

AT32 BLDC Hall 1-Shunt Demo

前言

这篇应用笔记描述了怎么使用 AT32F413xx 以及 AT32F421xx 搭配 AT-MOTOR-EVB 电机开发板，使用霍尔传感器六步方波控制算法搭配 1-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）。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	AT32F413xx, AT32F421xx
------	------------------------

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	7
3	BLDC 电机库文档说明.....	9
4	电机控制状态机.....	19
4.1	状态机描述	19
5	工程使用说明	21
5.1	建立连接.....	21
5.2	Q 轴电流调试.....	21
5.3	外部/软件命令控制.....	24
5.4	速度环控制	26
5.5	低速电压控制调适.....	28
6	文档版本历史	29

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.....	7
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	12
表 6. 驱动器参数宏定义.....	13
表 7. 电机参数宏定义	14
表 8. 相关外设配置(以 AT32F413RCT7 为例).....	16
表 9. 相关外设配置(以 AT32F421C8T7 为例).....	16
表 10. 外设配置相关函数.....	16
表 11. 电机控制相关中断函数.....	17
表 12. 电机库枚举列表	17
表 13. 各状态起始状态及切换条件	20
表 14. 文档版本历史	29

图目录

图 1. 电机 JK42BLS01-X056ED.....	6
图 2. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB	7
图 3. AT32F413RCT7 之 ROM 配置(AT32IDE).....	8
图 4. 电机库控制程序架构图	9
图 5. 电机库文档结构说明图	9
图 6. 电机控制工程结构.....	10
图 7. BLDC 反电势、霍尔状态与 MOS 导通状态的关系图	15
图 8. 状态机流程图	19
图 9. 连接操作说明	21
图 10. 步阶电流示意图	21
图 11. 控制模式选取 IQ 电流环调试	22
图 12. PID 参数以及步阶电流参数	22
图 13. 调整通道监控参数(IQ 电流环调试)	22
图 14. 电流环调试波形	23
图 15. 外部电压控制来源之电位器位置图	24
图 16. 控制来源定义值(软件控制来源(上)/外部电压控制(下)).....	24
图 17. 速度控制模式(外部电压控制来源)	25
图 18 转矩控制模式(外部电压控制来源)	25
图 19 软件控制来源设置目标速度	25
图 20. PID 参数以及加速度、减速度设置	26
图 21. 目标速度值设置	26
图 22. 调整信道监控参数(速度环调试).....	26
图 23. 速度环调试波形	27
图 24. 低速电压控制定义.....	28
图 25. 低速电压控制参数定义值.....	28

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：

- 120°方波控制

三相 PWM 调制模式：

- 120°导通 PWM 控制

相电流检测模式：

- 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 120°方波控制模式：

- 120°方波电压控制
- 转矩控制 (120°方波电流控制)
- 转速控制
- 弱磁控制
- 正逆转控制

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

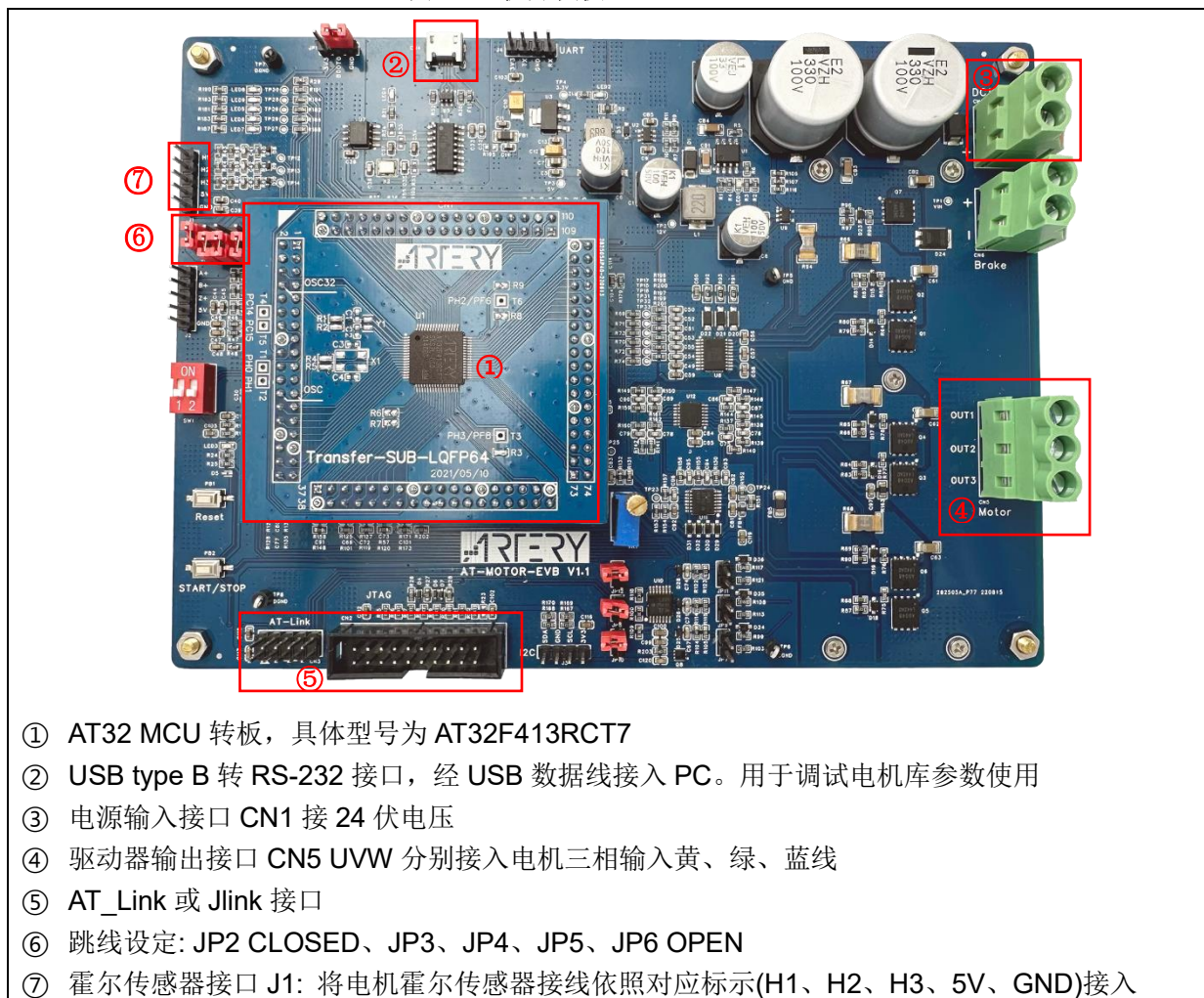


表 1. 电机参数表

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 (含 AT32F413RCT7 转板)

图 2. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB



2.2 软件环境准备

- 1) 开启 bldc_1shunt_hall_sensor 范例工程
- 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 0x800，AT32F413RCT7 的修改范例如图 3 所示。

表 2. 对应闪存存储空间之 ROM 配置表

Flash size	256K	128K	64K	32K	16K
IROM1(address)	0x8000000	0x8000000	0x8000000	0x8000000	0x8000000
IROM1(size)	0x3F800	0x1FC00	0x0FC00	0x07C00	0x03C00
IROM2(address)	0x803F800	0x801FC00	0x800FC00	0x8007C00	0x8003C00
IROM2(size)	0x800	0x400	0x400	0x400	0x400

注[1]:使用 keil v5.33 版本，因 AT32 BSP 源码不支持 V6.15 编译器，请使用 keil compiler version 5 版本进行编译。

图 3. AT32F413RCT7 之 ROM 配置(AT32IDE)

```
AT32F413xC_FLASH.ld X
25 _estack = 0x20008000; /* end of RAM */
26
27 /* Generate a link error if heap and stack don't fit into RAM */
28 _Min_Heap_Size = 0x200; /* required amount of heap */
29 _Min_Stack_Size = 0x400; /* required amount of stack */
30
31 /* Specify the memory areas */
32 MEMORY
33 {
34     FLASH (rx) : ORIGIN = 0x08000000, LENGTH = 0x3F800
35     MC_DATA(r) : ORIGIN = 0x0803F800, LENGTH = 0x800
36     RAM (xrw) : ORIGIN = 0x20000000, LENGTH = 32K
37     SPIIM (rx) : ORIGIN = 0x08400000, LENGTH = 16384K
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
52     .mc_data :
53     {
54         . = ALIGN(4);
55         *mc_flash_data_table.o(.rodata .rodata*)
56         . = ALIGN(4);
57     } >MC_DATA
58
59     /* The program code and other data goes into FLASH */
60     .text :
61     {
62         . = ALIGN(4);
63         *(.text) /* .text sections (code) */
64         *(.text*) /* .text* sections (code) */
65         *(.glue_7) /* glue arm to thumb code */
66         *(.glue_7t) /* glue thumb to arm code */
67         *(.eh_frame)
68     }
```


