



**MICROCHIP**

# 无传感器磁场定向控制 及其在无人机中的应用

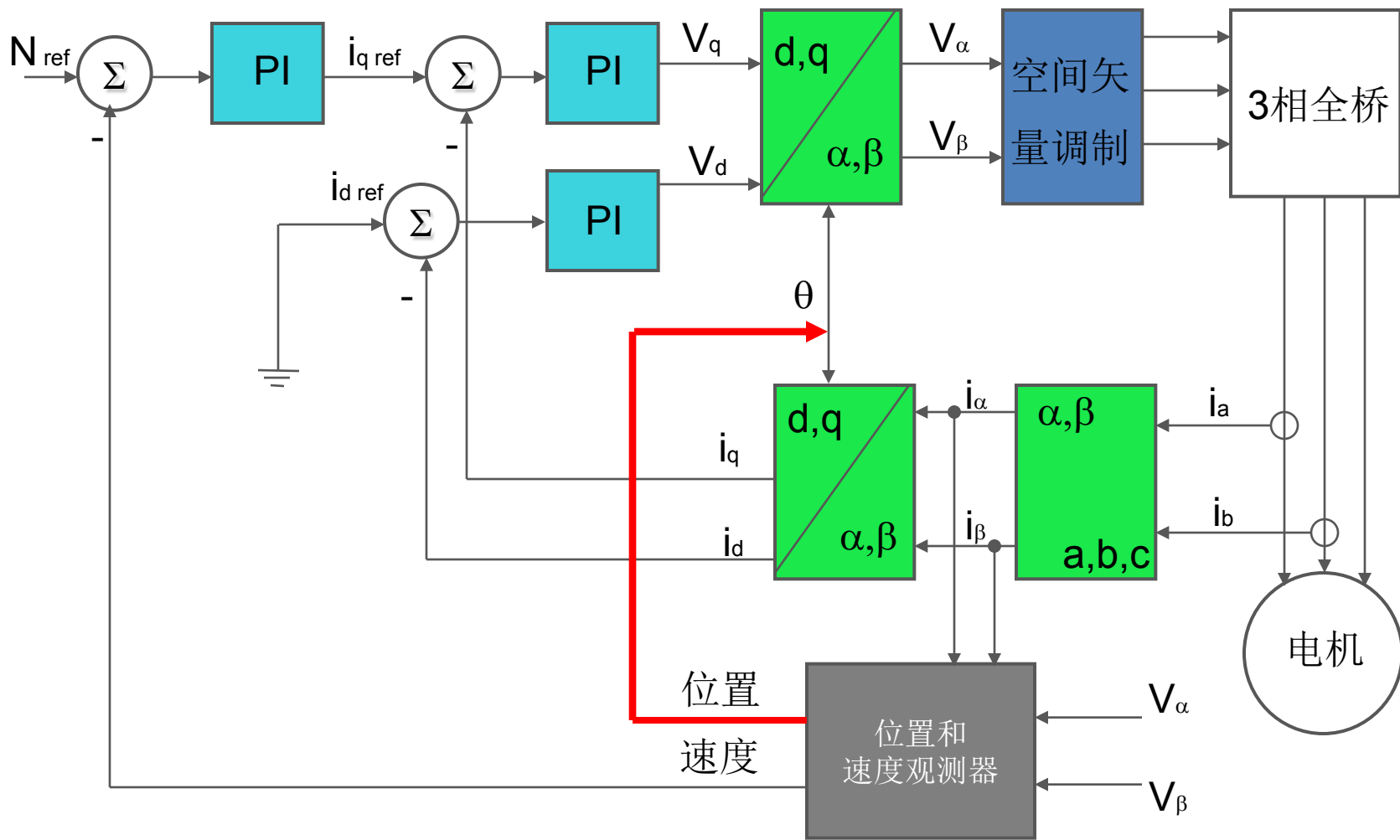
演讲者：张炎  
应用工程师

**Microchip Technology Inc.**

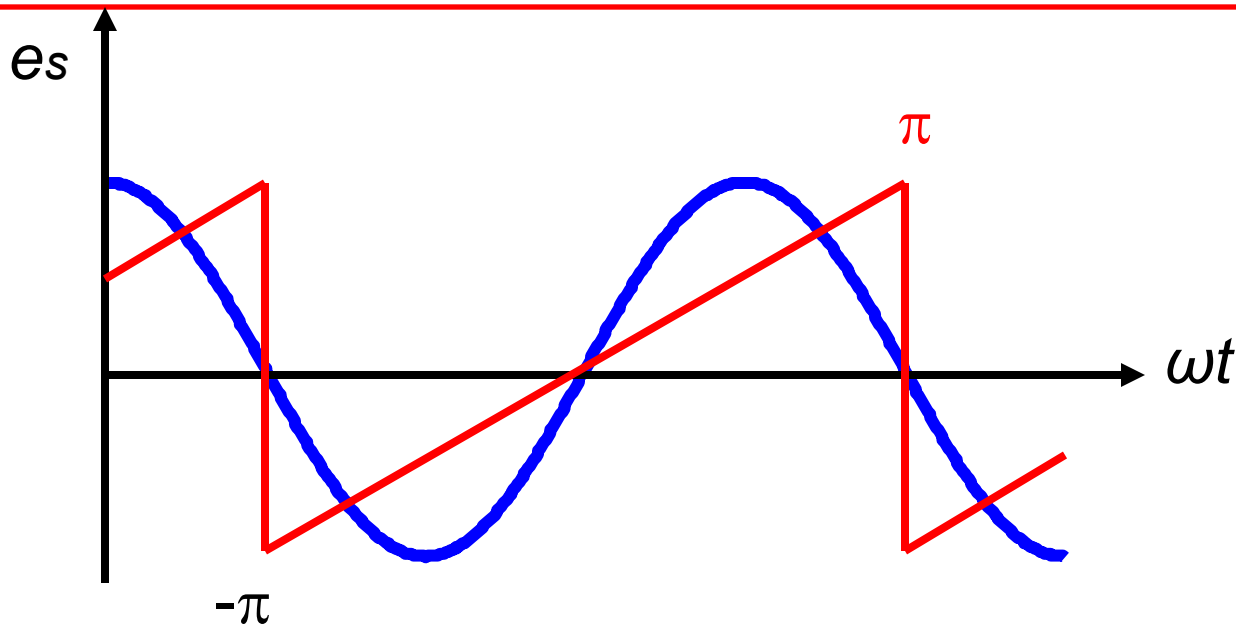
- 无传感器的磁场定向控制方法
  - 滑模观测器（**SMO**）
  - 锁相环观测器（**PLL**）
- **FOC相关产品**
  - 高性能的数字信号控制器（**dsPIC33EP**）
  - 高集成度的模拟驱动器（**MCP802X & MIC460X**）
- 无人机应用中的**FOC**控制
  - 云台
  - 旋翼

- 更快的动态响应
- 转矩输出平稳，抖动小
- 具有更高的效率
- 更低的电机噪音
- 正弦的反电动势波形谐波含量少，有更好的**EMI**性能

# 无传感器的磁场定向控制方法



# 无传感器的磁场定向控制方法

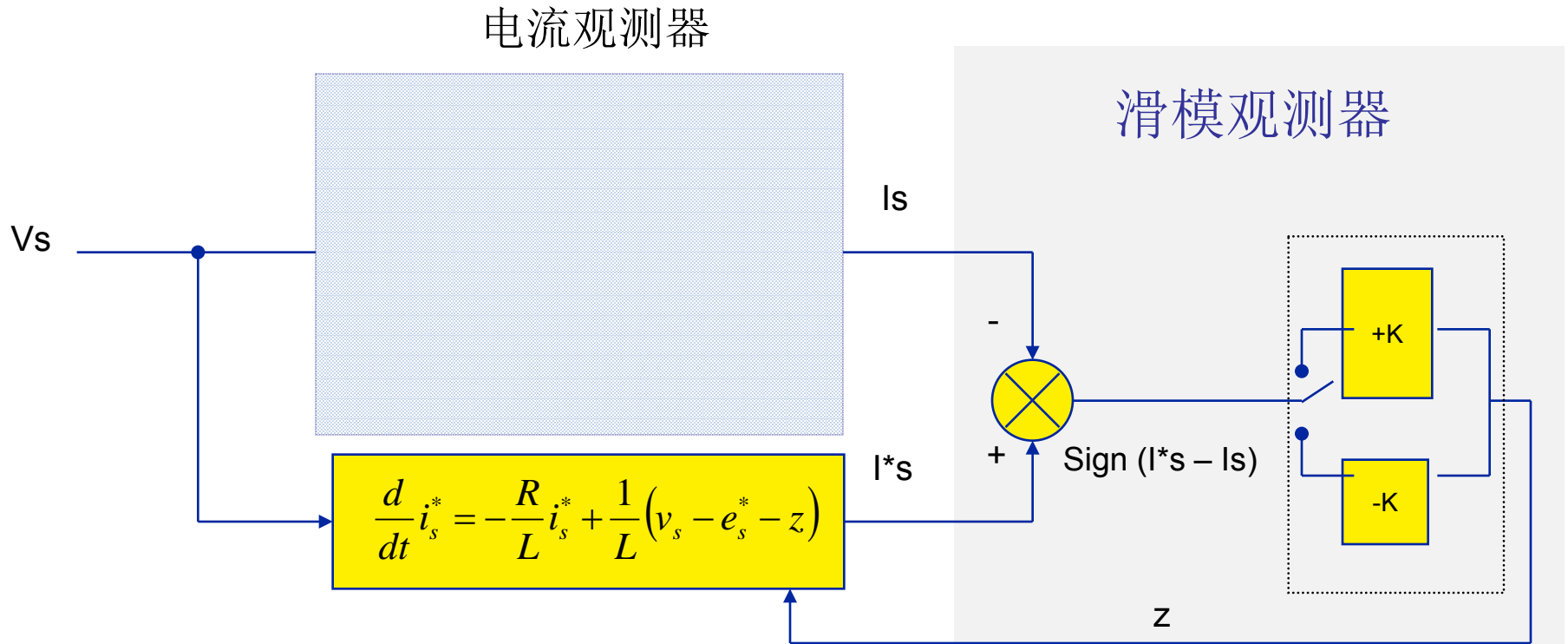


- 位置观测器

- 滑模观测器 (SMO) – AN1078
- 锁相环观测器 (PLL) – AN1292

- 无传感器的磁场定向控制方法
  - 滑模观测器（**SMO**）
  - 锁相环观测器（**PLL**）
- FOC相关产品
  - 高性能的数字信号控制器（**dsPIC33EP**）
  - 高集成度的模拟驱动器（**MCP802X & MIC460X**）
- 无人机应用中的FOC控制
  - 云台
  - 旋翼

# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)



\* 被观测电量

# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)

电机电气微分方程:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_\alpha + \frac{1}{L_s} [u_\alpha - e_{\alpha 0}] \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_\beta + \frac{1}{L_s} [u_\beta - e_{\beta 0}] \end{cases}$$

定子侧电气方程

滑模观测方程:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_d} [u_\alpha - e_\alpha - z_\alpha] \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_d} [u_\beta - e_\beta - z_\beta] \end{cases}$$

滑模开关量

快速切换

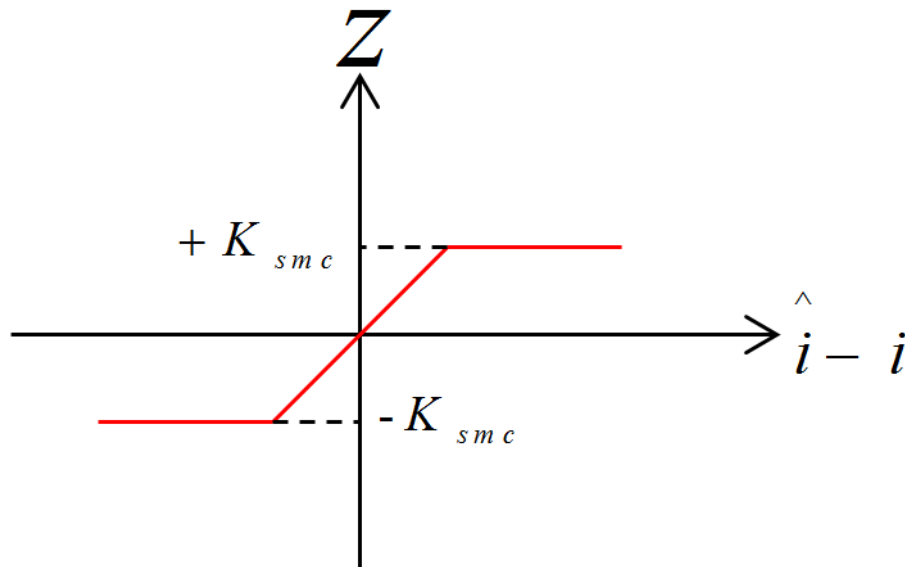
$$\begin{cases} \hat{i}_\alpha \approx i_\alpha \\ \hat{i}_\beta \approx i_\beta \end{cases}$$



# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)

滑模运动方程：

$$\begin{cases} z_{\alpha} = \frac{K_{smc}}{iErrMax} \cdot \left( \hat{i}_{\alpha} - i_{\alpha} \right) \in [-K_{smc}, +K_{smc}] \\ z_{\beta} = \frac{K_{smc}}{iErrMax} \cdot \left( \hat{i}_{\beta} - i_{\beta} \right) \in [-K_{smc}, +K_{smc}] \end{cases}$$



# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)

反电势计算方程：

$$\begin{cases} e_{\alpha} = \frac{z_{\alpha}}{\tau_s s + 1} \\ e_{\beta} = \frac{z_{\beta}}{\tau_s s + 1} \end{cases}$$

用低通滤波器滤掉载波PWM  
信息从而获取有效 $e_{\alpha}$ 、 $e_{\beta}$

# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)

为抑制噪音影响，再次低通滤波：

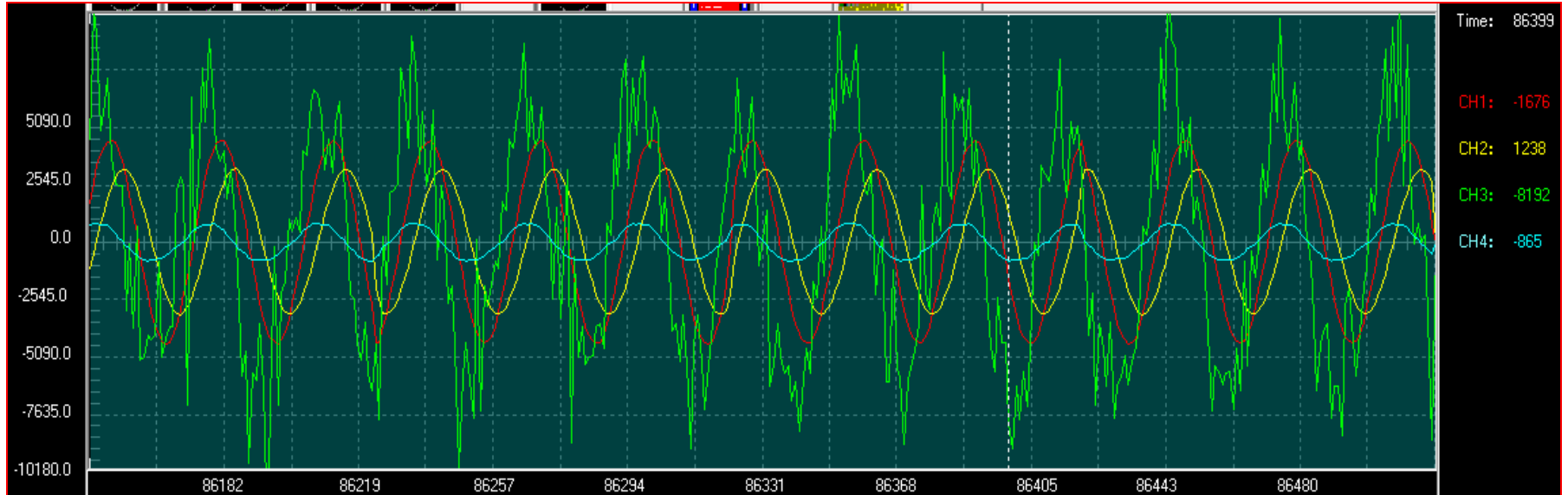
$$\begin{cases} e_{\alpha Lpf} = \frac{e_{\alpha}}{\tau_s s + 1} \\ e_{\beta Lpf} = \frac{e_{\beta}}{\tau_s s + 1} \end{cases}$$



