

峰昭科技MCU应用于电机控制

峰昭科技（深圳）股份有限公司



Agenda



Fortior Tech
峰昭科技

1 直流无刷电机应用领域

2 电机控制方法介绍

3 电机控制芯片产品

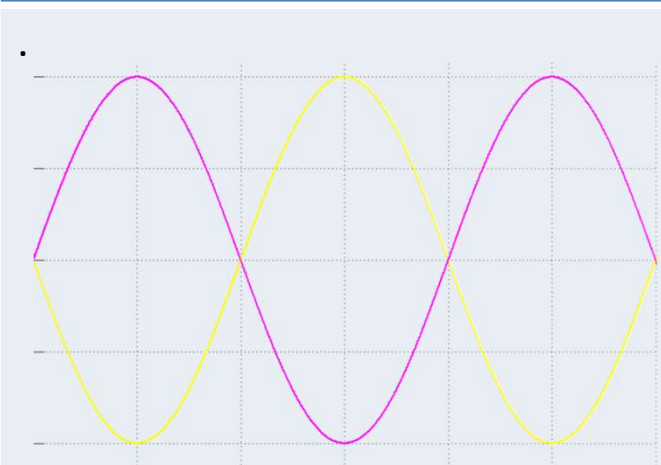
4 FOC控制原理介绍

5 吊扇控制程序设计

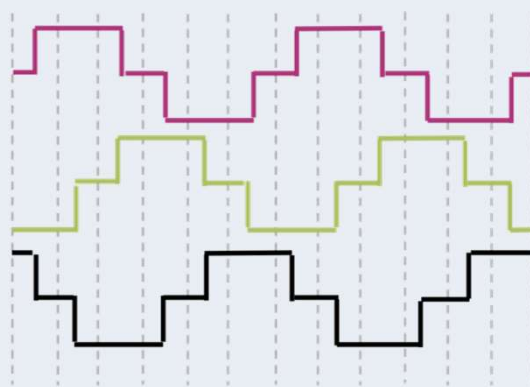


峰岬科技根据应用类型提供不同控制方法

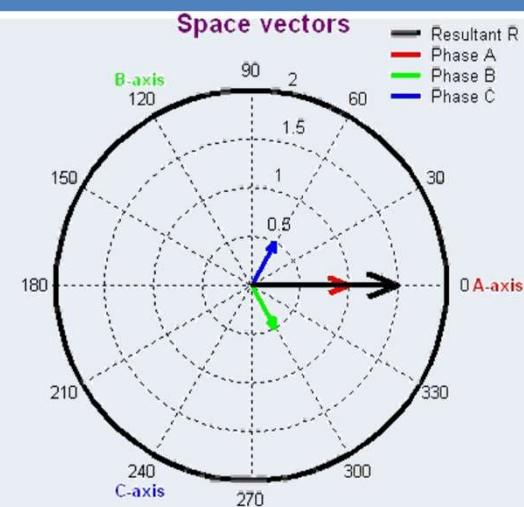
单相控制



方波控制



矢量控制





FOC应用场景



压缩机



吸尘器



空气净化器



吊扇



助力车



平衡车



跑步机



水泵



FOC应用场景



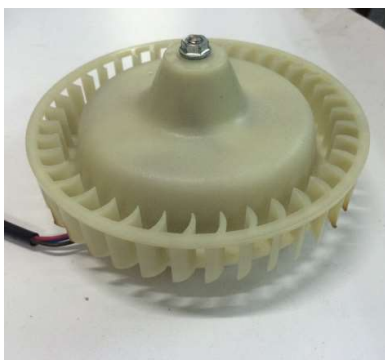
洗衣机



落地扇



料理机



风机



三相吹风筒



油烟机



Agenda



Fortior Tech
峰昭科技

1 直流无刷电机应用领域

2 电机控制方法介绍

3 电机控制芯片介绍

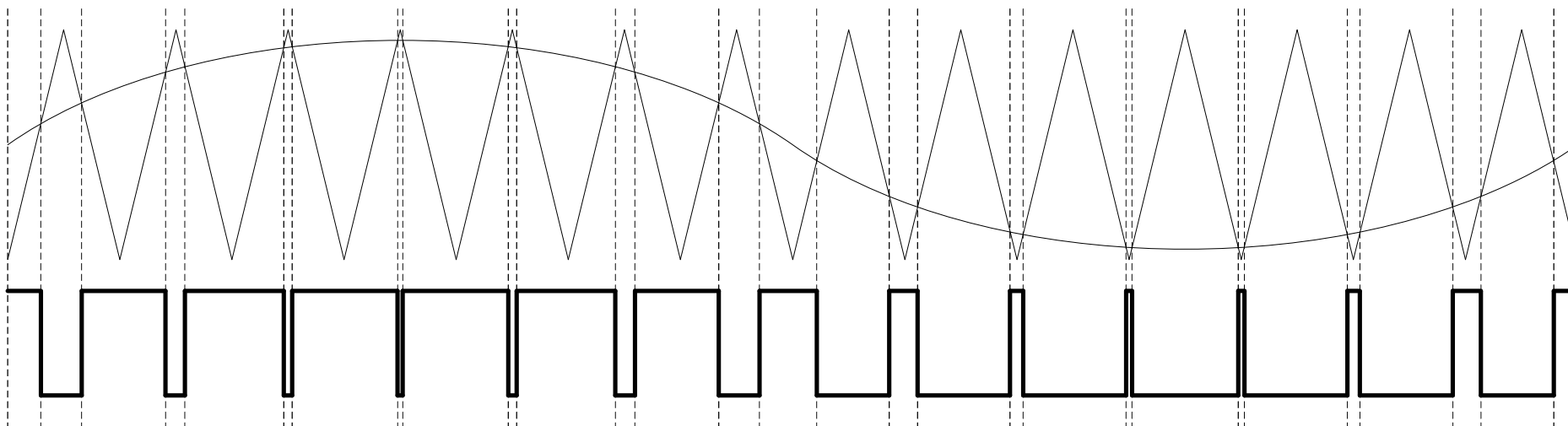
4 FOC控制原理介绍

5 吊扇控制程序设计



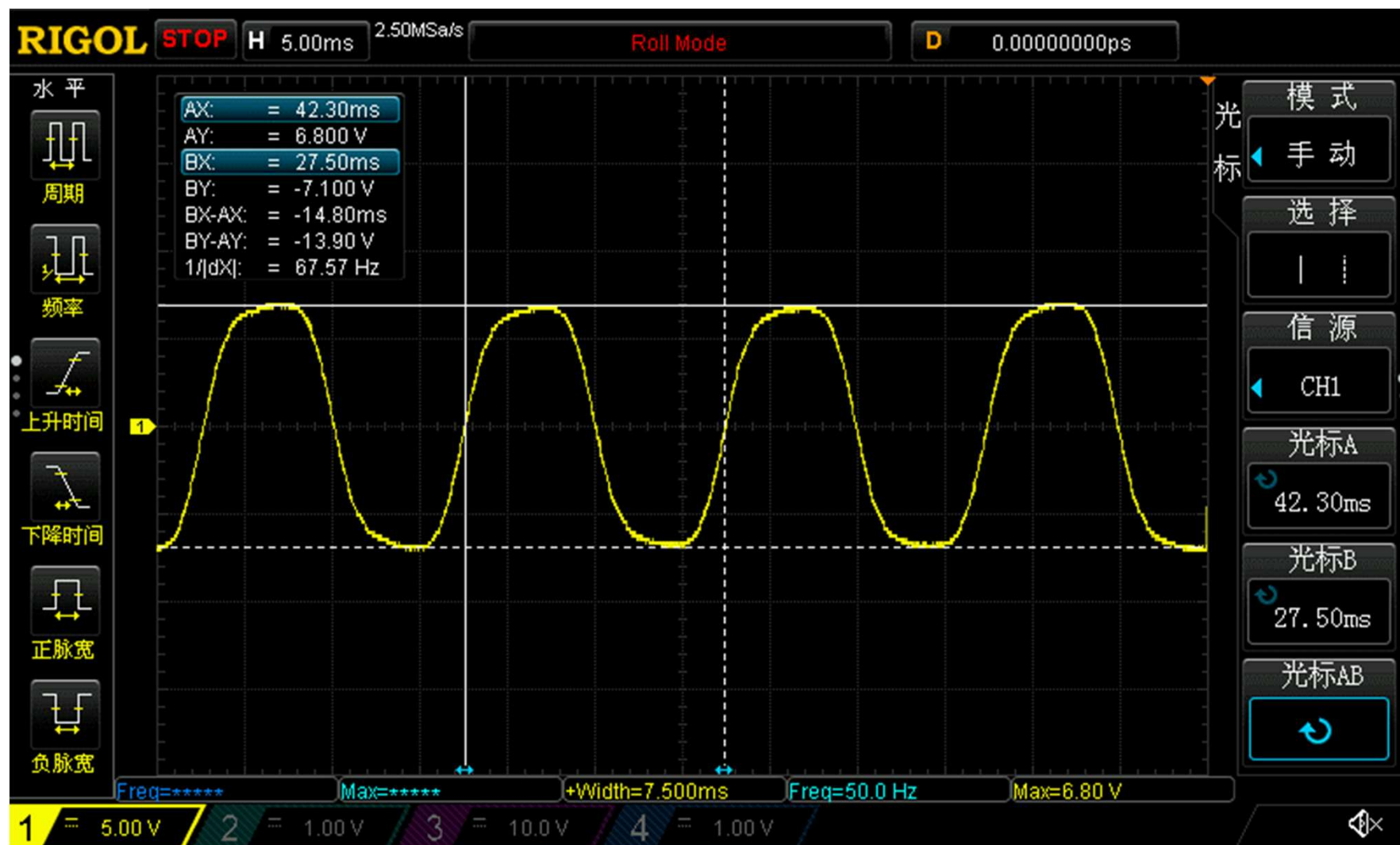
单相控制方式介绍

单相电机的控制分单相方波控制和单相正弦波控制，单相方波的控制方法优点类似于同步电机的控制，使用 180° 相位差的控制方式。在使用单相无感方波的时候，控制方法类似于三相无感方波控制，不能将导通周期直接 180° 相位互补导通，还必须留出过电压过零的检测时间。在使用单相正弦控制方式的时候，需要使用SPWM产生正交的正弦波控制电机，控制波形如下图。





