



AC78xx Motor Debug Guide

文档版本：2.3

发布日期：2023-03-13

© 2013 - 2023 杰发科技

本文档包含杰发科技的专有信息。未经授权，严禁复制或披露本文档包含的任何信息。

由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。

修订信息

版本	日期	作者	修订说明
1.0	2019-05-20	ATC	文档初版
2.0	2021-05-06	ATC	优化文档结构
2.1	2021-08-02	ATC	支持 ATC Motor Studio, 支持 IAR EWARM
2.2	2022-02-22	ATC	更新算法参数, 增加参考文档链接
2.3	2023-03-13	ATC	增加 AC7840x 开发板及 BLDC 常见调试问题说明

版权声明

本文档包含 AutoChips 公司的机密信息。禁止未经授权使用或披露本文档包含的信息。对因未经 AutoChips 公司授权而全部或部分披露此文档内容而给 AutoChips 公司带来的任何损失或损害，AutoChips 公司将追究责任。

AutoChips 公司保留对此处任何信息进行更改的权利，此处的信息如有变更，恕不另行通知。AutoChips 公司对使用或依赖此处包含的信息不承担任何责任。

本文档的所有信息均“按原样”提供，不提供任何形式的明示，暗示，法定或其他形式的保证。AutoChips 公司明确拒绝对适销性，非侵权性和针对特定用途的适用性方面的所有暗示保证。AutoChips 公司对本文档可能使用、包含或提供的任何第三方软件不提供任何担保，并且用户同意仅向该等第三方寻求与此相关的任何担保索赔。AutoChips 公司对于根据用户规格或为符合特定标准或公开论坛而产生的任何交付物，也不承担任何责任。

文档目录

修订信息	2
版权声明	3
文档目录	4
插图目录	6
表格目录	7
1 简介	8
1.1 本文目的	8
1.2 电机 Demo 板硬件介绍	8
1.2.1 硬件说明	8
1.2.2 接口描述	10
1.2.3 算法支持	15
2 MCU 仿真软件环境搭建	16
2.1 MCU 开发环境准备	16
2.2 工程及仿真器配置	16
2.3 软件路径	16
2.4 模块初始化	18
3 适配文件修改	19
3.1 电机参数适配	19
3.2 电路板参数适配	20
3.3 算法参数适配	24
3.3.1 FOC 控制算法参数适配	24
3.3.2 BLDC 参数适配	53

4	调试	62
4.1	带霍尔传感器 BLDC 调试.....	62
4.2	无感 BLDC 调试	64
4.3	带霍尔传感器 FOC 调试	66
4.4	带正交编码器 FOC 调试	68
4.5	带 Hall 传感器与 AB 编码器 FOC 调试.....	69
4.6	无感 FOC 调试.....	70
4.6.1	无感 FOC 滑模观测器调试	70
4.6.2	无感 FOC 磁链观测器调试	73
4.6.3	无感 FOC MRAS 观测器调试.....	74
4.7	母线电流估算调试.....	75
4.8	电机参数识别	76
4.9	Hall 传感器自学习	77
4.10	使用 Motor Studio 调试电机	77
5	典型问题.....	79
5.1	电路硬件相关配置计算.....	79
5.2	参数标么值、实际值对应关系说明.....	81
5.3	无传感 FOC 无法顺利切换闭环问题	82
6	缩略语.....	84
7	参考资源.....	85

插图目录

图 1-1 AC781x 电机 Demo 板硬件图	9
图 1-2 AC780x 电机 Demo 板硬件图	9
图 1-3 AC7840x 电机 Demo 板硬件图	10
图 1-4 Demo 板与电机连接图.....	12
图 2-1 MotorApp 文件结构	17
图 4-1 带霍尔的 BLDC 调试流程图.....	62
图 4-2 无感 BLDC 调试流程图	65
图 4-3 带霍尔的 FOC 调试流程图	67
图 4-4 正交编码器 FOC 调试流程图	68
图 4-5 霍尔传感器与 AB 编码器模式调试流程图.....	70
图 4-6 无感 FOC 滑模观测器调试流程图.....	71
图 4-7 滑模观测器参数合理估算效果图	73
图 4-8 Motor Studio 界面	78
图 4-9 ATC Motor Studio 调试电机流程图.....	78
图 5-1 U 相电流采样原理图	79
图 5-2 母线电压分压原理图	80
图 5-3 Debug 电路滤波原理图.....	81

表格目录

表 1-1 AC780x/ AC781x 系列电机 Demo 板 IDC 总线定义.....	10
表 1-2 AC7840x 系列电机 Demo 板总线定义	13
表 1-3 电机 Demo 板支持算法类型.....	15
表 3-1 电机参数宏定义适配表	19
表 3-2 电路板参数宏定义适配表.....	21
表 3-3 FOC 算法和六步方波 BLDC 控制算法的差异点	24
表 3-4 FOC 算法参数宏定义适配表.....	25
表 3-5 方波算法参数宏定义适配表	54
表 4-1 PWDT 模块 pinmux 定义	63
表 5-1 无感 FOC 无法进入闭环的原因及对应解决方法.....	82
表 6-1 术语缩写	84
表 7-1 相关资源简介	85

1 简介

1.1 本文目的

本文主要目的是为了介绍如何使用 AutoChips 公司电机 Demo 板进行电机控制。用户在 Demo 板上进行电机控制调试时，通过在 Demo 板程序上进行适配修改，可快速实现各型电机的控制开发工作。

1.2 电机 Demo 板硬件介绍

1.2.1 硬件说明

AutoChips 公司 Demo 板的分布方式有两种：隔离式和叠层式。其中隔离式指的是将 MCU 弱电与电机驱动强电分区(两块独立 PCB)隔离，采用总线接口连接。隔离式 Demo 板中将弱电分布于 MCU 控制板，将强电分布于功率驱动板。叠层式分布指的是上下两块 PCB 采用叠加连接形式。叠层式 Demo 板将 MCU 最小系统独立出来置于上层(简称 MCU 板)，其余部分则置于下层成为基板(强电与弱电隔离通过 PCB 的 Layout 设计保证)。叠层式的优点为可兼容更多 MCU 系列，例如 AC780x 系列 MCU 板与 AC7840x 系列 MCU 板可共享同一基板，便于用户在不同 MCU 系列之间切换使用。

AC780x 和 AC781x 系列电机 Demo 板均采用隔离式分布，由 MCU 控制板和功率驱动板两块板组成，两块板之间使用 34-PIN 的 IDC 排线相连。

- MCU 控制板模块包括 JTAG Debug 接口，CAN / LIN / UART / SPI 通讯接口，以及电机的 Hall 输入/编码器输入接口。
- 驱动功率板主要包括功率管供电输入、功率管预驱电路、功率 MOS 管以及 UVW 3 相电机线输出；功率管供电电源的输入范围为 $\leq 60V$ 。

AC780x 和 AC781x 系列 Demo 板实物如[图 1-1](#)及[图 1-2](#)所示：

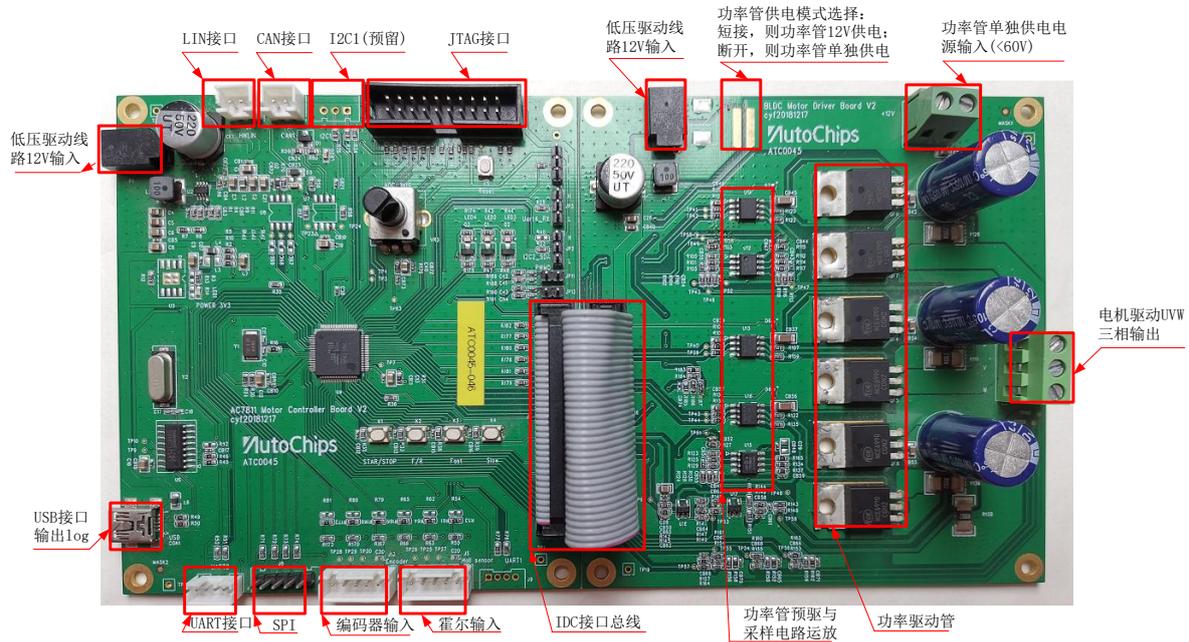


图 1-1 AC781x 电机 Demo 板硬件图

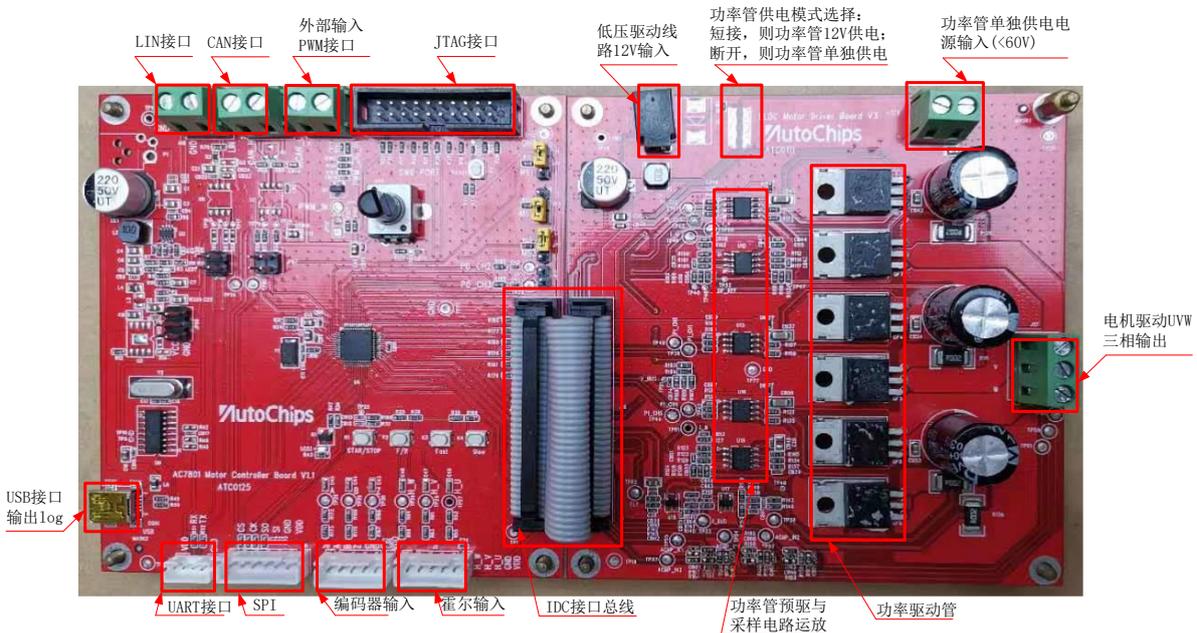


图 1-2 AC780x 电机 Demo 板硬件图

AC7840x 系列电机 Demo 板采用叠层式分布，由 AC7804x 系列 MCU 板和基板两块 PCB 组成，上下两块板之间采用两个标准的 2.54 双排针(32-PIN)叠加相连。AC7840x 系列 Demo 板对外通信，传感器信号采集等接口均分布于基板之上，实物如图 1-3 所示：

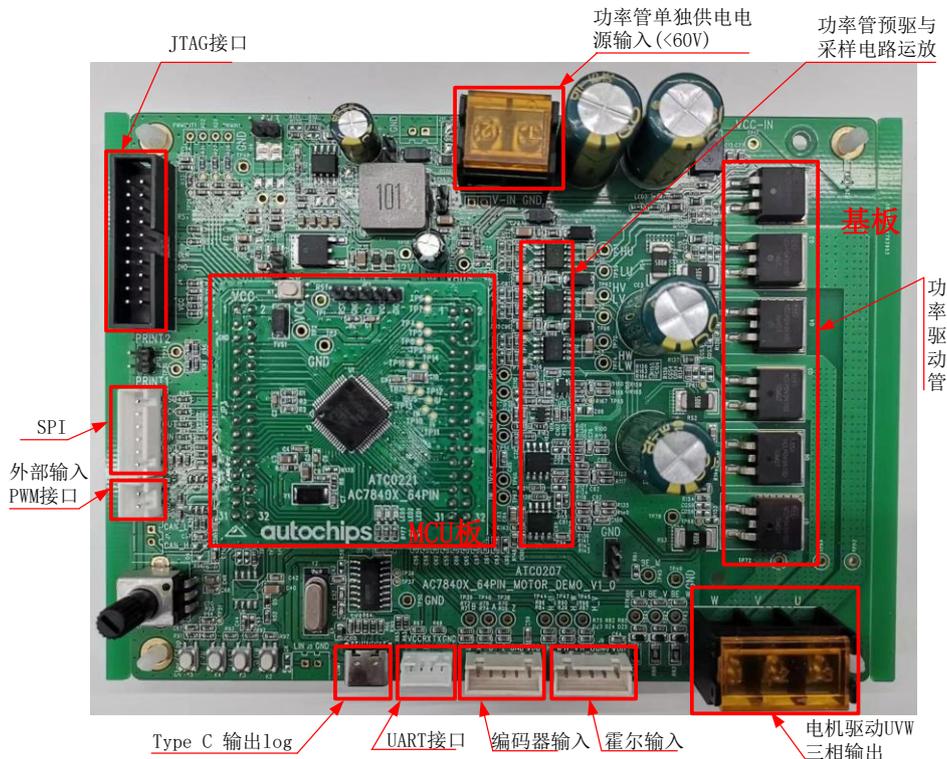


图 1-3 AC7840x 电机 Demo 板硬件图

1.2.2 接口描述

1.2.2.1 AC780x 和 AC781x 系列接口

对于 AC780x 和 AC781x 系列电机 Demo 板，其 MCU 控制板和功率板的 12V 输入只需接一路即可，如果电机额定电压为 12V，那么将功率板中的功率管供电模式选择跳点(靠近 D5)短接即可，不需要再额外供电；如果电机的额定电压大 12V，那么功率板就需要单独供电：需要将功率板上的功率管供电模式选择跳点(靠近 D5)断开，电机驱动电源从 J15 端输入。功率管供电模式选择跳点在 Demo 板上详细位置请参见图 1-1。

AC781x 与 AC780x 系列电机 Demo 板 MCU 控制板和功率板之间的 IDC 总线接口定义及连接关系一致，详细定义如表 1-1 所示。

表 1-1 AC780x/ AC781x 系列电机 Demo 板 IDC 总线定义

控制板总线 J2 引脚编号	控制板接口信号定义	功率板总线 J16 引脚编号	功率板接口信号定义	连接信号备注
1	ADC_IN4	34	XADC_IN4	ADC 通道 4，采 A 相电流

控制板总线 J2 引脚编号	控制板接口信号定义	功率板总线 J16 引脚编号	功率板接口信号定义	连接信号备注
2	ADC_IN5	33	XADC_IN5	ADC 通道 5, 采 B 相电流
3	ADC_IN3	32	XADC_IN3	ADC 通道 3, 采 C 相反电动势
4	ADC_IN6	31	XADC_IN6	ADC 通道 6, 采 C 相电流
5	ADC_IN2	30	XADC_IN2	ADC 通道 2, 采 C 相反电动势
6	ADC_IN7	29	XADC_IN7	ADC 通道 7, 采母线电流
7	ADC_IN1	28	XADC_IN1	ADC 通道 1, 采 B 相反电动势
8	ADC_IN8	27	XADC_IN8	ADC 通道 8, 采母线电压
9	ADC_IN0	26	XADC_IN0	ADC 通道 0, 采 A 相反电动势
10	ADC_IN9	25	NC	预留, 未连接
11	DGND	24	DGND	数字地
12	DGND	23	DGND	数字地
13	VDD	22	M2_VDD	控制板 5V 供电
14	VDD	21	M2_VDD	控制板 5V 供电
15	DGND	20	DGND	数字地
16	DGND	19	DGND	数字地
17	PWM0_CH0	18	NC	预留, 未连接
18	PWM_FAULT1	17	XPWM_FAULT1	过流检测故障
19	PWM0_CH1	16	NC	预留, 未连接
20	SPI2_SCK	15	NC	预留, 未连接
21	SPI2_MISO	14	NC	预留, 未连接
22	SPI2_MOSI	13	NC	预留, 未连接

控制板总线 J2 引脚编号	控制板接口信号定义	功率板总线 J16 引脚编号	功率板接口信号定义	连接信号备注
23	UART5_TX	12	NC	预留, 未连接
24	PWM2_CH4	11	PWM2_CH4	PWM2 通道 4 输出
25	UART5_RX	10	NC	预留, 未连接
26	PWM2_CH5	9	PWM2_CH5	PWM2 通道 5 输出
27	DGND	8	DGND	数字地
28	PWM2_CH0	7	PWM2_CH0	PWM2 通道 0 输出
29	DGND	6	DGND	数字地
30	PWM2_CH1	5	PWM2_CH1	PWM2 通道 1 输出
31	B+12V	4	M2_12V	12V 输入电压
32	PWM2_CH2	3	PWM2_CH2	PWM2 通道 2 输出
33	B+12V	2	M2_12V	12V 输入电压
34	PWM2_CH3	1	PWM2_CH3	PWM2 通道 3 输出

以 57BL55S06 电机为例, 电机与 Demo 板之间的接线在 AC781x 电机 Demo 板和 AC780x 电机 Demo 板上是一致的, 接线方法如图 1-4 所示。



图 1-4 Demo 板与电机连接图

其中，电机端出线分两部分，一部分为电机三相驱动线 3 根，UVW 三相依次接 Demo 板 J17 接口上面的 U, V, W 端口；另一部分为霍尔工作接口共 5 根线，分别为 Hall_W、Hall_V、Hall_U、GND、VDD，依次接 Demo 板 J5 接口上第 1、2、3、4、5 号引脚。

1.2.2.2 AC7840x 系列接口

对于 AC7840x 系列电机 Demo 板，其唯一供电输入接口位于基板 J1 端口，输入电压范围 12V~60V，在 Demo 板上详细位置请参见图 1-3。

AC7840x 系列 MCU 板和基板之间通过两个 32PIN 总线直插连接，其中 JP2 和 JP5 引脚对应一致，JP3 和 JP4 引脚对应一致，详细的总线接口定义如表 1-2 所示。

表 1-2 AC7840x 系列电机 Demo 板总线定义

JP2 与 JP5 引脚编号	信号定义	连接信号备注	JP3 与 JP4 引脚编号	信号定义	连接信号备注
1	V_TEMP	Mos 温度采样 AD 信号	1	VDD	MCU 电源
2	VBUS	母线电压	2	VDD	MCU 电源
3	PWM3_CH0_U+	PWM3 通道 0 输出，用于 U 相上桥驱动	3	VDD	MCU 电源
4	PWM3_CH1_U-	PWM3 通道 1 输出，用于 U 相下桥驱动	4	GND	地信号
5	PWM3_CH2_V+	PWM3 通道 2 输出，用于 V 相上桥驱动	5	GND	地信号
6	PWM3_CH3_V-	PWM3 通道 3 输出，用于 V 相下桥驱动	6	GND	地信号
7	PWM3_CH4_W+	PWM3 通道 4 输出，用于 W 相上桥驱动	7	ADC_IN11	ADC 通道 11，预留
8	PWM3_CH5_W-	PWM3 通道 5 输出，用于 W 相下桥驱动	8	ADC_IN10	ADC 通道 10，预留
9	GND	地信号	9	Print_1	Debug 打印通道 1
10	GND	地信号	10	Print_2	Debug 打印通道 2

