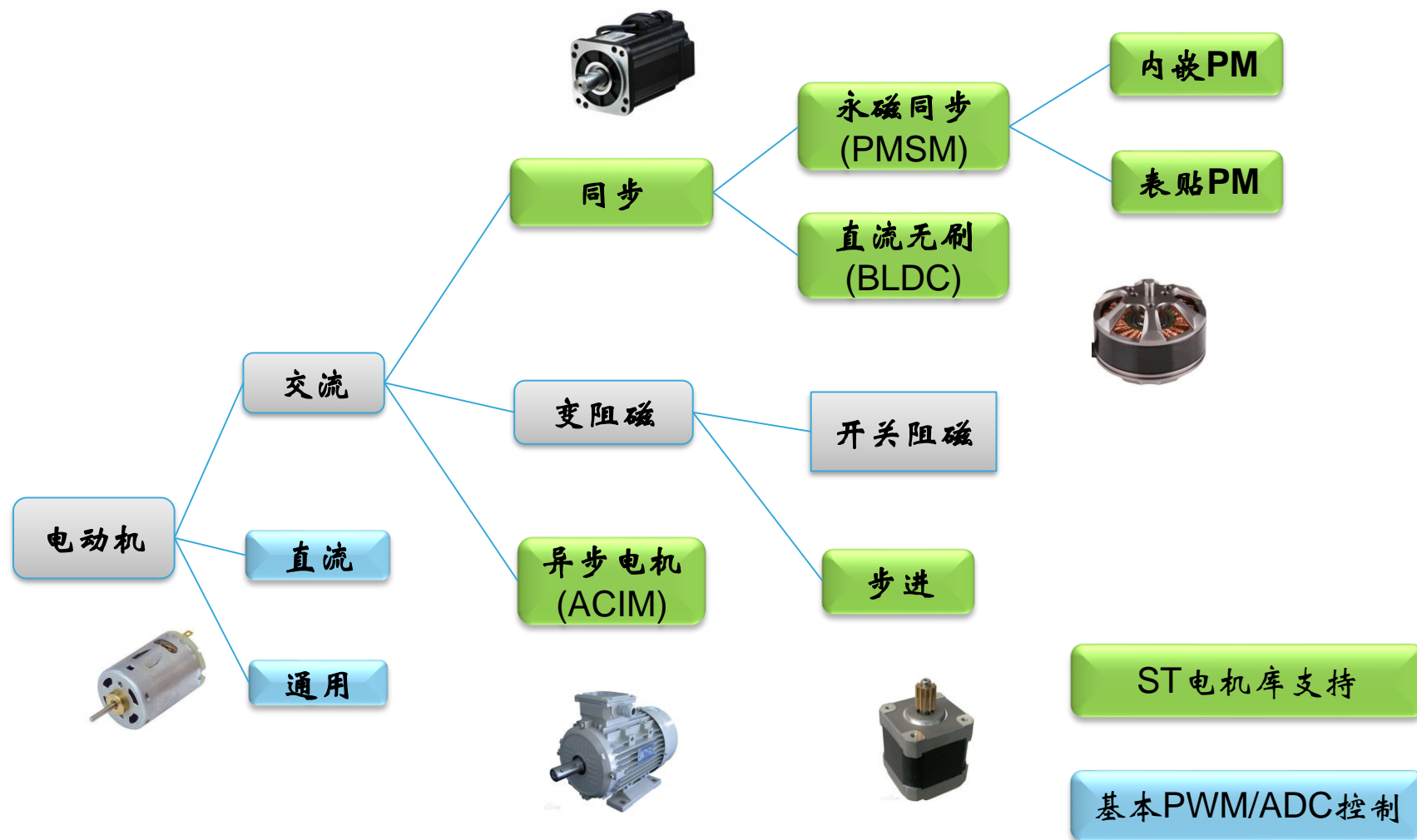


# ST 电机控制开发套件5.0简介



- 安超





直流无刷 (BLDC) --六步换向

X-CUBE-SPN7

基于STM32Cube 三相BLDC方波控制库

X-CUBE-SPN8

基于STM32Cube低电压BLDC控制库



永磁同步 (PMSM)

STSW-STM32100

STM32 永磁同步电机 (BLDC) FOC控制库—FOC V5.0



步进电机

STSW-STM32018

步进电机控制—STM32F103xx (AN2820)

X-CUBE-SPN1

基于STM32Cube 步进电机控制库

X-CUBE-SPN2

基于STM32Cube 两轴步进电机控制库

X-CUBE-SPN5

基于STM32Cube 双极步进电机控制库



直流电机

X-CUBE-SPN12

基于STM32Cube低电压双有刷电机控制库



交流异步 (ACIM)

STSW-STM8020

STM8S/STM8A BLDC/ACIM 电机控制库(UM0708)

STM32 V2.0.1

STM32 FOC 电机控制库



电机	电机库名称	描述
直流无刷 (BLDC) --六步换向	X-CUBE-SPN7	基于STM32Cube三相BLDC方波控制库
	X-CUBE-SPN7	基于STM32Cube低电压BLDC控制库
永磁同步 (PMSM)		基于STM32Cube FOC V5.0
步进	X-CUBE-SPN7	基于STM32Cube (820)
	X-CUBE-SPN7	基于STM32Cube控制库
直流电机	X-CUBE-SPN7	基于STM32Cube低电压双有刷电机控制库
	X-CUBE-SPN7	基于STM32Cube低电压双有刷电机控制库
交流异步 (ACIM)	STSW-STM8020	STM8S/STM8A BLDC/ACIM 电机控制库(UM0708)
	STM32 V2.0.1	STM32 FOC 电机控制库

电机库可以在  
[www.stmcu.com.cn](http://www.stmcu.com.cn)  
或者[www.st.com](http://www.st.com)下载

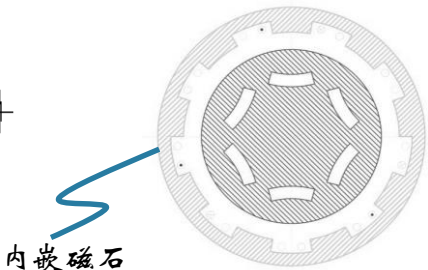
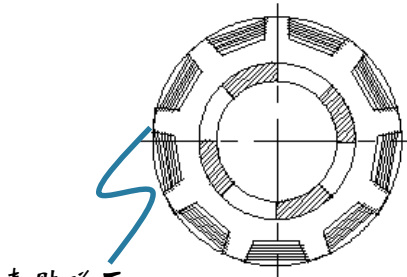
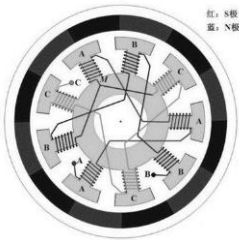
# 三相永磁同步电动机(直流无刷电动机)

永磁同步电动机  
(直流无刷电动机)

转子

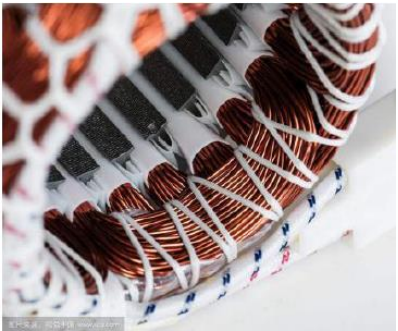
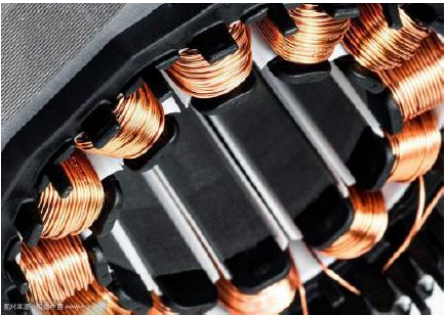
内转子/外转子

