



## **ATC AC78xx Motor Debug Guide**

文档版本	2.0
撰写日期	2021-05-06

© 2013 - 2021 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。

## 修订历史

---

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

## 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。**

## 目录

修订历史.....	2
版权声明.....	3
目录 .....	4
插图目录.....	6
表格目录.....	7
<b>1 简介 .....</b>	<b>8</b>
1.1 本文目的 .....	8
1.2 电机 Demo 板硬件介绍 .....	8
<b>2 MCU 仿真软件环境搭建 .....</b>	<b>10</b>
2.1 MCU 开发环境准备 .....	10
2.2 工程及仿真器配置 .....	10
2.3 软件路径 .....	10
2.4 模块初始化.....	11
<b>3 适配文件修改.....</b>	<b>12</b>
3.1 电机参数适配 .....	12
3.2 电路板参数适配.....	14
3.3 算法参数适配 .....	17
3.4 BLDC 参数适配 .....	45
<b>4 调试 .....</b>	<b>50</b>
4.1 带霍尔传感器 BLDC 调试.....	50
4.2 无感 BLDC 调试 .....	52
4.3 带霍尔传感器 FOC 调试.....	53
4.4 带正交编码器 FOC 调试.....	55
4.5 带 Hall 传感器与 AB 编码器 FOC 调试.....	56
4.6 无感 FOC 滑模观测器调试 .....	57
4.7 无感 FOC 磁链观测器调试 .....	61

4.8	母线电流估算调试 .....	62
<b>5</b>	<b>典型问题 .....</b>	<b>63</b>
5.1	电路硬件相关配置计算 .....	63
5.2	参数标么值、实际值对应关系说明 .....	65
5.3	HALL 角度自学习问题 .....	65
5.4	无传感 FOC 无法顺利切换闭环问题 .....	67
<b>6</b>	<b>缩略语 .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>参考文件 .....</b>	<b>69</b>

## 插图目录

---

图 1-1 AC781x 电机 Demo 板硬件图 .....	8
图 1-2 AC7801x 电机 Demo 板硬件图 .....	9
图 4-1 带霍尔的 BLDC 调试流程图 .....	50
图 4-2 PWD 模块 pinmux 定义 .....	51
图 4-3 无感 BLDC 调试流程图 .....	52
图 4-4 带霍尔的 FOC 调试流程图 .....	54
图 4-5 正交编码器 FOC 调试流程图 .....	55
图 4-6 霍尔传感器与 AB 编码器模式调试流程图 .....	57
图 4-7 无感 FOC 滑模观测器调试流程图 .....	58
图 4-8 滑模观测器参数不合理估算效果图 .....	60
图 4-9 滑模观测器参数合理估算效果图 .....	61
图 5-1 U 相电流采样原理图 .....	63
图 5-2 母线电压分压原理图 .....	64
图 5-3 Debug 电路滤波原理图 .....	64

## 表格目录

---

表 3-1 电机参数宏定义适配表.....	12
表 3-2 电路板参数宏定义适配表.....	14
表 3-3 算法参数宏定义适配表.....	18

## 1 简介

### 1.1 本文目的

本文主要目的是为了介绍如何使用 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

电机 Demo 板有 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 12V ~ 48V。Demo 板实物如下图 1-1 及图 1-2 所示：

