

于初始状态(Ide)时确认所有参数已被设置、已取得电流 offset 的值，确认电机可以安全被启动的状态。

Running

运转模式，在此模式下马达为运转状态。用户可于 UI 界面实时调整参数(如目标速度、目标电流等)、

或下命令停止马达。

Braking

刹车模式，在此模式下马达为刹车状态。在转矩模式且马达正常运转状态下，给予电流命令 0 时可进入此模式。用户可于宏定义 BRAKING_CURRENT 设置刹车电流命令(若不执行刹车模式可将 BRAKING_CURRENT 设为 0，电机在此状态则为自然减速)，当转速低于 STABLE_SPEED_RPM 即进入 Free run 模式停止驱动器输出直到转速降为 0。

Reverse run

倒车模式，在此模式下马达为反向运转。用户在转矩模式且马达静止情况下将倒车旗标(reverse_flag)置起，即可进入此状态，并于宏定义 REVERSE_MAX_SPEED_RPM 与 REVERSE_CURRENT 设置最高倒车转速以及倒车电流命令。

Free run

相当于停止模式，在此模式下驱动器将停止输出，马达将由原速度慢慢降为 0，在马达完全停止前将会在这个状态，马达完全停止时则会回到 Satety ready 状态。

I_tune

此为调整电流 PID 控制器参数的模式，在此模式下可通过 UI 界面调整目标电流、电流环之 KP、KI 值，将会产生一步阶电流，可经由观察电流响应于此状态调整至适合参数。

Winding param Id

此为电机线圈参数辨识状态，用户可于 UI 界面启动自动参数辨识功能，通常在调适新电机时可做参数辨识，辨识后的线圈参数可用于无传感器矢量控制以及电流 PI 控制参数自整定。

Auto learn

此为自学习状态，目前电机库支持霍尔状态自学习功能，六步方波以及矢量控制皆可适用。

Error

当有错误发生时将会跳至这个状态。

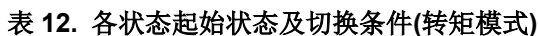
此电机工程范例非转矩模式各状态的起始状态、结束状态以及切换条件的详细说明如表 11 所示。

表 11. 各状态起始状态及切换条件(非转矩模式)

起始状态	结束状态	切换条件
IDLE	SAFETY REDAY	当控制来源为上位机时且初始参数设定完成
		当控制来源为电机控制板时且 POTENTIOMETER 命令给定小于默认值以及初始参数设定完成
SAFETY REDAY	RUNNING	当控制模式不为 ID_MANUAL_TUNE 或 IQ_MANUAL_TUNE 时，按下上位机的 START MOTOR 或电机控制板 START/STOP 按键
	I TUNE	当控制模式为 ID_MANUAL_TUNE 或 IQ_MANUAL_TUNE 时，按下上位机的 START MOTOR 或电机控制板 START/STOP 按键
	WINDING_PARAM_ID	按下上位机的 Identify Winding parameter 按钮
	AUTO_LEARN	电机控制板 I2C 接口(AT-MOTOR-EVB V1.x:J3; AT-MOTOR-EVB V2.x:J5)的 SCL 脚位先短路 GND 后再开路
RUNNING	FREE_RUN	按下上位机的 STOP MOTOR 或电机控制板 START/STOP 按键
FREE_RUN	SAFETY REDAY	当电机停止时
	FREE_RUN	当电机运转时

图 9 为转矩模式的状态机流程图，而各状态起始状态、结束状态及切换条件如表 12 所示。

图 9. 状态机流程图(转矩模式)

版本 2.0.1

		POTENTIOMETER 命令大于默认值以及指拨开关 SW1 的 1 设置为 OFF
	REVERSE RUN	当控制来源为上位机且控制模式为 TORQUE_CTR 以及 reverse_flag 置起
		当控制来源为电机控制板且控制模式为 TORQUE_CTRL 以及指拨开关 SW1 的 1 设置为 ON
	WINDING_PARAM_ID	按下上位机的 Identify Winding parameter 按钮
	AUTO_LEARN	电机控制板 I2C 接口(AT-MOTOR-EVB V1.x:J3; AT-MOTOR-EVB V2.x:J5)的 SCL 脚位先短路 GND 后再开路
RUNNING	BRAKING	当控制来源为上位机且控制模式为 TORQUE_CTRL 以及电流命令(Torque reference)为 0
		当控制来源为电机控制板且控制模式为 TORQUE_CTRL 时, POTENTIOMETER 命令小于默认值
BRAKING	FREE_RUN	当控制来源为上位机且电流命令(Torque reference)等于 0 以及转速小于 STABLE_SPEED_RPM
		当控制来源为电机控制板且 POTENTIOMETER 命令小于默认值以及转速小于 STABLE_SPEED_RPM
	RUNNING	当控制来源为上位机且电流命令(Torque reference)大于 0
		当控制来源为电机控制板且 POTENTIOMETER 命令大于默认值
FREE_RUN	SAFETY REDAY	当电机停止时
	FREE_RUN	当电机运转时
	RUNNING	当控制来源为上位机且电流命令(Torque reference)大于 0
		当控制来源为电机控制板且 POTENTIOMETER 命令大于默认值
REVERSE RUN	FREE_RUN	当控制来源为上位机且控制模式为 TORQUE_CTRL 以及 reverse_flag 为 0
		当控制来源为电机控制板且控制模式为 TORQUE_CTRL 以及指拨开关 SW1 的 1 设置为 OFF
WINDING_PARAM_ID	FREE_RUN	电机线圈参数辨识功能执行完成
AUTO_LEARN	FREE_RUN	霍尔状态自学习功能执行完成
ERROR	IDLE	故障已消除