3 BLDC 电机库文档说明

图 4 为一个电机控制工程中电机控制函数与其它 MCU 基础函数(BSP)、UI 通讯程序以及硬件的关系图。其中最低层的硬件外设直接透过 bsp 函数控制，而电机库函数与 UI 函数均建构于 BSP 与 Low level 函数之上，而用户自行撰写的控制程序则植基于电机库函数与 UI 函数之上。因此用户可以很方便地调用电机控制函数控制 MCU 硬件外设，实现电机控制程序。并可同时经由 UI 控制函数与外部个人计算机 UI 软件工具链接，传输实时的电机控制状态或实时改变控制参数与命令。

图 4. 电机库控制程序架构图

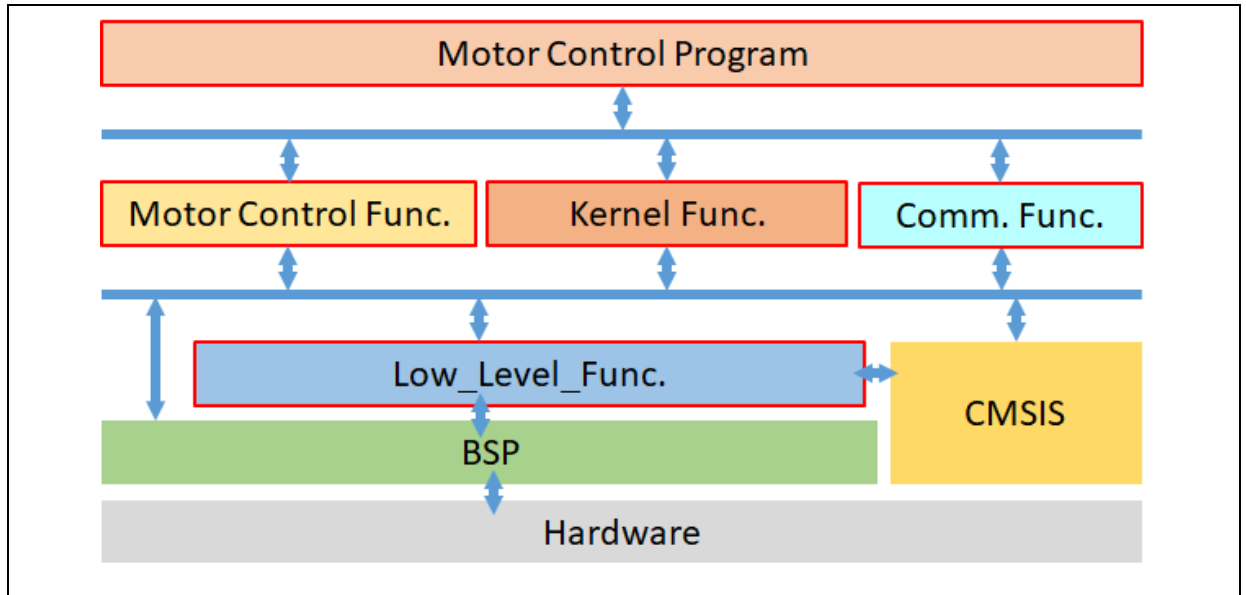
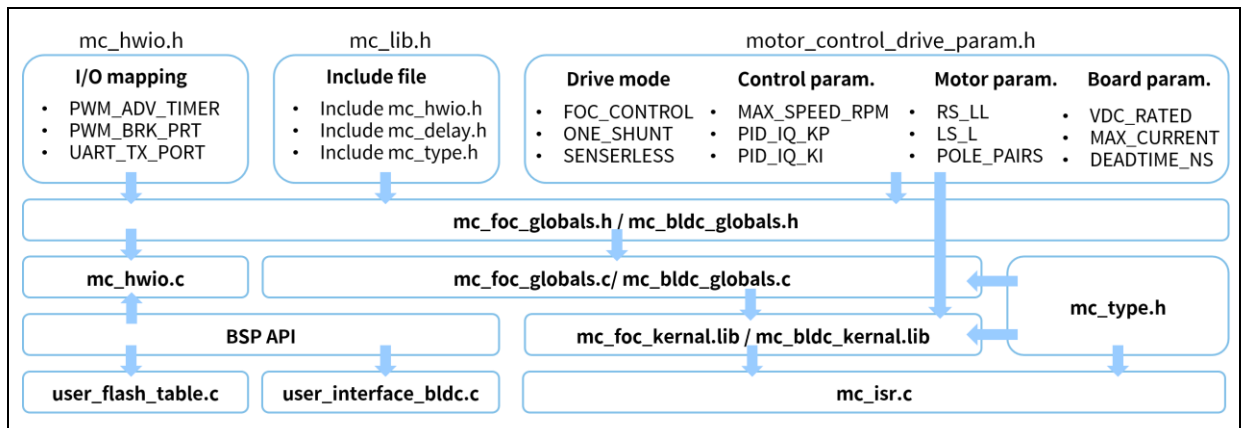


图 5 为电机库文档结构说明图，说明电机库文档中各文件之间的关系，其中 motor_control_drive.h 头文件提供用户自行输入电机控制型式、电机参数、控制板参数、控制器参数等，以及 mc_hwio.h 头文件可根据 MCU 外设与控制板连结的接脚对应关系，设定 MCU 外设规划参数。相关的设定参数于 mc_foc_globals.h (mc_blcdc_globals.h)整合后，于 mc_foc_globals.c(mc_blcdc_globals.c)中的函数设定变量初值，提供电机库函数使用。而在 MCU 外设规划部分，则由 mc_hwio.c 文件执行相关外设初使化设定。

图 5. 电机库文档结构说明图



开启 `bldc_1shunt_hall_sensor` 范例工程，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。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