单相控制方法电机充磁



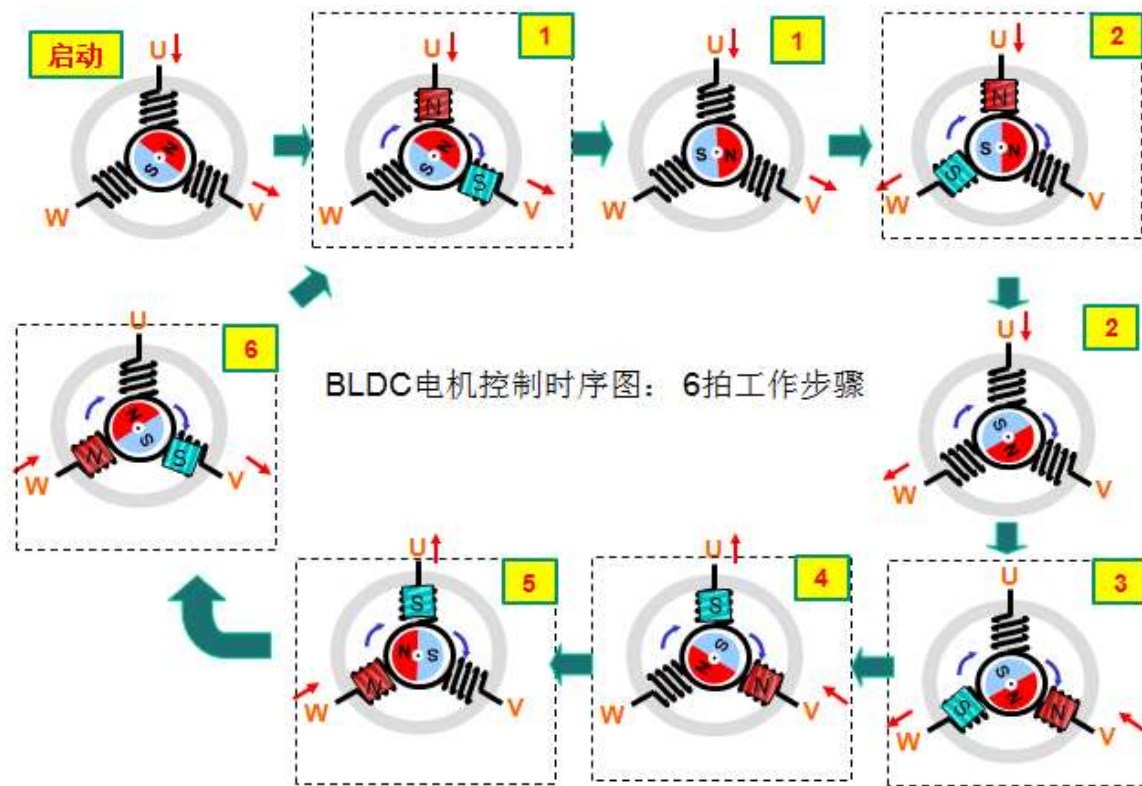


BLDC控制方式介绍

无刷直流电机的定子绕组一般为星型接法，采用两相导通三向六状态的运行方式，**每次使两相绕组导通，第三相绕组处于悬浮状态**。在检测到反电动势过零点后，根据换相点滞后过零点30度电角度，进行30度电角度延时，当延时时间结束后，根据电机运转的方式，进行电机换向，进入下一个工作状态。

驱动时序（6拍）

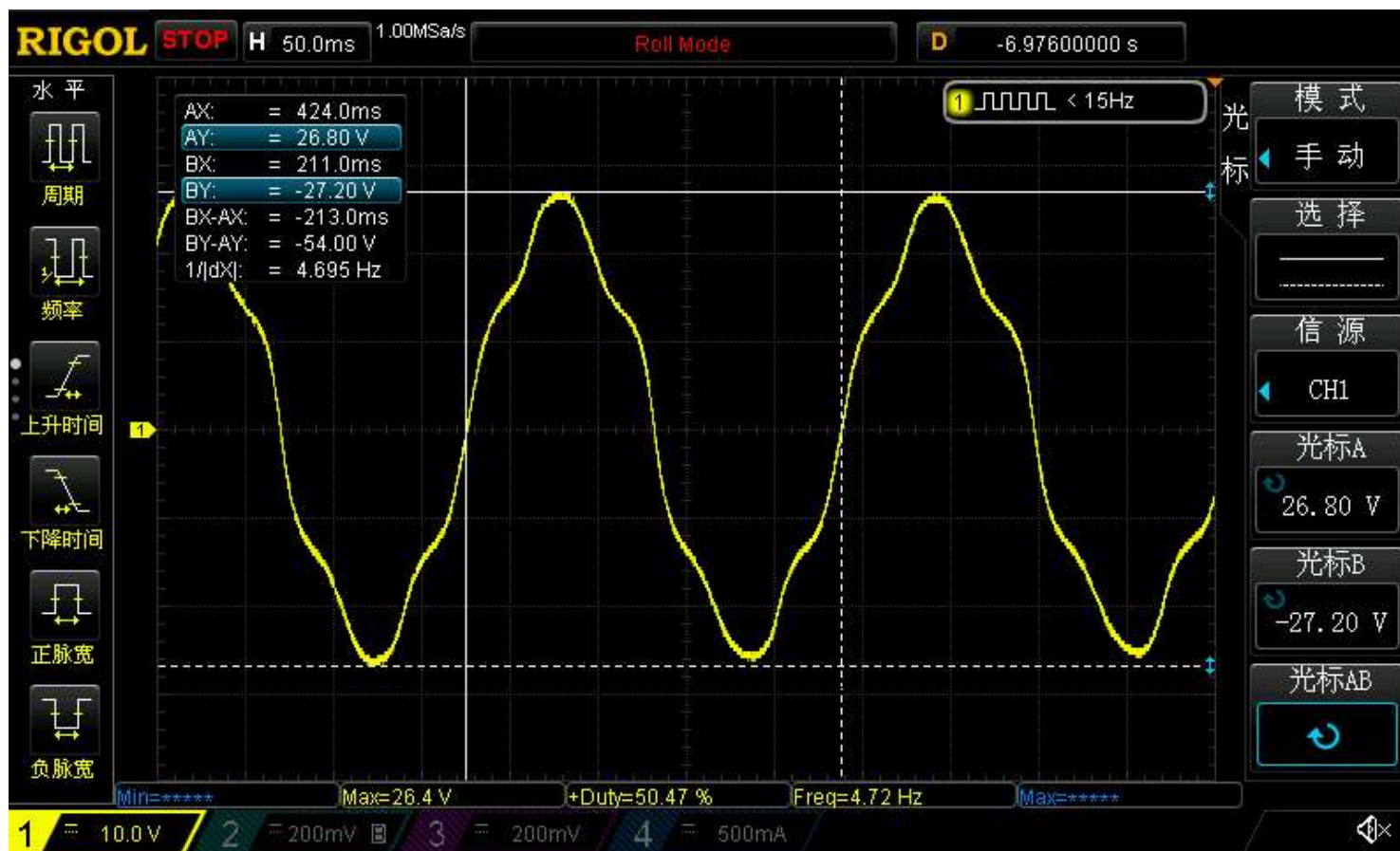
1	$U \rightarrow V$
2	$U \rightarrow W$
3	$V \rightarrow W$
4	$V \rightarrow U$
5	$W \rightarrow U$
6	$W \rightarrow V$





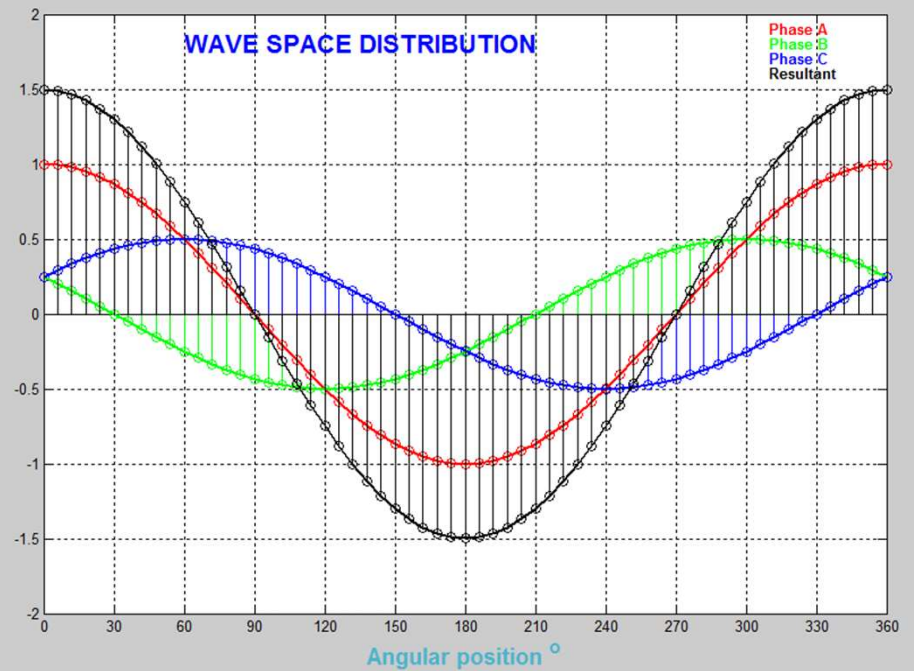
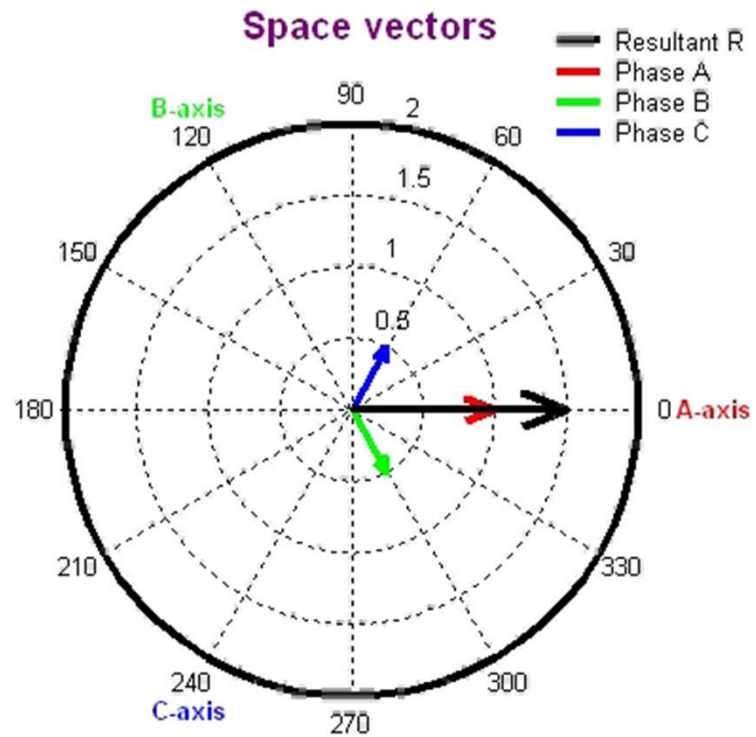
BLDC控制方法电机充磁