表面贴装磁石或内嵌式磁石



绕组(定子)

集中绕组/分布绕组



- 库仑定律
  - 静止点电荷相互作用
  - $F = k \frac{q_1 q_2}{d^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2}$
- 奥斯特实验/安培定则
  - 开启人类大规模利用电能的大门
  - $F = BIL \cdot \sin\theta$
- 法拉第电磁感应定律
  - 发电机
  - $\varepsilon = -n \frac{d\Phi}{dt}$

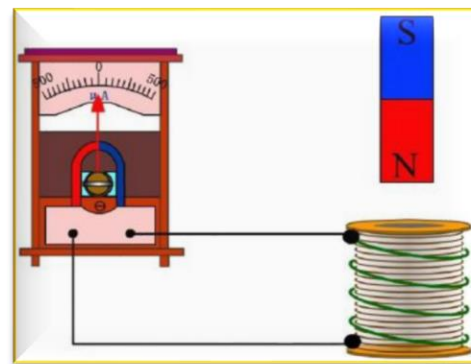
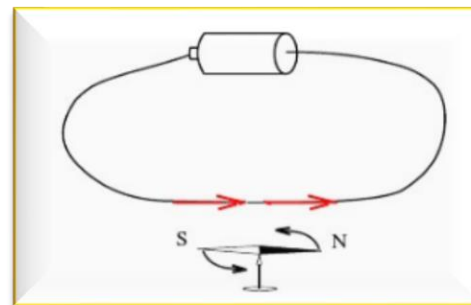
## ➤ 麦克斯韦方程组

$$\oint_{\partial V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{Q_V}{\epsilon_0},$$

$$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a},$$

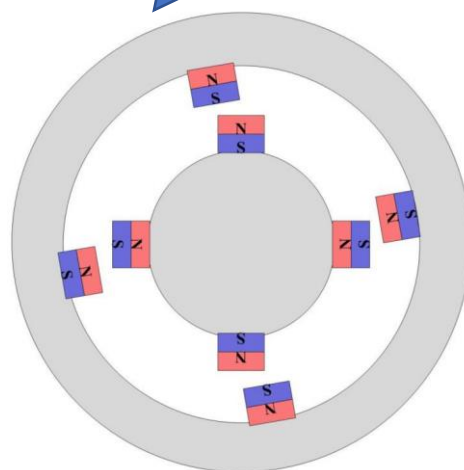
$$\oint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0,$$

$$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a}.$$

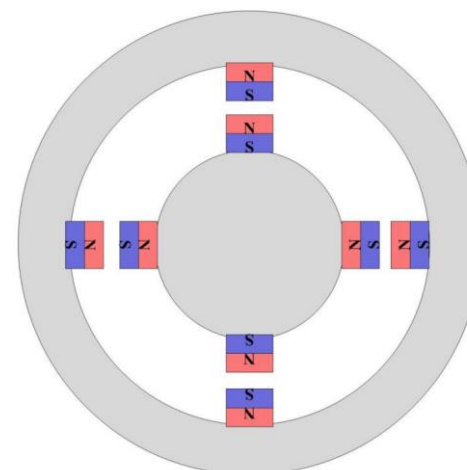


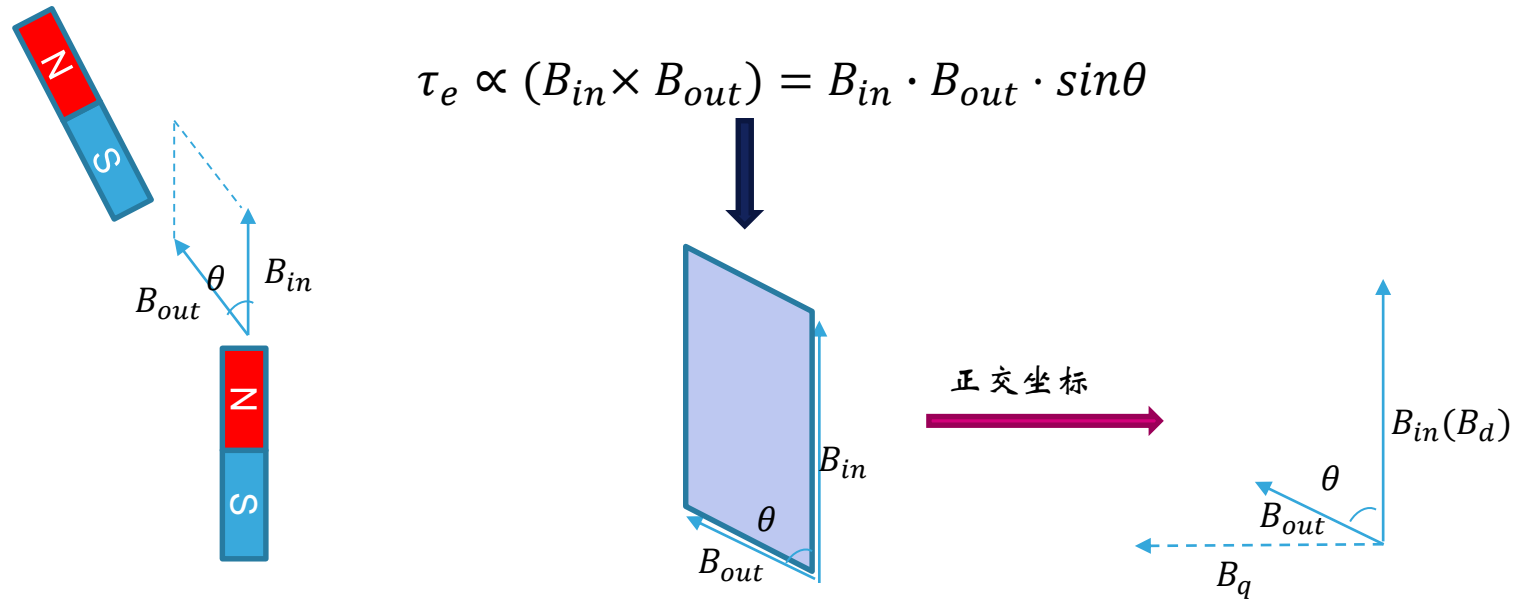


磁电统一



磁力







## ➤ 运动平衡方程

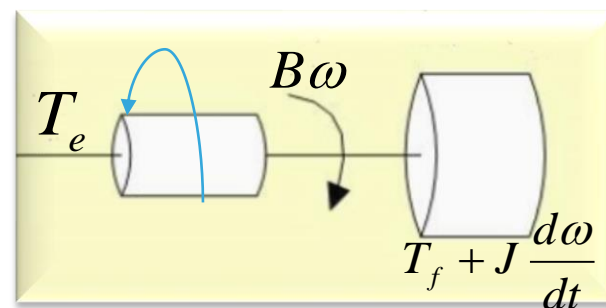
$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_f - B\omega$$