JP2 与 JP5 引脚编号	信号定义	连接信号备注	JP3 与 JP4 引脚编号	信号定义	连接信号备注
11	IBUS_SUM	母线电流滤波信号	11	PWM_R2	PWM 输出通道, 预留
12	IBUS	母线电流	12	JTAG_TDO	JTAG 仿真 TDO 信号
13	IBUS_CMP	过流检测信号	13	JTAG_TDI	JTAG 仿真 TDI 信号
14	IU_AD	U 相电流 AD	14	SWD_CLK	JTAG 仿真时钟
15	IW_AD	V 相电流 AD	15	NRST_1	MCU 硬件复位信号
16	IV_AD	W 相电流 AD	16	SWD_DIO	JTAG 仿真数据
17	GND	地信号	17	SPI1_SOUT	SPI1 数据输出端
18	GND	地信号	18	SPI1_CS0	SPI1 片选 0 信号
19	UART1_TX	串口 1 发送端	19	SPI1_SIN	SPI1 数据输入端
20	UART1_RX	串口 1 接收端	20	SPI1_SCK	SPI1 通信时钟
21	GND	地信号	21	SPEED_PWM	ADC 通道 0, 采 A 相反电动势
22	GND	地信号	22	CAN_STB	CAN 通信 STB
23	Encode_A	正交编码器 A 相	23	CAN0_TX	CAN0 通信发送端
24	Encode_B	正交编码器 B 相	24	CAN0_RX	CAN0 通信接收端
25	Encode_Z	正交编码器归零信号	25	LIN_SLP	LIN 通信休眠信号
26	HALL_U	霍尔 U 相	26	PWM_R1	PWM 输入通道, 预留
27	HALL_V	霍尔 V 相	27	GND	地信号
28	HALL_W	霍尔 W 相	28	UART0_TX	串口 0 发送端
29	BEMF_V	反电动势 V 相	29	GND	地信号
30	BEMF_U	反电动势 U 相	30	UART0_RX	串口 0 接收端

JP2 与 JP5 引脚编号	信号定义	连接信号备注	JP3 与 JP4 引脚编号	信号定义	连接信号备注
31	BEMF_W	反电动势 W 相	31	SPEED_AD	滑动变阻器调速 AD 采样口
32	BEMF_MID	反电动势中性点	32	KEY_AD	按键 AD 采样口

1.2.3 算法支持

如表 1-3 所示，ATC 电机 Demo 板可以支持以下类型的电机的开发和调试。

表 1-3 电机 Demo 板支持算法类型

电机类型	控制方式	电压范围
带霍尔的 BLDC 控制	6 步方波控制	≤ 60V
无霍尔的 BLDC 控制	6 步方波控制(使用反电动势)	≤ 60V
带霍尔的 PMSM 控制	FOC	≤ 60V
无霍尔的 PMSM 控制	无传感 FOC	≤ 60V
带编码器的 PMSM 控制	FOC	≤ 60V
带编码器与霍尔的 PMSM 控制	FOC	≤ 60V
无传感器的异步电机控制	无传感 FOC	≤ 60V
带编码器的异步电机控制	FOC	≤ 60V

2 MCU 仿真软件环境搭建

2.1 MCU 开发环境准备

MCU 仿真软件采用 ARM 公司 Keil，用户可自行下载 Keil MDK Version 5 软件，并运行安装程序，建议安装 v5.23 以上版本并避免使用 v5.30 版本（因 ARM Keil MDK v5.30 版本官方确认存在 bug）。

当前 Motor Demo 使用的 Keil 开发环境必须包括 CMSIS 安装包，用户可自行前往 [AutoChips 官网](#) 下载最新版本；安装包命名格式为 AutoChips.AC78xx_DFP.x.x.x.pack，其中“x.x.x”为版本号。

同时也支持 IAR Embedded Workbench for ARM（IAR EWARM V9.32.1 及以上版本），使用 IAR EWARM 的用户可参考 [Autochips 官网](#) 电机例程。

2.2 工程及仿真器配置

在本地新建工程及工程模式配置，仿真器与 Demo 板之间的配置连接等详细操作，用户可参考官网软件说明文件《AC781x 入门指南》或《AC780x 入门指南》。

2.3 软件路径

ATC MCU 电机控制算法的软件为 Motor_App.rar，解压这个压缩包之后即可看到电机控制算法的软件结构，如图 2-1 所示。主要包括以下几个部分：

(1) Drivers:

Drivers 文件夹为 MCU 的驱动支持包，内含 ATC_Driver 与 Device 两个文件夹，分别是 Autochips AC78xx 系列 MCU 的驱动文件与启动文件。

(2) IAR-EWARM:

IAR-EWARM 文件夹是 IAR EW 的工程路径，其中包含电机控制算法 IAR 工程的 workspace 文件、Bldc_App 工程文件，以及支持 IAR EW 工程的 flashloader 文件夹。

(3) MDK-ARM:

MDK-ARM 文件夹是 MDK keil 的工程路径，其中包含电机控制算法 MDK 工程的 Bldc_App 与 Motor_App 工程文件。

(4) Motor-Master:

Motor-Master 文件夹是电机控制软件算法的文件路径，其中包含 Bldc、Foc 与 User 三个文件夹。

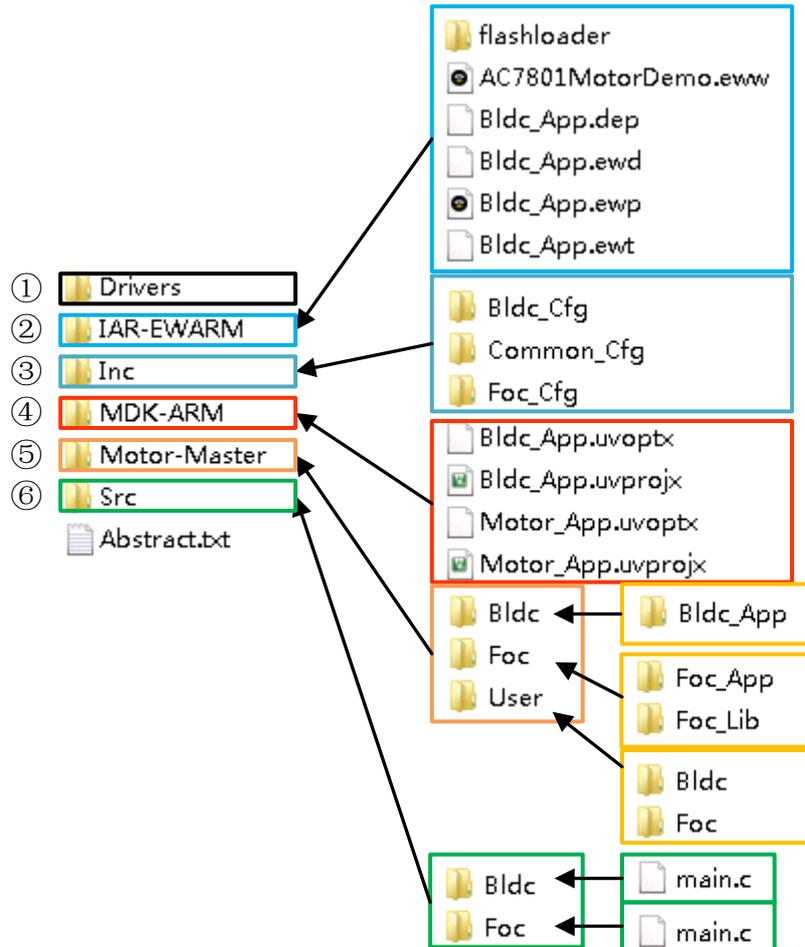


图 2-1 MotorApp 文件结构

Bldc 文件夹： 内含 Bldc_App，是方波控制算法软件代码源文件的集合。

Foc 文件夹： 内含 Foc_App 与 Foc_Lib，分别是矢量控制算法软件代码源文件集合以及电机算法库。

User 文件夹： 内分 Bldc 与 Foc，是对应控制算法下用户层功能代码源文件集合。

(5) **Inc:**

Inc 文件夹包含三个子文件夹：**Bldc_Cfg**、**Foc_Cfg** 与 **Common_Cfg**，分别对应方波控制软件算法配置、矢量控制软件算法配置，以及共用的硬件与电机参数配置文件。

- a) **Bldc_Cfg:** 内含 Bldc_parameters_define.h，用于配置方波控制算法软件的算法参数。
- b) **Foc_Cfg:** 内含 drive_parameters_define.h，用于配置矢量控制算法软件的算法参数；protector_parameters_define.h，用于配置矢量控制算法软件的保护功能参数。

- c) `Common_Cfg`: 内含 `hwboard_parameters_define.h`, 用于配置电机控制板的硬件参数; `motor_parameters_define.h`, 用于配置电机参数。

(6) `Src`:

`Src` 文件夹包含两个子文件夹: `Bldc`、`Foc`, 分别是方波控制软件算法与矢量控制软件算法代码的 `main` 源文件。

2.4 模块初始化

电机控制算法需要用到 `TIMER` / `PWM` / `PWDT` / `ADC` / `GPIO` 等几个模块, 需要分别对这些模块进行初始化设置, 详细可以参考《`ATC_AC78xx_MotorApp_Development_Guide_CH`》。

3 适配文件修改

3.1 电机参数适配

对于市场上种类繁多的电机，各厂家设计的电机参数都不尽相同，因此用户进行开发时必须清楚其技术参数及基本测量方法，详细电机参数测量方法可参考《ATC 电机主要参数介绍及测量方法说明》。Demo 板中为了适应不同电机的应用，在 MotorApp 中对使用的电机参数进行了明确定义，用户可根据电机的特性进行软件设置，适配不同电机应用开发。

如表 3-1 所示，对 motor_parameters_define.h 中定义的电机参数进行详细适配信息说明。

表 3-1 电机参数宏定义适配表

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
STATOR_RS	电机定子绕阻阻值	单位: mΩ	1. 查阅电机参数手册 2. 用电桥在 100Hz 测试	影响无感 FOC 模式下电机模型的准确性及无感观测运算
ROTOR_RS	电机转子绕阻阻值	单位: mΩ	永磁同步电机转子绕组为 0	影响异步电机控制
LS	电机定子相电感	单位: μH	1. 查阅电机参数手册 2. 可用 (LD+LQ) / 2 填入，无感 FOC 暂时未使用，为预留	影响无感 FOC 模式下电机模型的准确性及无感观测运算
LD	D 轴电感	单位: μH	用电桥在 1kHz 测试两相间电感，缓慢旋转电机一圈。LD 为最小电感值/2，LQ 最大电感值/2	
LQ	Q 轴电感	单位: μH		
LR	电机转子电感	单位: H	转子电感 LR 无法直接测量，可用 LS 值近似代替	影响异步电机控制
LM	电机定转子互感	单位: H	可用空载试验进行测量	
POLE_PAIR_NUM	电机极对数	≥1	1. 查阅电机参数手册 2. 用公式推导极对数 p，用示波器可测出相电流频率 f(Hz)，用转速计可测出电	影响电机转速转换，电机转速的取值范围及电机转速调速斜率

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
			机转子转速 $n(\text{rpm})$ ，则可由 $n = 60 * f / p$ 推导出电机极对数 p	
INERTIA	负载转动惯量	单位: $10\text{E}-7\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1. 空载转动惯量可查阅电机参数手册 2. 通过其他设备拖动电机转子，由拖动力矩和转子加速度推算转动惯量	影响 PID 运算参数的整定和控制效果
VOLTAGE_CONSTANT	电压常数	单位: V/krpm	1. 查阅电机参数手册 2. 询问电机设计厂商	电机的反电动势常数
MAX_CURRENT	电机峰值电流	单位: A	查阅电机参数手册	电流标么基值，一般设置要大于电机实际运行的最大相电流峰值
MAX_TORQUE	电机最大转矩	单位: $\text{mN}\cdot\text{m}$	1. 查阅电机参数手册 2. 询问电机设计厂商	转矩标么基值，预留
MOTOR_MAX_SPEED_RPM	电机最大转速	单位: rpm	查阅电机参数手册及电机铭牌标识	转速标么基值，需设置大于电机实际运行的最高转速，影响电机转速转换，电机转速的取值范围及电机转速调速斜率
RATE_POWER	电机额定功率	单位: W	查阅电机参数手册及电机铭牌标识	算法未使用，预留

3.2 电路板参数适配

Demo 板中为了适应不同电机的控制需求应用，在 Demo 板硬件电路上做了大量兼容设计。电机控制系统的实现需硬件电路和软件的配合工作，因此在 Demo 程序中需对硬件电路配置进行定义说明，确保程序配置与硬件状态统一。

如表 3-2 所示，对 hwboard_parameters_define.h 中定义的 Demo 板硬件电路参数进行详细适配信息说明。

表 3-2 电路板参数宏定义适配表

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
GATE_DRIVER_HIGH_HIGH / GATE_DRIVER_HIGH_LOW / GATE_DRIVER_LOW_HIGH / GATE_DRIVER_LOW_LOW	PWM 通道输出极性与逆变电路功率器件预驱极性	<p>GATE_DRIVER_HIGH_HIGH: PWM 通道输出极性为高有效, 且预驱的驱动极性与其相同;</p> <p>GATE_DRIVER_HIGH_LOW: PWM 通道输出极性为高有效, 且预驱将逆变电路下桥臂的 PWM 输出翻转;</p> <p>GATE_DRIVER_LOW_HIGH: PWM 通道输出极性为低有效, 且预驱将逆变电路上桥臂的 PWM 输出翻转;</p> <p>GATE_DRIVER_LOW_LOW: PWM 通道输出极性为低有效, 且预驱将逆变电路上下桥臂的 PWM 输出均翻转。</p>	<p>根据电路原理图中电机驱动电路, 查阅 MOS 管及预驱动芯片手册。</p> <p>AC78xx 系列除 AC781x 高压 demo 板默认打开 GATE_DRIVER_LOW_LOW 外, 其余 demo 板均默认打开 GATE_DRIVER_HIGH_HIGH。</p>	<p>表征 MCU 的 PWM 模块通道输出极性与硬件电路功率器件的预驱极性的模式组合。</p> <p>宏定义与实际硬件电路不匹配时可能导致逆变电路上下桥臂直通。</p> <p>正式调试电机前必须确认, 同相上下桥不能同时导通, 否则功率电源通过上下桥直接短路, 大电流可烧坏 MOS 电路</p>
PHASE_UVW_POLARITY	MCU 端 PWM 通道输出极性	<p>ACTIVE_HIGH: 三相对应 PWM 通道输出极性为上桥臂高有效导通</p> <p>ACTIVE_LOW: 三相对应 PWM 通道输出极性为上桥臂上桥低有效导通</p>	根据电路原理图中电机驱动电路, 查阅 MOS 管及预驱动芯片手册	影响 PWM 模块通道配置。配置错误可能导致与功率器件预驱的错误配合, 使逆变电路上下桥臂直通。正式调试电机前必须确认, 同相上下桥不能同时导通, 否则功率电源通过上下桥直接短路, 大电流可烧坏 MOS 电路
HW_DEAD_TIME_NS	功率器件驱动电路死区时间	单位: ns	根据电路原理图中电机驱动电路, 查阅 MOS 管及预驱动芯片手册	影响功率器件导通时间

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
SW_DEAD_TIME_NS	PWM 模块通道死区时间	单位：ns，取值范围 0~10500	查询芯片手册	影响死区插入的时间长短，默认 4 分频设置，PWM 死区时间插入控制寄存器计数值最大为 63，系统主频越高，允许的最大死区时间插入值越小。 SW_DEAD_TIME_NS = (4 * 63 / PWM_CLK) 其中 PWM_CLK 单位为 1000Mhz，因此： AC780x 允许值为 10500ns；AC781x 允许值为 5250ns；AC7840x 允许值为 2100ns。
SAMPLE_TRIG_EDGE	单电阻采样触发边沿选择	0: 上升沿触发 1: 下降沿触发	根据单电阻采样调试效果设置数值	影响单电阻采样，当 PWM 频率较高时，上升沿触发采样可能异常，导致 FOC 无法重构三相电流
SAMPLE_HOLD_TIME	单电阻采样保持时间	单位：ns，0~10000	根据单电阻采样调试效果设置数值	影响单电阻采样：设置过大会使电流采样失效，影响电机控制；设置过小会导致无法进行电流采样
SAMPLE_RISE_TIME	单电阻采样上升时间			
VBUS_ATTENUATE_FACTOR	母线电压分压系数	常数：>1	查阅电路原理图中母线电压采样配置并分析其分压系数	影响母线电压采样的结果
MAX/MIN_BUS_VOLTAGE	电机控制器母线电压最大/小值	单位：V	根据电机控制器母线电压及功率电路器件耐压能力设置最大母线电压；根据电机控制的需求设置最小母线电压	设置不合理可能导致电压保护的漏报或误报，影响过压和欠压监测保护策略实现。最大母线电压设置过高有硬件损坏的风险，过低则在正常驱动电机时易误报过

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
				压故障；最小母线电压设置过高易误报欠压故障，过低则会在母线电压过低而不能正常驱动电机时无法报出欠压故障
NORMAL_BUS_VOLTAGE	电机控制器母线电压正常值	单位：V	查阅电路原理图中功率MOS管驱动部分	电压标么基值，一般设置为电机实际运行中的最大允许母线电压，若设置较小会导致输出能力受限
CUR_SAMPLE_MODE	电机三相电流采集方式	ICS_SENSORS_SAMPLE：电流传感器采样 SINGLE_SHUNT：单电阻采样 TWO_SHUNT_SAMPLE：双电阻采样 THREE_SHUNT：三电阻采样	查阅电路原理图中电机相电流采样电路	影响调试中调用的相电流采样配置方法及相电流的读取
RSHUNT	采样电阻阻值	单位：Ω	查阅电路原理图中电机相电流采样电路	影响运放 AD 采样相电流精度和结果
ICS_GAIN	电流传感器增益	单位：V/A	查阅电路原理图中电机相电流采样电路	
OP_AMPLIFICATION_GAIN	电流采样运放增益	常数：>1	查阅电路原理图中电机相电流采样电路运放硬件配置，并分析计算其运放增益	
HW_MAX_CURRENT	硬件最大电流	单位：A	根据硬件设计及功率器件规格进行设置	影响电机控制器安全运行（软件暂未使用该参数，当前仅起提示作用）
ADC_RANGE	ADC 采样范围	4096	ADC 为 12Bit 分辨率	影响相电流，母线电压，母线电压等需 ADC

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
VSVREF	ADC 采样参考电压	单位: V	1. 查阅电路原理图中 MCU_AVDD 网络电压 2. 控制板通电后用万用表直接测量 MCU_AVDD 电压	采样的信号采样精度以及闭环运算标么
OVERCUR_FEEDBACK_POLARITY	过流保护极性	PWM_INPUT_POLARITY_ACTIVE_HIGH/LOW	查阅电路原理图	影响硬件过流保护



注意:

表 3-2 中 PWM 通道输出极性与逆变电路功率器件预驱极性设置, 同时只能打开其中一个宏定义, 并关闭其他三个宏定义配置。

3.3 算法参数适配

Demo 板中为了适应不同电机的控制需求应用, 在 Demo 板软件中开发了控制算法: FOC 算法与六步方波 BLDC 控制算法。表 3-3 列出了两种算法的差异点。

表 3-3 FOC 算法和六步方波 BLDC 控制算法的差异点

差异点	FOC 算法	六步方波 BLDC 控制算法
工程名	Motor_App	Bldc_App
算法构成	App 文件+算法库	App 文件
算法特点	针对交流电机, 基于 SVPWM 算法	针对 BLDC 电机, 方波换向

3.3.1 FOC 控制算法参数适配

表 3-4 列出了 drive_parameters_define.h 中定义的算法参数, 主要用于运行 FOC 算法时各算法模块的选择配置说明。

表 3-4 FOC 算法参数宏定义适配表

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
DATA_ACCESS_FLASH_ENABLE	参数固化 Flash 功能使能开关	无	打开或屏蔽	影响 flash 固化、恢复参数功能的使用
FOC_SINE_WAVE	正弦波矢量控制	无	打开或屏蔽	影响电机控制方式
FOC_PMSM	PMSM 矢量控制	无	打开或屏蔽	影响电机控制方式
FOC_ACIM	异步电机矢量控制	无	打开或屏蔽	影响电机控制方式
SENSORLESS	无速度传感器矢量控制	无	打开或屏蔽	影响 PMSM 电机控制方式
HALL_SENSORS	带 Hall 传感器矢量控制	无	打开或屏蔽	
ENCODER_SENSORS	带编码器矢量控制	无	打开或屏蔽	
ENCODER_HALL_SENSORS	编码器与 Hall 传感器矢量控制	无	打开或屏蔽	
SENSORLESS_ACIM	无速度传感器矢量控制	无	打开或屏蔽	影响异步电机控制方式
SENSOR_ACIM	有速度传感器（编码器）的矢量控制	无	打开或屏蔽	
VF_CONTROL	V/f 控制方式	无	打开或屏蔽	影响电机控制方式
IF_STARTUP	矢量控制开环 IF 启动	无	打开或屏蔽	影响无传感矢量控制开环启动方式
VF_STARTUP	矢量控制开环 VF 启动	无	打开或屏蔽	
DIRECT_STARTUP	矢量控制开环直接启动	无	打开或屏蔽	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
CLOSE_TO_OPEN_SWITCH	无感 FOC 闭环-开环切换	无	打开或屏蔽	影响 PMSM 无感 FOC，打开后无感 FOC 可从闭环切换到开环再回到闭环运行
SPEED_DELAY_ZONE	闭环-开环切换速度滞环宽度	0~Math_IQ(1.0)	根据实际电机系统设置	影响无感 FOC 闭环-开环切换区间
SMC_OBSERVE	滑模观测器无传感矢量控制	无	打开或屏蔽	影响无传感矢量控制方式
FLUX_OBSERVE	磁链观测器无传感矢量控制	无	打开或屏蔽	
MRAS_OBSERVE	电流自适应观测器无传感矢量控制	无	打开或屏蔽	
ATAN_ANGLE_ESTIMATION	反正切法估算电角度	无	打开或屏蔽	影响无传感矢量控制电角度的获取方式
PLL_ANGLE_ESTIMATION	锁相环法估算电角度	无	打开或屏蔽	
ALIGNMENT_ONCE	一次预定位	无	打开或屏蔽	影响电机初始角度获取方式
ALIGNMENT_TWICE	二次预定位	无	打开或屏蔽	
PULSE_INJECTION	脉冲注入辨识初始位置	无	打开或屏蔽	
PULSE_INJECTION_TIMES	脉冲注入辨识次数	1~5	脉冲注入辨识初始位置执行次数	
INIT_POS_DETEC	初始位置检测	无	打开或屏蔽	
HIGH_FREQUENCY_INJECTION	高频注入	无	打开或屏蔽	影响电机初始角度获取方式；使用时需要屏蔽无传感矢量控制开环启动的三种模式：IF/VF/DIRECT_STARTUP，及