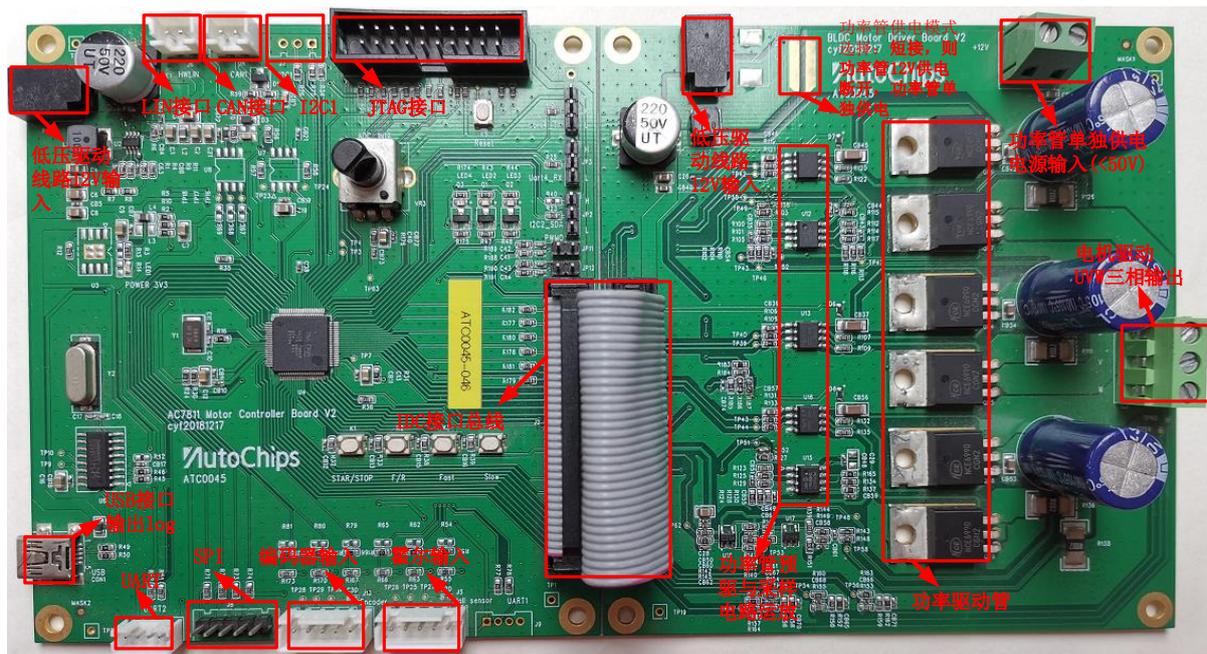


图 1-1 AC781x 电机 Demo 板硬件图

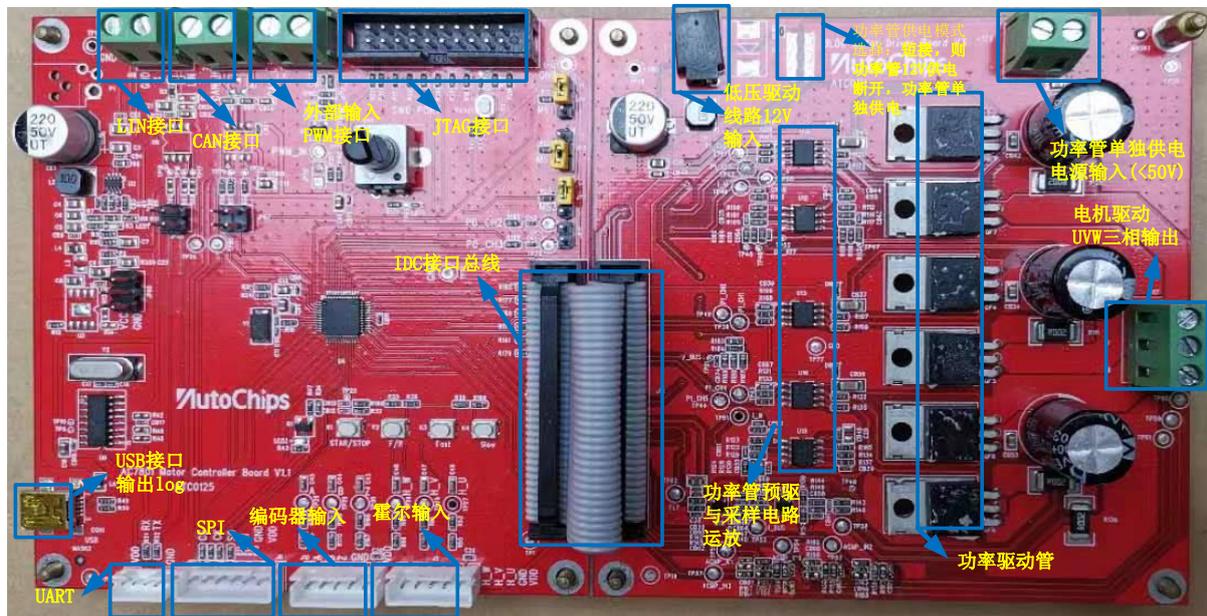


图 1-2 AC7801x 电机 Demo 板硬件图

关于 Demo 板详细的硬件接口定义，用户可参考的文件有：

ATC\_AC78xx\_Motor\_Demo\_Board\_Guide\_CH

ac7811\_lqfp80\_motor\_v2

ac7801\_lqfp48\_motor\_v1.1

## 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。

### 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\_开发板说明手册》或《AC7801x\_开发板说明手册》。

### 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，主要包括以下几个部分：

(1) User:

- a. 外设初始化
- b. 控制板按键操作
- c. 上位机通信
- d. 毫秒时基任务调度

(2) Bldc\_App:

- a. PWDT 初始化及中断，获取 Hall 状态
- b. BLDC 方波六步换相算法实现
- c. 电机转子转速的计算及速度环 pid 运算

(3) Foc\_App:

- a. 速度指令处理
- b. Hall 状态的获取以及电机转速的计算
- c. pid 初始化和控制器参数初始化

- d. 相电流的采样
- e. ADC 中断，在 ADC 中断中执行 FOC 算法
- f. 电机控制故障保护
- g. 电机控制调试功能

#### (4) foc\_control.lib

- a. 数学函数（如正余弦、反正切等）的实现
- b. SVPWM 的实现
- c. Clark/Park 变换的实现
- d. Hall 传感器转子位置估算及 Hall 安装辨识
- e. 无位置传感算法的实现
- f. 前馈补偿的实现
- g. 单电阻电流采样的实现
- h. 节能控制算法的实现
- i. 功率与母线电流估算的实现
- j. PMSM 参数辨识的实现
- k. 高频注入算法的实现
- l. 弱磁控制算法的实现
- m. MTPA 的实现
- n. 刹车控制算法的实现

## 2.4 模块初始化

电机控制算法需要用到 PWM/PWDT/ADC/GPIO 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.pdf。

### 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。下面对 Motor\_parameters\_define.h 中定义的电机参数进行详细的适配修改见表 3-1 所述。

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	电机定子绕组阻值	单位：毫欧	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	电机转子绕组阻值	单位：毫欧	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，缓慢旋转电机一圈。Y 型连接下，LD 为最小电感值/2，LQ 最大电感值/2；三角型连接下，LD 为最小电感值*1.5，LQ 为最大电感值*1.5；	
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	影响异步电机控制

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
			近似代替	
LM	电机定子互感	单位: H	可用空载试验进行测量	
POLE_PAIR_NUM	电机极对数	$\geq 1$	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), 用转速计可测出电机转子转速 n(rpm), 则可由 $n = 60 * f / p$ 推导出电机极对数 p	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
INERTIA	负载转动惯量	单位: $10E-7kg.m^2$	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: mN·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	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

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
				速的取值范围及电机转速调速斜率
RATE_POWER	电机额定功率	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。下面对 Hwboard\_parameters\_define.h 中定义的电路板硬件参数进行详细的适配修改见表 3-2 所述。

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</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>打开或关闭宏定义，<b>同时只能打开其中一个宏定义。</b></p> <p>AC78xx 系列 demo 板默认打开 GATE_DRIVER_HIGH_HIGH 并关闭其他三个宏定义。</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>

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
		W_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。		
PHASE_UVW_POLARITY	MCU PWM 通道输出极性	ACTIVE_HIGH: 三相对应 PWM 通道输出极性为上桥臂高有效导通 ACTIVE_LOW: 三相对应 PWM 通道输出极性为上桥臂上桥低有效导通	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
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, PWM 死区时间插入控制寄存器计数值最大为 63, 允许的最大死区时间插入值为 10500ns
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			

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
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, 一般设置为实际母线电压, 影响电机参数标么
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	单位: 欧姆	查阅电路原理图中电	影响运放 AD 采样相

参数宏定义	参数名称	参数取值	获取方法	影响范围
	阻值		机相电流采样电路	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
ADC_RANGE	ADC 采样范围	4096	ADC 为 12Bit 分辨率	影响相电流, 母线电流, 母线电压等需 ADC 采样的信号采样精度以及闭环运算标么
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	
OVERCURRENT_BACKPOLARITY	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

### 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。控制算法编译后以 MotorLib 封装库的形式提供, 不对用户开放源码, 为了给用户提供更灵活的电机控制算法使用体验, Demo 板软件中给出了算法常用调试变量的宏定义接口, 用户可根据实际控制需求进行适配修改。下面对 Drive\_parameters\_define.h 中定义的算法参数进行详细的适配修改见表 3-3 所述。

表 3-3 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
FOC_SINE_WAVE	正弦波矢量控制	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	
IF_STARTUP	矢量控制开环 IF 启动	无	打开或屏蔽	
VF_STARTUP	矢量控制开环 VF 启动	无	打开或屏蔽	影响无传感矢量控制开环启动方式
DIRECT_STARTUP	矢量控制开环直接启动	无	打开或屏蔽	
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	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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	影响脉冲注入辨识初始位置的执行次数	
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
MOTOR_POLES_OBTAIN	辨识电机极对数	无	打开或屏蔽	
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	影响 SVPWM 算法

