



# Gowin FOC Industrial Motor Control System Design

## 用户指南

TN663-1.0,2020-12-03

## **版权所有© 2020 广东高云半导体科技股份有限公司**

未经本公司书面许可，任何单位和个人都不得擅自摘抄、复制、翻译本档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

### **免责声明**

本档并未授予任何知识产权的许可，并未以明示或暗示，或以禁止发言或其它方式授予任何知识产权许可。除高云半导体在其产品的销售条款和条件中声明的责任之外，高云半导体概不承担任何法律或非法律责任。高云半导体对高云半导体产品的销售和 / 或使用不作任何明示或暗示的担保，包括对产品的特定用途适用性、适销性或对任何专利权、版权或其它知识产权的侵权责任等，均不作担保。高云半导体对档中包含的文字、图片及其它内容的准确性和完整性不承担任何法律或非法律责任，高云半导体保留修改档中任何内容的权利，恕不另行通知。高云半导体不承诺对这些档进行适时的更新。

## 版本信息

日期	版本	说明
2020/12/03	1.0	初始版本。

# 目录

目录 .....	i
图目录 .....	ii
表目录 .....	iii
<b>1 关于本手册 .....</b>	<b>1</b>
1.1 手册内容 .....	1
1.2 相关文档 .....	1
1.3 术语、缩略语 .....	1
1.4 技术支持与反馈 .....	2
<b>2 FOC 简介 .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Gowin FOC Current Loop Control IP 概述 .....</b>	<b>3</b>
3.1 FOC 电流环原理 .....	5
3.2 端口描述 .....	5
<b>4 应用参考案例 .....</b>	<b>8</b>
4.1 FOC 工作流程 .....	9
4.2 电流环闭环 .....	10
4.3 速度环闭环 .....	11
4.4 位置环闭环 .....	12
4.5 消耗资源 .....	13
<b>5 注意事项 .....</b>	<b>14</b>

# 图目录

图 2-1 FOC 控制系统 .....	3
图 3-1 基于 FOC Current Loop Control IP 的有感 FOC 实现 .....	4
图 3-2 Gowin FOC Current Loop Control IP 端口图.....	5
图 4-1 应用参考案例 .....	8
图 4-2 电流环闭环.....	10
图 4-3 电流环闭环的相关波形图.....	10
图 4-4 速度环闭环.....	11
图 4-5 速度环闭环的相关波形图.....	11
图 4-6 位置环闭环.....	12
图 4-7 位置环闭环的相关波形图.....	12

# 表目录

表 1-1 术语、缩略语 .....	1
表 3-1 Gowin FOC Current Loop Control IP IO 端口列表 .....	6
表 4-1 应用参考案例的工作流程 .....	9
表 4-2 FPGA 所消耗资源 .....	13

# 1 关于本手册

## 1.1 手册内容

Gowin FOC Industrial Motor Control System Design 用户指南主要内容包括产品概述及应用参考案例，旨在帮助用户如何使用 Gowin FOC Current Loop Control IP 构建整个马达伺服控制系统。

## 1.2 相关文档

通过登录高云半导体网站 [www.gowinsemi.com.cn](http://www.gowinsemi.com.cn) 可以下载、查看以下相关文档：

- [SUG100, Gowin 云源软件用户指南](#)
- [IPUG942, Gowin FOC Current Loop Control IP 用户指南](#)

## 1.3 术语、缩略语

表 1-1 中列出了本手册中出现的相关术语、缩略语及相关释义。

**表 1-1 术语、缩略语**

术语、缩略语	全称	含义
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理
IP	Intellectual Property	知识产权
RAM	Random Access Memory	随机存取存储器
LUT	Look-up Table	查找表
FOC	Field Oriented Control	磁场定向控制
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation	空间矢量脉宽调制
BLDC	Brushless Direct Current Motor	无刷直流电机
PMSM	Permanent-magnet Synchronous Motor	永磁同步电机
PIC	Proportional Integral Controller	比例积分控制器

## 1.4 技术支持与反馈

高云半导体提供全方位技术支持，在使用过程中如有任何疑问或建议，可直接与公司联系：

网址：[www.gowinsemi.com.cn](http://www.gowinsemi.com.cn)

