Nation 国民技术

多BLDC电机磁场定向控制策略及解决方案



舒晓华：国民技术电机方案开发高级工程师

Confidential & Proprietary © 2020



01/ 国民技术股份有限公司

02/ FOC（磁场定向控制）理论基础

03/ 多FOC应用中的软件设计策略

04/ 国民技术多FOC的解决方案

05/ 快速搭建多FOC电机验证平台

Confidential & Proprietary © 2020

公司简介

Nation 国民技术

国民技术股份有限公司

2000年
成立

2010年
上市

20年
芯片技术经验

300077
股票代码



研发实力

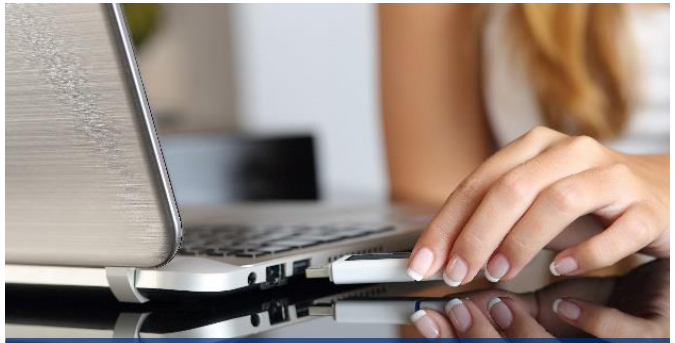
· 国家级博士后科研工作站
· 国家及地方领军人才3人
· 国际化研发团队
· 安全攻防实验室
· 丰富的设计经验
· 70%以上产品及研发人员

服务能力

· 累计芯片稳定供货超13亿颗
·提供从芯片到应用的整体解决方案
·本土化的技术支持团队

Confidential & Proprietary © 2020

主要产品



网络安全

UKey主控、OTP主控、金融支付终端主控、物联网安全芯片、版权保护芯片、设备认证芯片、RCC移动安全



MCU

安全、高集成度、高性价比、高可靠性、低功耗、简单易用



可信计算

PC、工控机、服务器、IoT设备



无线射频

BLE、NFC Reader、5.8G RF



人工智能

多核异构CPU、AI专用处理器



智能卡

银行卡、社保卡、居民健康卡、电子工商执照、残联卡、交通卡 ETC、旅行证件

Confidential & Proprietary © 2020

交付能力与产业链合作伙伴

与全球一流圆片和封测厂商建立战略合作伙伴关系，打造稳定、高质量产品

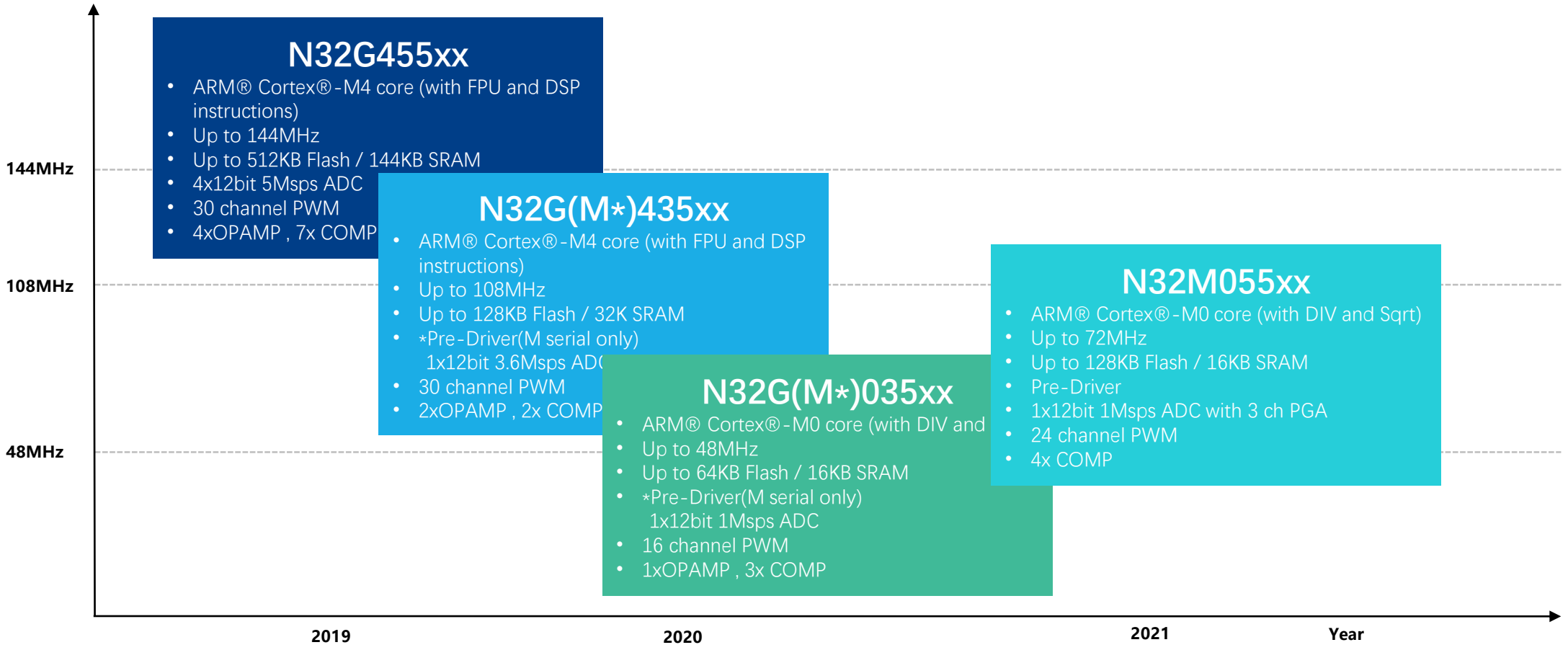
每一颗芯片都经过严谨的质量控制流程，确保合格交付

130 000 万+颗
已累计出货

15 000 万颗
年交付客户

Confidential & Proprietary © 2020

电机控制MCU Roadmap



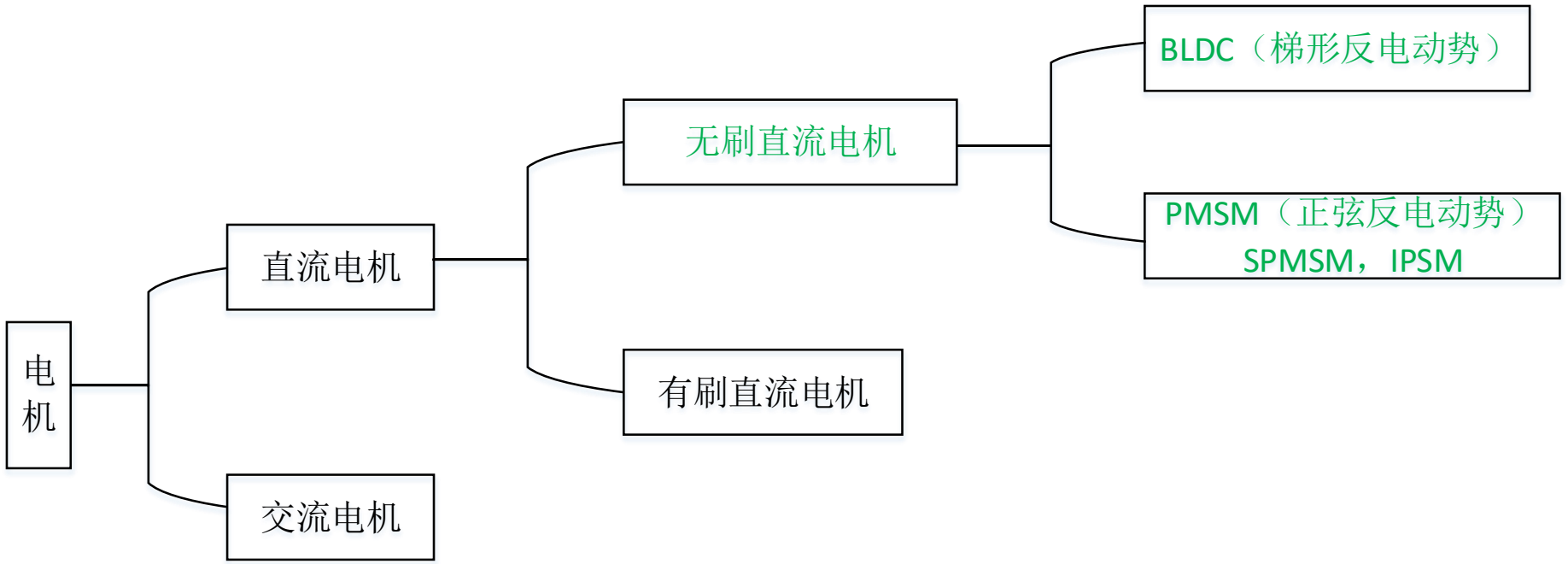
Confidential & Proprietary © 2020



FOC（磁场定向控制）理论基础

Confidential & Proprietary © 2020

电机分类

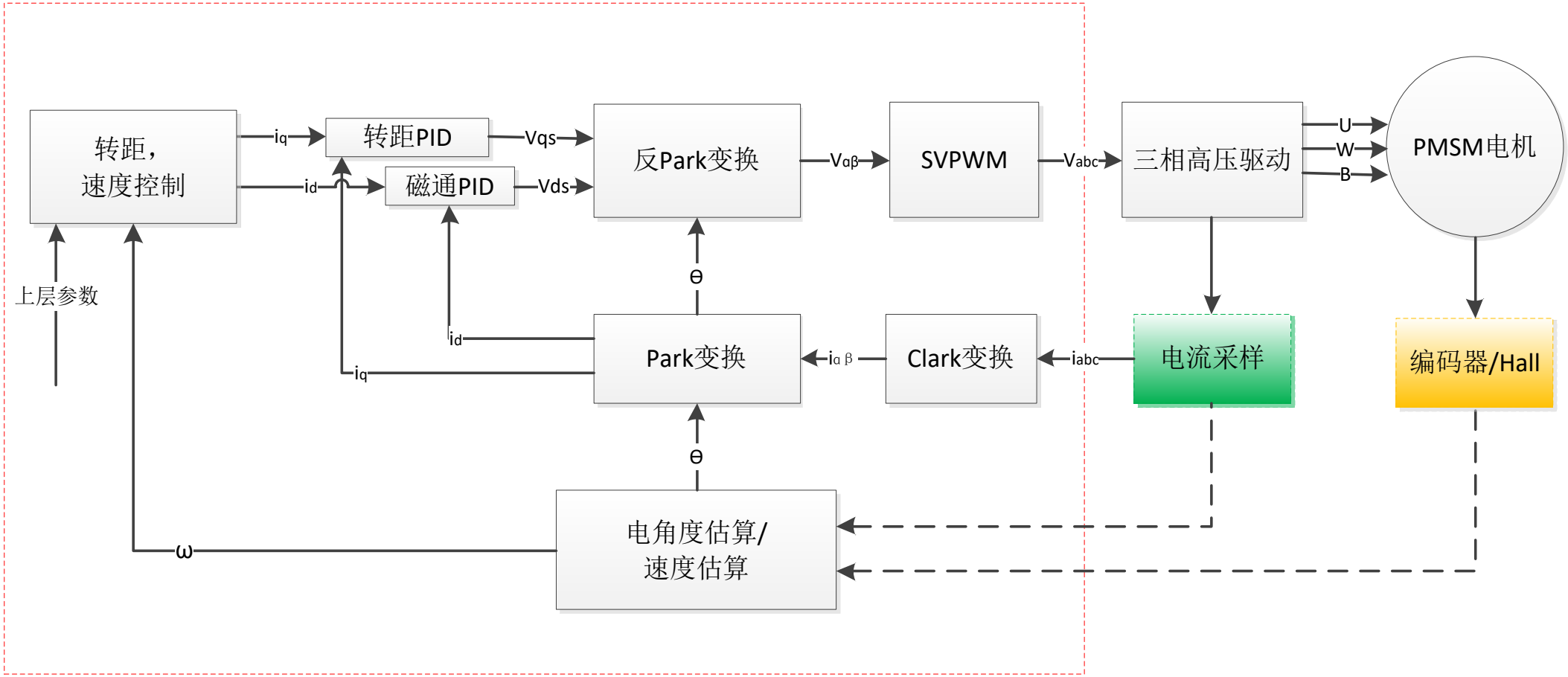


有刷直流电机的特点：

- 定子上安装有固定的换向器， 故障多， 维护工作量大，噪声较大无刷直流电机的特点
- 用电子开关器件代替换向器，可靠性高，噪声低等优点
- 无感控制技术中，极对数，相电阻，相电感，相磁链成为重要参数

