

AN0214

应用笔记

AT32 BLDC Sensorless 快速入门指南

前言

这篇应用笔记描述了如何快速使用 AT-MOTOR-EVB 电机开发板搭配 AT32 BLDC 电机库调试不同型 号无传感器的电机运转。

支持型号列表:

士持刑品	AT32F413 系列
又苻至 5	AT32F421 系列

<u>75=121;</u>

目录

1	电机	车算法概述	. 6
2	环境	准备	. 7
	2.1	硬件环境准备	7
	2.2	软件环境准备	7
3	快速	上手操作指南	11
	3.1	修改电机控制模式及参数	12
	3.2	建立连接	16
	3.3	六步方波开环控制	17
	3.4	确认电流取样点	19
	3.5	参数自动鉴定	20
	3.6	Q 轴电流调试	23
	3.7	无传感器启动方式	25
	3.8	无传感器相关参数设定	27
	3.9	速度环控制	31
	3.10	外部/软件命令控制	33
4	文档)	版本历史	35



表目录

表 1.	对应闪存存储空间 ROM 配置表8
表 2 .	宏定义设定一12
表 3 .	宏定义设定一12
表 4.	宏定义设定二12
表 5.	宏定义设定三12
表 6.	宏定义设定四12
表 7.	宏定义设定五1 2
表 8 .	宏定义设定六13
表 9.	宏定义设定七13
表 10.	宏定义设定八13
表 11.	宏定义设定九13
表 12.	宏定义设定十13
表 13.	宏定义设定十一13
表 14.	宏定义设定十二14
表 15.	宏定义设定十三14
表 16.	宏定义设定十四14
表 17.	电机参数宏定义15
表 18.	六步方波无感调整参数表27
表 19.	文档版本历史



图目录

图 1. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB
图 2. AT32F413RCT7 ROM 配置(Keil)
图 3. AT32F413RCT7 ROM 配置(AT32IDE)10
图 4. 连接操作说明10
图 5 控制模式选取开环控制1
图 6.开环控制相关参数(BLDC)1
图 7.开环控制示意图
图 8. 开环参数宏定义
图 9. 确认电流取样点信号测量位置(AT32-Motor-EVB2.0 为例) 19
图 10. 电流取样延迟时间测量波型20
图 11. 电流取样点宏定义
图 12. 电机额定电流宏定义
图 13. 电机线圈参数自动辨识2 ²
图 14. 电机线圈参数宏定义2
图 15. 电机额定电压2
图 16. 电流 PI 控制参数自整定22
图 17. 电流 PI 控制参数宏定义22
图 18. 步阶电流示意图
图 19. 控制模式选取 IQ 电流环调试 23
图 20. PID 参数以及步阶电流参数23
图 21. 调整通道监控参数(IQ 电流环调试) 24
图 22. 电流环调试波型
图 23. 电流 PI 控制参数宏定义24
图 24. 六步方波无传感器启动方式定义2
图 25. 六步方波无传感器起步方式定义
图 26. 六步方波无感启动示意图
图 27. 六步方波无传感器调试参数页面(比较器检测方法)29
图 28. 六步方波无传感器调试参数页面(ADC 检测方法) 29
图 29. 六步方波反电势调试参数示意图(ADC 检测方法) 29
图 30. PID 参数以及加速度、减速度设置

,**:17[**7]7];

图 31. 目标速度值设置	31
图 32. 调整信道监控参数(速度环调试)	31
图 33. 速度环调试波型	32
图 34. 电位器位置图(外部电压控制来源)	33
图 35. 控制来源定义值(软件控制来源(上)/外部电压控制(下))	33
图 36. 速度控制模式(外部电压控制来源)	34
图 37 转矩控制模式(外部电压控制来源)	34
图 38 软件控制来源设置目标速度	

1 电机库算法概述

- ~

这篇应用笔记使用电机库相关算法主要内容如下

目标电机:三相永磁同步电动机(直流无刷电动机) 控制模式:

■ 120°方波控制

三相 PWM 调制模式:

■ 120°导通 PWM 控制

相电流检测模式:

■ 单电阻电流检测和重构方式

初始转子位置估测模式:

■ 三相电压矢量转子初始角度估测

120°方波控制的转子位置估测模式:

- ADC 检测反电势过零点
- 比较器检测反电势过零点

无传感器 120°方波控制模式:

- 120°方波电压控制
- 转矩控制 (120°方波电流控制)
- 转速控制

自动调试功能:

- 电机线圈参数自动辨识
- 电流 PI 控制参数自整定

2 环境准备

2.1 硬件环境准备

需要准备硬件项目主要包括 PMSM(BLDC)电机、AT-Link 或第三方调试下载器以及一块电机开发控制 板 AT-MOTOR-EVB,相关硬件配置可参考 UM0011 低压电机控制开发板使用手册。

- PMSM(BLDC)电机
- 调试下载器
- 电机控制开发板: AT-MOTOR-EVB (含 AT32F413RCT7 转板)



图 1. 电机开发板 AT-MOTOR-EVB

2.2 软件环境准备

- 1) 开启 bldc_1shunt_sensorless 范例工程
- 2) 电机应用 PC 软件 ArteryMotorMonitor.exe(本软件不需安装,只需直接运行可执行程序)。
- 3) Keil 的配置需根据各个 AT32 MCU 的闪存存储大小修改 Options 中的 Read/Only Memory Areas,详细参照表 1,例: AT32F413RCT7 的闪存存储大小为 256 K 字节,则其 IROM1 的起



始位置为 0x8000000,大小为 0x3F800,其 IROM2 的起始位置为 0x803F800,大小为 0x800, AT32F413RCT7 的修改范例如图 2 所示; AT32IDE 的配置需根据各个 AT32 MCU 的闪存存储 大小修改 ld 文件如图 3 所示。

