



# AC7840x Dual Motor User Guide

文档版本： 1.0

发布日期： 2023-03-14

© 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	2023-3-14	ATC	文档初版

## 版权声明

---

本档包含 AutoChips 公司的机密信息。禁止未经授权使用或披露本档包含的信息。对因未经 AutoChips 公司授权而全部或部分披露此档内容而给 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 .....	7
表格目录 .....	8
<b>1 简介 .....</b>	<b>9</b>
1.1 目的.....	9
1.2 双电机 MotorApp 工程组成 .....	9
1.3 双电机 MotorApp 工程简介 .....	10
1.3.1 双电机 MotorApp 功能 .....	10
1.3.2 双电机 MotorApp 代码结构.....	11
1.4 双电机 MotorApp 软件设计 .....	15
1.4.1 双电机 MotorApp 架构.....	15
1.4.2 双电机 MotorApp 流程图 .....	16
1.4.3 双电机 MotorApp while 主循环 .....	17
1.5 双电机 MotorApp 接口描述 .....	17
1.5.1 双电机 MotorApp API .....	17
1.5.2 双电机 MotorApp 数据结构.....	20
1.6 AC7840x 双电机硬件板 .....	20
1.6.1 双电机硬件架构 .....	20
1.6.2 双电机硬件版简介.....	22
<b>2 双电机 MotorApp 外设配置 .....</b>	<b>24</b>

2.1	GPIO 初始化.....	24
2.2	PWM 初始化.....	24
2.2.1	驱动 PWM 初始化 .....	24
2.2.2	Hall 信号捕获 PWM 初始化.....	25
2.2.3	Encoder 信号捕获 PWM 初始化 .....	25
2.3	ADC 初始化 .....	25
2.4	TIMER 初始化.....	26
<b>3</b>	<b>AC7840x 双电机中断服务 .....</b>	<b>27</b>
3.1	双电机 FOC 控制中断服务.....	27
3.1.1	电机硬件过流保护中断 .....	27
3.1.2	ADC 采样中断 .....	27
3.1.3	Timer 中断 .....	28
3.1.4	Hall 中断 .....	29
3.2	双电机方波控制中断服务 .....	29
3.2.1	电机硬件过流保护中断 .....	29
3.2.2	ADC 采样中断 .....	30
3.2.3	Timer 中断 .....	31
3.2.4	Hall 中断 .....	32
<b>4</b>	<b>AC7840x 双电机控制算法 .....</b>	<b>33</b>
4.1	BLDC 双电机方波控制 .....	33
4.2	PMSM 双电机 FOC 控制.....	33
<b>5</b>	<b>电机运行保护功能.....</b>	<b>35</b>
5.1	电机保护功能 API.....	35

5.2	电机保护功能说明 .....	36
5.2.1	相电流过流保护 .....	36
5.2.2	母线电流过流保护 .....	36
5.2.3	过压保护 .....	37
5.2.4	欠压保护 .....	37
5.2.5	失速保护 .....	38
5.2.6	零速保护 .....	38
5.2.7	有感堵转保护 .....	39
5.2.8	无感堵转保护 .....	39
5.2.9	相电流中点检测保护 .....	40
5.2.10	缺相保护 .....	40
5.2.11	相短路保护 .....	40
5.3	电机保护调用主函数 .....	41
<b>6</b>	<b>调试 .....</b>	<b>42</b>
6.1	BLDC 调试 .....	42
6.1.1	带霍尔传感器 BLDC 调试 .....	42
6.1.2	无感 BLDC 调试 .....	42
6.2	FOC 调试 .....	44
<b>7</b>	<b>缩略语 .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>参考资源 .....</b>	<b>46</b>

## 插图目录

图 1-1 AC7840x 双电机 MotorApp 工程组成.....	9
图 1-2 Motor_App 架构图 .....	16
图 1-3 Motor_App 主程序流程图 .....	16
图 1-4 while 主循环流程图.....	17
图 1-5 AC7840x 双电机控制系统框图.....	21
图 1-6 AC7840x 双电机板示意图 .....	22
图 3-1 FOC 硬件过流中断流程图 .....	27
图 3-2 FOC ADC 中断服务流程图 .....	28
图 3-3 FOC 定时中断服务流程图 .....	28
图 3-4 FOC Hall 捕获中断服务流程图.....	29
图 3-5 BLDC 硬件过流中断流程图.....	30
图 3-6 BLDC ADC 中断服务流程图.....	30
图 3-7 BLDC 控制时基中断服务流程图 .....	31
图 3-8 BLDC 控制换相定时器中断服务流程图.....	31
图 3-9 BLDC Hall 捕获中断服务流程图 .....	32
图 4-1 BLDC 方波控制框图.....	33
图 4-2 PMSM 矢量控制框图 .....	34
图 6-1 无感 BLDC 调试流程图.....	43

## 表格目录

---

表 1-1 Motor_App 代码文件.....	11
表 1-2 FOC_App 模块 API 结构.....	17
表 1-3 Bldc_App 模块 API 接口.....	18
表 1-4 Motor_App 工程结构体.....	20
表 5-1 故障保护功能 API.....	35
表 7-1 术语缩写.....	45
表 8-1 相关资源简介.....	46

# 1 简介

## 1.1 目的

本文主要目的是为了描述 AC7840x 双电机板的适配 MotorApp 软件工程基本组成，并简要介绍基本软件模块，根据实际电机的技术参数需适配修改的宏定义变量等，让用户能够快速在现有双电机 MotorApp 工程上进行修改适配，满足项目的应用需求。

## 1.2 双电机 MotorApp 工程组成

AC7840x 双电机 MotorApp 工程组成部分如图 1-1 所示。

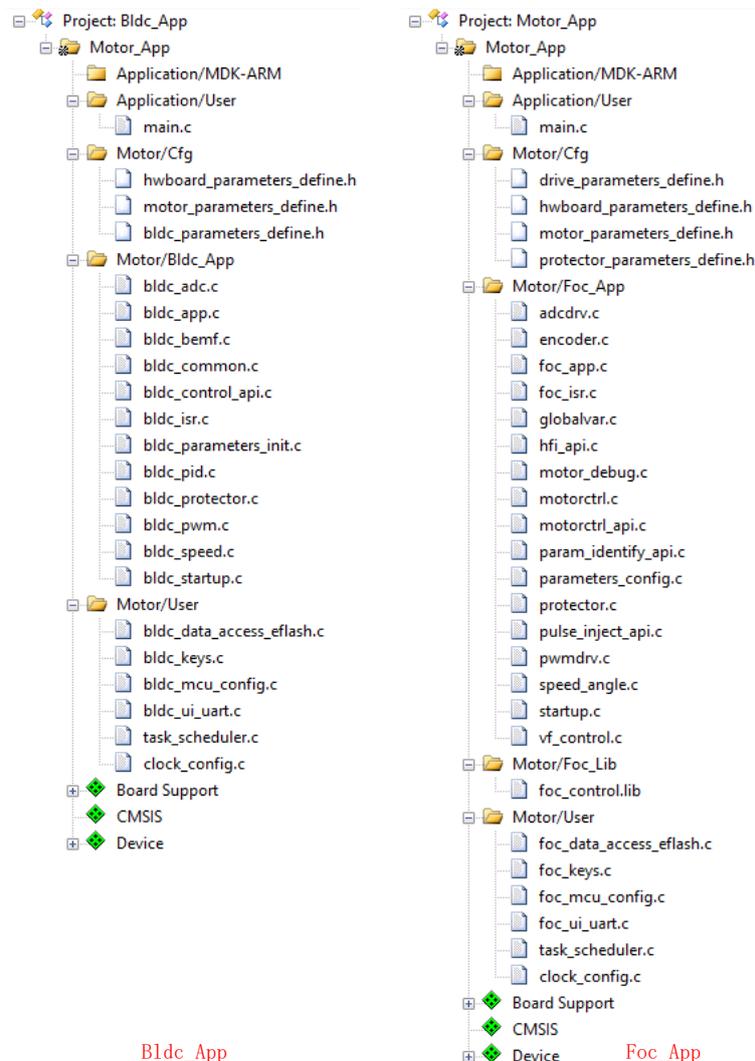


图 1-1 AC7840x 双电机 MotorApp 工程组成

## 1.3 双电机 MotorApp 工程简介

### 1.3.1 双电机 MotorApp 功能

AC7840x 双电机控制算法应用层软件 MotorApp 主要功能包括以下几个部分：

- User 部分
  - a) MCU 各外设模块的初始化
  - b) 控制板上按钮控制接口实现
  - c) 电机控制算法任务调度
  - d) Motor Studio 上位机工具通信（暂不支持）
  - e) 参数在 flash 中的固化与恢复
  - f) MCU 时钟配置
- Foc\_App 部分
  - a) 速度斜坡函数
  - b) 电机保护策略
  - c) 无感电机启动策略
  - d) 相电流采样
  - e) ADC 中断，在 ADC 中断中调用 FOC 算法
  - f) 编码器速度估算
  - g) 电机控制变量 DAC 输出
- Foc\_Lib 部分
  - a) FOC 算法矢量变换实现
  - b) SVPWM 空间矢量脉宽调制实现
  - c) Hall 传感器估算转子初始位置及安装方式辨识
  - d) 无感 FOC 滑膜观测器
  - e) 无感 FOC 磁链观测器
  - f) 无感 FOC 自适应观测器
  - g) 高频注入算法
  - h) 快速刹车制动
  - i) 弱磁控制

- j) 节能控制算法
- k) 功率与母线电流估算
- l) 电机参数辨识
- m) 单电阻采样电流重构
- n) 脉冲注入识别电机初始位置
- o) PID 参数自整定
- p) 数学函数库
- Config define 部分
  - a) 双电机板硬件参数配置
  - b) 双电机控制算法驱动参数配置
  - c) 双电机本体参数配置
  - d) 电机控制保护参数设置
- Bldc\_App 部分
  - a) BLDC 电机 Hall 信号采集及电机转子速度解算
  - b) BLDC 带 Hall 控制算法
  - c) BLDC 无感控制算法
  - d) BLDC 速度环调速实现

### 1.3.2 双电机 MotorApp 代码结构

AC7840x 双电机 MotorApp 的代码结构及文件路径描述见表 1-1 所示。

表 1-1 Motor\_App 代码文件

文件名	文件路径	文件描述
bldc_adc.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	ADC 采样直流母线
bldc_app.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制参数初始化及主函数
bldc_bemf.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制反电动势过零检测、换相

