



电机控制算法样例参考手册

## 单电阻采样 FOC 算法

文档版本 01

发布日期 2024-04-16

版权所有 © 海思技术有限公司2024。保留一切权利。

非经本公司书面许可，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本文档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

## 商标声明



**HISILICON**、海思和其他海思商标均为海思技术有限公司的商标。

本文档提及的其他所有商标或注册商标，由各自的所有人拥有。

## 注意

您购买的产品、服务或特性等应受海思公司商业合同和条款的约束，本文档中描述的全部或部分产品、服务或特性可能不在您的购买或使用范围之内。除非合同另有约定，海思公司对本文档内容不做任何明示或默示的声明或保证。

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。除非另有约定，本文档仅作为使用指导，本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何明示或暗示的担保。

## 海思技术有限公司

地址：上海市青浦区虹桥港路2号101室 邮编：201721

网址：<https://www.hisilicon.com/cn/>

客户服务邮箱：[support@hisilicon.com](mailto:support@hisilicon.com)



# 前言

## 概述






本文档详细描述了基于电机控制算法库control\_library的FOC（Field Oriented Control）算法样例，该算法样例实现了基于单电阻电流采样的无位置传感器FOC电机控制算法。

## 读者对象

- 软件工程师

## 符号约定

在本文中可能出现下列标志，它们所代表的含义如下。

符号	说明
 危险	表示如不避免则将会导致死亡或严重伤害的具有高等级风险的危害。
 警告	表示如不避免则可能导致死亡或严重伤害的具有中等级风险的危害。
 注意	表示如不避免则可能导致轻微或中度伤害的具有低等级风险的危害。
 须知	用于传递设备或环境安全警示信息。如不避免则可能会导致设备损坏、数据丢失、设备性能降低或其它不可预知的结果。 “须知”不涉及人身伤害。
 说明	对正文中重点信息的补充说明。 “说明”不是安全警示信息，不涉及人身、设备及环境伤害信息。



## 修订记录

修订日期	版本	修订说明
2023-06-28	00B01	第1次临时版本发布。
2023-10-13	00B02	第2次临时版本发布。 修改相关函数路径； 刷新 <a href="#">软件目录安排</a> 章节文件目录结构图； 修改入口函数变量名称。
2024-04-16	01	第1次正式版本发布。 修改 <a href="#">电控算法执行流程</a> 3章节的内容。



# 目录

前言..... i

1 系统概述..... 1

    1.1 软件目录安排..... 2

    1.2 程序模块调用..... 2

2 电控算法样例..... 3

    2.1 电控算法功能模块..... 3

        2.1.1 电机控制接口..... 3

        2.1.2 电流采样..... 3

        2.1.3 电压调制..... 5

        2.1.4 状态机..... 6

        2.1.5 电机启动流程..... 6

        2.1.6 保护流程..... 8

    2.2 电控算法原理框图..... 8

    2.3 电控算法执行流程..... 8

        2.3.1 main 函数流程..... 8

        2.3.2 载波中断流程..... 10

        2.3.3 定时器中断流程..... 11

        2.3.4 电流过流保护中断..... 12

A 缩略语..... 14



# 插图目录

图 1-1 FOC 样例目录结构..... 2

图 1-2 样例模块框架图..... 2

图 2-1 单电阻采样电路原理图..... 4

图 2-2 电流采样时刻示意图.....4

图 2-3 非观测区域示意图..... 5

图 2-4 不同开关状态与其对应的相电压值.....6

图 2-5 电机运行状态机示意图..... 6

图 2-6 基于 I-f 控制方法的电机启动控制.....7

图 2-7 电控算法执行框图..... 8

图 2-8 主循环控制流程..... 9

图 2-9 电流环中断处理流程..... 11

图 2-10 500us 定时处理流程..... 12

图 2-11 过流中断处理流程..... 13



# 表格目录

表 2-1 电机控制 HMI 配置参数信息.....3

表 2-2 不同开关状态下的电流采样值.....5

表 2-3 I-f 控制的参数信息.....7

表 2-4 保护过程的参数信息.....8

表 A-1 缩略语.....14



# 1 系统概述

IDE生成的电机例程工程包括三个部分：各个外设配置接口对应的驱动库、电机控制算法依赖的算法库以及基于上述两者实现的单电阻无感FOC控制算法例程。这三部分在工程中文件目录安排如[图1-1](#)所示。