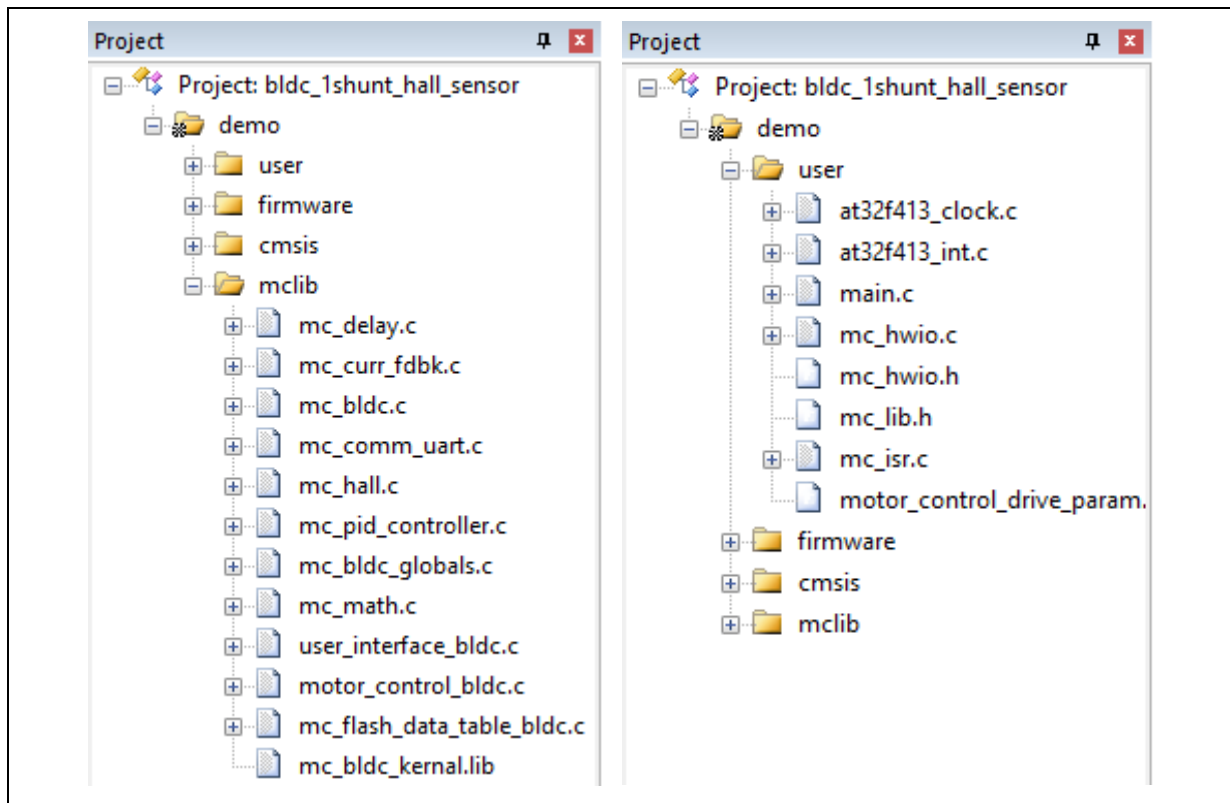


表 3 即为电机库文档说明总表，以下对于不同文档分别进行说明。

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.h	硬件 IO 接口宏定义配置
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
motor_control_bldc.c	电机控制相关函数
motor_control_bldc.h	电机控制相关函数声明
mc_bldc.c	六步方波相关函数
mc_bldc.h	六步方波控制相关函数声明
mc_bldc_globals.c	全局变量定义与默认值、全局函数定义
mc_bldc_globals.h	全局变量、全局函数声明、宏定义
user_interface_bldc.c	通讯界面相关函数
user_interface_bldc.h	通讯界面相关函数声明
mc_flash_data_table_bldc.c	写入 flash 参数表
mc_flash_data_table_bldc.h	写入 flash 参数表的相关配置

- 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。此工程范例配置为六步方波控制模式、单电阻电流采样、霍尔传感器。

表 4. 模式宏定义

宏定义名称	描述
SIX_STEP_CONTROL	六步方波控制模式
ONE_SHUNT	单电阻电流采样
HALL_SENSORS	霍尔传感器
COMPLEMENT	开启下臂 MOS 管开关与上臂 PWM 互补
GATE_DRIVER_LOW_SIDE_INVERT	开启下臂 MOS 反向输出
LOW_SPEED_CONTROL	低速电压控制模式(默认为开启，若注释掉则此功能不开启)

- 相关电机的控制参数如表 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：Is 电流 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(预设 1.5M 波特率)
UI_SAMPLE_CYCLE	电机应用工具参数取样频率(unit: PWM 计时器时基)
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)
I_SAMPLE_CHANGE_DUTY	改变电流取样点的 PWM DUTY 值 (unit: PWM 计时器时基)
I_SAMPLE_MIN_DUTY	可执行电流取样的 PWM 最小 DUTY 值 (unit: PWM 计时器时基)
SPEED_FILTER_TIMES	速度计算移动平均次数(unit:次)
MIN_SPEED_RPM	电机最低速度 (unit: rpm)
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)
ACC_SPD_SLOPE	加速度斜率 (unit: rpm/ms, 当速度环控制频率=1kHz)
DEC_SPD_SLOPE	减速度斜率 (unit: rpm/ms, 当速度环控制频率=1kHz)
SP_MAX_VOLT	外部命令来源的最大电压(unit: voltage)

宏定义名称	描述
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_IS_KP_DIV_LOG	母线电流控制比例增益除数 (Q16 mode)
PID_IS_KI_DIV_LOG	母线电流控制积分增益除数 (Q16 mode)
PID_IS_KP_DEFAULT	母线电流控制比例增益 (Q15 mode)
PID_IS_KI_DEFAULT	母线电流控制积分增益 (Q15 mode)
MAX_VOLT_CMD	低速电压控制最大电压命令限制值(Q15 mode)
MAX_V_CONTROL_SPD	电压控制的最大转速，高于此转速时切换到电流控制(unit: rpm)
MIN_I_CONTROL_SPD	电流控制的最小转速，低于此转速时切换到电压控制(unit: rpm)

- 关于驱动器的相关参数定义如表 6 所示，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，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(此范例之电路可参见 UM0011 低压电机控制开发板用户手册之 5.5 章节)
MAX_CURRENT	电机控制器输出最大电流 (unit: ampere)
MIN_CURRENT	电机控制器输出最小电流 (unit: ampere)
CURRENT_SPAN_SHIFT	电流标么化所需的位移数
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)
R_SHUNT	Shunt 电阻 (unit: Ω)
OP_GAIN	电流放大增益(此范例之电路可参见 UM0011 低压电机控制开发板用户手册之 5.3.2 章节)

宏定义名称	描述
CURR_OFFSET_VOLT	零电流偏移量(此范例之电路可参见 UM0011 低压电机控制开发板用户手册之 5.3.2 章节) (unit: voltage)
OVER_CURRENT_VREF	过电流临界点(此范例之电路可参见 UM0011 低压电机控制开发板用户手册之 5.4.2 章节) (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[2])
T0_C	NTC 的电压与温度关系的近似曲线之参数 T0(注[2])
dV_dT	NTC 的电压与温度关系的近似曲线之参数 dV/dT(注[2])
OVER_TEMP_THRESHOLD	过温临界点 (unit: Celsius degrees)
MC_ERROR_MASK	保护检测遮蔽

注[2]: 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表 7 所示，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。