$J$  - 转动惯量

$\omega$  - 机械角速度

$T_f$  - 转子负载转矩

$B$  - 阻尼系数



当负载固定，同一个电机速度正比于转矩

$$\omega \propto \tau_e$$

直接转矩控制 (DTC) ABB专利

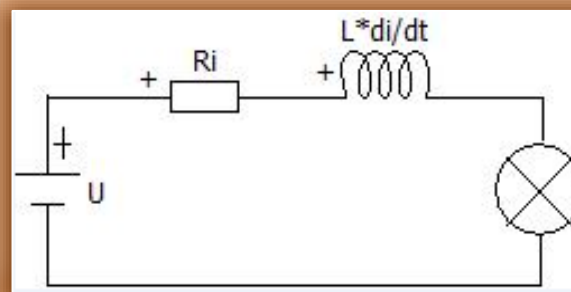
$$\Phi = \int \varepsilon \cdot dt \Rightarrow \tau_e \Rightarrow \omega$$

在定子坐标系下分析

磁场定向控制 (FOC)

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix} \Rightarrow \tau_e \Rightarrow \omega$$

在转子坐标系下分析

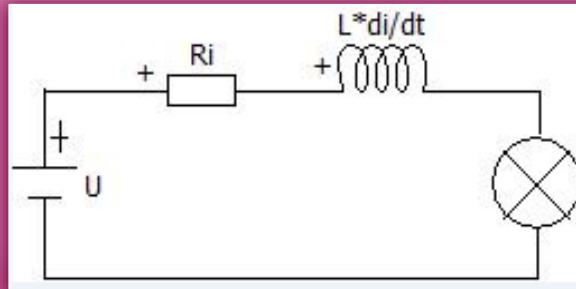


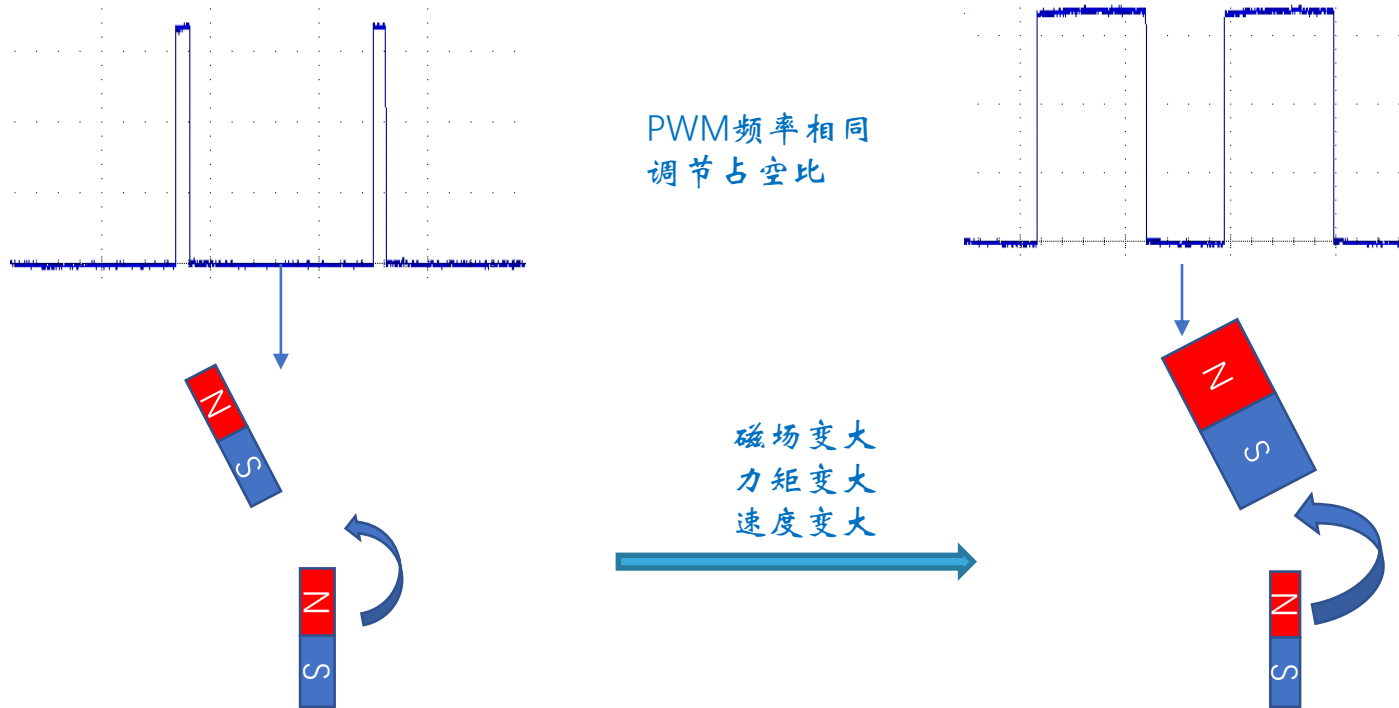
$$\begin{cases} U_d = Ri_d + L_d \frac{di}{dt} - \omega \Phi_q \\ U_q = Ri_q + L_q \frac{di}{dt} + \omega \Phi_d \end{cases}$$

恒定电流，低速情况下  $\omega \approx 0$

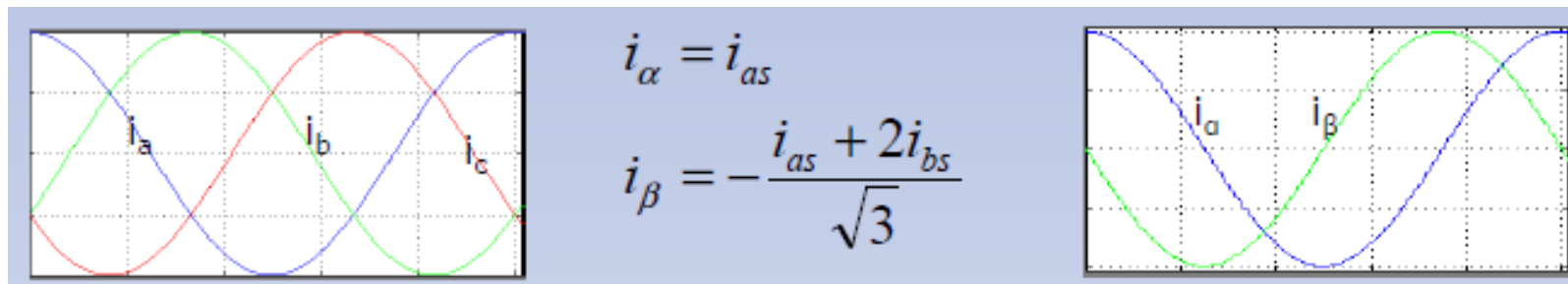
$$\begin{cases} U_d = Ri_d \\ U_q = Ri_q \end{cases}$$