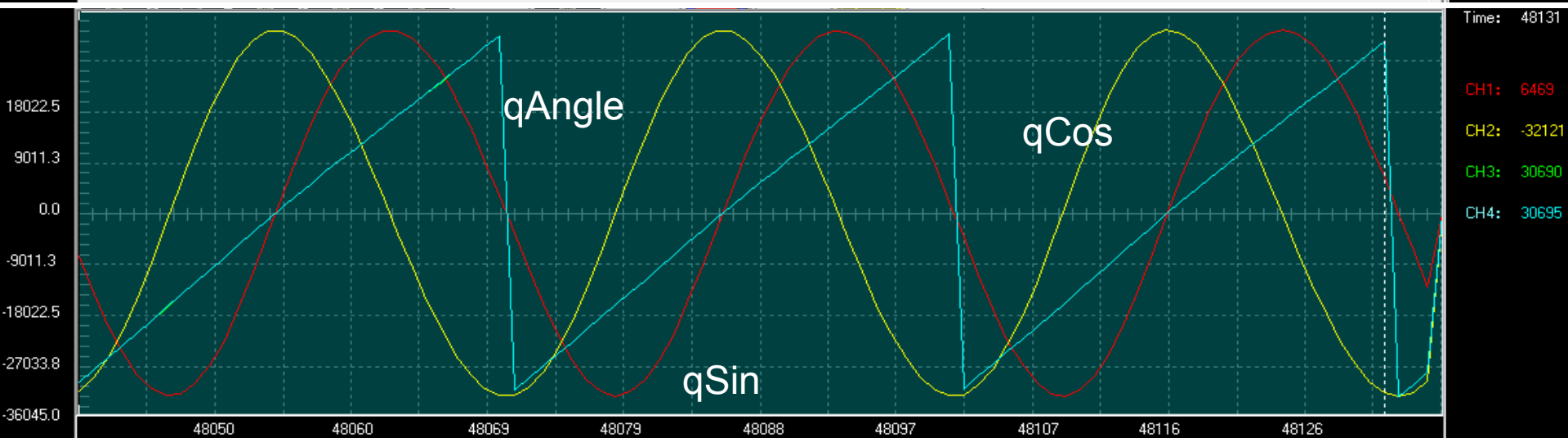
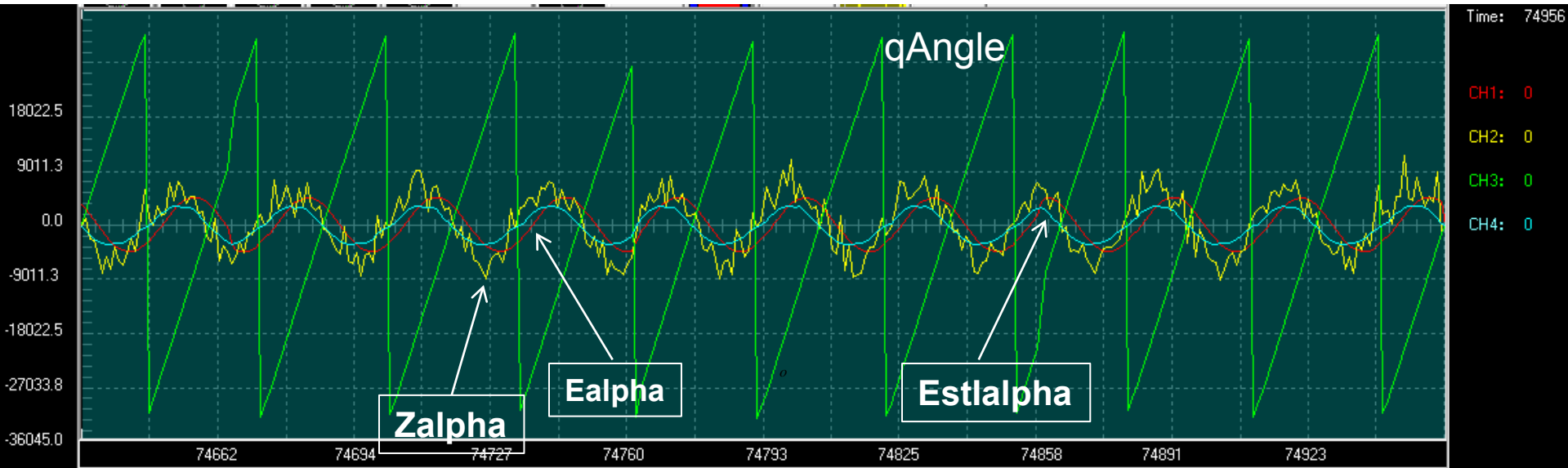
利用反正切求取位置角：

$$\theta_r = \operatorname{tg}^{-1} \left( -\frac{e_{\alpha Lpf}}{e_{\beta Lpf}} \right)$$

# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)

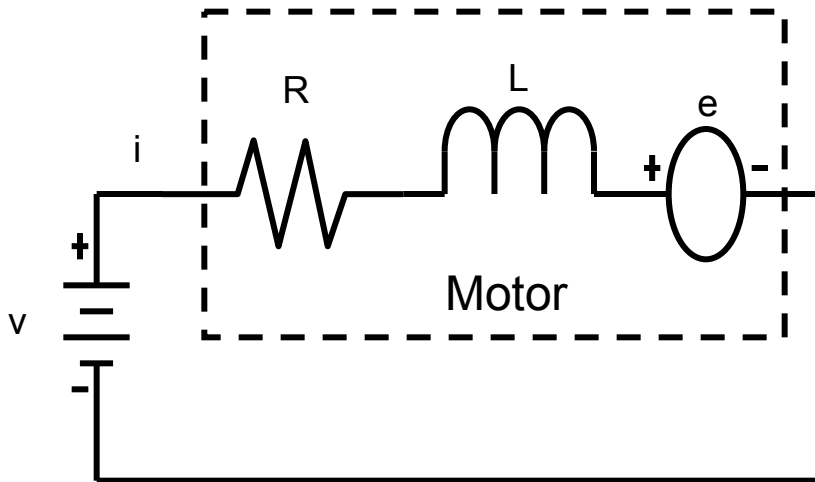


# 无传感器的磁场定向控制方法 (SMO)



# 无传感器的磁场定向控制方法 (PLL)

PMSM 电气模型



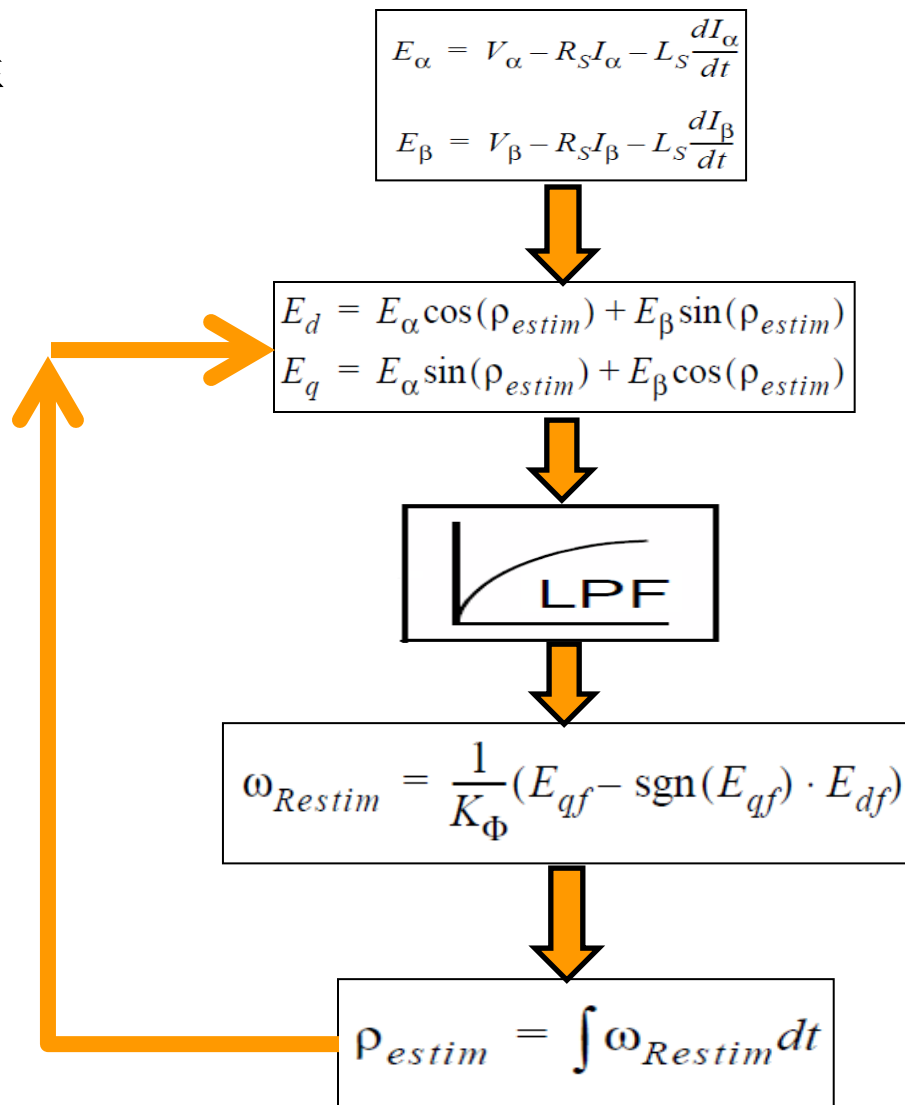
$$v_s = Ri_s + L \frac{d}{dt} i_s + e_s$$