表 7. 电机参数宏定义

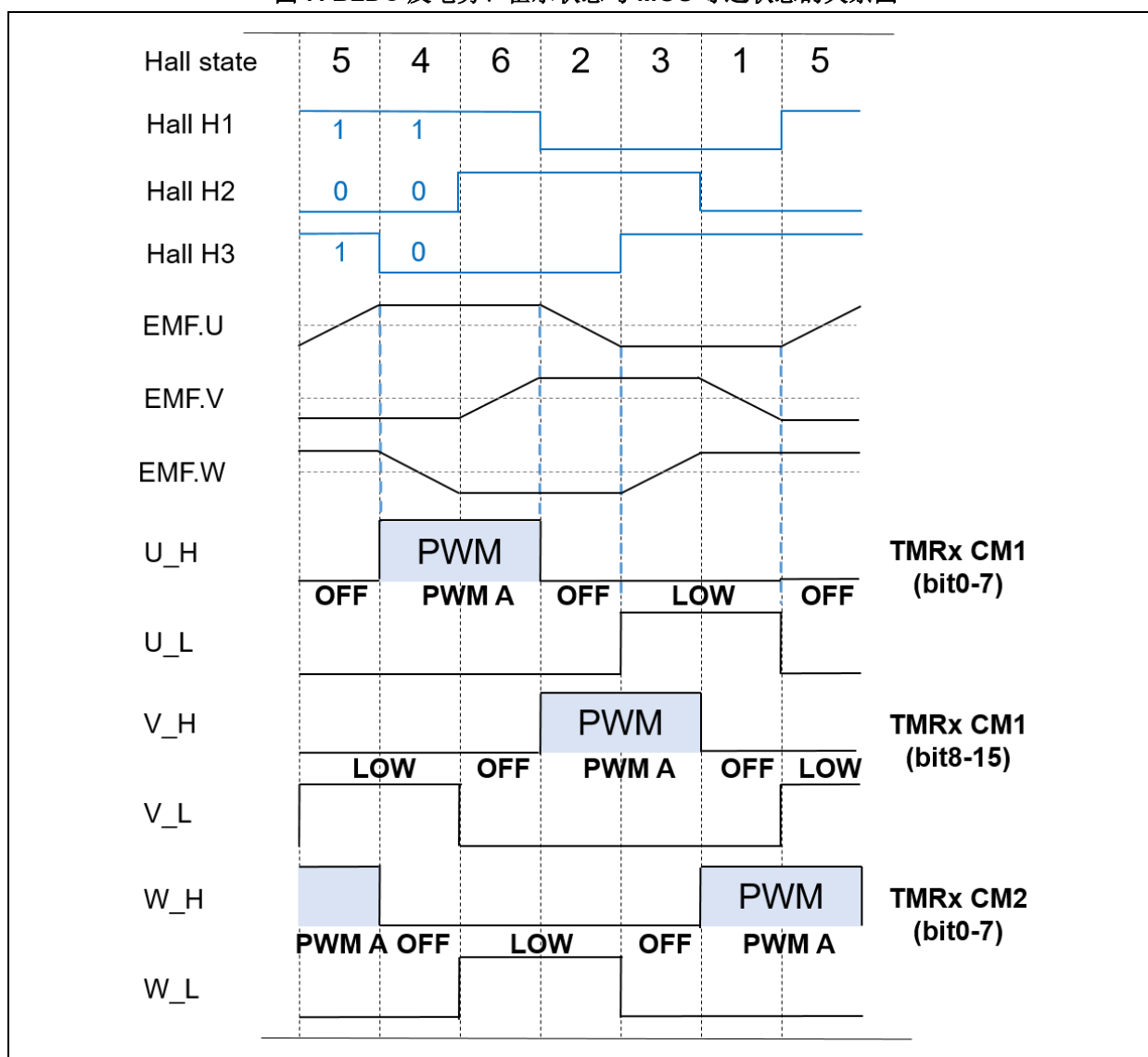
宏定义名称	描述
RS_LL	电机线间电阻值(unit: Ω)
LS_LL	电机线间电感值(unit: mH)
POLE_PAIRS	极对数
KE	电机 KE 值
OUTPUT_AH_BL_HALL_STATE	输出 A 相上臂 PWM 与 B 相下臂 ON 对应的电机霍尔状态(注[3])
OUTPUT_AH_CL_HALL_STATE	输出 A 相上臂 PWM 与 C 相下臂 ON 对应的电机霍尔状态(注[3])
OUTPUT_BH_CL_HALL_STATE	输出 B 相上臂 PWM 与 C 相下臂 ON 对应的电机霍尔状态(注[3])
OUTPUT_BH_AL_HALL_STATE	输出 B 相上臂 PWM 与 A 相下臂 ON 对应的电机霍尔状态(注[3])
OUTPUT_CH_AL_HALL_STATE	输出 C 相上臂 PWM 与 A 相下臂 ON 对应的电机霍尔状态(注[3])
OUTPUT_CH_BL_HALL_STATE	输出 C 相上臂 PWM 与 B 相下臂 ON 对应的电机霍尔状态(注[3])
HALL_STATE_ONE_NEXT_CW	HALL 状态 1 的下一个状态(正转)
HALL_STATE_TWO_NEXT_CW	HALL 状态 2 的下一个状态(正转)
HALL_STATE_THREE_NEXT_CW	HALL 状态 3 的下一个状态(正转)
HALL_STATE_FOUR_NEXT_CW	HALL 状态 4 的下一个状态(正转)
HALL_STATE_FIVE_NEXT_CW	HALL 状态 5 的下一个状态(正转)
HALL_STATE_SIX_NEXT_CW	HALL 状态 6 的下一个状态(正转)
HALL_STATE_ONE_NEXT_CCW	HALL 状态 1 的下一个状态(逆转)
HALL_STATE_TWO_NEXT_CCW	HALL 状态 2 的下一个状态(逆转)
HALL_STATE_THREE_NEXT_CCW	HALL 状态 3 的下一个状态(逆转)

宏定义名称	描述
HALL_STATE_FOUR_NEXT_CCW	HALL 状态 4 的下一个状态(逆转)
HALL_STATE_FIVE_NEXT_CCW	HALL 状态 5 的下一个状态(逆转)
HALL_STATE_SIX_NEXT_CCW	HALL 状态 6 的下一个状态(逆转)

图 7 为 BLDC 反电势、霍尔状态与 MOS 导通状态的关系图。以此图为例，A 相反电势最大且 B 相反电势最小所对应到的电机状态为 4，因此于 OUTPUT_AH_BL_HALL_STATE 参数定义为 4，同理，A 相反电势最大且 C 相反电势最小所对应到的电机状态为 6，因此于 OUTPUT_AH_BL_HALL_STATE 参数定义为 6，以此类推将对应的 6 个霍尔状态填入定义后即可配合不同电机输出正确的 PWM 波形。

此图例的 PWM 输出状态为一般下臂无反向输出的栅极驱动器(Gate driver)且上臂 PWM 切换时下臂不开互补的示意图，可以透过修改 motor_control_drive_param.h 文档内的定义修改成用户想要输出的模式，六步方波控制的三个范例工程内所采用的为下臂有反向输出且开启互补的模式。

图 7. BLDC 反电势、霍尔状态与 MOS 导通状态的关系图



注[3]. 根据电机反电势与霍尔状态的对应可设置不同的 MOS 上下臂开关状态。

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、表 9 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)
ADC1	ADC1_2_IRQn	N/A	ADC1 抢占通道转换(母线电流)
TMR1	TMR1_OVF_TMR10_IRQn	N/A	电机 BLDC 控制中断
TMR1	TMR1_BRK_TMR9_IRQn	N/A	PWM 输出禁能
TMR3	TMR3_GLOBAL_IRQn	N/A	捕获霍尔传感器讯号
USART1_TX	N/A	DMA1_CH2	USART1 TX 传输数据
USART1_RX	USART1_IRQn	DMA1_CH3	USART1 RX 接收数据
EXINT	EXINT15_10_IRQn	N/A	START/STOP 按钮(启动/停止电机)

表 9. 相关外设配置(以 AT32F421C8T7 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)
ADC1	ADC1_CMP_IRQn	N/A	ADC1 抢占通道转换(母线电流)
TMR1	TMR1_BRK_OVF_TRG_HALL_IRQn	N/A	电机 BLDC 控制中断、PWM 输出禁能
TMR3	TMR3_GLOBAL_IRQn	N/A	捕获霍尔传感器讯号
USART1_TX	N/A	DMA1_CH2	USART1 TX 传输数据
USART1_RX	USART1_IRQn	DMA1_CH3	USART1 RX 接收数据
EXINT	EXINT15_4_IRQn	N/A	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、PWM 开启/关闭等函数。在此仅列出此工程范例相关函数定义如表 10 所示。

表 10. 外设配置相关函数

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
gpio_hall_init	霍尔传感器 GPIO 配置
tmr_hall_init	霍尔传感器时钟(tmr)、crm clock 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
uart_init	UART 相关 crm clock、GPIO、UART 配置
button_switch_init	switch 按钮 GPIO、crm clock 配置(BLDC hall 传感器专用)
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(亮变暗、暗变亮)
led_blink	LED 闪烁
led_init	LED 初始状态设置
current_offset_tmr_setting	检测电流 offset 相关 tmr 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 11 所示。

表 11. 电机控制相关中断函数

函数名称	描述
ADVTMR_PWM_CYCLE_IRQ	TIMER1 更新中断函数: 电压环控制、电流环控制、电流取样时机点计算、UI 资料传输
ADVTMR_PWM_BRK_IRQ	TMR1 刹车输入中断函数: PWM 输出禁能
ADC_SHUNT_SAMP_READY_IRQ	ADC1 中断函数: 电流采样
HALL_CAPTURE_IRQ	TMR3 捕获中断函数: 霍尔信号输入捕获、获取转速
SysTick_Handler	系统中断函数(1ms): 状态机切换状态流程、速度环控制
BUTTON_EXINT_IRQHandler	外部 IO 中断函数: START/STOP 按钮(启动/停止电机)

5) mc_type.h 文档

- 此文档为全局枚举/类型定义。详细如表 12 所示。

表 12. 电机库枚举列表

枚举/类型名称	描述
firmware_id_type	区分不同电机控制模式的编号
motor_control_mode	电机控制模式(开环控制、电压控制、Id 调控模式、Iq 调控模式、转速控制、转矩控制、位置控制、编码器校准模式等)
ctrl_source_type	控制来源(软件控制、外部电路控制)
encoder_align_type	编码器校准状态
esc_state_type	电机控制流程状态机