使用方波充磁方式，即转子磁铁全部充磁，放电动势波形如下。



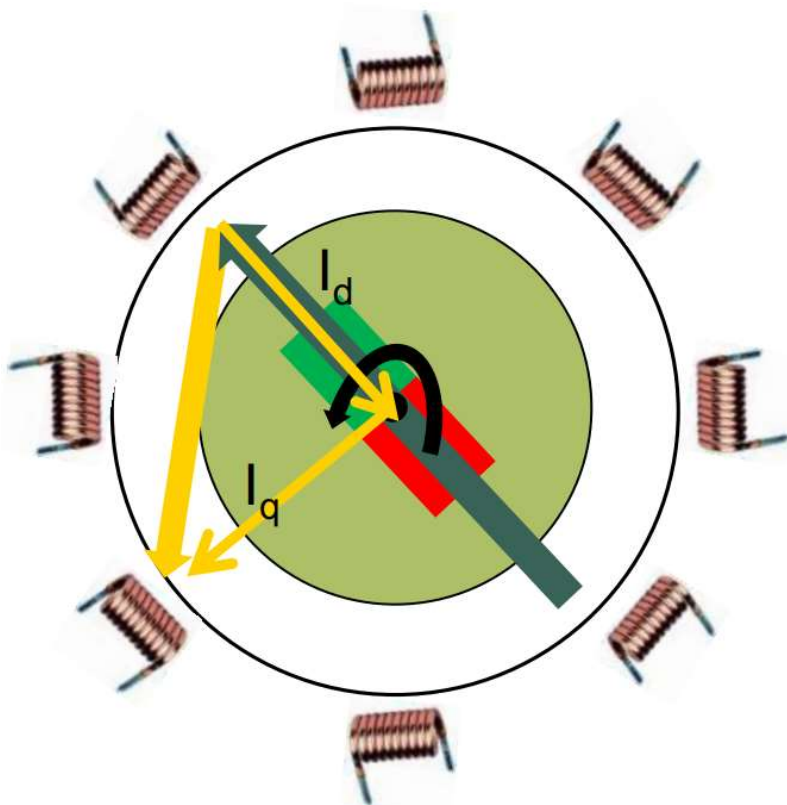


FOC控制方法介绍





FOC控制方法介绍



在理想情况下：

产生定子场的电流为：

I_d : 恒定0

I_q : 产生转矩

在非理想情况下：

产生定子场的电流为：

I_d : 减弱磁场/加强磁场

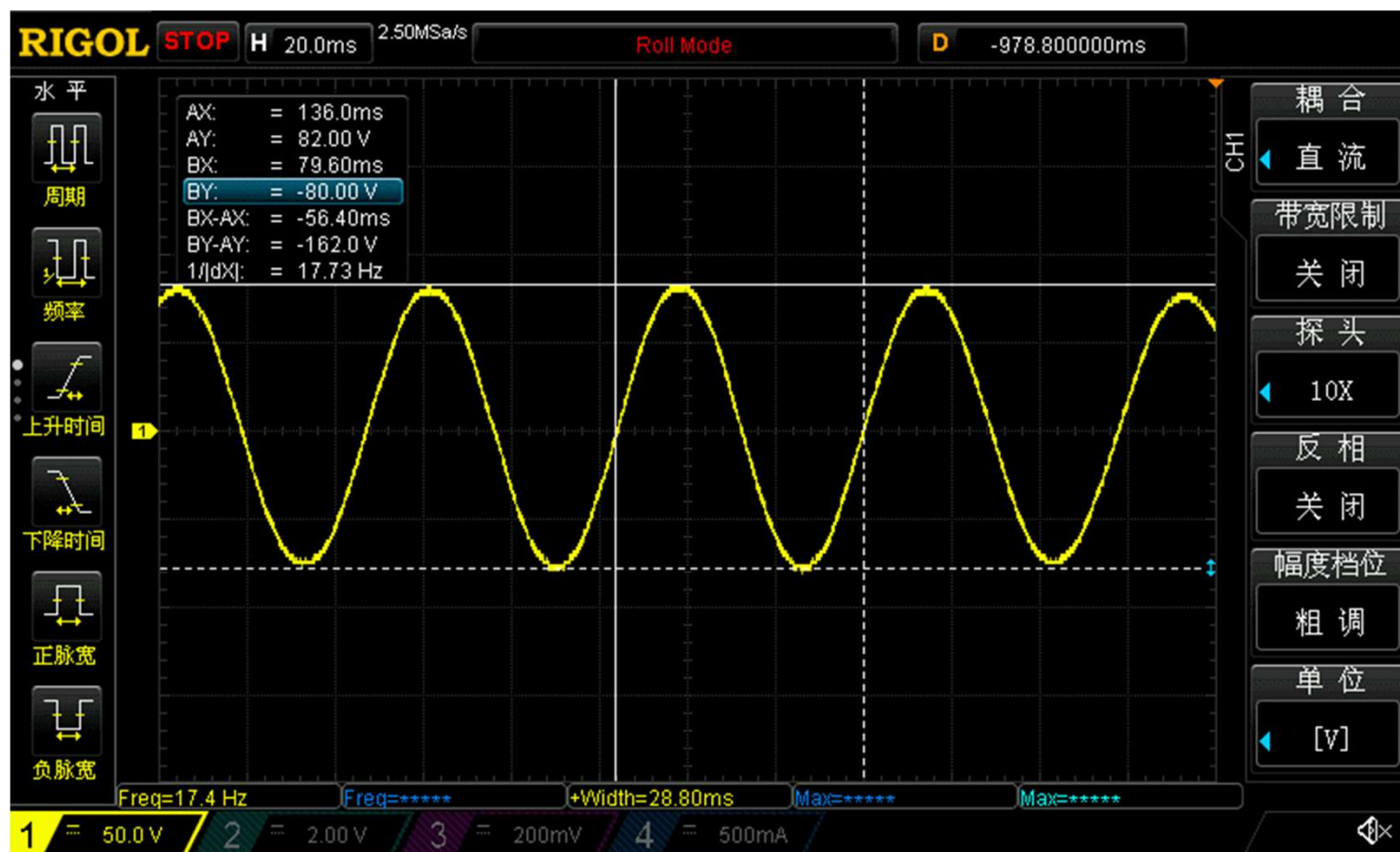
I_q : 产生转矩

为了准确的控制电流 I_D 和 I_Q ，就必须知道转子的准确位置。



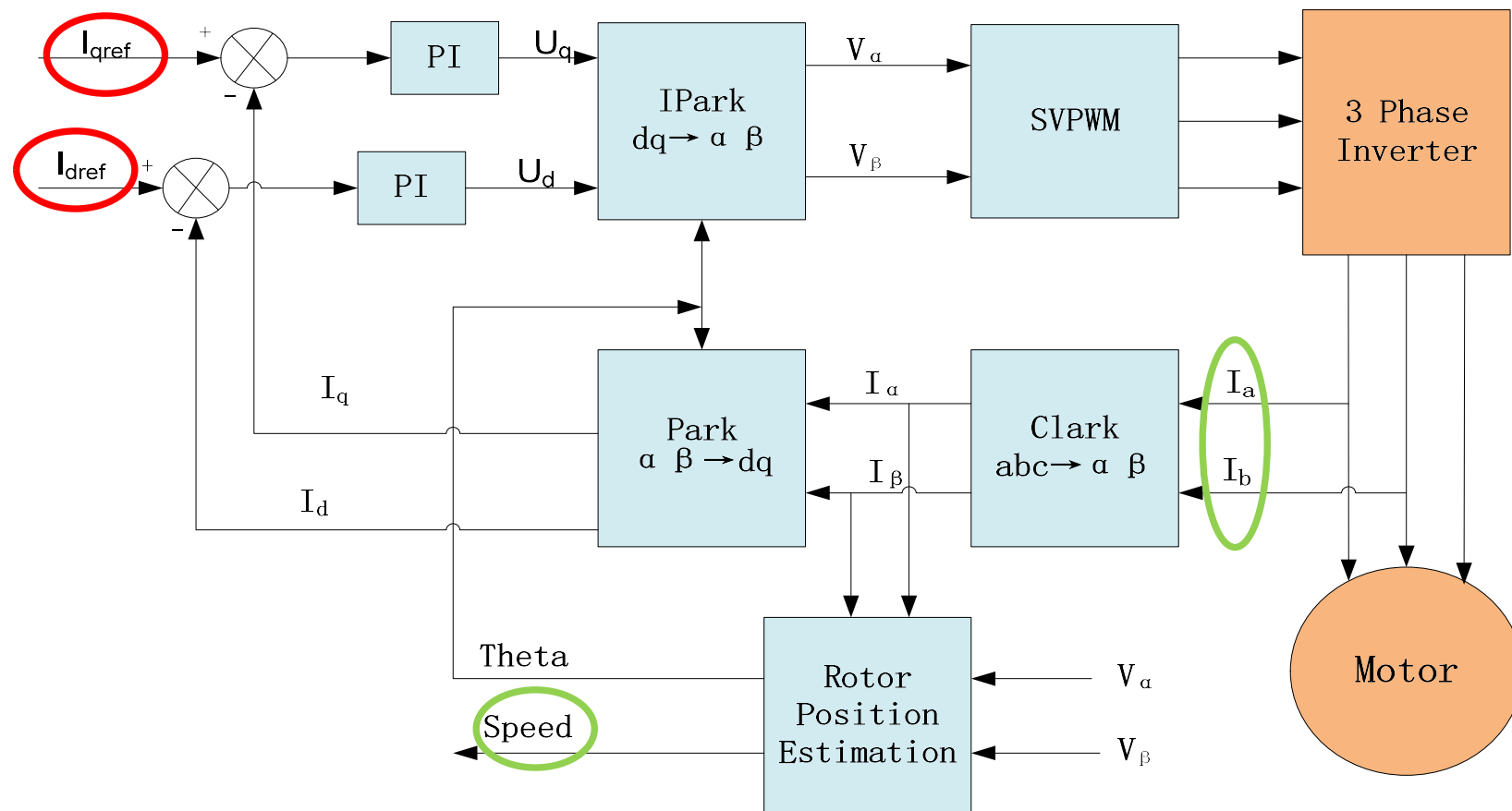
FOC控制方法电机充磁

使用正弦充磁方式，即转子磁铁不可以直接充满，放电动势波形如下。





FOC电流控制闭环





FOC控制硬件框图

FOC电流控制闭环实际电路分为四部分

AC-DC以及直流母线整流电路设计

相电流和相反电动势采样电路设计

三相逆变器电路设计

电机位置角采样电路设计



优化成本方案

IPM集成模块

替换成

分立MOS管

霍尔传感器

替换成

电阻+运放

外置PreDriver

升级成

芯片内置预驱

外置5V降压芯片

升级成

芯片内置5V降压芯片

采样电阻

升级成

MOS内阻采样



Agenda



Fortior Tech
峰昭科技

1 直流无刷电机应用领域

2 电机控制方法介绍

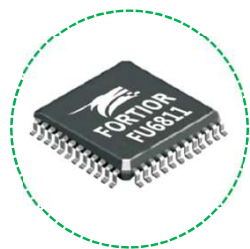
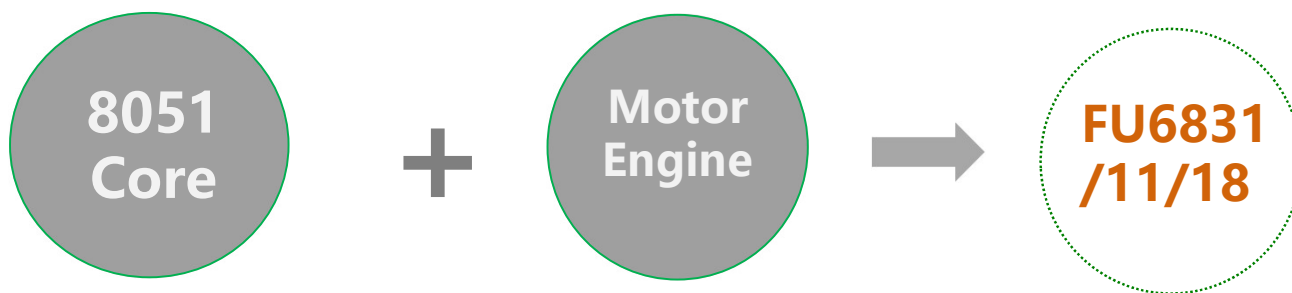
3 电机控制芯片介绍