Confidential & Proprietary © 2020

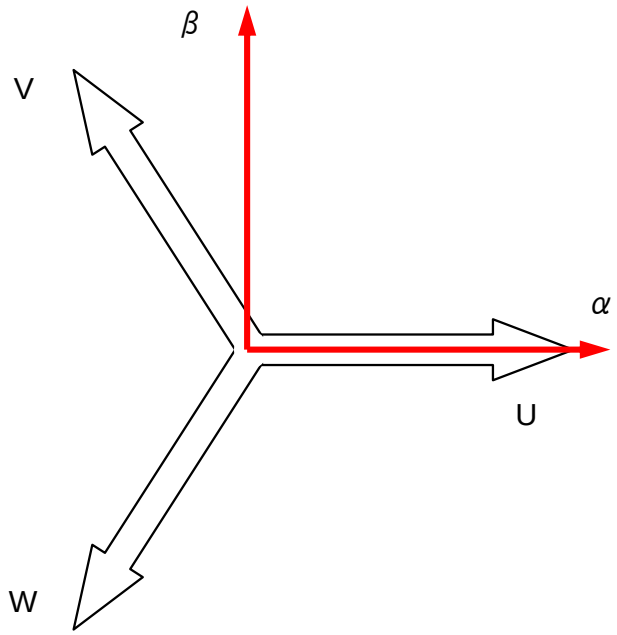
FOC理论框架



- 坐标变换
- PI(D)控制
- 电角度计算（无感，有感）
- 电流采样（非核心理论，但很重要）

Confidential & Proprietary © 2020

坐标变换



Clark变换实现UVW → αβ变换

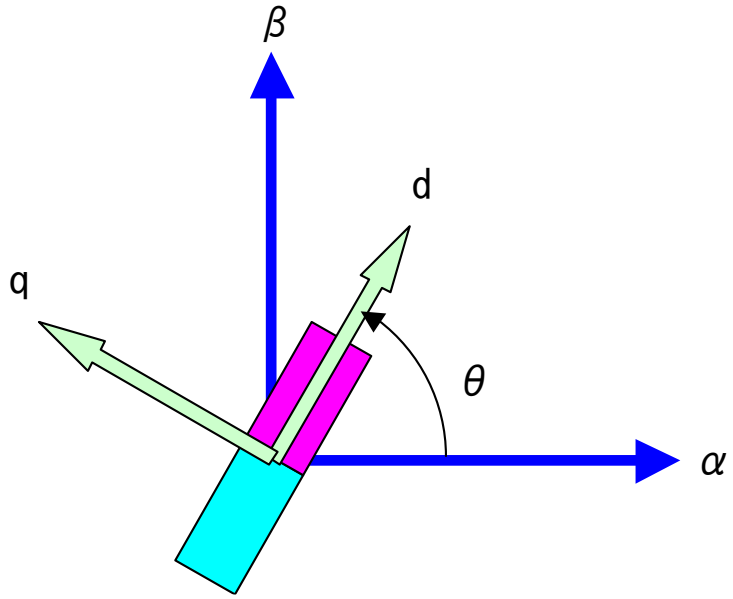
$$i_\alpha = i_u$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_u + 2i_v)$$

$$i_u + i_v + i_w = 0$$

Confidential & Proprietary © 2020

坐标变换



Park变换实现αβ → dq变换

转子同时旋转的2相线圈d、q分别加入电流Id、Iq 获取相同磁场，此时Id、Iq可以根据以下公式计算。

$$i_d = \cos\theta \cdot i_\alpha + \sin\theta \cdot i_\beta$$

$$i_q = -\sin\theta \cdot i_\alpha + \cos\theta \cdot i_\beta$$

Park逆变换实现dq → αβ变换

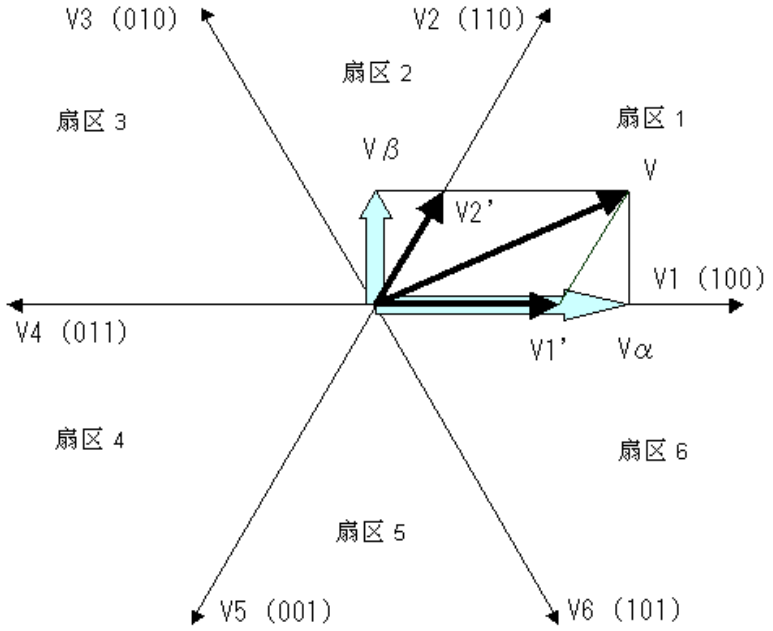
$$V_\alpha = \cos\theta \cdot V_d - \sin\theta \cdot V_q$$

$$V_\beta = \sin\theta \cdot V_d + \cos\theta \cdot V_q$$

Confidential & Proprietary © 2020

Nation 国民技术

SVPWM为Clark逆变换实现αβ → UVW变换



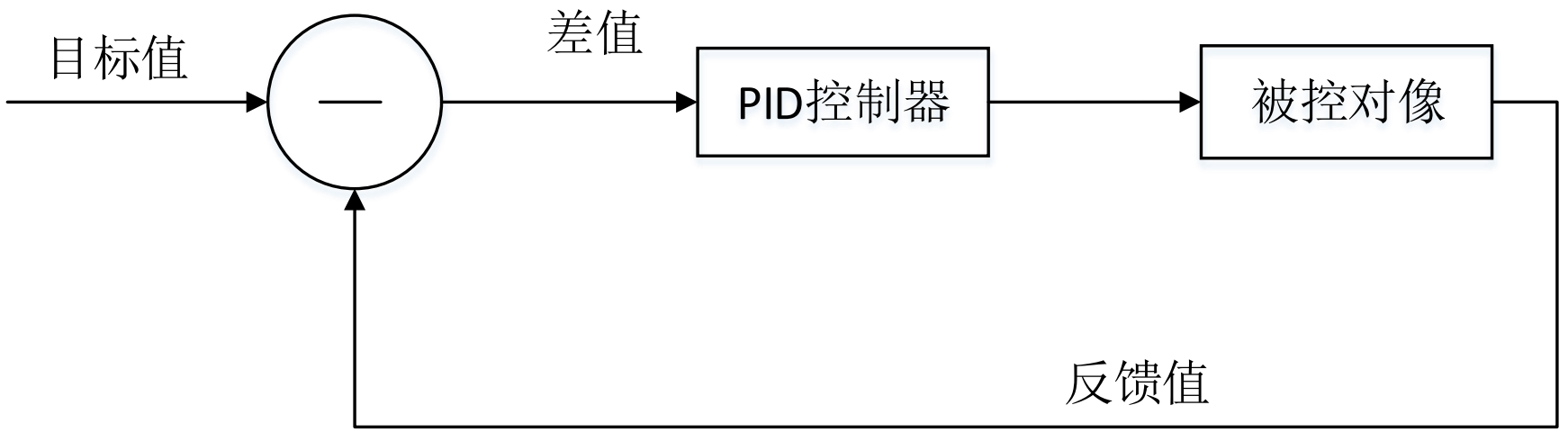
$$U_1 = U_\beta$$

$$U_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}$$

$$U_3 = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2}$$

Confidential & Proprietary © 2020

PI(D)控制



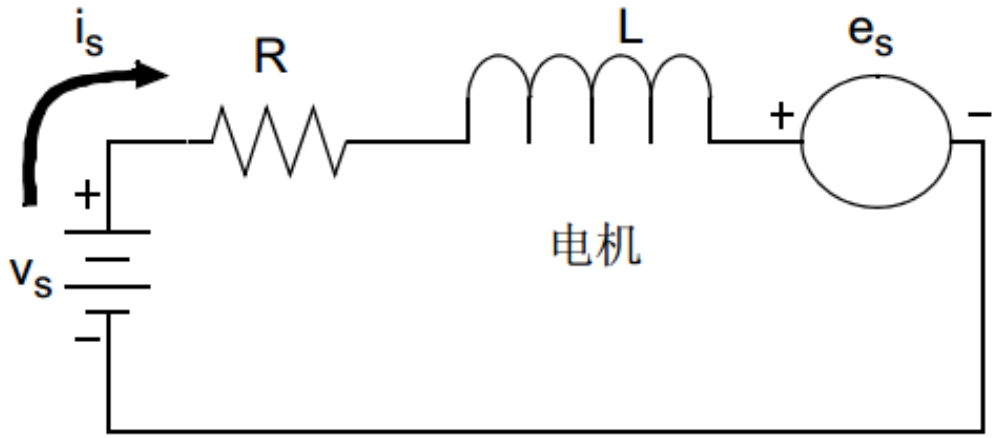
在FOC电机控制中，电流环，速度环控制一般使用PI进行控制，PI控制的 基本算法如下：

操作量 = 比例项 + 积分项
比例项 = KP × 偏差
积分项 = KI × TS ×(偏差的积分)
= KI × TS ×偏差 + (1个控制周期前的积分项)
KP: 比例增益
KI: 积分增益
TS: 控制周期