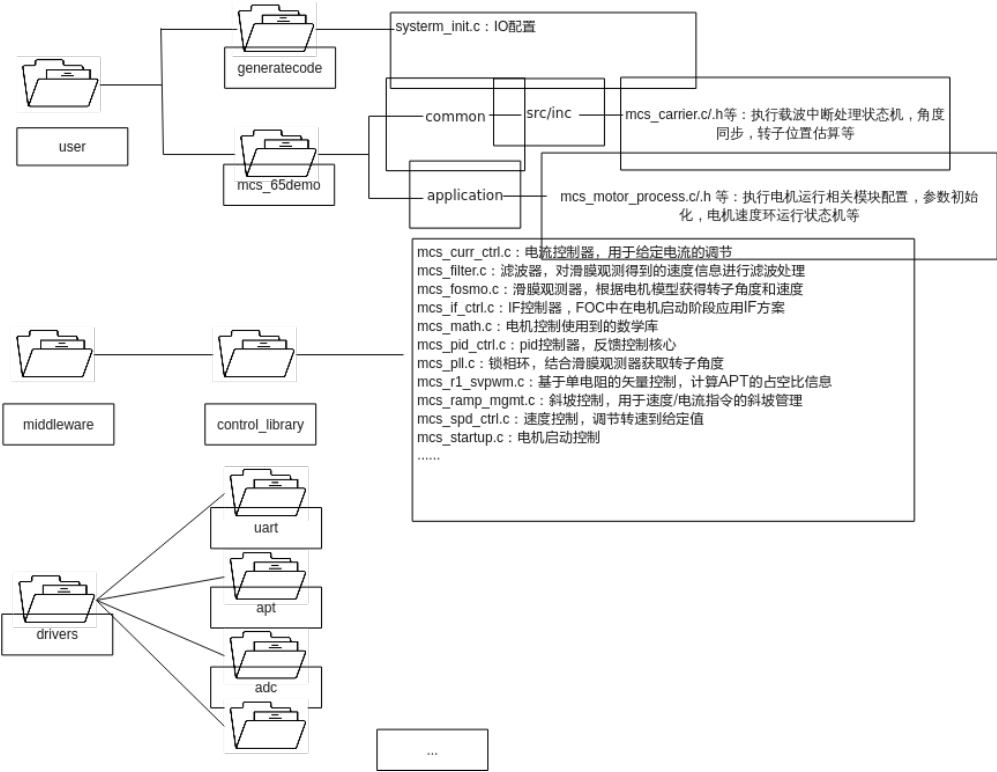
- 驱动库对应drivers目录，该目录按照MCU架构配置各外设接口，如ADC、APT（Advanced PWM Timer）、UART等模块，其具体实现和应用可以参考文档《SolarA<sup>2</sup> 驱动程序说明》。
- middleware/control\_library目录存放FOC电机控制应用用到的各个核心算法实现，包括观测器、IF启动和电流环和速度环的控制器等。
- user目录则是本例程的实现主体，其中generatecode目录是例程应用到的外设的初始化配置部分，user/mcs\_65demo/目录是电机控制算法例程的完整实现。





1.1 软件目录安排

图 1-1 FOC 样例目录结构



1.2 程序模块调用

工程采用无感FOC控制算法驱动电机，其中用到的板载资源有APT、ADC、UART、GPIO、TIMER等，涉及到的算法库接口函数如图1-2所示。

图 1-2 样例模块框架图





# 2 电控算法样例

本节从功能模块、静态视图等多个维度详细剖析FOC电控样例的功能与执行流程。

## 2.1 电控算法功能模块

### 2.1.1 电机控制接口

在main函数中通过SysCmdStartSet()函数设置电机状态值对电机进行启动，可手动设置电机目标转速对电机进行调速，本例程选用杰美康42JSF630AS-1000型号电机作为被控对象，其额定转速为3000RPM（Revolutions Per Minute）。

表 2-1 电机控制 HMI 配置参数信息

条目	参考	备注
电机启动动作	0: 电机停止; 1: 电机启动。	-
额定转速	3000 RPM。	杰美康42JSF630AS-1000电机。

### 2.1.2 电流采样

在FOC算法中，无论是有感FOC还是无感FOC，电流采样在反馈环节都是相当重要的一部分，通常有三种采样方案：单电阻采样、双电阻采样和三电阻采样。关系到整体系统的成本，算法的复杂程度和最终运行的效果，因此需要根据项目的具体需求进行选择。

本例程中的电流采样基于内置运放的单电阻电流采样。与三电阻或双电阻电流采样相比，单电阻采样成本低，只需要一个采样电阻和一个运算放大电路即可，但是算法相对复杂。在采用单电阻采样的电机驱动系统中，不同电压矢量作用下，母线电流与相电流关系如图2-1所示。例如，当逆变器输出 $V_1(100)$ 时， $i_a=i_{dc}$ ；逆变器输出 $V_2(110)$ 时， $i_c=-i_{dc}$ 。