文件名	文件路径	文件描述
bldc_common.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制相关结构体
bldc_control_api.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制功能接口
bldc_isr.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制相关中断回调任务
bldc_parameters_init.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制相关参数初始化
bldc_pid.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制 PID 回路运算
bldc_protector.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制故障保护
bldc_pwm.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机控制 PWM 发波驱动
bldc_speed.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 中速度指令给定运算
bldc_startup.c	Motor_App\Motor-Master\Bldc\Bldc_App\src	Bldc 电机启动控制
adcdrv.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	ADC 采样
encoder.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	编码器位置传感器的 Foc 控制
foc_app.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 电机控制主函数
foc_isr.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 电机控制相关中断函数
globalvar.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 电机控制相关结构体
hfi_api.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	高频注入 app 接口文件

文件名	文件路径	文件描述
motor_debug.c	Motor_App\Foc\Foc_App\src	Foc 调试中 DAC 输出送显
motorctrl.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	正交编码器位置传感器的 Foc 控制
motorctrl_api.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 中电机控制接口文件
param_identify_api.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	电机参数识别接口文件
parameters_config.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 电机控制参数配置初始化
protector.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 中电机保护策略
pulse_inject.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	脉冲注入 app 接口文件
pwmdrv.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	PWM 模块驱动
speed_angle.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	Foc 中速度指令及速度环运算
startup.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	无感 Foc 启动策略控制
vf_control.c	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_App\src	电机 V/f 控制
bldc_parameters_define.h	Motor_App\Inc\Bldc_Cfg	Bldc 电机算法控制参数定义头文件
hwboard_parameters_define.h	Motor_App\Inc\Common_Cfg	Foc 硬件电路板参数定义头文件
motor_parameters_define.h	Motor_App\Inc\ Common_Cfg	Foc 电机参数定义头文件
drive_parameters_define.h	Motor_App\Inc\Foc_Cfg	Foc 电机算法控制参数定义头文件
protector_parameters_define.h	Motor_App\Inc\Foc_Cfg	Foc 保护策略参数定义头文件

文件名	文件路径	文件描述
autocur_regulator.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 电流调节器相关头文件
autospd_regulator.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 速度调节器相关头文件
coordnt.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 矢量变换相关头文件
cur_restruct.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 采样电流处理相关头文件
energy_save.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	节能控制算法相关头文件
flux_observer.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 磁链观测器相关头文件
flux_weakening.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 弱磁控制相关头文件
hall_sensor.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc Hall 信号处理相关头文件
highfreqinj.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	高频注入法相关头文件
iqmath.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	电机算法数学库函数头文件
maxtorque_per_ampere.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	MTPA 算法相关头文件
mras.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	模型参考自适应算法相关头文件
param_identify.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	电机参数辨识相关头文件
param_init.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 电机控制参数标么相关头文件
pid_regulator.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc PID 控制相关头文件

文件名	文件路径	文件描述
power_dccur_estimate.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	功率及母线电流估算相关头文件
pulse_inject.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	无感 Foc 初始位置识别相关头文件
short_brake.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	快速刹车功能相关头文件
smopos.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	Foc 滑模观测器相关头文件
svgen.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	FOC SVPWM 相关头文件
version.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	电机 Foc 控制开发库版本相关头文件
vf_compensate.h	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\inc	vf 控制辅助功能相关头文件
foc_control.lib foc_control.a	Motor_App\Motor-Master\Foc\Foc_Lib\src	电机 Foc 控制开发库

## 1.4 双电机 MotorApp 软件设计

### 1.4.1 双电机 MotorApp 架构

AC7840x 双电机 MotorApp 软件工程包括 Motor\_App, MotorLib 等模块, 其基本架构如图 1-2 所示。

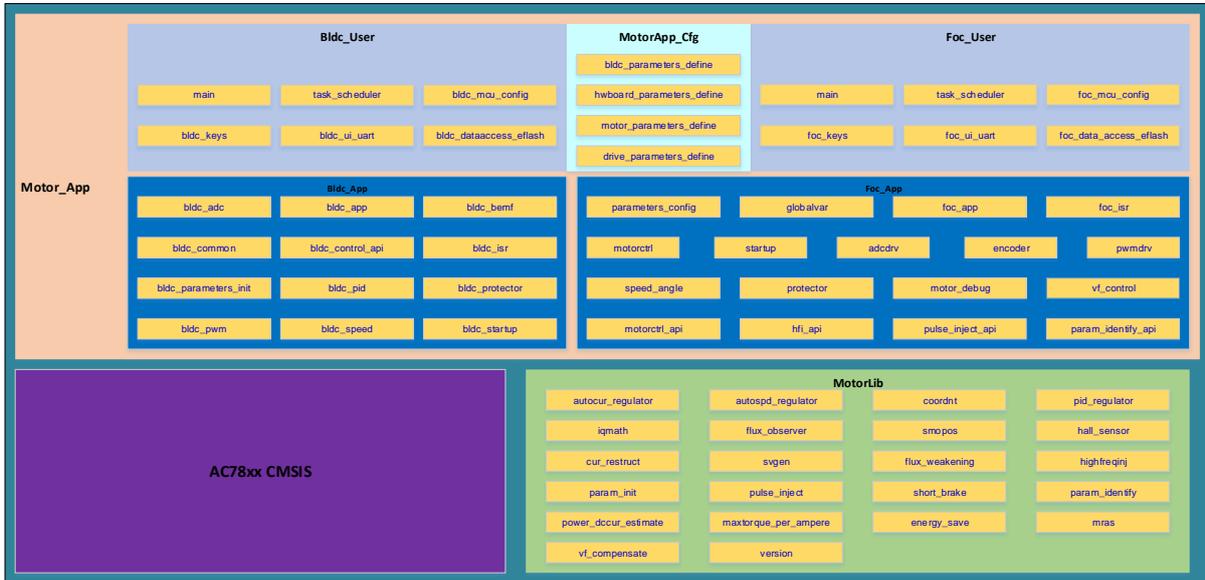


图 1-2 Motor\_App 架构图

### 1.4.2 双电机 MotorApp 流程图

AC7840x 双电机 Motor\_App 主程序流程如图 1-3 所示。

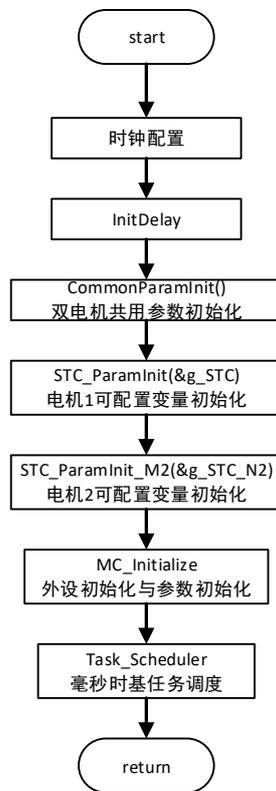


图 1-3 Motor\_App 主程序流程图

### 1.4.3 双电机 MotorApp while 主循环

AC7840x 双电机 Motor\_App while 主循环中流程图如图 1-4 所示。

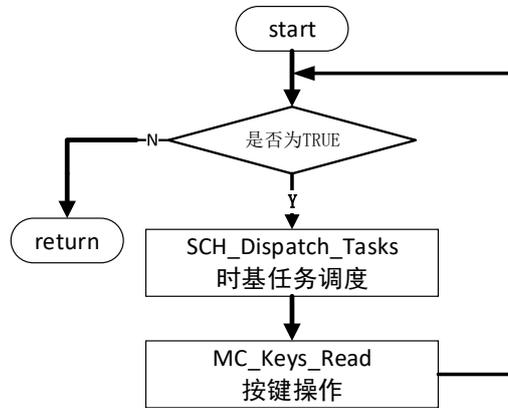


图 1-4 while 主循环流程图

## 1.5 双电机 MotorApp 接口描述

### 1.5.1 双电机 MotorApp API

双电机 Motor\_App 模块中 FOC 与 BLDC 的 API 接口见表 1-2 和表 1-3 所示。

表 1-2 FOC\_App 模块 API 结构

API	说明
FOC_Parameters_Initialize	电机 1 的 FOC 控制全局变量初始化
FOC_Parameters_Initialize_M2	电机 2 的 FOC 控制全局变量初始化
FOC_Peripheral_Initialize	电机 FOC 控制外设初始化
FOC_PWM_FaultCallback	电机 1 硬件过流保护中断
FOC_PWM_FaultCallback_M2	电机 2 硬件过流保护中断
Timer0_Callback	定时器 0 中断回调函数，产生 1ms 时基
FOC_Hall_CaptureCallback	电机 1 Hall FOC 控制 Hall 信号捕获中断
FOC_Hall_CaptureCallback_M2	电机 2 Hall FOC 控制 Hall 信号捕获中断
Motor_Ctrl_CallBack	电机 1 FOC 控制 ADC 中断

API	说明
Motor_Ctrl_CallBack_M2	电机 2 FOC 控制 ADC 中断
Motor_1ms_Task	电机 1 FOC 控制 1ms 时基任务，主状态机及速度环运算
Motor_1ms_Task_M2	电机 2 FOC 控制 1ms 时基任务，主状态机及速度环运算
MainStateMachine	电机 1 FOC 控制状态机
MainStateMachine_M2	电机 2 FOC 控制状态机
MC_Keys_Read	电机控制按键识别
Task_Scheduler	时基任务调度管理
ASR_SetSpeedTarget_Pu	设定速度环速度目标值
ASR_SpeedTargetRampCalc	速度斜坡计算
ASR_SpeedLoop_Process	速度环计算
ASR_SpeedFbk_Update	获取电机 1 速度环反馈
ASR_SpeedFbk_Update_M2	获取电机 2 速度环反馈
Get_ElecAngle	获取电机 1 电角度
Get_ElecAngle_M2	获取电机 2 电角度
Debug_Display_Variables	电机 1 调试 DAC 输出送显
Debug_Display_Variables_M2	电机 2 调试 DAC 输出送显

表 1-3 Bldc\_App 模块 API 接口

API	说明
BLDC_Parameters_Initialize	BLDC 电机 1 控制参数初始化
BLDC_Parameters_Initialize2	BLDC 电机 2 控制参数初始化