5 工程使用说明

5.1 建立连接

在确保完成硬件准备和软件环境准备后，我们可以进行以下操作建立 UI 与控制版的连接。详细电机 UI 使用说明请参照 AN0063 文档。

STEP-1

正确将电机、AT_Link/Jlink、开发板电源接到电机开发板上，将 USART 接口同 USB 线接入 PC。

STEP-2

使用 MDK 编译 demo 工程代码，使用 Jlink 或 AT_Link 下载到开发板的芯片中

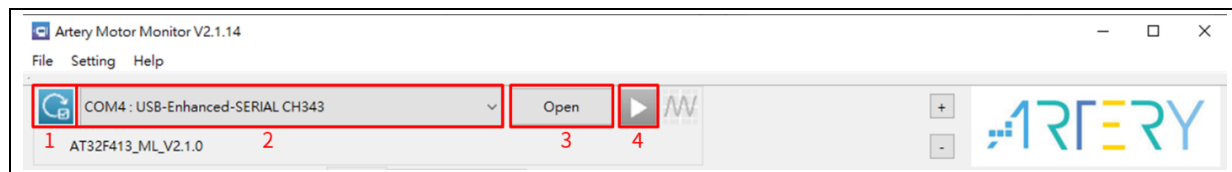
STEP-3

执行程序 ArteryMotorMonitor_V2.1.14.exe(V2.1.14 为软件版本号)，在 File -> Open Porject 选项中选择 ArteryMotorMonitor_V2.1.14.atmcx->开启

STEP-4

点选 Serial Port 更新图标(1.)并选取对应的串口号(2.)，选完点选 Open(3.)即可开启串口实时通信，操作步骤如图 10。

图 10. 连接操作说明



STEP-5

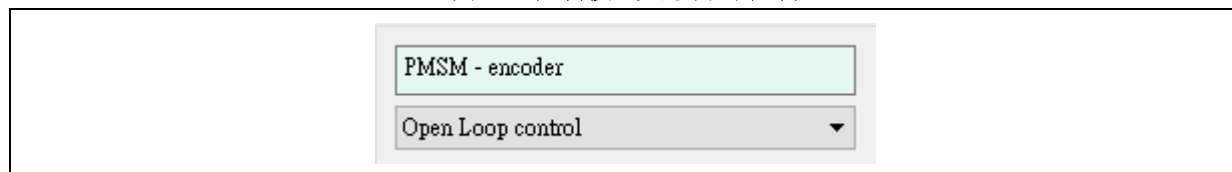
按下播放键(4.)即可周期性更新 UI 接口的数据以及与目标板通过串口实时通信，如发送启动/停止电机的命令、实时调速、调试电流 PID 参数以及监控参数绘制波形等。

5.2 开环控制

此模式使用开环电压控制模式，不需位置传感器即可转动电机，用来确认电机是否可正常运转与运转方向是否正确，开环电压与角度增加量的调试方式可视电机运转速度与电机相电流大小由 0 开始慢慢往上加。

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 Open Loop control

图 11. 控制模式选取开环控制



STEP-2. 将开环电压(Open Loop Voltage)与角度增量(Open Loop Angle Increments)慢慢增加并观察电流大小，直到电机正常运转。(开环电压避免过大以免造成电机过热损毁)

图 12. 开环控制相关参数

Open loop control		
Open Loop Voltage	1	V
Open Loop Angle Increments	10	

5.3 电压控制

此模式基于位置传感器下使用电压控制模式可控制电机 D 轴与 Q 轴电压。(无传感器时无法使用)