$$\Phi \propto i \propto U$$

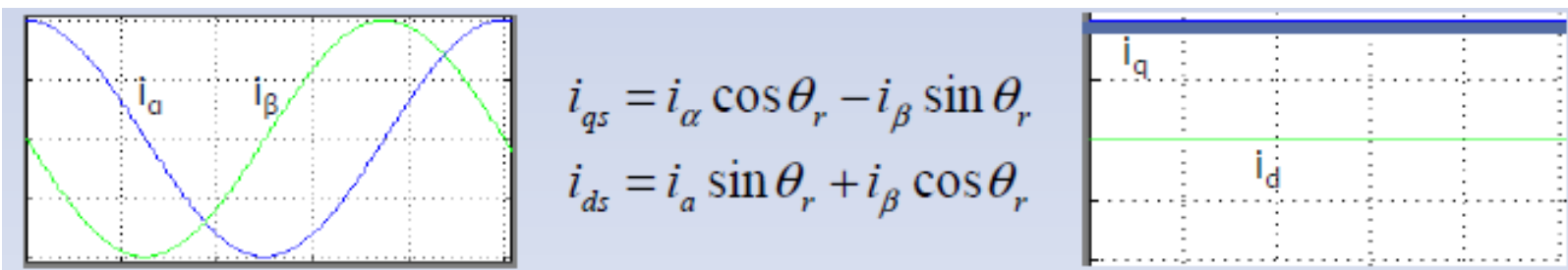




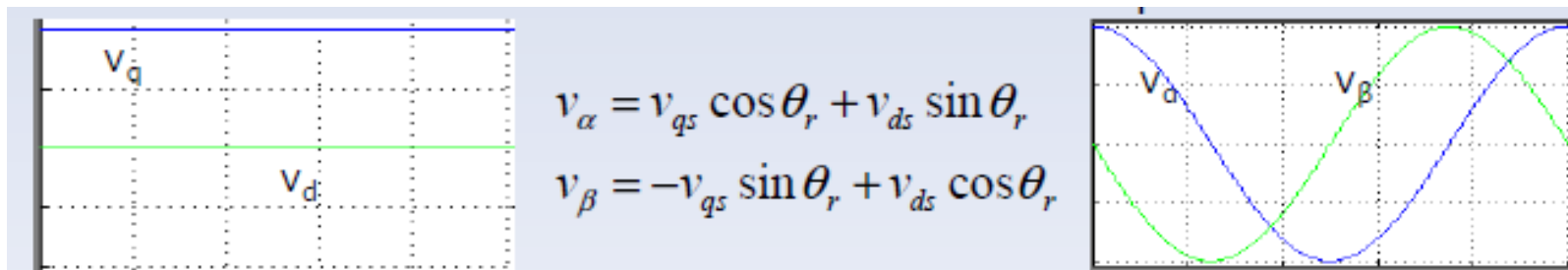
- Clarke变换，三轴 $i_a, i_b, i_c$  ( $120^\circ$ ) 到两轴  $i_\alpha, i_\beta$  ( $90^\circ$ )



- Park变换，两轴  $i_\alpha, i_\beta$  ( $90^\circ$ ) 到动轴  $i_q, i_d$  ( $90^\circ$ )

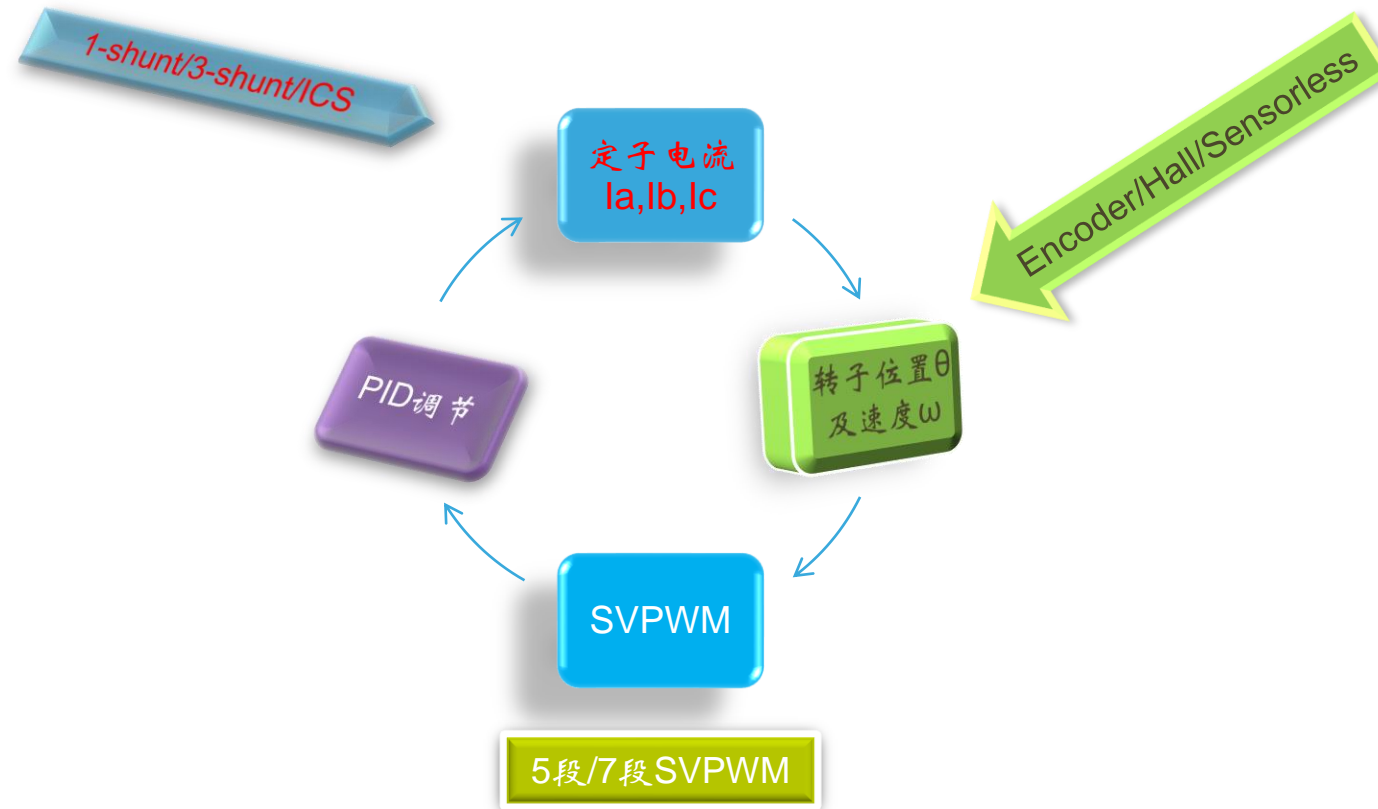


- 反Park变换，得到 $V_\alpha, V_\beta$



# 构成FOC控制的要素

14



➤ 1-SHUNT: 采样电阻放在DC BUS上

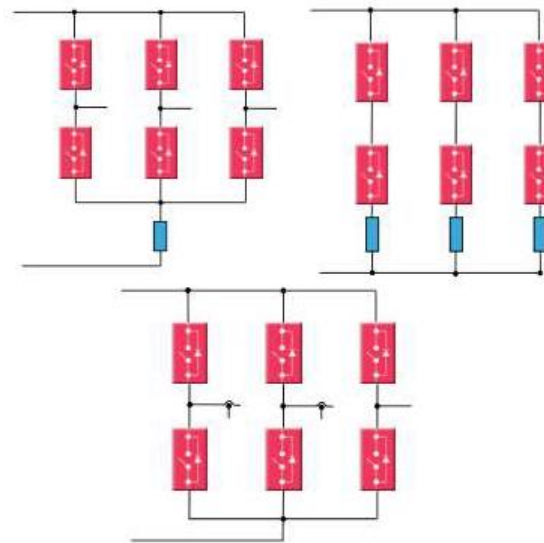
- ST专利的算法
- 仅需要1个电阻/运放: 成本较低
- 电流采样算法可能会带来力矩纹波