PI(D)本质是实现误差控制误差

Confidential & Proprietary © 2020

无感位置估算（SMO）



电机模型

数字化电机模型公式

$$V_s = Ri_s + L\frac{d}{dt}i_s + e_s$$

Is:电流矢量

Vs:电压矢量

es :反电动矢量

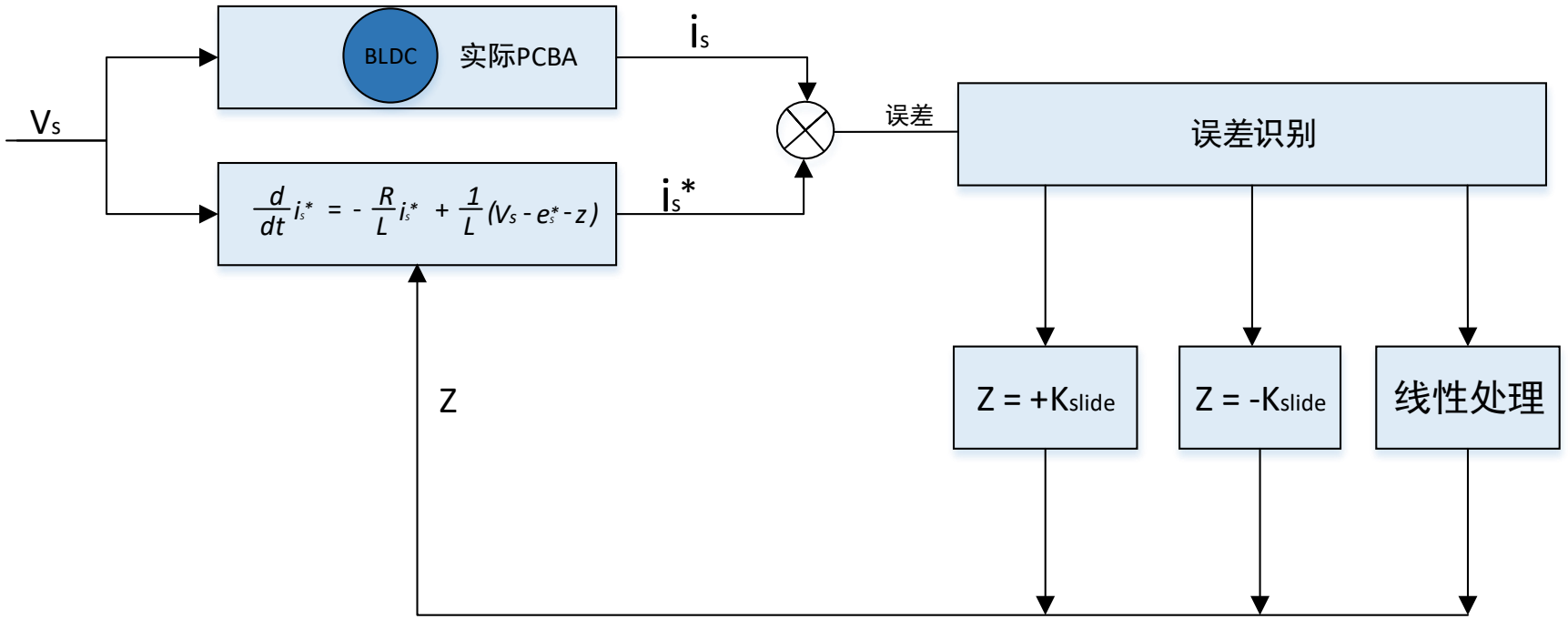
R :绕组

L :绕组电感

Ts :控制周期

Confidential & Proprietary © 2020

无感位置估算（SMO）

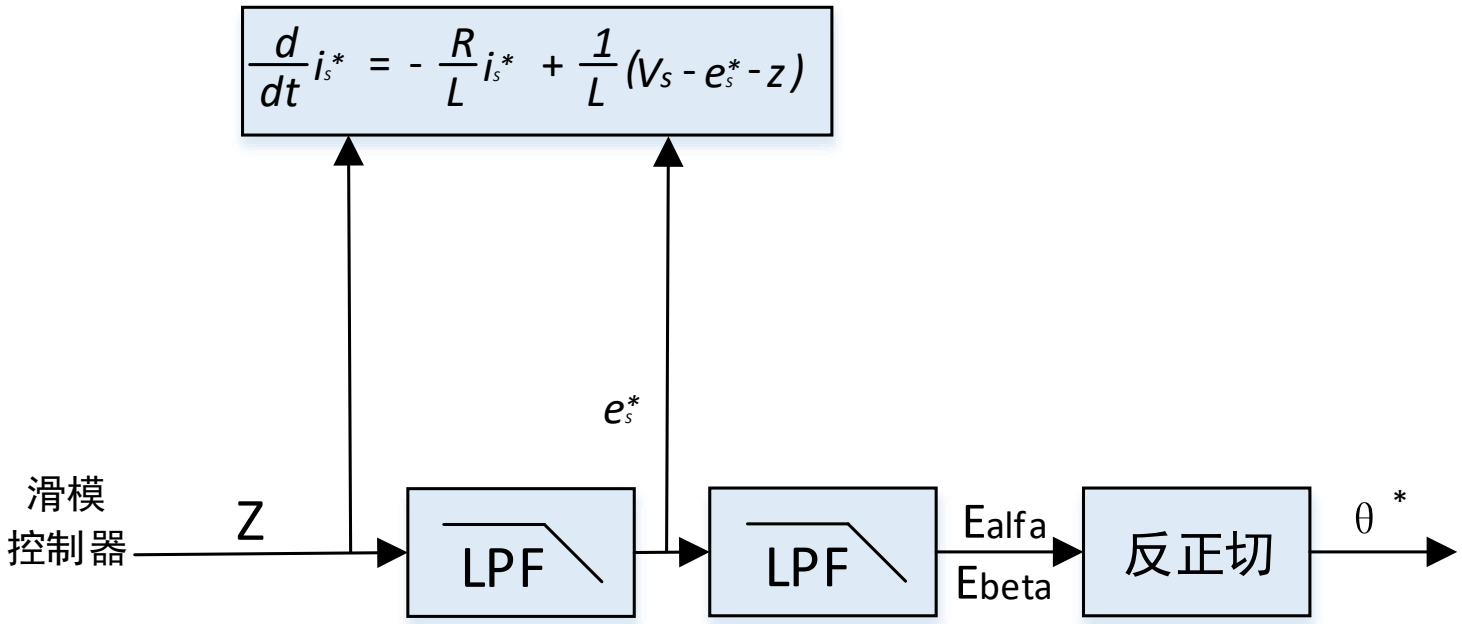


对电机模块进行变换，得到电流观测器模型

根据电流模型的值和反馈的电流值进行差值判断，不断调整参数使误差最小

Confidential & Proprietary © 2020

无感位置估算（SMO）

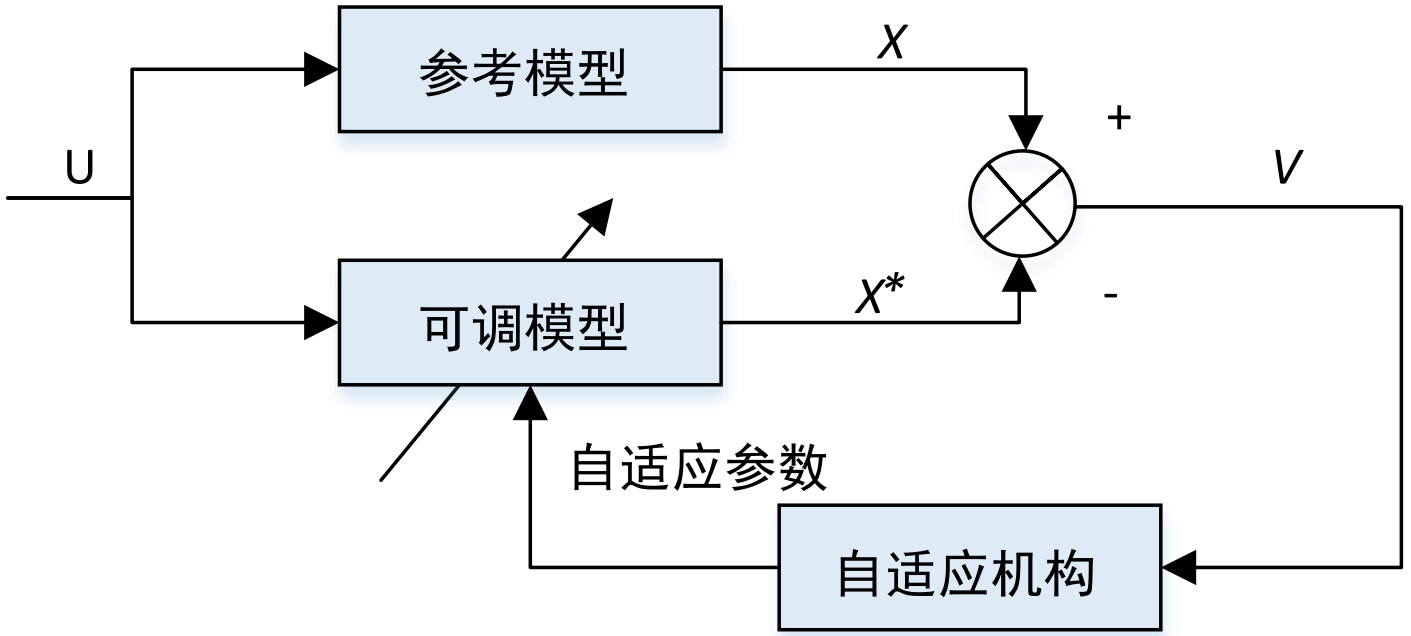


有了SMO电流观测器，就可以进行反电动势进行估算

国民技术电机套件提供的SMO反电势估算具有数字化相位补偿。电机模型的输入电压(Vs)和电流（is*）与数字化电机模型中的值相同。一旦对数字化模型补偿完后，下一步通过校正因子（Z）滤波来估算反电动势（e_s^*），随之反电势的估算值（e_s^*）反馈给数字化电机模型，以便于在每个控制周期之后对变量(e_s^*)进行更新，Ealfa和Ebeta用于估算角度θ*。

Confidential & Proprietary © 2020

无感位置估算（MRAS）



在模型参考自适应系统中，参考模型中不含待估算参数，可调模型中含有待估参数，两者模型中有共同矢量。两者由相同的外部输入U所激励，*X*与*X**分别是参考模型和可调模型的状态矢量，两者为同一矢量。计算出参考模型与可调模型中共有矢量的差值矢量 *V*后，由自适应机构来修改可调模型中的参数（增益，速度等），使可调模型中的状态矢量趋近于参考模型中的状态矢量，也就是使共有矢量的差值趋近于零，最终达到速度观测的目的。

Confidential & Proprietary © 2020

无感位置估算（MRAS）

国民电机套件选择用波波夫稳定性理论（MRAS）的设计方法，具有如下优点：

- **调试参数少**

基于国民电机套件提供的开发板，调试一款新的电机，仅需确认电机相电阻R_S，电机相电感$R_{L,}$电机磁链F_S。

- **低速观测性能好**

采用N32G455的内置运放(OPAMP)的电机开发板，可以用软件灵活配置内置运放的放大倍数，实现在1Hz下的速度观测。

- **直接闭环起动**

国民电机套件提供的MRAS无需开环拖动，起动力矩大，电机适用能力强，当前已经在几十款电机上进行了直接闭环启动测试，都有良好的表现。

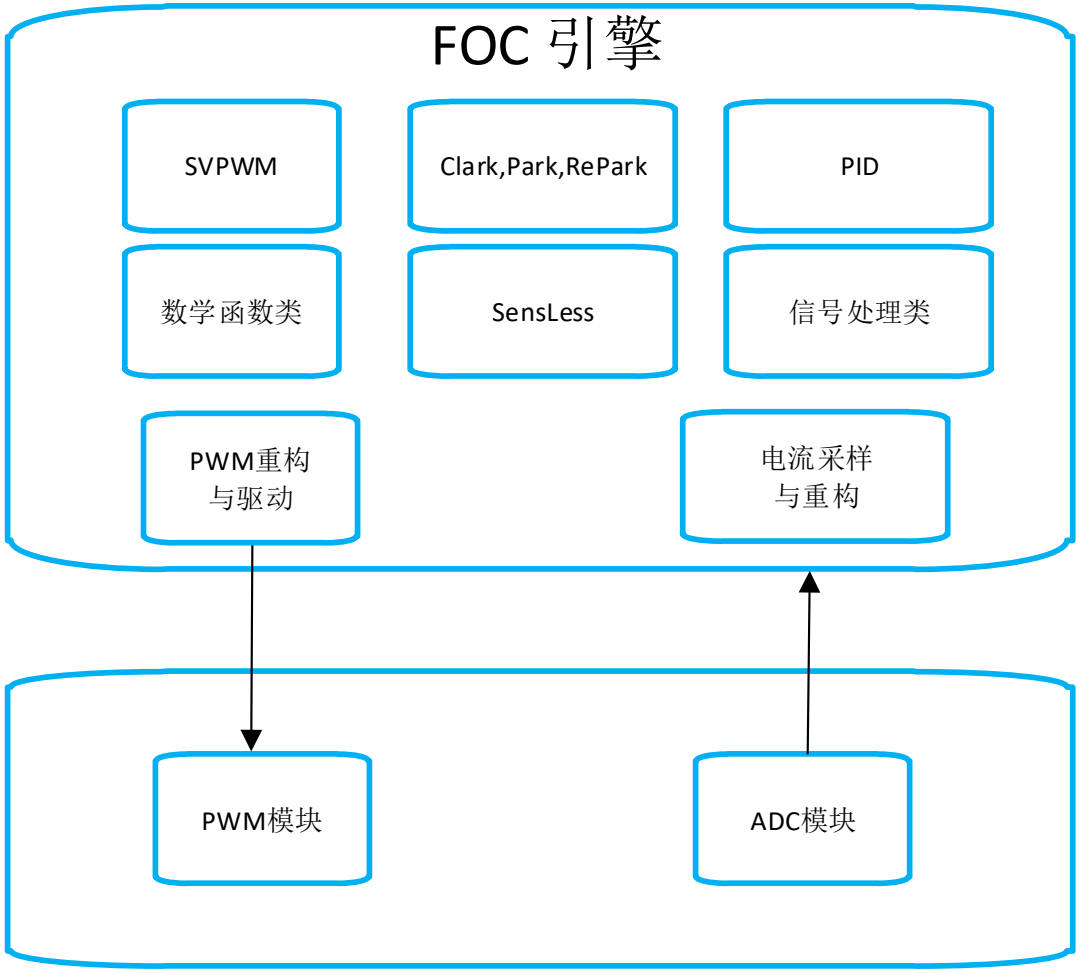
Confidential & Proprietary © 2020



多FOC应用中的软件设计策略

Confidential & Proprietary © 2020

FOC框架的软件抽象



FOC引擎的设计原则

- **独立地提供方法库**

  只占用FLASH，不占用RAM

- **统一的属性资源分配**

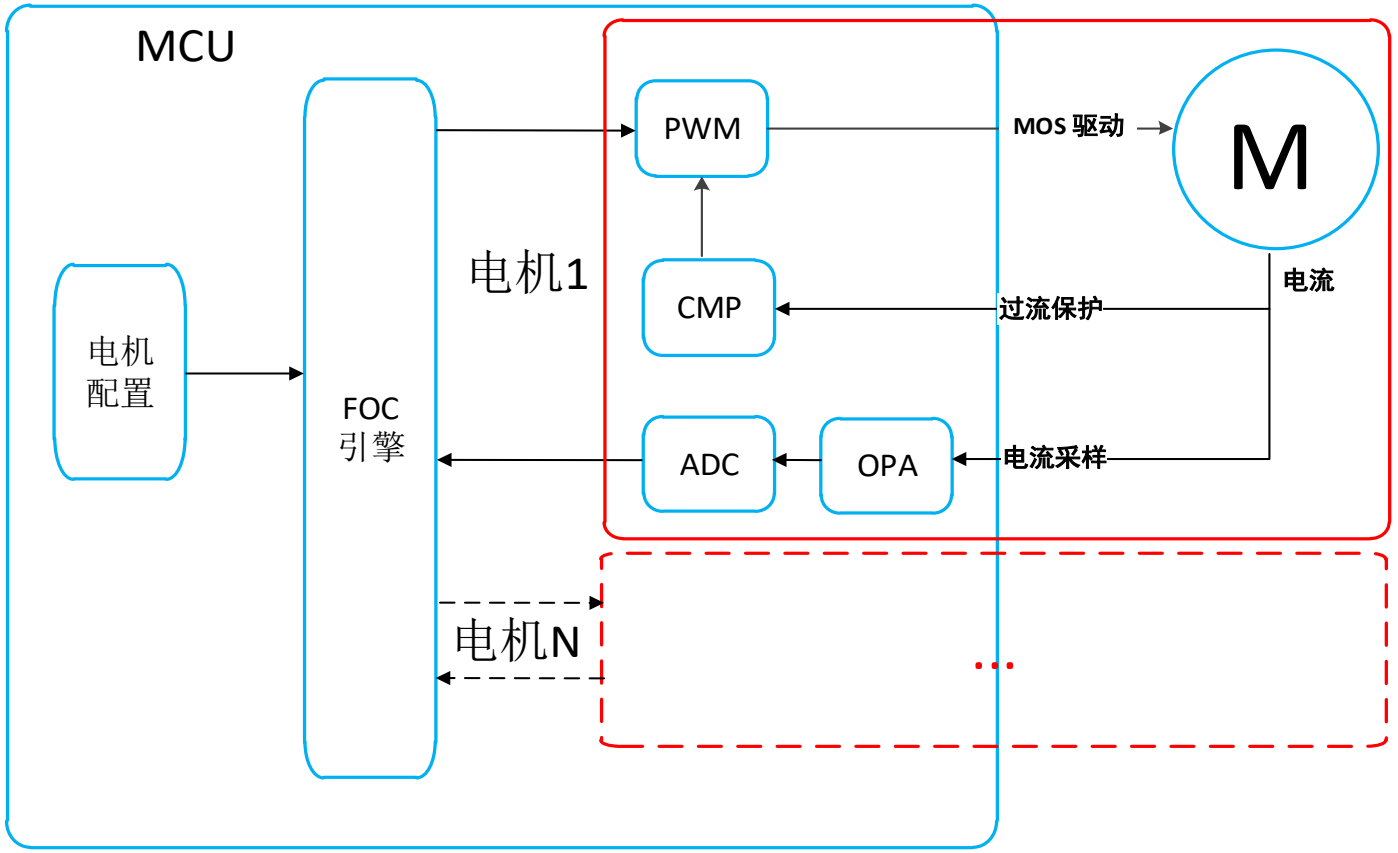
  RAM统一管理

- **面向对像的设计方法**

  支持方法的重用

Confidential & Proprietary © 2020

FOC引擎接口设计原则



FOC引擎结构化接口

- 提供标准的PWM的接口
- 提供标准的ADC的接口
- 支持电机静态配置接口
- 支持电机动态配置接口

Confidential & Proprietary © 2020

FOC软件模块设计的重难点

FOC核心依赖是转子的电角度计算，以国民技术电机套件为例

- 无感SMO
- 无感MRAS
- 有感HALL

FOC的电流重构方法，以国民技术电机套件为例

- 双电阻电流采样
- 单电阻电流采样（需重构PWM输出波形）

Confidential & Proprietary © 2020

电角度计算设计要点

Nation 国民技术

为了支持多FOC，转子电角度计算方法需统一的接口如下：

- 初始化函数void xxx_Init(Struct *Pst);
- 角度计算函数uint16_t xxx_CalcAngle(Struct *Pst);
- 速度计算函数uint16_t xxx_GetSpeed(Struct *Pst);