当逆变器处于不同开关状态时，直流母线上流过特定相的电流，因此，在一个开关周期内两个特定时刻对母线电流进行采样，得到电机两相电流，进而通过基尔霍夫电流

定律计算出第三相电流。然而，由于ADC采样过程需要一定的建立和转换时间，单电阻采样存在着一些非观测区域。在非观测区域，无法准确采样相电流，需要对其进行移相处理。

图 2-1 单电阻采样电路原理图

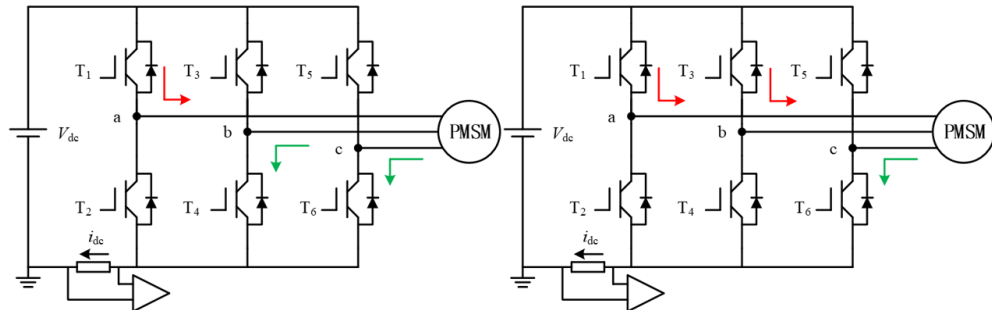
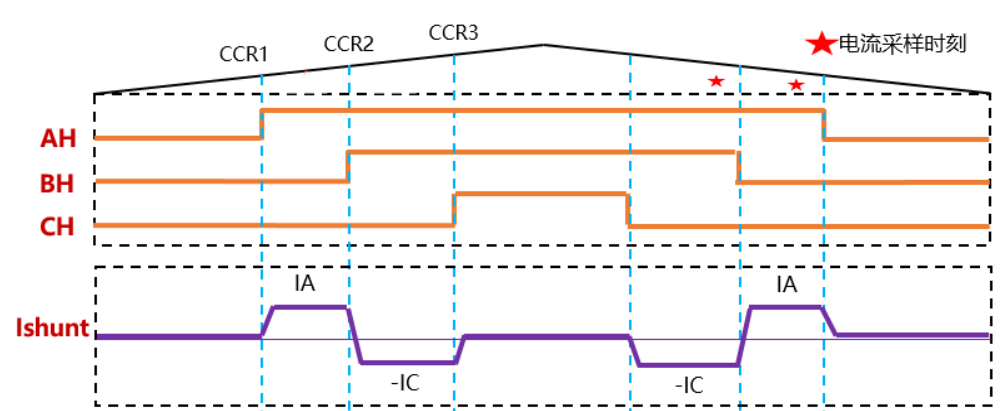


图 2-2 电流采样时刻示意图

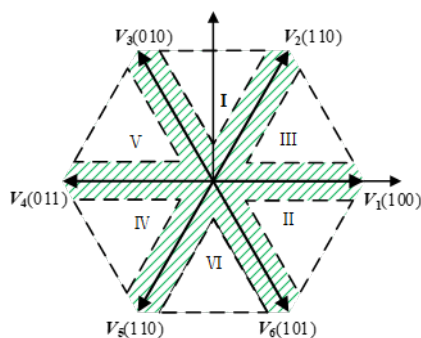


在单电阻采样中，ADC采样时刻和采样时间直接影响电流重构的准确性。由于寄生参数的影响，功率开关管在开通关断时刻电流会产生振荡，需要等待电流稳定后再进行采样，电流振荡时间为 $T_{set}$ ；ADC采样不是瞬间完成，需要一定时间完成采样保持，采样时间为 $T_{conv}$ ；为避免上下管直通，需要设置一定的死区时间，死区时间为 $T_d$ 。因此，最小采样窗口可以表示为 $T_{min} = T_{set} + T_{conv} + T_d$ 。当任一有效矢量作用时间小于 $T_{min}$ 时，无法进行相电流重构，此时参考电压矢量所在区域称为非观测区域。非观测区域可以分为两部分：

- 低调制比区域：当电机低速运行时，参考电压矢量幅值很小，一个PWM周期内两个有效电压矢量作用时间均小于 $T_{min}$ ，导致两相电流均无法正常采样。
- 扇区边界区域：当参考电压矢量位于扇区边界附近时，必然有一个有效电压矢量作用时间较短，当其作用时间小于 $T_{min}$ 时，对应相电流无法正常采样。

非观测区域如图2-3所示。

图 2-3 非观测区域示意图



不同的开关状态下，单电阻采样的电流值如表2-2所示。

表 2-2 不同开关状态下的电流采样值

序号	电压矢量	AH	BH	CH	Ishunt
0	U0	0	0	0	0
1	U1	0	0	1	Ic
2	U2	0	1	0	Ib
3	U3	0	1	1	-Ia
4	U4	1	0	0	Ia
5	U5	1	0	1	-Ib
6	U6	1	1	0	-Ic
7	U7	1	1	1	0