API	说明
BLDC_Peripheral_Initialize	BLDC 控制外设初始化
BLDC_Base_TimerCallBack	方波控制 1ms 时基任务
Timer2_Callback	电机 1 方波无感控制 12us 时基任务
Timer3_Callback	电机 2 方波无感控制 12us 时基任务
BLDC_Hall_ChannelCallback	BLDC 电机 1 有感控制 Hall 捕获中断
BLDC_Hall2_ChannelCallback	BLDC 电机 2 有感控制 Hall 捕获中断
BLDC_Hall_OFCallback	BLDC 电机 1 有感控制 Hall 通道溢出中断
BLDC_Hall2_OFCallback	BLDC 电机 2 有感控制 Hall 通道溢出中断
BLDC_PWM_FaultCallback	电机 1 方波控制 PWM 硬件过流中断
BLDC_PWM_Fault2Callback	电机 2 方波控制 PWM 硬件过流中断
BLDC_ADC1_Callback	电机 1 方波控制 ADC 中断
BLDC_ADC0_Callback	电机 2 方波控制 ADC 中断
Motor_1ms_Task	电机 BLDC 控制 1ms 时基任务，主状态机及速度命令给定等
Motor_2ms_Task	电机 BLDC 控制 2ms 时基任务，上位机功能
BldeStateMachine	电机 1 BLDC 控制状态机
BldeStateMachine2	电机 2 BLDC 控制状态机
BLDC_CurrentLoop_Calculate	电机 BLDC 控制电流环计算
BLDC_SpeedLoop_Calculate	电机 BLDC 控制速度环计算
BLDC_ASR_FbkUpdate	电机 BLDC 控制获取速度环反馈
MC_Keys_Read	电机控制按键识别

## 1.5.2 双电机 MotorApp 数据结构

双电机 Motor\_App 工程中定义的结构体见表 1-4 所示。

表 1-4 Motor\_App 工程结构体

数据结构	说明
MOTOR_PARAM	电机参数结构体
MOTOR_PARAM_PU	电机参数标么化结构体
HW_BOARD	电机控制器硬件电路参数结构体
FOC_VARS_CFG	FOC 配置参数结构体
FOC_VARS_CTRL	FOC 控制参数结构体
FOC_VARS	FOC 控制功能结构体
STC_PARAM	速度-转矩控制参数结构体
PROTECTOR	保护相关结构体
SPEED_RAMP_HANDLE	速度环速度斜坡参数结构体
START_UP_CFG	FOC 起动功能配置参数结构体
START_UP_CTRL	FOC 起动功能控制参数结构体
START_UP	FOC 起动控制参数结构体
BLDC_VARS_CFG	BLDC 配置参数结构体
BLDC_VARS_CTRL	BLDC 控制参数结构体
BLDC_VARS	BLDC 控制功能结构体
SPEED_RAMP_TYPE	BLDC 控制速度环速度斜坡参数结构体

## 1.6 AC7840x 双电机硬件板

### 1.6.1 双电机硬件架构

基于 AC7840x 双电机板进行 BLDC 或 PMSM 双电机控制，其原理框图如图 1-5 所示。

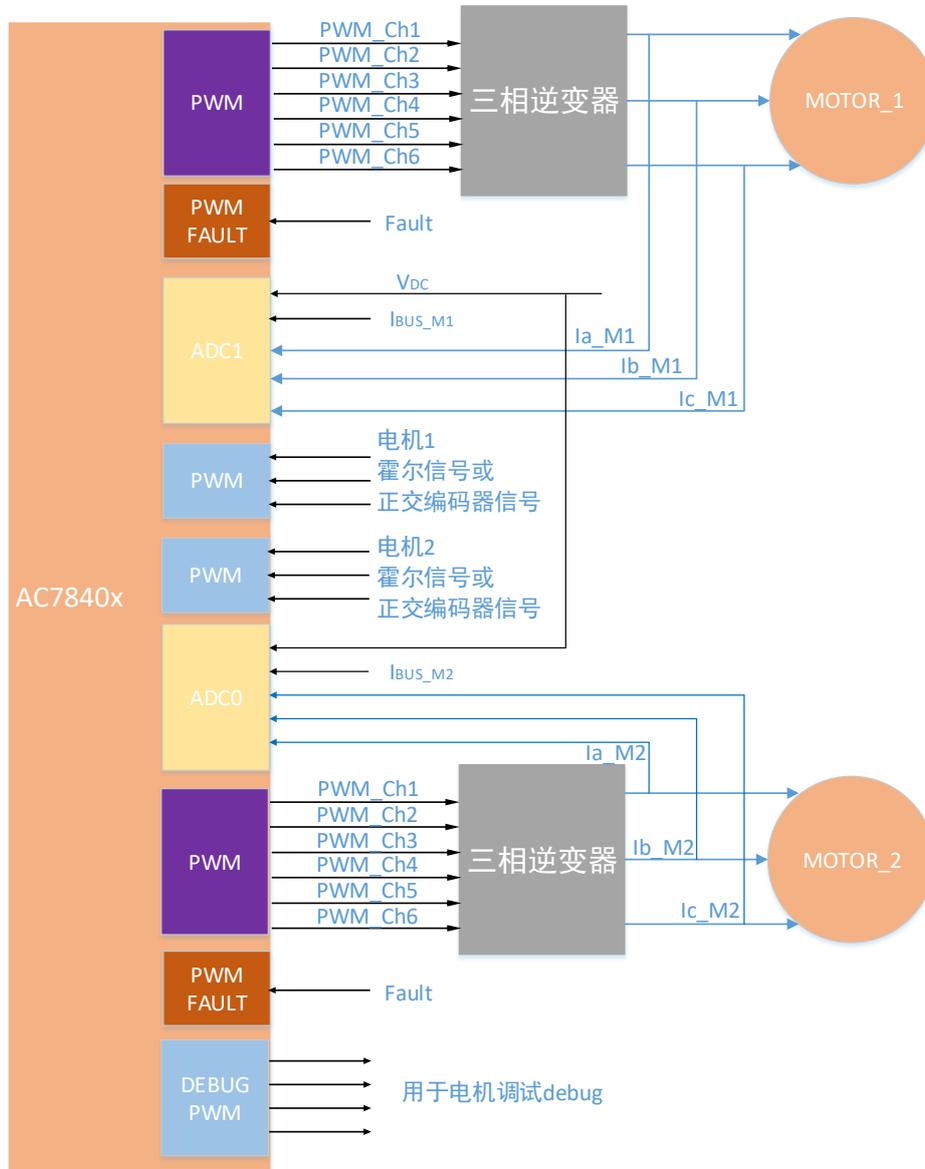


图 1-5 AC7840x 双电机控制系统框图

双电机控制系统需要使用以下 MCU 外设资源，主要包括：

1) PWM

用于控制六路 PWM 输出，经逆变器后驱动三相电机。AC7840x 的 PWM 模块也用来作为 Hall 传感器或 Encoder 的信号采集，获取电机转子位置。

2) FAULT

检测电机过流故障，快速关停 PWM 以便于进行电机保护。

3) ADC

用于采集电机相电流，或在单电阻模式下采集母线电流，以及采集母线电压、调速旋钮、控制按钮等电压信号。

#### 4) Debug PWM

用于电机开发调试，产品量产时不使用，可与 CAN、UART、SPI 等外设模块复用。

### 1.6.2 双电机硬件版简介

AC7840x 双电机硬件板如图 1-6 所示。

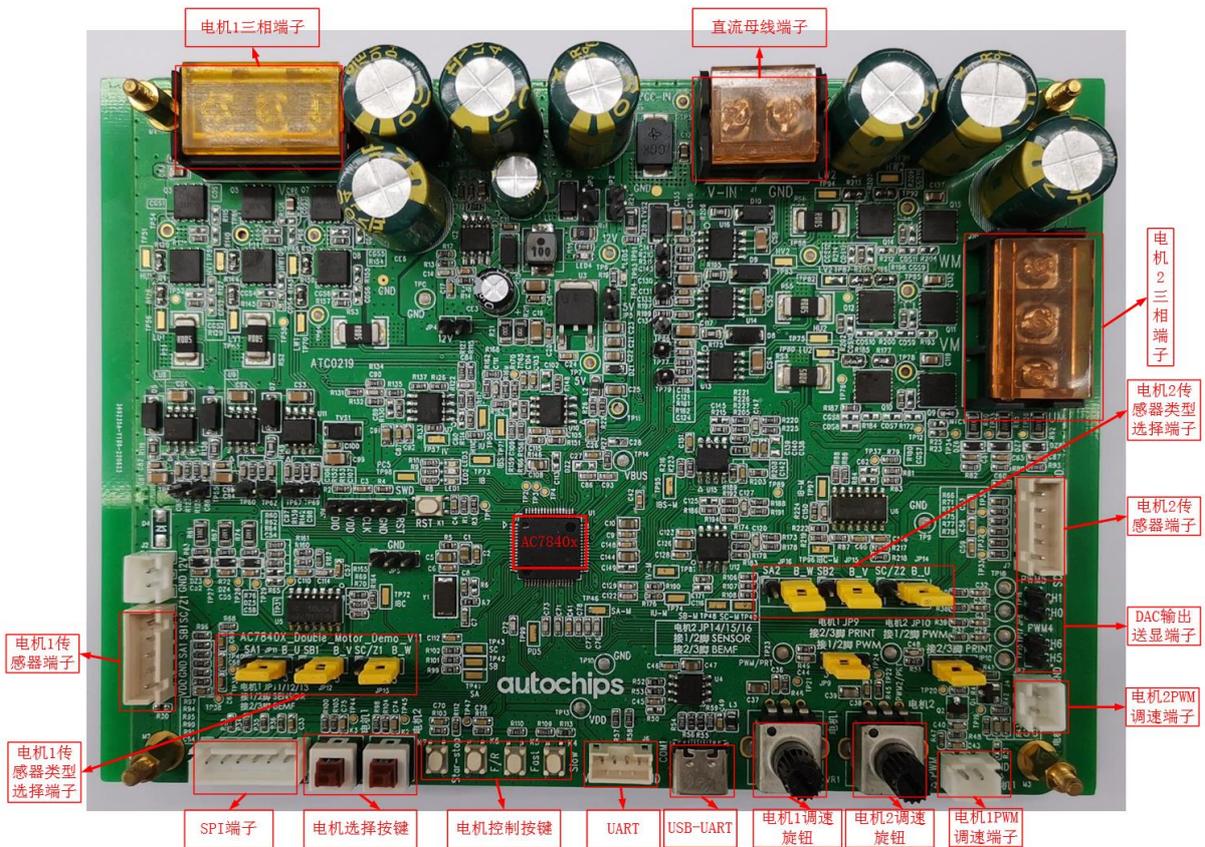


图 1-6 AC7840x 双电机板示意图

双电机板上的各端子功能如下：

1. 直流母线端子：接入直流电源，其中 V\_IN 接电源正端，GND 接电源负端。
2. 电机 1 三相端子：接电机 1 的三相线，顺时针方向为 U-V-W。
3. 电机 2 三相端子：接电机 2 的三相线，逆时针方向为 U-V-W。
4. 电机 1 传感器端子：接电机 1 的 Hall 或 Encoder 传感器信号线，五个连接 pin 分别为 VDD 供电、GND 地、SA1 A 相信号线、SB1 B 相信号线、SC/Z1 C 相（Hall 传感器）或 Z 信号（Encoder 传感器）。