4 FOC控制原理介绍

5 吊扇控制程序设计



芯片架构——“双核” MCU

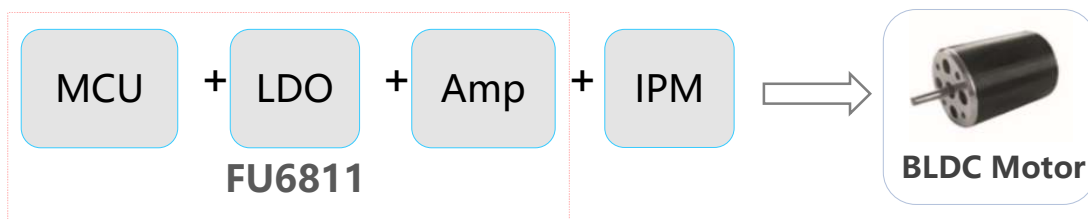


- 支持单相，方波，SPWM，FOC等控制方法。
- FU68系列是一款集成8051内核和电机控制引擎(ME)的双核电机驱动专用芯片，8051内核处理常规事务，ME处理电机实时事务，双核协同工作实现各种高性能电机控制。
- 芯片内部集成有高速ADC、运放、比较器、高速乘除法器、CRC、SPI、I2C、UART、多种TIMER、PWM等功能，内置高压LDO，适用于各种电机控制。
- FU6811驱动需配合外部驱动电路驱动功率管。
- FU6831驱动类型3P3N Predriver输出，直接驱动功率管。
- FU6818驱动类型6N Predriver输出，直接驱动功率管。

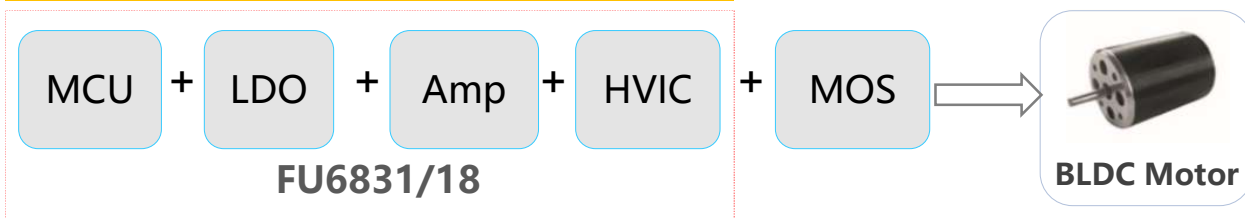


芯片架构——“双核” MCU

高压应用方案



低压应用方案

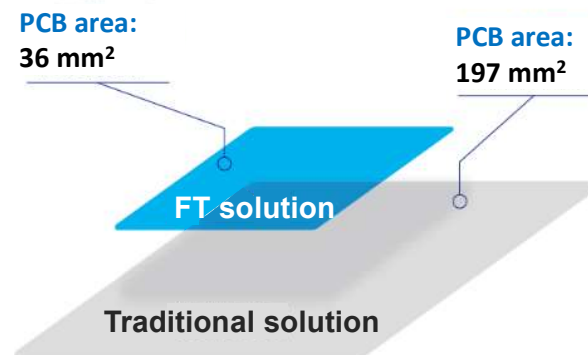


优势

▶ 高度集成

▶ 简化系统结构和外部电路

▶ 缩短研发周期，节约开发成本



75% of the PCB area can be reduced



与时俱进的产品设计

MCU系列芯片封装 (L: LQFP48, Q: QFN48, N: QFN32, S: SSOP24)



2016

第一代MCU FU6801系列 (FU6831/FU6818/FU6811)

- 首创8051+ME“双核”电机驱动控制芯片；
- 元器件面积减少82%，外围器件少，电路简洁



2017

第二代MCU FU6802系列 (FU6812/FU6861)

- FOC算法优化、促使位置检测、过调制、死区补偿
- BLDC算法硬件化、降低成本



2019

第三代MCU FU6803系列 (FU6813)

- FLASH升级
- 精准FOC控制
- PFC功能增加



2020

第四代MCU FU6804、FU69系列 FU6804系列 (FU6832)

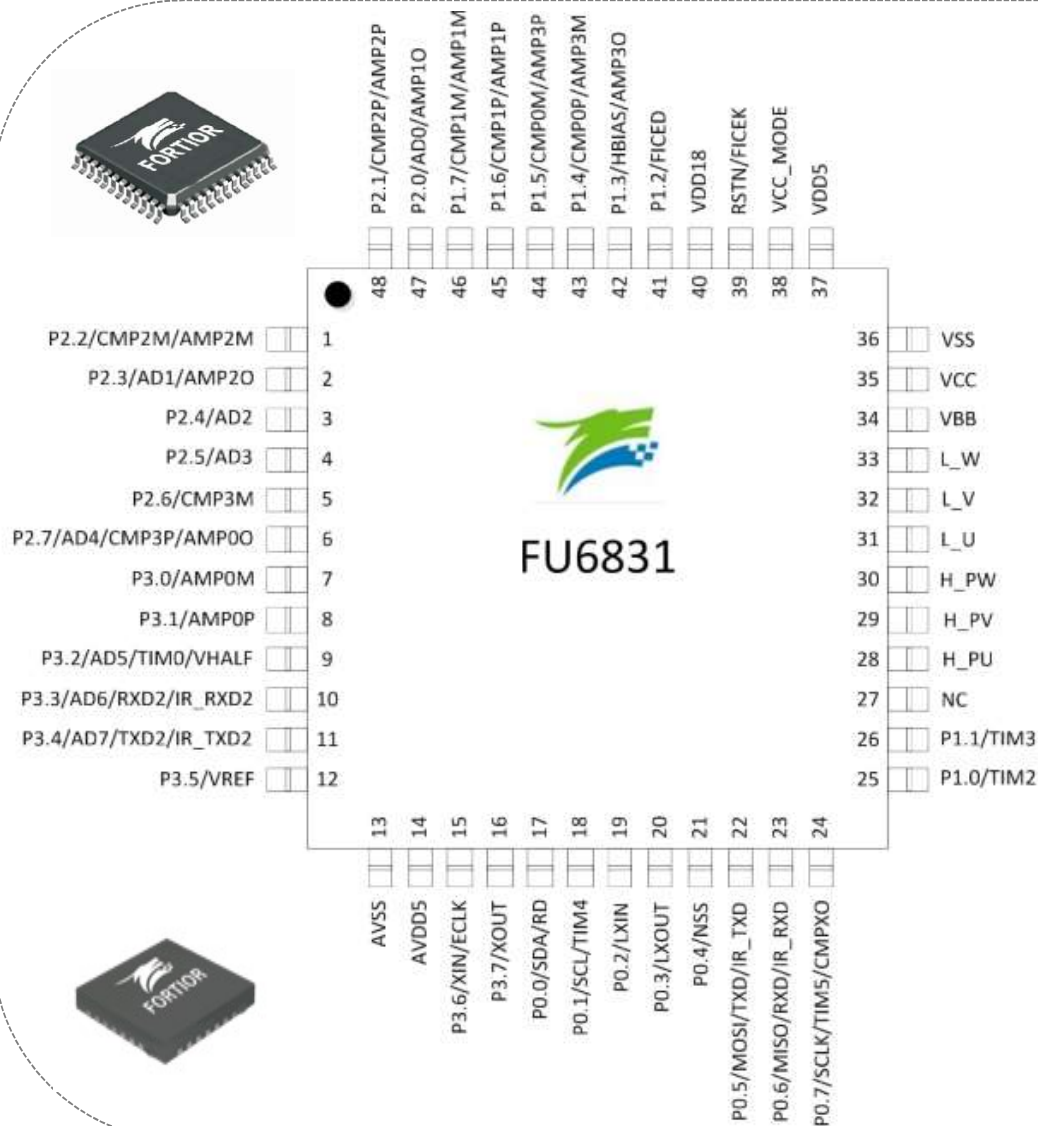
- 内置母线分压电阻电阻、内置运放电阻，高度集成，外围电路极致简化
- 优化无感启动算法提高系统兼容性

FU69系列

- 开源RISC-V架构，创造性在电机控制领域实现RISC-V+电机控制引擎"双核"MCU
- 伺服控制



关键引脚



6路PWM

引脚28-33

6路PWM输出(固定)

6831默认上桥臂上拉、下桥臂下拉

6811上下桥臂默认为高阻

6818上下桥臂默认低电平

可通过软件使能或关闭

ADC与运放

ADC0---U相电流

ADC1---V相电流

ADC2---母线电压

ADC4---母线电流

对应的运放端口不能改变

其他

PWM调速——TIM3

硬件比较过流 ——P2. 7

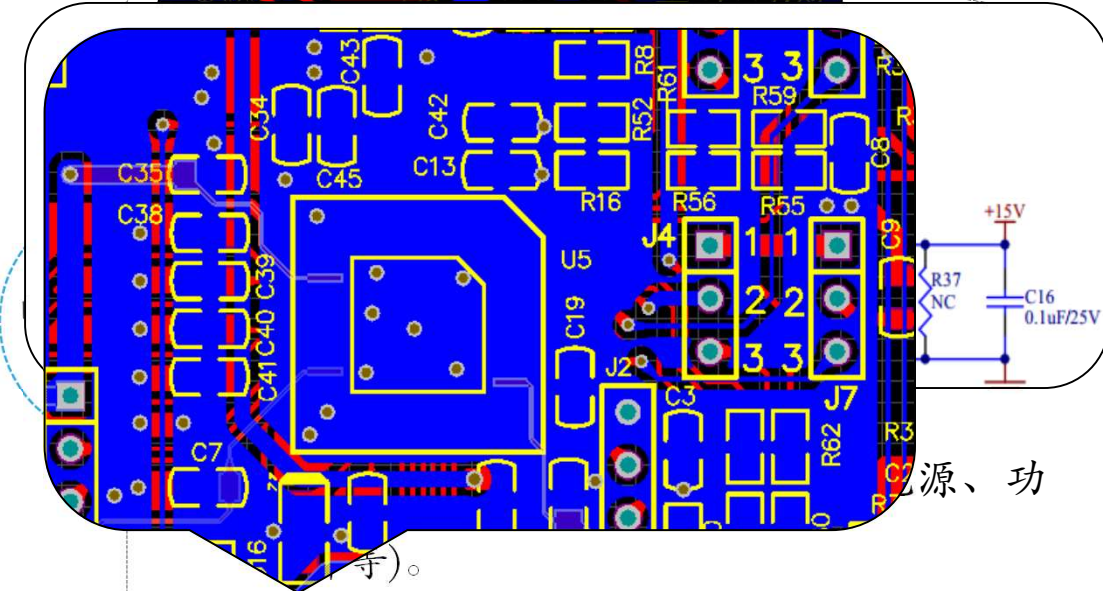
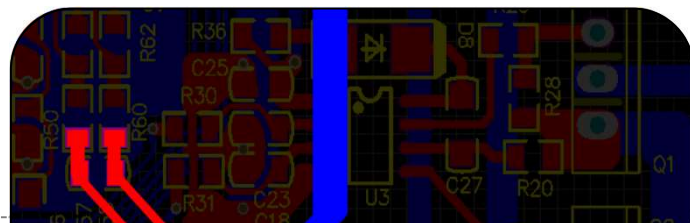
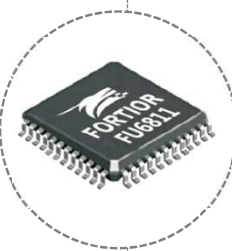
硬件FO过流——P0. 0