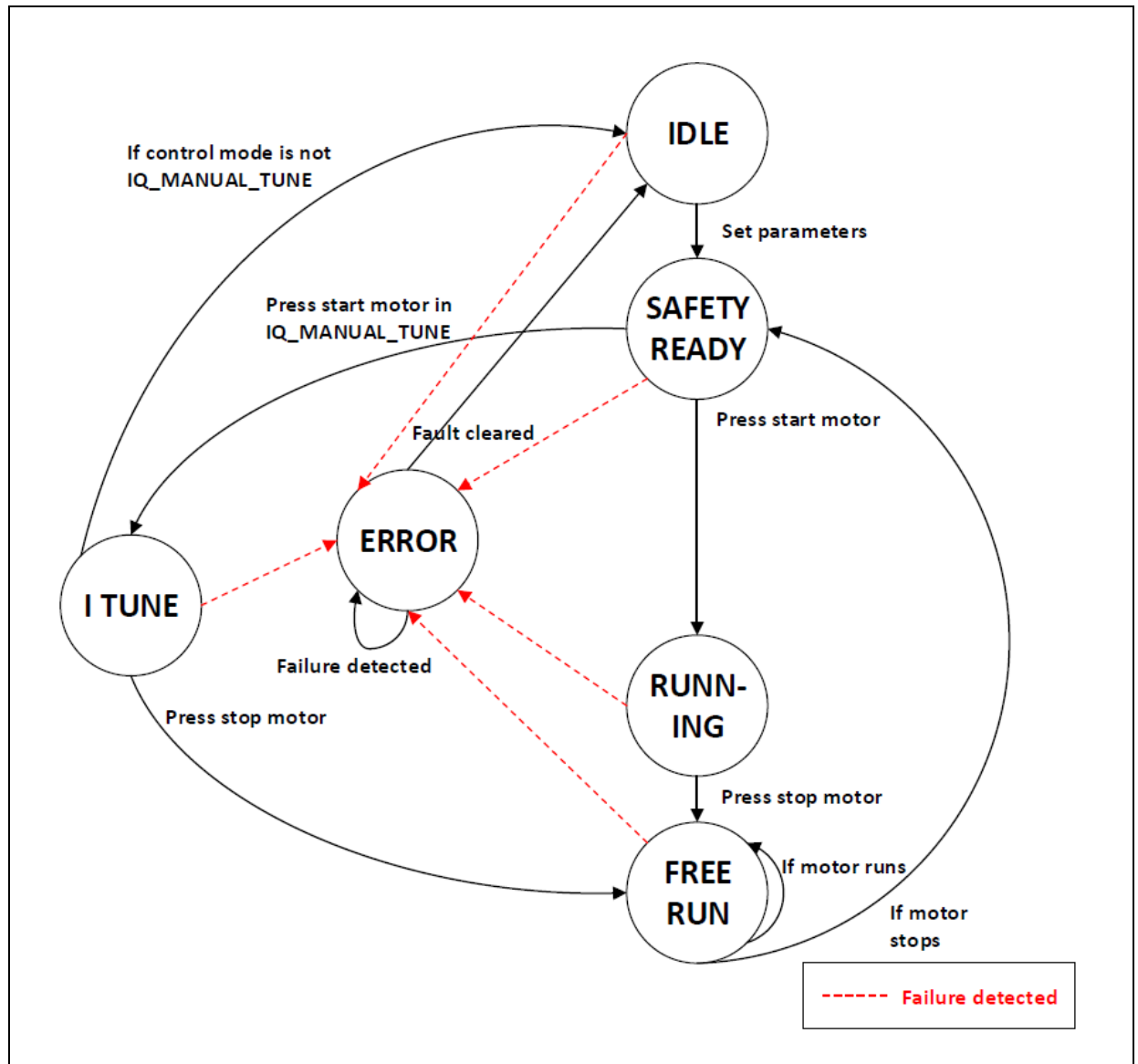
err_code_type	电机错误讯息类别(过压、欠压、过温、过流、编码器错误、霍尔错误、启动错误)
shunt_nbr_type	相电流检测模式(单电阻、双电阻、三电阻)
curr_offs_type	ADC 电流取样偏移值
current_type	电流相关变量
pid_ctrl_type	PID 控制环相关变量
pid_ctrl_dc_type	PID 控制环相关变量
speed_type	速度相关变量
value_type	变量类型
hall_sensor_type	霍尔传感器相关变量
ramp_cmd_type	斜坡命令相关变量
usart_data_index	UART 伫列相关变量
moving_average_type	移动平均相关变量
usart_config_type	UART 外设配置相关变量
ui_wave_param_type	界面波形显示相关变量
i_bus_type	母线电流相关变量
olc_type	开环控制相关变量

4 电机控制状态机

4.1 状态机描述

此电机工程范例的状态流程如图 8 中所示的状态机流程图，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。

图 8. 状态机流程图



它由以下状态组成：Idle、Safety ready、Running、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，遇警示状况解除后或马达停止也会回到此状态。

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。

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 **Safety 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。

Error

当有错误发生时将会跳至这个状态。

此电机工程范例各状态的起始状态、结束状态以及切换条件的详细说明如表 13 所示。

表 13. 各状态起始状态及切换条件

起始状态	结束状态	切换条件
IDLE	SAFETY REDAY	控制来源为上位机且初始参数设定完成
		控制来源为外部电路且 POTENTIOMETER 命令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 IQ_MANUAL_TUNE 时，按下上位机的 START MOTOR 或 START/STOP 按键
	I TUNE	当控制模式为 IQ_MANUAL_TUNE 时，按下上位机的 START MOTOR 或 START/STOP 按键
RUNNING	FREE_RUN	按下上位机的 STOP MOTOR 或 START/STOP 按键
FREE_RUN	SAFETY REDAY	当电机停止时
	FREE_RUN	当电机运转时
I TUNE	IDLE	当控制模式不为 IQ_MANUAL_TUNE 时
	FREE_RUN	按下上位机的 STOP MOTOR 或 START/STOP 按键
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。