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
				CLOSE_TO_OPEN_SWITCH
MOTOR_POLES_OBTAIN	辨识电机极对数	无	打开或屏蔽	打开后可用于识别电机极对数
VOLTAGE_RESTRUCT	电压重构	无	打开或屏蔽	影响观测器电压选择
OPEN_LOOP	开环控制	无	打开或屏蔽	影响 FOC 控制方式
CLOSE_LOOP	闭环控制	无	打开或屏蔽	
OVER_MODULATION	SVPWM 过调制	0: 禁用 1: 使能	根据控制中是否需要使用 SVPWM 过调制功能, 来进行参数配置	影响 SVPWM 算法
SVPWM_SEGMENT_TYPE	SVPWM 模式	SEVEN_SEGMENT : 七段式 SVPWM FIVE_SEGMENT : 五段式 SVPWM	根据控制中是否需要使用五段式 SVPWM 进行选择, 默认七段式	
PWM_FREQ_SETTING	PWM 计数频率	单位: Hz	默认 8000	影响 FOC 执行频率
PWM_PRSC	PWM 分频系数	单位: 1	默认 0	影响 PWM 模块配置
PWM_MODE_SELECT	PWM 计数模式选择	PWM_COUNT_UP_MODE : 增计数模式 PWM_COUNT_UP_DOWN_MODE : 增减计数模式	根据用户算法需求进行设置	
FOC_EXECUTION_RATE	FOC 执行频率倍数	单位: 1	根据用户算法需求进行设置为 1 或 2	影响 FOC 执行频率
FOC_FERQ	FOC 执行频率	单位: Hz	根据用户配置自动计算	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
FPWM_Hz	PWM 计数频率	单位: Hz	根据用户配置自动计算	影响 PWM 频率
FTBS_Hz	速度环计算频率	单位: Hz	根据用户配置自动计算	影响速度环时基
FTBC_Hz	电流环计算频率	单位: Hz	根据用户配置自动计算	影响电流环时基
PWM_FREQ_K	电流环毫秒系数	单位: 1	根据用户配置自动计算	影响电流环计时
MS_UINT_INT	电流环毫秒时基	单位: ms	根据用户配置自动计算	影响电流环毫秒时基计时
PWDT_CLK_PRESCALE R	PWDT 时钟分频系数	单位: 1	根据 Hall 算法需求进行配置	影响 Hall 信号滤波
PWDT_FILTER_PSC	PWDT 输入信号滤波器时钟分频	单位: 1	根据 Hall 算法需求进行配置	
PWDT_FILTVAL	PWDT 输入信号滤波系数	单位: 1	根据 Hall 算法需求进行配置	
ELEC_FREQUENCY_HI GH	无传感 FOC 频率计算中断执行使能标志	无	打开或屏蔽	影响反正切角度计算执行频率
ELEC_FREQUENCY_LO W	无传感 FOC 频率计算 1 毫秒执行使能标志	无	打开或屏蔽	
ATAN_SPEED_FILT_H	无传感 FOC 频率计算中断执行反正切法滤波系数	0~Math_IQ(1.0)	反正切法速度环滤波系数, 数值越大则滤波程度越大	根据反正切法速度环计算执行频率选择参数设置
ATAN_SPEED_FILT_L	无传感 FOC 频率计算 1 毫秒执行反正切法滤波系数	0~Math_IQ(1.0)	反正切法速度环滤波系数, 数值越大则滤波程度越大	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
MT_SPEED_MEASURE	M_T 测速法	无	打开或屏蔽	打开后可用于正交编码器 M_T 法测速
T_METHOD_HZ	T 测速法脉冲源频率	单位: Hz	默认 10000	影响测量转速分辨率
DAC_FUNCTIONALITY	DAC 调试功能使能标志	无	打开或屏蔽	影响在线调试功能
DAC_PWM	使用 PWM 作为 DAC 输出使能标志	ENALBE: 使能 DISABLE: 禁止	使用 PWM 模块作为调试输出时使能	
DAC_SPI	使用 SPI 作为 DAC 输出使能标志	ENALBE: 使能 DISABLE: 禁止	使用 SPI 连接外接 DAC 模块作为调试输出时使能	
DEBUG_DAC_CH0	DAC 调试输出通道 0 使能标志	ENALBE: 使能 DISABLE: 禁止	使用通道 0 时使能	
DEBUG_DAC_CH1	DAC 调试输出通道 1 使能标志	ENALBE: 使能 DISABLE: 禁止	使用通道 1 时使能	
DEBUG_DAC_CH0_PARAMID	DAC 调试输出通道 0 参数码	0~255	默认值 157	
DEBUG_DAC_CH1_PARAMID	DAC 调试输出通道 1 参数码	0~255	默认值 158	
USE_GPIO_CALCULATE_FOC_RUNTIME	使用 GPIO 测量程序执行时间使能标志	无	需要测量代码执行时长时打开宏定义	
SPEED_ADJUST_KEY	按键调试使能标志	无	打开或屏蔽	影响速度指令设置方式。 二者互斥, 对于确定的调速方式, 需要关闭另一项
SPEED_ADJUST_KNOB	电位器调速使能标志	无	打开或屏蔽	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
MOTOR_CONTROL_MODE	电机控制模式选择	TORQUE_CONTROL_WITH_SPD_LIMIT: 有速度限幅的转矩控制 SPEED_CONTROL_MODE: 速度控制	根据用户需求进行设置	影响电机控制算法
TORQUE_MODE_IQ_ADD_STEP	转矩模式转矩电流指令步距	单位: A/ms	根据用户需求进行设置	影响转矩模式
TORQUE_MODE_IQ_CMD_MAX	转矩模式转矩电流指令上限	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求进行设置	
TORQUE_MODE_IQ_CMD_MIN	转矩模式转矩电流指令下限	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求进行设置	
VDQ_CIRCLE_LIMIT_CTRL	输出电压限幅使能标志	无	打开或屏蔽	影响电压输出
VDQ_LIMIT_VALUE	输出电压限幅值	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求进行设置	影响电压输出
SPEED_CHANGE_STEP	速度斜坡变化率	单位: Hz	根据客户需求进行设置	影响速度指令斜坡变化率
MAX_SPEED_VALUE	最大运行转速	单位: Hz	根据客户电机参数进行设置	影响电机运行速度范围
MIN_SPEED_VALUE	最小运行转速	单位: Hz	根据客户需求进行设置	
STOP_SPEED_VALUE	停机转速	单位: Hz	根据 STOP_SPEED_HZ 的值自动计算	影响减速停机功能
ACCELERATION_RPS	单次加速调速斜率	单位: rpm / s	根据用户调速需求进行设置。需要调速响应快则增大参数	影响电机调速过程中速度变化的快慢
DECELERATION_RPS	单次减速调速斜率			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
OPEN_LOOP_SPEED_HZ	开环切换机械频率	单位: Hz	无感 FOC 开环启动频率设置	设置过低, 观测器无法有效观测估算转子电角度, 影响开环切 FOC 无感控制过程
MAX_SYNC_SPEED_THRES	开环至闭环切换频率上限	单位: 1	根据开闭环切换效果进行设置	影响无感 FOC 开闭环切换效果
MIN_SYNC_SPEED_THRES	开环至闭环切换频率下限	单位: 1	根据开闭环切换效果进行设置	
OPEN_LOOP_TIME_SYNC	开环至闭环切换时间	单位: ms	电机达到开环运转转速后切入闭环前稳定时间	影响电机开环切入闭环时间
CUR_START_SUB	开环至闭环电流缓降斜率	无	无感 FOC 开环启动电流减速度设置	影响开环切入闭环平顺性
SPD_SMOOTH_CUR	开环启动平滑切换电流	0~32767	根据无感 FOC 开闭环切换效果进行设置	影响开环切入闭环的平顺性
DEFAULT_TARGET_FREQ_START	开环启动默认目标频率	根据开环频率自动计算	根据 OPEN_LOOP_SPEED_HZ 的值自动计算	影响无感 FOC 开闭环切换频率
STOP_SPEED_HZ	停机机械频率	单位: Hz	根据用户需求进行设置	影响减速停机功能
OPEN_LOOP_CURRENT	开环启动电流	Math_IQ(0)~Math_IQ(1.0)	根据无感 FOC 开环调试情况进行设置	影响无感 FOC IF 开环运行
OPEN_LOOP_VOLTAGE	开环启动电压	Math_IQ(0)~Math_IQ(1.0)		影响无感 FOC VF 开环运行
CURVE_TYPE	开环启动曲线类型	CURVE_TYPE_STRAIGHT: 直线型	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环运行

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
		CURVE_TYPE_CUSTOMER : 自定义型		
TIME_DURATION1	开环启动曲线第1段时长	单位: ms	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环起动运行时长
TIME_DURATION2	开环启动曲线第2段时长			
TIME_DURATION3	开环启动曲线第3段时长			
TIME_DURATION4	开环启动曲线第4段时长			
TIME_DURATION5	开环启动曲线第5段时长			
CUSTOMER_CURVE_POINTS	自定义开环启动曲线点数	1~5	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环启动曲线, 需要选择 CURVE_TYPE_CUSTOMER
FREQ_REF_INITVALUE	开环启动曲线频率初始值	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环运行曲线的起点设置
CUR_REF_INITVALUE	开环启动曲线电流初始值	0~Math_IQ(1.0)		
VOLT_REF_INITVALUE	开环启动曲线电压初始值	0~Math_IQ(1.0)		
FREQ_REF_VALUE_1	开环启动曲线第1点频率值	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环起动曲线的频率设置
FREQ_REF_VALUE_2	开环启动曲线第2点频率值			
FREQ_REF_VALUE_3	开环启动曲线第3点频率值			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
FREQ_REF_VALUE_4	开环启动曲线第4点频率值			
FREQ_REF_VALUE_5	开环启动曲线第5点频率值			
CUR_REF_VALUE_1	开环启动曲线第1点电流值	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环启动曲线的电流设置
CUR_REF_VALUE_2	开环启动曲线第2点电流值			
CUR_REF_VALUE_3	开环启动曲线第3点电流值			
CUR_REF_VALUE_4	开环启动曲线第4点电流值			
CUR_REF_VALUE_5	开环启动曲线第5点电流值			
VOLT_REF_VALUE_1	开环启动曲线第1点电压值	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环启动曲线的电压设置
VOLT_REF_VALUE_2	开环启动曲线第2点电压值			
VOLT_REF_VALUE_3	开环启动曲线第3点电压值			
VOLT_REF_VALUE_4	开环启动曲线第4点电压值			
VOLT_REF_VALUE_5	开环启动曲线第5点电压值			
SCURVE_SPEED_RAMP	速度斜坡 S 曲线功能开关	无	打开或屏蔽	影响速度指令斜坡的计算方式
ACC_START_SEG_RATIO	速度斜坡 S 曲线加速起始段比例	0~Math_IQ(1.0)		影响速度斜坡 S 曲线形状及加速度计算

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
ACC_END_SEG_RATIO	速度斜坡 S 曲线加速结束段比例	0~Math_IQ(1.0)	根据用户需求及调试情况进行设置	
DEC_START_SEG_RATIO	速度斜坡 S 曲线减速起始段比例	0~Math_IQ(1.0)		
DEC_END_SEG_RATIO	速度斜坡 S 曲线减速结束段比例	0~Math_IQ(1.0)		
STOP_MODE	停机模式选择	FREE_RUN_STOP: 自由停机 SLOW_DOWN_STOP: 减速停机	根据用户需求进行设置	影响电机控制停机方式
MOTOR_DIR	电机启动转向	FORWARD_ROTATE: 电机启动正转 REVERSE_ROTATE: 电机启动反转	根据用户电机控制启动需求来设置电机启动默认转向	影响电机启动过程电机转向
SPEED_FIFO_DEPTH	平均转速计算缓存	0~32767	数值越大, 求平均次数越多	影响转速平均值精度及执行时间长短
TAIL_HEAD_WIND	风扇顺逆风控制	无	打开或屏蔽	影响风扇无感 FOC 控制的顺逆风启动
MOTOR_MOTION_BEMF_AMP_THRESHOLD	电机初始转速判断反电动势阈值	0~4096	根据电机参数及调试结果设置	影响风扇无感 FOC 控制顺逆风启动的初始状态判断
HIGH_REVERSE_THRESHOLD	高速逆风判断阈值	0~Math_IQ(-1.0)	根据调试结果设置	
STATIC_THRESHOLD	静止判断阈值	0~Math_IQ(1.0)		
HIGH_FORWARD_THRESHOLD	高速顺风判断阈值	STATIC_THRESHOLD ~ Math_IQ(1.0)		
SHORT_BRAKE_CTRL	短路刹车使能位	0: 不使能短路刹车功能	根据应用工况选择合适的刹车方式	是否开启刹车功能

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
		1: 使能启动前刹车功能 2: 使能停机刹车功能 3: 使能启动前、停机后刹车功能		
SHORT_BRAKE_CUR_RATIO	刹车电流大小百分比	0~100	该值越大刹车电流越大，刹车越快	该值过大会引起较大噪音
SHORT_BRAKE_UDC_MAX	刹车时最大母线电压保护电压	0~1000V	该值取在实际供电电压以上，过压点以下	母线电压保护
SHORT_BRAKE_TIMES	刹车完成等待时间	0~65535ms	为刹车完成后，电机仍在缓慢转动，会延迟等待一段时间，再进入下一状态	影响刹车完成等待时间
SHORT_QUIT_CUR	刹车退出电流阈值	0~100	作为判断是否刹车完成电流阈值	影响退出短路刹车条件
SHORT_TIME	单电阻采样刹车时间	0~65535ms	单电阻模式刹车时间设定	影响单电阻模式下刹车时间设定
ORDER_ERROR_COMP_MODE	霍尔自学习角度补偿方式	0: 零阶强制补偿 1: 零阶分散补偿	高精度 FOC 控制要求场合建议配置为零阶分散补偿模式。零阶强制补偿在霍尔扇区切换时，电角度会因为强制补偿而跳变	影响霍尔角度估算算法中角度校准方式
HALL_INSTALL_TYPE	霍尔传感器安装方式	0: 120 度霍尔传感器安装方式 1: 60 度霍尔传感器安装方式	根据用户电机霍尔传感器安装方式进行设置	影响霍尔角度估算以及电机旋转方向判断

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
HALL_SENSOR_SELF_LEARN	霍尔自学习使能标志位	ENABLE：使能霍尔自学习 DISABLE：禁止霍尔自学习	根据控制中是否需要采用霍尔自学习的电机角度，来选择是否启用霍尔自学习	影响控制启动过程中是否执行霍尔自学习功能
HALL_SELF_LEARN_MODE	霍尔自学习模式	1：仅学习霍尔相序与角度； 2：学习霍尔相序、角度及最大最小扇区宽度	根据电机能否自由旋转决定自学习模式，当电机已与负载连接而不能自由旋转时，需设为1	影响霍尔自学习功能执行步骤
HALL_SWAP_TRQ_COEFF	霍尔低频转矩提升	0~100%	提升在低速时霍尔模式输出力矩	影响低速时力矩提升大小
HALL_SELF_LEARN_INTERVAL	霍尔自学习时间间隔	0~Math_IQ(1.0)	霍尔自学习每次摆动间隔时间设定，根据电机惯量确定	影响霍尔自学习摆动间隔时间
HALL_SELF_LEARN_CURRENT	霍尔自学习电流	0~Math_IQ(1.0)	霍尔自学习过程中电流大小设定，根据电机负载确定	影响霍尔自学习出力大小
HALL_SELF_LEARN_ORDER	霍尔安装相序	13：Hall 顺序为 3-2-6-4-5-1； 15：Hall 顺序为 5-4-6-2-3-1； 23：Hall 顺序为 3-1-5-4-6-2； 26：Hall 顺序为 6-4-5-1-3-2； 31：Hall 顺序为 1-5-4-6-2-3； 32：Hall 顺序为 2-6-4-5-1-3；	根据霍尔自学习结果得到霍尔安装相序	影响霍尔角度估算

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
		45: Hall 顺序为 5-1-3-2-6-4; 46: Hall 顺序为 6-2-3-1-5-4; 51: Hall 顺序为 1-3-2-6-4-5; 54: Hall 顺序为 4-6-2-3-1-5; 62: Hall 顺序为 2-3-1-5-4-6; 64: Hall 顺序为 4-5-1-3-2-6.		
HALL_SELF_LEARN_T HETA	霍尔自学习安装 角度偏差	0~Math_IQ(1.0)	霍尔角度估算零 度角与真实电零 度角偏差	影响霍尔角度估算准确 性
ELEC_BRAKE_ENABLE	电子刹车使能标 志	无	打开或屏蔽	影响刹车功能
ENTER_BRAKE_DEPTH	进入电子刹车的 最小深度	0~32767	数字越大，深度 越深，高于阈值 认为有刹车指令	
EXIT_BRAKE_DEPTH	退出电子刹车的 最大深度	0~32767	数字越大，深度 越深，低于阈值 认为退出刹车指 令	
ENTER_ELEC_BRAKE_ FREQ	进入电子刹车的 最小频率	0~Math_IQ (1.0)	进入电子刹车的 最低频率点，高 于阈值才会刹车	
EXIT_ELEC_BRAKE_FR EQ	退出电子刹车的 最大频率	0~Math_IQ (1.0)	低于阈值才会退 出刹车	
ISQ_ADD_STEP	Q 轴电流递增步 进	0~32767	阈值越大，增步 长越大	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
ISQ_DEC_STEP	Q 轴电流递减步进	0~32767	阈值越大，减步长越大	
ELEC_BRAKE_CUR_RATIO	电子刹车最大电流比率	0~100%	最大相电流峰值高于设置阈值封管	
ELEC_BRAKE_UDC_MAX	电子刹车最高母线电压	0~最大母线电压	母线电压高于阈值封管	
ELEC_BRAKE_DEPTH	电子刹车深度	0~32767	外界实际输入的刹车指令深度	
ELEC_BRAKE_MAX_DEPTH	电子刹车最大深度	0~32767	外界刹车指令高于设置阈值时认为等于阈值	
POWER_DCCUR_EST_ENABLE	功率与母线电流估算使能标志	无	打开或屏蔽	影响功率及母线电流估算功能的执行
PWM_DELAY_COF	功率估算 PWM 延时系数	0~32767	系数越大，认为补偿角度越大	影响控制器输出功率计算精度
UQCOMP	功率估算 Q 轴电压补偿	0~32767	系数越大，Q 轴电压补偿越大	
PARAM_IDENTIFY_SEL	参数辨识模式选择	Bit0: 电阻辨识 Bit1: Ld/Lq 辨识 Bit2: 磁链辨识 Bit3: 惯量辨识	根据所需辨识的参数任意组合。例如需要辨识电阻与磁链，则配置为 0x05	参数辨识模式选择
RS_ID_PHASE_SEL	定子电阻辨识相数选择	1: 仅辨识一相 2: 辨识两相 3: 辨识三相		影响定子电阻辨识时长与辨识结果
RS_ID_FIRST_INJECT	定子电阻辨识第一次注入电流阈值	0~Math_IQ(1.0)	两次注入电流幅值应设置不同值，避免过大或	影响定子电阻辨识过程中的电流