芯片原理图

原理图设计关键点

- 1、芯片选型、功率器件选型
- 2、电源供电方式 (3种模式)
- 3、计算采样电阻阻值和运放放大倍数
- 4、计算母线电压的缩小倍数
- 5、调速端口、过流保护端口、FG端口
- 6、预留SPI/USART端口，以便调试



- 4、MCU周边尽量铺地，信号地与功率地单点相接



Agenda



Fortior Tech
峰昭科技

1 直流无刷电机应用领域

2 电机控制方法介绍

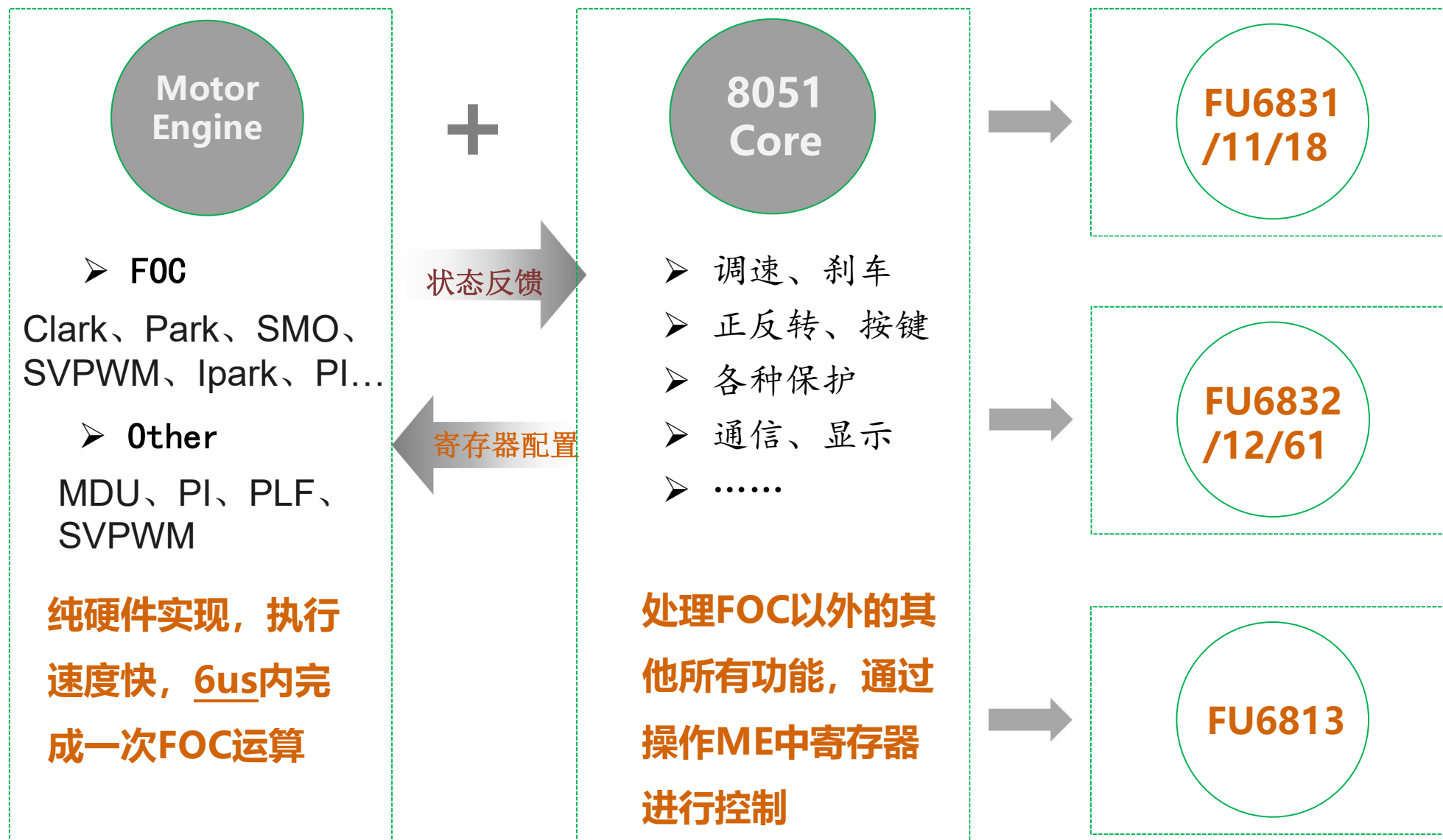
3 电机控制芯片介绍

4 FOC控制原理介绍

5 吊扇控制程序设计



芯片架构——“双核” MCU





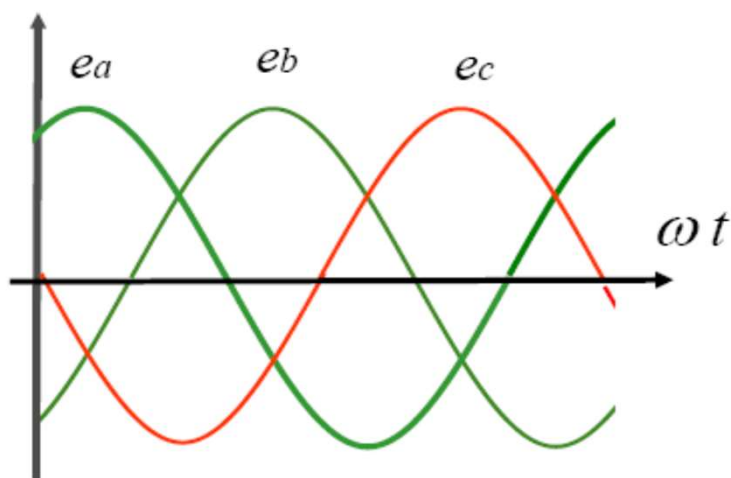
控制算法——FOC角度观测

三相 BLDC 电机模块由电阻、电感、反电动势组成,其简单的模型如下:

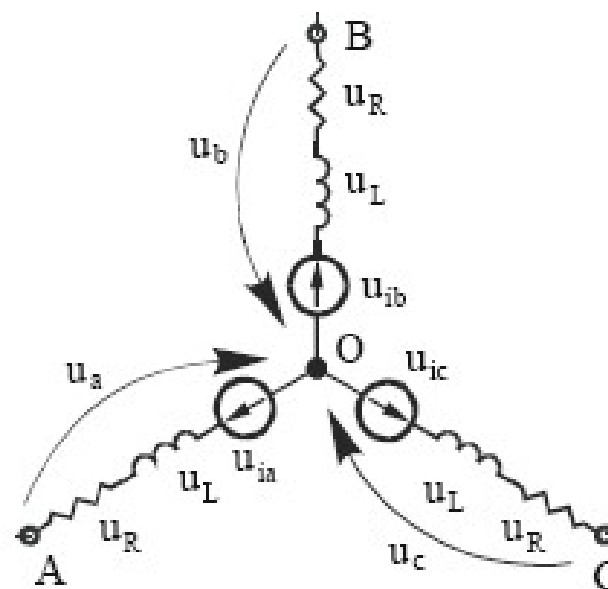
1

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

2



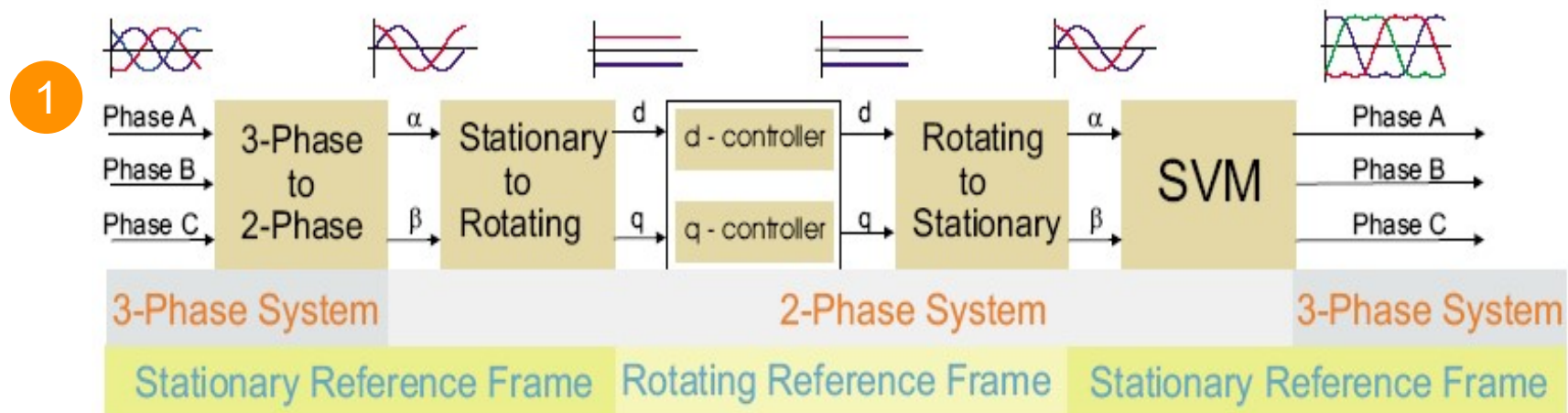
3





控制算法——FOC角度观测

基本原理：通过测量和控制电动机定子电流矢量，根据磁场定向原理分别对电动机的励磁电流和转矩电流进行控制，从而达到控制电动机转矩的目的。



2

$$Torque = \frac{p}{2} (\Psi_{magnet} \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q)$$