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 Voltage Control

图 13. 控制模式选取开环控制

PMSM - encoder
Voltage Control

STEP-2. 控制 Q 轴电压可使电机运转，而控制 D 轴电压可将电机磁极定位在 D 轴

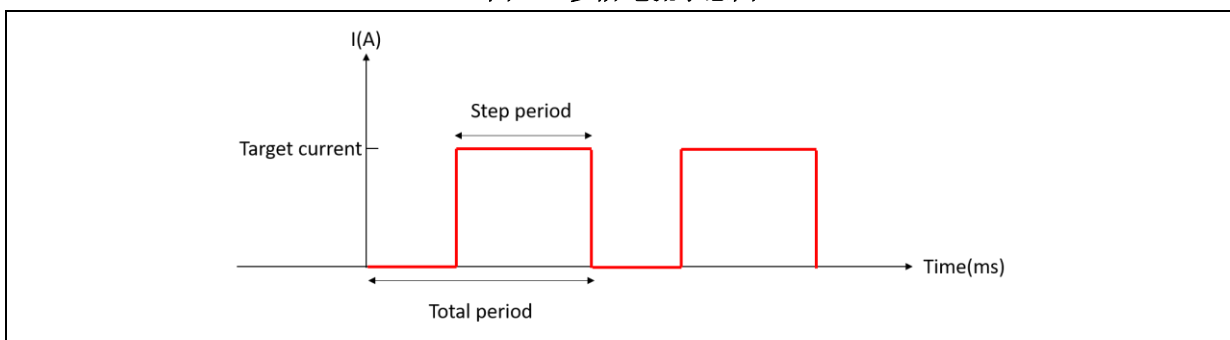
图 14. 电压控制相关参数

Voltage control		
Vq reference	1	V
Vd reference	0	V

5.4 D 轴电流调试

此模式下会产生一个步阶的电流，如图 15，可以调整步阶电流的相关参数，产生步阶电流的目的是为了查看调整 D 轴电流的 PID 电流环参数后的电流响应。

图 15. 步阶电流示意图

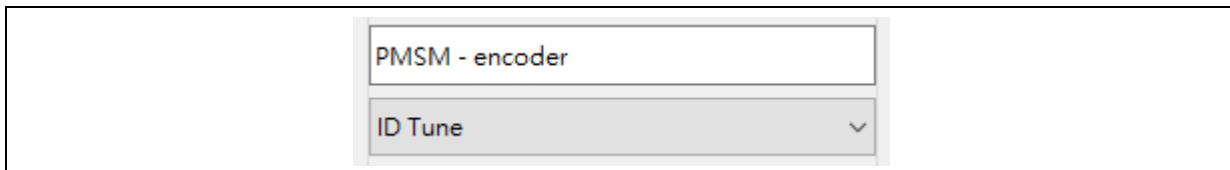


注：建议先调适 D 轴电流再调适 Q 轴电流，在调适电流之前先将 D 轴与 Q 轴电流的 KP 与 KI 设置为 0，避免不匹配的默认值影响电流参数调适。

详细操作步骤如下：

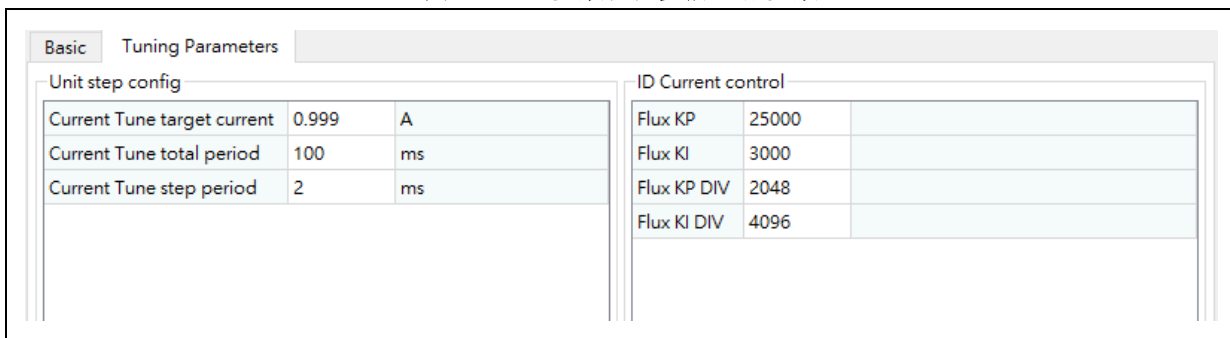
STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 ID tune