5. 电机 2 传感器端子：接电机 2 的 Hall 或 Encoder 传感器信号线，五个连接 pin 分别为 VDD 供电、GND 地、SA2 A 相信号线、SB2 B 相信号线、SC/Z2 C 相（Hall 传感器）或 Z 信号（Encoder 传感器）。
6. 电机 1 传感器类型选择端子（JP11/12/13）：由三个跳帽选择电机 1 的传感器类型，当电机 1 使用 Hall 或 Encoder 传感器时，跳帽均需要接左侧两个 pin（1/2 脚）；当电机 1 需要检测电机反电动势时，跳帽均需要接右侧两个 pin（2/3 脚）。
7. 电机 2 传感器类型选择端子（JP14/15/16）：由三个跳帽选择电机 2 的传感器类型，当电机 2 使用 Hall 或 Encoder 传感器时，跳帽均需要接左侧两个 pin（1/2 脚）；当电机 2 需要检测电机反电动势时，跳帽均需要接右侧两个 pin（2/3 脚）。
8. 电机选择按键：两个锁存开关按键用来选定当前运行的电机，左侧靠近 SPI 的按键对应电机 1，右侧靠近电机控制按键的对应电机 2。当锁存按键按下时，表示选定对应电机，此时电机控制按键按下后选定的电机响应控制按键的动作；当锁存按键弹起时，表示不控对应电机，此时电机控制按键无法控制对应电机的运行。
9. 电机控制按键：由 4 个按键组成，逆时针方向分别为 Start-Stop 启停按键、F/R 正反转按键、Fast 加速按键、Slow 减速按键。当电机被选定后，按下控制按键，电机响应控制按键操作运行。
10. 电机 1 调速旋钮 / 电机 1 PWM 调速端子：通过旋钮或 PWM 波来调节电机 1 的转速。
11. 电机 2 调速旋钮 / 电机 2 PWM 调速端子：通过旋钮或 PWM 波来调节电机 2 的转速。
12. DAC 输出送显端子：由 PWM 通道输出 MotorApp 中程序变量，可通过示波器测量端子的四个 pin 来观测程序变量。待观测的程序变量可在程序中进行选择，可同时观测两个电机的程序变量。

**说明：**

1.6.2 章节中顺/逆时针以图 1-6 中 AC7840x 双电机开发板为参考基准。

## 2 双电机 MotorApp 外设配置

### 2.1 GPIO 初始化

AC7840x 系列 MCU 的 GPIO 具有 Multi-Function 功能，可以根据 GPIO 复用功能表及 PCB 原理图确认各模块使用的 GPIO 及其功能，各模块使用的 GPIO 的初始化是在各模块初始化函数中进行。

### 2.2 PWM 初始化

AC7840x 双电机 PWM 模块初始化包含 4 类：电机驱动 PWM 模块，电机 Hall 信号 PWM 模块，电机 Encoder 信号 PWM 模块，程序变量输出送显 PWM 模块。

#### 2.2.1 驱动 PWM 初始化

在双电机应用中，两个驱动 PWM 模块需要错开半个 PWM 周期，以保证两个电机的 FOC 中断均有充足的可执行时间。通过首先单独配置两个 PWM 模块，再对两个 PWM 模块的时钟配置函数之间延时半个 PWM 周期，使得两个 PWM 模块计数器工作间隔半个 PWM 周期。两个 PWM 模块的具体配置步骤完全一致，以下以电机 1 的 PWM 模块为例，配置步骤如下：

1. 对 PWM 的 6 个输出通道的初始输出电平进行设置，双电机板配置为 PWM\_LOW\_LEVEL 低电平，并使能通道输出初始化；
2. 将 3 对通道配置为组合模式，levelMode 配置为 PWM\_HIGH\_TRUE 高有效；使能互补模式 complementEn；使能死区时间 deadtimeEn，死区时间 deadTime 配置为 PWM\_DEAD\_TIME，设置死区时间分频；设置组合通道中第一通道匹配方向 ch1stMatchDir 为 PWM\_MATHC\_DIR\_UP 增方向，第二通道匹配方向 ch2ndMatchDir 为 PWM\_MATCH\_DIR\_DOWN 减方向；设置组合通道中两个通道输出极性 ch1stPolarity 和 ch2ndPolarity 为 PWM\_OUTPUT\_POLARITY\_ACTIVE\_HIGH 高有效；
3. 使能 initTriggerEn 初始值触发；配置计数模式 countMode 为 PWM\_UP\_DOWN\_COUNT 增减计数；配置组合通道数 combineChannelNum 为 3；
4. 配置 PWM 模块模式 mode 为 PWM\_MODE\_MODULATION 调制模式；配置 PWM 时钟源及时钟分频系数；配置 PWM 计数最大值 maxValue 为 PWM\_PERIOD\_VALUE 周期值；
5. 配置 PWM 模块同步参数；
6. 配置 PWM 模块 Fault 参数；
7. 设置 PWM Fault 中断优先级为 0。

### 2.2.2 Hall 信号捕获 PWM 初始化

在双电机应用中，两个 Hall PWM 的初始化除 GPIO 部分根据硬件原理图进行选择，以及中断回调配置为各电机对应的回调函数外，具体配置保持一致。以电机 1 的 Hall PWM 为例，配置步骤如下：

1. 首先进行通道配置，配置 channel 通道为 PWM\_CH\_0，mode 模式为 PWM\_INPUTCAP\_DUAL\_EDGE 双边沿捕获；配置 measureType 测量模式为 PWM\_POSITIVE\_PLUSE\_WIDTH\_MEASURE 脉宽检测；配置 onceMode 为 PWM\_INPUTCAP\_CONTINUOUS 连续模式；使能滤波并配置滤波参数；
2. 使能 Hall 模式 hallEn；
3. 配置 PWM 模块模式 mode 为 PWM\_MODE\_INPUT\_CAPTURE 输入捕获；配置 PWM 时钟源、时钟分频、计数最大值，使能 PWM 中断，使能溢出中断，配置通道中断和溢出中断回调函数。

### 2.2.3 Encoder 信号捕获 PWM 初始化

在双电机应用中，两个 Encoder PWM 的初始化除 GPIO 部分根据硬件原理图进行选择外，以及中断回调配置为各电机对应的回调函数外，具体配置保持一致。以电机 1 的 Encoder PWM 为例，配置步骤如下：

1. 使能 encoder quadEn 正交解码模式；配置 encoder mode 为 PWM\_QUAD\_PHASE\_ENCODE；配置 Encoder AB 相滤波值和极性；
2. 配置 PWM 模式 mode 为 PWM\_MODE\_QUADRATURE\_DECODER 正交解码模式；配置 PWM 时钟源、时钟分频，使能溢出中断，并配置溢出中断回调函数。

## 2.3 ADC 初始化

AC7840x ADC 分为规则组和注入组，使用规则组进行母线电压、调速旋钮、按键等信号采样，使用注入组实现相电流、母线电流采样。在 AC7840x 双电机板上，电机 1 的 U/V 相电流、母线电流、调速旋钮采样使用 ADC1；电机 2 的 U/V 相电流、母线电流、调速旋钮，以及公共母线电压、操作按键等采样使用 ADC0。

规则组采用软件触发模式。注入组采用外部触发模式，在 PWM 下桥臂导通的中心开始 ADC 采样，采集相电流。ADC 数据支持 DMA 传输，在规则组采样完成后，使用 DMA 将数据从 ADC 寄存器搬到 Memory 中。

注入组 ADC 采样完后，触发 ADC 中断，在 ADC 中断中根据当前采样的相电流执行 FOC 算法。两个电机的 ADC 初始化函数分别为 FOC\_ADC\_Initialize\_M1 和 FOC\_ADC\_Initialize\_M2，其中根据硬件电路设置 ADC 注入组通道、规则组通道，并配置中断回调函数。

## 2.4 TIMER 初始化

在 AC7840x 双电机控制中，Timer 有 3 种用途：1) 产生 1ms 时基，作为周期任务的基准；2) 在 Encoder FOC 模式下用作 MT 测速法获取转速；3) 在 BLDC 无感方波模式下作为换相定时器。由于 AC7840x 的 Timer 是单模块 4 通道，Timer 初始化共用一个初始化 API：FOC\_TIM\_Initialize 或 BLDC\_TIM\_Initialize，在函数内部对不同的通道根据其处理的任务进行相应的配置，主要内容有 timerMode 配置为 TIMER\_PERIODIC\_COUNTER 周期计数模式；periodUnits 配置为 TIMER\_PERIOD\_UNITS\_COUNTS 计数时间单位；period 根据执行的任务周期进行区别配置；使能 Timer 通道中断，并配置对应通道的中断回调函数。

### 3 AC7840x 双电机中断服务

#### 3.1 双电机 FOC 控制中断服务

##### 3.1.1 电机硬件过流保护中断

发生硬件过流时触发电机过电流保护中断，由外部比较器电路产生过流故障信号，MCU 检测到有效的故障电平信号后，触发 PWM Fault 中断，关闭 PWM 脉冲宽度调制波输出，保护电路板。该中断优先级一般设置位 0，即最高优先级。在 MotorApp 工程中，FOC 模式中加入了电机过流保护机制，其执行 API 为 FOC\_PWM\_FaultCallback，发生过流触发中断时，将电机运行状态设置位 FAULT，给出过流标志位并禁止 PWM 输出。两个电机的 Fault 中断一致，以下以电机 1 为例。

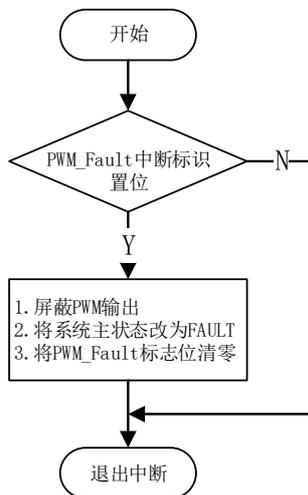


图 3-1 FOC 硬件过流中断流程图

##### 3.1.2 ADC 采样中断

在 ADC 初始化函数中，已设置了相应的 ADC 中断回调函数，因此在相应 ADC 通道完成 ADC 转换触发 ADC 中断后，即调用相应的回调函数。双电机的 ADC 中断函数流程完全一致，以下以电机 1 的 ADC 中断为例进行说明。