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			行参数配置	
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	
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	影响 PWM 模块配置
FOC_EXECUTION_RATE	FOC 执行频率倍率	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	
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	单位: 1	根据用户配置	影响电流环计时

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	系数		自动计算	
MS_UINT_INT	电流环毫秒时基	单位：毫秒	根据用户配置 自动计算	影响电流环毫秒时基 计时
PWDT_CLK_PRESCALER	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_HIGH	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_LOW	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	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
	法滤波系数			
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: 失能	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: 失能	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: 失能	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: 失能	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	调试输出通道 0 参数码	
DEBUG_DAC_CH1_PARAMID	DAC 调试输出通道 1 参数码	0~255	调试输出通道 1 参数码	
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	无	打开或屏蔽	影响速度指令设置方

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	能标志			式
SPEED_ADJUST_KNOB	电位器调速使能标志	无	打开或屏蔽	影响速度指令设置方式
MOTOR_CONTROL_MODE	电机控制模式选择	VOLTAGE_CONTROL_WITHOUT_SPDLIMIT: 无速度限幅的电压控制 TORQUE_CONTROL_WITH_SPDLIMIT: 有速度限幅的转矩控制 TORQUE_CONTROL_WITHOUT_SPDLIMIT: 无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_CONTROL_SPEED_LEVEL	转矩控制速度档位	0~1.0	根据用户需求进行设置	影响转矩模式速度指令
SPEED_LEVEL	转矩控制速度档位指令	无	根据用户配置自动计算	
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

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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: 转/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			
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 开环启动电流减速速度设置	影响开环切入闭环平顺性
SPD_SMOOTH_CUR	开环启动平	0~32767	根据无感 FOC	影响开环切入闭环的

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	滑切换电流		开闭环切换效果进行设置	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 开环运行
CURVE_TYPE	开环启动曲线类型	CURVE_TYPE_STRAIGHT: 直线型 CURVE_TYPE_CUSTOMER: 自定义型	根据用户需求及调试情况进行设置	影响无感 FOC 开环运行
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 开环启动运行时长
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			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	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_CUS TOMER
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 启动曲线的频率设置
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			
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			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	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			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
VOLT_REF_VALUE_5	开环启动曲线第 5 点电压值			
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 1: 使能启动前刹车	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
		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, 刹车越快速	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_TIME S	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	影响霍尔角度估算算法中角度校准方式

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			角度会因为强制补偿而跳变	
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
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_SWAP_TRQ_COFF	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	0~100	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
HALL_SELF_LEARN_OFFSET	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

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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_FREQ	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，增长步长越大	
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	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			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	参数辨识使能位	无	打开或屏蔽	影响参数辨识功能的执行
PARAM_IDENTIFY_SELECT	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_PWM_PERIOD	定子电阻辨识 PWM 周期设置	单位: 1	通常不需修改，采用默认值即可	影响电机定子辨识
RS_ID_WAIT_TIME	定子电阻辨识等待延时	单位: ms	通常不需修改，采用默认值即可	
RS_ID_FIRST_INJECT	定子电阻辨	0~Math_IQ(1.0)	两次注入电流	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	识第一次注入电流阈值		幅值应设置不同值，避免过大或过小，以免影响辨识结果	
RS_ID_SECOND_INJECT	定子电阻辨识第二次注入电流阈值	0~Math_IQ(1.0)		
RS_ID_PWM_STEP	定子电阻辨识 PWM 脉宽步距设置	单位：1		
LDQ_ID_INIT_PRD	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
LDQ_ID_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	
ALIGN_TIME1	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
ALIGN_TIME2	参数辨识第二次强吸时间	单位：ms		
ALIGN_CUR	参数辨识强吸电流	0~Math_IQ(1.0)		
ALIGN_WAIT	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	
FLUX_ID_FRE	磁链辨识目标频率设定	0~Math_IQ(1.0)	不可设置过大，避免运行	影响磁链辨识

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	值		失步	
FLUX_ID_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	
FLUX_ID_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	
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_SUPPRES S	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_P R OCESS	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_C HAN GE	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

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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
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	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			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	
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	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			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	
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	影响全阶滑模观测器的使用
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	
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	影响磁链观测器角度精度

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			过大问题	
ALPHA_COEFF	自适应观测器速度估算系数	Math_IQ(0.2)~Math_IQ(0.6)	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(1.0)~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	0~Math_IQ(1.0)	系数越大，预	影响预定位电流给定

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	电流		定位电流越大	值
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	
PWM_SELF_LEARN_P RD	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

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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
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_CUR_START	高频注入起 动电流	0~Math_IQ(1.0)	预留	
HFI_CUR_MAX	高频注入起 动最大电流	0~Math_IQ(1.0)	预留	
HFI_LOW_SPEED_K	高频注入低 速系数	0~32767	低速 Bangbang 控	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
			制器开关系数	
HFI_HIGH_SPEED_K	高频注入高速系数	0~32767	高速 Bangbang 控制器开关系数	
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_STO_RPM_TH	高频注入切换至状态观测器转速阈值	0~32767	系数越大，切换转速越大	影响高频注入和状态观测器之间切换
STO_HFI_RPM_TH	状态观测器切换至高频注入转速阈值	0~32767	系数越大，切换转速越大	
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			
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	影响截止频率

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
LPF_A1	低通滤波器参数		计的 LPF 系数	
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			
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_CONSTANT	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
PID_TORQUE_KP_DEFAULT	力矩轴 Q 轴 PID 参数	0~Math_IQ(1.0)	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				

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
FAULT				
PID_TORQUE_MAX_D EFAULT				
PID_TORQUE_MIN_D EFAULT				
PID_FLUX_KP_DEFAULT	励磁轴 D 轴 PID 参数	0~Math_IQ(1.0)	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_DE COUPLE	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

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	电机最大电流标幺值	0~Math_IQ(1.0)	一般等同设置为实际最大相电流	

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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

### 3.4 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。下面对 `bldc_parameters_define.h` 中定义的算法参数进行详细的适配修改见表 3-4 所述。

表 3-4 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
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	
BLDC_PULSE_INJECTION	脉冲注入功能	无	打开或屏蔽	影响无感方波初始位置获取和启动方式，仅在无感方波调用
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
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

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
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		
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			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
T	小输出			
MAX_DUTY_WITH_HALL	有感方波输出最大占空比	0 ~ DUTY_BASE_VALUE	根据有感方波最高转速调整	限制有感方波最高转速
MIN_DUTY_WITH_HALL	有感方波输出最小占空比		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
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	
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
MAX_DUTY_PREPOSITION	无感方波预定位最大占空比	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
MIN_DUTY_PREPOSITION	无感方波预定位最			