图 16. 控制模式选取 ID 电流环调试



STEP-2. 设置 PID 参数以及步阶电流参数，如图 17

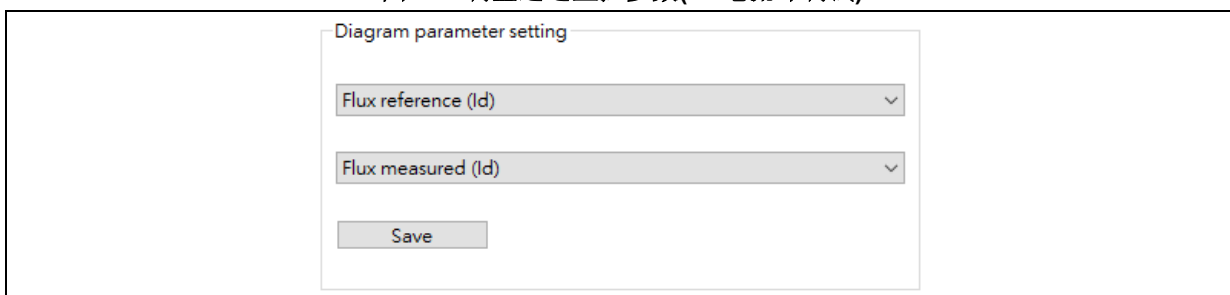
图 17. PID 参数以及步阶电流参数



STEP-3. 按下启动电机(Start Motor)按钮

STEP-4. 调整绘图区的参数监控为 Flux reference(Id)以及 Flux measured(Id)并按下 Save 键

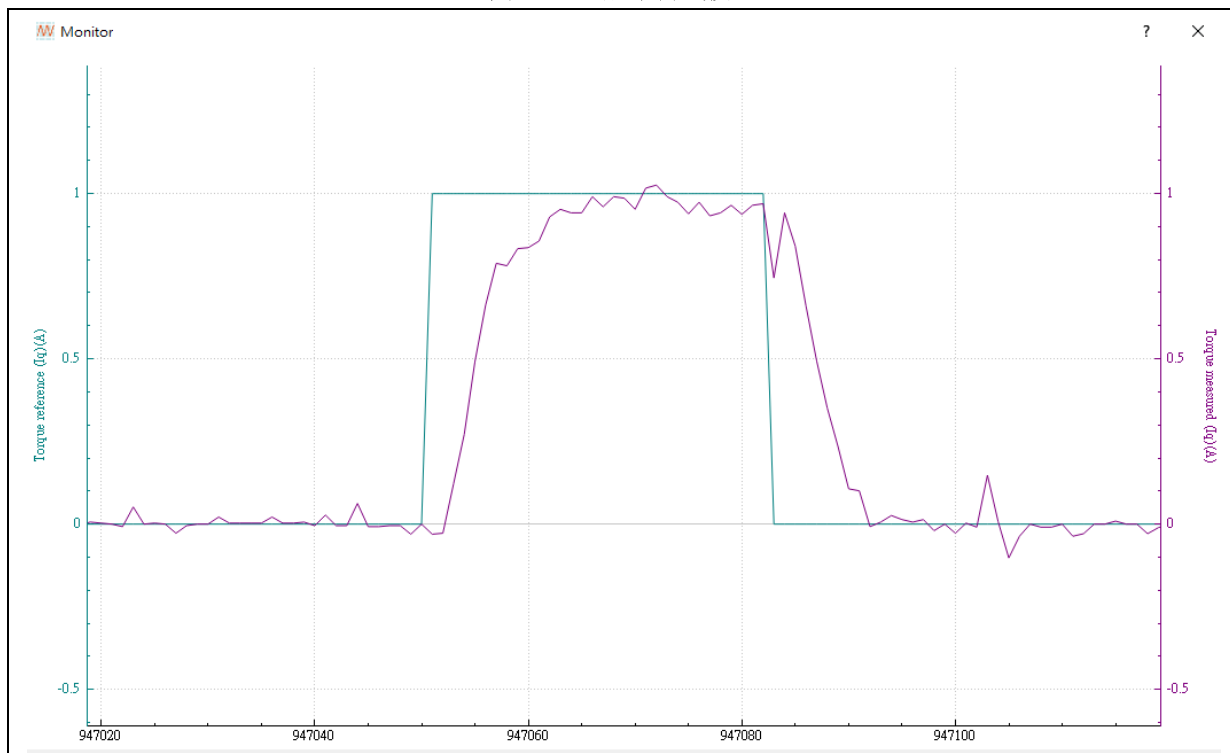
图 18. 调整通道监控参数(ID 电流环调试)



STEP-5. 点选绘图按钮即可呼叫出波形窗口

STEP-6. 查看电流响应是否如预期，如图 19，若不如预期则按下停止电机，并重复 STEP-2~STEP-6

图 19. 电流环调试波形



5.5 Q 轴电流调试

此模式下会产生一个步阶的电流，如图 15，可以调整步阶电流的相关参数，产生步阶电流的目的是为了查看调整 Q 轴电流的 PID 电流环参数后的电流响应，详细操作步骤如下：

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 IQ tune

STEP-2. 设置 PID 参数以及步阶电流参数

图 20. Q 轴电流 PID 参数以及步阶电流参数

Basic			Tuning Parameters		
Unit step config			IQ Current control		
Current Tune target current	0.999	A	Torque KP	25000	
Current Tune total period	100	ms	Torque KI	3000	
Current Tune step period	2	ms	Torque KP DIV	2048	
			Torque KI DIV	4096	

STEP-3. 按下启动电机按钮

STEP-4. 调整绘图区的参数监控为 Torque reference(Iq)以及 Torque measured(Iq) 并按下 Save 键

图 21. 调整通道监控参数(IQ 电流环调试)