FOC 模式执行时 ADC 中断调用 Motor\_Ctrl\_CallBack 函数，因为 ADC 中断后即可完成采集三相电流。故在回调函数 Motor\_Ctrl\_CallBack 中，调用 Get\_CurrentSample 完成相电流采样转换，AdcResultTransmit 完成 ADC 数据到 FOC 程序量的传递，Foc\_Execution\_AngleProcess 执行无感 FOC 的观测器或有感 FOC 的电角度估算，和 Foc\_Execution\_CurrentLoopProcess 执行电流环计算，完成一次 FOC 运算。FOC ADC 中断流程如图 3-2 所示。

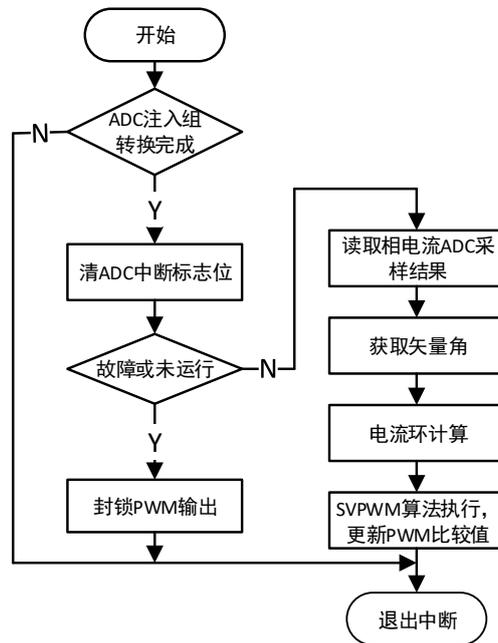


图 3-2 FOC ADC 中断服务流程图

### 3.1.3 Timer 中断

FOC 模式中 Timer 中断主要用来毫秒时机任务调度管理，中断回调函数为 Timer0\_Callback，中断流程图如图 3-3 所示。

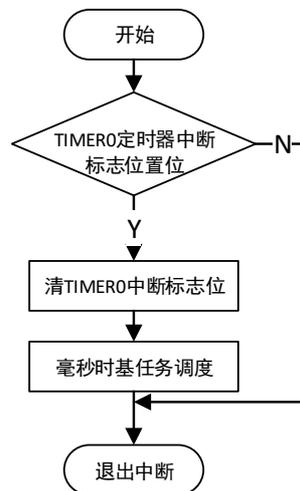


图 3-3 FOC 定时中断服务流程图

### 3.1.4 Hall 中断

在 Hall FOC 模式中，Hall 信号解析由 PWM 模块执行。PWM 溢出中断回调 API 为 FOC\_Hall\_OverCallback 函数；使用 PWM 捕获中断，捕获通道事件中断回调函数为 FOC\_Hall\_CaptureCallback，Hall PWM 中断流程图如图 3-4 所示。

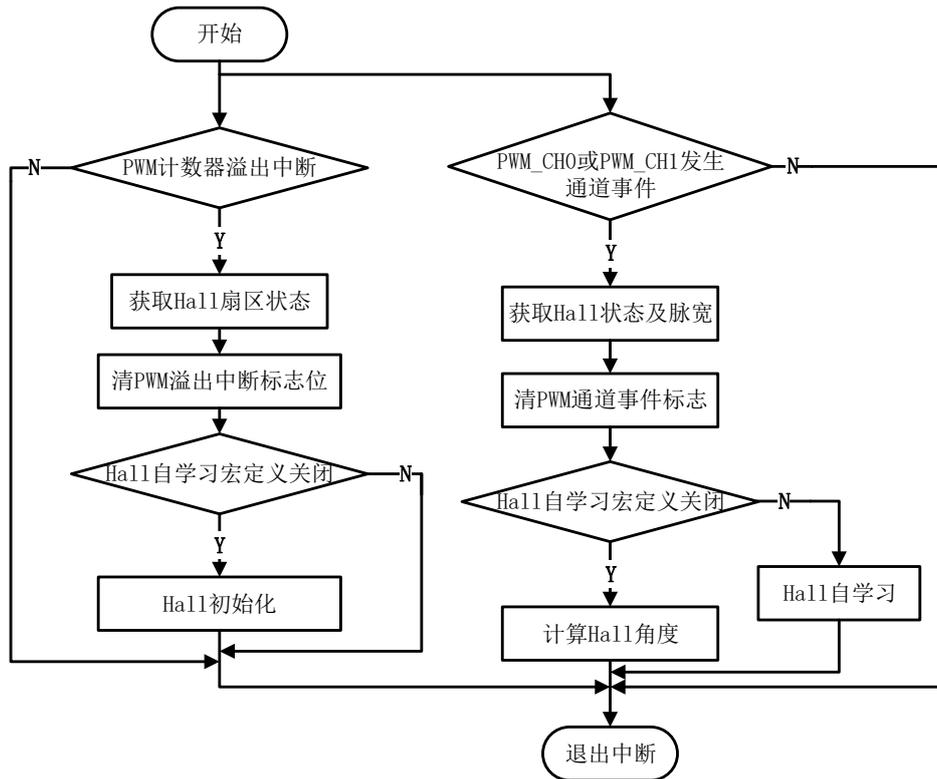


图 3-4 FOC Hall 捕获中断服务流程图

## 3.2 双电机方波控制中断服务

### 3.2.1 电机硬件过流保护中断

发生硬件过电流时触发，由外部比较器电路产生过流故障信号，芯片检测到有效的故障电平信号后，触发 PWM Fault 中断。关闭 PWM 脉冲宽度调制波输出，保护电路板。该中断优先级一般设置为 0，即最高优先级。

在 MotorApp 工程中，BLDC 模式中加入了电机硬件过流保护机制，其执行 API 为：电机 1 为 BLDC\_PWM\_FaultCallback，电机 2 为 BLDC\_PWM\_Fault2Callback。发生过流触发中断时，将电机运行状态设置为 FAULT，给出过流标志位并将对应的 PWM 模块脉冲宽度调制波输出设置为无效。

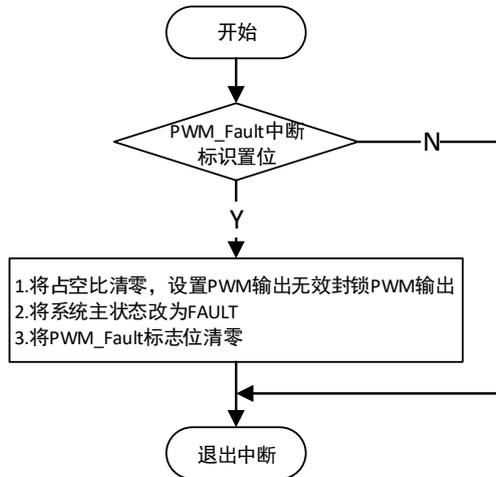


图 3-5 BLDC 硬件过流中断流程图

### 3.2.2 ADC 采样中断

在 ADC 初始化函数中，为 BLDC 模式设置了相应的 ADC 中断回调函数，在 ADC 注入组受 PWM\_MATCH 触发 ADC 转换完成后触发中断，并调用相应的回调函数。双电机的 ADC 中断一致，电机 1 使用 ADC1，电机 2 使用 ADC0，以下以电机 1 为例进行说明。

BLDC 模式执行 ADC 中断调用 BLDC\_ADC1\_Callback，在回调函数中读取母线电流 AD 值，用于电流环闭环运算。ADC 中断服务程序如图 3-6 所示。

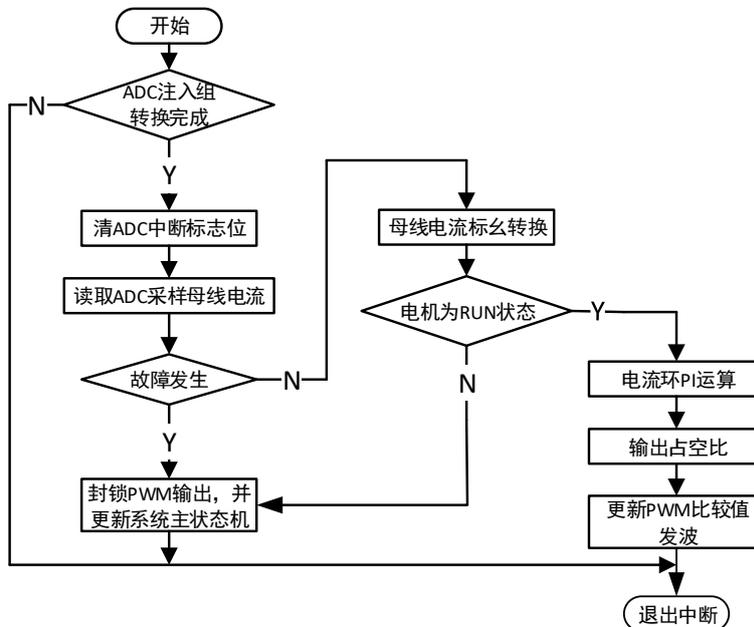


图 3-6 BLDC ADC 中断服务流程图

### 3.2.3 Timer 中断

BLDC 采用 Timer0 中断产生 1ms 时基，Timer1 中断作为电机 1 的无感方波换相定时器，Timer2 中断作为电机 2 的无感方波换相定时器。任务时基中断流程图如图 3-7 所示，电机 1 换相定时器中断流程图如图 3-8 所示。

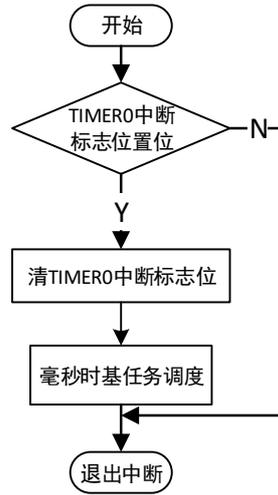


图 3-7 BLDC 控制时基中断服务流程图

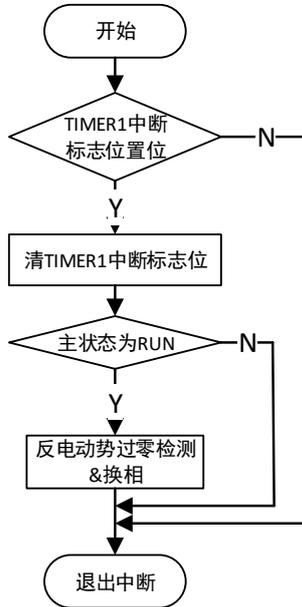


图 3-8 BLDC 控制换相定时器中断服务流程图

### 3.2.4 Hall 中断

在 Hall BLDC 模式控制中，Hall 信号解析由 PWM 模块执行。PWM 溢出中断回调 API 为 BLDC\_Hall\_OFCallback 函数；使用 PWM 捕获中断，捕获通道事件中断回调函数为 BLDC\_Hall\_ChannelCallback，中断流程图如图 3-9 所示。