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	小占空比			
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			
MAX_DUTY_SENSORLESS_START	无感方波开环加速最大占空比	0~ (20% * DUTY_BASE_VALUE)		
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			
PWDT_CLK_PSC	PWDT 时钟分频系	单位: 1	根据霍尔信号质量和	影响方波控制霍尔信号采集稳定性, 并限

参数宏定义	参数名称	参数取值	参数配置	影响范围
	数		应用需求进行配置	制电机运行最高转速
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		
LIMIT_PEAKE_CUR_AD	峰值电流 AD 限幅	单位：1	根据 Demo 板硬件和应用需求进行配置	影响母线电流保护范围

## 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

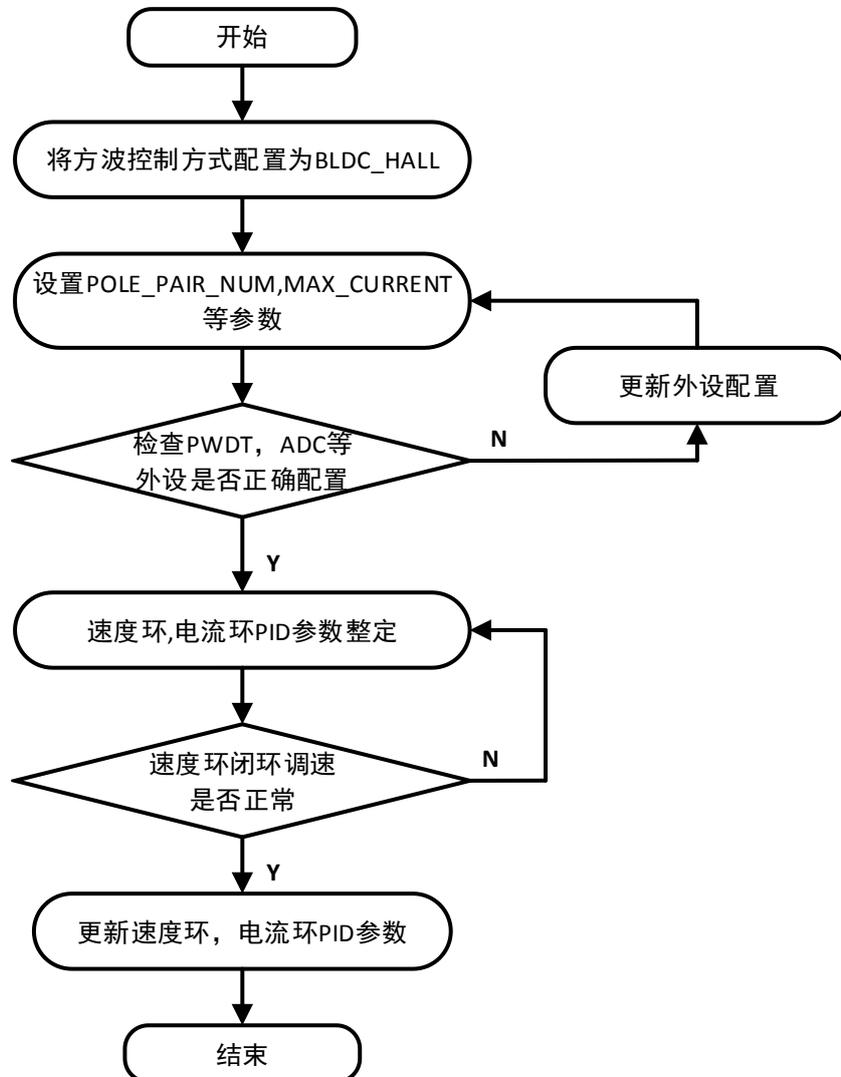


图 4-1 带霍尔的 BLDC 调试流程图

根据以上调试流程图，带霍尔传感器 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。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 `drive_parameters_define.h` 文件中，屏蔽 `FOC_SINE_WAVE` 宏定义。
3. 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。
4. 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 口 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 Function，将相应的 GPIO 设置 PWDT 功能。以 80-PIN 封装的 AC781x 为例，以下图 4-2 给出这种封装类型下 PWDT 的 GPIO 口 pinmux 设置的参考。

	PAD Name	BGA Ball Name	Function 1	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