➤ 3-SHUNT: 采样电阻放在3个下桥臂上

- 电流采样精度高
- 不会有电流纹波产生

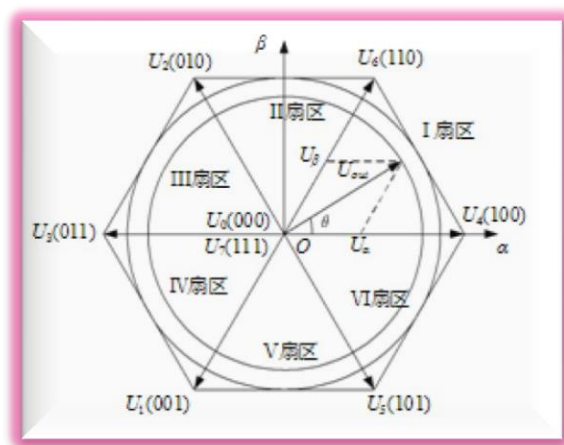
➤ ICS: 2个隔离的电流传感器

- 放在A/B相绕组上
- 适用于相电流较大的场合: 无功耗
- 成本较高



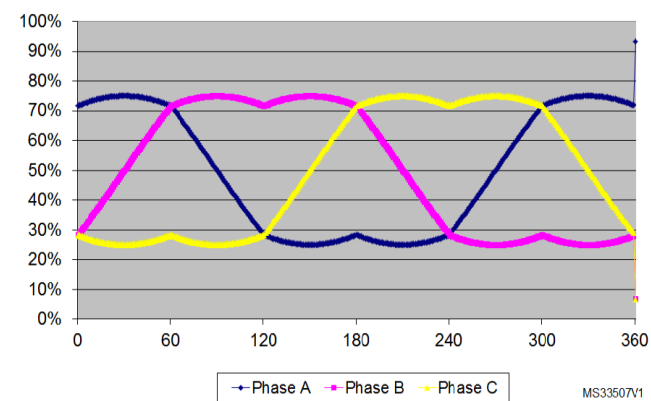
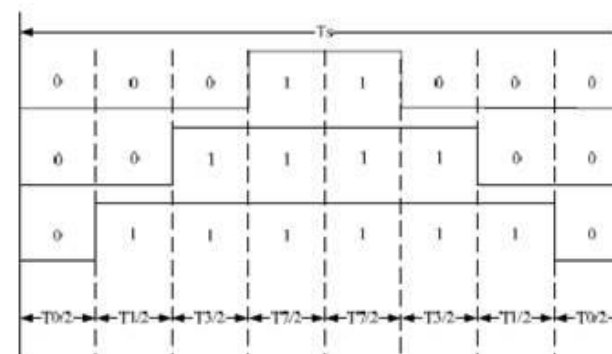






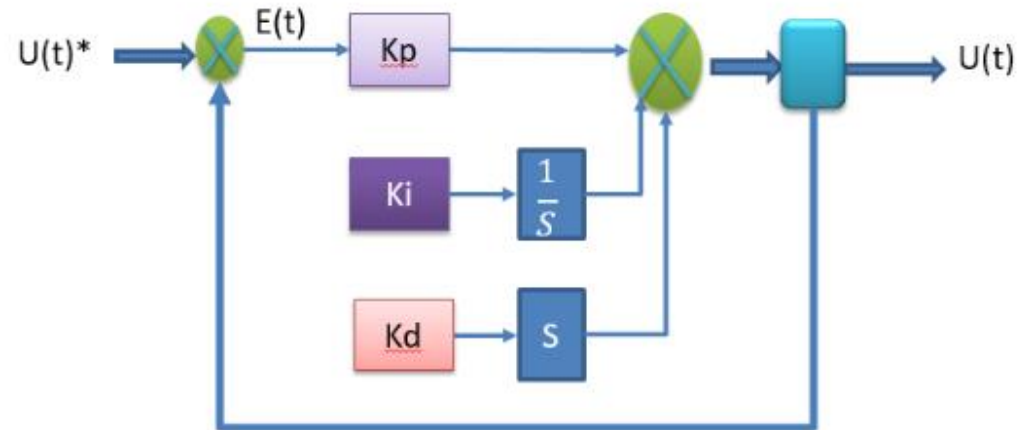
$$T_0 = T_7 = (T_s - T_{U_x} - T_{U_{x+60}}) / 2$$

其中 $T_{U_x}$ ,  $T_{U_{x+60}}$ 代表相邻的两个基本电压空间矢量



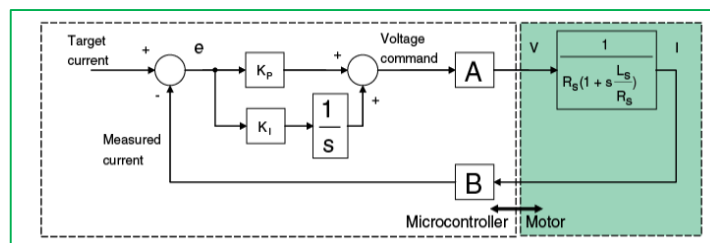
MS33507V1

$$f(t) = K_p \times \text{Error}_{\text{sys}}(t) + K_i \times \int_0^t \text{Error}_{\text{sys}}(t) dt + K_d \times \frac{d}{dt}(\text{Error}_{\text{sys}}(t))$$

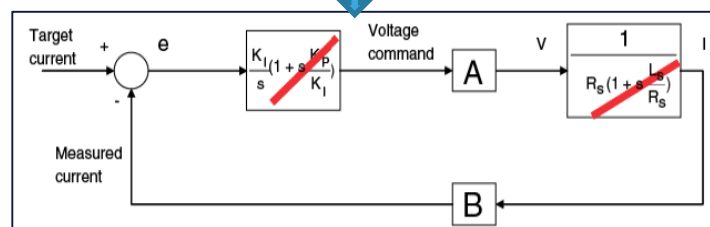


# FOC v5.0 中的电流环-PID

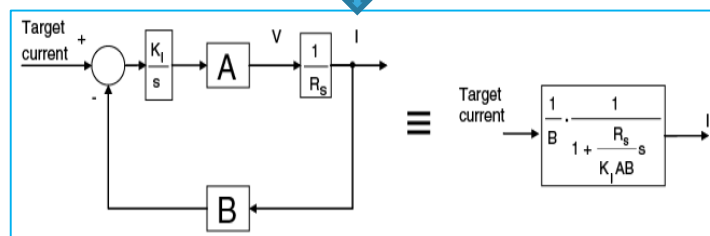
19



令  $K_P/K_I = L_S/R_S$



变为一阶系统



$$K_P = L_S \frac{\omega_C}{AB}$$

$$K_I = \frac{R_S \cdot \omega_C \cdot T}{AB}$$

$$AB = \frac{V_{BusDC} \cdot R_{shunt} \cdot A_{op}}{3.3}$$

$$A = \frac{V_{BusDC}}{2^{16}}$$

$$B = \frac{R_{shunt} A_{op} 2^{16}}{3.3}$$

$$K_p = \omega_c * \frac{B * P}{K_e}$$

$$K_i = \omega_c * \frac{B^2 * P}{J * K_e} * T_s$$

$J$  - 转动惯量

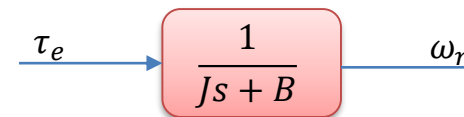
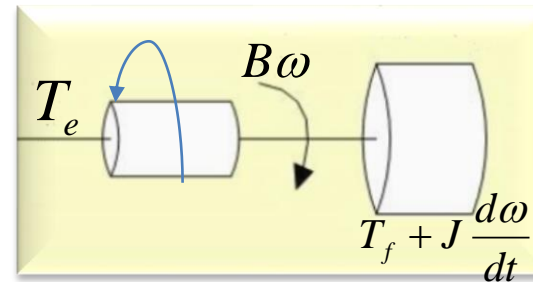
$\omega_c$  - 带宽系数