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

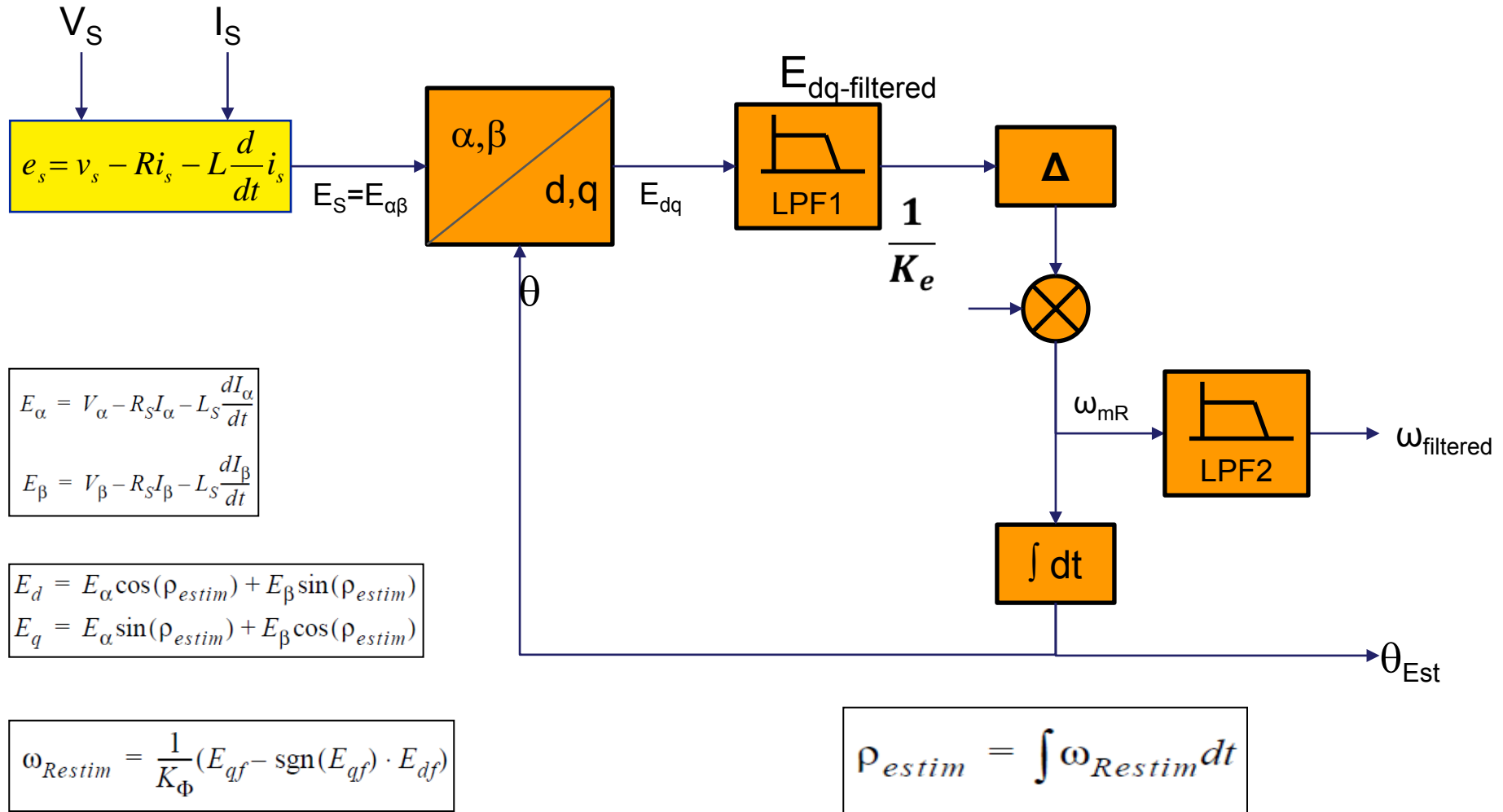
- 通过电气方程直接计算电机反电势( $e_s$ ) 用于后续的PLL观测器

# 无传感器的磁场定向控制方法 (PLL)

## 算法流程

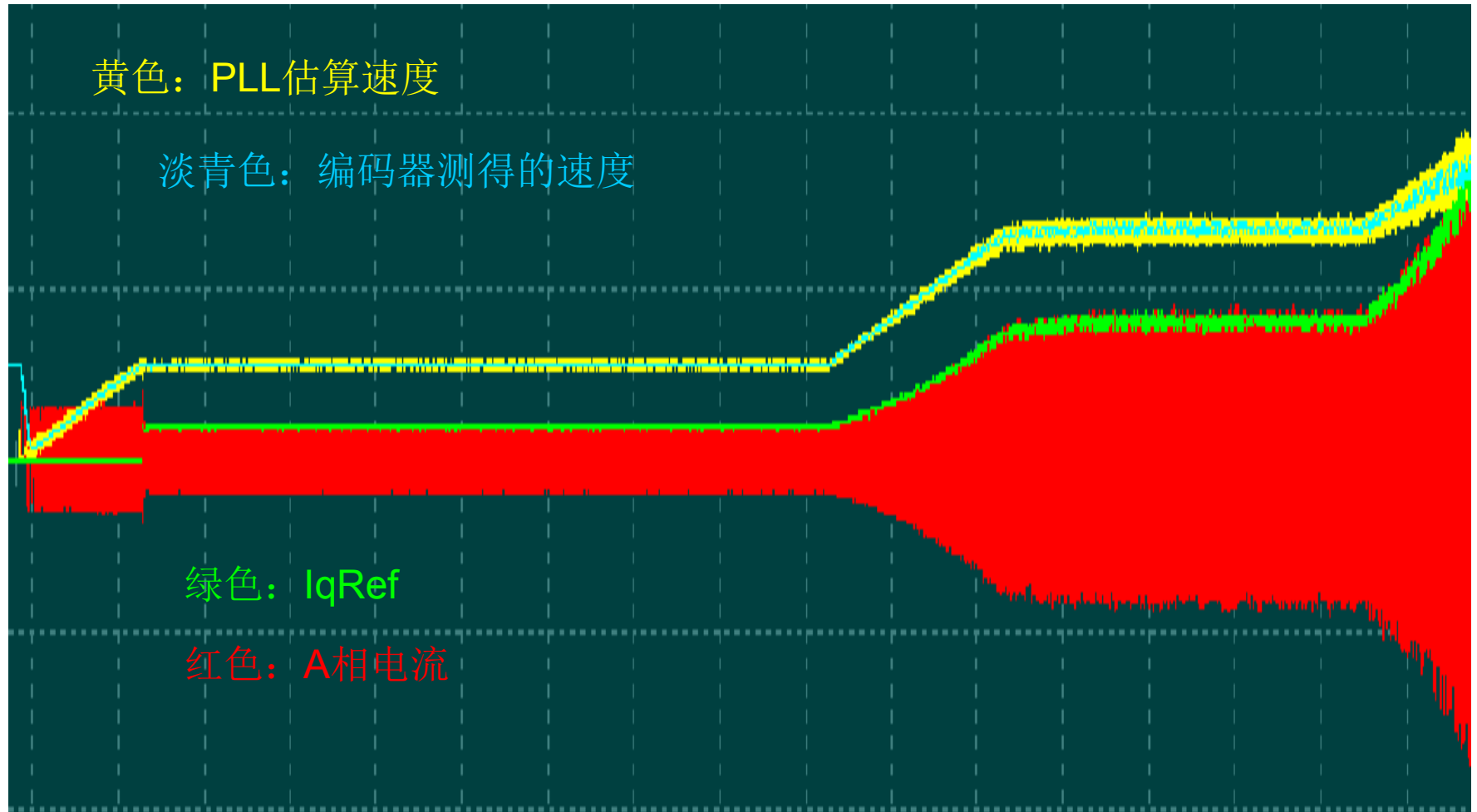


# 无传感器的磁场定向控制方法 (PLL)





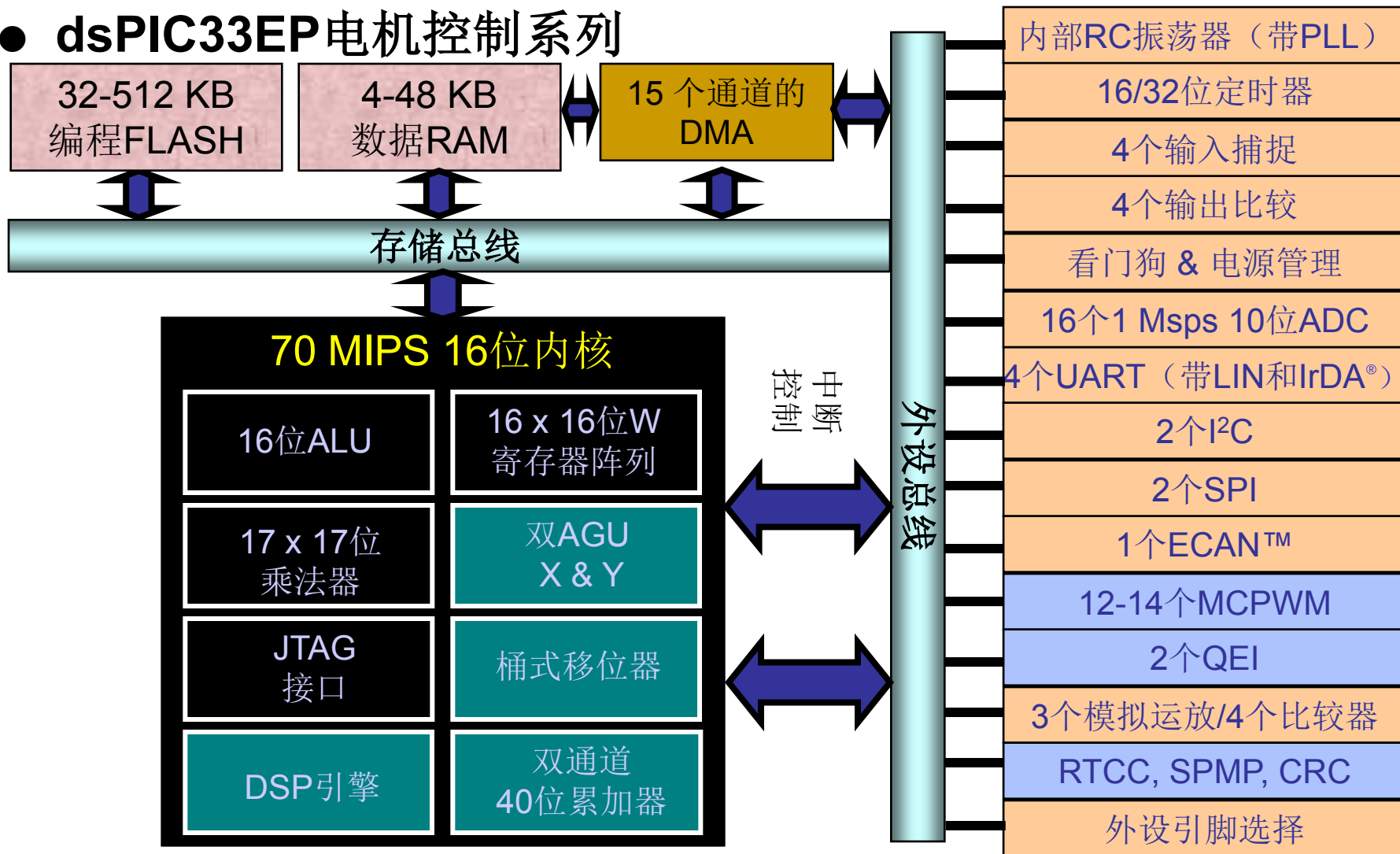
# 无传感器的磁场定向控制方法 (PLL)