Confidential & Proprietary © 2020

电角度计算设计要点示例

Nation 国民技术

国民技术电机套件，电角度计算接口函数示例

转子位置计算方法	SMO	MRAS	HALL
初始化	Smo_Para_init(Smo_Obj *Data);	Para_init(Al_Data_t *Data);	Hall_Para_init(Hall_Obj *Data);
角度计算	Smo_Angle_Calc(Smo_Para_t *Para,Smo_Obj *Data);	Angle_Calc(Motor_Para_t *Para,Al_Data_t *Data);	Hall_Angle_Calc(Hall_Para_t *Para, Hall_Obj *Data);
速度计算	Get_Smo_Speed(Smo_Obj *Data);	Get_Speed(Al_Data_t *Data);	Get_Hall_Speed(Hall_Obj *Data);

注：以上内容仅供参考，随着版本的跌代，命名会改变，保持功能一致

Confidential & Proprietary © 2020

电流重构设计

Nation 国民技术

电流重构模块，支持不同的电流采样

- 3相电流（eg:3电阻）
- 2相电流（eg:2电阻）
- 1相电流（eg:1电阻）

目标：

FOC引擎具有统一的电流采样接入，不同的电流采样重构成相同的数据接口，传入FOC引擎

Confidential & Proprietary © 2020

多FOC电机应用中的MCU选型考查点

考查点	要求	说明
ADC数量	1路FOC电机最好有1个独享的ADC	方便支持不同载频的需求
PWM数量	1路FOC电机最好有1个独享的PWM模块	
OPAMP数量	内置OPAMP可以简化BOM，提高稳定性	可以提高集成度 支持PGA模式可以进一步简化BOM
MCU主频	成本可控的情况下，主频越高越好	确保的最高载波下，FOC运算不会超时

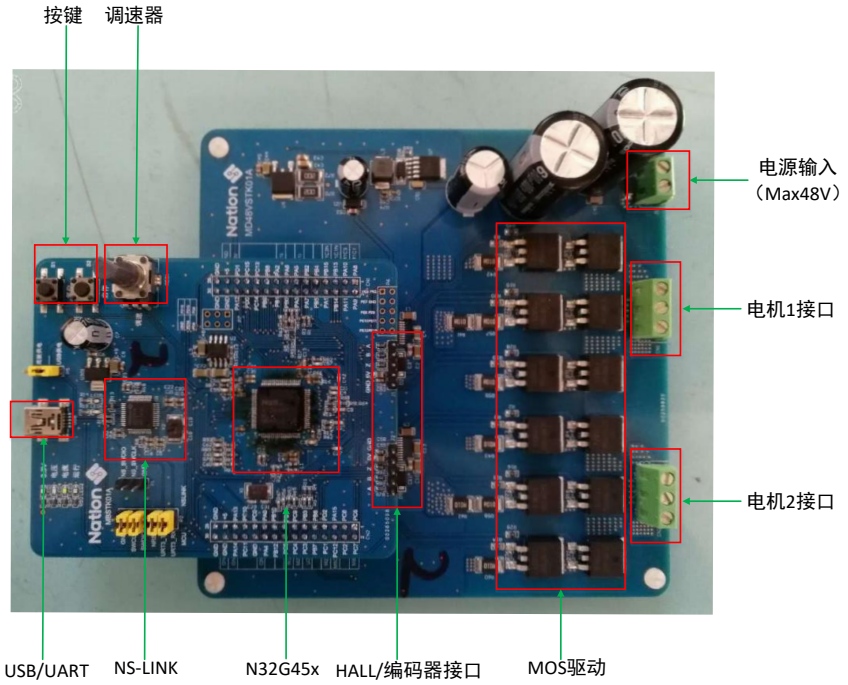
Confidential & Proprietary © 2020



国民技术多FOC的解决方案

Confidential & Proprietary © 2020

国民技术多FOC电机控制解决方案



双FOC电机控制

评估套件

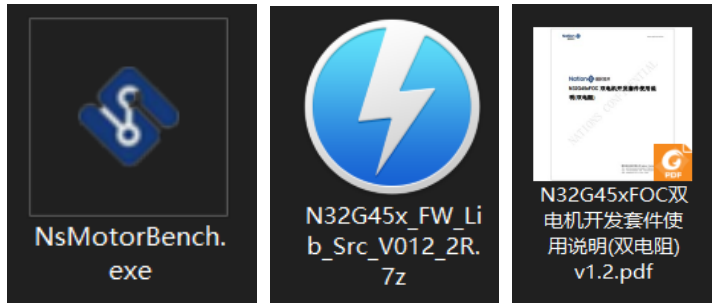
(基于N32G455系列)



空调(室外机)

参考设计

(基于N32G455系列)



工具　　固件　　文档

Confidential & Proprietary © 2020

N32G455系列芯片主要指标

- **高达144MHz**的高性能32位ARM Cortex-M4F处理器，支持硬件乘除法运算，浮点运算，DSP运算指令
- **高达6.9ns**的PWM控制精度，至多12路互补带死区时间控制和刹车控制的PWM输出
- **高达4**个独立的5Msps的12bit ADC(模数转换器)，支持PWM定时器连动自动触发采样
- 内置最多**4个轨道轨OPAMPMP**(运算放大器)，支持内置可编程增益放大（PGA）
- 内置最多**7个快速比较器**，内部与PWM模块联动，快速响应刹车事件
- 对于有感电机支持编码器输入接口
- 提供LQFP48/64/80/100多种封装

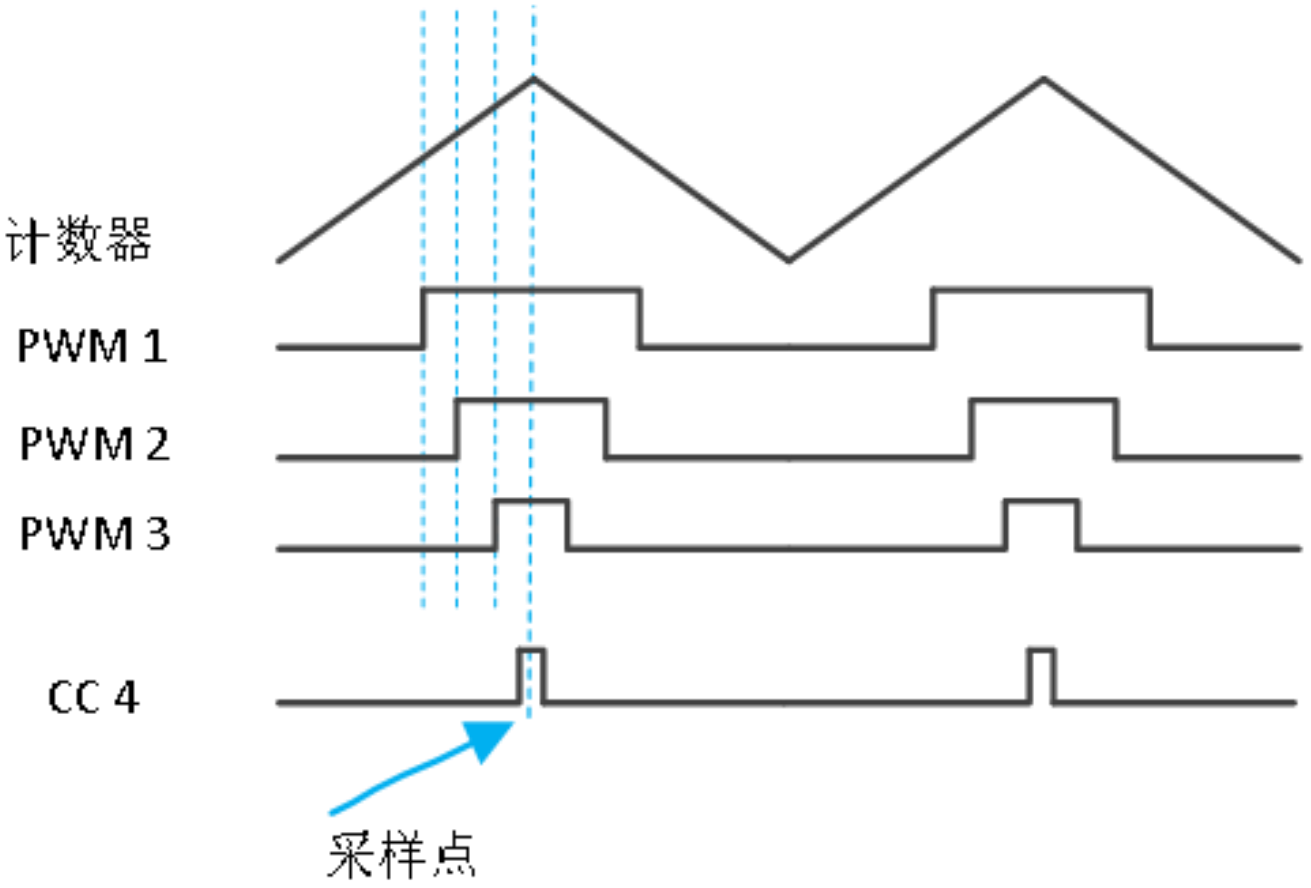
Confidential & Proprietary © 2020

N32G455系列芯片对多FOC的支持

考查点	要求	国民技术解决方案	说明
ADC数量	1路FOC最好有1个独享的ADC	**4**	支持不同载频的多电机控制
PWM数量	1路FOC最好有1个独享的PWM模块	**6**	可以支持多电机控制
OPAMP数量	内置OPAMP数量是加分项	**4**	可以提高集成度 支持PGA模式可以进一步简化BOM
MCU主频	成本可控的情况下，主频越高越好	**144MHz**	--
公版基础方案	FOC框架具有可扩展性	**最高支持4FOC**	来源于原厂的方案，或方案公司的基础版本，或自有方案
角度计算（观测器）	支持多种角度计算模块 且接口标准统一，易于后期更新	**SMO, MRAS, HALL**	需方便局部功能的更新，替换，而不是重新方案选型
电流采样	支持单电阻，双电阻等 且接口标准统一	**单电阻，双电阻**	在不增加额外器件的情况下，可以支持单电阻或双电阻采样的多电机控制
单次FOC计算周期	根据电机转速确定最高载波 根据FOC电机数据，考核MCU运算能力	**最小仅需10.1微秒**	确保FOC运算不会超时

Confidential & Proprietary © 2020

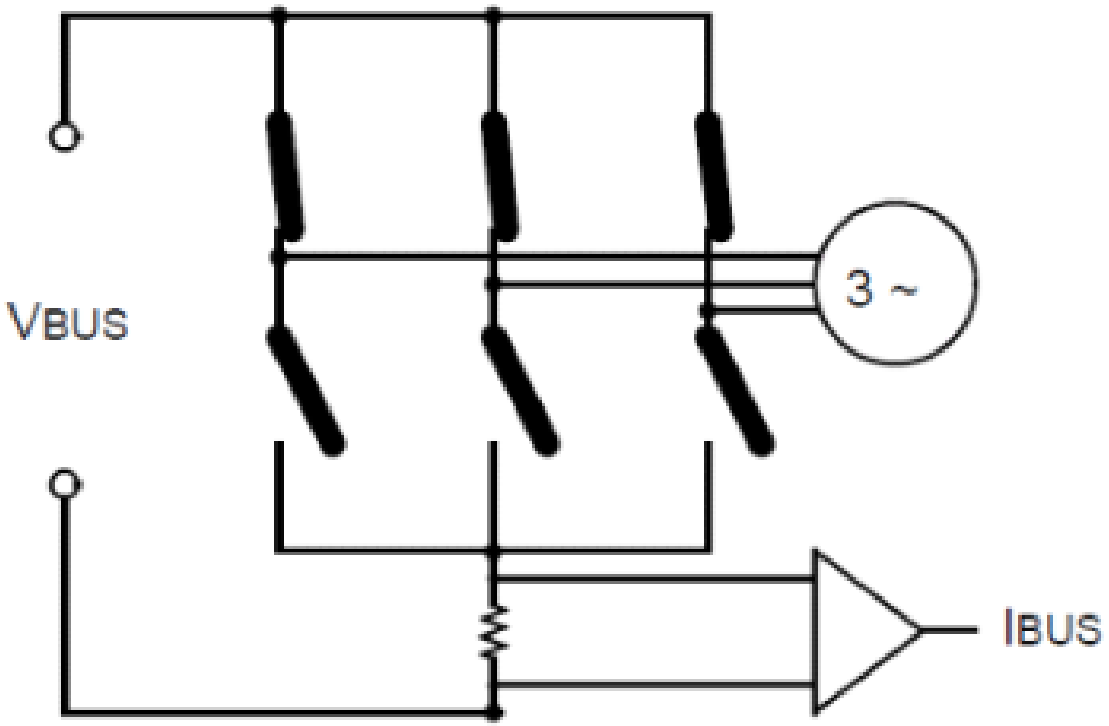
电流采样与重构1/3(双电阻电流采样)