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
RS_ID_SECOND_INJECT	定子电阻辨识第二次注入电流阈值	0~Math_IQ(1.0)	过小，以免影响辨识结果	
RS_STABLE_DELAY	定子电阻辨识等待稳定延时	单位：ms	不可过大或过小，避免电机过热或影响辨识结果	影响定子电阻辨识时长
RS_SETTING_DELAY	定子电阻辨识等待延时	单位：ms		
RS_SAMPLE_DELAY	定子电阻辨识采样延时	单位：ms		
PMSM_LDQ_METHOD_SEL	PMSM 电感辨识方法选择	PMSM_LDQ_METHOD_HFP：采用高频脉冲辨识法 PMSM_LDQ_METHOD_HFS：采用高频正弦法	高频脉冲辨识法不支持单电阻采样模式	影响 PMSM 电感辨识策略
PMSM_LDQ_INIT_PRD	高频脉冲法 DQ 电感辨识初始 PWM 周期设置	单位：1	通常不需修改，采用默认值即可	影响 DQ 电感辨识
PMSM_LDQ_CUR_LIMIT	DQ 电感辨识最大电流限幅	0~Math_IQ(1.0)	设置过大可能导致过流故障等	
PMSMID_ALIGN_TIME1	PMSM 参数辨识第一次强吸时间	单位：ms	可与 IF 强吸参数配置相同	影响强吸过程
PMSMID_ALIGN_TIME2	PMSM 参数辨识第二次强吸时间	单位：ms		
PMSMID_ALIGN_CUR	PMSM 参数辨识强吸电流	0~Math_IQ(1.0)		
PMSMID_ALIGN_WAIT	PMSM 参数辨识强吸完成等待延时时间	单位：ms	可根据调试情况设置数值	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
PMSMID_CUR_DC_SET	PMSM 电感辨识 高频正弦法直流 电流设定值	0~Math_IQ(1.0)	设置过大可能导 致过流故障	影响 PMSM 电感辨识高 频正弦法的电流和辨识 结果
PMSMID_CUR_AC_SET D	PMSM 电感辨识 高频正弦法 D 轴 电流设定值	0~Math_IQ(1.0)	设置过大可能导 致过流故障	
PMSMID_CUR_AC_SET Q	PMSM 电感辨识 高频正弦法 Q 轴 电流设定值	0~Math_IQ(1.0)	设置过大可能导 致过流故障	
PMSMID_CUR_FREQ_S ETD	PMSM 电感辨识 高频正弦法 D 轴 电流频率设定值	0~Math_IQ(8.0)	设置过大可能导 致电流波形异常	
PMSMID_CUR_FREQ_S ETQ	PMSM 电感辨识 高频正弦法 Q 轴 电流频率设定值	0~Math_IQ(8.0)	设置过大可能导 致电流波形异常	
PMSM_CUR_DC_STEP	PMSM 电感辨识 高频正弦法直流 电流步距	0~Math_IQ(1.0)	设置过大可能导 致电流冲击	
STABLE_JUDGE_LIMIT	参数辨识反馈电 流稳定判断点	0~Math_IQ(1.0)	设置过小可能导 致辨识结果异常	影响反馈电流稳定性判 断
PMSMID_LDQ_PWMFR EQ	PMSM 电感辨识 高 频 正 弦 法 PWM 频率	单位: Hz	设置过大可能导 致程序执行异常	影响中断执行时间
PMSMID_LDQ_PWMPR D	PMSM 电感辨识 高 频 正 弦 法 PWM 周期	根 据 PMSMID_LDQ_ PWMFREQ 的 值 自动计算	无需修改	
PMSMID_FLUX_FRE	磁链辨识目标频 率设定值	0~Math_IQ(1.0)	不可设置过大, 避免运行失步	影响磁链辨识
PMSMID_FLUX_CUR	磁链辨识电流设 定值	0~Math_IQ(0.5)	不可设置过大, 避免过流故障等	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
PMSMID_FLUX_IF_ACC	磁链辨识电流累加步距	单位: 1	可根据调试情况设置数值	
ACIMID_RR_CURRENT	异步电机转子电阻辨识电流幅值	0~Math_IQ(1.0)	一般无需修改	影响异步电机参数辨识结果
ACIMID_RR_FREQ	异步电机转子电阻辨识电流频率	Math_IQ(0.5)~Math_IQ(1.0)	一般无需修改	
ACIMID_LM_FREQ	异步电机互感辨识电流频率	Math_IQ(0.5)~Math_IQ(1.0)	一般无需修改	
ACIMID_RR_CURSTEP	异步电机转子电阻辨识电流步距	0~Math_IQ(1.0)	可根据调试情况设置数值	
ACIMID_LM_FREQSTEP	异步电机互感辨识电流频率步距	0~Math_IQ(1.0)	可根据调试情况设置数值	
ACIMID_CURRENT_THRESHOLD	异步电机参数辨识电流稳定判断点	0~Math_IQ(1.0)	可根据调试情况设置数值	
ACIMID_VOLTAGE_THRESHOLD	异步电机参数辨识电压稳定判断点	0~Math_IQ(1.0)	可根据调试情况设置数值	
PARID_DATANUM	参数辨识采样点数	单位: 1	可根据调试情况设置数值	
PARID_FILTER1COEFF1	参数辨识信号滤波器 1 的第一滤波系数	单位: 1	可根据调试情况设置数值	影响电压、电流信号的分析, 设置不当可能导致信号信息提取失败, 无法完成参数辨识过程
PARID_FILTER1COEFF2	参数辨识信号滤波器 1 的第二滤波系数	单位: 1	可根据调试情况设置数值	
PARID_FILTER2COEFF1	参数辨识信号滤波器 2 的第一滤波系数	单位: 1	可根据调试情况设置数值	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
PARID_FILTER2COEFF 2	参数辨识信号滤波器 2 的第二滤波系数	单位: 1	可根据调试情况设置数值	
DEAD_BAND_COMP	死区补偿使能标志	无	打开或屏蔽	影响死区补偿功能的执行
CUTOFF_CUR_VAL	死区补偿电流阈值	0~Math_IQ(1.0)	作为进入死区补偿功能电流矢量幅值阈值	影响进入死区补偿功能条件
MAX_COMP_FREQ	死区补偿频率阈值	0~Math_IQ(1.0)	作为进入死区补偿功能电机频率阈值	影响进入死区补偿功能条件
OVER_VOL_SUPPRESS	过压抑制使能标志	无	打开或屏蔽	影响过压抑制功能的执行
NARROW_PULSE_PROCESS	窄脉宽处理使能标志	无	打开或屏蔽	影响窄脉宽功能的执行
SAVE_ENERGY	节能控制使能标志	无	打开或屏蔽	影响节能控制功能的执行
MAX_CUR_CHANGE	最大电流切换阈值	0~Math_IQ(1.0)	根据最大输出电流确定	影响节能控制执行过程中最大电流阈值
STEADY_CUR_CHANGE	稳定电流检测阈值	0~Math_IQ(1.0)	负载稳定判断阈值电流	影响判断负载稳定, 进入节能控制条件
CUR_CHANGE_STEP	D 轴电流步进	0~Math_IQ(1.0)	一般按照默认参数	影响节能控制中 d 轴电流调节步长
ENERGY_SAVE_DEC	电流幅值递减步长	0~Math_IQ(1.0)	一般使用默认参数	影响 d 轴电流反向调节步长大小
ENERGY_SAVE_INC	电流幅值递增步长	0~Math_IQ(1.0)	一般使用默认参数	影响 d 轴电流正向调节步长大小
RECHECK_CUR_CHANGE	节能控制重新进入电流阈值	0~Math_IQ(1.0)	根据电机额定电流修改	影响重新进入节能控制算法电流变化阈值

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
MAX_ID_TARGET	D 轴电流上限	0~Math_IQ(1.0)	一般使用默认参数	影响 d 轴电流设定最大值
MIN_ID_TARGET	D 轴电流下限	0~Math_IQ(1.0)	一般使用默认参数	影响 d 轴电流设定最小值
WAIT_TIME	节能控制时间间隔	0~65535ms	一般使用默认参数	影响调节 d 轴电流间隔时长
ENTER_ENERGY_SAVE_LOAD	节能控制负载阈值	0~Math_IQ(1.0)	根据电机所带负载大小修改	影响进入节能控制算法电流大小阈值
SMC_KSLIDE0	滑模观测器增益	0~Math_IQ(1.0)	无感 FOC 开环调试估计电机转子电角度时，噪声低但逼近积分电角度速度慢，则需增加滑模增益，加快滑模估计收敛速度	影响滑模观测器对反电动势和电角度的估计速度及估计结果的稳定性和噪声
SMC_KSLF0	滑模观测滤波系数	0~Math_IQ(1.0)	无感 FOC 开环调试时，反电动势高频噪声大，则需减小滑模滤波系数，滤波系数越小，滤波越严重。最大转速无法到达时，需增加滤波系数，保证低通滤波器的截止频率高于电机实际运行最大频率	
SMC_MAXERR0	滑模观测估计误差最大值	0~Math_IQ(1.0)	无感 FOC 开环调试时，电机转速高，则需增加滑模观测估计误差边界，抑制滑模抖颤	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
SMC_KSLIDE1	滑模观测器增益	0~Math_IQ(1.0)	无感FOC闭环调试估计电机转子电角度时，噪声低但逼近积分电角度速度慢，则需增加滑模增益，加快滑模估计收敛速度	
SMC_KSLF1	滑模观测滤波系数	0~Math_IQ(1.0)	无感FOC闭环调试时，反电动势高频噪声大，则需减小滑模滤波系数，滤波系数越小，滤波越严重。最大转速无法到达时，需增加滤波系数，保证低通滤波器的截止频率高于电机实际运行最大频率	
SMC_MAXERR1	滑模观测估计误差最大值	0~Math_IQ(1.0)	无感FOC闭环调试时，电机转速高，则需增加滑模观测估计误差边界，抑制滑模抖颤	
FULL_ORDER_SMC	全阶滑模观测器使能开关	无	打开或屏蔽	影响全阶滑模观测器的使用
FULL_SMC_GAIN	全阶滑模增益	0~32767	系数越大，则响应越快，但转速波动相应亦较大	
FULL_SMC_FILT	全阶滑模滤波使能开关	ENABLE : 使能; DISABLE: 禁止	全阶滑模观测器反电动势参数滤波开关	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
FLIT_COEFF	磁链观测器低通滤波器系数	0~32767	系数越小，滤波越严重	影响低通滤波截止频率
COMPCOF_UPLIMIT	磁链观测器反电势补偿上限	0~Math_IQ(100)	系数越大，补偿越接近真实值，为了限制 0 速附近补偿过大问题	影响磁链观测器角度精度
ALPHA_COEFF	自适应观测器速度估算系数	Math_IQ(0)~Math_IQ(1.0)	值越大，频率估算收敛越快，相应抖动增大	影响自适应观测器转速估算
BETA_COEFF	自适应观测器速度估算补偿系数	Math_IQ(0)~Math_IQ(1.4)	值越大，频率估算收敛越快，相应抖动增大	
COEFFPLL_SMC	滑模观测器锁相环计算电角度系数	0~16384	系数越大，锁相环 PI 系数越大	影响滑模观测器的角度估算
COEFFPLL_FLUX	磁链观测器锁相环计算电角度系数	0~16384	系数越大，锁相环 PI 系数越大	影响磁链观测器的角度估算
T_ALIGNMENT1	一次预定位时长	单位：ms	系数越大，第一段定位时间越长	影响预定位时间长短
T_ALIGNMENT2	二次预定位时长	单位：ms	系数越大，第二段定位时间越长	影响预定位时间长短
ALIGNMENT_ANGLE_DEGREE	预定位角度	单位：度	默认定位 0 度	影响初始预定位角度
ALIGNMENT_ANGLE	预定位电角度	自动计算	根据 ALIGNMENT_ANGLE_DEGREE 的值自动计算	影响初始预定位角度
I_ALIGNMENT1	一次预定位电流	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，预定位电流越大	影响预定位电流给定值

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围	
I_ALIGNMENT2	二次预定位电流	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，预定位电流越大	影响预定位电流给定值	
I_RAMP1_INIT	预定位电流第一段斜坡初始值	0~Math_IQ(1.0)	值越大，预定位第一段斜坡起点越大，电流阶跃越大	影响预定位强吸电流斜坡形状	
I_RAMP2_INIT	预定位电流第二段斜坡初始值	0~Math_IQ(1.0)	值越大，预定位第二段斜坡起点越大，电流阶跃越大		
T_SLOPE1	预定位电流第一次斜坡时长	单位: ms	值越大，预定位第一段斜坡时间越长，电流增加得越缓慢		
T_SLOPE2	预定位电流第二次斜坡时长	单位: ms	值越大，预定位第二段斜坡时间越长，电流增加得越缓慢		
PULSE_SELF_LEARN	脉冲注入法自学习使能标志位	无	打开或屏蔽		根据控制中是否需要无抖动启动，来选择是否启用脉冲注入法，影响电机启动平顺性
PWM_SELF_LEARN_PERIOD	脉冲注入法自学习后所得到的脉冲宽度	0~65536	作为取消脉冲自学习后的脉冲宽度		影响注入脉冲宽度
INTI_PULSE_PERIOD	脉冲注入法初始PWM周期	0~65536	作为初始脉冲注入脉宽，受电机电感大小影响	影响初始注入脉冲宽度	
SELF_LEARN_THRES	脉冲注入法自学习阈值电流	0~Math_IQ(1.0)	一般使用默认参数即可	脉冲注入初始角度辨识成功率	
SELF_LEARN_DUTY_STEP	脉冲注入法自学习 PWM 脉宽变化率	0~65536	脉冲宽度自学习每拍脉宽增量	影响脉冲注入脉宽自学习每拍脉宽增量	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
INITPOS_VOLT_AMP	初始位置检测注入旋转电压幅值	0~Math_IQ(1.0)	注入电机旋转正弦电压幅值	影响电机相电流采样及检测电角度
INITPOS_VOLT_FREQ	初始位置检测注入旋转电压频率	0~Math_IQ(3.0)	注入电机旋转正弦电压频率	
INITPOS_PULSE_AMP	初始位置检测注入脉冲电压幅值	0~Math_IQ(1.0)	注入脉冲电压幅值	影响初始位置检测中磁极的检测结果
INITPOS_PULSE_INJECT_TIME	初始位置检测注入脉冲电压时间	1~5	注入脉冲电压时间	
INITPOS_PULSE_CLEAR_TIME	初始位置检测注入脉冲电压清除时间	1~200	注入脉冲电压间隔等待时间	
HFI_DEBUG_MODE	高频注入调试模式开关	0 or 1	打开或屏蔽	影响高频注入功能
HFI_TO_STO	高频注入是否切换至状态观测器开关	0 or 1	打开或屏蔽	
HFI_FREQUENCY	高频注入电频率	0~PWM 频率	系数越大，注入频率越高	
HFI_AMPLITUDE	高频注入电压幅值	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，注入电压幅值越高	
HFI_PULSE_AMP	高频注入电压脉冲幅值	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，注入电压幅值越高	
HFI_PULSE_TIME	高频注入电压注入时间	0~100	脉冲注入时间，以 PWM 周期为单位	
HFI_CLEAR_TIME	高频注入电流清零时间	单位：ms	根据高频注入调试情况设置	
HFI_JUDGE_TIME1	高频注入第一次判断时间	单位：ms		

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
HFI_JUDGE_TIME2	高频注入第二次判断时间	单位: ms		
HFI_INIT_TIME	高频注入初始注入时间	单位: ms		
HFI_INIT_THETA	高频注入初始注入角度	单位: 度		
HFI_PLL_KP_DEFAULT	高频注入锁相环调节器参数	0~32767	锁相环比例系数	影响高频注入角度精度
HFI_PLL_KI_DEFAULT	高频注入锁相环调节器参数	0~32767	锁相环积分系数	
HFI_INIT_FREQ	高频注入初始频率	单位: Hz	影响低速性能	影响高频注入和状态观测器之间切换
HFI_FREQ_HIGH	高频注入与观测器的切换点	单位: Hz		
HFI_FREQ_LOW	观测器与高频注入的切换点	单位: Hz		
HFI_VD_FREQ_HIGH	高频注入电压降幅高频点	单位: Hz	影响低速性能	影响高频注入功能
HFI_VD_FREQ_LOW	高频注入电压降幅低频点	单位: Hz		
HFI_DIR_ERR_TIME	高频注入运行方向判断时间	单位: ms	根据实际调试情况设置	影响方向判断
HFI_DIR_ERR_FREQ	高频注入运行方向判断频率阈值	单位: Hz		
BPF_A0	带通滤波器参数	-Math_IQ(1.0)~ Math_IQ(1.0)	根据开关频率和通带频率设计的BPF系数	影响通带频率
BPF_A2	带通滤波器参数			
BPF_B1	带通滤波器参数			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
BPF_B2	带通滤波器参数			
LPF_A0	低通滤波器参数		根据开关频率和截止频率设计的LPF系数	影响截止频率
LPF_A1	低通滤波器参数			
LPF_A2	低通滤波器参数			
LPF_B1	低通滤波器参数			
LPF_B2	低通滤波器参数			
THETA_LPF_COEFF	高频注入角度滤波系数	0~Math_IQ(1.0)		
CUR_LPF_COEFF	高频注入电流滤波系数	0~Math_IQ(1.0)		
CURRENT_PID_SELF_LEARN	电流环 PID 参数自学习使能标志	ENABLE：使能电流环 PI 参数自学习 DISABLE：禁止电流环 PI 参数自学习	根据电流环调试情况进行选择	影响电流环 PID 自学习功能
SPEED_PID_SELF_LEARN	速度环 PID 参数自学习使能标志	ENABLE：使能速度环 PI 参数自学习 DISABLE：禁止速度环 PI 参数自学习	根据速度环调试情况进行选择	影响速度环 PID 自学习功能
CURRENT_REGULATOR_BANDWIDTH	电流环带宽	单位：rad/s	默认值，咨询客户支持	影响电流环 PI 参数自学习
SPEED_REGULATOR_BANDWIDTH	速度环带宽	单位：rad/s	默认值，咨询客户支持	影响速度环 PI 参数自学习
SPEED_DAMP_CONST	电机阻尼常数	1~16	默认值，咨询客户支持	影响速度环 PI 参数自学习

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
POSITION_LOOP_CTRL	位置环控制	无	打开或屏蔽	仅支持有编码器的位置环控制
REDUCTION_RATIO_CONST	位置环减速率	1~60	根据用户需求设置	影响位置环运行
POSITION_ACTION_MAX_TIME	位置环最大时间	单位: ms		
POSITION_GEAR_DEFAULT	位置环运行档位	0~2		
POSITION_ANGLE_BASE	位置环角度基准	单位: 1		
POSITION_TARGET_DEFAULT	位置环目标角度	单位: 1		
PID_POSITION_KP_DEFAULT	位置环 PID 参数	0~Math_IQ(1.0)	需根据位置环调试效果整定修改	影响位置环响应与稳定性
PID_POSITION_KI_DEFAULT				
PID_POSITION_KD_DEFAULT				
PID_POSITION_MAX_DEFAULT				
PID_POSITION_MIN_DEFAULT				
PID_TORQUE_KP_DEFAULT	力矩轴 Q 轴 PID 参数	0~Math_IQ(4.0)	需根据 Q 轴电流环调试效果整定修改	影响 FOC 控制中 Q 轴电流环响应速度和稳定性
PID_TORQUE_KI_DEFAULT				
PID_TORQUE_KD_DEFAULT				
PID_TORQUE_MAX_DEFAULT				

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
PID_TORQUE_MIN_DEFAULT				
PID_FLUX_KP_DEFAULT	励磁轴 D 轴 PID 参数	0~Math_IQ(4.0)	需根据 D 轴电流环调试效果整定修改	影响 FOC 控制中 D 轴电流环响应速度和稳定性
PID_FLUX_KI_DEFAULT				
PID_FLUX_KD_DEFAULT				
PID_FLUX_MAX_DEFAULT				
PID_FLUX_MIN_DEFAULT				
PID_SPEED_KP_DEFAULT	速度环 PID 参数	0~Math_IQ(1.0)	需根据调试中速度环调试效果整定修改	影响 FOC 控制中速度环响应速度和稳定性
PID_SPEED_KI_DEFAULT				
PID_SPEED_KD_DEFAULT				
PID_SPEED_MAX_DEFAULT				
PID_SPEED_MIN_DEFAULT				
FEED_FORWARD_DECOUPLE	电流环前馈解耦使能标志	无	打开或屏蔽	影响电流环前馈解耦功能的执行
FEED_FORWARD_LIMIT	电流环前馈解耦限幅	0~Math_IQ(1.0)	一般无需修改	影响解耦输出
COMPLEX_VECTOR_DECOUPLE	电流环复矢量解耦使能标志	无	打开或屏蔽	影响复矢量解耦功能执行
LOAD_TORQUE_ESTIMATE	负载转矩估算使能标志	无	打开或屏蔽	影响负载转矩估算功能的执行

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围	
LOAD_ESTIMATE_COEFF	负载转矩估算增益系数	单位: 1	根据调试情况进行设置	影响负载转矩估算功能的执行	
LOAD_COMP_LIMIT	负载转矩估算补偿限幅值	0~Math_IQ(1.0)			
INERTIA_ONLINE_IDENT	惯量在线辨识使能标志	无	打开或屏蔽	影响惯量在线辨识功能的执行	
INERTIA_IDENT_MRAS	基于模型参考自适应MRAS的惯量在线辨识	无	打开或屏蔽		
INERTIA_IDENT_FFLS	基于最小二乘法FFLS的惯量在线辨识	无	打开或屏蔽		
INERTIA_IDENT_GAIN_MRAS	MRAS 惯量辨识增益	单位: 1	根据调试情况设置	影响惯量在线辨识功能执行	
INERTIA_IDENT_FACTOR_FFLS	FFLS 惯量辨识遗忘因子				
INERTIA_IDENT_PK_INIT_FFLS	FFLS 惯量辨识PK参数初始值				
INERTIA_IDENT_COF_INIT	惯量辨识初始系数				
INERTIA_IDENT_OPERATION_PERIOD	惯量辨识执行周期				
INERTIA_IDENT_ERROR_THRESHOLD	惯量辨识误差阈值				
INERTIA_IDENT_STEADY_TIME	惯量辨识稳定时间				单位: s
INERTIA_IDENT_OLD_TIME	惯量辨识上一周期值更新时间				单位: s