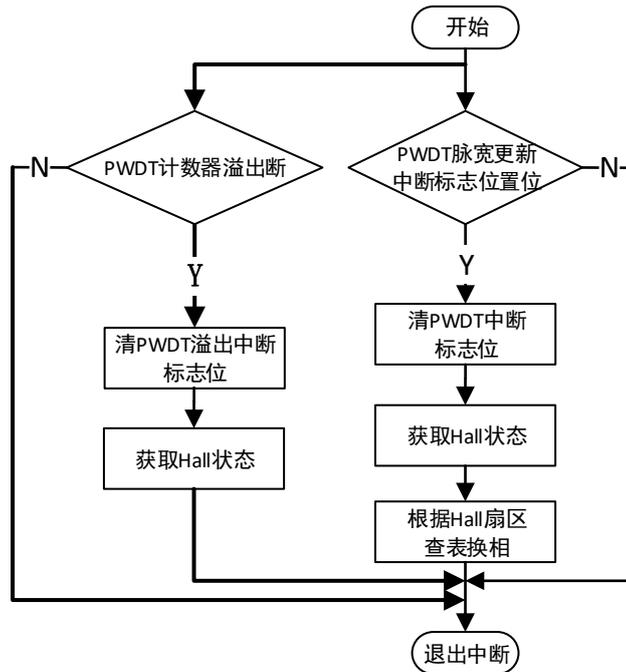


图 3-9 BLDC Hall 捕获中断服务流程图

## 4 AC7840x 双电机控制算法

### 4.1 BLDC 双电机方波控制

BLDC 双电机控制与单电机控制方式一致，区别仅在于两个电机可完全独立控制运行，也可由统一的信号控制一起运行。两个电机独立运行时，其控制方式是完全独立的。BLDC 的控制电路对电机转子位置信号进行逻辑变换后产生脉宽调制 PWM 信号，驱动逆变器的功率开关管，从而控制 BLDC 电机各相绕组按一定顺序工作，在电机气隙中产生跳跃式旋转磁场。BLDC 转子旋转时，每转过  $60^\circ$  电角度，逆变器开关管换流一次、定子磁场状态改变一次，因此 BLDC 共有 6 个磁场状态，三相各导通  $120^\circ$  电角度，相电流为方波。BLDC 的方波控制框图如图 4-1 所示。

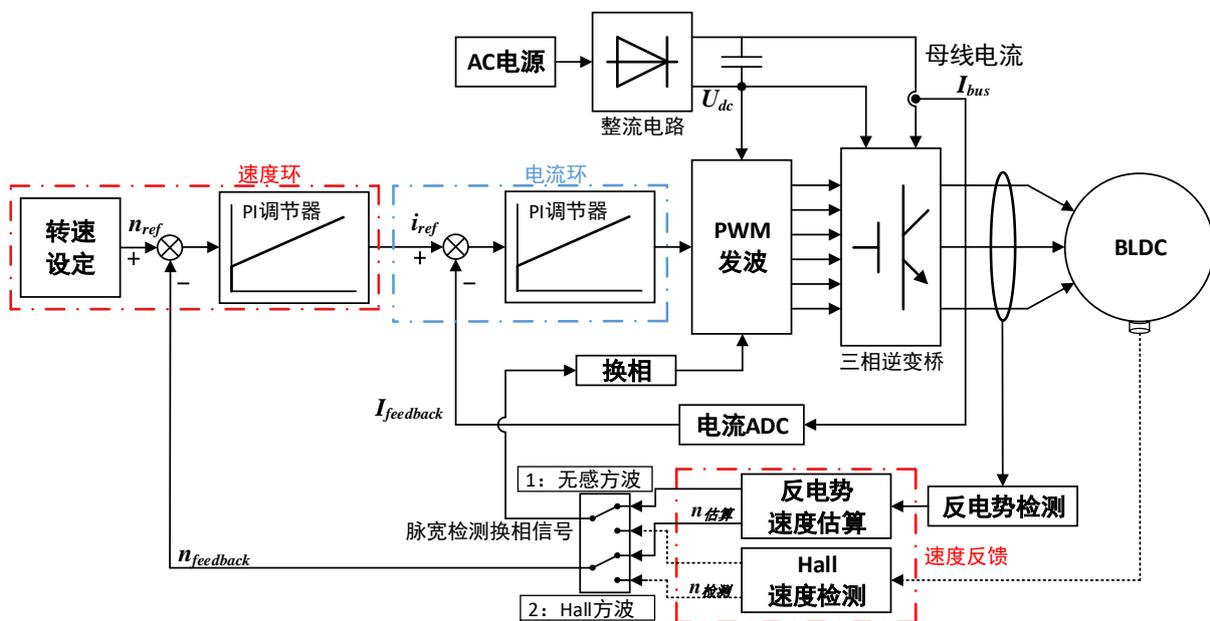


图 4-1 BLDC 方波控制框图

BLDC 双电机控制中支持带 Hall 传感器的 Hall 方波控制和基于反电动势检测的无感方波控制任意组合，两个电机可单独选择控制算法模式运行。

### 4.2 PMSM 双电机 FOC 控制

PMSM 双电机 FOC (Field Oriented Control) 控制与单电机 FOC 控制方式一致，两个电机可完全独立控制运行，也可由统一的信号控制一起运行。两个电机独立运行时，其控制方式是完全独立的。在 FOC 中，电机的定子电流被分解为用于产生磁场的直轴电流（励磁电流）与用于控制转矩的交轴电流（转矩电流），通过对转速和电流的双环控制实现电机的高性能运行。根据转速信号来源可以分成带传感器 FOC 以及无传感器 FOC，其中传感器通常有 Hall 传感器、编码器等类型。PMSM 的 FOC 控制框图如图 4-2 所示。

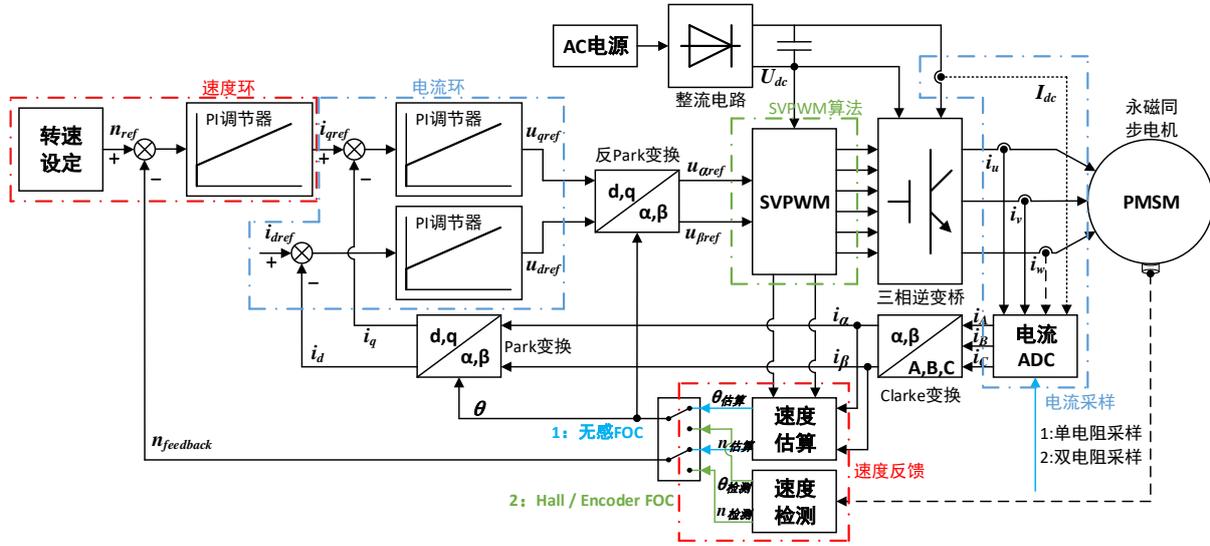


图 4-2 PMSM 矢量控制框图

PMSM 矢量控制支持带速度/位置传感器的有感 (Hall 或 Encoder) FOC 和无感 FOC 任意组合。两个电机可单独选择控制算法模式运行，并配置不同的电流采样模式(单电阻采样或双电阻采样)。

## 5 电机运行保护功能

### 5.1 电机保护功能 API

本节对常规使用的电机保护功能接口进行描述，如表 5-1 所示。

表 5-1 故障保护功能 API

故障保护API接口	功能
Fault_Report	故障置位
Fault_Clear	故障清除
Phase_Over_Current_Check	相电流过流保护
Bus_Over_Current_Check	母线电流过流保护
Vbus_OverVoltage_Check	过压保护
Vbus_UnderVoltage_Check	欠压保护
LoseSpeed_Check	失速保护
ZeroSpeed_Check	零速保护
Stall_Check_Sensor	堵转保护（有位置传感器）
Stall_Check_Sensorless	堵转保护（无位置传感器）
Current_Sensor_Check	相电流中点检测保护
LosePhase_Check	缺相保护（动态）
Phase_Short_Dynamic_Check	相线短路保护（动态）
Motor_Protection	电机 1 保护主函数
Motor_Protection_M2	电机 2 保护主函数

## 5.2 电机保护功能说明

### 5.2.1 相电流过流保护

电机相电流超过设定阈值，且连续达到设定次数（防误报）时，上报相电流过流故障。

通过以下进行相电流保护设置：

```
#define PHASE_CURRENT_PROTECTION_ENABLE      /*!< Phase current overcurrent protection enable */
#define MAX_IPHASE_THRESHOLD      Math_IQ(0.95) /*!< Protection threshold, refer to current base value */
#define IPHASE_DBC      (10) /*!< Phase current overcurrent protection operation
value in ms unit. 10 refer to 10ms */
```

- 宏定义 `PHASE_CURRENT_PROTECTION_ENABLE`，定义时打开相电流保护功能，屏蔽则关闭相电流保护功能。
- 宏定义 `MAX_IPHASE_THRESHOLD` 设置保护电流阈值，保护电流阈值对应真实值 =  $0.95 * MAX\_CURRENT$  (在 `motor_parameters_define.h` 中定义)。
- 宏定义 `IPHASE_DBC` 设置保护电流判断次数，连续判断过流超过此次数上报过流故障。
- 验证相电流过流保护时可先将宏定义 `MAX_IPHASE_THRESHOLD` 的值设置为较小值，提前模拟相电流过流保护的发生。