定子磁势垂直于转子磁势，电机保持最大转矩控制，快速响应



Agenda



Fortior Tech
峰昭科技

1 直流无刷电机应用领域

2 电机控制方法介绍

3 电机控制芯片介绍

4 FOC控制原理介绍

5 吊扇控制程序设计



调试电机四部曲——评估性能需求

芯片选择——FU6812、6832、6861

■ 高压吊扇选用FU6812L/**FU6812s**，低压吊扇选用FU6832L/**FU6832s**

功率器件选择

■ 根据功率、电压、电流选择相应的功率器件

设计合适的采样电阻值、放大倍数

低压吊扇选用PN管集成的MOS半桥MOS

高压吊扇选用预驱FD2606s+分立MOS FMD2N50E5

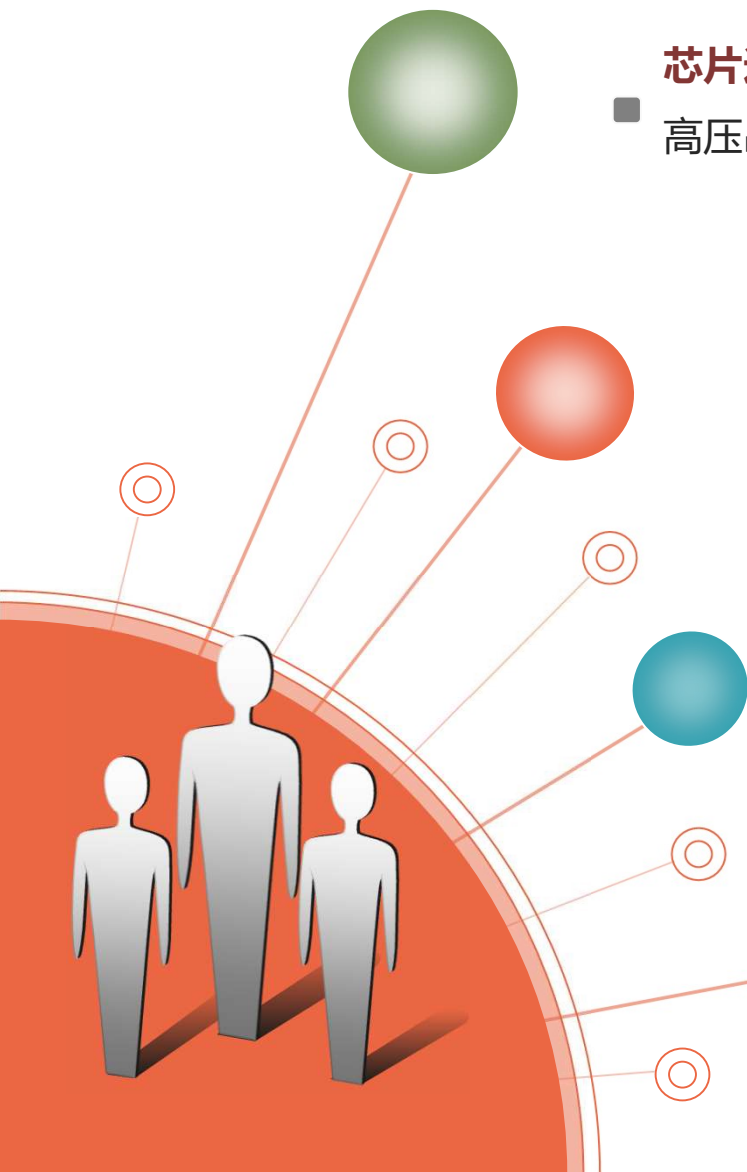
调速、保护

■ 模拟调速/PWM调速/串口调速

过流、过欠压、堵转、短路、缺相、温度

其他附加功能

■ 遥控器、蜂鸣器、LED调光调色





调试电机四部曲——测试电机参数

▶ 不同电机的极对数、电阻、电感、反电动势都不同，因FOC计算受这些参数影响很大，调试时需写入调试电机的参数

1、电机极对数P

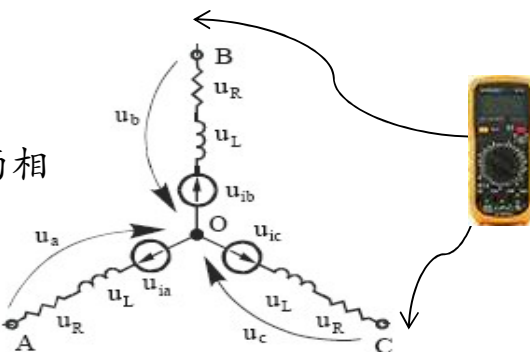
电机设计时给出的参数



2、相电阻Rs

万用表测量电机两相线电阻RL

$$\text{相电阻 } R_s = R_L / 2$$

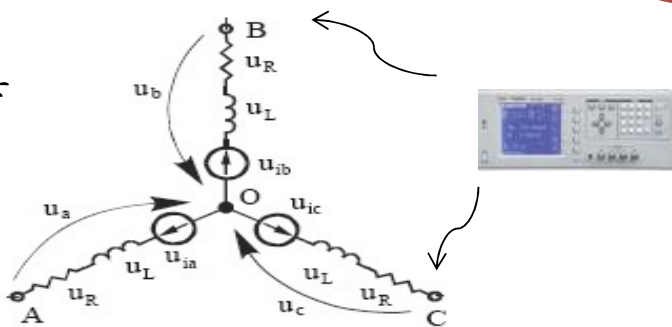


测

3、相电感Ls

电桥测1KHz频率下的两相线电感LL

$$\text{相电感 } L_s = L_L / 2$$



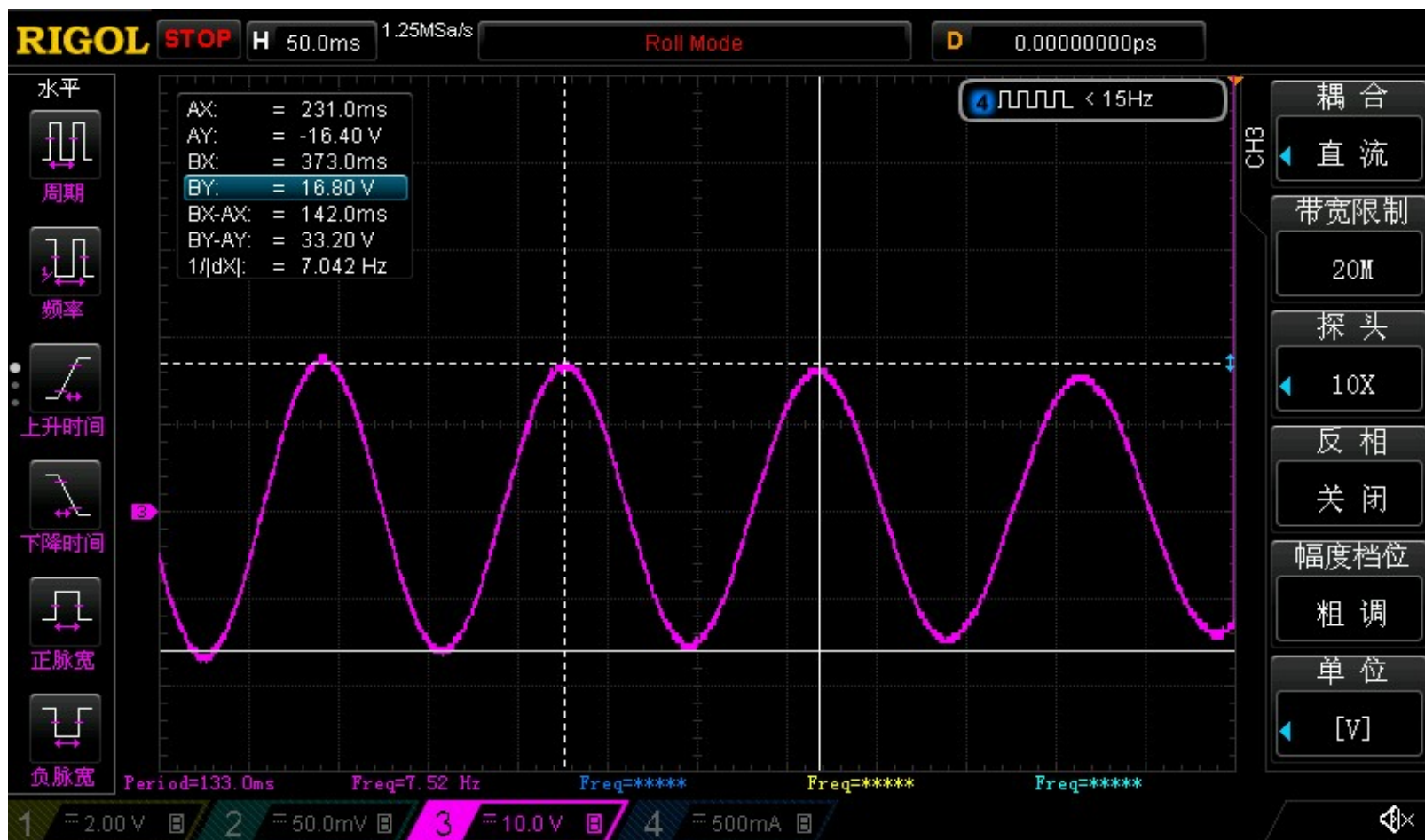
4、反电动势常数Ke

示波器的探头接电机的一相，地接电机另外两相中的某一相，转动负载，测出反电动势波形。取中间的一个正弦波，测量其峰峰值Vpp和频率f

$$K_e = 1000 * P * \frac{V_{pp}}{2 * 1.732 * 60 * f}$$



测试电机参数—反电动势常数Ke



▶ 测量峰峰值 V_{pp} 为33.2V，频率 f 为7.042Hz，极对数为4，则：反电动势 $K_e=90.73$

$$K_e = 1000 * 4 * \frac{33.2}{2 * 1.732 * 60 * 7.042}$$

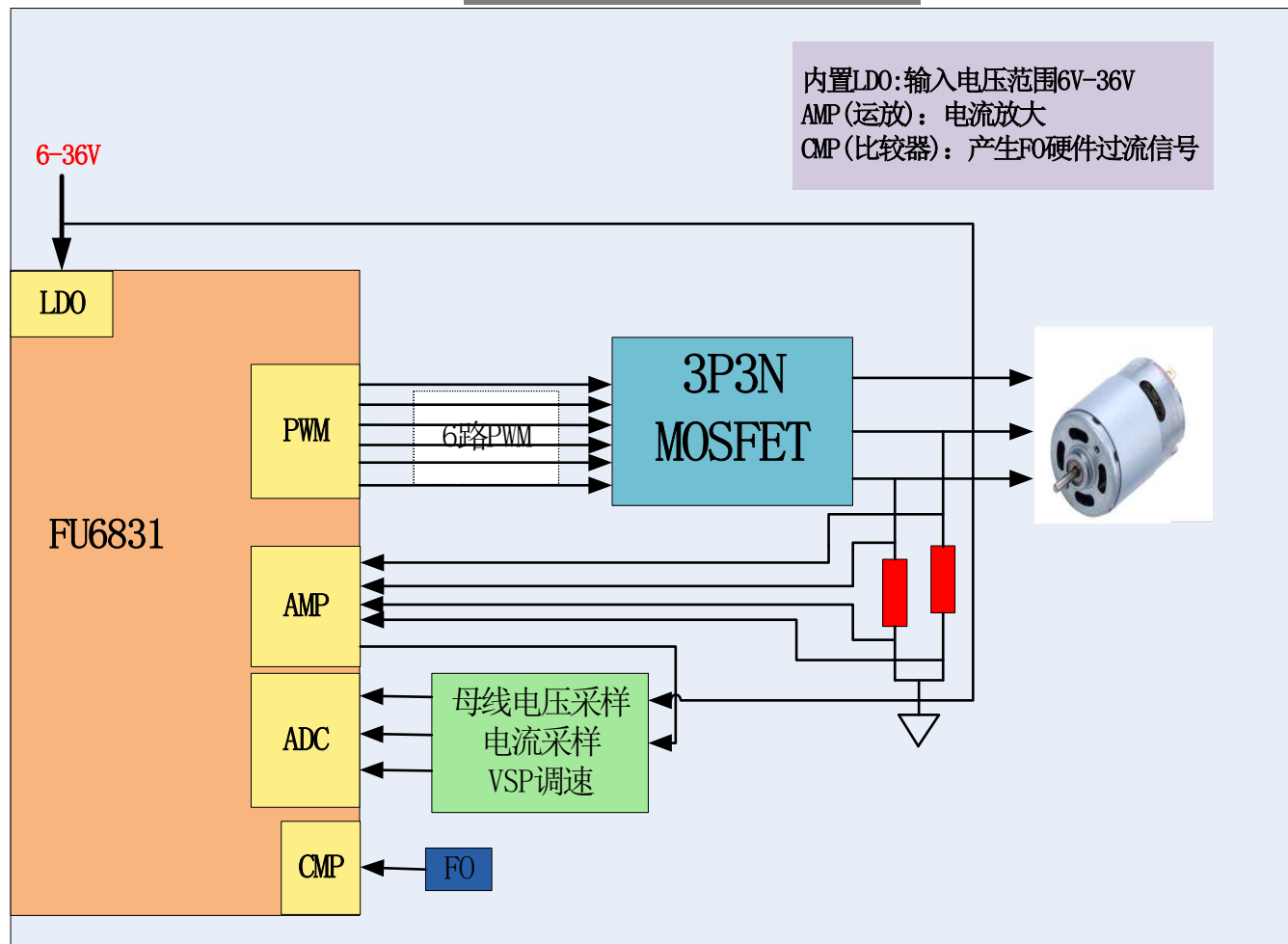


调试电机四部曲——验证硬件

调试步骤

- 1、芯片电源电压是否正常
- 2、2.5V采样电压是否正常
- 3、硬件过流保护配置
- 4、不接电机时，U、V、W输出（幅值、频率、占空比）

FU6831硬件控制框图

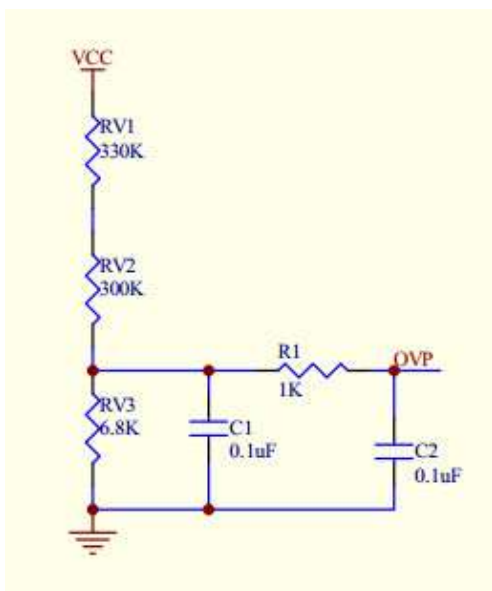




调试电机四部曲—验证硬件

电压基准

- FOC的SVPWM模块中需采集母线电压进行计算，在高低压应用中，因电源电压与MCU的ADC最大采样电压不等，需根据实际情况将母线电压用分压方式来处理。
- 如下图：RV1=330K Ω ，RV2=300K Ω ，RV3=6.8K Ω ， $V_s=5.0V$ ，
则母线电压最大值为： $V_{smax}=5.0*(470+470+6.8)/6.8=468V$