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
ASR_VARPI_ENABLE	速度环变 PI 参数使能标志	无	打开或屏蔽	影响速度环变 PI 参数功能的执行
QUICK_DESATURATION	快速退饱和使能标志	无	打开或屏蔽	影响速度环快速退饱和功能的执行
FEEDBACK_GAIN	PID 调节器反馈增益	0~Math_IQ(1.0)	反馈抑制 PID 反馈增益系数	影响反馈抑制 PID 积分限制快慢
FLUX_WEAKENING	弱磁控制使能标志	无	打开或屏蔽	影响弱磁控制功能的执行
FLUXWEAKE_VOLTAGE_REF	弱磁控制电压参考值	0~1000	电压环弱磁输入	影响电压环弱磁给定大小
FLUX_WEAKE_KP	弱磁 PI 调节器比例系数	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，电压环比例系数越大	影响电压环弱磁 PI 调节器性能
FLUX_WEAKE_KI	弱磁 PI 调节器积分系数	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，电压环积分系数越大	
IDMIN	弱磁电流下限	Math_IQ(-1.0)~0	预留	影响电压环弱磁功能
IDDEMAG	退磁电流	Math_IQ(-1.0)~0	Id 低于此阈值会限制在阈值，设置过低存在使永磁体退磁的风险	
ISMAX	电机最大电流标么值	0~Math_IQ(1.0)	一般等同设置为实际最大相电流	
MAXMODULE	弱磁控制最大调制度	0~Math_IQ(1.0)	电压弱磁输入调制度	
MTPA_ENABLE	最大转矩电流比 MTPA 使能标志	无	打开或屏蔽	影响最大转矩电流比控制功能

3.3.2 BLDC 参数适配

Demo 板中六步方波控制方案配置参数在 `bldc_parameters_define.h` 文件中定义，用户可根据实际控制需求进行适配修改。表 3-5 列出了 `bldc_parameters_define.h` 中定义的算法参数。

表 3-5 方波算法参数宏定义适配表

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
DATA_ACCESS_FLASH_ENABLE	参数固化 Flash 功能使能开关	无	打开或屏蔽	影响 flash 固化、恢复参数功能的使用
SIX_STEP_SQUARE_WAVE	六步方波控制	无	打开或屏蔽	影响电机控制方式
BLDC_HALL	带 Hall 传感器方波控制	无	打开或屏蔽	影响电机控制方式
BLDC_SENSORLESS	无传感器方波控制	无	打开或屏蔽	
BEMF_DETECT_HARDWARE	硬件检测反电动势使能标志	无	打开或屏蔽，仅 在无传感模式下生效	影响无传感器方波控制实现方式
BEMF_DETECT_SOFTWARE	软件检测反电动势使能标志	无	打开或屏蔽，仅 在无传感模式下生效	
CURRENT_LOOP_CTRL	电流环控制使能标志	无	打开或屏蔽	影响 BLDC 控制环路结构
PWM_FREQ_SETTING	PWM 计数频率	单位：Hz	默认 8000	影响 BLDC 控制执行频率
PWM_PRSC	PWM 分频系数	单位：1	默认 0	影响 PWM 模块配置
PWM_MODE_SELECT	PWM 计数模式选择	PWM_COUNT_UP_MODE：增计数模式 PWM_COUNT_UP_DOWN_MODE：增减计数模式	根据用户算法需求进行设置	
MS_UINT_INT	毫秒时基	单位：毫秒	根据用户配置自动计算	在电流环中作为毫秒时基单位
DUTY_BASE_VALUE	占空比调制基值	>100	根据调制波占空比细分程度设置	影响调制占空比分辨率

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
BLDC_DUTY_UNIT	占空比基准单位	DUTY_BASE_VALUE / 100	根据 DUTY_BASE_VALUE 的值自动计算	PWM 占空比基准值, 1%占空比
BLDC_SPEED_KP_DEFAULT	速度环 PI 调节器比例系数	0~Math_IQ(1.0)	需根据调试中速度环调试效果整定修改	影响方波控制中速度环响应速度和稳定性
BLDC_SPEED_KI_DEFAULT	速度环 PI 调节器积分系数	0~Math_IQ(1.0)		
BLDC_SPEED_KD_DEFAULT	速度环 PI 调节器微分系数	0~Math_IQ(1.0)		
BLDC_SPEED_MAX_DEFAULT	速度环 PI 调节器最大输出	0~Math_IQ(1.0)		
BLDC_SPEED_MIN_DEFAULT	速度环 PI 调节器最小输出	Math_IQ(-1.0) ~0		
OPEN_LOOP_SPEED_HZ	默认目标机械频率	单位: Hz	启动频率设置	影响电机初始目标转速
DEFAULT_TARGET_FREQ_START	启动默认目标频率	根据默认目标机械频率自动计算	根据 OPEN_LOOP_SPEED_HZ 的值自动计算	影响电机初始目标转速
SPEED_CHANGE_STEP	速度斜坡变化率	单位: Hz	根据客户需求进行设置	影响速度指令斜坡变化率
MAX_SPEED_VALUE	最大运行转速	单位: Hz	根据客户电机参数进行设置	影响电机运行速度范围
MIN_SPEED_VALUE	最小运行转速	单位: Hz	根据客户需求进行设置	
ACCELERATION_RPS	单次加速调速斜率	单位: rpm / s	根据用户调速需求进行设置。需要调速响应快则增大参数	影响电机调速过程中调速的快慢
DECELERATION_RPS	单次减速调速斜率			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
MOTOR_DIR	电机启动转向	FORWARD_ROT ATE: 电机启动正转 REVERSE_ROT ATE: 电机启动反转	根据用户电机控制启动需求来设置电机启动默认转向	影响电机启动过程电机转向
BLDC_CURRENT_KP_DEFAULT	电流环 PI 调节器比例系数	0~Math_IQ(1.0)	需根据调试中电流环调试效果整定修改	影响方波控制中电流环响应速度和稳定性
BLDC_CURRENT_KI_DEFAULT	电流环 PI 调节器积分系数			
BLDC_CURRENT_KD_DEFAULT	电流环 PI 调节器微分系数			
BLDC_CURRENT_MAX_DEFAULT	电流环 PI 调节器最大输出			
BLDC_CURRENT_MIN_DEFAULT	电流环 PI 调节器最小输出			
CURRENT_PU_COF	电流采样标么转换系数	单位: 1	根据硬件电路参数自动计算	影响电流采样转换结果
CURRENT_AD_COF	电流采样 AD 转换系数	单位: 1		
CURRENT_AD_VALUE(XA)	电流采样转换系数	单位: 1		
PWDT_CLK_PSC	PWDT 时钟分频系数	单位: 1	根据霍尔信号质量和应用需求进行配置	影响 Hall 信号滤波
PWDT_FILT_PSC	PWDT 输入信号滤波器时钟分频	单位: 1		
PWDT_FILT_VAL	PWDT 输入信号滤波系数	单位: 1		
MAX_DUTY_WITH_HALL	有感方波输出最大占空比		根据有感方波最高转速调整	限制有感方波最高转速

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
MIN_DUTY_WITH_HALL	有感方波输出最小占空比	(0 ~ 100) * BLDC_DUTY_UNIT	根据有感方波最低转速调整	限制有感方波最低转速
MAX_DUTY_SENSORLESS	无感方波输出最大占空比		根据无感方波最高转速调整	限制无感方波最高转速
MIN_DUTY_SENSORLESS	无感方波输出最小占空比		根据无感方波最低转速调整	限制无感方波最低转速
STARTUP_DUTY_STEP	启动占空比步距	单位 : BLDC_DUTY_UNIT	根据用户电机控制启动需求来设置	影响启动
KICK_STARTUP	无传感器方波控制开环加速启动	无	打开或屏蔽	影响无感方波启动方式和启动时间
NOKICK_STARTUP	无传感器方波控制直接启动	无	打开或屏蔽	
DRAG_DUTY	无感启动强拖占空比	单位 : BLDC_DUTY_UNIT	根据用户电机启动负载惯量设置	影响无感方波直接启动模式启动加速度
FORCE_COMMUTATE_TIME	强制换相时间	单位: us	根据用户电机应用最低转速设置	影响无感方波最低转速, 需大于最低转速换相时间
FIRST_STEP_DRAG_TIME	闭环首次强拖时间	单位: us	根据用户电机无感方波切入闭环顺畅性与电流要求设置	影响无感方波切入闭环过程
FIRST_COMMUTATE_TIME	闭环首次换相时间			
BLDC_AFTER_FLOW_CONTROL	无感方波续流时间抑制功能	无	打开或屏蔽	影响无感方波高速重载时续流时间
RISE_AFTER_FLOW	抑制续流上升沿反电动势	无	打开或屏蔽	影响无感方波高速重载时反电动势上升沿续流时间

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
FALL_AFTER_FLOW	抑制续流下降沿反电动势	无	打开或屏蔽	影响无感方波高速重载时反电动势下降沿续流时间
AFTER_FLOW_ANGLE_PSRC	续流时间分频系数	单位: 1	根据调试情况进行设置	影响无感方波高速重载时续流时间
AFTER_FLOW_ANGLE_NUMERATOR	续流角度系数	0 ~ 2* AFTER_FLOW_ANGLE_PSRC	根据调试情况进行设置	影响无感方波高速重载时续流时间
MIN_DUTY_PREPOSITION	无感方波预定位最小占空比	0~ (5% * DUTY_BASE_VALUE)	根据控制无感电机负载大小来调整预定位占空比大小和预定位时间	影响无感方波预定位准确性
MAX_DUTY_PREPOSITION	无感方波预定位最大占空比			
STEP_DUTY_PREPOSITION	无感方波预定位占空比步进			
INIT_PREPOSITION_DELAY	无感方波预定位初始延时	0~100,单位: ms		影响无感方波预定位耗时
INIT_PREPOSITION_DELAY_STEP	无感方波预定位延时步进			
MIN_PREPOSITION_DELAY	无感方波预定位最小延时			
BLDC_SENSORLESS_INIT_DELAY_TIME	无感方波开环加速初始延时	0~50,单位: ms	根据无感方波开环加速平滑度调整开环占空比和延时	影响无感方波开环 kick 加速过程
BLDC_SENSORLESS_MIN_DELAY_TIME	无感方波开环加速最小延时			
BLDC_SENSORLESS_STEP_DELAY_TIME	无感方波开环加速延时步进			
MAX_DUTY_SENSORLESS_START	无感方波开环加速最大占空比	0~ (20% * DUTY_BASE_VALUE)	根据无感方波开环加速平滑度调整	影响无感方波开环启动过程

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
UNDRIVE_PHASE_BEMF	过零检测反电动势结果	无	根据 MCU 外设配置设定	影响反电动势结果读取
DETECT_OK	检测正常状态	0	无需配置	定义检测状态
DETECT_FAULT	检测故障状态	1		
DETECT_UNKNOWN	检测未知状态	2		
BLDC_OVER_CURRENT_CHECK	母线过流保护使能标志	无	打开或屏蔽	影响 BLDC 母线电流过流保护策略
BLDC_OVER_CURRENT_THRESHOLD	过流阈值	单位: A	根据电机和硬件电路设置	
LIMIT_PEAK_CUR_AD	电流峰值 AD 转换结果	单位: 1	根据过流阈值自动计算	
BLDC_OVER_CURRENT_DBC	过流保护执行周期	单位: ms	根据实际需求设置	
LOSE_PHASE_PROTECTION_ENABLE	缺相保护使能标志	无	打开或屏蔽	影响 BLDC 缺相保护策略
LOSE_PHASE_THRESHOLD	缺相保护电流阈值	0~Math_IQ(1.0)	根据调试情况设置	
LOSE_PHASE_DBC	缺相保护执行周期	单位: ms		
LOSE_PHASE_ADD_COUNT	缺相保护执行计数值	单位: 1		
LOSE_PHASE_JUDGE_THRESHOLD	缺相保护最大最小电流比值	> Math_IQ(1.0)		
MOTOR_STALL_PROTECTION_ENABLE	堵转保护使能标志	无	打开或屏蔽	影响 BLDC 堵转保护策略
MOTOR_STALL_JUDGE_DBC	堵转保护判断周期	单位: ms	根据实际需求和调试情况设置	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
MOTOR_STALL_RECOVER_DBC	堵转保护恢复周期	单位: ms		
MOTOR_STALL_DRAG_DUTY	堵转恢复强拖占空比	0~Math_IQ(1.0)		
MOTOR_STALL_SPEED_THRESHOLD	堵转保护速度判断点	0~Math_IQ(1.0)		
MOTOR_STALL_DUTY_THRESHOLD	堵转保护占空比判断点	0~Math_IQ(1.0)		
MOTOR_STALL_CURRENT_THRESHOLD	堵转保护恢复电流阈值	0~Math_IQ(1.0)		
LIMIT_BUS_CURRENT_PROTECTION_ENABLE	限母线电流使能标志	无	打开或屏蔽	影响 BLDC 限母线电流策略
LIMIT_BUS_CURRENT_LTHRESHOLD	限母线电流低点阈值	0~Math_IQ(1.0)	根据实际需求和调试情况设置	
LIMIT_BUS_CURRENT_HTHRESHOLD	限母线电流高点阈值	0~Math_IQ(1.0)		
BUS_VOLTAGE_OVER	母线过压	DETECT_FAULT	状态定义, 无需更改	影响母线电压检测状态
BUS_VOLTAGE_NORMAL	母线电压正常	DETECT_OK		
BUS_VOLTAGE_UNDER	母线欠压	DETECT_FAULT		
BUS_VOLTAGE_RECOVER	母线恢复	DETECT_UNKNOWN		
BLDC_UNDER_VOLTAGE_CHECK	母线欠压检测使能标志	无	打开或屏蔽	影响母线电压保护策略
BLDC_OVER_VOLTAGE_CHECK	母线过压检测使能标志	无	打开或屏蔽	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
UNDER_VBUS_RECOVERY_VOLTAGE	母线欠压恢复电压	单位：V	根据实际需求和调试情况设置	
OVER_VBUS_RECOVERY_VOLTAGE	母线过压恢复电压	单位：V		
UNDER_VBUS_THRESHOLD	母线欠压阈值	单位：V		
UNDER_VBUS_RECOVERY_THRESHOLD	母线欠压恢复阈值	单位：V		
OVER_VBUS_THRESHOLD	母线过压阈值	单位：V		
OVER_VBUS_RECOVERY_THRESHOLD	母线过压恢复阈值	单位：V		

4 调试

4.1 带霍尔传感器 BLDC 调试

对于带霍尔传感器的 BLDC 电机，电机控制采用六步方波。电机控制的关键在于霍尔扇区信号的检测，捕获到霍尔反馈电机当前扇区后直接换相，并结合调速 PID 输出设置占空比进行 PWM 发波完成闭环控制。有感 BLDC 模式中电流内环控制母线电流，速度外环控制电机转速；根据按键指令进行电机启停，切换转动方向，加/减速等控制。参考《ATC_AC78xx_MotorApp_Development_Guide_CH》文档，其调试流程如图 4-1 所示。

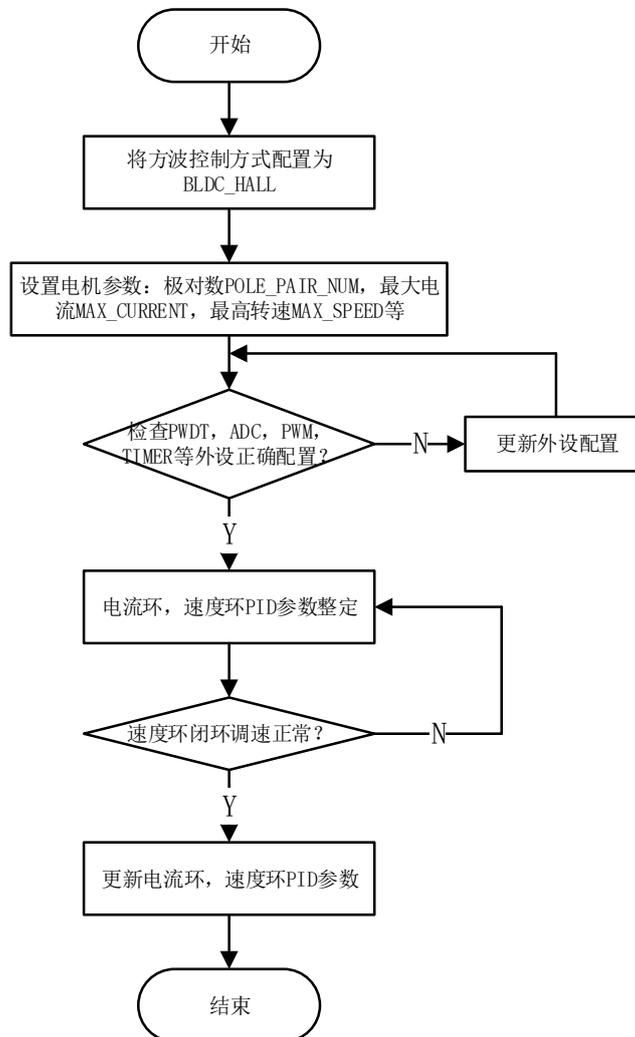


图 4-1 带霍尔的 BLDC 调试流程图



注意：

图 4-1 中 PWDT 外设为 AC780x 和 AC781x 系列为霍尔信号捕获而设计模块。AC7840x 直接采用 PWM 模块双边沿捕获功能测量霍尔信号，无需 PWDT 模块。关于 PWM 模块在带霍尔电机应用中的初始化和中断任务接口，可参考《ATC_AC78xx_MotorApp_Development_Guide_CH》。

以 AC780x 电机调试为例，带霍尔传感器 BLDC 控制的调试主要步骤如下：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Bldc_App.uvprojx 工程文件，在 bldc_parameters_define.h 文件中，打开 SIX_STEP_SQUARE_WAVE 宏定义，打开 BLDC_HALL 宏定义，屏蔽 BLDC_SENSORLESS 无感模式宏定义。
2. 在 motor_parameters_define.h 文件中，根据电机参数修改极对数 POLE_PAIR_NUM，峰值转速 MOTOR_MAX_SPEED_RPM，峰值电流 MAX_CURRENT 等适配参数。
3. 核查 PWDT，CTU，ADC 等外设是否正确配置。PWDT 模块配置主要包括如下设置：

PWDT 的 GPIO pinmux 配置: AC78xx 的 GPIO 具有 Multi-Function 功能，可以根据具体的 pinmux 表格选择相应的功能，将相应的 GPIO 设置 PWDT 功能。以 80-PIN 封装的 AC781x 为例，表 4-1 给出这种封装类型下 PWDT 的 GPIO pinmux 设置的参考。

表 4-1 PWDT 模块 pinmux 定义

Module	PAD Name	BGA Ball Name	Function1	GPIO
PWDT	PAD_PWDT_IN1	PWDT_IN1	PWDT_IN1(I)	19
PWDT	PAD_PWDT_IN2	PWDT_IN2	PWDT_IN2(I)	20
PWDT	PAD_PWDT_IN0	PWDT_IN0	PWDT_IN0(I)	24

PWDT 模块用于检测霍尔扇区并计算电机转速，CTU 和 ADC 模块用于母线电流采集，必须确保外设正确配置，能检测电机控制需要的速度环，电流环反馈方可继续调试。

在 Debug 状态下，手动缓慢转动电机转子，以霍尔 120° 安装为例，若霍尔扇区 g_hallControl.currentPhase 依次按 5=>4=>6=>2=>3=>1 或 5=>1=>3=>2=>6=>4 顺序循环更新，则 PWDT 模块配置工作正常。调整功率板目前电压，若 ADC 采样母线电压值 g_bldc_adSample.busVoltageTrue 始终与供电母线电压之间保持 10 倍的比例关系： $V_{in} = 10 * g_bldc_adSample.busVoltageTrue$ ，则 ADC 模块配置工作正常。

4. 对速度环，电流环 PI 参数进行调试整定。在确保外设配置正常后，还需对速度环，电流环的 PID 闭环控制参数进行整定调试。速度环和电流环 PID 参数调试原则相同，以速度环 PID 参数调节整

定为例：观察速度环当前速度与给定目标速度之间的关系，若出现当前速度接近目标速度过快，超调量大并伴有振荡现象，则当前 PI 参数偏大，应减小速度环 PI 参数；若出现当前速度接近目标速度过慢，调节时间过长，则当前 PI 参数偏小，应增大速度环 PI 参数；PID 参数整定的最终效果要求当前速度快速接近目标速度的同时，超调量合理且控制系统稳定而不抖动发散。

5. 把以上速度环、电流环整定 PID 参数固化设置到 `bldc_parameters_define.h` 相应宏定义中并保存，即完成带霍尔 BLDC 的调试工作。

带霍尔传感器的 BLDC 电机调试中，常见的故障问题如下：

➤ 连接问题

- a) 电机信号线或电机 Demo 板线未连接问题，需接好所有电源，Demo 板信号线解决。
 1. Demo 功率板母线电源未连接，无驱动电源输入时启动电机，电机不受力(可轻松拨动)。
 2. 电机霍尔信号线未连接至 Demo 驱动板霍尔信号接口，MCU 无法采集霍尔信号使电机进入停机状态，电机不受力。
 3. 电机 U/V/W 三相驱动线未连接至 Demo 功率板驱动接口，MCU 驱动发波信号无法输入电机本体，电机不受力。

- b) 电机信号线连接错误问题，需纠正电机霍尔信号线和 U/V/W 三相连接解决。

只有正确的电机霍尔信号线序与 Demo 驱动板霍尔 A/B/C 信号接口连接，Demo 功率板驱动输出 U/V/W 信号与电机正确的 U/V/W 三相连接，电机才能启动稳定运转。电机信号线连接错误时，MCU 驱动发波信号相对电机转子位置错乱，不匹配的方波控制换相会导致电机受力后运行混乱卡顿，甚至完全卡死堵转。堵转时母线堵转电流大，有损坏 Demo 功率板风险，所以需根据电机和 Demo 板定义，纠正电机霍尔信号线和 U/V/W 三相连接问题。