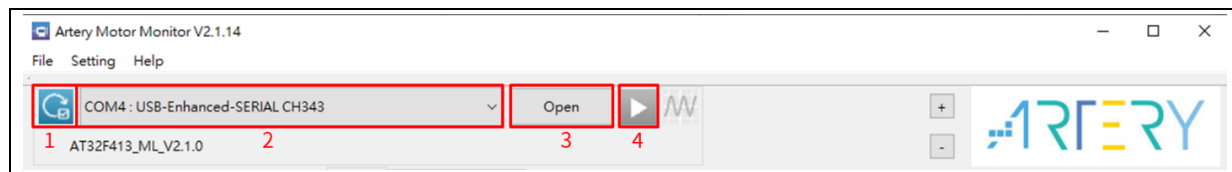
STEP-3

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 9。

图 9. 连接操作说明



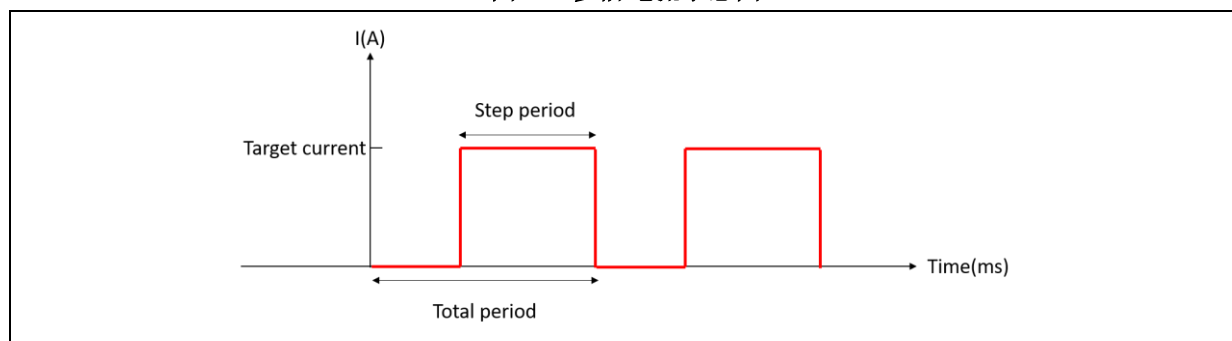
STEP-5

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 Q 轴电流调试

此模式下会产生一个步阶的电流，如图 10，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。

图 10. 步阶电流示意图



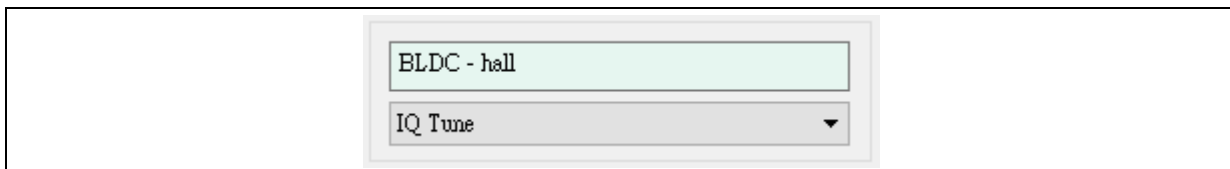
绘图时 Y 轴的电流值为转换后的数位值，转换公式如下：

$$\text{实际电流值(A)} = \frac{\text{数位电流值}}{32767} * \text{最大电流值(A)}$$

详细操作步骤如下：

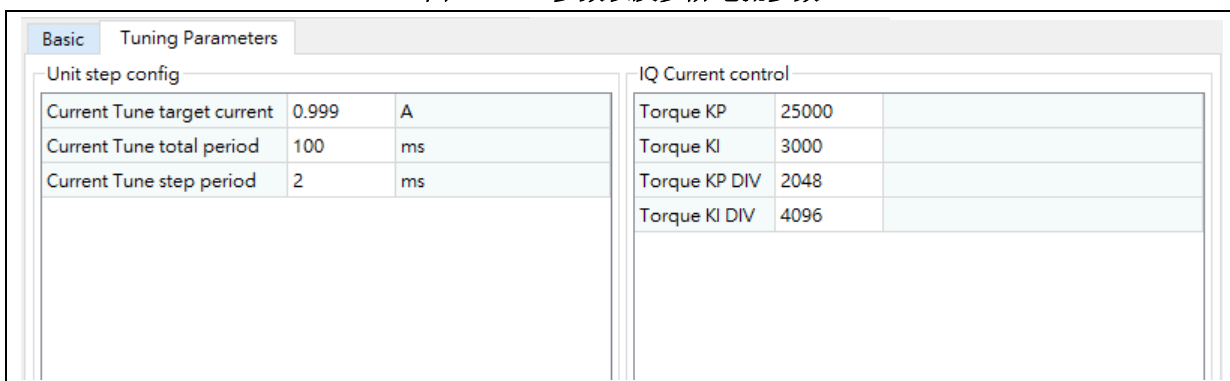
STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 IQ tune

图 11. 控制模式选取 IQ 电流环调试



STEP-2. 设置 PID 参数以及步阶电流参数，如图 12

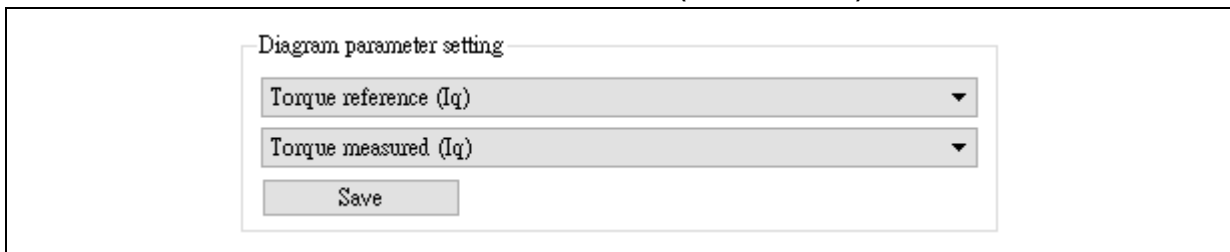
图 12. PID 参数以及步阶电流参数



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 Torque reference(Iq)以及 Torque measured(Iq)并按下 Save 键

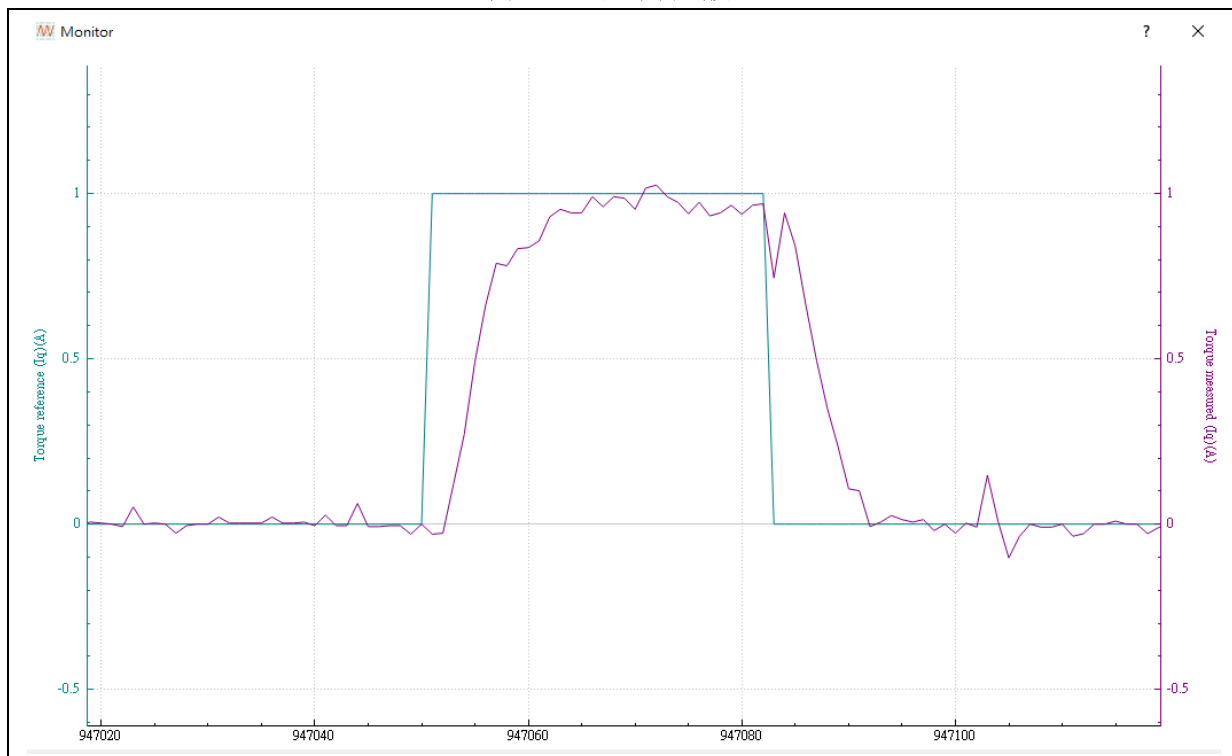
图 13. 调整通道监控参数(IQ 电流环调试)



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 14，若不如预期则按下停止电机，并重复 STEP-2~STEP-6