$$RV = (RV1 + RV2 + RV3) / RV3$$

$$V_{s \max} = RV * V_s$$

注：低压RV2可省略



调试电机三部曲——验证硬件

电流基准计算

- 根据硬件板上的采样电阻 R_{sample} ，运放放大倍数 Amp ，MCU的ADC参考电压 V_s ，可计算电流基准、最大采样电流、最小采样电流。
- 在调节过程中，电机的电流不能超过最大采样电流，也不能小于最小采样电流
- 若出现超出情况，需根据实际情况重新配置采样电阻和运放放大倍数。
- 采样电阻的功率选择上，采用的原则为 $P=I^2 \cdot R_{sample} < P_{max}$ 。

$$I_{base} = V_s / (R_{sample} * Amp)$$

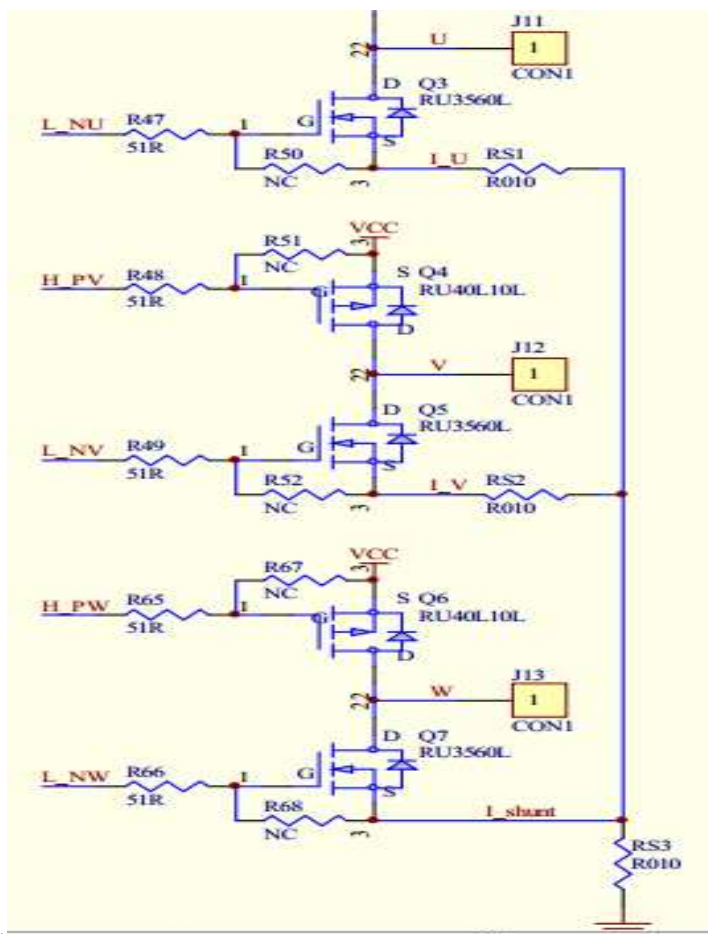
$$I_{s\ max} = I_{base} / 2$$

$$I_{s\ min} = -I_{base} / 2$$

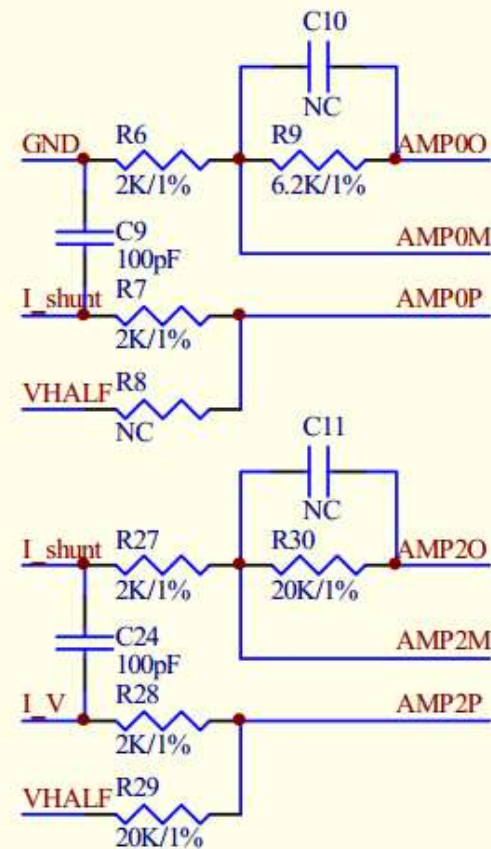


芯片原理图

采样电阻



放大倍数





调试电机四部曲——软件调试性能

7个控制状态

- 电机FOC控制包括7个控制状态，mcInit、mcCharge、mcTaiwind、mcAlign、mcStart、mcRun、mcFault
- 要启动电机使其稳定运转，需按照控制流程依次进行各阶段操作，实施相对应的控制

McInit关键参数

- 电机参数，速度基准，最大最小转速
- 采样电阻、运放放大倍数、母线分压电阻
- MCU的初始化，如变量赋初值，硬件I/O口初始化等
- 电流采样、电压采样的校准
- 配置FOC寄存器，如PWM有效电平、估算算法、单双电阻等



软件调试性能—三种启动方式

1

爬坡启动：大负载、慢启动

- 给定启动电流(IQREF为非零)，用爬坡方式将电机的电频率慢慢累加，坐标变换的角度信息由爬坡强制角度提供，拖动电机转动。待拖动电机速度达到一定时启动完成，角度信息逐渐切入到由位置估算算法提供
- 爬坡模块每个载波周期进行一次运算，爬坡计数器加一，当计数值达到RTHECNT，RFAE硬件清零，爬坡结束。
- 当爬坡结束后切换到估算模式，由于估算角度和爬坡角度存在偏差，因此需要平滑切换。通过调节角度切换修正值FOC_THECOR的值减小切换抖动，实现平滑切换。

$$\begin{aligned}\text{速度RTHESTEP}(32\text{bit}) &= \text{速度RTHESTEP}(32\text{bit}) + \text{加速度RTHEACC} * T_s \\ \text{角度THETA}(16\text{bit}) &= \text{角度THETA}(16\text{bit}) + \text{速度RTHESTEP}(\text{高}16\text{bit}) * T_s\end{aligned}$$



软件调试性能—三种启动方式

2

Omega启动：启动快、切换平滑

- 给定启动电流(IQREF为非零)，位置估算算法估算当前速度，当速度低于启动限制转速时，估算器输出强制角度，将电机拖动。当电机速度大于启动的最小切换转速，启动结束，角度信息由估算算法计算得出。