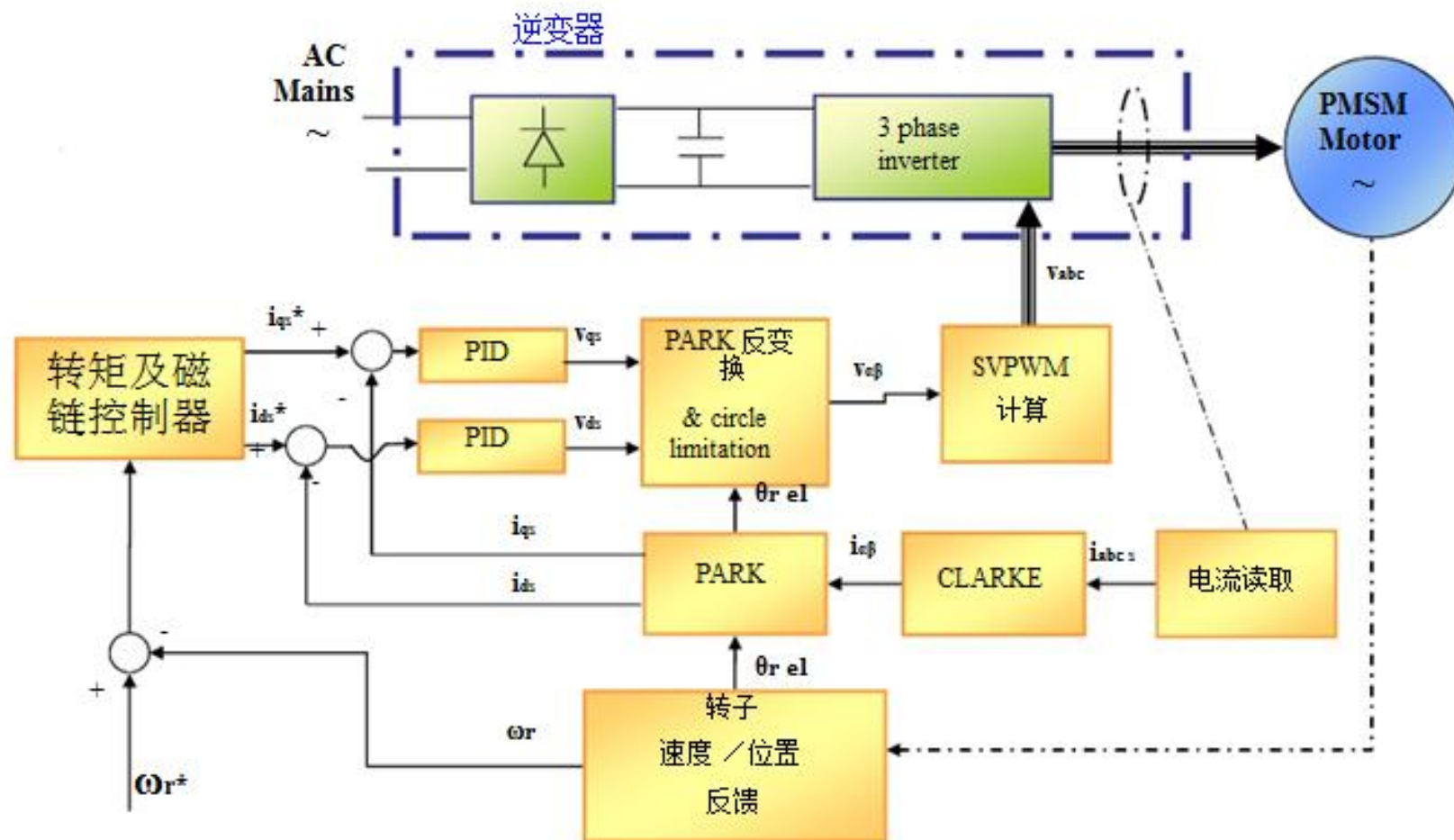
$B$  - 阻尼系数

$P$  - 极对数

$K_e$  - 反电势系数

$T_s$  - 速度环时间

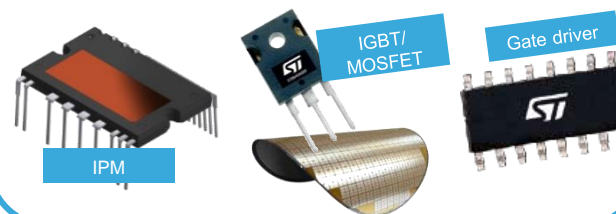




## MCUs for Motor Control (8-32 bit)



## Inverters IPM / discretes



## ST MC Workbench



PC SW GUI  
Full customization  
and real time  
communication

## 电机控制

## HW Boards



## FW library

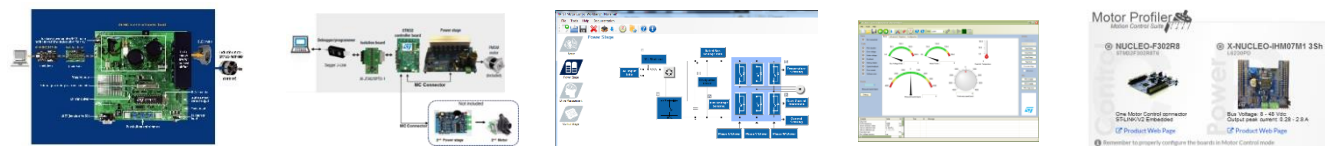
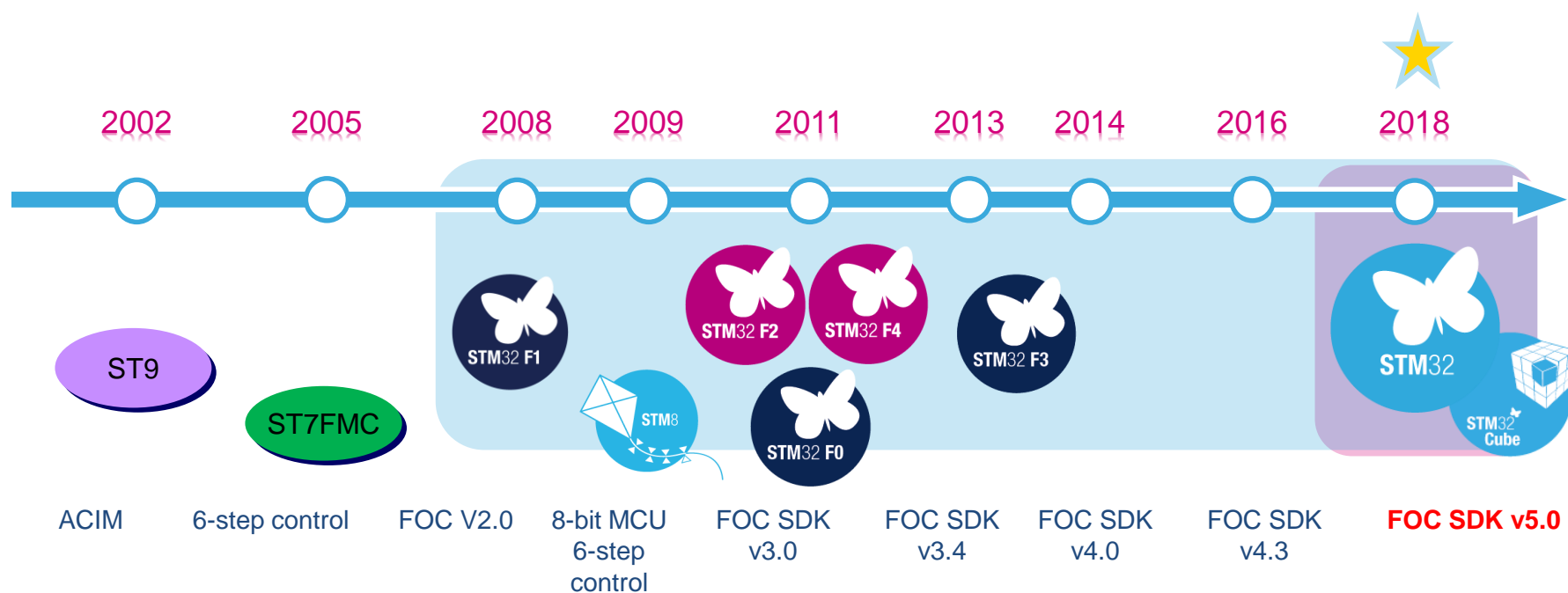
wide range of features &  
algorithms (FOC)