- c) 电机信号线部分未连接问题，需连接电机接触不良信号线解决。
 1. 当电机霍尔信号部分接触不良时，MCU 只能测量到部分有效霍尔扇区，方波控制会使电机受力后吸引到固定电机位置区间卡住，无法连续稳定运转。
 2. 当电机 U/V/W 三相线部分接触不良时，MCU 驱动电机发波信号仅接线部分有效。六步方波不完整，电机无法连续受力驱动，无法启动运转。

➤ 保护报警问题

当控制电机启动，电机没有受力启动，有可能在启动指令前或启动过程中检测到故障报警而使电机进入停机状态，电机不受力。常见的故障有母线电源过压，欠压，缺相，堵转等。控制电机启动故障时，需在 `g_bldc_protect` 中查看故障，并调整电机启动工况或保护功能参数解决问题。

4.2 无感 BLDC 调试

对于无传感器的 BLDC 电机，电机控制仍然采用六步方波，与霍尔 BLDC 模式的区别在于霍尔扇区的获取方式以及换相点的差异。在无霍尔传感器的情况下，经典 BLDC 电机控制一般采用反电动势过零

点来模拟重构霍尔信号。AC78xx 系列 MCU 中集成了 ACMP 比较器，采用硬件比较器 ACMP 的方案来检测反电动势过零点。同时反电动势越大 ACMP 输出结果越准确，故无感 BLDC 还需要开环加速的过程。由于反电动势过零点与霍尔信号之间相位关系，检测到反电动势过零点后需延迟 30 度电角度后换相，换相 delay 由电机转速计算而来。参考《ATC_AC78xx_MotorApp_Development_Guide_CH》文档，其调试流程如图 4-2 所示。

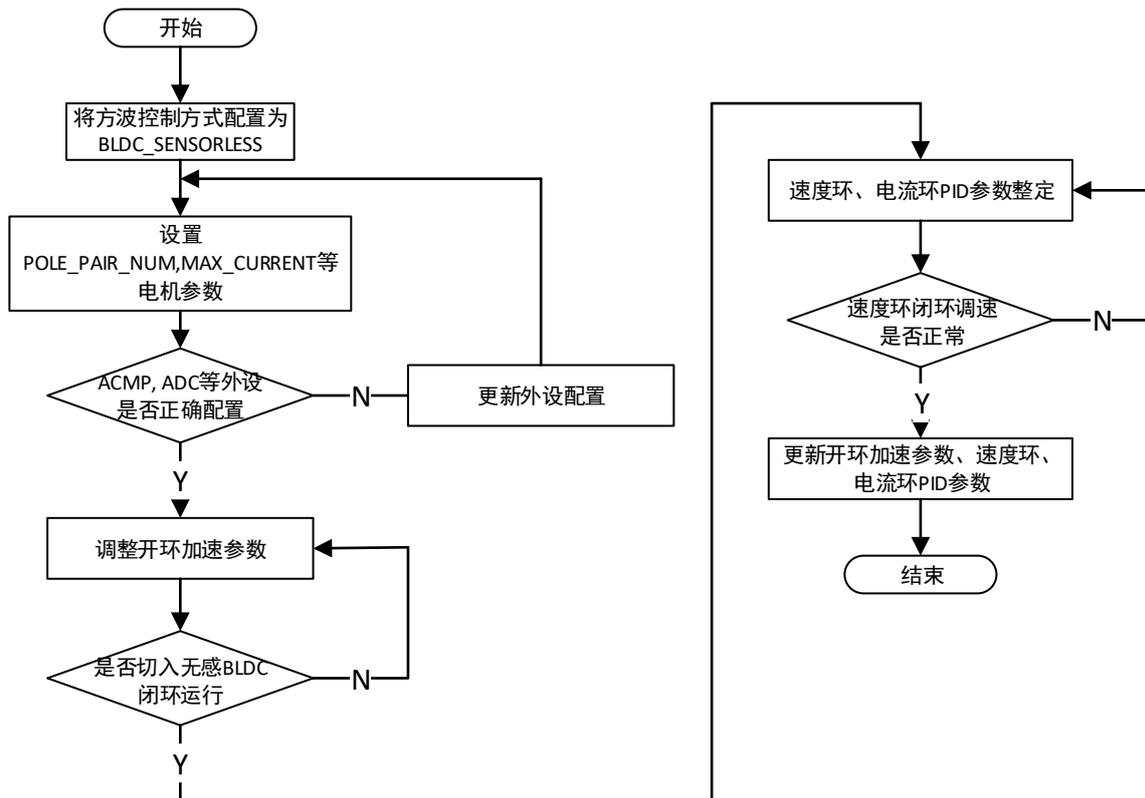


图 4-2 无感 BLDC 调试流程图

根据以上调试流程图，无感 BLDC 控制的调试主要分以下步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Bldc_App.uvprojx 工程文件，在 bldc_parameters_define.h 文件中，打开 SIX_STEP_SQUARE_WAVE 宏定义，打开 BLDC_SENSORLESS 无感宏定义，屏蔽 BLDC_HALL 有感宏定义。
2. 在 motor_parameters_define.h 文件中，根据电机参数修改极对数 POLE_PAIR_NUM，峰值转速 MOTOR_MAX_SPEED_RPM，峰值电流 MAX_CURRENT 等适配参数。
3. 核查 ACMP，CTU，ADC 等外设是否正确配置。

ACMP 模块用于检测反电动势过零点并触发换相，在电机获取初始位置后开始比较过零点；CTU 和 ADC 模块用于母线电流采集，其检验方法霍尔 BLDC 模式相同，可参考霍尔 BLDC 模式。

4. 调试无感 BLDC 模式开环加速参数。无感 BLDC 启动过程先预定位到固定磁场扇区后，需调试开环加速参数。适当增加开环加速占空比 MAX_DUTY_SENSORLESS_START 和

MOTOR_DUTY_STEP, 同时减小开环加速时间 BLDC_SENSORLESS_INIT_DELAY_TIME, BLDC_SENSORLESS_MIN_DELAY_TIME, BLDC_SENSORLESS_STEP_DELAY_TIME 即可调整开环加速过程。开环占空比不宜过大, 否则会引起启动过流等问题, 只需加 BLDC 加速带动转起来即可。只要开环加速参数合理, 能正常检测到反电动势过零点, 便可闭环切入无感 BLDC 工作。

5. 对速度环, 电流环 PI 参数进行调试整定。在确保外设配置正常后, 还需对速度环, 电流环的 PID 闭环控制参数进行整定调试。速度环和电流环 PID 参数调试原则相同, 以速度环 PID 参数调节整定为例: 观察速度环当前速度与给定目标速度之间的关系, 若出现当前速度接近目标速度过快, 超调量大并伴有振荡现象, 则当前 PI 参数偏大, 应减小速度环 PI 参数; 若出现当前速度接近目标速度过慢, 调节时间过长, 则当前 PI 参数偏小, 应增大速度环 PI 参数; PID 参数整定的最终效果要求当前速度快速接近目标速度的同时, 超调量合理且控制系统稳定而不抖动发散。
6. 把以上开环加速参数, 速度环, 电流环整定 PID 参数固化设置到 bldc_parameters_define.h 相应宏定义中并保存, 即完成无感 BLDC 的调试工作。

无感 BLDC 电机调试中, 常见的故障问题除 4.1 节外, 还有低速稳定性问题。解决无感 BLDC 在低转速时稳定性问题主要方法有:

➤ 拓展反电动势检测精度

无感 BLDC 控制主要通过检测反电动势过零点, 而反电动势幅值与电机转速正相关, 因此低速时反电动势幅值小限制了过零检测的准确性。可以通过调整反电动势分压电路, 将分压后三相反电动势最大限度放大拓展至 ACMP 检测最大电压范围(同 ADC 采样范围), 增加了低速下反电动势幅值, 提高反电动势检测精度。

➤ 增加反电动势噪声检测补偿

反电动势过零点一旦检测错误, 就会造成无感 BLDC 换相时序误差, 电机运行抖动。虽然反电动势检测电路中增加滤波深度可保证信号无噪声, 但造成反电动势检测时序滞后也是无感 BLDC 控制中缺陷。对反电动势噪声在过零检测造成的误差进行补偿处理, 可克服反电动势噪声影响, 提高运行稳定性。检测到反电动势过零点后, 开始延迟 30 电角度计时。同时继续检测反电动势过零点结果, 若检测到过零点后又出现过零点之前结果, 则说明之前检测的过零点为反电动势噪声信号。此时将延迟电角度的计时值增加, 即可有效避免反电动势噪声的影响, 提高电机运转稳定性。

4.3 带霍尔传感器 FOC 调试

对于电机带霍尔传感器的 FOC 控制, Demo 程序中进行三相电流采样还原, 并对相电流进行 clark, park 变换后分别对 D 轴和 Q 轴进行电流环 PID 闭环控制, 最终根据运算所得向量进行 SVPWM 向量调制, 对 UVW 三相 MOS 管进行通断控制, 完成 FOC 算法对电机的控制。带霍尔 FOC 控制的难点在于如何将霍尔的脉冲式开关信号量转换成电机转子电角度。Demo 程序中是通过霍尔自学习算法先学习到霍尔线序及电机转子初始位置, 启动后根据霍尔传感器解算出的速度信息进行持续积分对转子电角度进行更新, 并在扇区切换时检测误差并补偿。带霍尔传感器的 FOC 控制的调试流程如图 4-3 所示。

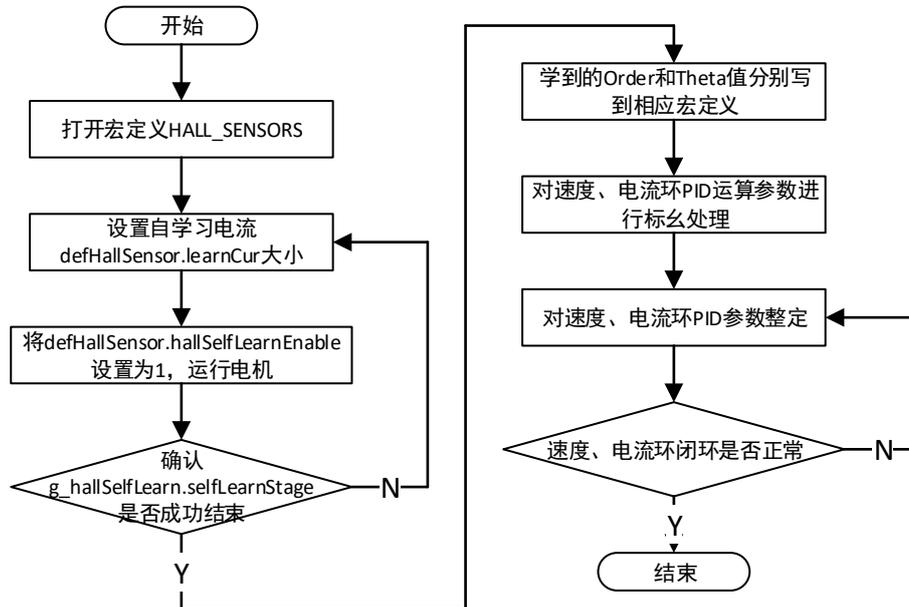


图 4-3 带霍尔的 FOC 调试流程图

根据以上调试流程图，带霍尔传感器 FOC 控制的调试主要分以下步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Motor_App.uvprojx 工程文件，打开 drive_parameters_define.h 中宏定义 FOC_SINE_WAVE，打开宏定义 HALL_SENSORS。
2. 确认电机及霍尔与 Demo 板连接无误后上电 Debug，在 Debug watch 窗口中将 defHallSensor.hallSelfLearnEnable 的值设 1，采用配置的自学习模式及自学习电流环参数进行霍尔自学习运算，电机将启动霍尔自学习功能。
3. 在进行霍尔自学习时，电机以小角度来回摆动。若 g_hallSelfLearn.selfLearnStage 变为 2，且 g_hallSelfLearn.selfLearnIndex 的值为 22，则霍尔自学习失败。霍尔自学习结束后，通过 debug 窗口记录学习到的 g_hallSelfLearn.selfLearnOrder 和 g_hallSelfLearn.selfLearnTheta 数值，分别填写到 Drive_parameters_define.h 中 HALL_SELF_LEARN_ORDER 和 HALL_SELF_LEARN_THETA。
4. 影响自学习结果的主要原因是自学习电流设定大小、电流环参数。当霍尔自学习失败时，用户可先检查霍尔线是否连接完好，然后适当调整霍尔自学习电流。同时建议用户在空载静止状态下启动自学习过程。若采取以上措施霍尔自学习仍然失败，用户可考虑适当调整电流环参数。
5. 完成以上调试过程自学习成功后，电机即可根据学习到的初始角度启动。启动后 PWDT 模块记录霍尔正负脉宽并计算出电机转子速度，转子速度积分运算可保证电机转子位置实时更新，进行 FOC 闭环运算。用户可进一步通过按键进行加减速等操作设置来验证速度环，电流环的 PID 参数。关于速度环参数验证整定，用户可参考带霍尔传感器 BLDC 速度环调试。电流环参数验证整定与速度环类似，在 Debug 状态下修改 g_focVarsCtrl.iqRef 给定 Q 轴目标电流，观察目标电流与实际采样电流之间的关系，若出现当前电流接近目标电流过快，超调量大并伴有振荡现象，则当前

Q 轴电流环 PI 参数偏大，应减小 PI 参数；若出现当前电流接近目标电流过慢，调节时间过长，则当前 Q 轴电流环 PI 参数偏小，应增大电流环 PI 参数；D 轴电流环 PID 参数调试和整定与 Q 轴同理。PID 参数整定的最终效果要求当前电流快速接近目标电流的同时，超调量合理且控制系统稳定而不抖动发散。

6. 把以上速度环，电流环整定 PID 参数固化设置到 Drive_parameters_define.h 相应宏定义中并保存，即完成带霍尔 FOC 的调试工作。

4.4 带正交编码器 FOC 调试

电机带正交编码器的 FOC 控制与霍尔 FOC 控制的差异在于转子电角度的获取方式。Demo 程序中编码 FOC 控制电角度来源于 A/B 相正交编码脉冲信号，配置 PWM 模块在正交编码捕获模式来采集编码器脉冲计数。编码 FOC 的优势在于编码器角度精度更高，且不需要复杂的算法运算即可获得有效电角度；缺点在于缺少归零 Z 信号和角度基准需要启动前进行强吸置位，且累计丢失脉冲计数如果不及时校正将影响电机运行。正交编码器 FOC 的缺点可通过归零 Z 信号或辅助霍尔传感器来解决。正交编码器的 A/B 相接线会影响捕获脉冲计数极性，因此需在正式 Debug 电机前检查编码器极性。编码器极性正确需保证从电机轴端观察电机，顺时针转动电机时 PWM 捕获脉冲计数 PWMx->CNT 增加，逆时针转动时 PWM 捕获脉冲计数 PWMx->CNT 减小。带正交编码器的 FOC 控制的调试流程如图 4-4 所示。

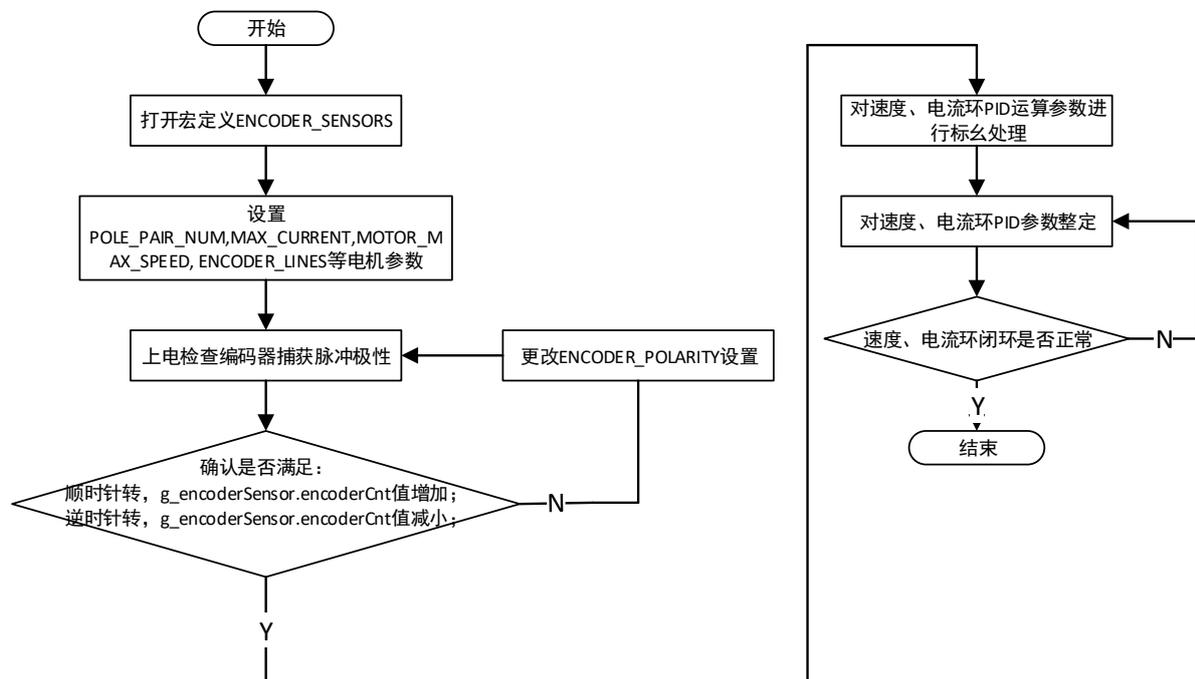


图 4-4 正交编码器 FOC 调试流程图

根据以上调试流程图，带正交编码器 FOC 控制的调试主要分以下步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Motor_App.uvprojx 工程文件，打开 drive_parameters_define.h 中宏定义 FOC_SINE_WAVE，打开宏定义 ENCODER_SENSORS。
2. 根据电机的技术参数，并参考 3.1 节修改 motor_parameters_define.h 中相应的电机参数宏定义。设置 POLE_PAIR_NUM, MAX_CURRENT 和 ENCODER_LINES(A 相脉冲数/机械周期)等参数。
3. 确认电机及编码器与 Demo 板连接无误后上电 Debug，将 g_encoderSensor.encoderCnt 添加到 Watch 窗口中，顺时针转动电机若 g_encoderSensor.encoderCnt 计数增加则编码器接线极性正常；若 g_encoderSensor.encoderCnt 计数减小则编码器接线极性反向，将 motor_parameters_define.h 中默认电机极性 ENCODER_POLARITY 由 0 更改为 1 后编译重新 debug，确保顺时针转动电机时 g_encoderSensor.encoderCnt 计数增加。
4. 完成以上 Debug 过程后，电机即可根据 PWM0 捕获脉冲计数计算电机角度，并在启动 ALIGN 后实时更新电角度启动运行。启动后 PWM 模块记录正交编码器脉冲计数，并在 Encoder_ElecAngleCalc 函数中计算更新电角度，在 1ms 任务中由 Asr_EstSpeedCalc 函数计算电机运行速度，进行 FOC 闭环运算。用户可进一步通过按键进行加减速等操作设置来验证速度环，电流环的 PID 参数。关于速度环参数验证整定，用户可参考带霍尔传感器 BLDC 速度环调试。电流环参数验证整定与速度环类似，在 Debug 状态下修改 g_focVarsCtrl.iqRef 给定 Q 轴目标电流，观察目标电流与实际采样电流之间的关系，若出现当前电流接近目标电流过快，超调量大并伴有振荡现象，则当前 Q 轴电流环 PI 参数偏大，应减小 PI 参数；若出现当前电流接近目标电流过慢，调节时间过长，则当前 Q 轴电流环 PI 参数偏小，应增大电流环 PI 参数；D 轴电流环 PID 参数调试和整定与 Q 轴同理。PID 参数整定的最终效果要求当前电流快速接近目标电流的同时，超调量合理且控制系统稳定而不抖动发散。
5. 把以上速度环，电流环整定 PID 参数固化设置到 drive_parameters_define.h 相应宏定义中并保存，即完成带编码器 FOC 的调试工作。

4.5 带 Hall 传感器与 AB 编码器 FOC 调试

该模式为霍尔传感器与 AB 编码器共同进行转子位置角度估算与频率估算，该模式可实现更准确的角度估算。对该模式调试前，需要首先分别单独调试 hall 传感器模式与 AB 编码器模式，然后将控制方式改为 ENCODER_HALL_SENSORS 模式，即可正常运行电机。

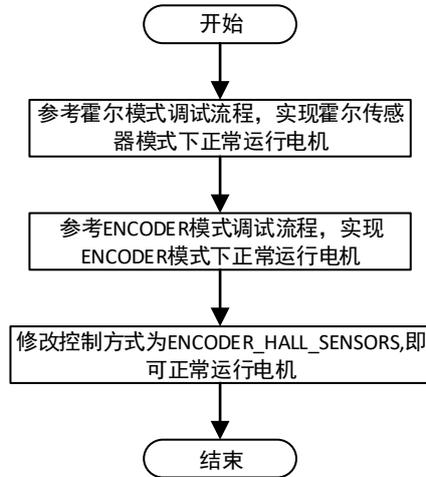


图 4-5 霍尔传感器与 AB 编码器模式调试流程图

4.6 无感 FOC 调试

无感 FOC 控制算法支持无感 FOC 滑模观测器算法、无感 FOC 磁链观测器算法与无感 FOC 模型参考自适应 (MRAS) 算法。

4.6.1 无感 FOC 滑模观测器调试

对于电机的无感 FOC 控制，其 FOC 控制核心原理同带霍尔 FOC 控制。无传感器控制的难点在于转子角位置的获取，Demo 程序中 FOC 算法可通过滑模观测器进行电机两相反电动势 e_a 、 e_b 向量的估算，然后通过求其反正切或者锁相环 PLL 方式得到电机转子电角度，从而将无感 FOC 控制问题转换为有感 (转子电角度)FOC 控制。无感 FOC 滑模观测器控制的调试流程如图 4-6 所示。