### 5.2.2 母线电流过流保护

电机母线电流超过设定阈值，且连续达到设定次数（防误报）时，上报母线电流过流故障。

通过以下进行母线电流保护设置：

```
#define BUS_OVERCURRENT_PROTECTION_ENABLE      /*!< Bus current overcurrent protection enable */
#define BUS_OVERCURRENT_THRESHOLD      (20) /*!< Bus current overcurrent protection threshold,
10 timers larger than true value, 20 means 2A*/
#define BUS_OVERCURRENT_DBC      (10) /*!< Bus current overcurrent protection operation
period value in ms unit, 10 refer to 10ms */
```

- `BUS_OVERCURRENT_PROTECTION_ENABLE`，定义时打开母线电流保护功能，屏蔽则关闭母线电流保护功能。
- 宏定义 `BUS_OVERCURRENT_THRESHOLD` 设置保护电流阈值，保护电流阈值对应真实值 =  $BUS\_OVERCURRENT\_THRESHOLD / 10$ 。
- 宏定义 `BUS_OVERCURRENT_DBC` 设置保护电流判断次数，连续判断过流超过此次数上报母线过流故障。
- 母线电流若采用估计值，需在 `drive_parameters_define.h` 中打 `POWER_DCCUR_EST_ENABLE` 宏定义，使能母线电流估算功能。（注意估算的母线电流准确性取决于当前电机三相电流准确度）
- 验证母线过流保护功能时，可将保护阈值 `BUS_OVERCURRENT_THRESHOLD` 减小来提前模拟保护的发生。

### 5.2.3 过压保护

母线电压超过设定阈值，且连续达到 10 次时上报过电压故障，低于设定恢复值且连续达到 10 次时清除过电压故障并恢复。

通过以下进行过电压保护设置：

```
#define VBUS_OVERVOLTAGE_PROTECTION_ENABLE          /*!< Bus voltage overvoltage fault
protection enable */

#define OVERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE (MAX_BUS_VOLTAGE - 2) /*!<Bus voltage overvoltage fault
recovery voltage, 2 means to recover from the fault when the bus voltage is 2V lower than the overvoltage point */

#define VBUS_OVERVOLTAGE_THRESHOLD (MAX_BUS_VOLTAGE * 10) /*!< Real vbus value enlarges 10
times, action threshold of overvoltage protection */

#define VBUS_OVERVOLTAGE_RECOVERY_THRESHOLD (OVERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE * 10) /*!<
Real value enlarges 10 times, action threshold of overvoltage recovery */
```

- VBUS\_OVERVOLTAGE\_PROTECTION\_ENABLE，定义时打开过电压保护功能，屏蔽则关闭过电压保护功能。
- 宏定义 VBUS\_OVERVOLTAGE\_THRESHOLD 设置过电压保护阈值，过电压保护阈值对应真实值 = VBUS\_OVERVOLTAGE\_THRESHOLD / 10。
- 宏定义 OVERVOLTAGE\_RECOVERY\_VOLTAGE 设置过电压保护恢复阈值，过电压保护恢复阈值对应真实值 = OVERVOLTAGE\_RECOVERY\_VOLTAGE / 10。
- 验证母线过压保护时，可先将外部电压源电压设置高于 VBUS\_OVERVOLTAGE\_THRESHOLD，然后 START 电机，可报母线过压故障；将电压源电压设置低于 OVERVOLTAGE\_RECOVERY\_VOLTAGE，故障标志可清零。

### 5.2.4 欠压保护

母线电压低于设定阈值，且连续达到 10 次时上报欠电压故障，高于设定恢复值且连续达到 10 次时清除欠电压故障并恢复。

通过以下进行过电压保护设置：

```
#define VBUS_UNDERVOLTAGE_PROTECTION_ENABLE          /*!< Bus voltage undervoltage fault
protection enable */

#define UNDERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE (MIN_BUS_VOLTAGE + 2) /*!<Bus voltage undervoltage fault
recovery voltage, 2 means to recover from the fault when the bus voltage is 2V higher than the undervoltage point */

#define VBUS_UNDERVOLTAGE_THRESHOLD (MIN_BUS_VOLTAGE * 10) /*!< Real vbus value enlarges 10
times, action threshold of undervoltage protection */

#define VBUS_UNDERVOLTAGE_RECOVERY_THRESHOLD (UNDERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE * 10) /*!<
Real value enlarges 10 times, action threshold of undervoltage recovery */
```

- `VBUS_UNDERVOLTAGE_PROTECTION_ENABLE`，定义时打开欠电压保护功能，屏蔽则关闭欠电压保护功能。
- 宏定义 `VBUS_UNDERVOLTAGE_THRESHOLD` 设置欠电压保护阈值，欠电压保护阈值对应真实值 = `VBUS_UNDERVOLTAGE_THRESHOLD / 10`。
- 宏定义 `UNDERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE` 设置欠电压保护恢复阈值，欠电压保护恢复阈值对应真实值 = `UNDERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE / 10`。
- 验证母线欠压保护时，可将外部电压源电压设置低于 `VBUS_UNDERVOLTAGE_THRESHOLD`，然后 `START` 电机，可报母线欠压故障；将电压源电压设置高于 `UNDERVOLTAGE_RECOVERY_VOLTAGE`，故障标志可清零。

### 5.2.5 失速保护

转速超过设定阈值或当前转速与上一次转速差值大于设定阈值，且连续达到 10 次时上报失速故障。

```
#define LOSE_SPEED_PROTECTION_ENABLE          /*!< Lose speed protection enable */
#define LOSE_SPEED_THRESHOLD      (Math_IQ(0.99)) /*!< Frequency threshold of lose speed protection */
#define LOSE_SPEED_ERR_THRESHOLD  (Math_IQ(0.1)) /*!< Frequency error threshold of lose speed protection */
#define LOSE_SPEED_DBC            (2)           /*!< Lose speed protection operation period value in ms
unit, 2 refer to 2ms */
```

- `LOSE_SPEED_PROTECTION_ENABLE`，定义时打开失速保护功能，屏蔽则关闭失速保护功能。
- 宏定义 `LOSE_SPEED_THRESHOLD` 设置失速保护阈值，失速保护阈值电气频率对应真实值 =  $(0.99 * \text{BASE\_FREQ})$ 。
- 宏定义 `LOSE_SPEED_ERR_THRESHOLD` 设置失速保护速度差值阈值，差值大小对应转速加速度，与失速保护接口调用周期相关。
- 宏定义 `LOSE_SPEED_DBC` 设置失速保护判断次数，连续判断超过此次数上报失速故障。
- 验证失速保护时可将 `LOSE_SPEED_THRESHOLD` 设置为较小值，提前模拟失速保护的发生。

### 5.2.6 零速保护

转速低于设定阈值，且连续达到 2 次时上报零速故障。

```
#define ZERO_SPEED_PROTECTION_ENABLE          /*!< Zero speed protection enable */
#define ZERO_SPEED_THRESHOLD      (Math_IQ(0.07)) /*!< Zero speed protection frequency threshold */
#define ZERO_SPEED_DBC            (2)           /*!< Zero speed protection operation period value in
ms unit, 2 refer to 2ms */
```

- ZERO\_SPEED\_PROTECTION\_ENABLE，定义时打开零速保护功能，屏蔽则关闭零速保护功能。
- 宏定义 ZERO\_SPEED\_THRESHOLD 设置零速保护阈值，零速保护阈值电气频率对应真实值 =  $(0.07 * \text{BASE\_FREQ})$ 。
- 宏定义 ZERO\_SPEED\_DBC 设置零速保护判断次数，连续判断超过此次数上报失速故障。

### 5.2.7 有感堵转保护

转速低于设定阈值且矢量电流大小超过设定保护阈值，连续达到设定时间，上报堵转保护故障。

```
#define STALL_PROTECTION_SENSOR_ENABLE      /*!< Hall sensor control stall protection enable */
#define STALL_SPD_THRESHOLD                 (20)      /*!< Stall judge speed, true */
#define STALL_CUR_THRESHOLD                 (Math_IQ(0.3)) /*!< Stall judge current, pu, refer to current base value*/
#define STALL_DBC                          (500)     /*!< Hall sensor stall protection operation period value, 500 refer to 500ms
```

- STALL\_PROTECT\_SENSOR\_ENABLE，定义时打开（有位置传感器）堵转保护功能，屏蔽则关闭堵转保护功能。
- 宏定义 STALL\_SPD\_THRESHOLD 设置堵转保护转速阈值，堵转保护转速阈值对应 RPM 为单位的转速值。
- STALL\_CUR\_THRESHOLD 设置堵转保护电流阈值，保护电流阈值对应真实值 =  $0.3 * \text{MAX\_CURRENT}$ （在 motor\_parameters\_define.h 中定义）。
- 宏定义 STALL\_DBC 设置堵转保护判断时间，以 ms 为单位（取决于堵转保护调用周期）。

### 5.2.8 无感堵转保护

通过反电动势幅值与当前估算转速的比例超过设定阈值判断无传感模式下发生堵转情况。

```
#define STALL_PROTECTION_SENSORLESS_ENABLE /*!< Sensorless control stall protection enable */
#define BEMF_CONSISTENT_THRESHOLD         (5)      /*!< Maximum accepted back-EMF on speed estimates (percentage) */
#define BEMF_DBC                          (500)     /*!< Sensorless stall protection operation period value on back-EMF method in ms unit, 500 refer to 500ms*/
```

- STALL\_PROTECT\_SENSORLESS\_ENABLE，定义时打开（无位置传感器）堵转保护功能，屏蔽则关闭堵转保护功能。
- 宏定义 BEMF\_CONSISTENT\_THRESHOLD 设置反电动势幅值方式保护判断阈值，需实际调试确认，从 1 开始往上设置。
- 宏定义 BEMF\_DBC 设置堵转保护反电动势判断时间，以 ms 为单位（取决于堵转保护调用周期）。

### 5.2.9 相电流中点检测保护

上电初始化阶段调用，获取三相电流中点偏移大小，超过 5%中点偏移电压，根据三相中点电压情况，上报相电流中点故障，分别为 PHASEA\_CURRENT\_MIDPOINT\_FAILURE、PHASEB\_CURRENT\_MIDPOINT\_FAILURE、PHASEC\_CURRENT\_MIDPOINT\_FAILURE。