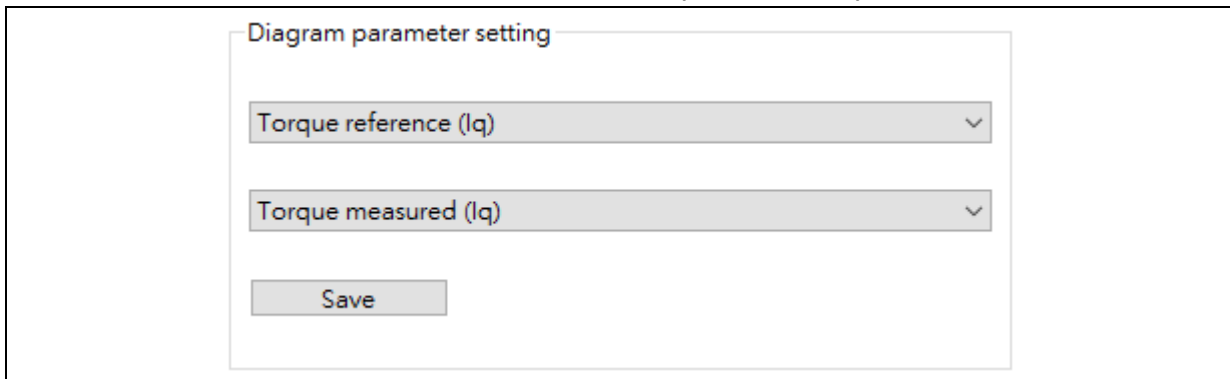


Diagram parameter setting

Torque reference (Iq) ▼

Torque measured (Iq) ▼

Save

STEP-5. 点选绘图组即可呼叫出波形窗口

STEP-6. 查看电流响应是否如预期，如图 19，若不如预期则按下停止电机，并重复 STEP-2~STEP-6

5.6 电流环控制

此模式下可调控目标电流来达到转矩控制，亦可由波形绘制查看响应，详细操作步骤如下：

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 Torque Control

STEP-2. 设置 Control source 为 software control 及目标电流参考值(Torque reference)

图 22. 目标电流值设置

Torque reference (Iq)	0.100	A
Flux reference (Id)	0.000	A

STEP-3. 调整绘图区的参数监控为 Ia 以及 Ib 后按下 Save 按钮。

图 23. 调整通道监控参数(电流环调试)