图 4-2 PWDT 模块 pinmux 定义

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。

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。

### 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 4-3 所示。

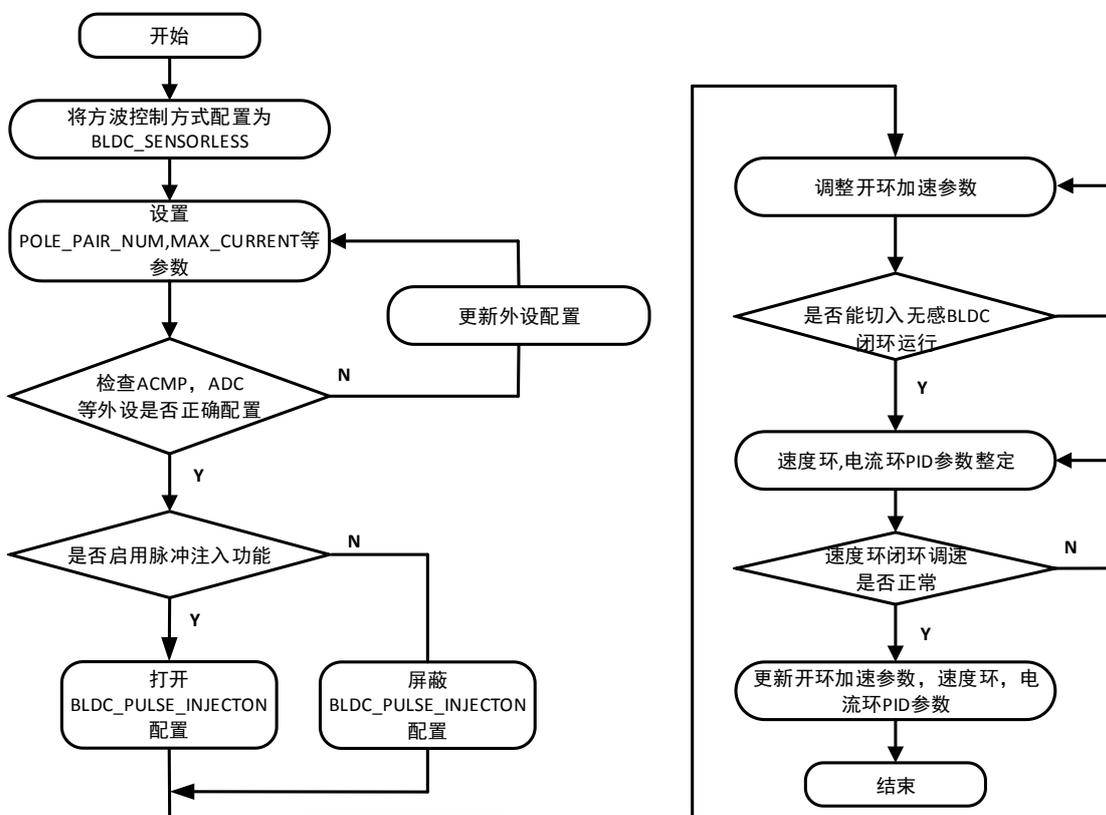


图 4-3 无感 BLDC 调试流程图

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。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 `drive_parameters_define.h` 文件中，屏蔽 `FOC_SINE_WAVE` 宏定义。
3. 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。
4. 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。
5. 选择配置初始转子位置获取方式。打开 `BLDC_PULSE_INJECTION` 宏定义则采用脉冲注入的方式检测初始位置，屏蔽 `BLDC_PULSE_INJECTION` 宏定义则采用强吸的方式将电机转子预定位到已知位置。
6. 调试无感 `BLDC` 模式开环加速参数。无感 `BIDC` 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。
7. 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。
8. 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。

### 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。

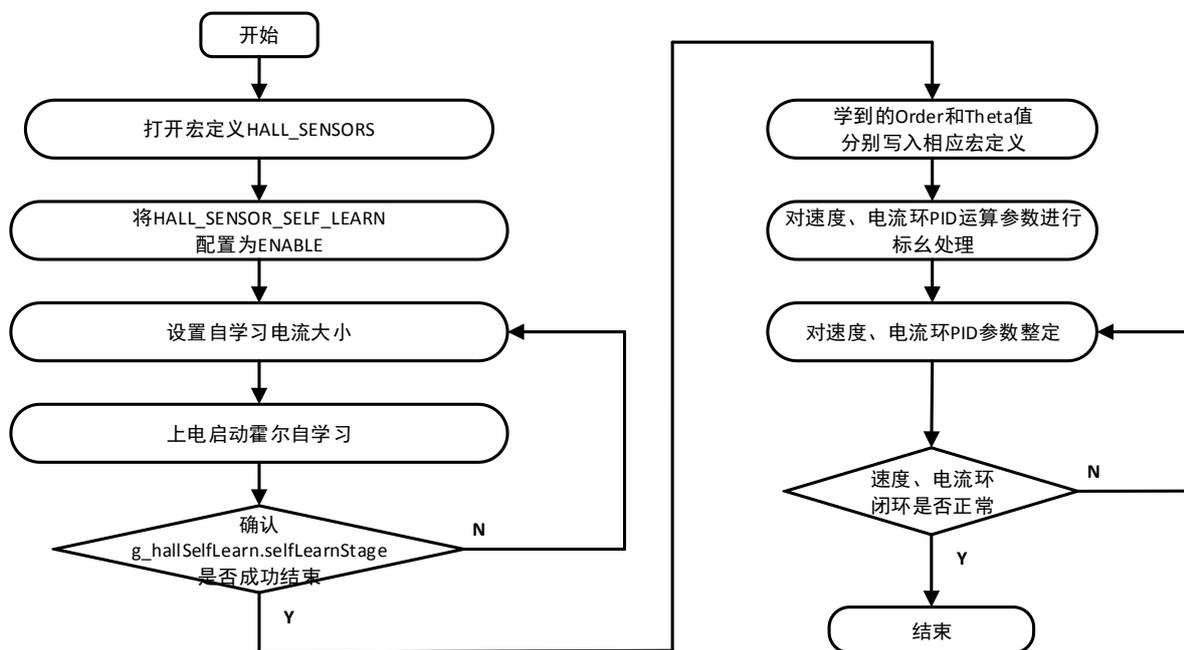


图 4-4 带霍尔的 FOC 调试流程图

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 `drive_parameters_define.h` 中宏定义 `FOC_SINE_WAVE`，打开宏定义 `HALL_SENSORS`。
2. 屏蔽 `bldc_parameters_define.h` 中的宏定义 `SIX_STEP_SQUARE_WAVE`。
3. 修改 `drive_parameters_define.h` 中参数宏定义 `HALL_SENSOR_SELF_LEARN`，将其设置为 `ENABLE`，使能霍尔自学习功能。
4. 确认电机及霍尔与 Demo 板连接无误后上电 Debug，点击 Demo 板上 Start 按键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，电机启动过程中将先启动霍尔自学习功能。
5. 在进行霍尔自学习时，电机会以小角度来回摆动十个来回左右。若 `g_hallSelfLearn.selfLearnStage` 变为 2，则霍尔自学习过程结束，否则霍尔自学习失败。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`。
6. 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，然后适当增大霍尔自学习电流。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。
7. 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。

8. 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 4-5 所示。

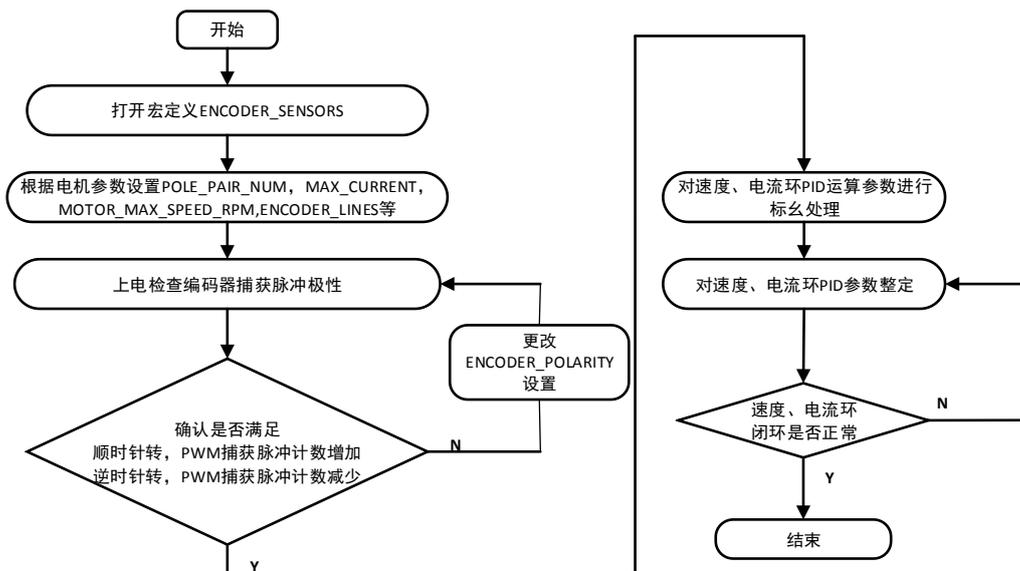


图 4-5 正交编码器 FOC 调试流程图

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 `drive_parameters_define.h` 中宏定义 `FOC_SINE_WAVE`，打开宏定义 `ENCODER_SENSORS`。
2. 屏蔽 `bldc_parameters_define.h` 中的宏定义 `SIX_STEP_SQUARE_WAVE`。
3. 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。
4. 确认电机及编码器与 Demo 板连接无误后上电 Debug，将 PWM0 添加到 Watch 串口中，顺时针转动电机若 PWM0->CNT 计数增加则编码器接线极性正常；若 PWM0->CNT 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 PWM0->CNT 计数增加。
5. 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。
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。