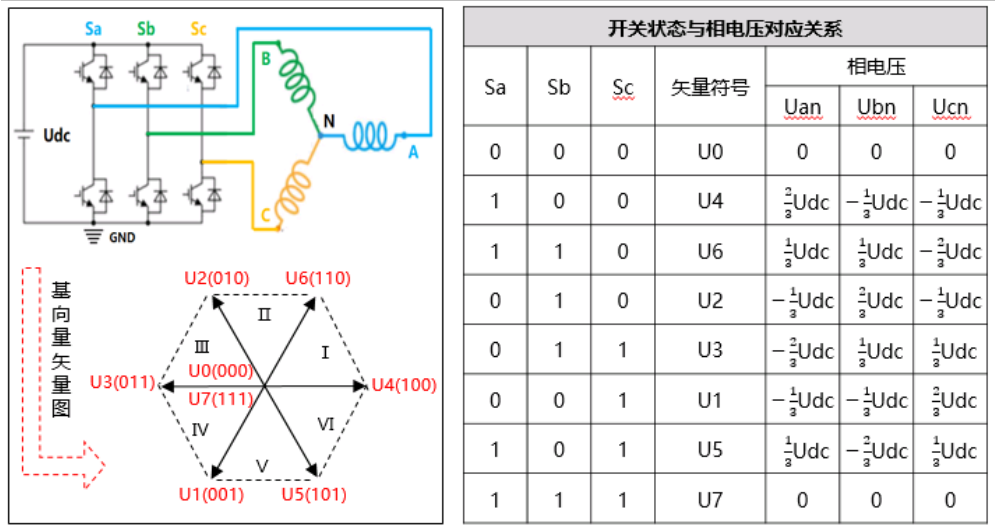
## 2.1.3 电压调制

本样例使用SVPWM作为调制方式，它由三相逆变器的六个功率开关元件组成的特定开关模式产生的脉宽调制波，能够使输出电流尽可能接近于理想的正弦波形。SVPWM的理论基础是平均值等效原理，即在一个开关周期内通过对基本电压矢量加以组合，使其平均值与给定电压矢量相等。在某个时刻，电压矢量旋转到某个区域中，可由组成这个区域的两个相邻的非零矢量和零矢量在时间上的不同组合来得到。两个矢量的作用时间在一个采样周期内分多次施加，从而控制各个电压矢量的作用时间，使电压空间矢量接近按圆路径旋转。

对于逆变器桥臂的状态，定义函数 $S_x$  ( $x=a, b, c$ ) ( $S_x=1$ : 上桥臂导通;  $S_x=0$ : 下桥臂导通)，则三相逆变器的三组桥臂 ( $S_a, S_b, S_c$ ) 共有八种组合，如图2-4所示，包括6个非零矢量  $U1(001)$ 、 $U2(010)$ 、 $U3(011)$ 、 $U4(100)$ 、 $U5(101)$ 、 $U6(110)$ 、和两个零矢量  $U0(000)$ 、 $U7(111)$ ，使用这8个空间电压矢量作为基向量就可以合成反Park转换后的 $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 的矢量电压。