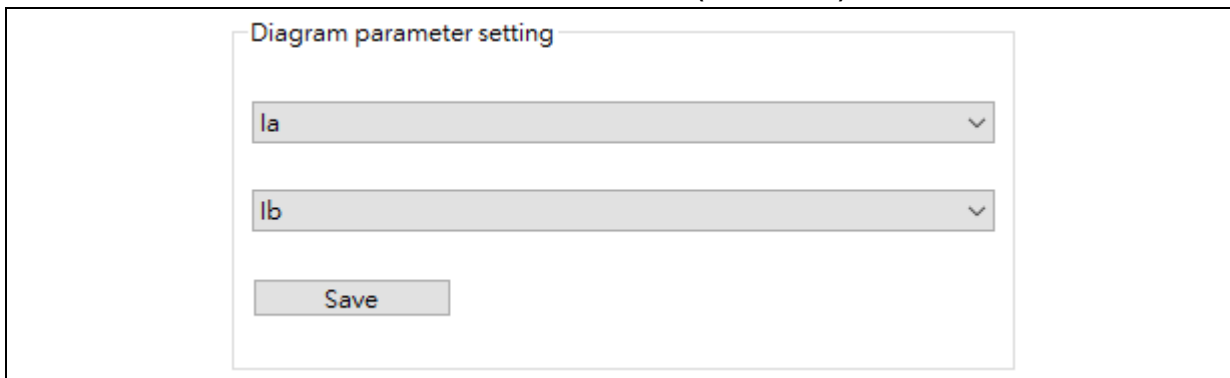


Diagram parameter setting

Ia ▼

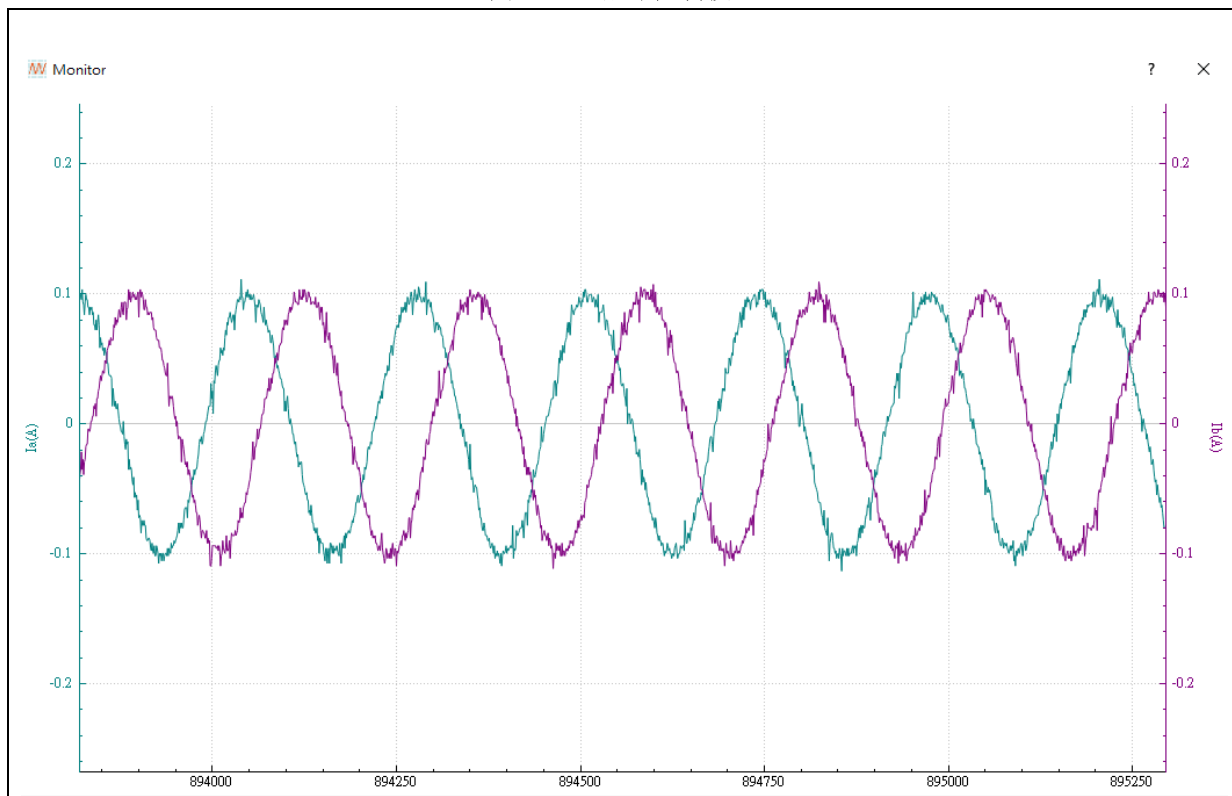
Ib ▼

Save

STEP-4. 点选绘图组即可呼叫出波形窗口

STEP-5. 查看电流波形是否如预期，如图 24

图 24. 电流环控制波形



5.7 速度环控制

在 E-Bike-Scooter 模式下不支持速度环控制，但电流环支持最大限速功能仍需调整速度 PID 控制参数与弱磁 PID 控制参数(若开启弱磁控制时)。请将 `motor_control_drive_param.h` 复制到 `pmsm_foc_hall_sensor` 工程中，调适速度控制参数与弱磁控制参数后再将控制参数值填回此工程即可。详细速度环控制调适方法请参照 AN0167 文档。

5.8 位置环控制

在 E-Bike-Scooter 模式下不支持位置环控制。

5.9 电机更换调试流程

在此介绍更换新电机后，必要的调试流程及详细步骤说明。请依照下列顺序进行，每个步骤确认完成后才可进行下个步骤。

STEP-1. 填入新电机规格参数于 `motor_control_drive_param.h` 文件(如: `POLE_PAIRS`、`RS_LL`(注[4])、`LS_LL`(注[4])、`NOMINAL_CURRENT`、`VDC_RATED`、`MAX_CURRENT`、`MAX_SPEED_RPM`...等参数，参数详细说明请参照表 5、表 6、表 7)并重新编译烧录代码。

注[4]. 电机若无此数据可由 STEP-5-1 电机线圈参数自动辨识获得。

STEP-2. 参照章节 5.1 连接 UI 软件，并使用开环控制确认电机是否正常运转(参照章节 5.2)。

STEP-3. 执行霍尔状态自学习功能，步骤如 STEP-3-1~ STEP-3-5。

STEP-3-1. 进入调试模式，观测 hall_learn_state_table 以及 hall_learn 变数

STEP-3-2. I2C 接口(AT-MOTOR-EVB V1.x:J3; AT-MOTOR-EVB V2.x:J5)的 SCL 脚位先短路 GND 后再开路。

STEP-3-3. 此时电机开环运转几圈，等待电机停止运转。若电机运转不顺或无法运转可慢慢增加 ALIGN_VOLT 并重新编译烧录，重新执行霍尔状态自学习功能。假如电机转向相反，重复步骤 STEP-3-2~ STEP-3-3

STEP-3-4. 在调试模式下的 watch 介面确认 hall_learn.process_state 状态是否为 4 PROCESS_4_FINISH

STEP-3-5. 填入 hall_learn.dir 与 hall_learn_state_table 数值至” hall learn table” 宏定义 (motor_control_drive_param.h) 并重新编译烧录代码。

图 25. 电机线圈参数自动辨识

The screenshot shows the Watch window with the following data:

Name	Value
hall_learn	0x200001A0 &hall_learn
process_state	4 PROCESS_4_FINISH
hall_state	0x200001A4
start_flag	0 RESET
dir	0
learn_period	0
learn_angle_inc	5
learn_volt	1182
align_time	500
count	0
step	139
check_flag	0 RESET
hall_learn_state_table	0x20000E6A hall_learn_state_table
[0]	6
[1]	2
[2]	3
[3]	1
[4]	5
[5]	4