衣T. 对应内存存储工间 KOM 能直衣						
Flash size	1024K	512K	256K			
IROM1(adress)	0x8000000	0x8000000	0x8000000			
IROM1(size)	0xFF800	0x7F800	0x3F800			
IROM2(adress)	0x80FF800	0x807F800	0x803F800			
IROM2(size)	0x800	0x800	0x800			

- 表 1	对应闪左左储空间	ROM	配署表
1X I.	<u> </u>	ROW	癿且巜

Flash size	128K	64K	32K	16K
IROM1(adress)	0x8000000	0x8000000	0x8000000	0x8000000
IROM1(size)	0x1FC00	0x0FC00	0x07C00	0x03C00
IROM2(adress)	0x801FC00	0x800FC00	0x8007C00	0x8003C00
IROM2(size)	0x400	0x400	0x400	0x400

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

🔣 Optio	ns for Targe	et 'demo'							×
Device	Target Ou	tput Listin	g User	C/C++ (AC6)	Asm	Linker	r Debug I	Jtilities	
Artery Tek	-AT32F413F	RCT7	Xtal (MHz):	undefined>	-Code (ARM (èeneration Compiler:	Use defau	lt compiler ver	sion 6 💌
Operating	system:	lone		T	🔽 U:	e MicroLI	B 🔲 Big End	dian	
System V	iewer File:				Floatin	g Point Ha	ardware: Sing	le Precision	-
AT32F4	13xx_v2.svd								
Use	Custom File								
Read/0	Only Memory	Areas	~		Read/	Write Mem	ory Areas	~	
default	off-chip	Start	Size	Startup	default	off-chip	Start	Size	Nolnit
	ROM1:		J	0		RAM1:			
	ROM2:			0		RAM2:			
	ROM3:			- C		RAM3:			
	on-chip					on-chip	,		
	IROM1:	8000000	0x3F800	œ	◄	IRAM1:	0x20000000	0x8000	
	IROM2:	803F800	0×800	C		IRAM2:			
			OK	Can	cel	De	faults		Help

图 2. AT32F413RCT7 ROM 配置(Keil)



Scatter	Device Targ	et Output Listing User C/C++ (AC6) Asm Linker Debug Utilities ory Layout from Target Dialog X/O Base: RW Sections Position Independent R/O Base: 0x08000000 RO Sections Position Independent R/W Base 0x20000000 Search Standard Libraries disable Warnings:	
Misc controls Linker control string -cpu=Cortex-M4.fp.sp *.o -library_type=microlib -strict -scatter ".\Objects\bldc_1shunt_sensorless_COMP.sct"	Scatter File	Edit	
Linker -cpu=Cortex-M4.fp.sp *.o control string -library_type=microlib -strict -scatter ".\Objects\bldc_1shunt_sensorless_COMP.sct"	Misc controls	<u> </u>	
	Linker control string	cpu=Cortex-M4.fp.sp *.o library_type=microlibstrictscatter ".\Objects\bldc_1shunt_sensorless_COMP.sct"	



图 3. AT32F413RCT7 ROM 配置(AT32IDE)

```
AT32F413xC_FLASH.Id X
 25_estack = 0x20008000;
                            /* end of RAM */
 26
 27 /* Generate a link error if heap and stack don't fit into RAM */
 28 _Min_Heap_Size = 0x200; /* required amount of heap
                                                             */
 29 Min_Stack_Size = 0x400; /* required amount of stack */
 30
 31 /* Specify the memory areas */
 32 MEMORY
 33 {
 34 FLASH (rx)
                 : ORIGIN = 0x08000000, LENGTH = 0x3F800
 35 MC_DATA (r)
                    : ORIGIN = 0x0803F800, LENGTH = 0x800
                    : ORIGIN = 0x20000000, LENGTH = 32K
 36 RAM (xrw)
 37 }
 38
 39 /* Define output sections */
 40 SECTIONS
 41 {
     /* The startup code goes first into FLASH */
 42
     .isr vector :
 43
 44
     {
 45
        = ALIGN(4);
       KEEP(*(.isr_vector)) /* Startup code */
 46
 47
        . = ALIGN(4);
     } >FLASH
 48
 49
 50
      .mc data :
 51
     {
       . = ALIGN(4);
 52
       . = ORIGIN(MC_DATA);
 53
 54
        MC VectStoreAddr1 = .;
        *(.MC_VectStoreAddr1);
 55
 56
        . = ALIGN(4);
        . = ORIGIN(MC_DATA) + 800;
 57
 58
        MC VectStoreAddr2 = .;
        *(.MC_VectStoreAddr2);
 59
 60
        = ALIGN(4);
 61
      } >MC DATA
 62
     /* The program code and other data goes into FLASH */
 63
 64
      .text :
 65
     {
 66
        . = ALIGN(4);
       *(.text)
 67
                           /* .text sections (code) */
       *(.text*)
                           /* .text* sections (code) */
 68
 69
        *(.glue_7)
                           /* glue arm to thumb code */
 70
        *(.glue_7t)
                           /* glue thumb to arm code */
 71
        *(.eh_frame)
 72
```

AT32 BLDC Sensorless 快速入门指南

3 快速上手操作指南

BLDC 六步方波无感控制调试流程如下:

步骤 1. 根据电机参数以及应用修改电机控制模式及参数(参考章节 3.1)

步骤 2. 与 UI 电机控制软件建立连接(参考章节 3.2)

步骤 3. 使用开环控制确认电机是否可正常运转(参考章节 3.3)

步骤 4. 电流环控制参数调整

(如不需要电流环,在步骤 1.修改电机控制模式下开启宏定义 WITHOUT_CURRENT_CTRL,并略过此步骤 4)