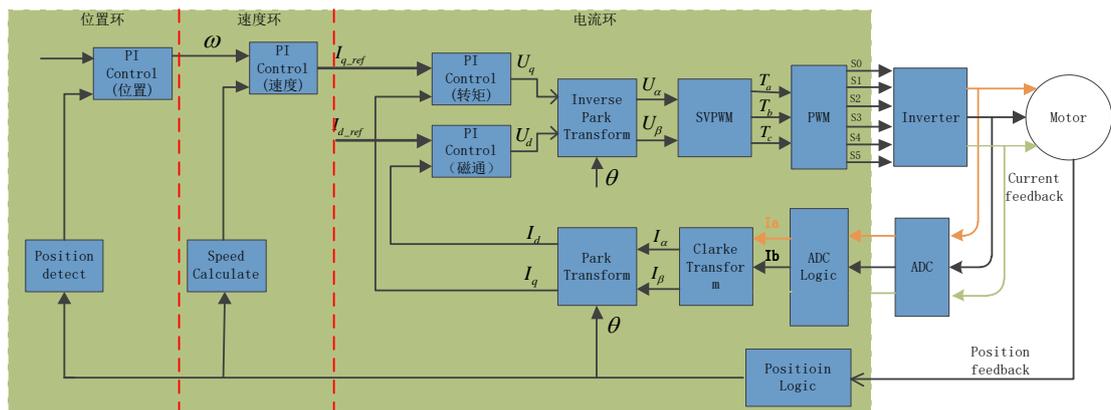
E-mail: [support@gowinsemi.com](mailto:support@gowinsemi.com)

Tel: +86 755 8262 0391

# 2 FOC 简介

磁场定向控制（Field Oriented Control, FOC）是目前无刷直流电机（BLDC）和永磁同步电机（PMSM）控制领域所采用的一种数学变换方法。FOC 精确地控制磁场大小与方向，使得电机转矩平稳、噪声小、效率高，并且具有高速的动态响应。

图 2-1 FOC 控制系统



FOC 控制框图如图 2-1 所示。电机转子的位置、电机转速、电流大小等信息作为反馈，对三相电流进行一系列的数学变换后得到解耦的易用控制的反馈量。根据反馈量与目标值的误差进行动态调节，最终输出三相正弦波驱动电机转动。

FOC 一般采用三环控制，分别为电流环、速度环、位置环。电流环控制电机的转矩，是 FOC 控制的根本。速度环、位置环主要通过检测电机编码器的信号来进行负反馈 PI 调节，它们的环内 PI 输出直接就是电流环的给定值，也就是说任何模式都必须使用电流环，在速度和位置控制的同时系统实际也在进行电流（转矩）的控制以达到对速度和位置的相应控制。

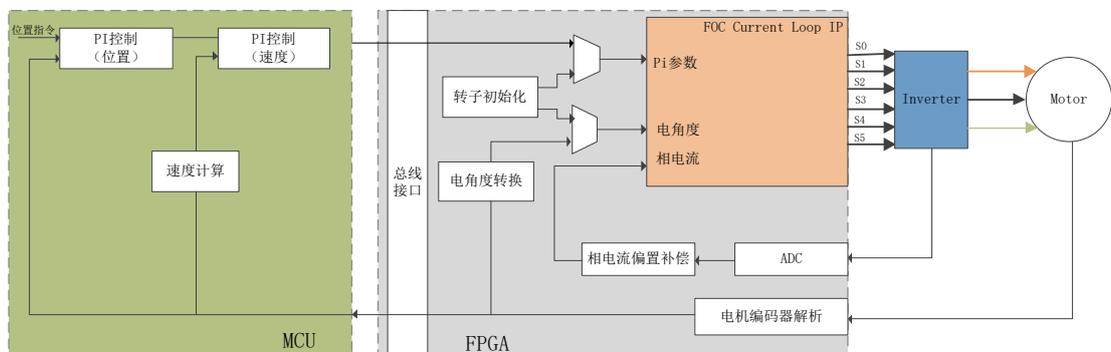
# 3 Gowin FOC Current Loop Control IP 概述

基于 Gowin FOC Current Loop Control IP 的有感 FOC 系统如图 3-1 所示。整个系统包含 MCU、FPGA、电机功率驱动板和带位置传感器接口的电机（如绝对式/增量式等），其中 Gowin FOC Current Loop Current IP 提供了电流环的核心运算。