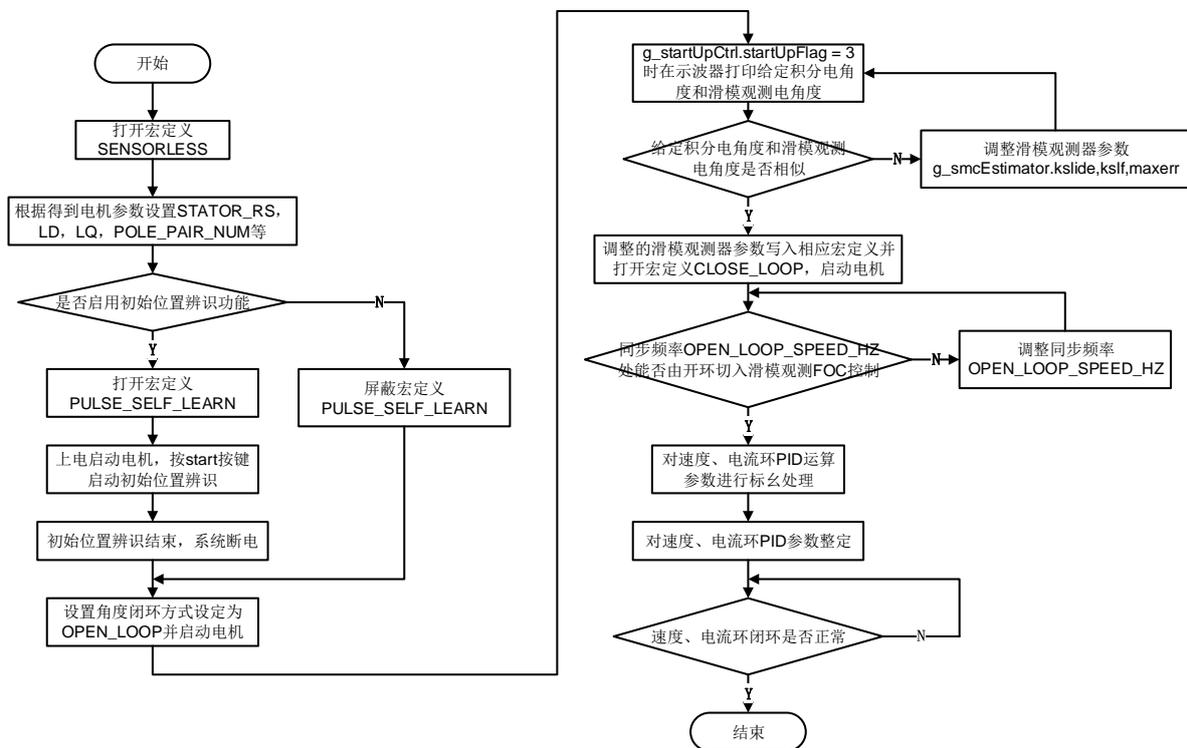


图 4-6 无感 FOC 滑模观测器调试流程图

根据以上调试流程图，无感 FOC 滑模观测器控制的调试主要分以下步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Motor_App.uvprojx 工程文件，打开 drive_parameters_define.h 中参数宏定义 FOC_SINE_WAVE 选择 FOC 矢量控制，打开宏定义 SENSORLESS，将其设置为无传感器模式。打开宏定义 SMC_OBSERVE 并屏蔽宏定义 FLUX_OBSERVE，使用无感 FOC 滑模观测器控制。
2. 打开宏定义 ATAN_STATE_OBSERVER 或者 PLL_STATE_OBSERVER，前者为反正切角度获取方法，后者为 PLL 锁相环角度获取方法。当选择 ATAN_STATE_OBSERVER 时，若打开宏定义 ELEC_FREQUENCY_HIGH，则在 FOC 中断中根据角度计算当前频率；若打开宏定义 ELEC_FREQUENCY_LOW，则在 1ms 时基中计算当前频率
3. 测量电机的技术参数，并参考 3.1 节修改 motor_parameters_define.h 中相应的电机参数宏定义。电机需要测量的参数主要有 STATOR_RS，LD，LQ 和 POLE_PAIR_NUM 等。
4. 打开 drive_parameters_define.h 中 OPEN_LOOP(开环模式)，打开 IF_STARTUP(电流闭环启动模式)。并在开环模式下启动电机。
5. 倘若开启初始位置辨识功能 PULSE_INJECTION，则先进行完成初始辨识功能，然后 IF 启动；否则直接进入 IF 启动流程。初始位置辨识功能需要配置的参数是 SELF_LEARN_THRES。该变量表示初始位置辨识时脉冲电流阈值，与电机电感大小有关，在 Keil 软件 Debug 状态中观察

`g_pulseInject.busCur[]` 数组变量，若最大值与第二大值之间差距较小，可适当增大 `SELF_LEARN_THRES`。在 Keil 软件 Debug 状态下 Watch 窗口中观察变量 `g_startUpCtrl.startUpFlag` 直到其变为 3；

6. 通过设置 `OPEN_LOOP_SPEED_HZ`（开环切换频率）、`CURVE_TYPE`（开环启动曲线类型）、`TIME_DURATION`（开环启动曲线时长）、`FREQ_REF_VALUE`（开环启动曲线频率值）、`CUR_REF_VALUE`（开环启动曲线电流值）将电机开环运转至设定的开环切换频率。

7. 设置 `DUBUG_DAC_CH0_PARAMID` 为 157，`DUBUG_DAC_CH1_PARAMID` 为 158，将 Demo 板上丝印 JP11 的两个引脚引到示波器两个通道进行观察。JP11 输出的是 PWM0 模块的两个通道，每个通道配有 RC 低通滤波电路，滤波电路将 Debug 数字脉冲信号转换成模拟信号输出，滤波截止频率 330Hz。PWM0 两通道接示波器后，屏幕上打印的是开环给定同步转速积分电角度和滑模观测器估计转子电角度，只有两波形相似度高且波形平滑才能进行后续闭环调试过程。

8. 开环调试，将电机运行到固定转速（通过 DAC 观察估测电气角）

通过调整开环启动曲线参数，使电机顺利运行找到最佳的 IF 启动斜率，并确认最终的闭环切换频率（以估测电气角平滑为标准）。调试中需要注意以下问题：

1、若估计转子电角度曲线波动噪声大，与积分电角度波形差异大，则用户需调整滑模观测器参数。用户改为用户更改滑模开环参数 `SMC_KSLIDE0`，`SMC_KSLF0`，`SMC_MAXERR0`，使估计转子电角度逼近积分电角度曲线，让滑模观测器估算出更好的效果如图 4-7 所示。

2、根据估测波形的状态，适当调整开环切换频率，默认是 10Hz。

9. 在以上开环调试过后，通过 DAC 观察估测电气角波形应该为规则三角波，此时可设置电机为闭环运转模式。将开环调试的 `SMC_KSLIDE0`，`SMC_KSLF0`，`SMC_MAXERR0` 参数同步到闭环参数 `SMC_KSLIDE1`，`SMC_KSLF1`，`SMC_MAXERR1` 中。闭环效果也可通过修改 `SMC_KSLIDE1`，`SMC_KSLF1`，`SMC_MAXERR1` 来进行调整。注意 `SMC_KSLF1` 由 `SMC_KSLF0` 自动计算获取。用户需关闭 `OPEN_LOOP`（闭环模式）并打开 `CLOSE_LOOP`（闭环模式）定义，为无感 FOC 使用估计转子电角度替代积分电角度进行 FOC 闭环运算做准备。

10. 当打开宏定义 `FULL_ORDER_SMC` 时，使用全阶滑模算法，此时在第 9 步调试参数基础上，新增了 `FULL_SMC_GAIN` 全阶滑模增益系数及 `FULL_SMC_FILT` 全阶滑模滤波使能开关。当 `FULL_SMC_FILT` 全阶滑模滤波使能开关配置为 `DISABLE` 时，第 9 步中的滤波系数 `SMC_KSLF0` 和 `SMC_KSLF1` 两个滤波系数不再起作用；当 `FULL_SMC_FILT` 全阶滑模滤波使能开关配置为 `ENABLE` 时，滑模算法的所有参数均参与运算。`FULL_SMC_GAIN` 全阶滑模增益系数越大，则响应越快，但转速波动相应亦较大。

11. 以上宏定义设置完毕重新编译后，用户可重新上电 Debug 无感 FOC 闭环模式。此时，用户仍然通过示波器继续观察估计转子电角度和积分电角度曲线，若两者变为重合曲线说明转子积分电角度切换到估计电角度闭环成功，无感 FOC 就能采用估计转子电角度进行正式的 FOC 运算。

12. 开环切换闭环过程中，开环角度会慢慢向估算角度靠近，防止角度突变。如果角度估算波形良好情况下，闭环切换停机，可能是电机阻力较大，可通过增加平滑电流 SPD_SMOOTH_CUR、增加开环频率 OPEN_LOOP_SPEED_HZ、增加速度环 PI 来解决切换停机问题。
13. 闭环成功后，用户可参考带霍尔 FOC 方法进行速度环，电流环 PID 参数整定，并把以上速度环，电流环整定 PID 参数固化设置到 drive_parameters_define.h 相应宏定义中并保存，完成无感 FOC 的调试工作。

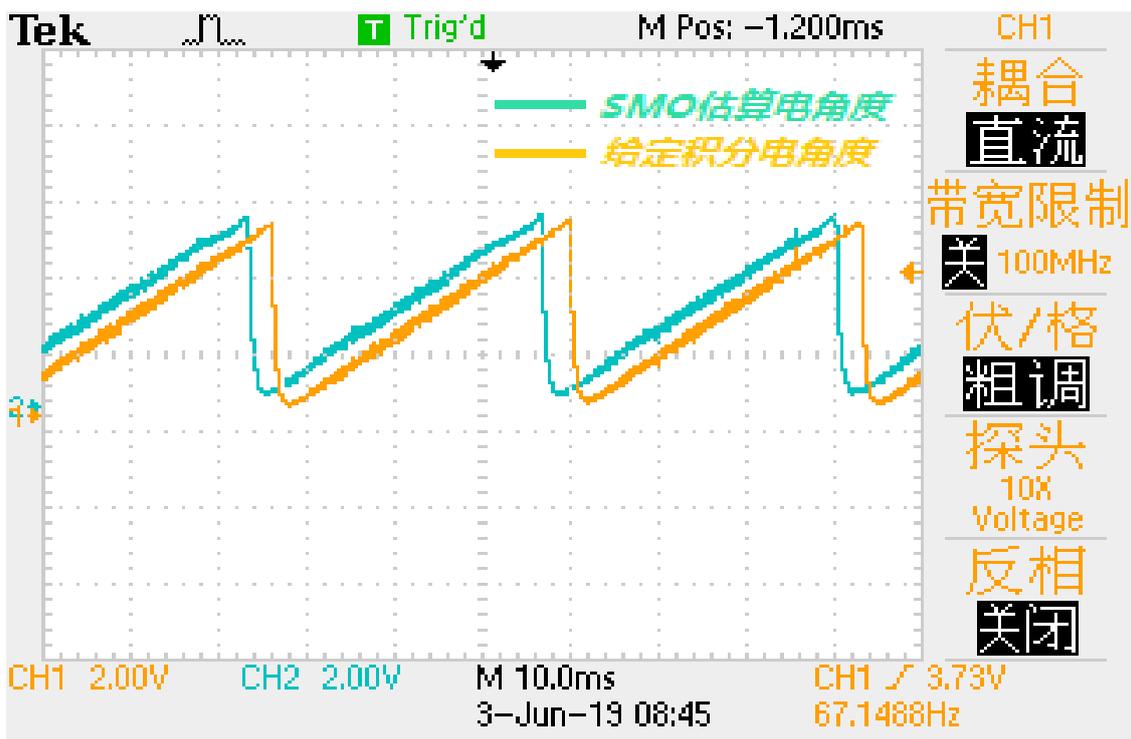


图 4-7 滑模观测器参数合理估算效果图

4.6.2 无感 FOC 磁链观测器调试

磁链观测器无感算法原理为：根据电压方程计算定子磁链 α , β 分量，再根据定子磁链得到转子永磁体磁链 α , β 分量，转子位置角可对转子永磁体磁链 α , β 分量求反正切，或通过内差法构造 PLL 锁相环得到。

调试步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Motor_App.uvprojx 工程文件，drive_parameters_define.h 中打开宏定义 FOC_SINE_WAVE，意为选择 FOC 矢量控制。
2. 打开宏定义 SENSORLESS，意为选择无感模式。
3. 打开宏定义 IF_STARTUP，选择启动方式为 I/F 启动。

4. 打开宏定义 `FLUX_OBSERVE`，选择磁链观测器模式，这里需屏蔽 `SMC_OBSERVE` 宏定义。
5. 打开宏定义 `ATAN_STATE_OBSERVER` 或者 `PLL_STATE_OBSERVER`，前者为反正切角度获取方法，后者为 PLL 锁相环角度获取方法。当选择 `ATAN_STATE_OBSERVER` 时，若打开宏定义 `ELEC_FREQUENCY_HIGH`，则在 FOC 中断中根据角度计算当前频率；若打开宏定义 `ELEC_FREQUENCY_LOW`，则在 1ms 时基中计算当前频率。
6. `motor_parameters_define.h` 中配置好电机参数以及 `hwboard_parameters_define.h` 中配置好硬件参数后即可进行磁链观测器调试。
7. 调试中可先选择开环模式，观察估测角度波形是否正常，以及开环速度是否在同步速度附近，若角度、速度无异常可切换至闭环调试；若角度正常，速度偏离同步速度，反正切法可根据调整 `drive_parameters_define.h` 中速度滤波系数 `ATAN_SPEED_FILT_H` 或 `ATAN_SPEED_FILT_L`。若选择 PLL 锁相环法可调整 `drive_parameters_define.h` 中 `COEFFPLL_FLUX` 来更改 PLL 的 PI 参数。
8. 若估测角度还不正常，还可以在 `drive_parameters_define.h` 调整低通滤波系数 `FLIT_COEFF` 来进行调试，开环角度正常但是无法闭环的话也可以更改此滤波系数 `FLIT_COEFF`；也可以调整 `COMPCOF_UPLIMIT` 磁链观测器反电势补偿上限的值，其值越大，则补偿越接近真实值。
9. 其他闭环调试同 FOC 滑模控制闭环调试一样，两者开环启动到闭环切换过程均一致。

4.6.3 无感 FOC MRAS 观测器调试

MRAS 即模型参考自适应算法，通过建立一个不含未知参数的参考模型，一个含未知参数的可调模型，两个模型具有相同的物理意义，两个模型同时工作，实现控制对象的输出实时跟踪参考模型，求得可调模型的输出量和参考模型输出量的差值，再通过合适的自适应率来调节可调模型的参数，系统的收敛性可以通过 Popov 的超稳定性理论来分析。

调试步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 `Motor_App.uvprojx` 工程文件，`drive_parameters_define.h` 中打开宏定义 `FOC_SINE_WAVE`，意为选择 FOC 矢量控制。
2. 打开宏定义 `SENSORLESS`，意为选择无感模式。
3. 打开宏定义 `IF_STARTUP`，选择启动方式为 I/F 启动。
4. 打开宏定义 `MRAS_OBSERVE`，选择模型参考自适应模式，这里需屏蔽 `SMC_OBSERVE` 以及 `FLUX_OBSERVE` 宏定义。
5. `motor_parameters_define.h` 中配置好电机参数以及 `hwboard_parameters_define.h` 中配置好硬件参数后即可进行 MRAS 算法调试。这里特别注意的是，MRAS 无传感算法需要使用电

机参数中的反电势电压系数 `VOLTAGE_CONSTANT`，该系数为电机在 1000rpm 时相反电势的平均值，需手动测量或咨询电机厂获取该参数，该参数对 MRAS 算法角度估算准确性影响较大。

6. 调试中可先选择开环模式 `OPEN_LOOP`，观察估测角度波形是否正常，以及开环速度是否在同步速度附近，若角度、速度无异常可切换至闭环调试。
7. 若估测角度及速度异常，可以在 `drive_parameters_define.h` 调整 MRAS 观测器的 `ALPHA_COEFF` 和 `BETA_COEFF` 来进行调试，这两个参数越大，MRAS 算法动态响应性越快，但系统稳定性会降低；参数越小，响应性越慢，但系统越稳定。需在实际应用中寻找合适参数，保证响应性的同时系统又不失稳。
8. 其他闭环调试同 FOC 滑模观测器以及磁链观测器闭环调试一样，两者开环启动到闭环切换过程均一致。

4.7 母线电流估算调试

母线电流估算原理为：在一个开关周期内,根据三相相电流与母线电流的关系计算出三相相电流各自的作用时间占比,然后将三相相电流采样值的加权平均值作为直流母线电流预估值,其中相电流的权系数分别为各自的作用时间占比。

调试步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。`drive_parameters_define.h` 中打开宏定义 `POWER_DCCUR_EST_ENABLE`，可启用母线电流估算功能。打开宏定义 `FOC_SINE_WAVE` 以使能 FOC 控制。
2. 在 keil 的 watch 窗口添加 `g_dcCurEst.dcCurTrue` 观察变量，此变量为估算的母线电流实际值。注意此变量为了提高显示精度，默认放大 100 倍，假如 `g_dcCurEst.dcCurTrue = 150`，代表当前母线电流为 1.5A。
3. 在 keil 的 watch 窗口添加 `g_dcCurEst.dcCur` 观察变量，此变量为母线电流 Q15 格式的标么值，标么的电流基值为 `motor_parameters_define.h` 中电机参数值 `MAX_CURRENT`。

假如当前电机标么电流 `MAX_CURRENT` 为 20A,若当前 `g_dcCurEst.dcCur` 值为 10000，此时母线电流真实值 = $10000 / 32768 * 20 = 6.1A$ 。

4. 特别说明：若电机相电流波形毛刺比较多，可能造成估算出的母线电流值误差偏大。

4.8 电机参数识别

无感 FOC 控制对电机参数敏感，在使用无感 FOC 驱动 PMSM 时首先需要获取较为准确的电机参数，如定子电阻 R_s ，定子电感 L_s ，转子磁链（反电动势常数）等。电机参数可通过直接测量法，使用电桥等试验设备进行测量；也可通过相关软件算法实现。试验测量法可参考《ATC 电机主要参数介绍及测量方法说明》。下面介绍软件算法获取电机参数。

调试步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Motor_App.uvprojx 工程文件，打开 motor_parameters_define.h 文件，正确填写电机类型 MOTOR_TYPE、电机极对数 POLE_PAIR_NUM、最高转速 MOTOR_MAX_SPEED_RPM、最大电流 MAX_CURRENT 等宏定义值。对于永磁同步电机，MOTOR_TYPE 设为 MOTOR_SPMSM 或 MOTOR_IPMSM 均可，可在完成参数辨识后通过 dq 电感的差别明确电机类型：dq 电感值基本一致为 MOTOR_SPMSM，dq 电感差异较大为 MOTOR_IPMSM。
2. 编译后下载到 demo 板，在 Debug watch 窗口中添加结构体 g_paramIdentify，其中，子结构体 pParamIdentifyCfg 的变量 identifyParSel 的 bit0 表示进行定子电阻识别；对于 PMSM，bit1 表示进行定子电感识别，bit2 表示进行转子磁链（反电动势常数）识别；对于异步电机，bit1 表示进行转子电阻与漏感辨识，bit2 表示进行互感辨识。其中，PMSM 的转子磁链识别与异步电机的互感辨识均需要电机可脱离负载自由旋转。例如将此变量值设为 3，则表示进行定子电阻与定子电感的识别。
3. 在 Debug watch 窗口中将 g_paramIdentify 子结构体 pParamIdentifyCtrl 的变量 identifyCtrl 设为 1，进入参数辨识运行模式。按下控制板上的启停键，或在 Debug watch 窗口中将 g_mcStatus 的值修改为 12（IDENTIFY），则开始执行电机参数识别流程。
4. 电机参数识别结果在 g_paramIdentify 的子结构体 pParamIdentifyCtrl 中。其中，rsId 为定子电阻值；ld 和 lq 为 PMSM 定子电感的 dq 轴分量，bemf 是 PMSM 电机反电动势常数；rrId 是异步电机的转子电阻值，lsId 和 lrId 是异步电机定子电感与转子电感，lmId 是异步电机的互感。
5. 记下步骤 5 的辨识结果，打开 motor_parameters_define.h 文件，将 rsId 的值填写到 STATOR_RS 宏定义值；若是 PMSM，则将 ld 的值填写到 LS 和 LD 宏定义值；lq 的值填写到 LQ 宏定义值；bemf 的值填写到 VOLTAGE_CONSTANT 宏定义值；若是异步电机，则将 rrId 值写到 ROTOR_RS、lsId 与 lrId 值写给 LS 和 LR，lmId 值写给 LM。再次按下控制板上的启停键，或在 Debug watch 窗口将 g_paramIdentify 子结构体 pParamIdentifyCtrl 的变量 initCtrl 设 1 则退出参数辨识模式，回到待机状态。保存工程并编译下载，即可使用当前电机的参数。
6. 用户同时可使用 ATC Motor Studio 工具实现电机参数识别，具体方式可参考文档《ATC Motor Studio 使用指南》中“参数识别”章节内容。