STEP 1 - 用示波器确认电流取样点(参考章节 3.4)

STEP 2 - 电机线圈参数自动鉴定(参考章节 3.5)

STEP 3 - 电流 PI 控制参数自整定(参考章节 3.5)

STEP 4 - IQ tune 微调电流环 Kp Ki 参数(参考章节 3.6)

步骤 5. 无感控制参数设置

STEP 1 - 设定起步检测转子位置方式、设定定电压或者定电流启动(参考章节 3.7)

STEP 2 - 调整定电流/电压大小 (& ADC 方法中的检测位准) (参考章节 3.8)

步骤 6. 速度控制参数调整(参考章节 3.9)

步骤 7. 预设为通过 UI 软件给定控制命令,如需修改为外部电位器控制,可调整控制命令来源(参考章节 3.10)



3.1 修改电机控制模式及参数

- 在电机库文档中的 motor_control_drive_param.h 内提供用户自行输入电机控制模式、电机参数、控制板参数、控制器参数。
- 模式宏定义基于用户的硬件与电机特性,可定义适当的模式,以下说明宏定义设定步骤:

设定步骤 1- 根据用户电机开发版选择使用的版本(择一开启)

表 2.	宏定义设定一
宏定义名称	描述
AT_MOTOR_EVB_V1	使用电机开发板 AT-MOTOR-EVB V1.x (include mc_hwio_v1.h 文档)
AT_MOTOR_EVB_V2	使用电机开发板 AT-MOTOR-EVB V2.0 (include mc_hwio_v1.h 文档)

设定步骤 2-根据用户需要的控制方法选择是否开启下臂 MOS 管开关与上臂 PWM 互补

表 3. 宏定义设定一

•••	
宏定义名称	描述
COMPLEMENT	开启下臂 MOS 管开关与上臂 PWM 互补(默认为开启,若 注解掉则此功能关闭)

设定步骤 3-根据用户硬件电路上使用的 Gate driver 型号是否有下臂反向输出功能决定是否开启此功能,以 AT32_LV_MOTOR_CONTROL_EVB 上使用的 U3315 为例有反向,因此预设为开启

表 4. 宏定义设定二

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
宏定义名称	描述
GATE_DRIVER_LOW_SIDE_INVERT	开启下臂 MOS 反向输出(默认为开启,若注解掉则此功能 关闭)

设定步骤 4 - 根据用户电机特性决定是否开启反电势电压补偿功能

表 5. 宏定义设定三

•	
宏定义名称	描述
EMF_COMPENSATE	反电势电压补偿(默认为不开启, 若定义则此功能开启)

设定步骤 5-本专案为无感方波范例工程,预设为无感控制,用户无需修改,但因代码判断需求需保留此选项

表 6. 宏定义设定四

宏定义名称	描述
HALL_SENSORS	霍尔传感器
SENSORLESS	无传感器控制的模式(通用)

设定步骤 6 - 反电势过零点检测分为两种方式: ADC 与比较器,可以二择一开启定义

表 7. 宏定义设定3

农口 宏定天夜定五	
宏定义名称	描述
BLDC_SENSORLESS_ADC	六步方波无传感器控制以 ADC 检测反电势的模式



BLDC_SENSORLESS_COMP	六步方波无传感器控制以比较器检测反电势的模式
----------------------	------------------------

设定步骤7-根据用户是否需要电流环控制选择是否开启

表 8. 宏定义设定六

宏定义名称	描述
WITHOUT_CURRENT_CTRL	纯电压控制,无电流环(默认为不开启,若定义则此功能开启)

设定步骤 8 –正常为检测到过零点后延迟 30 度换相,开启相位提前后则可能为延迟 0~29 度之间换相,该范围可 调整 EMF_PHASE_ADV_SPD 参数决定。建议若无感切换到高速时换相有问题可以尝试开启,有可能是因为换 相延迟时间太长导致的换相错误。

表 9. 宏定义设定七

宏定义名称	描述
PHASE_ADVANCE	相位提前(默认为不开启, 若定义则此功能开启)

设定步骤 9 – 使用 INIT_ANGLE_STARTUP 启动时才需要设置,否则可以略过。使用初始角度检测启动时会因为电机特性是否大齿槽转矩导致检测方式的不同,因此需要根据电机特性设置此功能。

表 10. 宏定义设定八

宏定义名称	描述
LARGE_COGGING	大齿槽转矩(默认为不开启,若定义则此功能开启)

设定步骤 10 - 使用 ALIGN_AND_GO_STARTUP 或 OPENLOOP_STARTUP 启动时才需要设置,否则可以略过。为切换到角度检测闭环控制时采用定电流或是定电压方式启动,为二选一(详细说明见章节 3.8)

表 11. 宏定义设定九

宏定义名称	描述
CONST_CURRENT_START	固定电流启动(六步方波无传感器控制)
CONST_VOLTAGE_START	固定电压启动(六步方波无传感器控制)

设定步骤 11 - 无传感器初始转子位置检测方法,为三选一(详细说明见章节 3.7)

表 12. 宏定义设定十

宏定义名称	描述
INIT_ANGLE_STARTUP	初始角度检测启动(通用)
ALIGN_AND_GO_STARTUP	对齐启动(通用)
OPENLOOP_STARTUP	开环启动(通用)

设定步骤 12 - 使用 BLDC_SENSORLESS_COMP 方法检测过零点时才需要设置,否则可以略过。连续取样模式为在一个 PWM 周期内多次检测反电势过零点,提高检测过零点准确度,反之未定义则为在一个 PWM 周期内 只检测 1 次反电势过零点。