### 5.2.10 缺相保护

电机运行状态下，当相电流小于设定缺相判断阈值，连续达到设定次数时，根据三相中点电流情况，上报缺相故障，分别为 LOSE\_PHASEA\_FAILURE、LOSE\_PHASEB\_FAILURE、LOSE\_PHASEC\_FAILURE。

```
#define LOSE_PHASE_PROTECTION_ENABLE          /*!< Lose phase protection enable */

#define LOSE_PHASE_THRESHOLD  (Math_IQ(0.055)) /*!< Lose phase protection operation threshold value, refer
to current base value */

#define LOSE_PHASE_DBC        (20) /*!< Lose phase protection operation period value, 20 refer to 20ms */

#define LOSE_PHASE_ADD_CNT  (6) /*!< Lose phase protection operation addition counter, 6 means 2^6 = 64 */

#define LOSE_PHASE_JUDGE_THRESHOLD  (Math_IQ(3.0)) /*!< Lose phase protection operation (Imax / Imin)
ratio judge threshold value */
```

- LOSE\_PHASE\_PROTECTION\_ENABLE，定义时打开动态缺相保护功能，屏蔽则关闭缺相保护功能。
- 宏定义 LOSE\_PHASE\_THRESHOLD 设置缺相电流保护阈值，缺相保护电流阈值对应真实值 = 0.055\* MAX\_CURRENT(在 motor\_parameters\_define.h 中定义)。
- 宏定义 LOSE\_PHASE\_DBC 设置保护电流判断次数，连续判断过流超过此次数上报过流故障。
- 宏定义 LOSE\_PHASE\_ADD\_CNT 设置保护电流判断采样点数。
- 宏定义 LOSE\_PHASE\_JUDGE\_THRESHOLD 设置过流保护最大/最小电流比值。
- 验证缺相保护功能时，在电机运行过程中拔掉某一相电机线，可上报某相缺相故障。

### 5.2.11 相短路保护

电机运行状态下，当电机转速高于判断阈值时，判断两相之间电流偏差大小，小于设定阈值且连续达到设定次数时，根据三相中点电流情况，上报相线短路故障。

```
#define PHASE_SHORT_PROTECTION_ENABLE          /*!< Phase current short-circuit protection enable */

#define SPEED_THRESHOLD_SHORT  (Math_IQ(1.0 / BASE_FREQ)) /*!< Phase current short-circuit protection speed
judge threshold value, refer to base frequency */

#define JUDGE_THRESHOLD_SHORT  (5) /*!< Phase current short-circuit protection current judge threshold value */

#define IPHASE_SHORT_DBC        (10) /*!< Phase current short-circuit protection operation period value in ms unit, 10
refer to 10ms */
```

- 宏定义 SPEED\_THRESHOLD\_SHORT 设置相线短路保护转速阈值，转速高于此值进行相线电流阈值判断。
- 宏定义 JUDGE\_THRESHOLD\_SHORT 设置相线短路电流保护阈值，两相电流差值小于此值判断为相线短路故障。
- 宏定义 IPHASE\_SHORT\_DBC 设置相线保护电流判断次数，连续判断大于此次数上报相线短路故障。

### 5.3 电机保护调用主函数

双电机保护的主函数分别为 Motor\_Protection()及 Motor\_ProtectionMotor2(), 在 1ms 周期中执行。函数内部会进行分频得到 10ms loop 和 100ms loop, 用于执行周期较慢的相关保护。

保护信息通过变量 g\_protector.ErrFlag.all 或 g\_protector\_M2.ErrFlag.all 查询。以电机 1 对应变量 g\_protector.ErrFlag.all 为例, 当无任何故障发生时, g\_protector.ErrFlag.all 为零; 当发生故障后, 相应保护位会被置位。通过判断 g\_protector.ErrFlag.all 对应 16 进制数的置位情况可获知故障发生情况。例如:

$g\_protector.ErrFlag.all = 17$  (10 进制) =  $0x11$  (16 进制) =  $b10001$  (二进制)

第 0 位和第 4 位被置位, 查询故障 ID 可知发生了过流保护和欠压保护。

## 6 调试

双电机 Motor\_App 的调试与单电机一致，两个电机的配置参数及 API、变量等均已解耦，以下以电机 1 的配置参数和变量为例，说明各控制模式下的调试过程。

### 6.1 BLDC 调试

#### 6.1.1 带霍尔传感器 BLDC 调试

除 Motor\_App 中外设初始化调用存在一定差异外，AC7840x 系列 BLDC 控制算法与 AC780x、AC781x 系列控制算法一脉相承。因此，双电机 Motor\_App 中，电机 1 的带霍尔传感器 BLDC 调试可参考《ATC\_AC78xx\_Motor\_Debug\_Guide\_CH》中 4.1 节所述。调试前，双电机的传感器类型选择端子（电机 1：JP11/12/13，电机 2：JP14/15/16）需保证跳帽均接左侧两个引脚，短接 pin1 和 pin2。调试单个电机时注意 1.6.2 节中所述电机选择按键设置，调试电机 1 时按下左侧锁存开关，置电机 1 为运行调试有效状态；同时保证右侧锁存开关为弹起状态，屏蔽电机 2 运行调试。调试电机 2 时，则同理需要按下右侧锁存开关，置电机 2 为运行调试有效状态；同时保证左侧锁存开关为弹起状态，屏蔽电机 1 运行调试。

#### 6.1.2 无感 BLDC 调试

对于无传感器的 BLDC 电机，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。AC7840x 双电机板 ACMP 比较器通道有限，且双电机共 8 个模拟通道电压之间比较时序难以控制；因此采用外置硬件比较器方案，直接将双电机各自的三相反电动势与中性点比较结果输出至 MCU 的 GPIO 口，在相应的 GPIO 口读取外部比较器结果来检测反电动势过零点。同时反电动势越大比较器输出结果越准确，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 值由电机转速计算而来。

调试前，双电机的传感器类型选择端子（电机 1：JP11/12/13，电机 2：JP14/15/16）需保证跳帽均接右侧两个引脚，短接 pin2 和 pin3。调试中电机选择按键的设置可参考 6.1.1 节所述。电机 1 无感 BLDC 调试流程如图 6-1 所示。

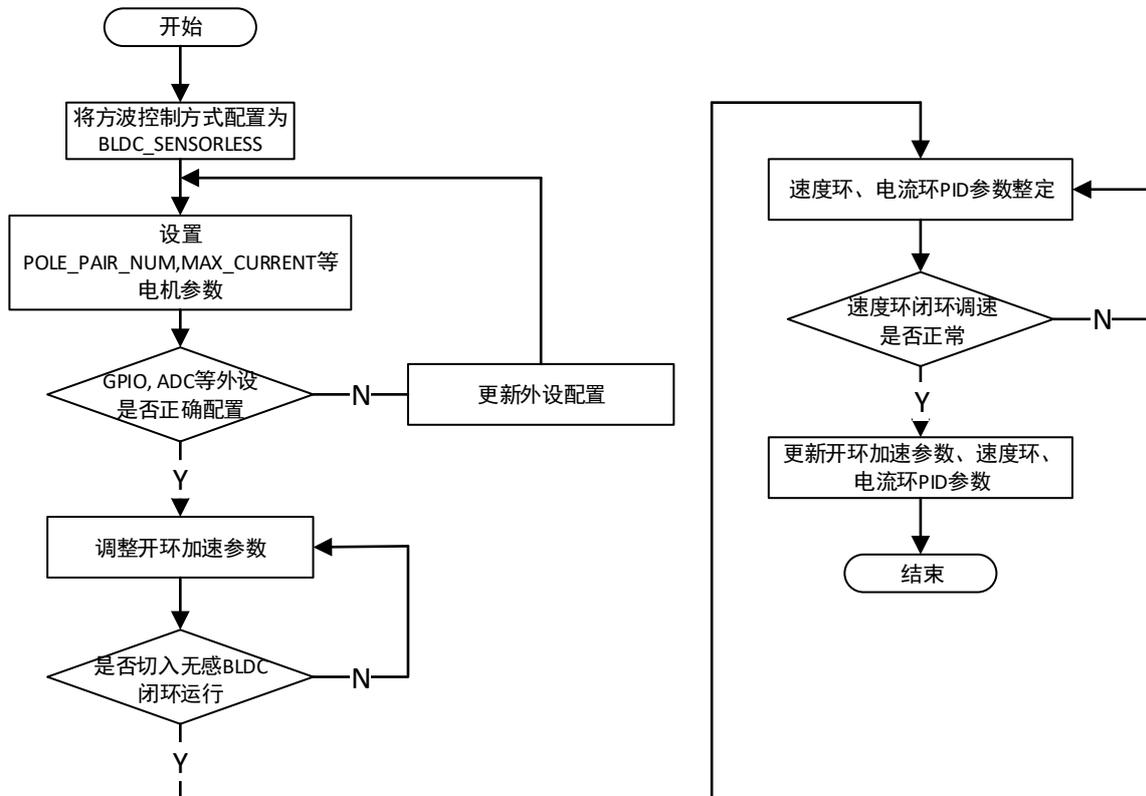


图 6-1 无感 BLDC 调试流程图

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 GPIO，CTU，ADC 等外设是否正确配置。

GPIO 口用于检测反电动势过零点并触发换相，因此需检查调试电机反电动势过零比较结果 GPIO 口配置，确保相应的 GPIO 口与电机 UVW 三相反电动势对应；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，经常存在电机运行低速稳定性难题。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外部比较器检测最大电压范围，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。

## 6.2 FOC 调试

除 `Motor_App` 中外设初始化调用存在一定差异外，AC7840x 系列 FOC 控制算法与 AC780x、AC781x 系列控制算法一脉相承。因此，双电机 `Motor_App` 中，电机 1 的 FOC 调试可参考《ATC\_AC78xx\_Motor\_Debug\_Guide\_CH》中第 4 章所述。调试前双电机的传感器类型选择端子配置与电机选择按键设置可参考 6.1.1 节所述。

## 7 缩略语

表 7-1 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
ADC	Analog-to-Digital Converter	模拟数字转换器
FOC	Field Oriented Control	磁场定向控制
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制波

## 8 参考资料

可参考得资源有：

表 8-1 相关资源简介

资源类型	资源名	资源简介
文档	ATC_AC78xx_Motor_App_Development_Guide_CH	AC78xx 电机 App 介绍文档
文档	ATC_AC78xx_Motor_Debug_Guide_CH	AC78xx 电机 App 调试文档
文档	ATC_AC78xx_Motor_Lib_Development_Guide_CH	AC78xx 电机算法库说明文档
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
文档	AC7840X_DOUBLE_MOTOR_DEMO_V1_1	AC7840x 双电机板 PCB 原理图