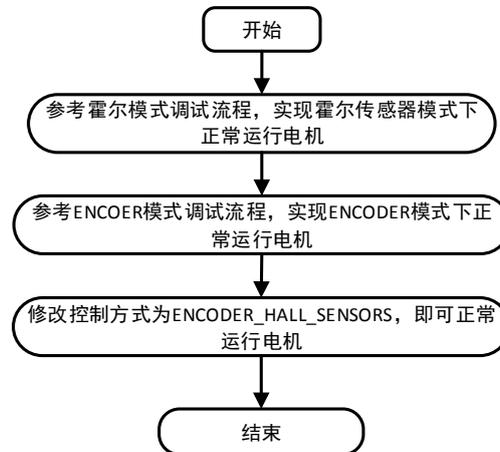


图 4-6 霍尔传感器与 AB 编码器模式调试流程图

## 4.6 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 算法目前通过滑模观测器进行电机两相反电动势  $e_\alpha$ 、 $e_\beta$  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 4-7 所示。

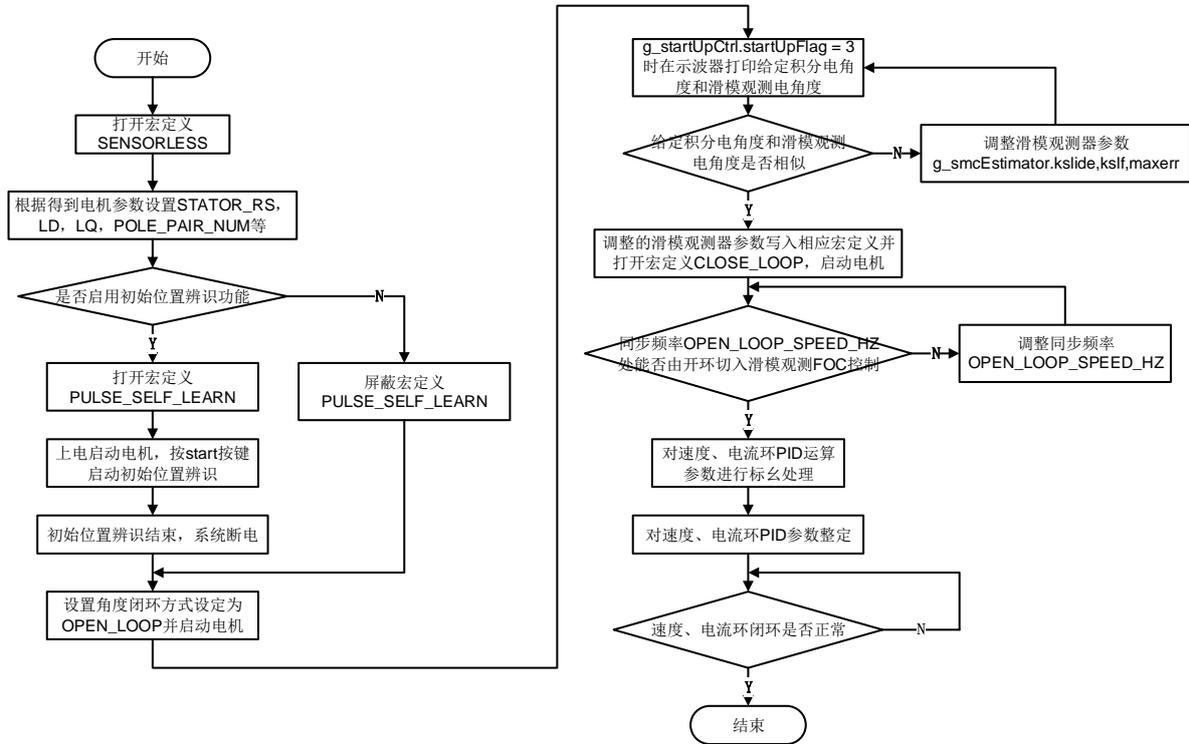


图 4-7 无感 FOC 滑模观测器调试流程图

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 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。屏蔽 bldc\_parameters\_define.h 中的宏定义 SIX\_STEP\_SQUARE\_WAVE。
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 78，`DUBUG_DAC_CH1_PARAMID` 为 80，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如图 4-8 所示，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 4-9 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。