衣 13. 宏定又仅足	
宏定义名称	描述
EMF_CONTINOUS_SAMPLE	反电势过零点检测连续取样模式(默认为不开启,若定义则 此功能开启)

表 13. 宏定义设定十一



设定步骤 13 - 使用 BLDC_SENSORLESS_COMP 方法检测过零点时才需要设置,否则可以略过。为是否根据 换相角度检测特定相序的反电势比较器信号,用来避开其他相不需要的比较器信号以及干扰。

表 14. 宏定义设定十二

宏定义名称	描述
SPECIFIC_EACH_EMF_PIN	避开其他相不需要的比较器信号(默认为开启,若注解掉则 此功能关闭)

设定步骤 14 - 使用 BLDC_SENSORLESS_ADC 方法检测过零点时才需要设置,否则可以略过。用于提升低速时 ADC 方法反电势检测过零点取样解析,为雅特力上拉电阻专利电路特殊方法。

衣 15. 宏定又仅定 二							
宏定义名称	描述						
EMF_PULL_UP	提升低速反电势 ADC 取样解析, 雅特力上拉电阻专利电路						
	(默认为不开启, 若定义则此功能开启)						

表 15. 宏定义设定十三

设定步骤 15 - 电机线圈参数自动辨识功能,打开后可自动检测电机线圈 RS、LS 以及计算电流环 PI 控制参数 (详细说明见章节 3.5)

宏定义名称	描述			
MOTOR_PARAM_IDENTIFY	电机线圈参数自动辨识(默认为开启,若注解掉则此功能关			
	闭)			

表 16. 宏定义设定十四



 相关电机参数的宏定义如表 17 所示,如极对数、编码器参数、霍尔传感器参数等。在此仅列出 此工程范例相关参数。

宏定义名称	描述
RS_LL	电机线间电阻值(unit: Ω)
LS_LL	电机线间电感值(unit: H)
POLE_PAIRS	极对数
ANGLE_INIT_DETECT_DUTY	初始角检测的 PWM DUTY 值 (unit: PWM 计时器时基)
KE	电机 KE 值(unit: V/rpm)
NOMINAL_CURRENT	电机额定电流 (unit: ampere)
HALL_LEARN_DIR	HALL 自学习后的电机转向 注[2]
HALL_LEARN_0_STATE	HALL 自学习后的第一个状态(BLDC: 输出 V 相上臂 PWM 与 W 相
	下臂 ON)注[2]
HALL_LEARN_1_STATE	HALL 自学习后的第二个状态(BLDC: 输出 V 相上臂 PWM 与 U 相
	下臂 ON) 注[2]
HALL_LEARN_2_STATE	HALL 自学习后的第三个状态(BLDC: 输出 W 相上臂 PWM 与 U 相
	下臂 ON)注[2]
HALL_LEARN_3_STATE	HALL 自学习后的第四个状态(BLDC: 输出 W 相上臂 PWM 与 V 相
	下臂 ON)注[2]
HALL_LEARN_4_STATE	HALL 自学习后的第五个状态(BLDC: 输出 U 相上臂 PWM 与 V 相
	下臂 ON) 注[2]
HALL_LEARN_5_STATE	HALL 自学习后的第六个状态(BLDC: 输出 U 相上臂 PWM 与 W 相
	下臂 ON) 注[2]

注[2]. 无传感器无须修改此状态

,**17157**

3.2 建立连接

在确保完成硬件准备和软件环境准备后,我们可以进行以下操作建立 UI 与控制版的连接。详细电机 UI 使用说明请参照 AN0063 文挡。

STEP-1

正确将电机、AT_Link/Jlink、开发板电源接到电机开发板上,将 USART 接口同 USB 线接入 PC。

STEP-2

使用 MDK 编译 demo 工程代码,使用 Jlink 或 AT_Link 下载到开发板的芯片中。

STEP-3

执行程序 ArteryMotorMonitor_V2.1.14.exe(V2.1.14 为软件版本号),在 File -> Open Porject 选项中选择 ArteryMotorMonitor_V2.1.14.atmcx->开启。

STEP-4

点选 Serial Port 更新图标(1.)并选取对应的串口号(2.),点击 Open(3.)即可开启串口实时通信,操作步骤如图 4。

C Artery Motor Monitor V2.1.14 File Setting Help		- 🗆 X
COM4 : USB-Enhanced-SERIAL CH343	Open 🕨 🎊	
1 AT32F413_ML_V2.1.0 2	3 4	

STEP-5

按下播放键(4.)即可周期性更新 UI 接口的数据以及与目标板通过串口实时通信,如发送启动/停止电机 的命令、实时调速、调试电流 PID 参数以及监控参数绘制波形等。



3.3 六步方波开环控制

此模式使用开环电压控制模式,不需位置传感器即可转动电机,用来确认电机是否可正常运转与运转 方向是否正确或用来调整 BLDC 无传感器开环启动参数。开环电压与速度递增量的调试方式可视电机 运转速度与电机相电流大小调整。

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 Open Loop control

图 5 控制模式选取开环控制

Open Loop control 🗸	BLDC - sensorless (ADC)]		
	Open Loop control	~	·		/	~

STEP-2. 切换到 Tuning Parameters 页面(如图 6),调整初始电压(OpenLoop initial voltage)、初始速度(OpenLoop initial speed)、最终速度(OpenLoop final speed)以及递增次数(OpenLoop times)、每次递增电压(OpenLoop increase volt),开环控制的示意图如图 7。

图 6.开环控制相关参数(BLDC)

Basic	Tuning Parameters		
Open	Loop Control		
Oper	Loop initial voltage	0.75	V
Oper	nLoop initial speed	100	rpm
Oper	nLoop increase volt	0.004	V
Oper	nLoop final speed	350	rpm
Oper	Loop times	90	