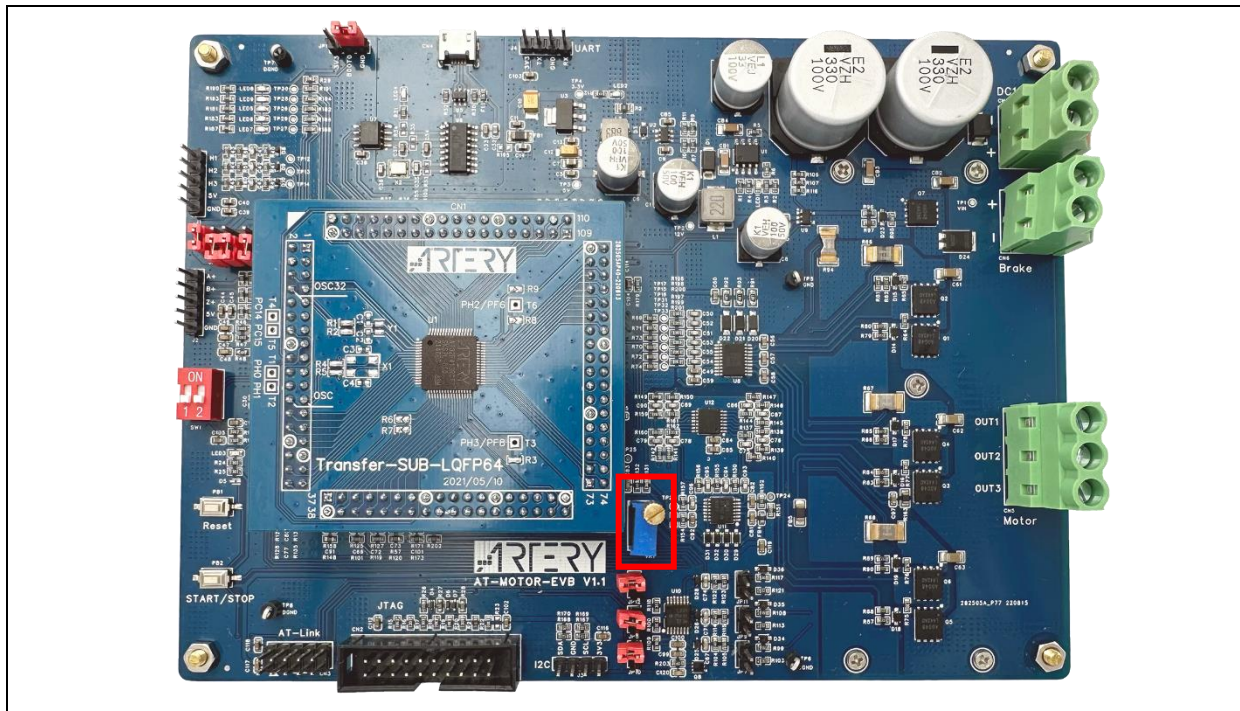
图 14. 电流环调试波形



5.3 外部/软件命令控制

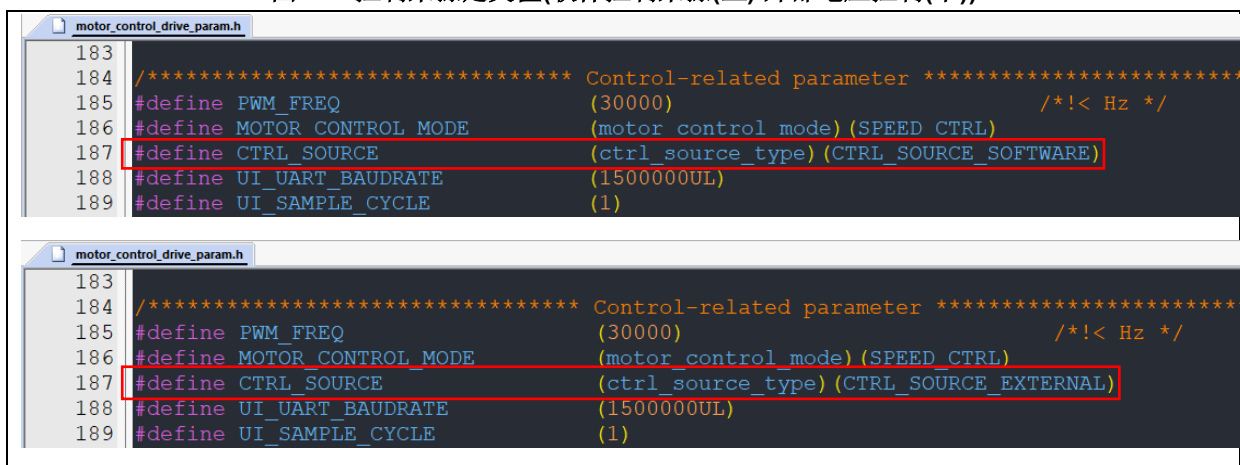
本范例工程支持两种控制来源，包含外部电压控制以及软件控制，外部电压控制为透过外部的电压调整速度或转矩的大小，在本低压电机控制开发板为调整图 15 处的电位器来控制命令值的大小，软件控制则为直接输入速度或转矩命令值来控制，本范例工程初始设定默认为软件控制模式。

图 15. 外部电压控制来源之电位器位置图



控制来源可以直接修改程序定义或是透过电机应用 PC 软件来做修改，程序定义值于 motor_control_drive_param.h 文档内的 CTRL_SOURCE，如图 16。透过 PC 软件修改的修改方式详见图 17、图 18、图 19，且根据用户选择不同的控制模式会对应不同的控制参数，若为速度控制模式时则会显示目标速度的控制栏位，如图 17，若选择转矩控制则会有目标转矩电流的控制栏位，如图 18。

图 16. 控制来源定义值(软件控制来源(上)/外部电压控制(下))



1) 外部电压控制来源

在来源选择的下拉菜单中若选择 external voltage control 则可以切换到外部来源控制，可通过外部的电压调整速度或转矩的大小，目标速度或目标转矩的栏位将会显示目前控制电压下所换算的控制速度或转矩大小。

注意：外部来源控制模式下本栏位不可修改。

图 17. 速度控制模式(外部电压控制来源)

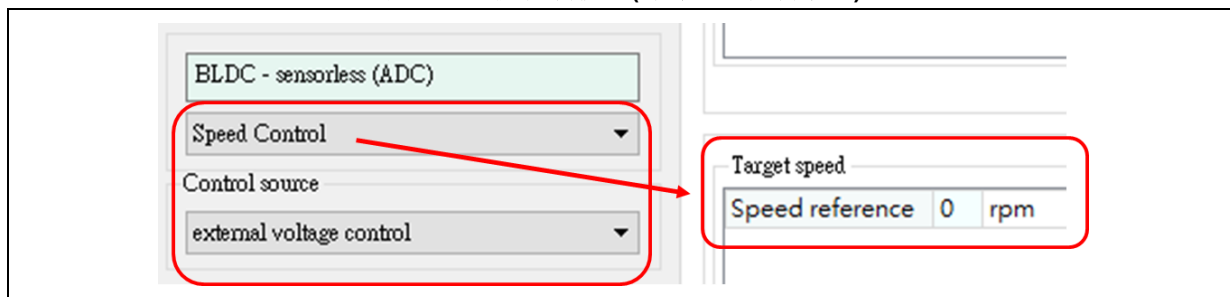
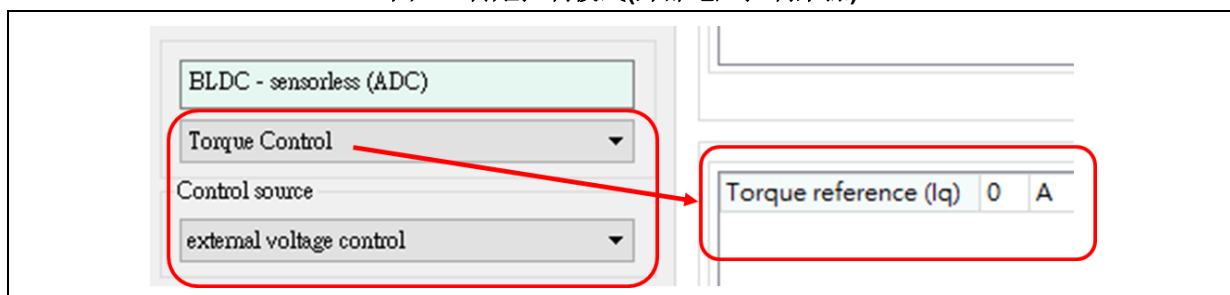


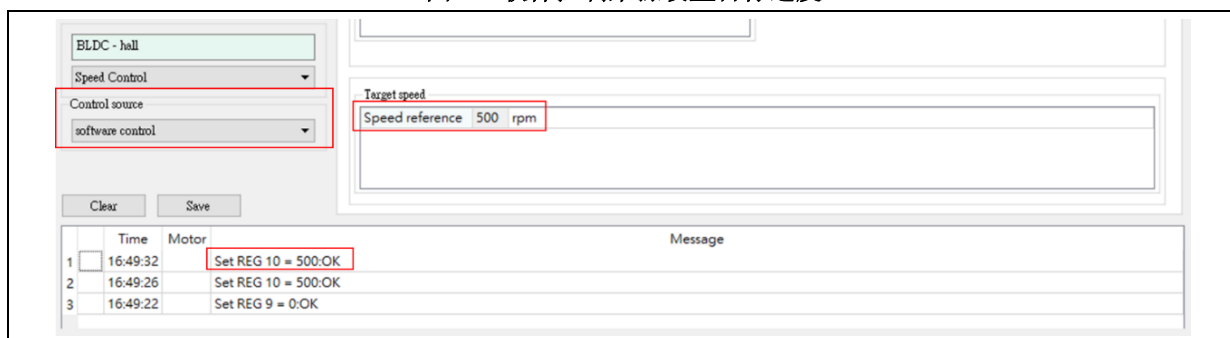
图 18 转矩控制模式(外部电压控制来源)