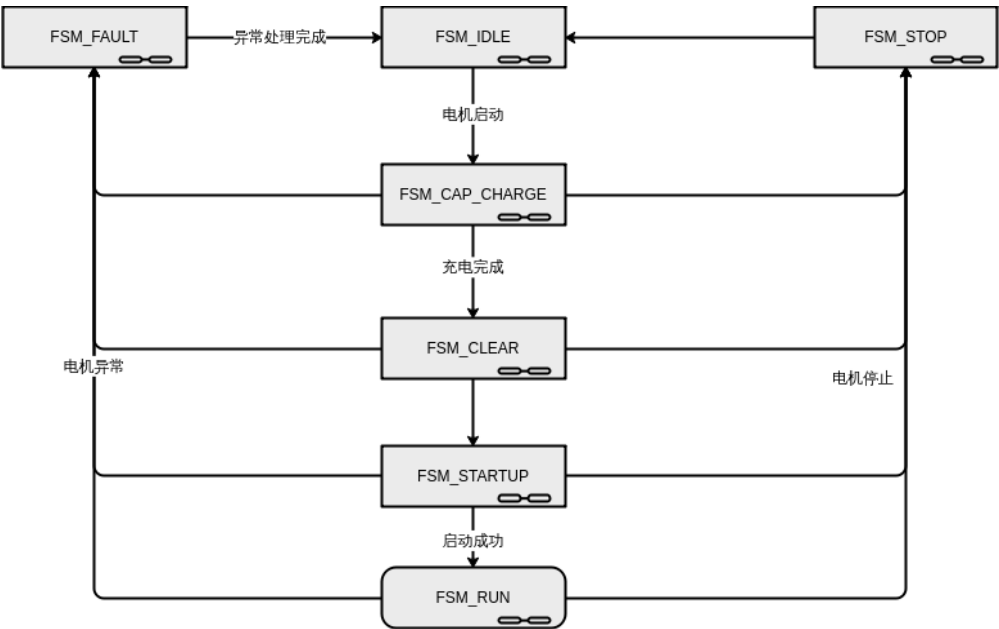
图 2-4 不同开关状态与其对应的相电压值



2.1.4 状态机

电机状态机运行在定时器1中断回调函数中，每500us进行一次状态轮询，其结构示意图如图2-5所示，包含FSM\_IDLE、FSM\_CAP\_CHARGE、FSM\_CLEAR、FSM\_STARTUP、FSM\_RUN、FSM\_STOP、FSM\_FAULT七种状态，通过状态机轮询的方式可实现电机从静止到启动、从运行到异常的各种状态监视。状态机的流程实现函数为TSK\_SystickIsr()。

图 2-5 电机运行状态机示意图



2.1.5 电机启动流程

在无位置传感器的矢量控制中，当电机处于静止状态时，电机转子位置未知，无法直接进行FOC控制，启动过程中需要采取一定的策略以获得转子位置切入闭环控制。本



样例使用IF控制方法，其分为两个阶段，首先在q轴逐步注入电流到启动目标值，然后保持q轴电流不变将电机速度开环强拖起来，当电机开环速度达到目标值后切入速度闭环，该切换值以电机反电动势能稳定维持为准。

图 2-6 基于 I-f 控制方法的电机启动控制

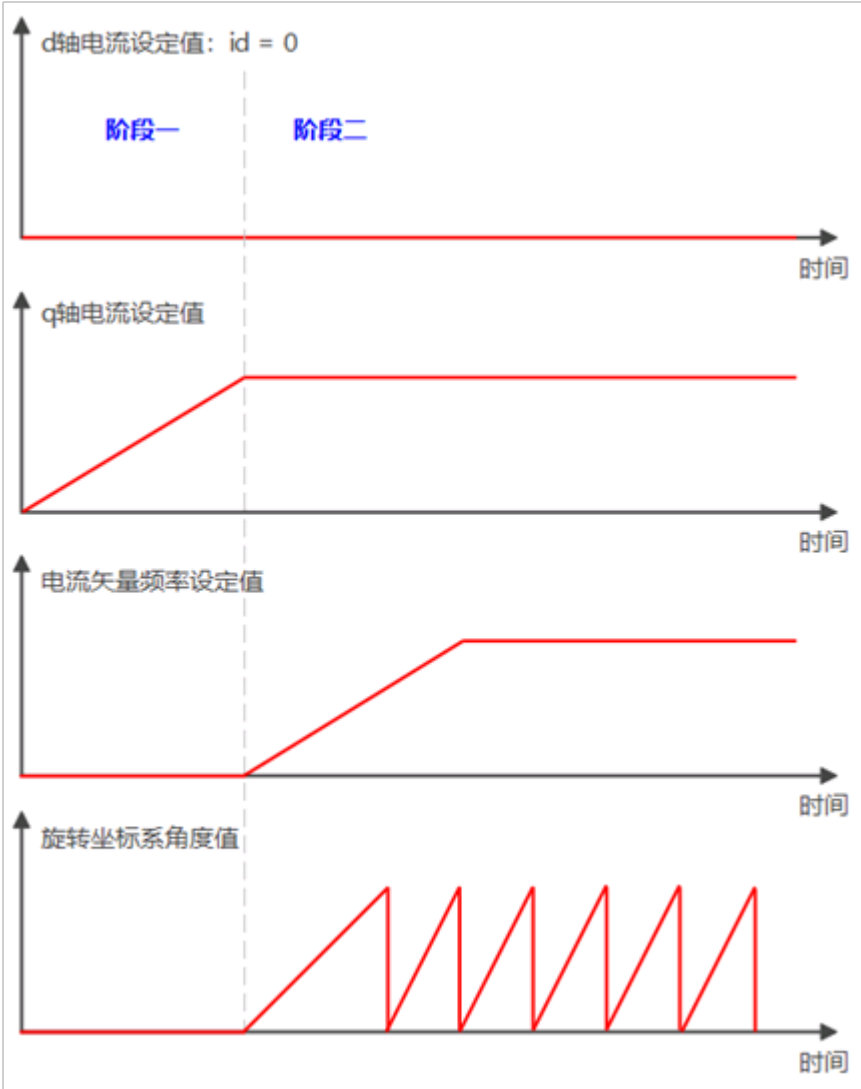


表 2-3 I-f 控制的参数信息

项目	值	单位	描述
q轴目标电流	1.0	安培（A）	q轴目标电流值。
电流频率切换开始点	51	赫兹（Hz）	速度开始切入闭环开始点。
电流频率切换结束点	52	赫兹（Hz）	速度切入闭环结束点。