On the left, the macro definitions in motor_control_drive_param.h are shown:

```

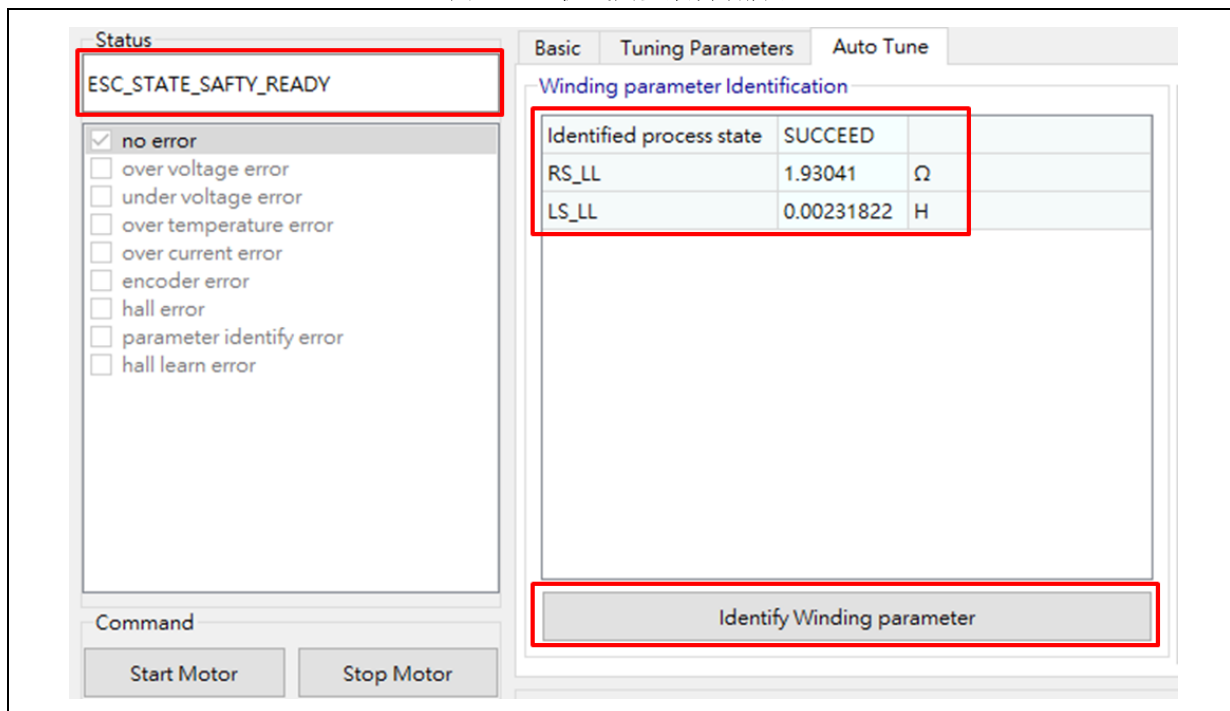
/* hall learn table */
#define HALL_LEARN_DIR (0)
#define HALL_LEARN_0_STATE (6)
#define HALL_LEARN_1_STATE (2)
#define HALL_LEARN_2_STATE (3)
#define HALL_LEARN_3_STATE (1)
#define HALL_LEARN_4_STATE (5)
#define HALL_LEARN_5_STATE (4)
    
```

STEP-4. 霍尔状态自学习完成后，可基于霍尔传感器位置进行电压控制(参照章节 5.3)。使用 Q 轴电压控制转动电机，并观察电机相电流 I_a , I_b 大小是否与实际电流一致、电流偏移值是否接近 0 以及 I_a 相位是否领先 I_b 相位 120 度(参照图 24)。