2) 软件控制来源

默认为软件控制模式，来源选择的下拉菜单中选择 **Software control** 也可切换至软件控制模式，如图 19，在此模式下通过修改 UI 接口的目标速度/转矩来调整电机控制的速度/转矩大小，双击此栏位即可修改数值，设定完成可看到下面栏位显示设置成功的信息。

图 19 软件控制来源设置目标速度



5.4 速度环控制

此模式下可调控的参数有速度环的 PID 参数以及加速度、减速度，调整完成后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 Speed Control

STEP-2. 设置速度 PID 参数以及加速度、减速度

图 20. PID 参数以及加速度、减速度设置

Speed control		
Speed KP	1000	
Speed KI	4	
Speed KP DIV	1024	
Speed KI DIV	1024	
Speed acceleration	8	rpm/ms
Speed deceleration	8	rpm/ms

STEP-3. 设置 Control source 为 software control 及目标速度参考值(Speed reference)

图 21. 目标速度值设置

Target speed		
Speed reference	0	rpm

STEP-4. 按下启动电机(Start Motor)按钮

STEP-5. 调整绘图区的参数监控为 Speed reference 以及 Speed measured

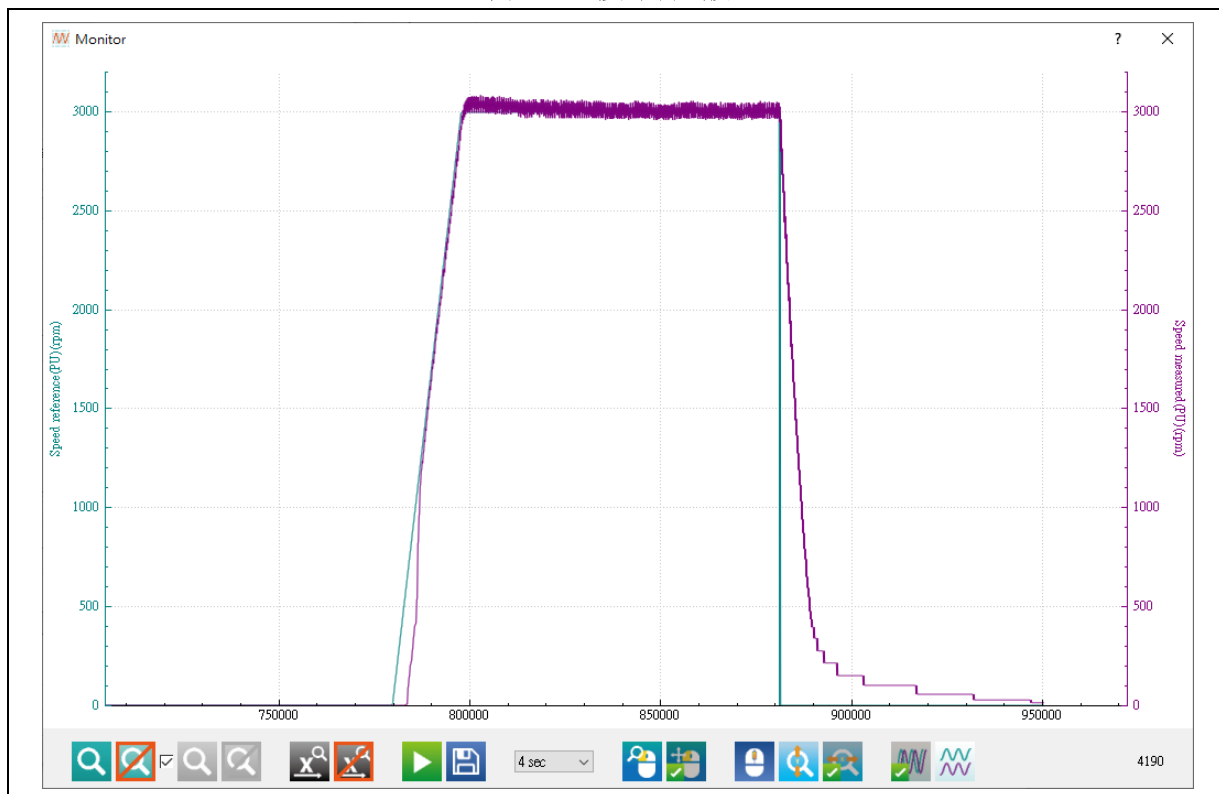
图 22. 调整信道监控参数(速度环调试)

Diagram parameter setting	
Speed reference	▼
Speed measured	▼
Save	

STEP-6. 点选绘图组  即可呼叫出波形窗口

STEP-7. 查看速度响应是否如预期，如图 23，若不如预期则按下停止电机，并重复 STEP-2~STEP-7

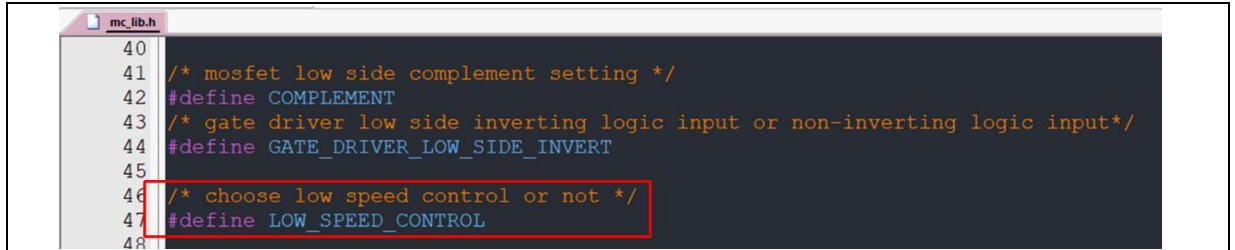
图 23. 速度环调试波型



5.5 低速电压控制调适

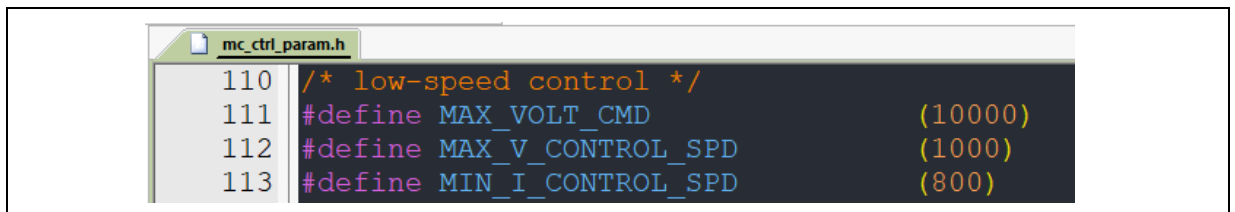
由于低转速时的电流非常小，使用电流控制时较难控制，因此本范例工程提供低速电压的控制方法，在低转速时使用电压控制，直到电流较大时切换回电流控制闭回路控制，可以透过 `mc.lib` 档案中的定义值选择是否开启此功能，如不开启则注释掉即可，如图 24。

图 24. 低速电压控制定义



若有开启此功能则可以透过 `mc_ctrl_param.h` 档案中的参数调整电压控制与电流控制的切换转速，`MAX_V_CONTROL_SPD` 为电压控制的最高转速，超过该定义值则改为电流控制，`MIN_I_CONTROL_SPD` 为电流控制的最低转速，低于该定义值则改为电压控制，如图 25。

图 25. 低速电压控制参数定义值



6 文档版本历史

表 14. 文档版本历史

日期	版本	变更
2023.03.02	2.0.0	最初版本
2023.04.27	2.0.1	1. 新增正逆转功能 2. 人机界面改版(baud rate:1.5M)
2023.10.05	2.1.0	修改文档架构、参数更新、人机界面改版

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，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) 汽车应用或汽车环境；(D) 航天应用或航天环境，且/或(E) 武器。因雅特力产品不是为前述应用设计的，而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，风险由购买者单独承担，并且独力负责在此类相关使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。

© 2023 雅特力科技 (重庆) 有限公司 保留所有权利