图 7.开环控制示意图

调试技巧:

- 1. 刚开始可以先将 Openloop increase volt, Openloop times 调整为 0, Openloop final speed 与 Openloop initial speed 调整成一样的数值, 先找到适当的起始电压及速度
- 2. 找到适当起始电压后,进一步设定最终速度,并调整 increase volt 以及 Openloop times,若觉 得运转无力则调大 increase volt 增加每次递增电压或 Openloop times 增加递增次数(一般来说建 议递增次数可以大于 50 次)

STEP-3. 按下启动电机(Start Motor)按纽,观察电流大小以及电机运转情况,直到电机正常运转。(开环电压避免过大以免造成电机过热损毁)

STEP-4. 将调试后参数填入 motor_control_drive_param.h 文件宏定义,如图 8 所示,并重新编译烧录代码。

motor_c	ontrol_drive_param.h		
225	/* open loop control */		
226	#define OLC_INIT_SPD	(100)	/*!< rpm */
227	<pre>#define OLC_FINAL_SPD</pre>	(350)	/*!< rpm */
228	#define OLC_TIMES	(90)	/*!< Accumula
229	#define OLC_INIT_VOLT	(0.75)	/*!< V */
230	#define OLC_VOLT_INC	(0.004)	

图 8. 开环参数宏定义

3.4 确认电流取样点

为了确认电流取样点,需要准备一台至少有3通道的示波器,测量的信号如下(图9):

示波器通道	测量位置	AT32-Motor-EVB2.0 为例
CH1	U相输出电压	CN4 OUT1
CH2	电流检测信号 *注[3]	IBUS_FDBK(TP26)
CH3	PWM UH 输出信号(MCU 端)	TIM1_CH1(TP17)

*注[3].因需检测正负电流,因此电流 0A 时电流检测信号有一个直流偏置,以 AT32-Motor-EVB2.0 为 例为 0.833V,信号测量时 CH2 需要设置消零(-0.83V)



图 9. 确认电流取样点信号测量位置(AT32-Motor-EVB2.0 为例)

STEP-1. 使用六步方波开环控制使电机运转(参照章节 3.3)

STEP-2. 以 PWM_UH 上升沿当作触发点,测量电流取样延迟时间,如图 6 Sample Delay = PWM UH 上升到电流检测信号开始上升的时间差(unit:usec) I_SAMP_DELAY(nsec) = Sample Delay(nsec) + Dead time(nsec)

STEP-3. 将 Cusrsor 移至稳定的 ADC 取样电压(约 16mV),测量 CH2 电流检测信号从 0mV 到 16mV 所需时间即为 I_SAMP_MIN_TIME 时间,以图 10 为例为 220 nsec

图 10. 电流取样延迟时间测量波型



STEP-5. 将 STEP-4.测量得到的延迟时间填入 motor_control_drive_param.h 文件宏定义 I_SAMPLE_MIN_TIME, 如图 11 所示,并重新编译烧录代码。

图 11. 电流取样点宏定义

196 /* I-SAMPLE PARAMETER */		
197 #define I_SAMP_MIN_TIME	(220)	/*!< nsec */
198 #define I_SAMP_DELAY	(500)	/*!< nsec */

3.5 参数自动鉴定

参数自动鉴定分为两部分,分别为电机线圈参数自动辨识、电流 PI 控制参数自整定。 若已有电机 RS_LL 以及 LS_LL 参数则不需进行电机线圈参数自动辨识,可以直接修改 motor_control_drive_param.h 文件内的宏定义 RS_LL 以及 LS_LL。

电机线圈参数自动辨识:

STEP-1. 在 motor_control_drive_param.h 文件内,填入电机额定电流(NOMINAL_CURRENT)宏定 义并重新编译烧录代码,如图 12 所示。

|--|

79	/*********	Motor-related par	ame	ter ***	*******	********
80	#define POLE_PAIRS	(8/2)				
81	#define RS_LL	(1.89f)	1*	Stator	resistance	(line-to-
82	<pre>#define LS_LL</pre>	(0.002387f)	/*	Stator	inductance	(line-to-



STEP-2. 使用 UI 软件,切换到 Auto Tune 页面,在状态机的状态为 ESC_STATE_SAFETY_READY 时按下 Identify Winding parameter 按扭即执行电机线圈参数自动辨识,如图 13 所示。

	Identified process s	tate SUCCEED	
over voltage error	RS_LL	1.93041	Ω
under voltage error	LS_LL	0.00231822	н
over temperature error			
encoder error			
hall error			
parameter identify error			
hall learn error			

图 13. 电机线圈参数自动辨识

STEP-3. Identified process state 回报是否成功(SUCCEED)并获得 RS_LL 以及 LS_LL 参数并将数值 填入 motor_control_drive_param.h 文件宏定义 RS_LL 以及 LS_LL 参数, 如图 14 所示。

图 14. 电机线圈参数宏定义

motor_co	ntrol_drive_param.h		
89			
90	/********	Motor-related	parameter ***********************************
91	/* Motor parameters */		
92	#define RS_LL	(1.89)	/* Stator resistance, ohm */
93	#define LS_LL	(0.002387)	/* Stator inductance, H */

电流 PI 控制参数自整定:

STEP-1. 在 motor_control_drive_param.h 文件内,填入输入电源 DC 电压(VDC_RATED)宏定义并 重新编译烧录代码,如图 15 所示。

图	15.	电机额定电	压
---	-----	-------	---

mote	or_control_drive_param.h		
100 101	/*******	Drive-related parameter	****
102	/* basic */		
103	#define VDC_RATED	(24.0f)	
104	#define V SENSE GAIN	(10/(3.9f+180+10))	// 0.05157
105	#define ADC REFERENCE VOLT	(3.3f)	
106	#define ADC DIGITAL SCALE 12BITS	(4095)	