- 具有1个可自由配置的，同步于PWM输出的触发信号CC4
- ADC多种触发源
- ADC具有5M SPS，更容易容易计算采样点
- 双ADC对相电流并行采样，提高采样电流精确度

Confidential & Proprietary © 2020

电流采样与重构1/2(单电阻电流采样)



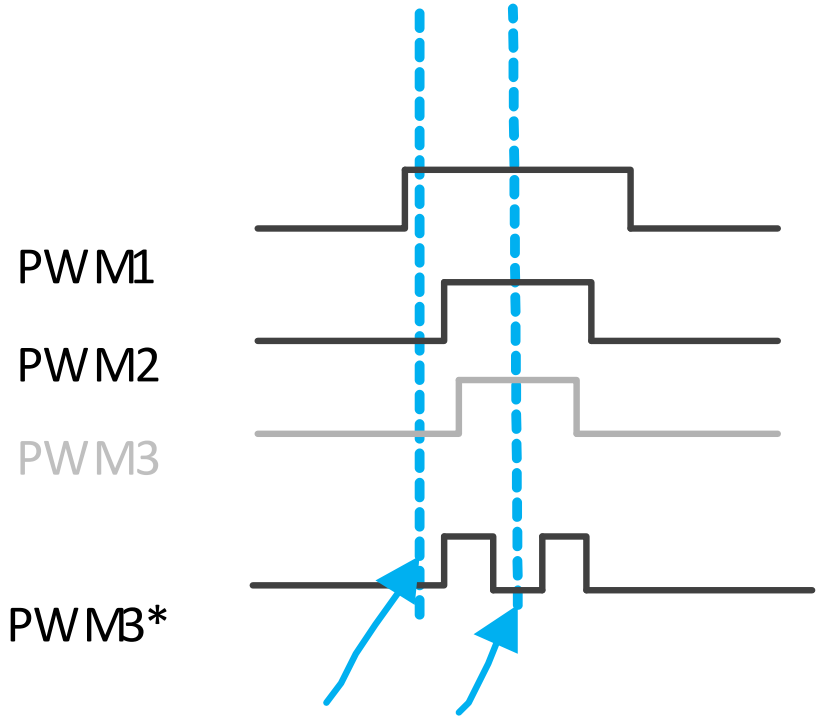
- 1个采样电阻，1个运放，1个ADC，1路FOC
- OPAMP可以工作在PGA模式，减少外部电阻

Confidential & Proprietary © 2020

电流采样与重构1/3(单电阻电流采样)

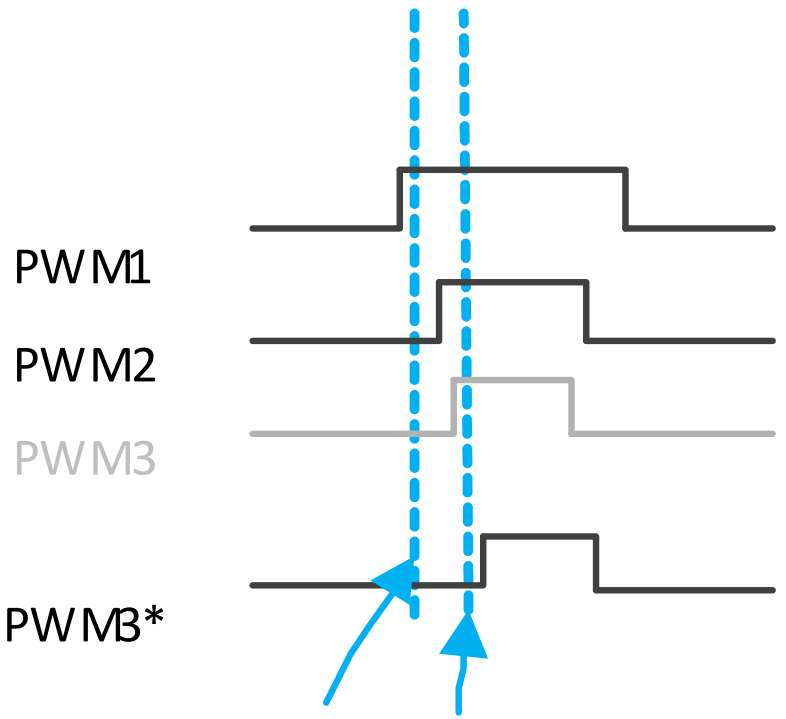
Nation 国民技术

挖补法



移相法

国民技术电机套件采用移相法



Confidential & Proprietary © 2020

电流采样与重构的优势总结

更高效率的电流采样与重构机制

- N32G455系列芯片内置5M SPS的ADC，采样窗口最小值仅需200n秒，在双电阻采样模式下，可以逼近100%的调制深度，提高母线电压利用率。
- 双电阻模式，电流重构计算量小，多FOC电机应用中节约计算资源

更高的相电流采样精度

- 4个ADC独立使用，或ADC1和ADC2，ADC3和ADC4构成同步采样，同步采样提高相电流的采样精度

可控的电流采样窗口

- ADC受PWM事件和定时事件的触发，确保ADC能同步于PWM进行采样，使采样窗口完美地避免干扰

更灵活的电流采样方式

- N32G455系列芯片多达4个独立的前置运算放大器，可以工作在PGA模式，放大倍数支持多级可编程设置。促使在多FOC应用中电流采样增益灵活控制

Confidential & Proprietary © 2020

PWM重构的优势总结

更精细的输出电流控制

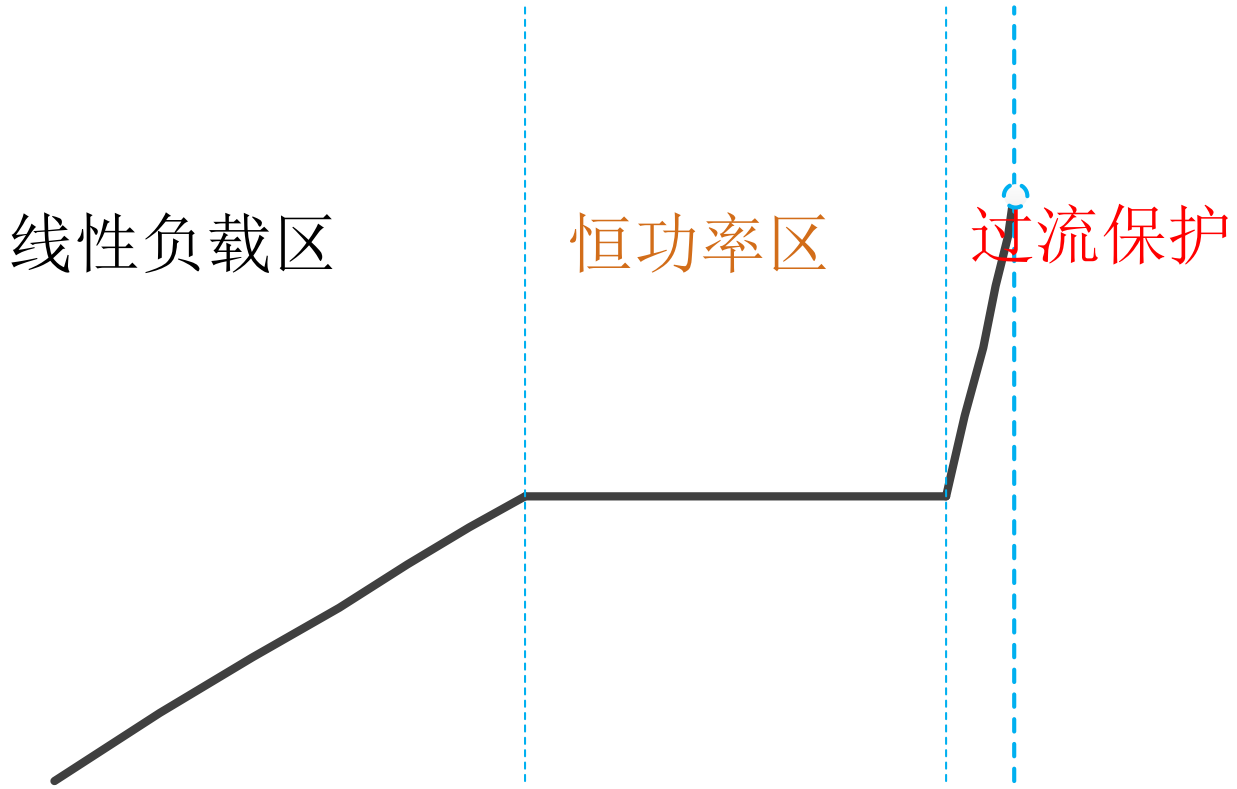
- 高达144MHz的PWM输入时钟，在更高载波的情况下，提供更细腻的电流输出控制
- PWM频率 = FOC载波 * 速度分辨率

更灵活的PWM配置

- 可配置的延时生效或即时生效模式
- 延时生效，使PWM输入是连续的稳定的
- 即时生效，可以方便的生成异形PWM波形，适合单电阻采样时PWM移相

Confidential & Proprietary © 2020

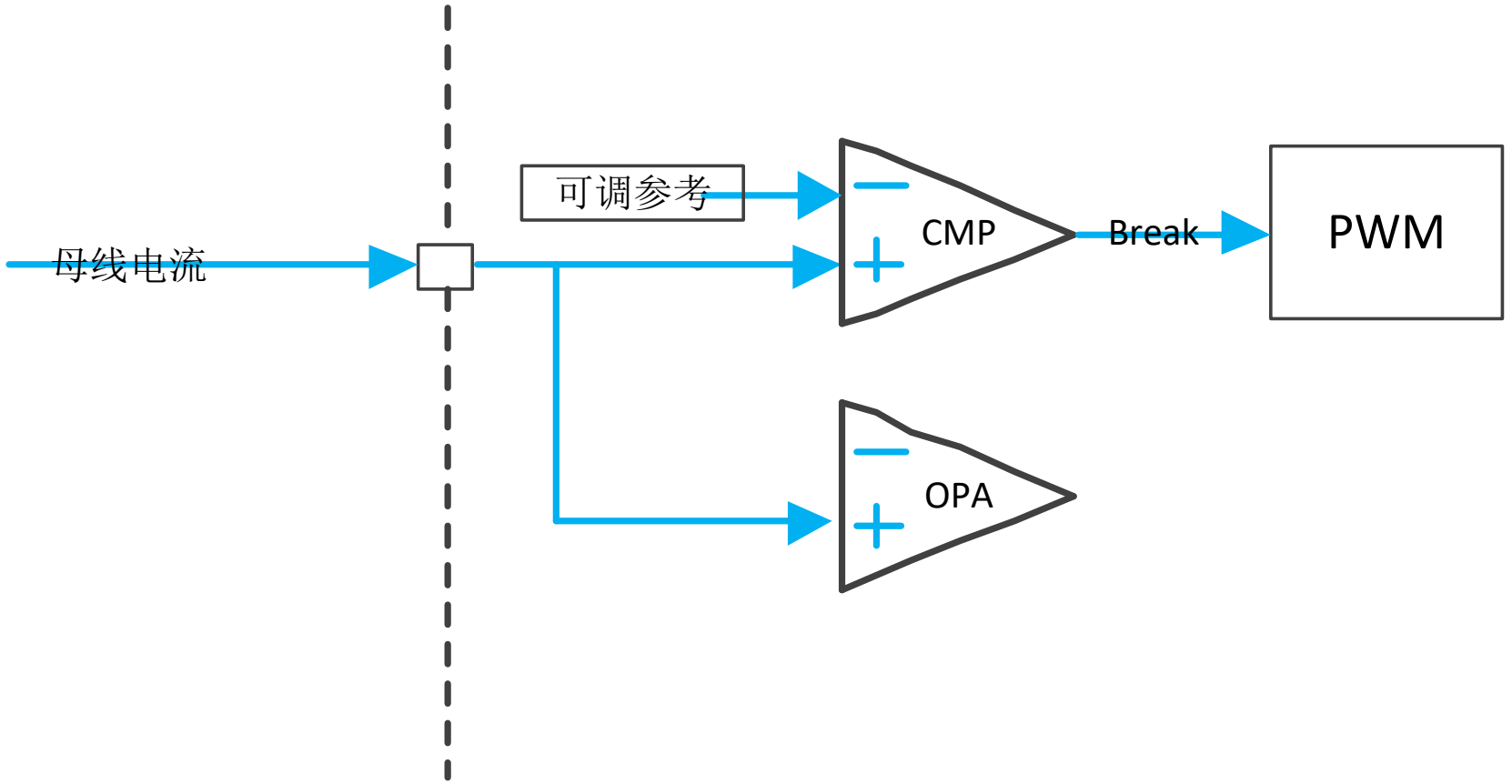
多种策略的过流保护方式



- 基于ADC过流保护，时效性是：**1/PWM载波周期**
- 基于比较器+软件中断，时效性是：**进出中断的时间花费**
- 基于比较器+直接对PWM进行刹车,时效性是：**硬件直接控制**