**Software  
Development  
Kit (SDK)**

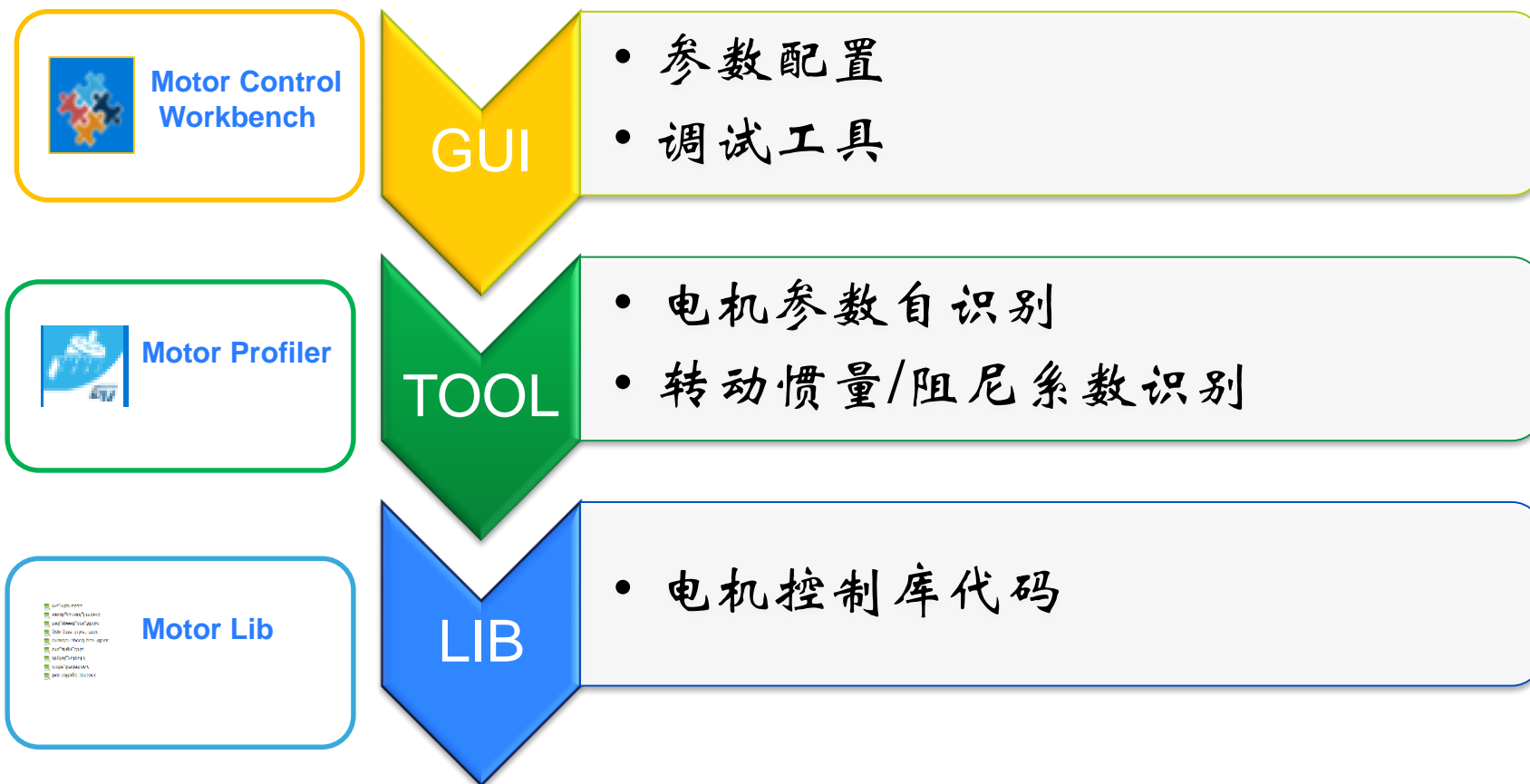
# 电机库发展历史

23



# SDK V5.0 电机库构成

24





# Workbench (1/2)

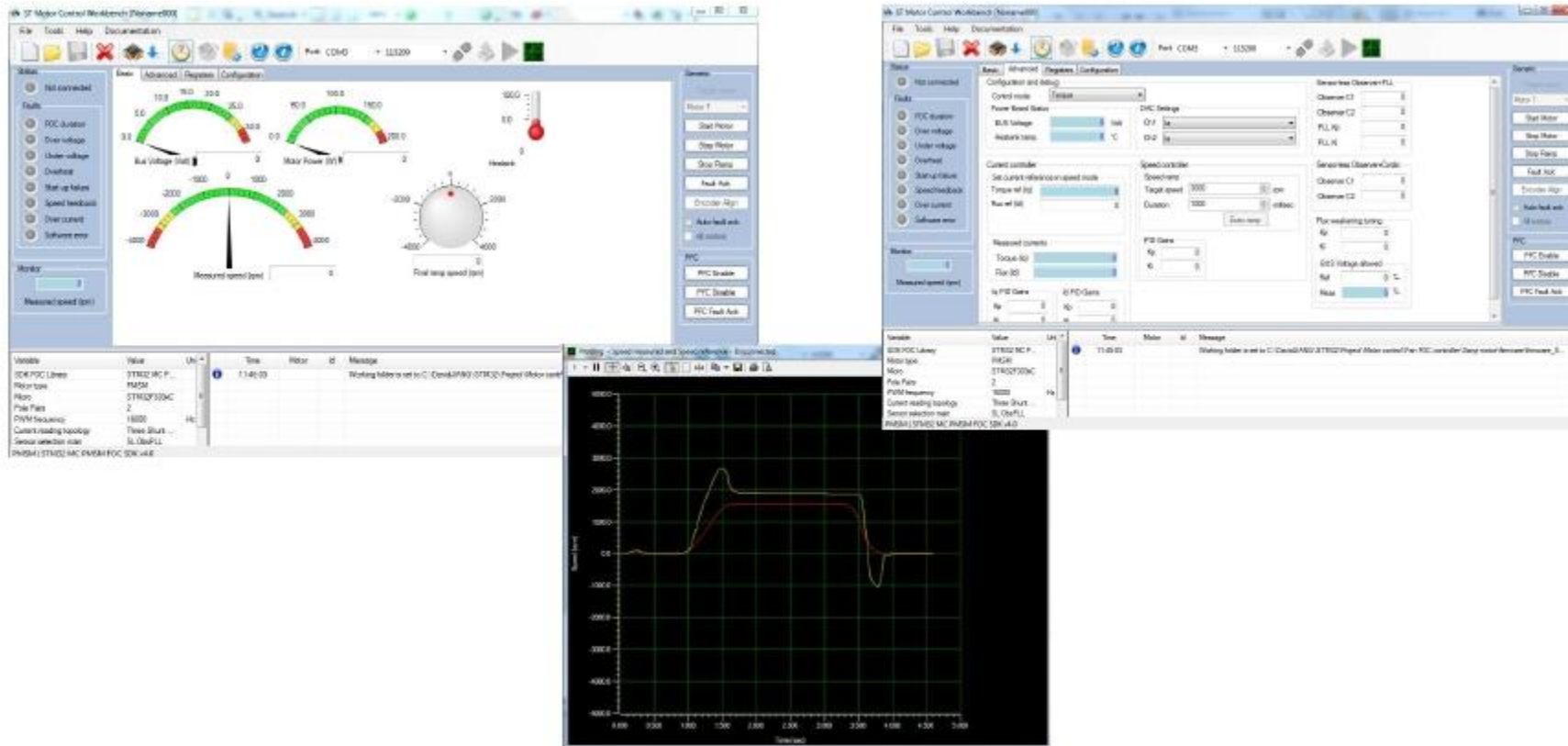
25

- 简化方案开发过程，缩短开发周期。



# Workbench (2/2)

26



## 马达本体参数识别 + 马达转动参数识别

**Motor Profiler**  
Motion Control Suite

**NUCLEO-F302R8**  
STM32F302R8T6

One Motor Control connector  
ST-LINK/V2 Embedded

[Product Web Page](#)

**X-NUCLEO-IHM07M1 3Sh**  
L6230PD

Bus Voltage: 8 - 48 Vdc  
Output peak current: 0.28 - 2.8 A

[Product Web Page](#)

Remember to properly configure the boards in Motor Control mode