注！

电机功率驱动板包括一些基本的保护、检测、控制信号，且驱动电路应符合 SVPWM 调制原理。

图 3-1 基于 FOC Current Loop Control IP 的有感 FOC 实现



FPGA 部分主要实现 FOC 电流环闭环系统：

- Gowin FOC Current Control Loop IP：提供电流环的核心计算；
- 电机编码器解析模块：用于获取电机位置反馈值；
- ADC 采样模块：用于采集 UV 两相电流反馈值。若采用 SIGMA-DELTA ADC，则 FPGA 内部需实现 SINC3 滤波及转换处理；若采用 SAR 型 ADC，一般采用 SPI 接口解析。
- 相电流偏置补偿模块：用于补偿驱动板在零电流驱动下的偏置值。
- 电角度转换模块：用于将获得电机位置反馈值转换为电角度。

- 转子初始化模块：上电时，转子的初始位置是未知的，该模块用于上电之后，校准电机转子与 0 电角度对齐。
- 总线接口模块：FPGA 与 MCU 交互数据的模块，推荐采用并行总线接口通信。

MCU 部分主要实现 FOC 的速度环/位置环：

- 速度环：从 FPGA 侧获取位置反馈信息（电机机械角度）后，估算出当前速度值（单位 rpm），再根据想要获得的速度参考值进行速度 PI 控制，并输出转矩值给 FPGA 侧的电流环，形成双环闭环系统。
- 位置环：从 FPGA 侧获取位置反馈信息（电机机械角度），根据位置指令与当前位置反馈信息的偏差进行位置 PI 控制，并输出参数给速度环，接着经过速度环 PI 控制输出指令至 FPGA 侧的电流环，形成三环闭环系统。

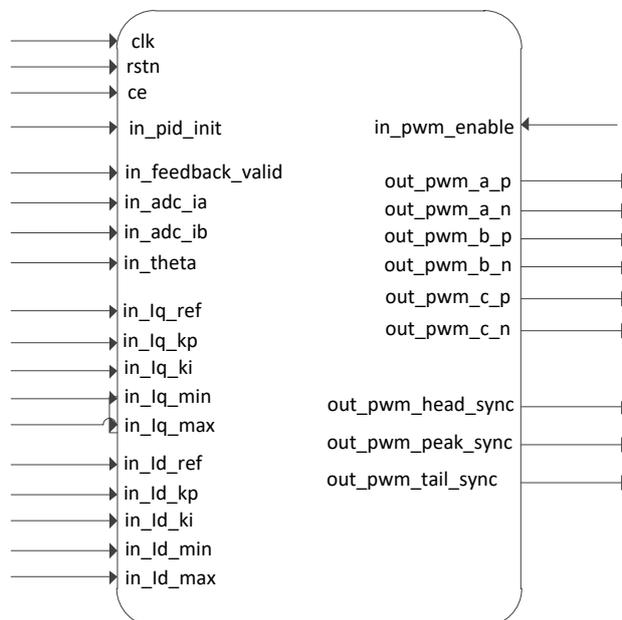
## 3.1 FOC 电流环原理

详细资料请参考 [Gowin FOC Current Loop Control IP 用户指南> 3 功能描述> 3.1 FOC Current Loop Control 算法简介> 3.1.2 FOC 及电流环原理](#)。