4.9 Hall 传感器自学习

带 Hall 传感器的 FOC 电机控制会因不确定 Hall 顺序，无法得到所对应的电机角度，需要对电机 Hall 传感器安装信息进行自学习。

调试步骤：

1. 检查硬件环境、线路连接正确。打开 Motor_App.uvprojx 工程文件，打开 drive_parameters_define.h 文件，打开宏定义 HALL_SENSORS，并屏蔽其他控制方式宏定义，以选择 Hall FOC 控制方式。
2. 编译下载后，在 debug watch 窗口中添加 g_hall 结构体，将子结构体 pHallCfg 变量 hallSelfLearnMode 设为 1，则只学习 Hall 传感器的顺序及角度；设为 2，则还可学习 Hall 传感器六个扇区中的最大及最小扇区宽度，以考察 Hall 扇区的均匀性。需要注意的是，设为 2 时，Hall 自学习功能会驱动电机旋转。
3. 将 g_hall 子结构体 pHallCfg 变量 hallSelfLearnEnable 设为 1，按下控制板上 START/STOP 按键，则开始 Hall 自学习。
4. 自学习结果可通过观察 g_hallSelfLearnBuffer 结构体记录下来，其中，变量 selfLearnOrder 的值替换 drive_parameters_define.h 中 HALL_SELF_LEARN_ORDER 宏定义值；变量 selfLearnTheta 替换 drive_parameters_define.h 中 HALL_SELF_LEARN_THETA 宏定义值。
5. 保存工程并重新编译、下载，即可运行 Hall FOC。
6. 当电机三相线接线顺序改变后，需要重新按照上述 1~5 的步骤进行 Hall 传感器自学习。
7. 若自学习进行中报故障：HALL_SELF_LEARN_FAILURE，则需要检查霍尔信号线是否可靠连接。
8. 若使用自学习的结果无法正常运行 Hall FOC，在确保霍尔信号线可靠连接后，调整结构体 pHallCfg 变量 learnCur 的值，重新按照 1~5 的步骤进行 Hall 传感器自学习，直到 Hall FOC 可正常运行。构体 pHallCfg 变量 learnCur 的意义是自学习阶段的注入电流幅值，程序值 16384 表示 0.5 倍电机最大电流。为避免注入电流过大造成意外事故，构体 pHallCfg 变量 learnCur 的值不可大于 16384。
9. 用户同时可使用 ATC Motor Studio 工具实现霍尔传感器自学习功能，具体方式可参考文档《ATC Motor Studio 使用指南》中“参数识别”章节内容。

4.10 使用 Motor Studio 调试电机

使用 ATC Motor Studio 电机上位机工具可快速实现用户电机 + ATC Motor 算法套件的适配调试。使用 Motor Studio 调试电机的流程图如图 4-9 所示。

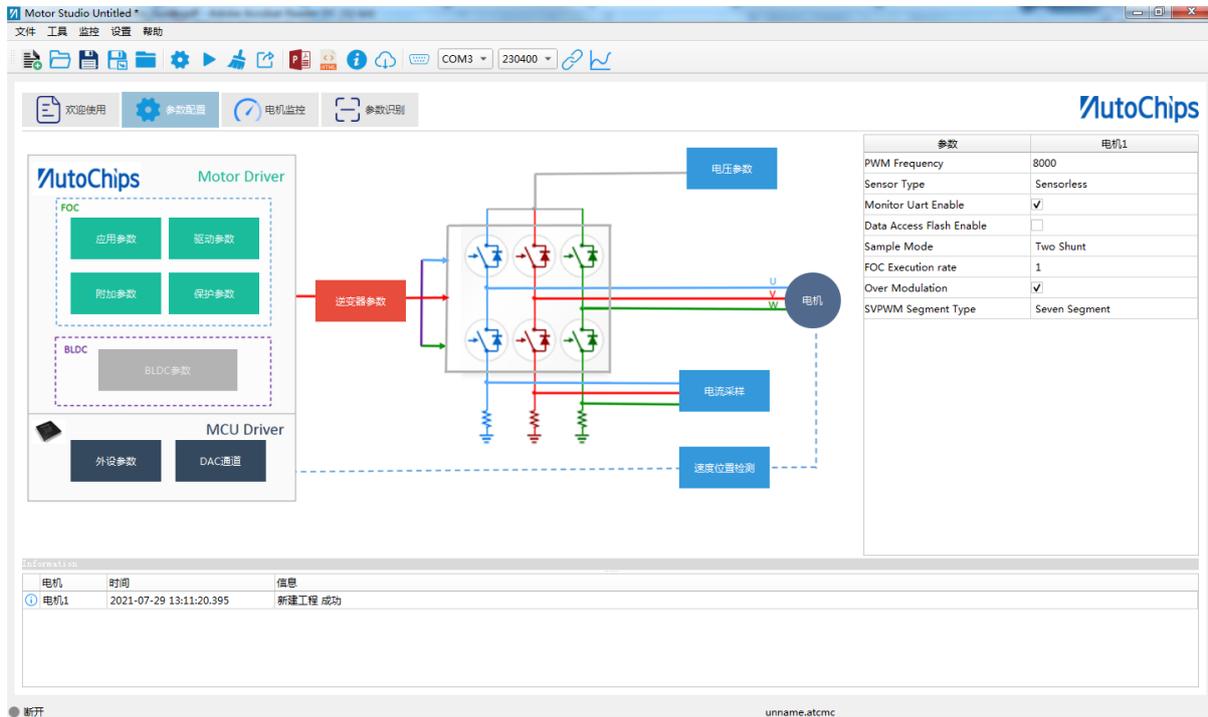


图 4-8 Motor Studio 界面

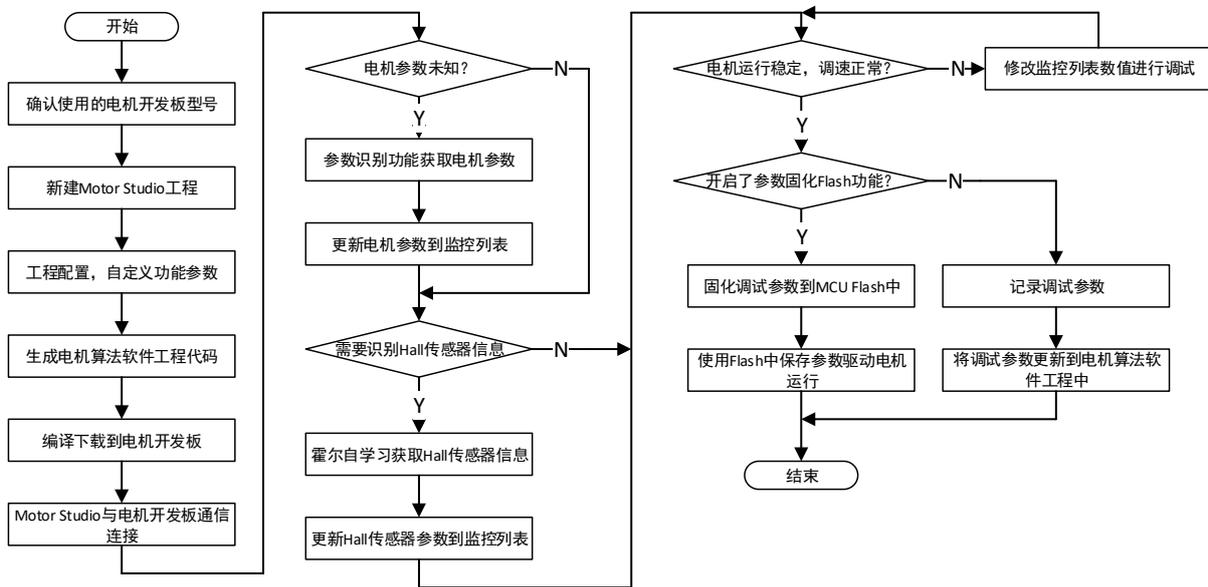


图 4-9 ATC Motor Studio 调试电机流程图

ATC Motor Studio 的详细使用方法可参考《AutoChips Motor Studio 使用指南》。

5 典型问题

5.1 电路硬件相关配置计算

本节主要描述与电路相关的电机控制系统参数计算对应关系。用户如需对相关参数进行修改适配，必须参考硬件原理图，并结合以下计算描述进行。

(1) 电流采样运放增益 `OP_AMPLIFICATION_GAIN` 主要由运放前级正负端以及前后级之间配置电阻决定。以 U 相电流模拟电压采样为例，U 相电流模拟信号经过运放 U12 进行增益放大后输出至 MCU 模块采样，具体原理图如图 5-1 所示。

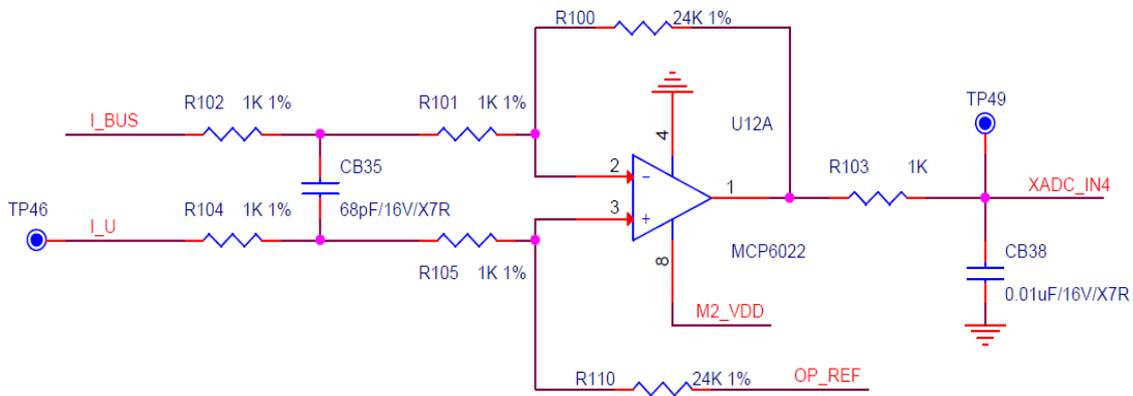


图 5-1 U 相电流采样原理图

根据运放输入端“虚断”和“虚短”原则进行分析推导可知：

$$U_{XADC_IN4} = U_{PO_REF} + 12(U_{I_U} - U_{I_BUS})$$

故运放输出和输入两端压差之间的运放增益系数 `OP_AMPLIFICATION_GAIN` 为 12，具体计算公式为：

$$\frac{R110}{R104 + R105}$$

(2) 母线电压分压系数 `VBUS_ATTENUATE_FACTOR` 主要由母线电压分压电路中配置电阻决定。该分压系数要根据母线电压和参考电压之间比例系数设置，分压后采样电压不能超出 ADC 参考电压，MCU 才能再进行 AD 采集。母线电压分压电路部分具体原理图如图 5-2 所示。

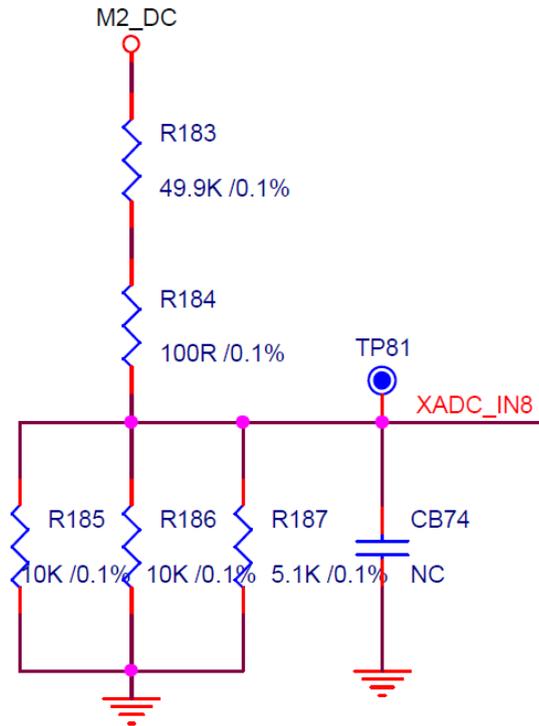


图 5-2 母线电压分压原理图

根据图 5-2 进行分析推导可知：

$$U_{XADC_IN8} = \frac{(R185//R186//R187) \times U_{M2_DC}}{(R185//R186//R187) + R184 + R183}$$

故母线电压分压系数 VBUS_ATTENUATE_FACTOR 为 21，具体计算公式为：

$$\frac{(R185//R186//R187) + R184 + R183}{R185//R186//R187}$$

(3) PWM0 调试 Debug 电路部分的滤波性能主要由 RC 滤波电路决定，其具体原理图如图 5-3 所示。

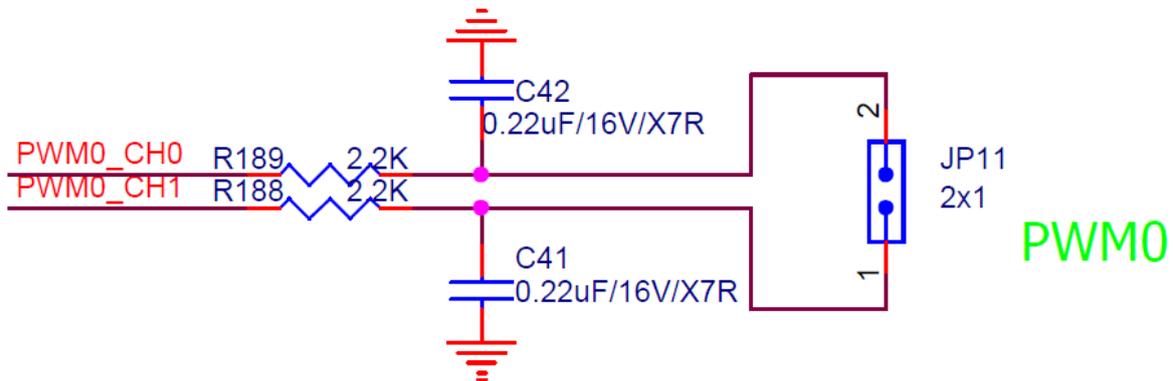


图 5-3 Debug 电路滤波原理图

结合 RC 滤波电路特性，根据图 5-3 进行分析推导可知：

Debug 电路输出信号滤波介质频率 f_c 为 329Hz，具体计算公式为： $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

5.2 参数标么值、实际值对应关系说明

MCU 相较于 DSP 一般存在主频偏低的缺点，这直接导致乘、除等复杂运算耗时飙升；而对未集成 FPU 的 MCU 而言，浮点数据的运算耗时更是雪上加霜。因此控制电机运行时，需提前将所控制的电流、转速、位置等参数量标么转换到某个定标 Q 格式，将耗时的浮点运算等效为定点运算。实际物理量在程序代码中采用标么值参与计算，无特殊说明则 AC78xx 例程中均采用 Q15 格式。

标么值与实际值之间的对应关系为：

$$\text{标么值 pu} = \frac{\text{实际值 real}}{\text{基值 base}} \times \text{放大系数 k}$$

其中实际值 real 是指物理量的真实值；标么值 pu 指此物理量在算法代码运行时的程序值；基值 base 指此物理量为进行标么转化而选取的基准数值；放大系数 k 是为了便于代码化处理和保证计算精度。k 与定标 Q 格式对应， $k = 2^Q$ ；当采用 Q15 格式时，放大系数 k 即为 2^{15} 。例如：若电流量的基值为 1A，电流实际值为 0.5A，放大系数为 4096(2^{12})，则定标到 Q12 格式下电流的标么值为：

$$\frac{0.5A}{1A} \times 4096 = 2048$$

AC78xx 例程中电压量、电流量、频率量的基值分别为 NORMAL_BUS_VOLTAGE、MAX_CURRENT 与 BASE_FREQ。

举例：

1) 程序中设置电压基值为 12V，在程序中的宏定义为：

```
#define NORMAL_BUS_VOLTAGE 12
```

若程序中母线电压 `g_adcTransform.vdcPu` 的值为 30000，则此时母线电压的实际值为 $U_{dc} = 30000 / (2^{15}) * 12 = 10.98V$ 。

2) 程序中设置电流基值为 20A，在程序中的宏定义为：

```
#define MAX_CURRENT 20
```

若设定 FOC 开环启动电流为 `Math_IQ(0.2)`，在程序中的宏定义为：

```
#define OPEN_LOOP_CURRENT Math_IQ(0.2)
```

则表示实际的开环启动电流值为 $0.2 * 20 = 4(A)$ 。

3) 程序中设置频率基值根据电机极对数与最高转速计算得到，在程序中的宏定义为：

```
#define BASE_FREQ (uint16_t)(MOTOR_MAX_SPEED_RPM * POLE_PAIR_NUM / 60)
```

若程序中运行频率 `g_speedCommand.speedTarget` 的值为 3276，电机极对数为 2，最高转速为 5400rpm，则表示此时相电流的频率为 $f = 3276 / (2^{15}) * (5400 * 2 / 60) = 18(Hz)$ 。

5.3 无传感 FOC 无法顺利切换闭环问题

对于无传感器 FOC 的应用，会先以开环方式启动电机，待电机转速足够使电流观测器估测到正确电角度时再切入闭环。表 5-1 介绍无感 FOC 无法进入闭环的原因及对应解决方法。

表 5-1 无感 FOC 无法进入闭环的原因及对应解决方法

序号	原因	解决方法
1	电机参数设置不合适	使用电桥测量或向电机厂咨询 PMSM 的定子电阻 (STATOR_RS)、d 轴电感 (LD)、q 轴电感 (LQ)、电机极对数 (POLE_PAIR_NUM)、最大运行相电流峰值 (MAX_CURRENT)、电机最大转速 (MOTOR_MAX_SPEED_RPM) 等信息，并正确填入 <code>motor_parameters_define.h</code> 文件中。
2	无传感 FOC 控制参数设置不合适	<p>滑模观测器控制方式需要调试的参数在 <code>drive_parameters_define.h</code> 文件中，包含 <code>SMC_KSLIDE0</code>，<code>SMC_KSLF0</code>，<code>SMC_MAXERR0</code>，<code>SMC_KSLIDE1</code>，<code>SMC_KSLF1</code>，<code>SMC_MAXERR1</code>，<code>COEFFPLL_SMC</code>，通过调整这些参数，使滑模观测器估算角度平滑。</p> <p>磁链观测器控制方式需要调试的参数在 <code>drive_parameters_define.h</code> 文件中，包含 <code>FLIT_COEFF</code>，<code>COMPCOF_UPLIMIT</code>，<code>COEFFPLL_FLUX</code>，通过调整这些参数，使磁链观测器估算角度平滑。</p> <p>MRAS 算法需要调试的参数在 <code>drive_parameters_define.h</code> 文件中，包含 <code>ALPHA_COEFF</code>，<code>BETA_COEFF</code>，通过调整这些参数，使 MRAS 无传感算法估算角度平滑。</p>

序号	原因	解决方法
3	开环 I/F 参数设置不合适，无法正常启动	在 <code>drive_parameters_define.h</code> 文件中打开 <code>OPEN_LOOP</code> 宏定义，屏蔽 <code>CLOSE_LOOP</code> 宏定义，在开环模式下确定开环电机可以正常到达设定的目标转速（ $60 * OPEN_LOOP_SPEED_HZ$ ）。开环电流和开环时间需要足够使电机运行至设定转速。
4	预定位参数设置过小，无法正常预定位	预定位电流和预定位时间设置足够，保证可以正常拖动电机预定位。
5	负载过大，开环运行正常但无法切入闭环	<ol style="list-style-type: none"> 1. 增加 <code>SPD_SMOOTH_CUR</code> 宏定义，增加切换时刻的平滑电流进行顺利过渡，需根据负载情况进行调试，设置过大切换时候出现加速现象，设置过小切换会停止或减速。 2. 增加速度环 PI 参数，以提高速度环响应速度。

6 缩略语

表 6-1 术语缩写

缩写	全称	描述
BLDC	Brushless Direct Current Motor	直流无刷电机
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor	永磁同步电机
FOC	Field Oriented Control	磁场定向控制
PWDT	Pulse Width Detect Timer	脉冲宽度检测定时器

7 参考资料

可参考的资源有：

表 7-1 相关资源简介

资源类型	资源名	资源简介
文档	AC781x 入门指南	AC781x 系列 MCU 通用开发板简介
文档	AC780x 入门指南	AC780x 系列 MCU 通用开发板简介
文档	ATC_AC78xx_Motor_App_Development_Guide_CH	AC78xx 电机 App 介绍文档
原理图	ac7811_lqfp80_motor_v2.3	AC781x 电机 demo 板硬件原理图
原理图	ac7801_lqfp48_motor_v1.1	AC780x 电机 demo 板硬件原理图
原理图	ac7840x_64pin_motor_demo_v1.0	AC7840x 电机 demo 板硬件原理图
文档	AC78xx Motor Driver_v1.1	AC78xx 系列电机 App 代码说明文档
文档	ATC 电机主要参数介绍及测量方法说明	电机主要参数介绍及测量方法说明
软件	Motor Studio	ATC 电机调试上位机