2.1.6 保护流程

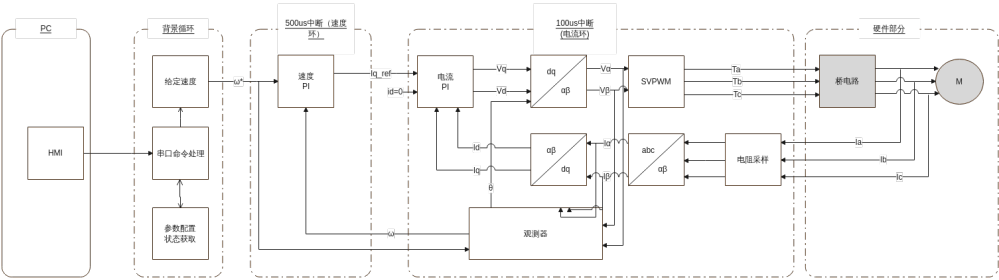
电控程序包括如下异常状态，在出现这种状况时会执行紧急制动动作，以避免硬件或者电机出现异常。[表2-4](#)列出了各个保护阈值的设定。

表 2-4 保护过程的参数信息

保护流程	设定阈值	检测频率	备注
过流保护	14.9A	硬件保护+中断处理	-
过温保护	90℃	1ms	-

2.2 电控算法原理框图

图 2-7 电控算法执行框图



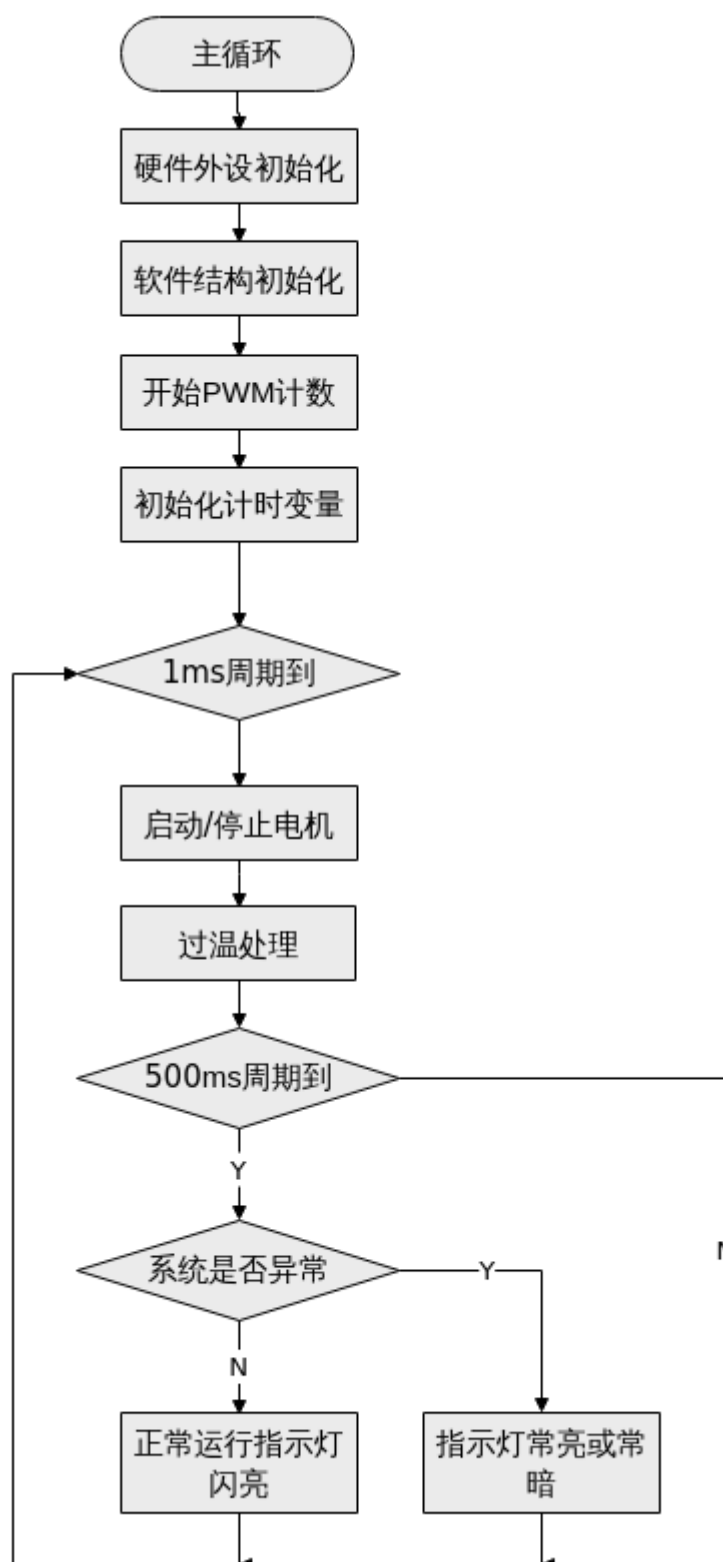
2.3 电控算法执行流程

2.3.1 main 函数流程

在main函数处理流程中进行硬件和软件的初始化，以及一些放在主循环的处理动作。这些处理动作包括和上位机的电控指令接收以及基于这些指令的电机控制动作执行、过温保护处理和电机正常运行中的LED灯指示。其执行流程如[图2-8](#)所示（入口主函数：MotorMain()）。