Confidential & Proprietary © 2020

内置硬件级的快速刹车机制



- 输入到芯片内部的电流信号直接进入电压比较较，比较器作为一个内部模块，检测过流情况，不占用IO资源

Confidential & Proprietary © 2020

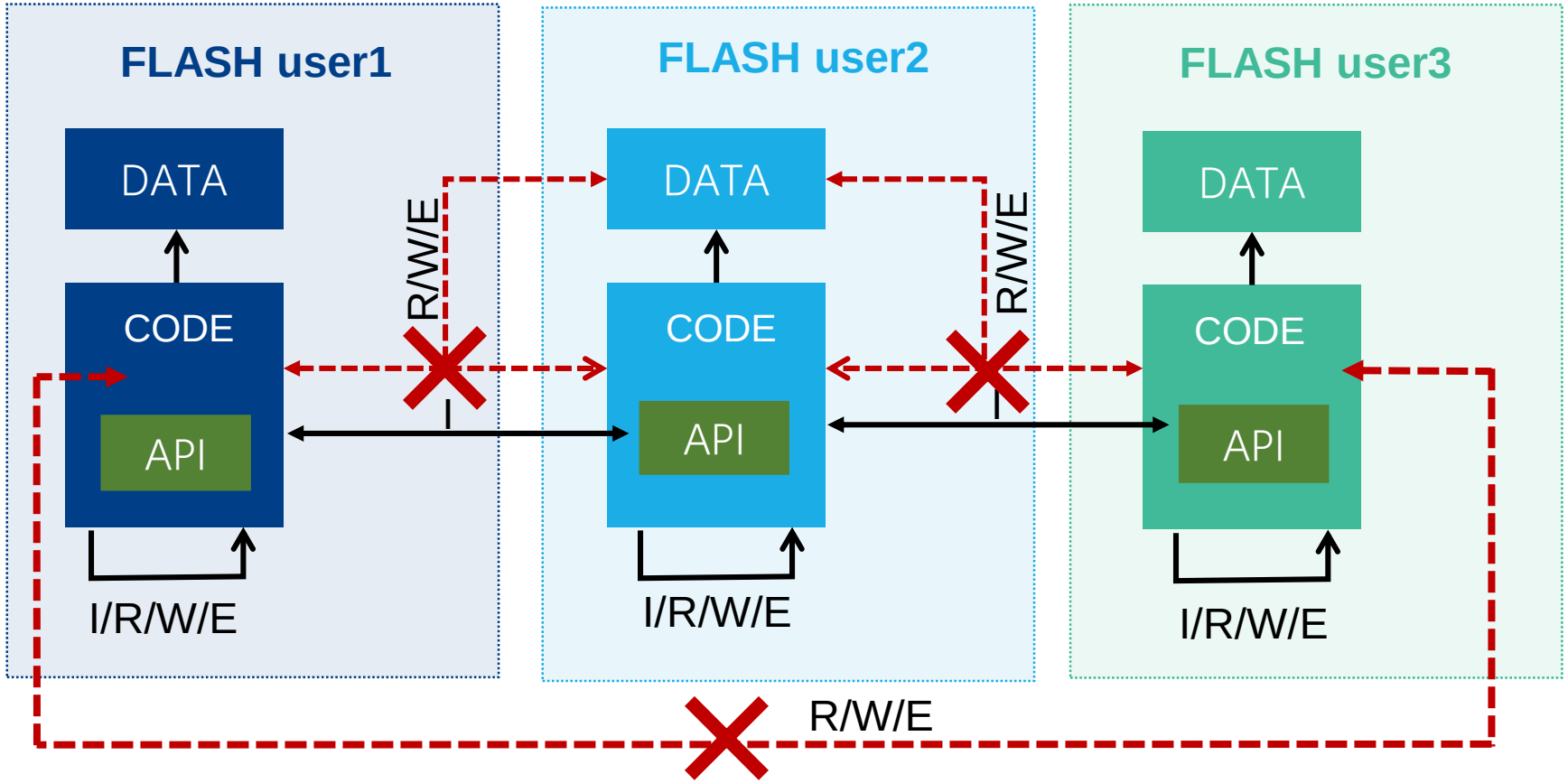
提供多种异常状况下的保护功能



- 软件断点下的刹车
- 总线异常（HardFault）下的刹车
- 电压不稳下的刹车
- 时钟不稳下的刹车

Confidential & Proprietary © 2020

核心算法硬件级防护



I：可调用API

R：可读

W：可写

E：可擦除

防COPY/防篡改/防擦除

Confidential & Proprietary © 2020

无感算法FOC的性能指标

无感算法	FOC指标（SMO）	FOC指标（MRAS）
算法占用FLASH空间	18.56K Bytes	18.4K Bytes
算法占用RAM空间	7.4K Bytes	7.5K Bytes
电机控制执行时间（基于N32G45X@72MHz）	20.2 us	18.3 us
电机控制执行时间（基于N32G45X@144MHz）	12.1 us	10.1 us
电转速支持范围	10Hz---2KHz	2Hz---2KHz
实测转速(1对极)	600RPM—120,000 RPM	120RPM—120,000 RPM

- 基于N32G455系列芯片
- 基于MDK5.21编译器， 优化等级Level3

注：随着版本的跌代，以上数据会有微调

Confidential & Proprietary © 2020

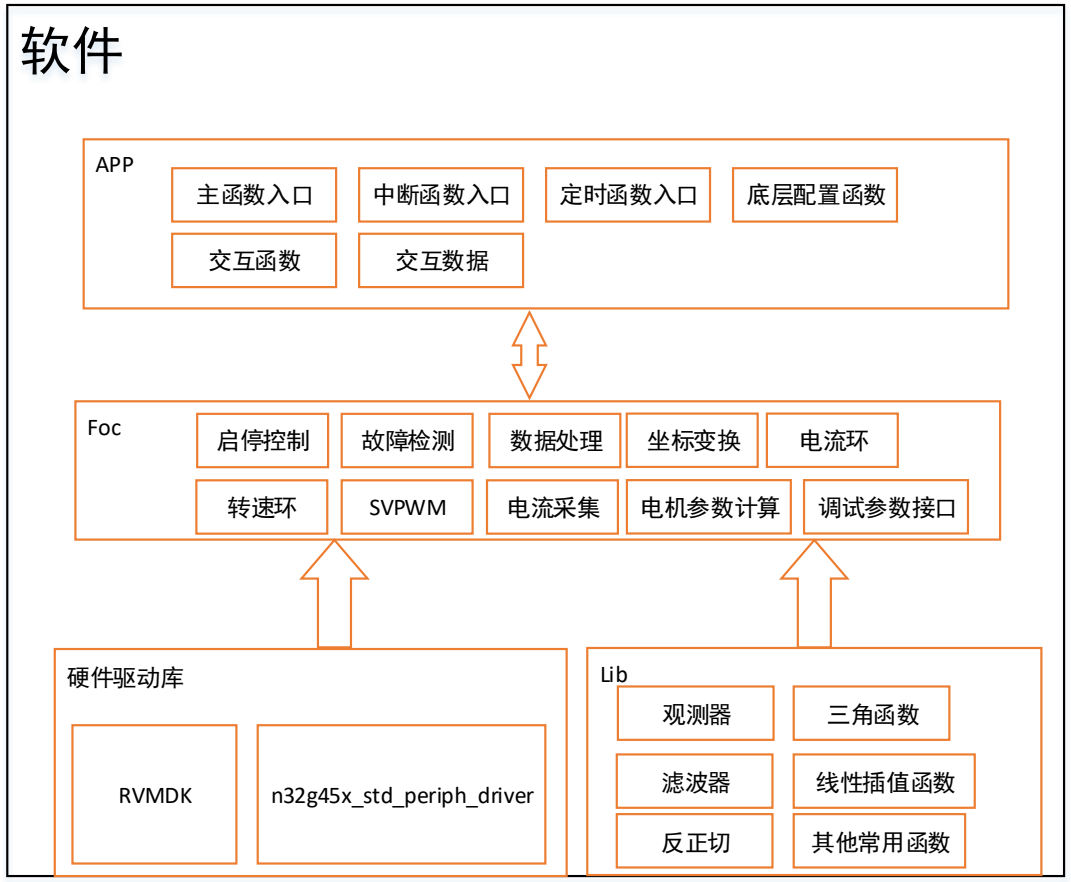
国民技术多FOC电机套件功能列表

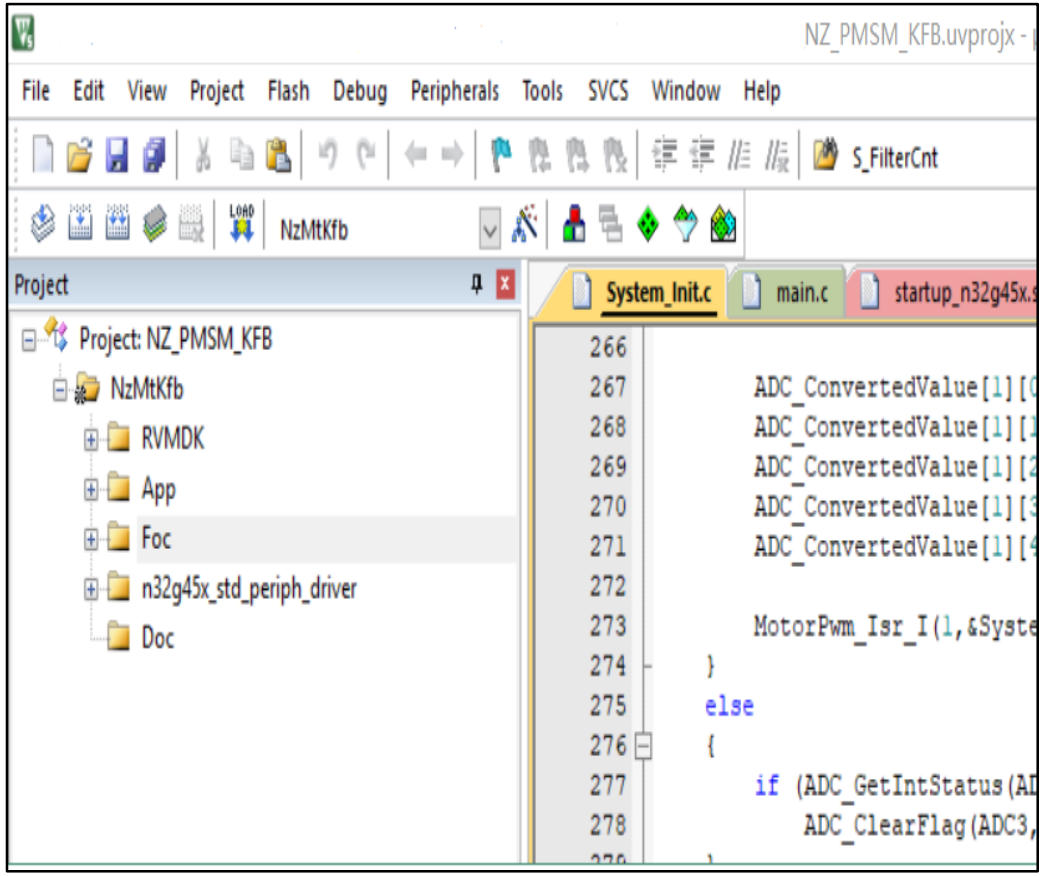
No.	软件功能分类	功能描述
1	ADC采样	（电位器）目标速度采样
2		相电流采样
3		母线电压采样
4	数学计算	正弦函数
5		余弦函数
6		反正切函数
7		线性插值函数
8		16位、32位限幅函数
9		均方根函数
10	滤波算法	一阶低通滤波
11	硬件自检	电压，电流自检
12	转子位置观测器	MRAS观测器
13		SMO观测器
14		HALL有感

No.	软件功能分类	功能描述
15	工作模式	速度环模式
16		转矩环模式
17	坐标变换	CLARK变换
18		PARK变换
19		反CLARK变换
20		反PARK变换
21	误差控制方式	位置式PID
22	保护	过压保护
23		欠压保护
24		过流保护
25		电压限幅保护
26		电流限幅保护
27		工作异常，电机停机
28	电机控制	启停控制
29		加减速控制
30	通信	UART安全通信