关键变量：

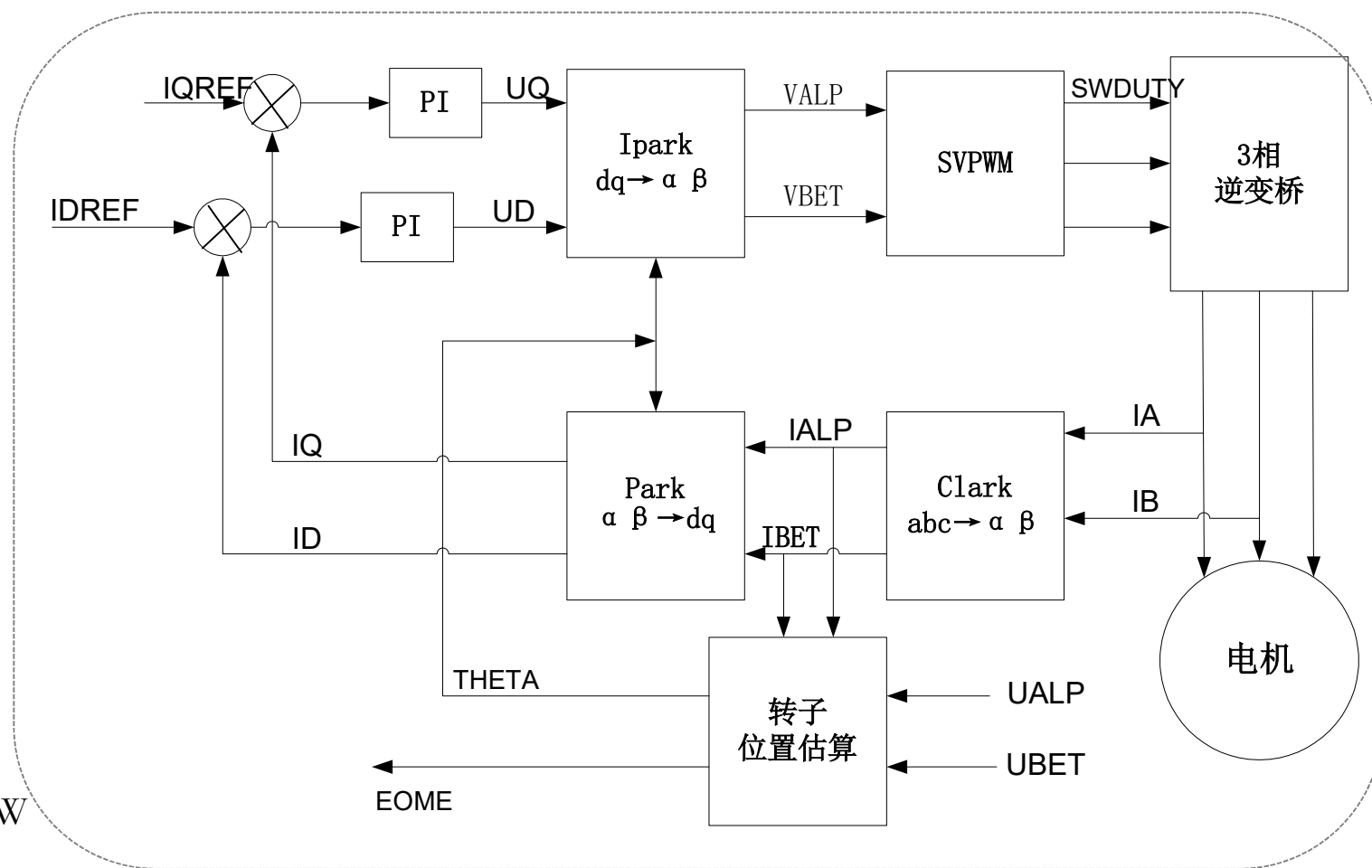
- 启动增量 Motor_Omega_Ramp_ACC
- 启动最小切换转速 MOTOR_OMEGA_ACC_MIN
- 启动限制转速 MOTOR_OMEGA_ACC_END
- 观测器带宽的滤波值ATO_BW
- 速度带宽滤波值SPD_BW
- 启动电流IQREF

3

爬坡启动 + Omega启动 → 第三种启动方式



软件调试性能—运行



关键变量

观测器带宽的滤波值 ATO_BW

速度带宽滤波值 SPD_BW

滑膜 K_{slide}

电流环的 K_p 、 K_i

电流给定值 FOC_I_{QREF}

纯电流环



速度环



软件调试性能——常用中断

中断优先级从高到低



硬件保护

CMP_ISR()
EXTERN_INT()

快速响应硬件过流，防止硬件板损坏



Capture中断

TIM23_INT()

捕获PWM信号，得到速度响应信号



FOC中断

FOC_INT()

每载波周期内执行一次，处理响应要比较快的函数，
如软件过流、速度滤波等



1ms中断

TIM45_INT()

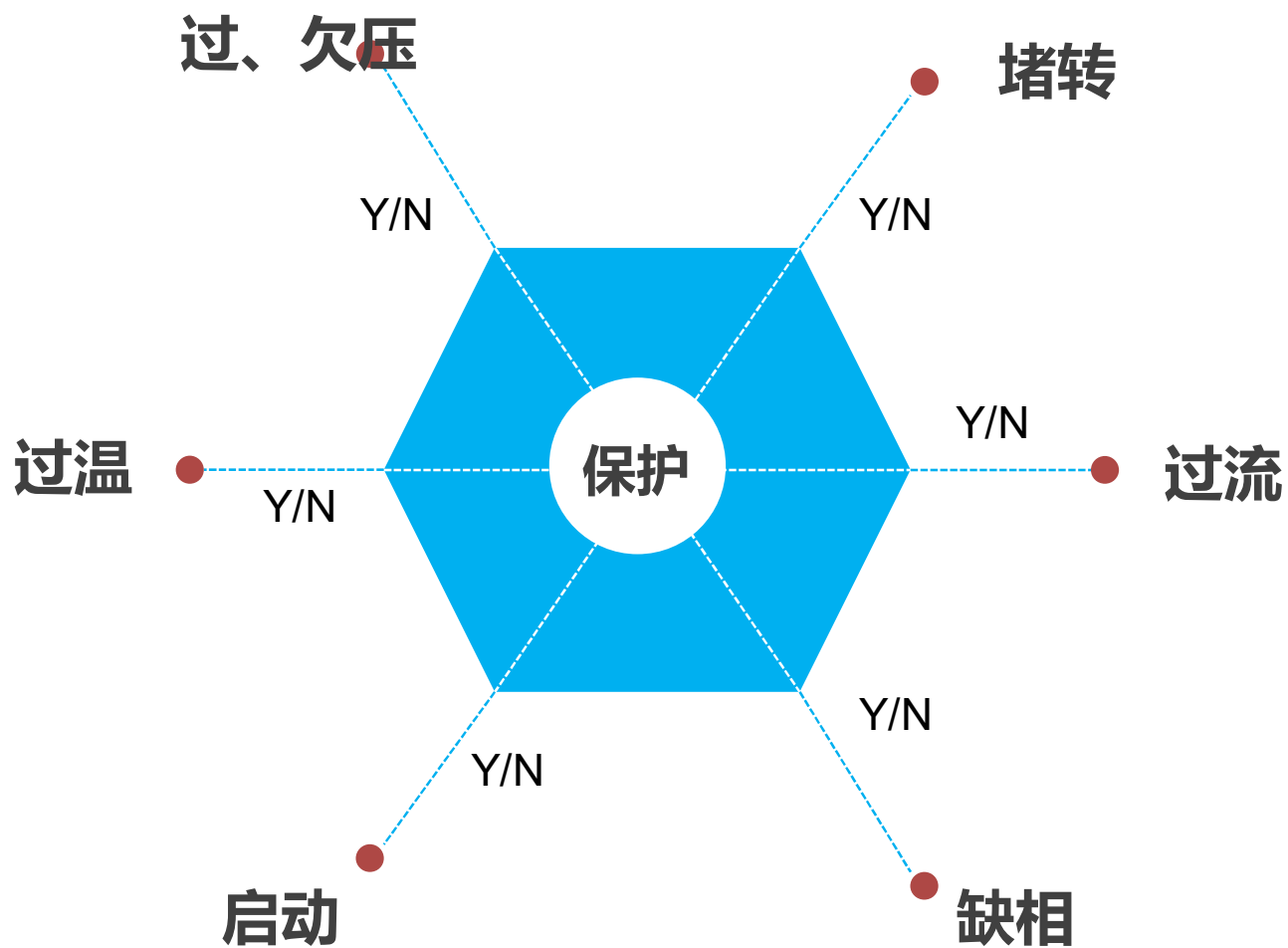
处理外部环路、保护、调速等实时性不高的函数

注：为防止中断串扰，乘法器、PI等应在一个中断里完成





软件调试性能—常用保护





应用手册—FOC应用手册

控制系统概述



磁场定相控制原理



FOC启动调试



FOC运行调试



FOC保护调试

2.1.3. 转子位置估算

1) 电机模型

通过使用一个直流电机模型来估算电机的位置，该电机模型由绕组电阻、绕组电感和反电动势来表示，如图 2-1-5 所示。

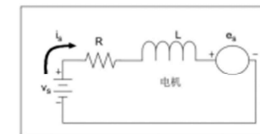


图 2-1-5 电机模型

无传感器控制技术通过估算电机的位置来计算 FOC 所需的换相角度，从而实现 FOC 算法。通常情况下，电机的位置和速度可根据测量电机的电流和电压估算出。在估算 BLDC 位置的算法中，滑膜观测器(SMO)是一种简单且性能较好的算法。在不影响电机控制性能的前提下，将 BLDC 的数学模型进行简化，用绕组电阻、绕组电感和反电动势来表示，如式(2-1-5)所示。

$$V_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + e_s \quad (2-1-5)$$

其中， i_s 为电机电流矢量， e_s 为反电动势矢量， V_s 为输入电压矢量， L 绕组电感， R 绕组电阻。在数字域中，该方程式可表示为：

$$i_s(n+1) = (1 - T_s \frac{R}{L})i_s(n) + \frac{T_s}{L}(V_s(n) - e_s(n)) \quad (2-1-6)$$

该公式是电机的一个数字化模型，称为电流观测器。位置和速度估算器是基于电流观测器而构建的。该数字化模型对硬件使用了软件表示方式，为了使测量电流和估算电流相匹配，数字化电机模型需要使用闭环控制来进行校正，如图所示。



应用手册——吊扇调试手册

硬件参数配置

FOC参数配置

吊扇启动方法说明

速度环/功率环外环调试

遥控器功能添加



FU68xx 无感 FOC 吊扇调试说明

1 硬件参数配置

1.1 电机参数配置

配置文件: customer.h

参数如下:

```
#define Pole_Pairs (4.0)
```

电机极对数 (单位: 对极)

```
#define RS (41.25)
```

电机相电阻: 使用万用表或 50Hz 频率电桥测量电机任意两个相线, 所得电阻值除以 2 (单位: 欧姆)

```
#define LD (0.26625)
```

```
#define LQ (0.26625)
```

电机相电感: 使用 1KHz 频率电桥测量电机任意两个相线, 所得电感值除以 2 (单位: H)

```
#define Ke (187.5)
```

电机反电动势系数 (单位: V/KRPM)

1.2 PCBA 硬件参数配置

配置文件: customer.h

电流采样参数

```
#define HW_RSHUNT (0.22)
```

采样电阻阻值 (单位: 欧姆)

```
#define HW_AMP_GAIN (6.0)
```

运放放大倍数, 详细描述如下:

电路上运放放大倍数受采样电阻配置影响, 改变以下语句可配置成单电阻采样 (Single_Resistor) 或双电阻采样 (Double_Resistor)

```
#define Shunt_Resistor_Mode (Double_Resistor)
```

当配置成双电阻采样 (Double_Resistor) 时, 运放放大倍数取决于芯片内部运放 AMP1 AMP2 外围电路配置, 如下图, 最终放大倍数为 $R9/R6=6$ 倍。

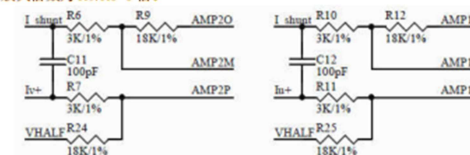


图 1

此时芯片内部运放 AMP0 可用于母线电路采样, 可配合芯片内部比较器 CMP3 用于硬件过流保护, AMP0 电路配置如下图。

Thanks

中国. 深圳高新中区科技中二路深圳软件园二期11栋203

邮 编: 518057

电 话: +86 755-8618-1158

手 机: 13713657701

传 真: +86 755-2686-7715

网 址: www.fortiortech.com

邮 箱: adazhu@fortiortech.com