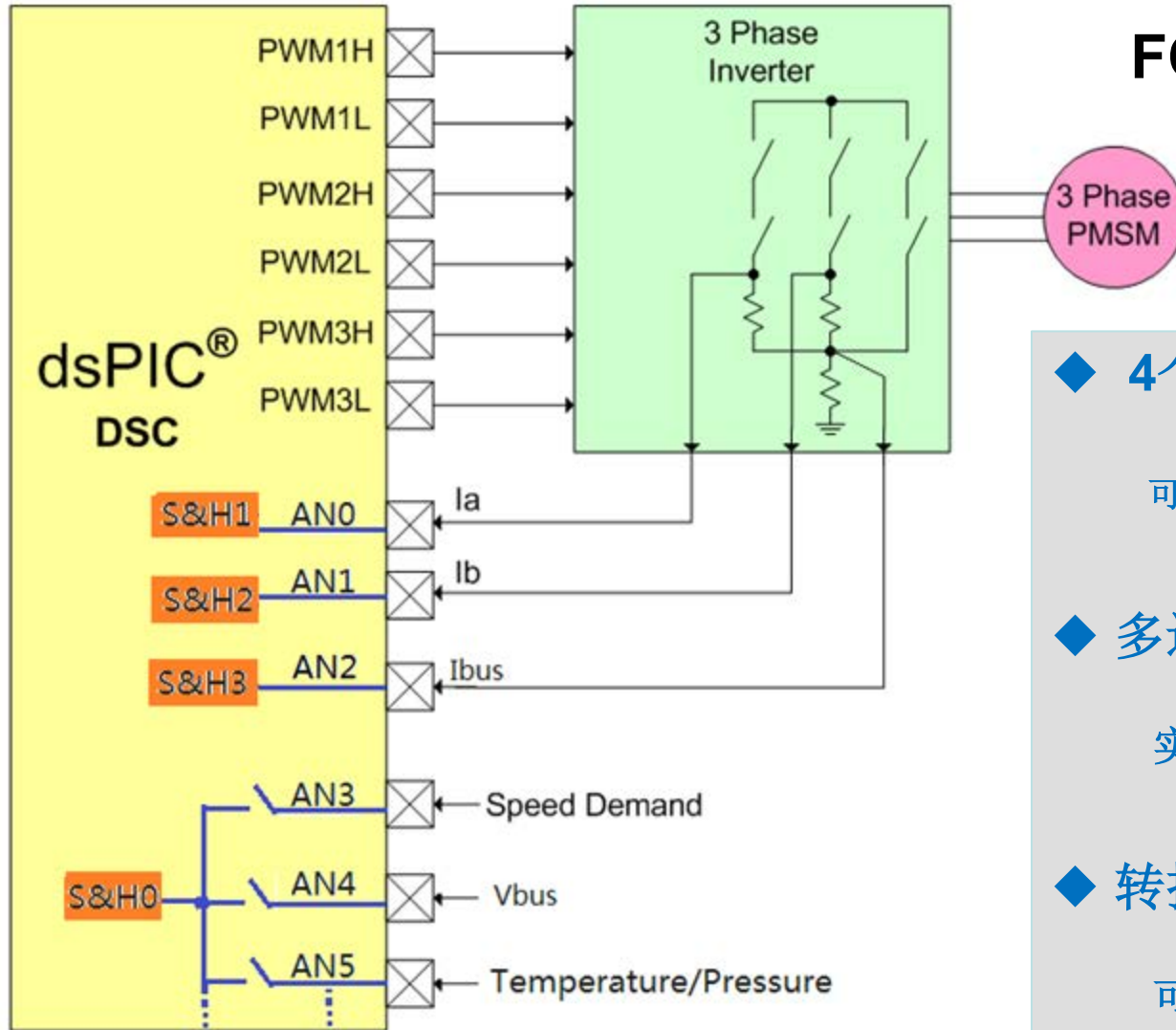
- 无传感器的磁场定向控制方法
  - 滑模观测器 (SMO)
  - 锁相环观测器 (PLL)
- **FOC相关产品**
  - 高性能的数字信号控制器 (**dsPIC33EP**)
  - 高集成度的模拟驱动器 (**MCP802X & MIC460X**)
- 无人机应用中的**FOC**控制
  - 云台
  - 旋翼

# 高性能的数字信号控制器 (dsPIC<sup>®</sup> DSC)

## ● dsPIC33EP电机控制系列



# 高性能的数字信号控制器 (dsPIC<sup>®</sup> DSC)



## FOC下ADC通道配置

### ◆ 4个采样/保持单元

可实现电流同步采样

### ◆ 多达16个通道

实时监控多种状态信息

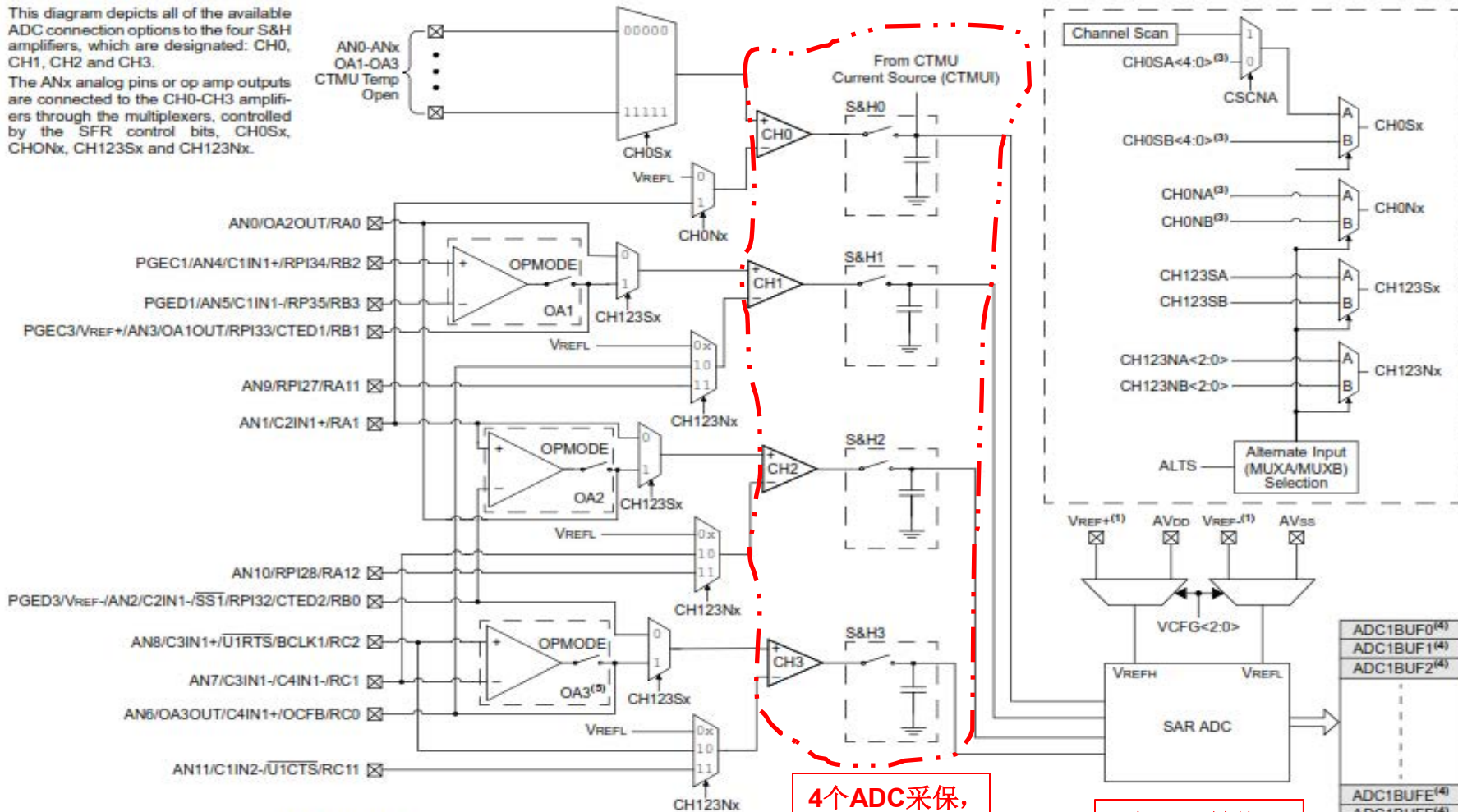
### ◆ 转换速度快

可达1.1 Msp/s

# 高性能的数字信号控制器 (dsPIC<sup>®</sup> DSC)

This diagram depicts all of the available ADC connection options to the four S&H amplifiers, which are designated: CH0, CH1, CH2 and CH3.