Confidential & Proprietary © 2020

国民技术多FOC电机套件组件介绍



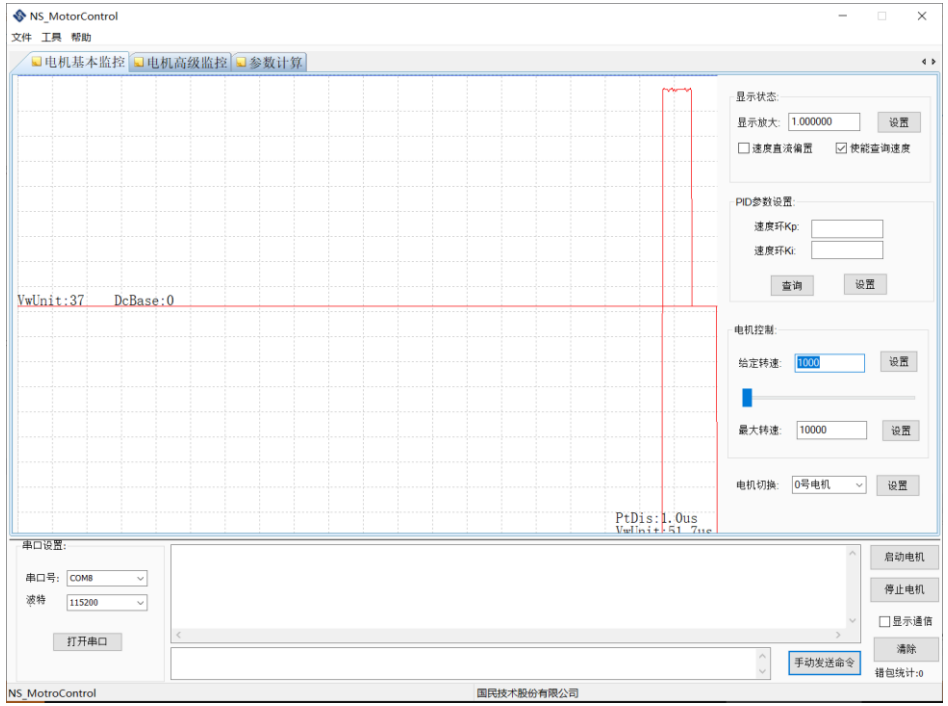


电机软件功能单元

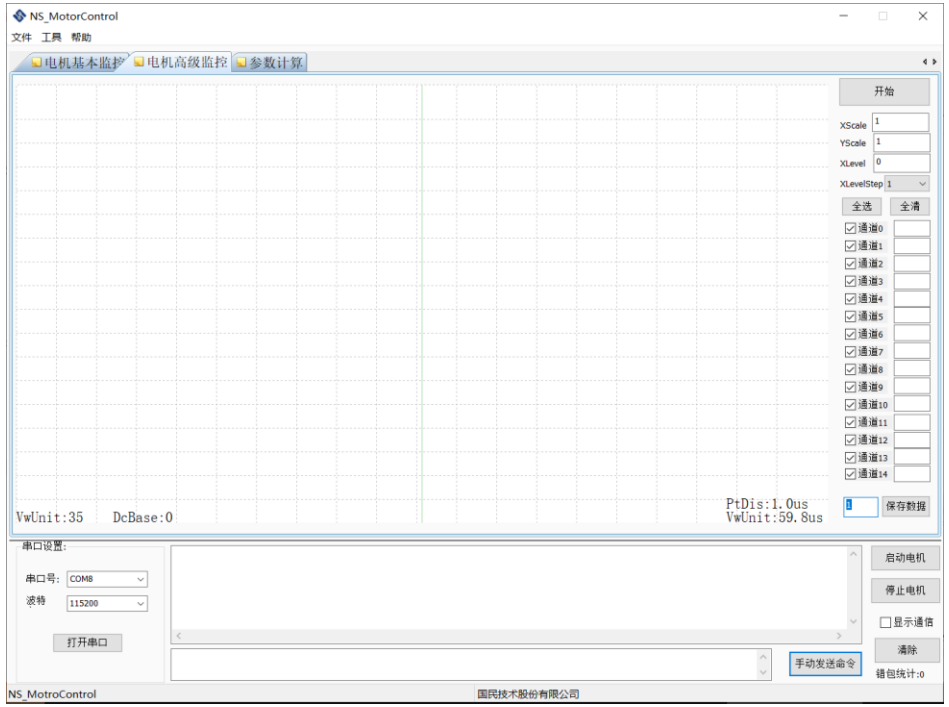
采用MDK 5.21及以上作为开发环境

Confidential & Proprietary © 2020

国民技术多FOC电机套件PC工具介绍



- 设置和查询速度环Pi参数
- 实时速度曲线
- 电机选择控制
- 启停控制
- 速度控制



- 支持最多10路数据曲线
- 可放大缩小
- 每一路数据支持基值设置

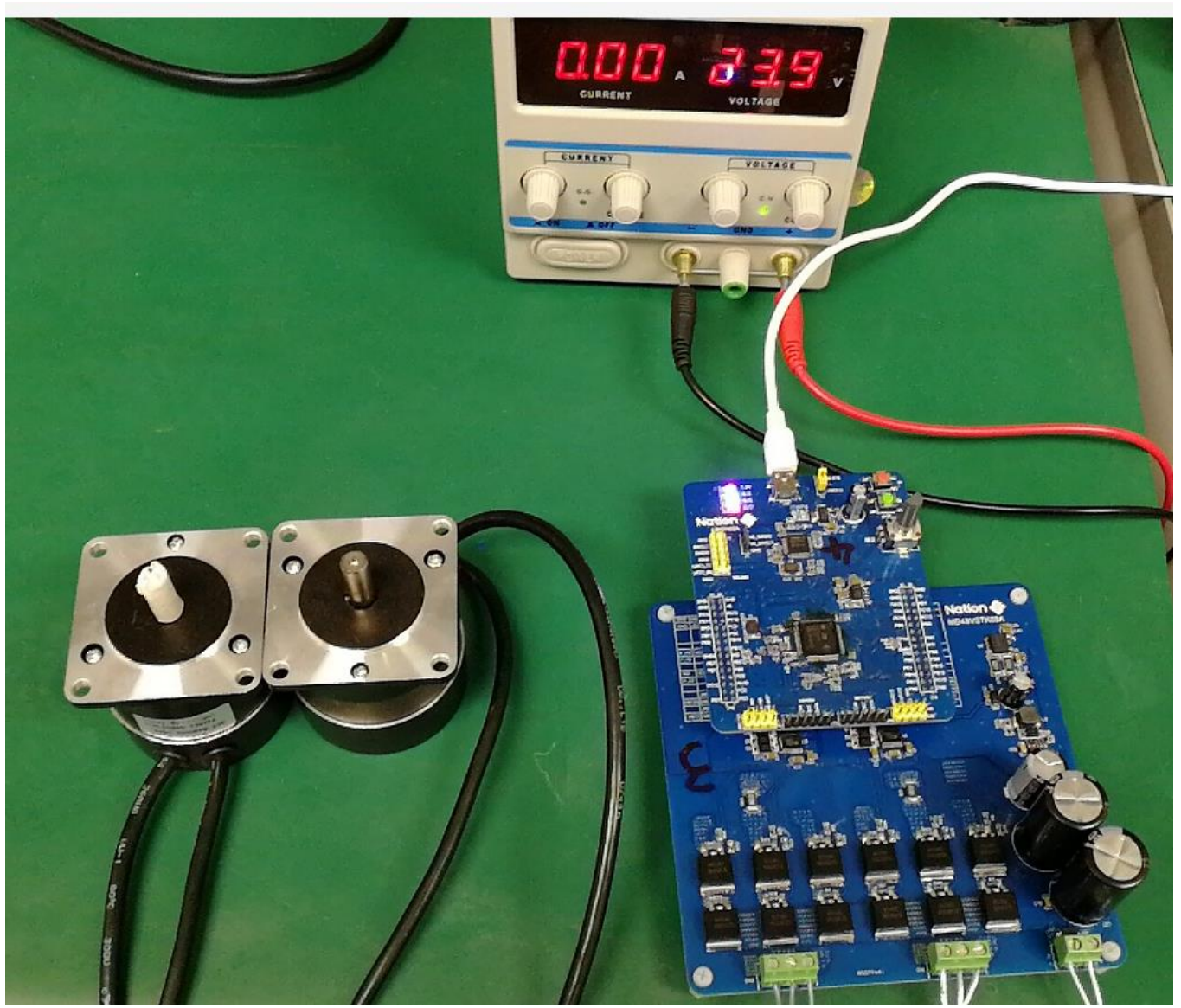
Confidential & Proprietary © 2020



快速搭建多FOC电机验证平台

Confidential & Proprietary © 2020

1、环境准备



Confidential & Proprietary © 2020

2、确认电机参数

根据电机型号，测量电机参数，相应参数填入UserParam.h头文件如下定义中

```
/************************电机参数*************************/
//motor 1
#define MOTOR_POPAIRS1          (2)             // 电机极对数
#define LD1                     (0.000925f)     // D轴相电感
#define LQ1                     (0.000925f)     // Q轴相电感
#define RS1                     (0.916f/2)      // 定子相电阻
#define FI1                     (0.01374f)      // 磁链
//motor 2
#define MOTOR_POPAIRS2          (2)             // 电机极对数
#define LD2                     (0.000925f)     // D轴相电感
#define LQ2                     (0.000925f)     // Q轴相电感
#define RS2                     (0.916f/2)      // 定子相电阻
#define FI2                     (0.01374f)      // 磁链
```

- 对于MRAS无感观测量，需要确认极对、相电阻、相电感、磁链
- 对于SMO无感观测量，需要确认极对数、相电阻、相电感

Confidential & Proprietary © 2020

3、确认开发板参数

```
/**********************交互控制选择 ***********************/
#define PCBA_SPEED_DEMO          //板载电位器调速

/**********************PCBA参数***********************/
#define MAIN_FREQUENCY      720000001        // 主频
//motor 1
#define PWM_FREQUENCY1      100001           // 电机载频
#define CURRENT_BASE1       (41.2f)          // 电流基值
#define VOLTAGE_BASE1       (25.0f)          // 电压基值
#define LIMIT_DUTY1         300001           // 占空比限制 max 327671
//motor 2
#define PWM_FREQUENCY2      100001           // 电机载频
#define CURRENT_BASE2       (41.2f)          // 电流基值
#define VOLTAGE_BASE2       (25.0f)          // 电压基值
#define LIMIT_DUTY2         300001           // 占空比限限制 max 327671
```

- 根据MCU的主频，电机的载波频率
- 确认电机驱动板的直流母线电压
- 根据电机控制板的OPAMP放大值数及采样电阻确认电流基值

Confidential & Proprietary © 2020

4、确认角度计算方法

确认采用的角度计划方法，当前支持的角度计算方法有MRAS无感 、SMO无感、HALL有感以及开环角度。

```
/************************转子角度选择************************/
//select one angle source
#define FOC_FOR_ANGLE                 //MRAS观测器
//#define SMO_FOR_ANGLE               //SMO观测器
//#define HALL_FOR_ANGLE              //HALL有感

//select OPEN_ANGLE ,need syn select TORQUE_CONTROL
//#define OPEN_ANGLE                  //开环角度
```

注1：在跑无感FOC时，在不确定电机参数时，又需要让电机跑起来，可以选择开环角度。

Confidential & Proprietary © 2020

5、确认电机运行模式

确认电机工作在速度环模式，或是转距环模式。

速度模式：以速度控制为目标，转矩变化

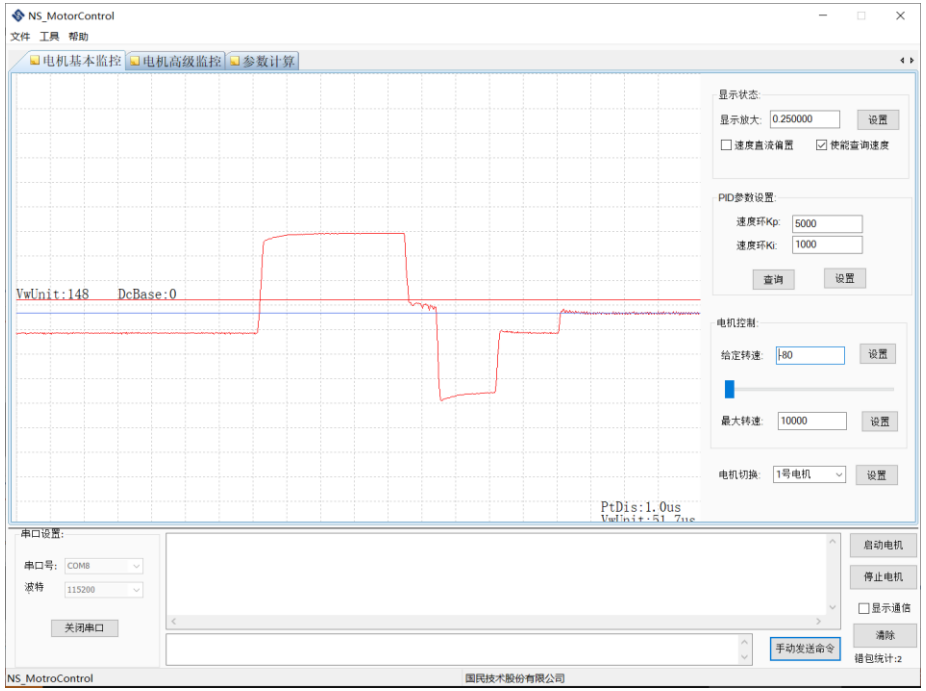
转矩模式：以转矩控制为目标，速度变化

```
/************************选择工作模式************************/
//#define TORQUE_CONTROL          //转矩模式
#define SPEED_CONTROL             //速度模式
```