## 3.2 端口描述

Gowin FOC Current Loop Control IP 的 IO 端口如图 3-2 所示。

图 3-2 Gowin FOC Current Loop Control IP 端口图



有关 Gowin FOC Current Loop Control 的 IO 端口详情，如表 3-1 所示。

表 3-1 Gowin FOC Current Loop Control IP IO 端口列表

信号	方向	位宽	描述
Gowin FOC Current Loop Control IP Interface			
clk	Input	1	工作时钟
rstn	Input	1	复位信号，异步复位，低电平有效。推荐同步复位，异步释放。
ce	Input	1	时钟使能信号
in_pid_init	Input	1	初始化 PI 控制器内部信号为 0
反馈输入（相电流&电角度）			
in_feedback_valid	Input	1	反馈信号有效指示符，高有效。
in_adc_la	Input	16	U 相电流，有符号数。
in_adc_lb	Input	16	V 相电流，有符号数。
in_adc_lc	Input	16	W 相电流，有符号数（当在 IP GUI 选择为 3 输入 Clark Transform 时存在）
in_theta	Input	16	电角度，无符号数，以 0~65536 对应 0~360 度
转矩 PI 参数			
in_lq_ref	Input	16	转矩 PI 的参考量，有符号数
in_lq_kp	Input	16	转矩 PI 的比例参数 kp，有符号数。若 kp = 4000，缩放因子为 12（缩放因子由 IP GUI 界面设定，则 PI 控制器的实际比例参数为 $4000/2^{12}$ ）。
in_lq_ki	Input	16	转矩 PI 的积分参数 ki，有符号数。若 ki = 4000，缩放因子为 12（缩放因子由 IP GUI 界面设定，则 PI 控制器的实际比例参数为 $4000/2^{12}$ ）。
in_lq_min	Input	16	转矩 PI 输出的最小饱和限定值，有符号数
in_lq_max	Input	16	转矩 PI 输出的最大饱和限定值，有符号数
磁通 PI 参数			
in_ld_ref	Input	16	磁通 PI 的参考量，有符号数。
in_ld_kp	Input	16	磁通 PI 的比例参数 kp，有符号数，使用方法同转矩 PI 参数 kp 相同。
in_ld_ki	Input	16	磁通 PI 的积分参数 ki，有符号数，使用方法同转矩 PI 参数 ki 相同。
in_ld_min	Input	16	磁通 PI 输出的最小饱和限定值
in_ld_max	Input	16	磁通 PI 输出的最大饱和限定值
PWM			
in_pwm_enable	Input	1	PWM 信号使能，高有效
out_pwm_head_sync	Output	1	内部三角波计数器起始值指示符，高有效
out_pwm_peak_sync	Output	1	内部三角波计数器中间值指示符，高有效
out_pwm_tail_sync	Output	1	内部三角波计数器尾部值指示符，高有效
out_pwm_a_p	Output	1	PWM 波输出
out_pwm_a_n	Output	1	

信号	方向	位宽	描述
out_pwm_b_p	Output	1	
out_pwm_b_n	Output	1	
out_pwm_c_p	Output	1	
out_pwm_c_n	Output	1	

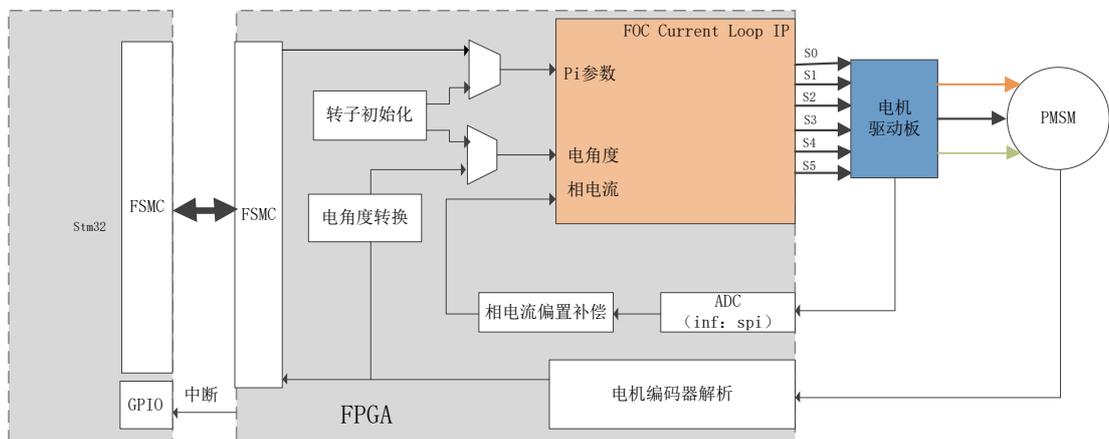
注！

GUI 界面可配 PWM 频率、死区时长。

# 4 应用参考案例

图 4-1 给出了基于高云 FPGA 的 FOC 参考案例。

图 4-1 应用参考案例



demo 设计中采用的硬件平台简述：

- DK\_START\_GW2A18-PG256 开发板（FPGA 型号为 GW2A-18），主要实现相电流采集、相电流补偿、电机编码器接口、FOC current Loop Control IP、转子初始化及 FSMC 接口功能，其中 pwm 波的频率为 16KHz，电流环的更新频率亦为 16KHz。
- 基于 STM32F407 的最小系统板主要实现位置环和速度环，其中位置环和速度环的更新频率为 2KHz。
- 电机驱动板，母线电压为 24V，采用 6 单元 MOSFET 结构，板上含有带 SPI 接口的 SAR 型 ADC 芯片，分别对 U/V 两相上桥臂进行电流采样。
- 带增量式/绝对式编码器的 PMSM 电机（demo 均支持），其中增强式编码器采用 4x 模式，角度分辨率为一圈 4000 个刻度。而绝对式编码器采用 RS485 电平，角度分辨率为一圈  $2^{23}$  个刻度，在 demo 中，只用了绝对式编码器的高 16bit，也就是说电机转一圈计数值从 0~65536。