STEP-5. 在进行闭环电流控制前需调试电流 PI 控制参数，可自行调试(参照章节 5.4、5.5)或自整定参数(STEP-5-1, STEP-5-2)。

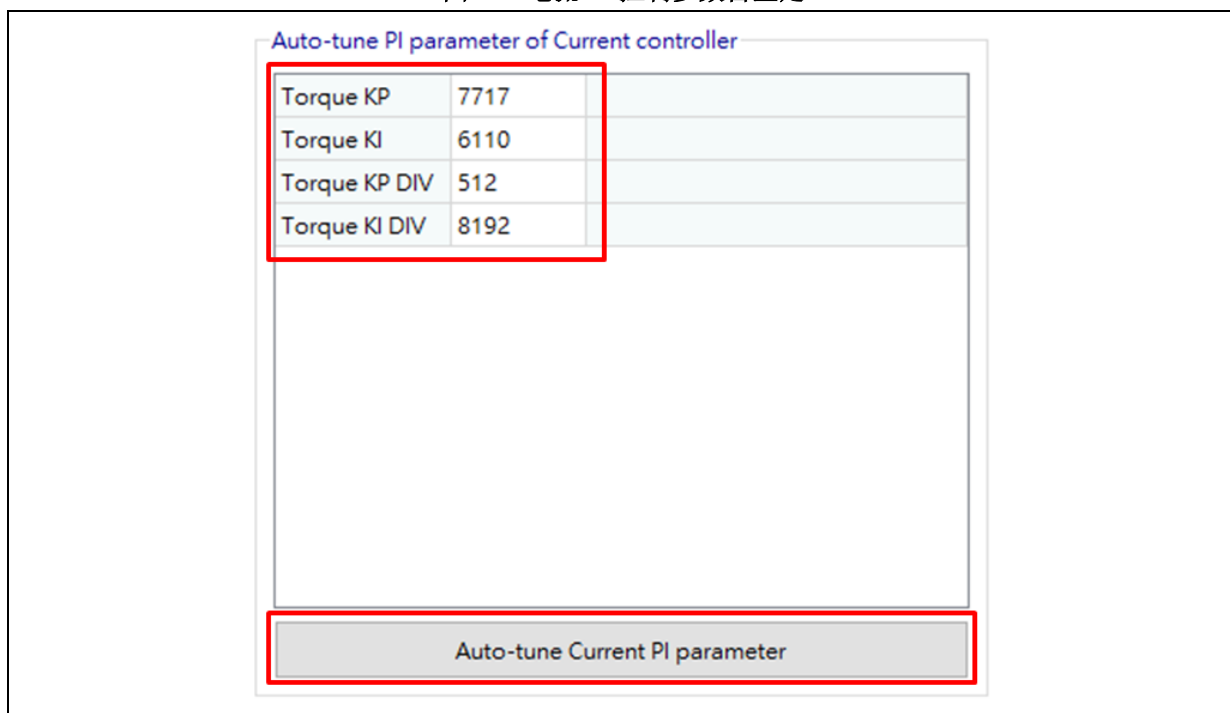
STEP-5-1. 使用 UI 软件，在状态机的状态为 safty ready 时按下 Identify Winding parameter 按钮即执行电机线圈参数自动辨识，由 Identified process state 回报是否成功(SUCCEED)并获得 RS_LL 以及 LS_LL 参数并将数值填入 motor_control_drive_param.h 文件宏定义 RS_LL 以及 LS_LL 参数。(若有电机 RS_LL 以及 LS_LL 规格参数可不执行 STEP-5-1 步骤)

图 26. 电机线圈参数自动辨识



STEP-5-2. 在状态机的状态为 **safty ready** 时按下 UI 软件的 **Auto-tune Current PI parameter** 按钮即执行电流 PI 控制参数自整定，完成后会自动更新 Q 轴以及 D 轴电流的 PI 控制参数，如图 27 所示。

图 27. 电流 PI 控制参数自整定



STEP-6. 完成电流控制参数调试或自整定后可进行转矩控制(参照章节 5.6)。

STEP-7. 参照章节 5.7 进行速度环控制，值得注意的是更换电机后或电机惯量改变时，速度环控制参数必须重新整定。

6 文档版本历史

表 13. 文档版本历史

日期	版本	变更
2023.10.03	2.0.0	最初版本
2024.02.27	2.0.1	新增AT-MOTOR-EVB V2.0接线说明、增加电机线圈参数自动辨识、电流PI控制参数自整定以及霍尔状态自学习的宏定义与状态机说明以及描述、增加电机更换调试流程与步骤

重要通知 - 请仔细阅读

买方自行负责对本文所述雅特力产品和服务的选择和使用，雅特力概不承担与选择或使用本文所述雅特力产品和服务相关的任何责任。

无论之前是否有过任何形式的表示，本文档不以任何方式对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。如果本文档任何部分涉及任何第三方产品或服务，不应被视为雅特力授权使用此类第三方产品或服务，或许可其中的任何知识产权，或者被视为涉及以任何方式使用任何此类第三方产品或服务或其中任何知识产权的保证。

除非在雅特力的销售条款中另有说明，否则，雅特力对雅特力产品的使用和 / 或销售不做任何明示或默示的保证，包括但不限于有关适销性、适合特定用途（及其依据任何司法管辖区的法律的对应情况），或侵犯任何专利、版权或其他知识产权的默示保证。

雅特力产品并非设计或专门用于下列用途的产品：（A）对安全性有特别要求的应用，例如：生命支持、主动植入设备或对产品功能安全有要求的系统；（B）航空应用；（C）航天应用或航天环境；（D）武器，且/或（E）其他可能导致人身伤害、死亡及财产损害的应用。如果采购商擅自将其用于前述应用，即使采购商向雅特力发出了书面通知，风险及法律责任仍将由采购商单独承担，且采购商应独力负责在前述应用中满足所有法律和法规要求。

经销的雅特力产品如有不同于本文档中提出的声明和 / 或技术特点的规定，将立即导致雅特力针对本文所述雅特力产品或服务授予的任何保证失效，并且不应以任何形式造成或扩大雅特力的任何责任。

© 2024 雅特力科技 保留所有权利