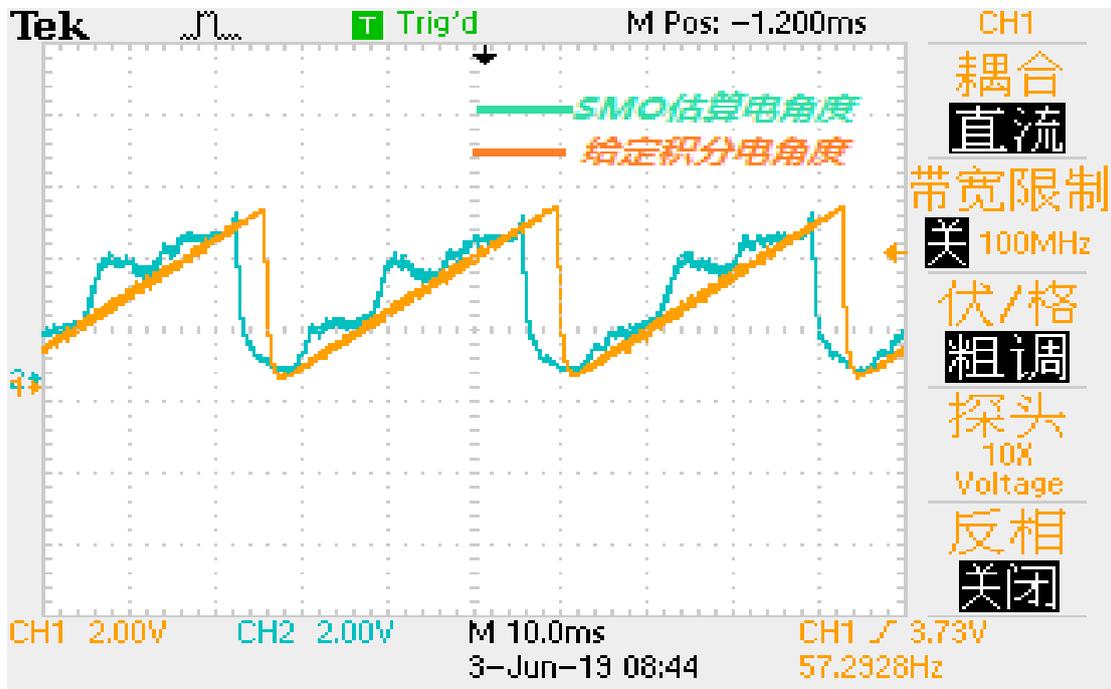


图 4-8 滑模观测器参数不合理估算效果图

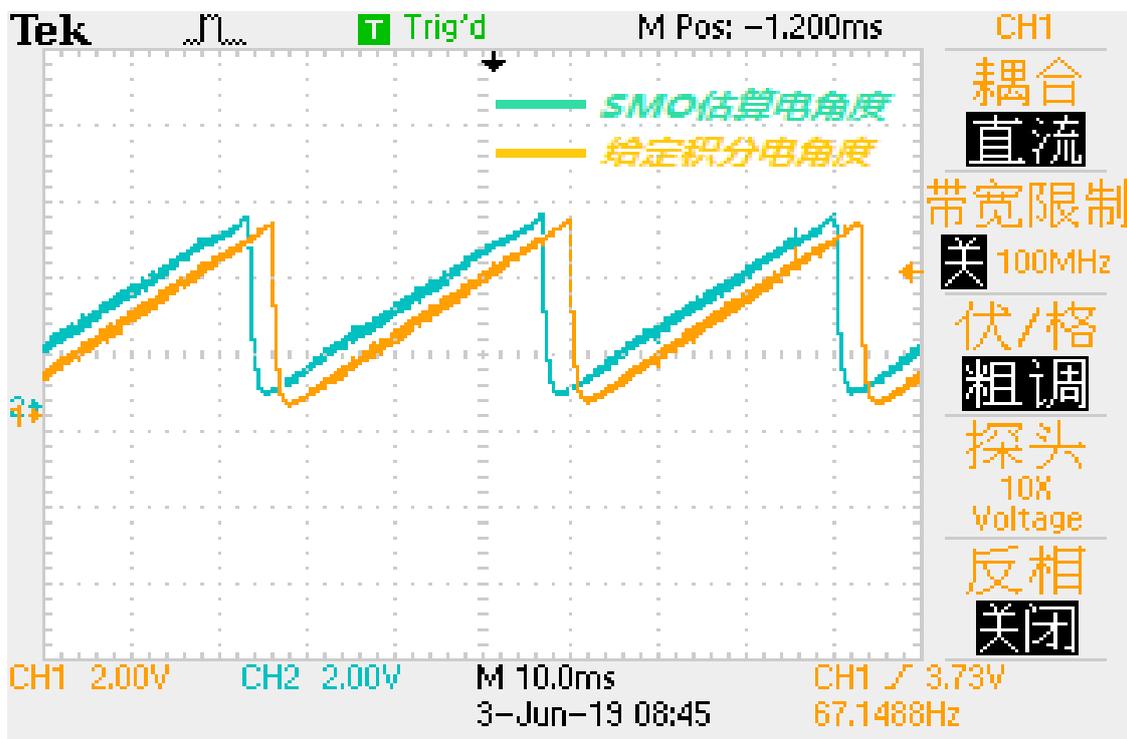


图 4-9 滑模观测器参数合理估算效果图

### 4.7 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  $\alpha$ ,  $\beta$  分量，再根据定子磁链得到转子永磁体磁链  $\alpha$ ,  $\beta$  分量，转子位置角可对转子永磁体磁链  $\alpha$ ,  $\beta$  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。drive\_parameters\_define.h 中打开宏定义 FOC\_SINE\_WAVE，意为选择 FOC 矢量控制。屏蔽 bldc\_parameters\_define.h 中的宏定义 SIX\_STEP\_SQUARE\_WAVE。
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 `COMP_COF_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。

## 4.8 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` 以启用 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 格式的标幺值，标幺的电流基值为 `motor_parameters_define.h` 中电机参数值 `MAX_CURRENT`。  
假如当前电机标幺电流 `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。