STEP-2. 切换到 Auto Tune 页面,在状态机的状态为 safty ready 时按下 UI 软件的 Auto-tune Current PI parameter 按扭即执行电流 PI 控制参数自整定,完成后会自动更新 Q 轴电流的 PI 控制参数,如图 16 所示。

Torque KP	7717		
Torque KI	6110		
Torque KP DIV	512		
Torque KI DIV	8192		

图 16. 电流 PI 控制参数自整定

STEP-3.将图 16 显示的参数填回宏定义(motor_control_drive_param.h) 并重新编译烧录代码,如图 17。

图 17. 电流 PI 控制参数宏定义

motor_c	ontrol_drive_param.h	
242	/* pi parameter */	
243	<pre>#define PID_IS_KP_DEFUALT</pre>	2000
244	<pre>#define PID_IS_KI_DEFUALT</pre>	200
245	#define PID_IS_KP_DIV	256
246	<pre>#define PID_IS_KP_DIV_LOG</pre>	LOG2 (PID_IS_KP_DIV)
247	#define PID_IS_KI_DIV	1024
248	#define PID_IS_KI_DIV_LOG	LOG2 (PID_IS_KI_DIV)

旧版电机库(MC_Library_Project_V2.1.1 以前)的换算公式如下:

 $PID_IS_KP_DIV_LOG = \log_2 \text{ Torque } KP DIV$ $PID_IS_KI_DIV_LOG = \log_2 \text{ Torque } KI DIV$

-17[<u>-</u>7]

3.6 Q 轴电流调试

此模式下会产生一个步阶的电流,如图 18,可以调整步阶电流的相关参数,产生步阶电流的目的是为了查看调整 Q 轴电流的 PID 电流环参数后的电流响应。



详细操作步骤如下:

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 IQ tune

图 19. 控制模式选取 IQ 电流环调试

В	LDC - hall]	
IC	Q Tune 🔻		

STEP-2. 切换到 Tuning Parameters 页面,设置 PID 参数以及步阶电流参数,设置 PID 参数以及步 阶电流参数,初次调整可以使用电流 PI 控制参数自整定后的参数,如电流响应不如预期在进行调整,如图 20

图 20. PID 参数以及步阶电流参数

		IQ Current cont	rol	
0.999	А	Torque KP	25000	
100	ms	Torque Kl	3000	
2	ms	Torque KP DIV	2048	
		Torque KI DIV	4096	
	0.999 100 2	0.999 A 100 ms 2 ms	0.999 A 100 ms 2 ms Torque KP Torque KI Torque KP DIV Torque KI DIV	0.999 A 100 ms 2 ms Torque KP 25000 Torque KI 3000 Torque KP DIV 2048 Torque KI DIV 4096

STEP-3. 按下启动电机(Start Motor)按纽

STEP-4. 调整绘图区的参数监控为 Torque reference(Iq)以及 Torque measured(Iq)并按下 Save 键



图 21. 调整通道监控参数(IQ 电流环调试)

Diagram parameter setting	
Torque reference (Iq)	•
Torque measured (Iq)	•
Save	

STEP-5. 点选绘图组^{MM}即可呼叫出波形窗口,波形制图控制按钮详细说明可参考 AN0063 AT32 Motor Monitor Application Note

STEP-6. 查看电流响应是否如预期,如图 22,若不如预期则按下停止电机,并重复 STEP-2~STEP-6



图 22. 电流环调试波型

STEP-7.微调完成后将参数填回宏定义(motor_control_drive_param.h) 并重新编译烧录代码,如图 23。

图	23.	电流	ΡI	控制	参数宏定义	ζ
---	-----	----	----	----	-------	---

motor_c	ontrol_drive_param.h	
242	/* pi parameter */	
243	<pre>#define PID_IS_KP_DEFUALT</pre>	2000
244	<pre>#define PID_IS_KI_DEFUALT</pre>	200
245	#define PID_IS_KP_DIV	256
246	#define PID_IS_KP_DIV_LOG	LOG2 (PID_IS_KP_DIV)
247	#define PID_IS_KI_DIV	1024
248	#define PID_IS_KI_DIV_LOG	LOG2 (PID_IS_KI_DIV)

,**17151**,

3.7 无传感器启动方式

由于 BLDC 无传感器 120 度驱动方法是根据反电势的过零点判断转子位置与换相时机,在电机静止时没有反电势,因此须利用其它的方法确定转子启动角度,才能产生正确的电流向量控制电机启动。

本范例提供三种无传感器启动的方式,分别是初始转子位置检测启动、对齐转子位置启动以及开环启动:

- 初始转子位置检测启动 定义:INIT_ANGLE_STARTUP 优点:不会逆转 缺点:不适用不容易磁饱和的电机(电感大/额定电流小)或无铁芯电机 适合电机类型:容易磁饱和且有铁芯的电机
- 对齐转子位置启动 定义: ALIGN_AND_GO_STARTUP 优点:简单、无须调整太多参数、适用大部分电机 缺点:可能会逆转 适合电机类型:适用大部分电机
- 3. 开环启动

定义: OPENLOOP_STARTUP 优点: 简单 缺点: 可能会逆转、须调整参数 适合电机类型: 适用轻载启动电机

可以直接修改程序定义选择这三种无传感器启动的方式,定义值位于 motor_control_drive_param.h 内,此范例选择使用对齐转子位置启动方式,如图 24



图 24. 六步方波无传感器启动方式定义



此外,起步时也有两种控制方式提供选择,分别为定电压启动以及定电流启动:

- 1. 定电压启动
 - 定义: CONST_VOLTAGE_START
 - 优点:对换相误差的容错馀裕大,轻载启动成功率高

缺点: 起步扭力不稳定

- 2. 定电流启动
 - 定义: CONST_CURRENT_START
 - 优点: 起步扭力稳定(适合起步需扭力的应用,例:链锯)
 - 缺点:错识换相时,易产生反向扭力而抖动

可以通过 motor_control_drive_param.h 修改程序定义选择起步的方式,本例使用定电压起步的方式, 如图 25。

图 25. 六步方波无传感器起步方式定义





3.8 无传感器相关参数设定

以下为无感控制启动示意图:



分别需要调整的参数如下表 18:

	ESC_STATE_ANGLE_INIT 调	整参数
方法	宏定义名称	描述
	OLC_INIT_SPD	开环控制初始速度(unit: rpm)
	OLC_FINAL_SPD	开环控制最终速度(unit: rpm)
	OLC TIMES	从初始速度递增到最终速度的递增次
OPENLOOP STARTUP		数(unit:次)
	OLC_INIT_VOLT	开环控制初始电压(unit: V 伏特)
	OLC_VOLT_INC	每一次的递增电压(unit: V/次)
		开环启动切入闭环控制时间(unit:
	OLC_STARTOF_FERIOD	ms) (BLDC 无传感器专用)
	AND OC OT ADTUD LOCK_VOLT 启动前转子对齐电压 (unit:	启动前转子对齐电压 (unit: V 伏特)
ALIGN_AND_GO_STARTOP	LOCK_PERIOD	启动前转子对齐时间 (unit: ms)
	初始角检测的 PWM DUT	初始角检测的 PWM DUTY 值 (unit:
INIT_ANGLE_STARTUP		PWM 计时器时基)
	ANGLE_INIT_I_DIFF	初始角检测的差值

表 18	. 六步方	ī 波无感调	周整参数表
------	-------	---------------	-------

	STARTING 调整	参数
方法	宏定义名称	描述
	START_CURRENT	定电流启动电流值 (unit: ampere)
CONST_CURRENT_START	SENSE_HALL_TIMES	设定开环切到闭环控制前的换相次数 (unit:
		次)
	START_VOLTAGE	定电压启动电压值(unit: V 伏特)
CONST_VOLTAGE_START	SENSE_HALL_TIMES	设定开环切到闭环控制前的换相次数 (unit:
		次)



	RUNNING 调整	参数
方法	宏定义名称	描述
	PID_IS_KP_DIV_LOG	母线电流控制比例增益除数 (Q16 mode)
山滨江按街	PID_IS_KI_DIV_LOG 母线电流控制积分增益除	母线电流控制积分增益除数 (Q16 mode)
电视坏空刺	PID_IS_KP_DEFUALT	母线电流控制比例增益 (Q15 mode)
	PID_IS_KI_DEFUALT	母线电流控制积分增益 (Q15 mode)
	PID_SPD_KP_DIV_DIV	转子速度比例增益除数 (Q16 mode)
速度环控制	PID_SPD_KI_DIV_DIV	转子速度积分增益除数 (Q16 mode)
	PID_SPD_KP_DEFUALT	转子速度比例增益 (Q15 mode)
	PID_SPD_KI_DEFUALT	转子速度积分增益 (Q15 mode)

有别于有传感器的控制,无传感器的控制需要通过检测反电势来估算转子的位置,且启动时须根据不 同的电机调试适当的启动电流(Start Current)或启动电压(Start Voltage),如图 27



L.	Sensor-less control(six-step)				
	Start Current	0.799	A		
	Start Voltage	0.087	V		

1. Start Current/Start Voltage(择一设置)

a)初始电流设置,为无传感器控制时启动的初始电流值,单位为安培(ampere)。 b)初始电压设置,为无传感器控制时启动的初始电压值,单位为伏特(voltage)。 *根据采用定电流启动或定电压启动择一设置

若用 ADC 检测反电势换相的方法则还有 EMF low speed offset(rising)、EMF low speed offset(falling)、EMF high speed offset(rising)、EMF high speed offset(falling)可调整,如图 28、图 29

图 28. 六步方波无传感器调试参数页面(ADC 检测方法)

Start Current	0.399	Α
Start Voltage	0.000	V
EMF low speed offset(Rising)	35	
EMF low speed offset(Falling)	35	
EMF high speed offset(Rising)	-100	
EMF high speed offset(Falling)	-100	



图 29. 六步方波反电势调试参数示意图(ADC 检测方法)



1. EMF low speed offset(rising)、EMF low speed offset(falling) 注[3]

低速时,在 PWM OFF 区间检测反电势过零点,EMF low speed offset 为检测的位准,正缘的过零点为 rising、负缘的过零点为 falling,位准设成正值则相对于 0 来说检测阀值向上移动,负值反之。

如非使用 AT32 MOTOR EVB Borad 则需要做微调,本例的 rising 值为 35、falling 值为 35,单位 为反电势检测电压的 ADC 数值。

2. EMF high speed offset(rising)、EMF high speed offset(falling) 注[3]

高速时,在 PWM ON 区间检测反电势过零点,EMF high speed offset 为检测的位准,正缘的过零点为 rising、负缘的过零点为 falling,位准设成正值则相对于 1/2VDC 来说检测阀值向上移动,负值反之。

如非使用 AT32 MOTOR EVB Borad 则需要做微调,本例的 rising 值为-100、falling 值为-100,单位为反电势检测电压的 ADC 数值。

注[3] 比较器检测反电势模式下不需要修改,且参数数值与驱动版硬件电路相关,若使用 AT32 MOTOR EVB Borad 则无需修改

-17L=2A

3.9 速度环控制

此模式下可调控的参数有速度环的 PID 参数以及加速度、减速度,调整完成后亦可由波形绘制查看响 应,详细操作步骤如下:

STEP-1. 将控制模式下拉菜单选为 Speed Control

STEP-2. 切换到 Tuning Parameters 页面,设置速度 PID 参数以及加速度、减速度

Speed KI 30 Speed KP DIV 4096
Speed KP DIV 4096
Speed KI DIV 32768
Speed acceleration 5 rpm/ms
Speed deceleration 5 rpm/ms

图 30. PID 参数以及加速度、减速度设置

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

图 31. 目标速度值设置

Target speed
Speed reference 0 rpm

STEP-4. 按下启动电机(Start Motor)按纽

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

图 32. 调整信道监控参数(速度环调试)

Diagram parameter setting	
Speed reference	•
Speed measured	-
Save	

STEP-6.点选绘图纽^W即可显示出波形窗口

STEP-7. 查看速度响应是否如预期,如图 33,若不如预期则按下停止电机,并重复 STEP-2~STEP-7

图 33. 速度环调试波型



STEP-8.微调完成后将参数填回宏定义(motor_control_drive_param.h) 并重新编译烧录代码

<u>Y7=171;</u>

3.10 外部/软件命令控制

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



图 34. 电位器位置图 (外部电压控制来源)

控制来源可以直接修改程序定义或是通过电机应用 PC 软件来做修改,程序定义值于 motor_control_drive_param.h 文档内的 CTRL_SOURCE,如图 35。通过 PC 软件修改的修改方式 详见图 36、图 37、图 38,且根据用户选择不同的控制模式会对应不同的控制参数。

	control_drive_param.h		
183			
184	/*********	Control-related parameter ***********************************	
185	#define PWM_FREQ	(30000) /*!< Hz */	
186	#define MOTOR_CONTROL_MODE	(motor_control_mode) (SPEED_CTRL)	
187	#define CTRL_SOURCE	(ctrl_source_type) (CTRL_SOURCE_SOFTWARE)	
188	#define UI_UART_BAUDRATE	(150000UL)	
189	#define UI_SAMPLE_CYCLE	(1)	
motor_	control_drive_param.h		
183			
184	/*********	Control-related parameter ***********************************	
185	#define PWM_FREQ	(30000) /*!< Hz */	
186	#define MOTOR CONTROL MODE	(motor control mode) (SPEED CTRL)	
187	#define CTRL_SOURCE	(ctrl_source_type) (CTRL_SOURCE_EXTERNAL)	
188	#define UI_UART_BAUDRATE	(1500000UL)	
189	#define UI_SAMPLE_CYCLE	(1)	

图 35. 控制来源定义值(软件控制来源(上)/外部电压控制(下))

<u>Y7=171:</u>

1) 外部电压控制来源

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

注意:外部来源控制模式下本栏位不可修改。





图 37 转矩控制模式(外部电压控制来源)

BLDC - sensorless (ADC)	
Torque Control	•
Control source	Torque reference (lq) 0 A
external voltage control	-) ()

2) 软件控制来源

默认为软件控制模式,来源选择的下拉菜单中选择 Software control 也可切换至软件控制模式,如图 38,在此模式下通过修改 UI 接口的目标速度/转矩来调整电机控制的速度/转矩大小,双击此栏位即可 修改数值,设定完成可看到下面栏位显示设置成功的信息。

Speed Control 👻									
С	ontrol sou	rce			Target speed	ace 500 /			
s	oftware co	ntrol		-	speed refere	ice 500 r	pm		
	~		~						
	Clear		Save						
	Clear	me	Save Motor					Me	ssage
1	Clear Ti 16:4	me 19:32	Save Motor	Set REG 10 = 500:C	<			Me	ssage
1 2	Clear Ti 16:- 16:-	me 19:32 19:26	Save Motor	Set REG 10 = 500:0 Set REG 10 = 500:0	<			Me	ssage

图 38 软件控制来源设置目标速度



4 文档版本历史

表 19. 文档版本历史

日期	版本	变更
2024.05.17	2.1.0	最初版本

重要通知 - 请仔细阅读

买方自行负责对本文所述雅特力产品和服务的选择和使用,雅特力概不承担与选择或使用本文所述雅特力产品和服务相关的任何责任。

无论之前是否有过任何形式的表示,本文档不以任何方式对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。如果本文档任何部分涉及任何 第三方产品或服务,不应被视为雅特力授权使用此类第三方产品或服务,或许可其中的任何知识产权,或者被视为涉及以任何方式使用任何 此类第三方产品或服务或其中任何知识产权的保证。

除非在雅特力的销售条款中另有说明,否则,雅特力对雅特力产品的使用和 / 或销售不做任何明示或默示的保证,包括但不限于有关适销 性、适合特定用途(及其依据任何司法管辖区的法律的对应情况),或侵犯任何专利、版权或其他知识产权的默示保证。

雅特力产品并非设计或专门用于下列用途的产品:(A)对安全性有特别要求的应用,例如:生命支持、主动植入设备或对产品功能安全有要 求的系统;(B)航空应用;(C)航天应用或航天环境;(D)武器,且/或(E)其他可能导致人身伤害、死亡及财产损害的应用。如果采购 商擅自将其用于前述应用,即使采购商向雅特力发出了书面通知,风险及法律责任仍将由采购商单独承担,且采购商应独力负责在前述应用 中满足所有法律和法规要求。

经销的雅特力产品如有不同于本文档中提出的声明和 / 或技术特点的规定,将立即导致雅特力针对本文所述雅特力产品或服务授予的任何保 证失效,并且不应以任何形式造成或扩大雅特力的任何责任。

© 2024 雅特力科技 保留所有权利