图 2-8 主循环控制流程





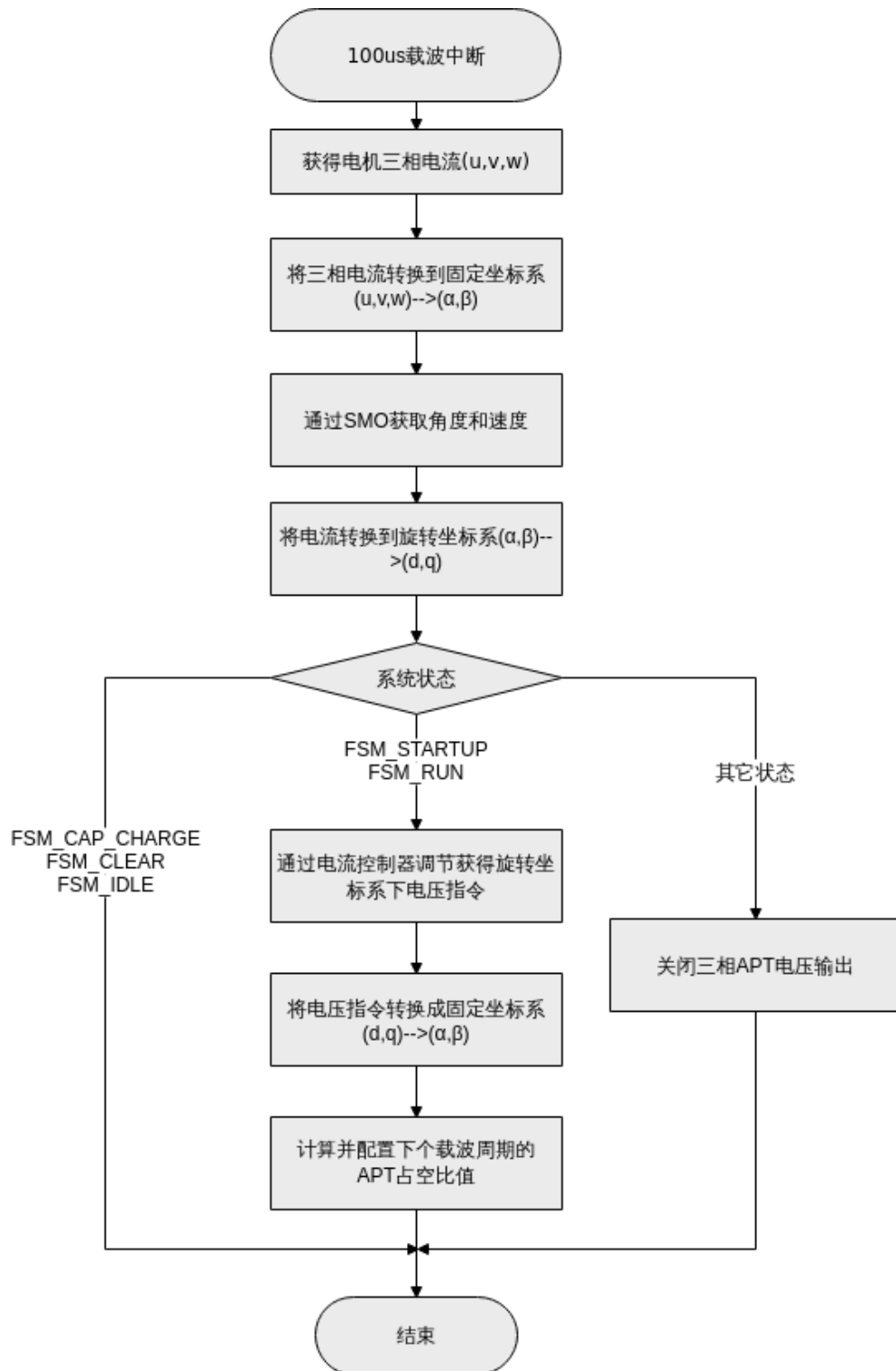


### 2.3.2 载波中断流程

载波中断函数APT3TimerCallback()通过APT初始化配置，它在每个APT载波的波谷触发中断处理，中断周期为100us。载波中断函数MCS\_CarrierProcess()是工程的主要处理流程函数之一，包含了坐标变换、滑模状态观测器、转子角度切换、电流环执行以及PWM占空比计算结果的更新等。在本函数中首先获取三相电流值进行ClarkeCalc变换，将ClarkeCalc变换之后的数据送入滑模观测器用于角度和速度值的估算以及后续的ParkCalc变换，当电机经过充电、开环强拖等步骤切换到速度闭环运行后，进行电流的PID闭环、反park和svpwm处理，最终得出需要的PWM占空比信息和采样点信息并更新到相应的执行模块中。