## 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。

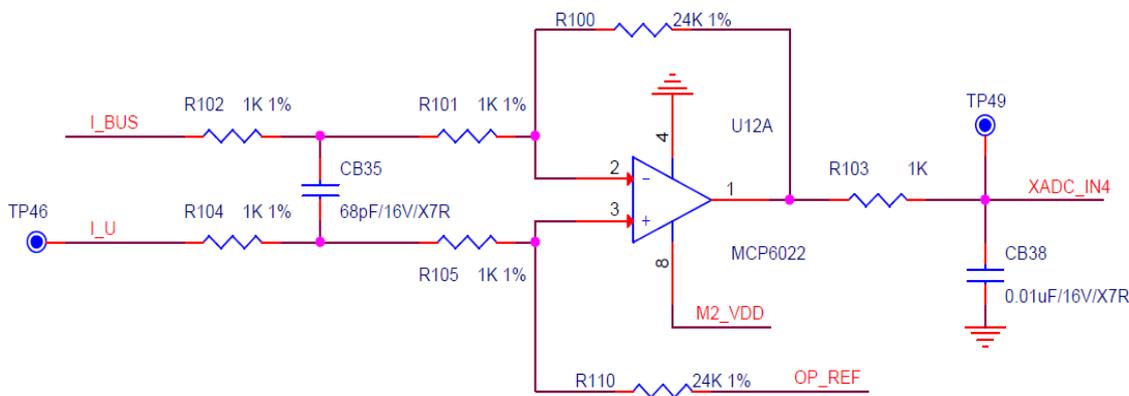


图 5-1 U 相电流采样原理图

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。

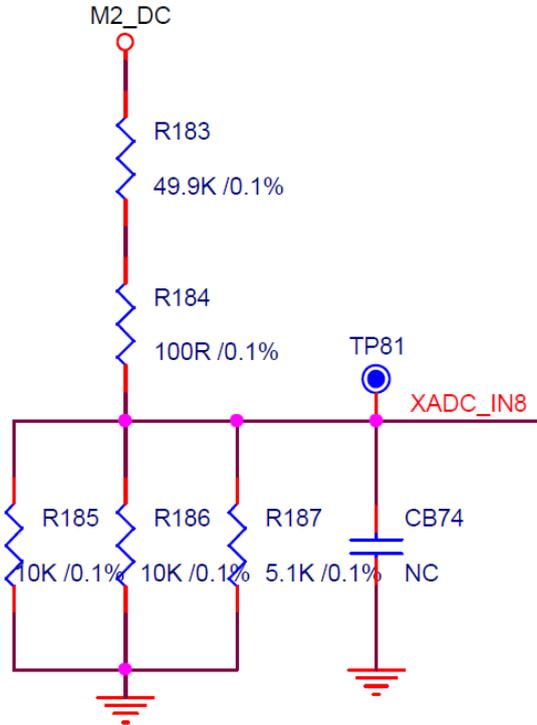


图 5-2 母线电压分压原理图

根据图 5-2 进行分析推导可知：

$$U_{XADC\_IN8} = (R185 // R186 // R187) * U_{M2\_DC} / ((R185 // R186 // R187) + R184 + R183)$$

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。

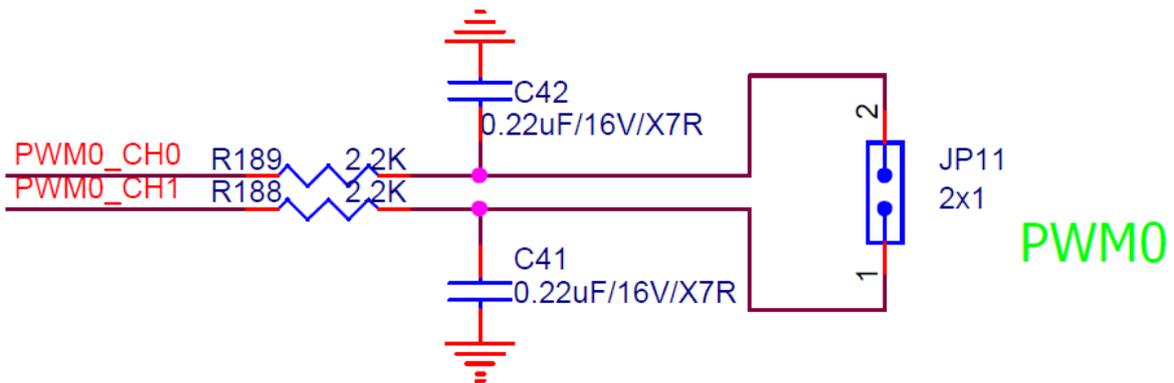


图 5-3 Debug 电路滤波原理图

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： $f_c = 1/2\pi RC$ 。

## 5.2 参数标么值、实际值对应关系说明

控制电机运行时，控制目标可能是电流、转速、位置等参数，需提前将所需控制量标么到某个 Q 格式。实际物理量在程序代码中采用标么值参与计算，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实际值 = 标么值 \* 基值，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 HALL 角度自学习问题

对于有霍尔传感器的应用，在不确定 HALL 顺序的情况下，需要进行霍尔角度自学习，得到 HALL 次序所对应的电机角度，下面来说明调试步骤。

(1) 将电机角度获取方式设定为 HALL\_SENSORS

打开 `drive_parameters_define.h` 文件中的宏定义：

```
#define HALL_SENSORS
```

## (2) 打开霍尔角度自学习功能

修改 `drive_parameters_define.h` 文件中的宏定义：

```
#define HALL_SENSOR_SELF_LEARN          ENABLE
```

## (3) 电机上电启动霍尔自学习

确认电机及霍尔与 Demo 板连接无误后上电，点击 **Start** 按键，电机启动过程中将先启动霍尔自学习功能。

## (4) 霍尔角度自学习过程

霍尔角度自学习功能进行时，电机会以小角度来回运转，属于正常现象，十个来回左右学习结束。记录学习得到的 `g_hallSelfLearn.selfLearnOrder` 和 `g_hallSelfLearn.selfLearnTheta` 数值。分别填写到修改 `drive_parameters_define.h` 文件中以下的宏定义：

```
#define HALL_SELF_LEARN_ORDER          0
#define HALL_SELF_LEARN_THETA          (uint16_t)(65536.0 * 330 / 360)
```

## (5) 霍尔角度自学习完成后，关闭自学习功能

修改 `drive_parameters_define.h` 文件中的宏定义：

```
#define HALL_SENSOR_SELF_LEARN          DISABLE
```

## (6) 电机负载较大时，还需修改自学习电流值

修改 `drive_parameters_define.h` 文件中的宏定义 `HALL_SELF_LEARN_CUR` 值,设置范围为 0~`Math_IQ(0.5)`。

## (7) 影响自学习结果因素

影响自学习成功与否的主要因素有：

1. 电机峰值电流参数
2. 电机驱动负载大小
3. 自学习电流环参数

因此建议空载静止状态下启动自学习过程，根据不同电机的技术参数更新峰值电流参数 `MAX_CURRENT`，如果以上措施自学习仍然失败，可考虑适当调整自学习电流环参数。

## (8) 自学习状态判断

霍尔自学习模块会进行自学习情况监测，倘若自学习失败会报霍尔自学习失败故障。

## 5.4 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，下面来介绍无感 FOC 无法进入闭环的原因及对应解决方法。

原因 1：电机参数设置不合适

解决方法：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 motor\_parameters\_define.h 文件中。

原因 2：无传感 FOC 控制参数设置不合适

解决方法：滑模观测器控制方式需要调试的参数在 drive\_parameters\_define.h 文件中，包含 SMC\_KSLIDE0, SMC\_KSLF0, SMC\_MAXERR0, SMC\_KSLIDE1, SMC\_KSLF1, SMC\_MAXERR1, COEFFPLL\_SMC，通过调整这些参数，使滑模观测器估算角度平滑。

磁链观测器控制方式需要调试的参数在 drive\_parameters\_define.h 文件中，包含 FLIT\_COEFF, COMPCOF\_UPLIMIT, COEFFPLL\_FLUX，通过调整这些参数，使磁链观测器估算角度平滑。

原因 3：开环 I/F 参数设置不合适，无法正常启动

解决方法：在 drive\_parameters\_define.h 文件中打开 OPEN\_LOOP 宏定义，屏蔽 CLOSE\_LOOP 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。

原因 4：预定位参数设置过小，无法正常预定位

解决方法：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。

原因 5：负载过大，开环运行正常但无法切入闭环

解决方法：

- 1) 增加 SPD\_SMOOTH\_CUR 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

---

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 参考文件

---

可参考的文档有：

AC781x\_开发板说明手册.pdf

AC7801x\_开发板说明手册.pdf

ATC\_AC78xx\_MotorApp\_Development\_Guide\_CH.pdf

ac7811\_lqfp80\_motor\_v2.pdf

ac7801\_lqfp48\_motor\_v1.1.pdf

AC7801x Motor Driver\_v1.0\_20210506.chm

ATC 电机主要参数介绍及测量方法说明.pdf