注！

后续的分析默认是基于绝对式编码器。

- STM32 与 FPGA 采用异步 FSMC 的并行总线进行交互数据，交互方式为中断触发。

## 4.1 FOC 工作流程

demo 设计中的 FPGA 工作时钟频率为 100MHz，STM32 的工作时钟频率为 168MHz，PWM 频率为 16KHz、电流环更新频率为 16KHz，速度环和位置环更新频率为 2KHz，中断频率为 16KHz，采用多摩川绝对式编码器。其工作流程如表 4-1 所示。

表 4-1 应用参考案例的工作流程

步骤	描述
Power on/复位	复位MCU、复位FPGA
相电流补偿	关闭pwm输出，采集电机驱动板零电流下的电流偏置值，并进行后续的补偿。
转子初始化	主要使得电机转子与U轴（零电角度）对齐： <ul style="list-style-type: none"> <li>● 使能PWM输出；</li> <li>● 电流环闭环环路的电角度固定为0；</li> <li>● 转矩PI的给定值（对应电流环IP中的输入端口 in_lq_ref）固定为0，磁通PI的给定值（对应电流环IP中的输入端口in_ld_ref）设为一个常数。</li> </ul>
电流环启动	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 启动ADC采样和编码器接口，ADC和编码器接口有转换时间；</li> <li>● 调用FOC电流环IP进行核心计算，并输出PWM波。</li> </ul>
速度环/位置环工作	双环控制，则有每8个中断（2KHz），计算： <ul style="list-style-type: none"> <li>● 根据当前位置编码器与上次位置编码器的偏差，得出当前速度，并根据速度给定值与当前速度的偏差进行PI控制，输出转矩给定值；</li> <li>● 通过FSMC接口，写入转矩给定值到FPGA的电流环。</li> </ul> 三环控制，则有每8个中断（2KHz），计算： <ul style="list-style-type: none"> <li>● 根据当前位置编码器与目标位置的偏差，进行位置PI控制，输出速度给定值；</li> <li>● 根据当前位置编码器与上次位置编码器的偏差，得出当前速度，并根据速度给定值与当前速度的偏差进行PI控制，输出转矩给定值；</li> <li>● 通过FSMC接口，写入转矩给定值到FPGA的电流环。</li> </ul>