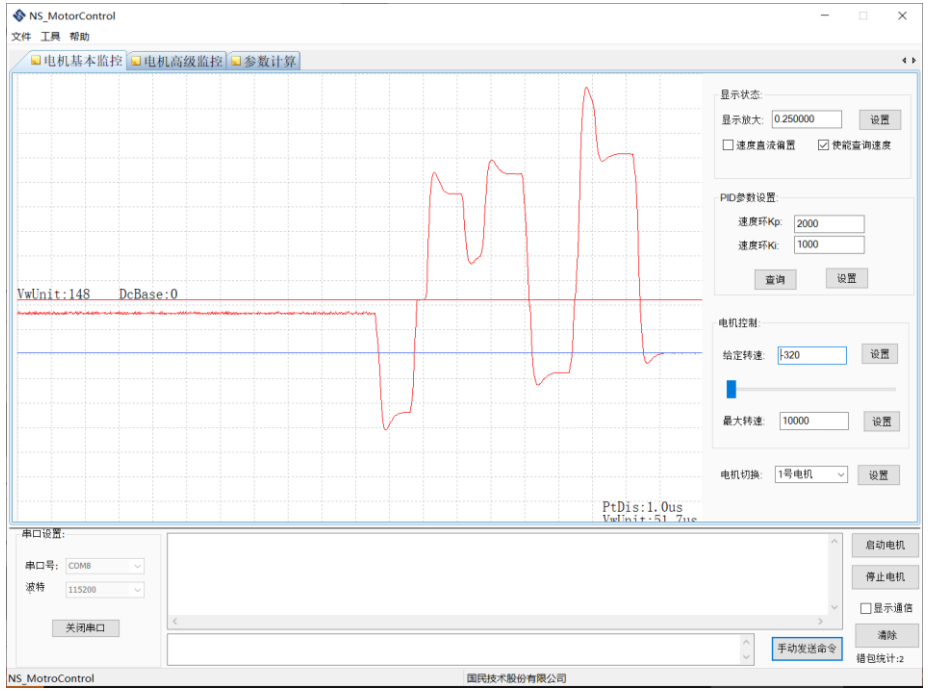
Confidential & Proprietary © 2020

启动

- MDK Debug启动
- 开发板启停键
- NS-LINK接上PC工具，直接启动



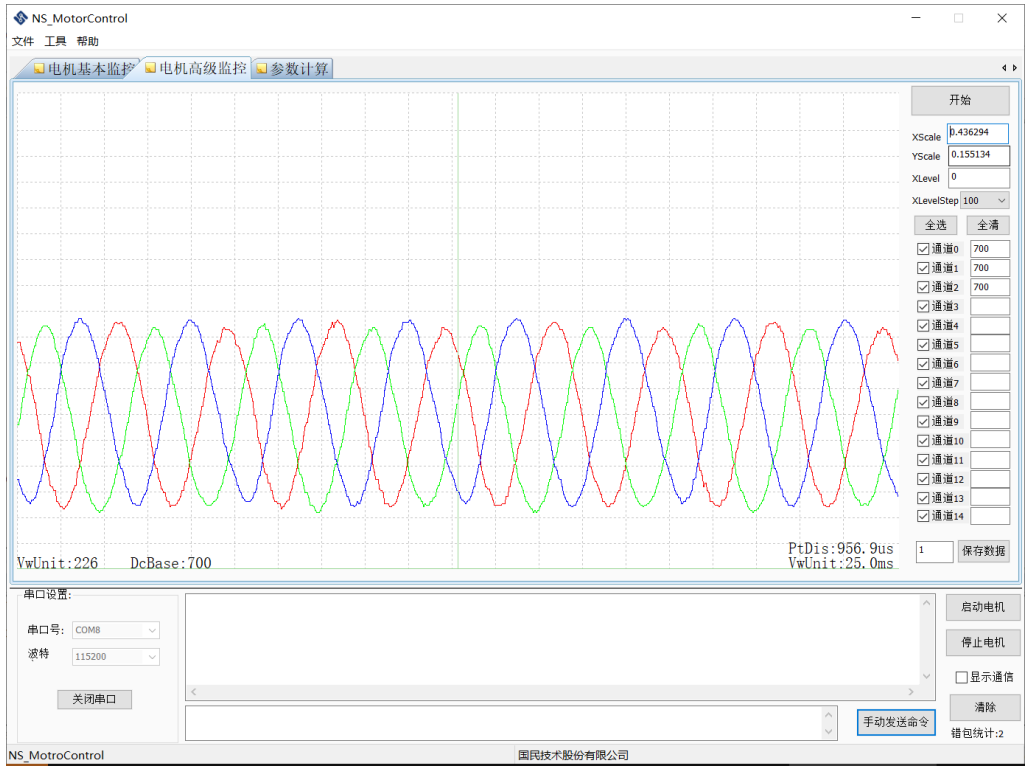
正反转，加减速度观测，P=5000



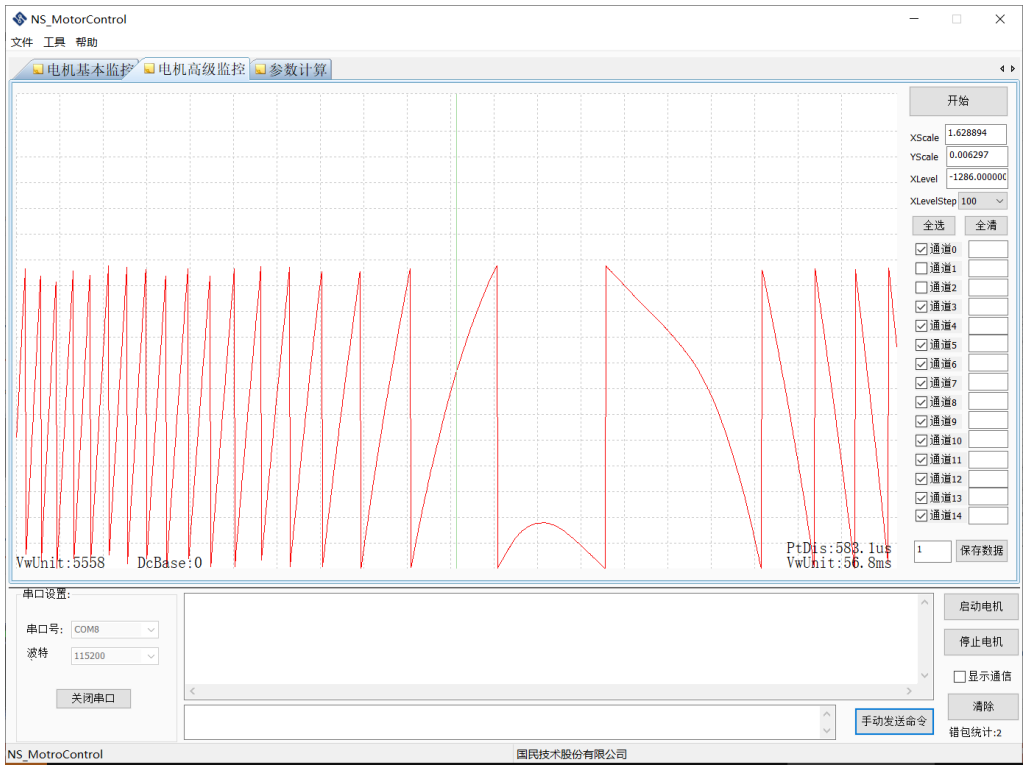
正反转，加减速度观测，P=2000

Confidential & Proprietary © 2020

国民技术多FOC电机应用实践



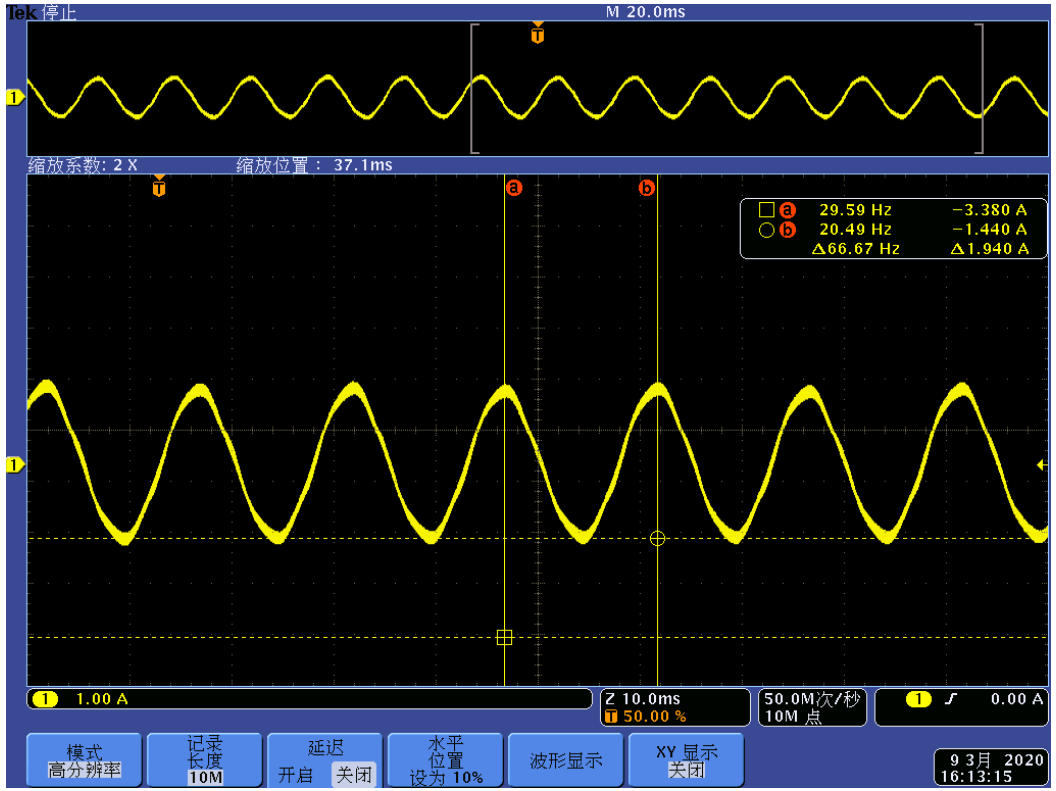
相电流观测



电机角度观测

Confidential & Proprietary © 2020

国民技术多FOC电机应用实践



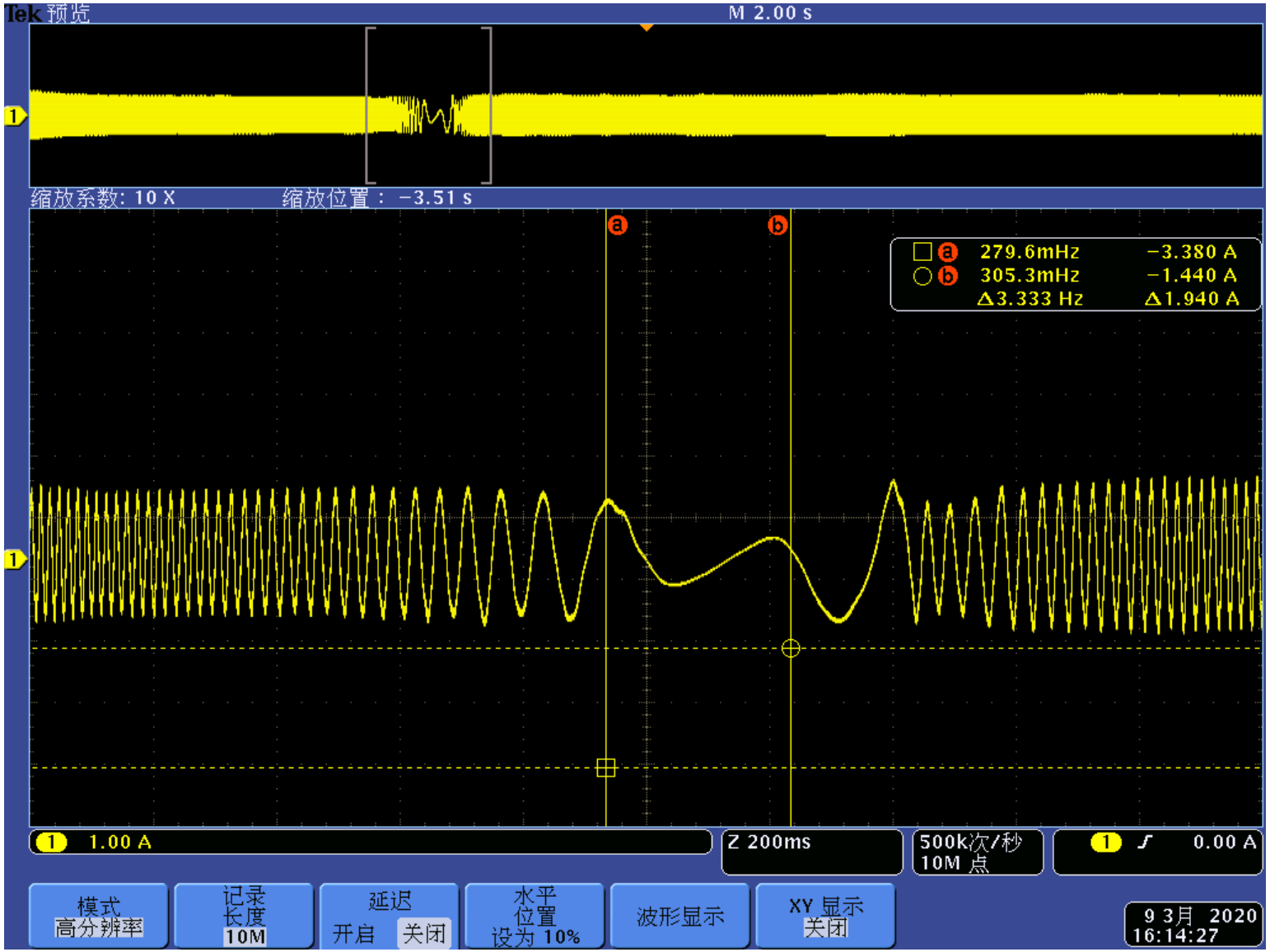
电机正常运行时的相电流波形



FOC执行时间测量

Confidential & Proprietary © 2020

电机带载正反转切换电流波形观测



Confidential & Proprietary © 2020

Nation 国民技术

创新服务全民

Innovation for the People



国民技术微信公众号



安小芯客服MM

国民技术股份有限公司 www.nationstech.com

Confidential & Proprietary © 2020