The ANx analog pins or op amp outputs are connected to the CH0-CH3 amplifiers through the multiplexers, controlled by the SFR control bits, CH0Sx, CH1Sx, CH2Sx and CH3Sx.



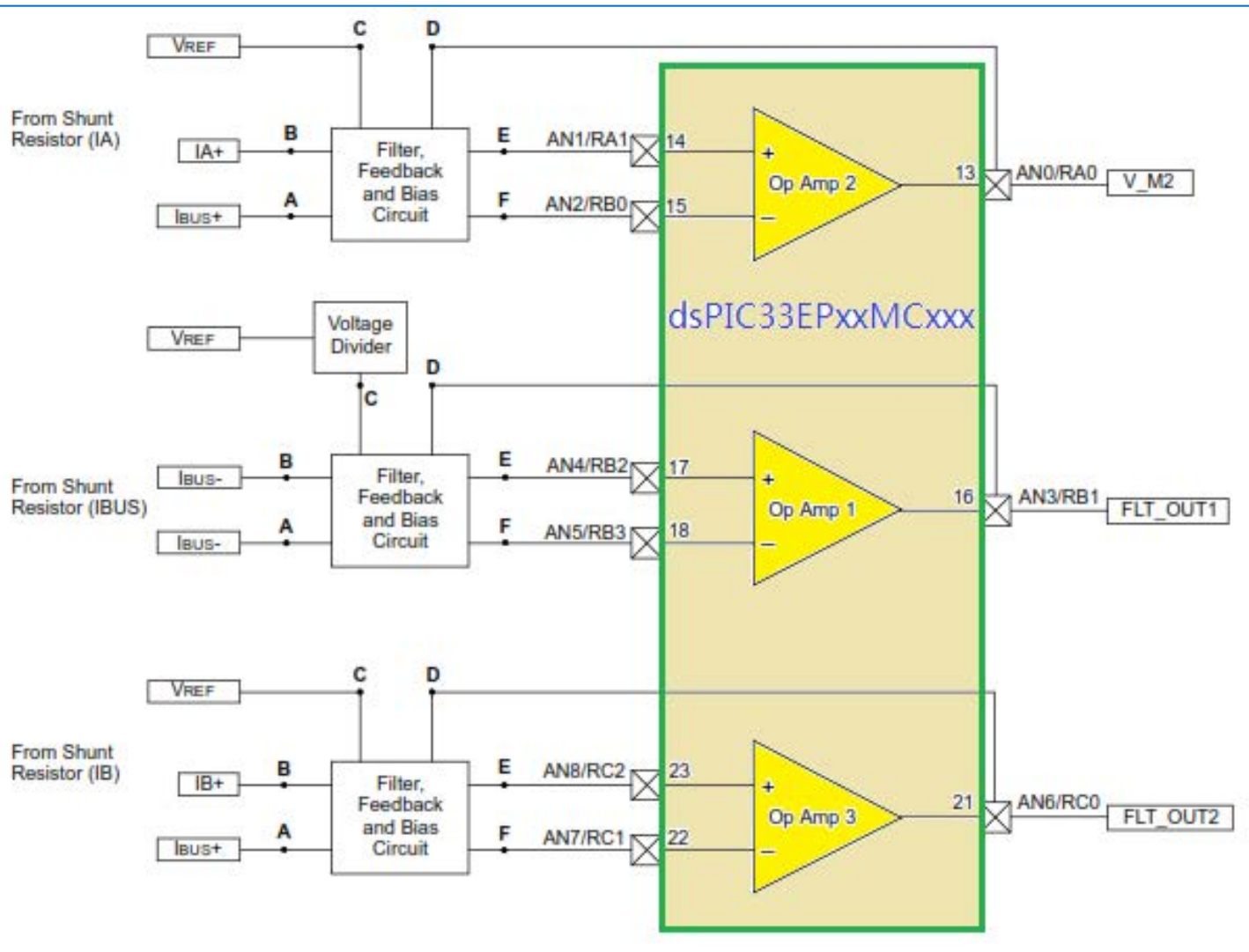
- Note**
- 1: VREF+, VREF- inputs can be multiplexed with other analog inputs.
  - 2: Channels 1, 2 and 3 are not applicable for the 12-bit mode of operation.
  - 3: These bits can be updated with Step commands from the PTG module. See Section 24.0 "Peripheral Trigger Generator (PTG) Module" for more information.
  - 4: When ADDMAEN (AD1CON4<8>) = 1, enabling DMA, only ADC1BUF0 is used.
  - 5: OA3 is not available for 28-pin devices.