### 4.2 电流环闭环

图 4-2 电流环闭环

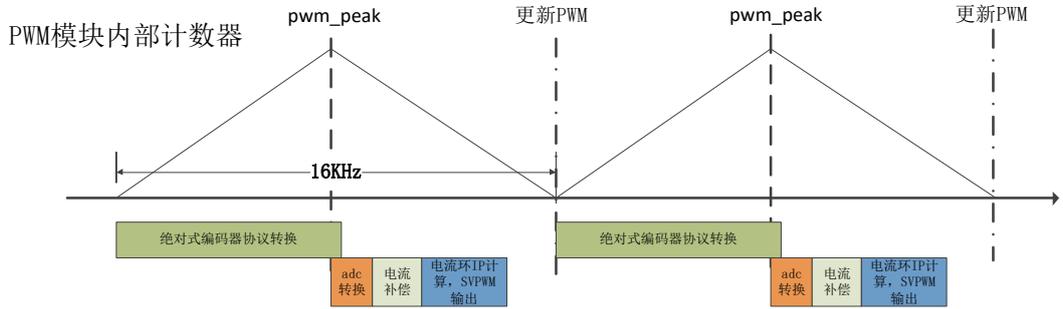
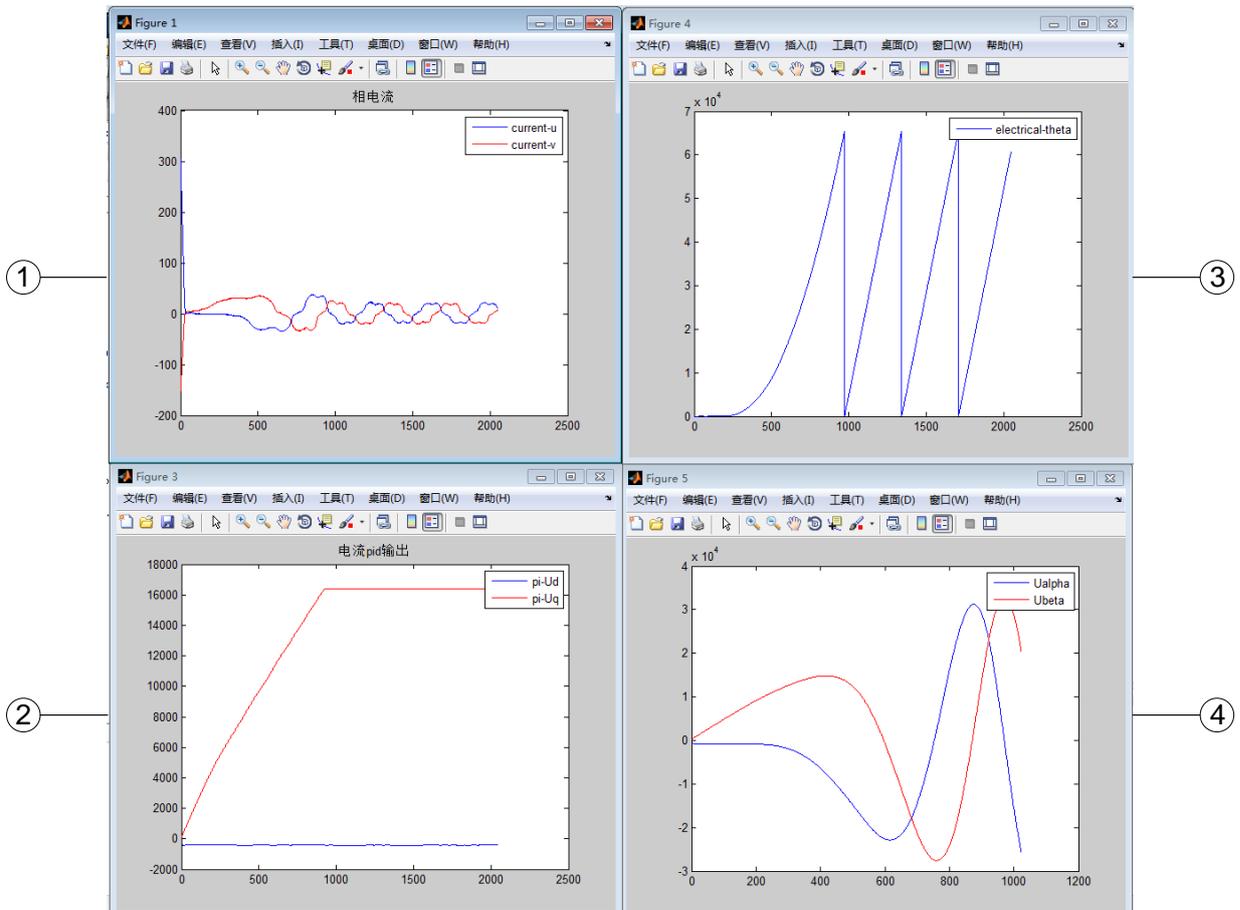


图 4-2 给出了绝对式编码器电机的电流环闭环过程。为了能在下一次更新 PWM 之前计算出 SVPWM 的结果，绝对式编码器启动转换的时刻位于 PWM 模块内部三角波计数器的头部（对应电流环 IP 中的输出端口 out\_pwm\_head\_sync），ADC 启动转换的时刻位于 PWM 模块内部三角波计数器的中部（对应电流环 IP 中的输出端口 out\_pwm\_peak\_sync）。