其流程图如[图2-9](#)所示。

图 2-9 电流环中断处理流程



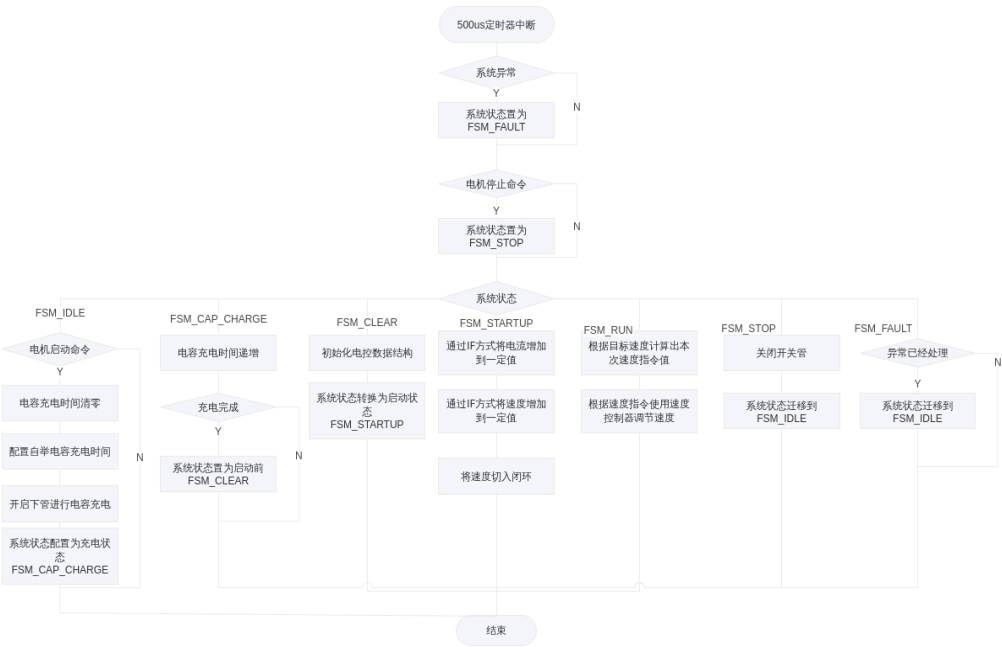
### 2.3.3 定时器中断流程

定时器中断处理函数void Timer1ITCallBack()由定时器1产生，其中断周期为500us。其中主要执行函数TSK\_SystickIsr(), 在该函数中运行电机控制状态机，包含电机启动



前的电容充电过程、电机开环启动、速度开/闭环切换以及速度闭环运行后的错误状态检测。其具体流程如图2-10所示。

图 2-10 500us 定时处理流程

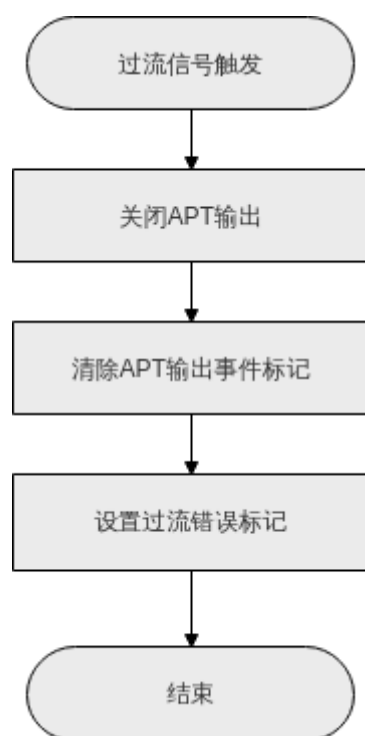


2.3.4 电流过流保护中断

过流保护中断是为了保护系统安全运行而设置，它利用功率器件的内置过流保护功能，当相电流超过一定阈值时，IPM（Intelligent Power Module）会在MCU的POE管脚上触发下降沿信号，MCU通过对该信号配置中断从而对电机控制信号进行处理以避免功率器件或系统损坏。



图 2-11 过流中断处理流程





# A 缩略语

表 A-1 缩略语

缩略语	英文	中文解释
APT	Advanced PWM Timer	高级定时器
FOC	Field Oriented Control	磁场定向控制
IPM	Intelligent Power Module	智能功率模块
MCU	Microcontroller Unit	微控制单元
RPM	Revolutions Per Minute	转每分钟