4个ADC采保，  
可同步采样

1个ADC转换器

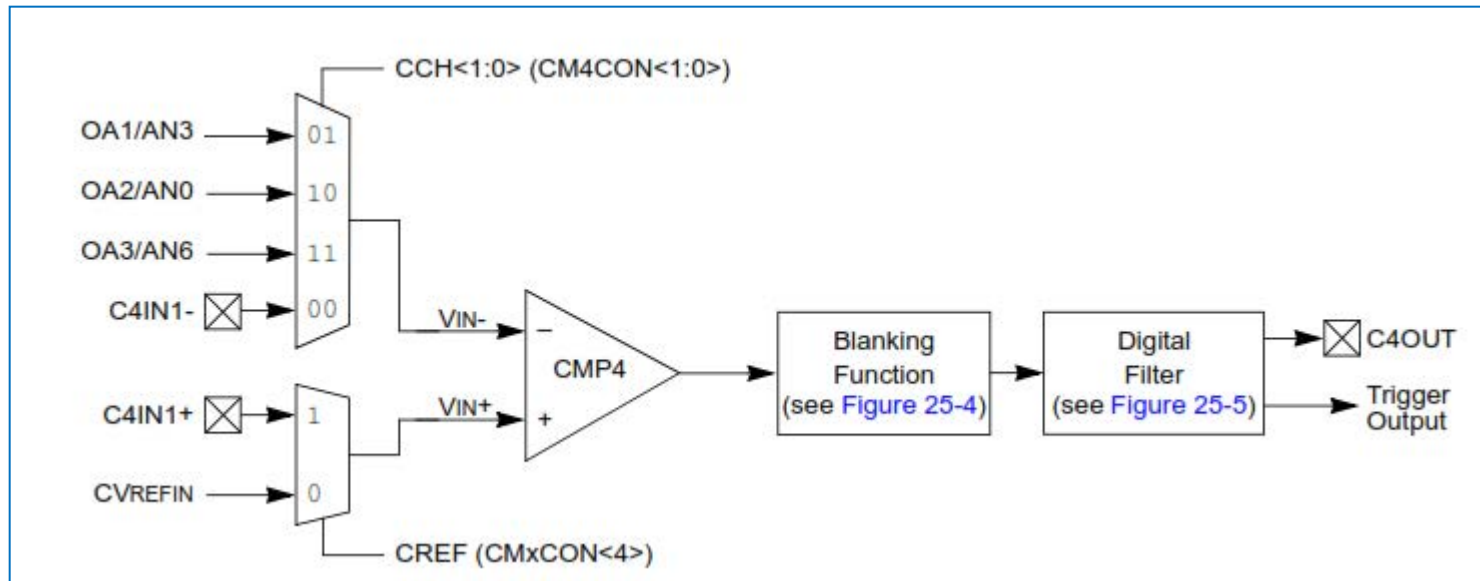
最多16个通道

# 高性能的数字信号控制器 (dsPIC<sup>®</sup> DSC)



- ✓ 电流采样
- ✓ 电压采样
- ✓ 温度采样
- ✓ 6~8 MHz
- ✓ Gain ≥ 4

# 高性能的数字信号控制器 (dsPIC<sup>®</sup> DSC)



**内置4个可编程比较器**

- ✓ 反电势过零比较
- ✓ 电流过流保护
- ✓  $V_{DC}$  过压保护

# 高度集成的模拟驱动器 (MCP802X)

## ● 集成了LIN收发器和电源模块的电机预驱动器

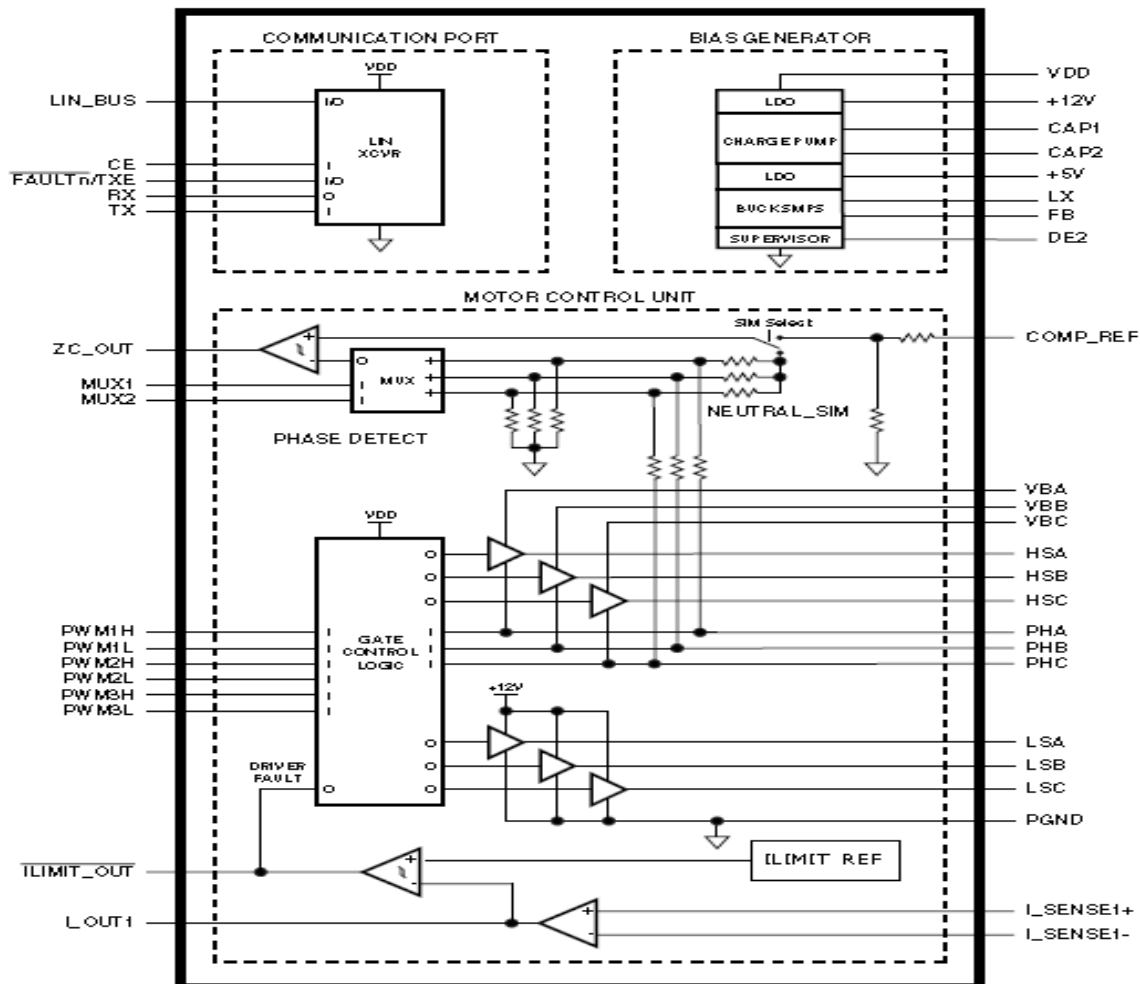
- 内置LIN收发器
- 3相6桥的MOS预驱动电路
- 内置开关模式的可调压的降压电源
- 内置LDO
- 内置端电压比较器和中心点模拟
- AEC-Q100认证
- 5X5 mm QFN 封装
- 输入电压范围：6V~40V
- 工作电压范围：6V~19V (MCP8025)  
6V~28V (MCP8026)
- 温度工作范围：-40~150°C
- 内置比较器和运算放大器
- 故障保护（过压、欠压、过温、过流和短路保护等）





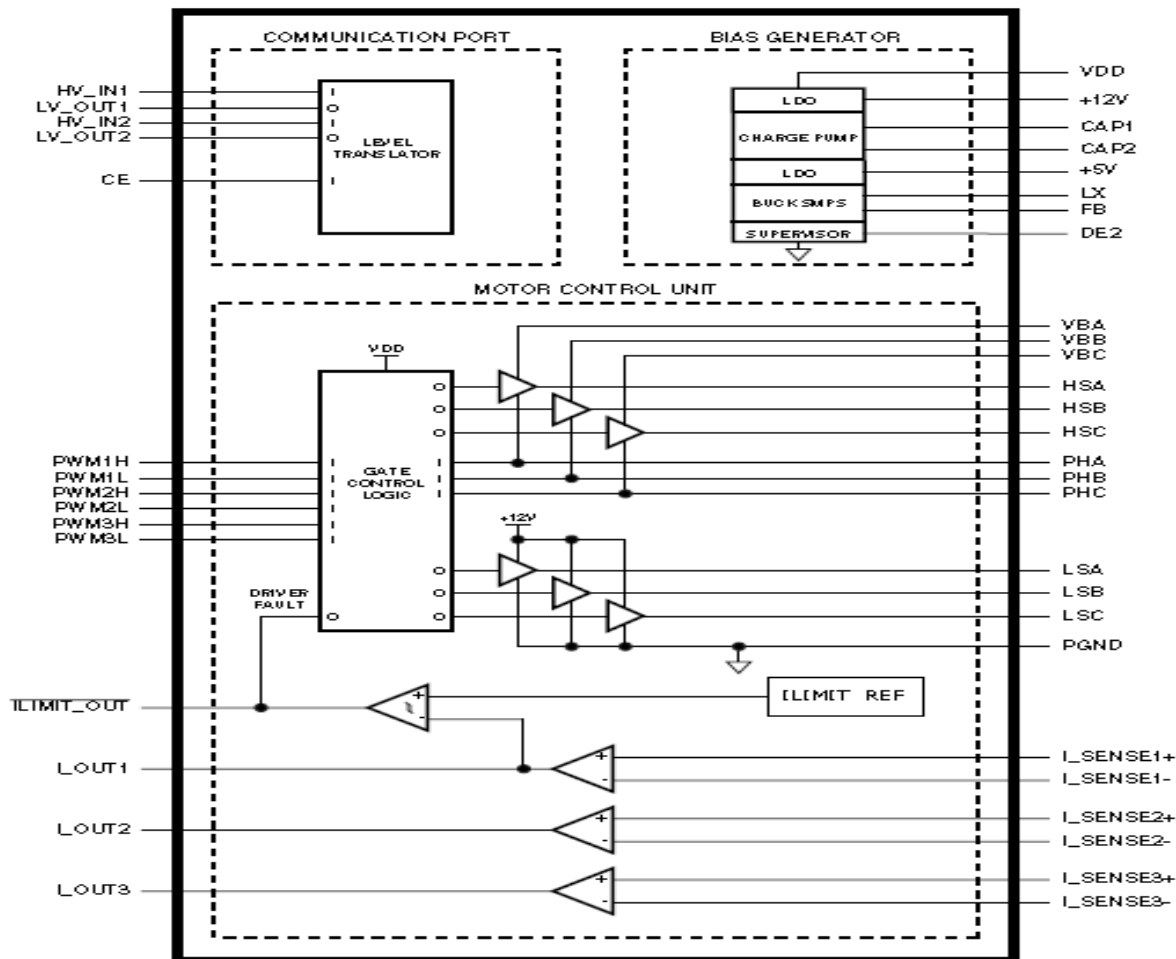
# 高度集成的模拟驱动器 (MCP802X)

## ● MCP8025功能框架图



# 高度集成的模拟驱动器 (MCP802X)

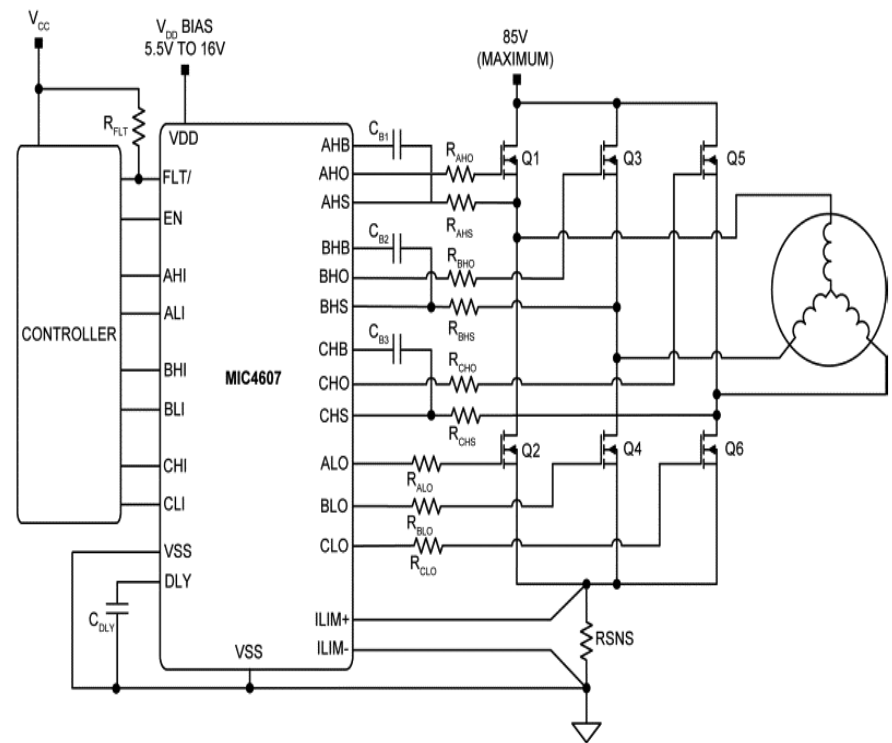
## ● MCP8026功能框架图



# 高度集成的模拟驱动器 (MIC460X)

## ● MIC4607-85V 3相MOSFET驱动器

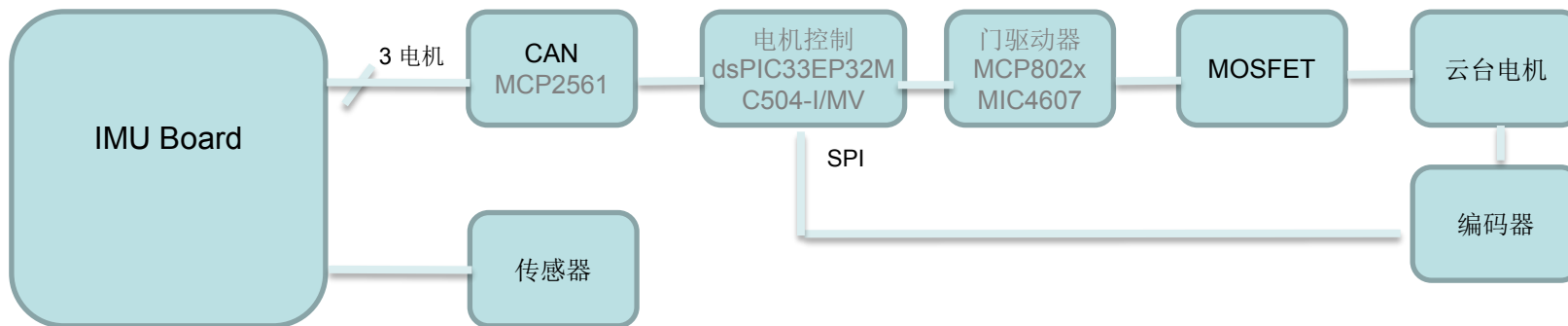
- 3相6桥的N MOS驱动电路
- 内置自举二极管
- 可选产生下桥互补PWM波形
- 可编程死区时间设置
- 内置比较器过流保护
- 上下桥直通击穿保护
- 驱动欠压保护
- 工作温度范围:  $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$
- 4X5 mm QFN封装