图 4-3 电流环闭环的相关波形图



- ① UV 两相电流
- ② 转矩 PI 控制器的输出
- ③ 电角度

④ Park 反变换的输出

图 4-3 给出了电流环闭环的相关波形图，其中转矩 PI 控制器的输出值限定为-16384~16383。

### 4.3 速度环闭环

图 4-4 速度环闭环

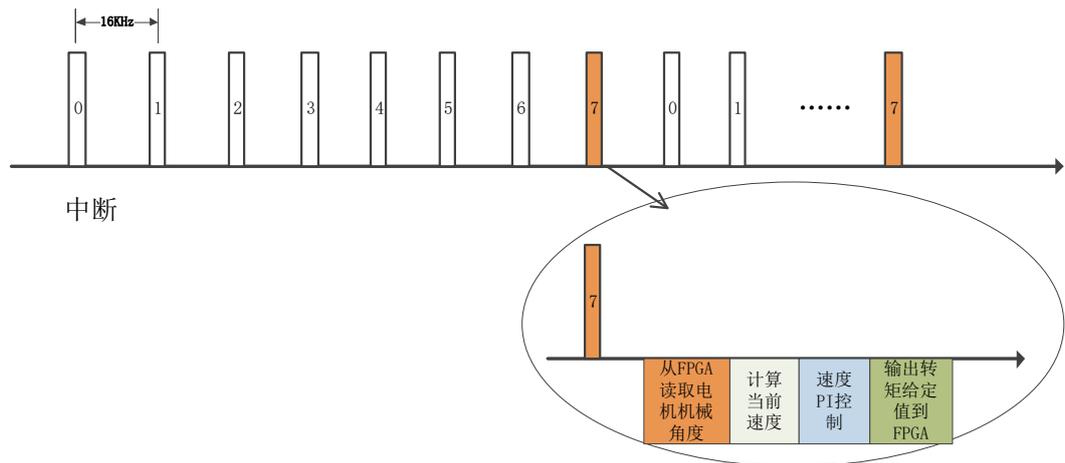
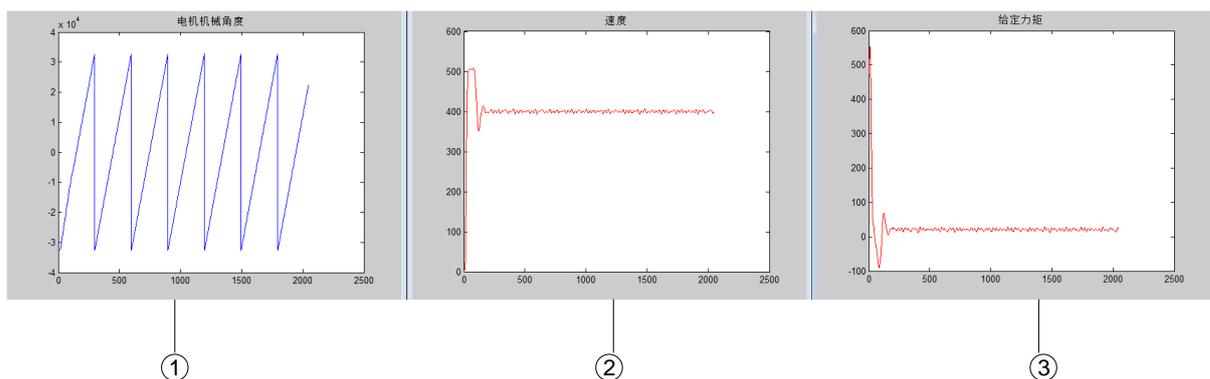


图 4-4 给出了 MCU 上的速度环闭环过程。MCU 的主频为 168MHz，中断频率为 16KHz，每计数 8 个中断（2KHz）后，进行速度环更新。首先，从 FPGA 读取当前的电机机械角度，与上次读取到的机械角度进行计算，得出当前速度；再根据速度给定值与当前速度的偏差进行 pi 控制，最后输出转矩给定值到 FPGA 侧。

图 4-5 速度环闭环的相关波形图



- ① 电机机械角度
- ② 速度
- ③ 转矩给定值

图 4-5 给出了速度环闭环的相关波形图。可以看出，速度为零时，给定力矩很大，随着速度提升，力矩慢慢变小，直到达到目标速度 400rpm。

在参考应用中，双环模式下（速度环+电流环），支持从串口输入速度指令来改变电机的速度，可从串口敲入“spd+回车”，再敲入“value+回车”（譬如，“300+回车”，代表目标速度为 300rpm），其串口波特率为 115200bps。

## 4.4 位置环闭环

图 4-6 位置环闭环

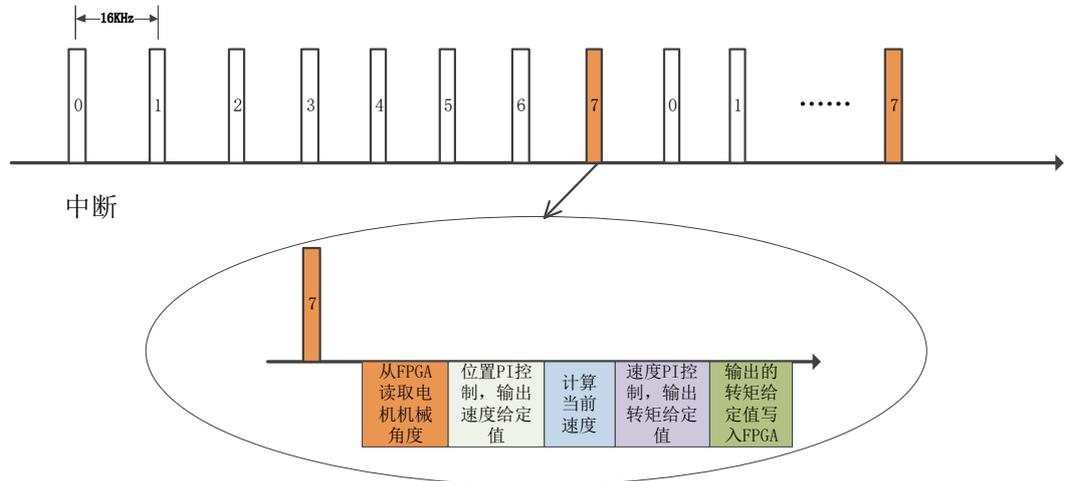
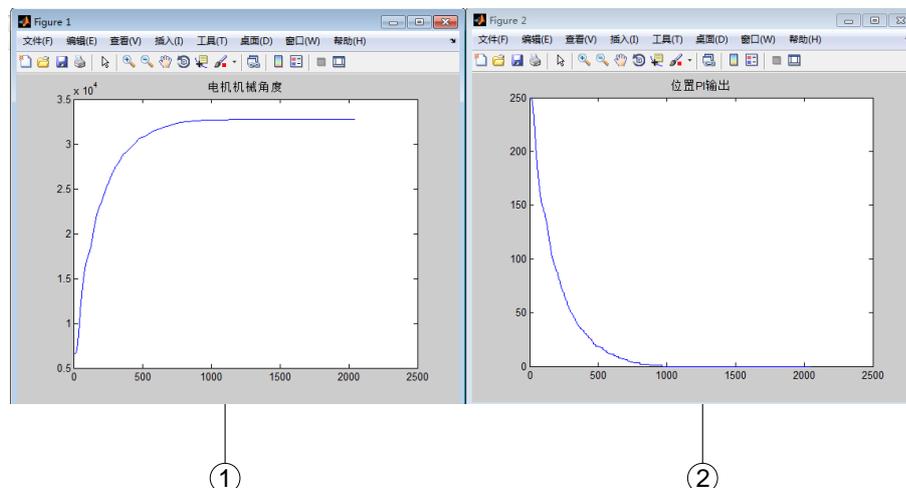


图 4-6 给出了 MCU 上的位置环闭环过程。MCU 的主频为 168MHz，中断频率为 16KHz，每计数 8 个中断（2KHz）后，进行位置环更新。

1. 从 FPGA 读取当前的电机机械角度；
2. 在根据当前的电机机械角度与目标位置的偏差进行 PI 控制，输出速度给定值；接着，根据当前的电机机械角度与上次读取到的机械角度，计算出当前速度；最后根据速度给定值与当前速度的偏差进行 pi 控制，输出转矩给定值并写入 FPGA 侧的电流环。

图 4-7 位置环闭环的相关波形图



- ① 电机机械角度
- ② 位置 PI 控制的输出

图 4-7 给出了位置环闭环的相关波形图。图中所示的目标位置为 PI，相当于 16bit 进度的电机编码器的 32768。一开始，距离参考位置较远，此时给定的速度会比较大，随着位置越来越近，会慢慢降速，直到到达参考位置，速度为 0。

## 4.5 消耗资源

参考设计中 FPGA 消耗资源如表 4-2 所示。

表 4-2 FPGA 所消耗资源

Logic	Register	BRAM	DSP
3061	2429	0	2

注！

FPGA 工作时钟 100MHz。

# 5 注意事项

- Demo 中控制单轴电流环需要 3K LUT，可根据实际情况进行容量选型，建议用 6K 或以上芯片都可以。
- Demo 中需一个 MCU（分立），建议单轴控制使用 Cortex-M3 或以上级别的。
- Demo 中采用 SAR 型 ADC 采集 U 和 V 两相电流，可根据具体需求修改为其他接口的 ADC 芯片，譬如 SIGMA-DELTA+滤波。
- Demo 采用 FSMC 并行接口总线，可根据具体情况来决定用并行接口还是串行接口。建议采用并行总线，FPGA 与 MCU 之间交互的数据内容不仅是电流环相关的，通常还会有其他信息。
- Demo 主要是针对有感 FOC，需电机编码器解析模块（绝对式/增量式）来获得位置反馈信息。