- 无传感器的磁场定向控制方法
  - 滑模观测器 (SMO)
  - 锁相环观测器 (PLL)
- FOC相关产品
  - 高性能的数字信号控制器 (dsPIC33EP)
  - 高集成度的模拟驱动器 (MCP802X & MIC460X)
- 无人机应用中的**FOC**控制
  - 云台
  - 旋翼

# 无人机应用中的电机控制 (云台)

- 3轴云台定位精度 < 0.1度
- 惯性测量单元从传感器（陀螺仪/加速计/磁材）得到3轴位置变化信息，然后发送指令到电机控制端来控制摄像头
- 使用FOC控制来保证更佳的控制精度
- 3个电机控制单片机单元：**dsPIC33EP32MC504-I/MV**
  - 16/32位单片机，可以运行FOC
  - 16/32 KB闪存，28/44脚
  - 小封装，6x6 mm QFN
  - 使用SPI与磁性编码器进行通信

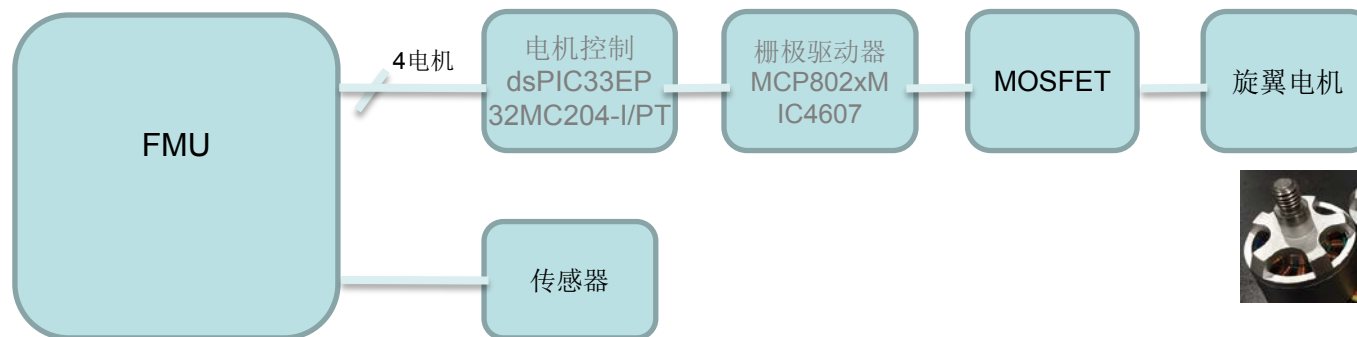


# 无人机应用中的电机控制 (云台)

- **单核对3轴的云台控制（正在评估）：**
  - 32位单片机PIC32MZ0512EFE064（带浮点单元的32位单片机）
  - 实现对3个电机的FOC控制
  - 兼容云台姿态控制算法

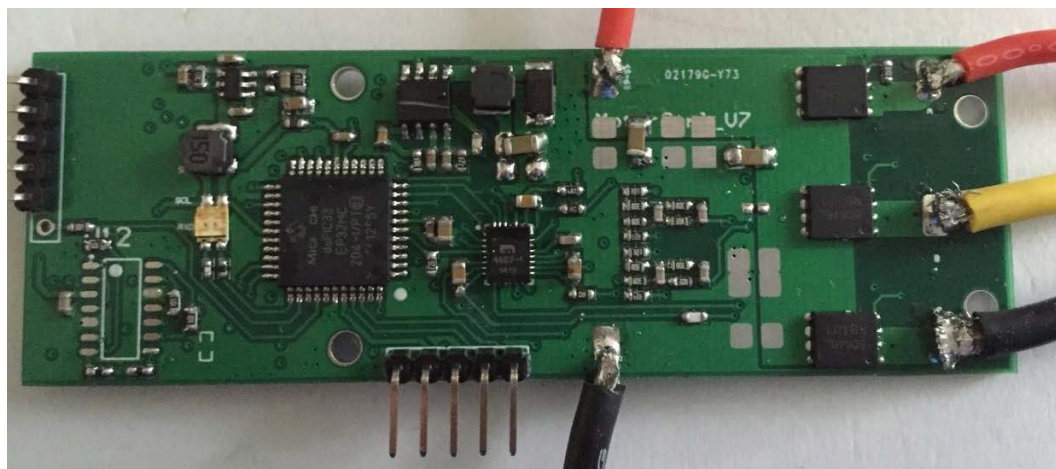
# 无人机应用中的电机控制 (旋翼)

- 旋翼控制从六步方波控制转换到FOC控制可以体现更好的电流-力矩效率，有更高的稳定性和低电磁噪声
- 4 个单片机单元：**dsPIC33EP32MC204-I/PT**
  - 16/32 位单片机，可以运行FOC
  - 16/32 KB闪存，28/44脚
  - 高稳定性和低电磁噪声
  - 转速范围：8~10 KRPM



# 无人机应用中的电机控制 (旋翼)

- 旋翼电机无传感器FOC控制设计参考样品
  - 单片机：dsPIC33EP32MC204-I/PT
  - 栅极驱动器：MIC4607/MCP802x
  - 控制方式：无传感器FOC控制





# 无人机应用中的电机控制 (旋翼)

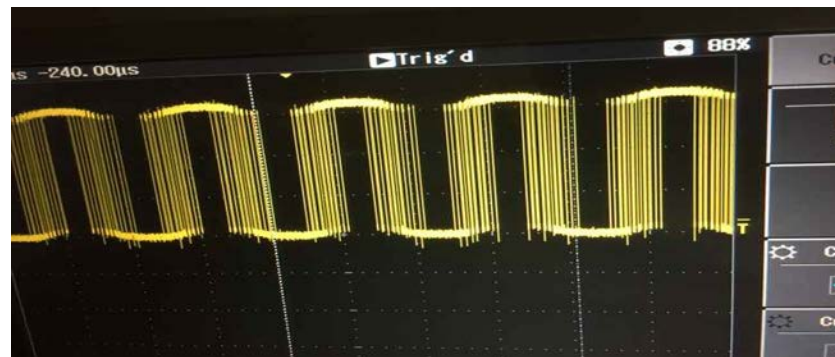
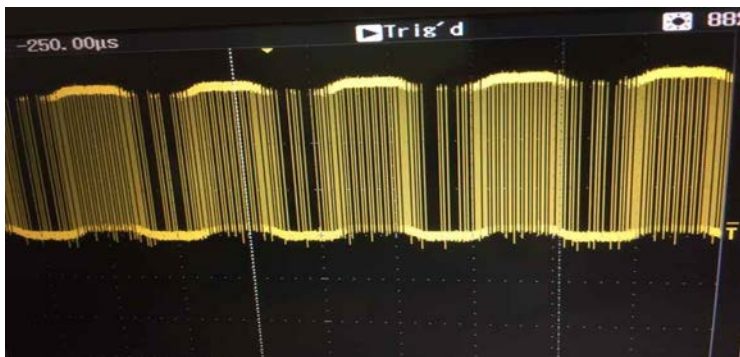
- 旋翼电机无传感器FOC控制碰到的问题及对策
  - FOC正弦调制无法达到六步方波一样的直流电压利用率
    - 采用SVPWM过调制技术，可以实现直流电压利用率的提升，通过在不同的FOC控制中测试，电机最高转速可以得到提升。

	有传感器 FOC控制	无传感器 FOC控制
电机最高转速	100%	100%
过调制后的最高转速	>113%	>110%

- 旋翼堵转无法及时响应处理
  - 通过采集端电压的方式来混合具有强鲁棒性的滑模观测器可以实现FOC控制在低速下的堵转判断检测

# 无人机应用中的电机控制 (旋翼)

- 旋翼电机无传感器FOC控制碰到的问题
  - 旋翼负载大，加速过快容易造成MOS管发热
  - 将五段式SVPWM与七段式SVPWM混合的调制方式取代原有的七段式SVPWM调制，可以在满载的时候减少30%的MOSFET开关损耗





# MICROCHIP

## 谢谢!

*注: Microchip的名称和徽标组合、Microchip徽标及dsPIC均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的注册商标。在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。*