**Pole Pairs:** 7 [how to detect...](#)

**Speed and Current limits**

**Max Speed:** 16000 RPM

**Max Current:** 1.8 Apk 0.28 - 2.8 Apk

**VBus:** 12 V 8 - 48 V

**Magnetic:** ☒ SM-PMSM ☐ I-PMSM

☒ Disconnect

[Start Profile](#)

[Save...](#) 保存识别的参数

[Play](#) 可以开始控制电机转动

**Electrical Model**

$R_s$  0.24  $\Omega$   $L_s$  0.02 mH

$V_{BUS}$  12.24 V

$I_{max}$  1.17 Apk

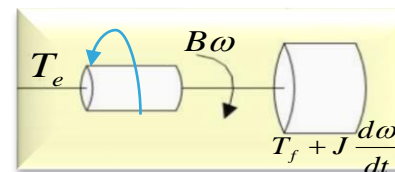
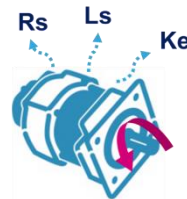
$K_e$  0.87 Vrms/kRPM

**Mechanical Model**

Friction 516.99 nN·m·s

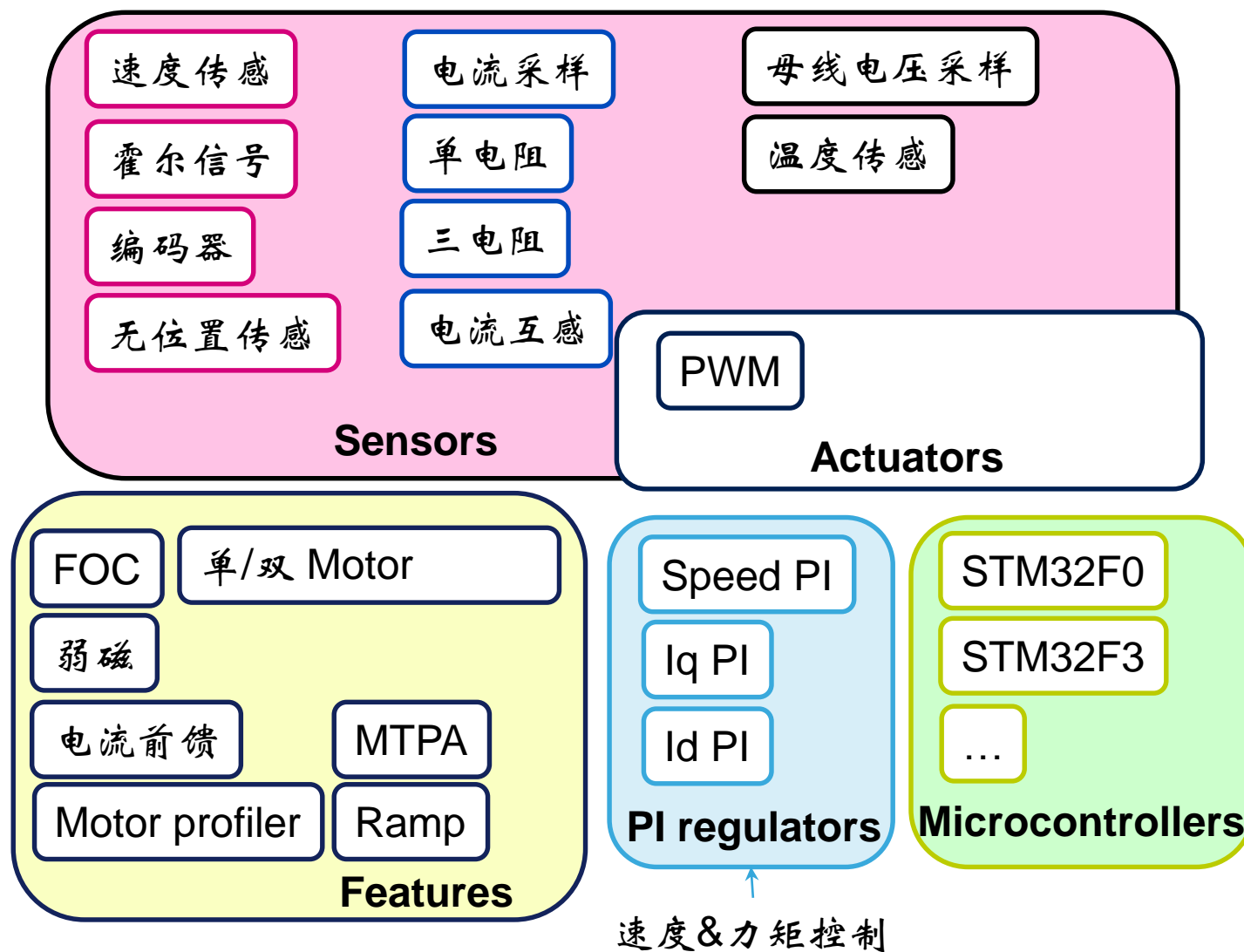
Inertia 346.9 nN·m·s<sup>2</sup>

Max Speed 15700 RPM



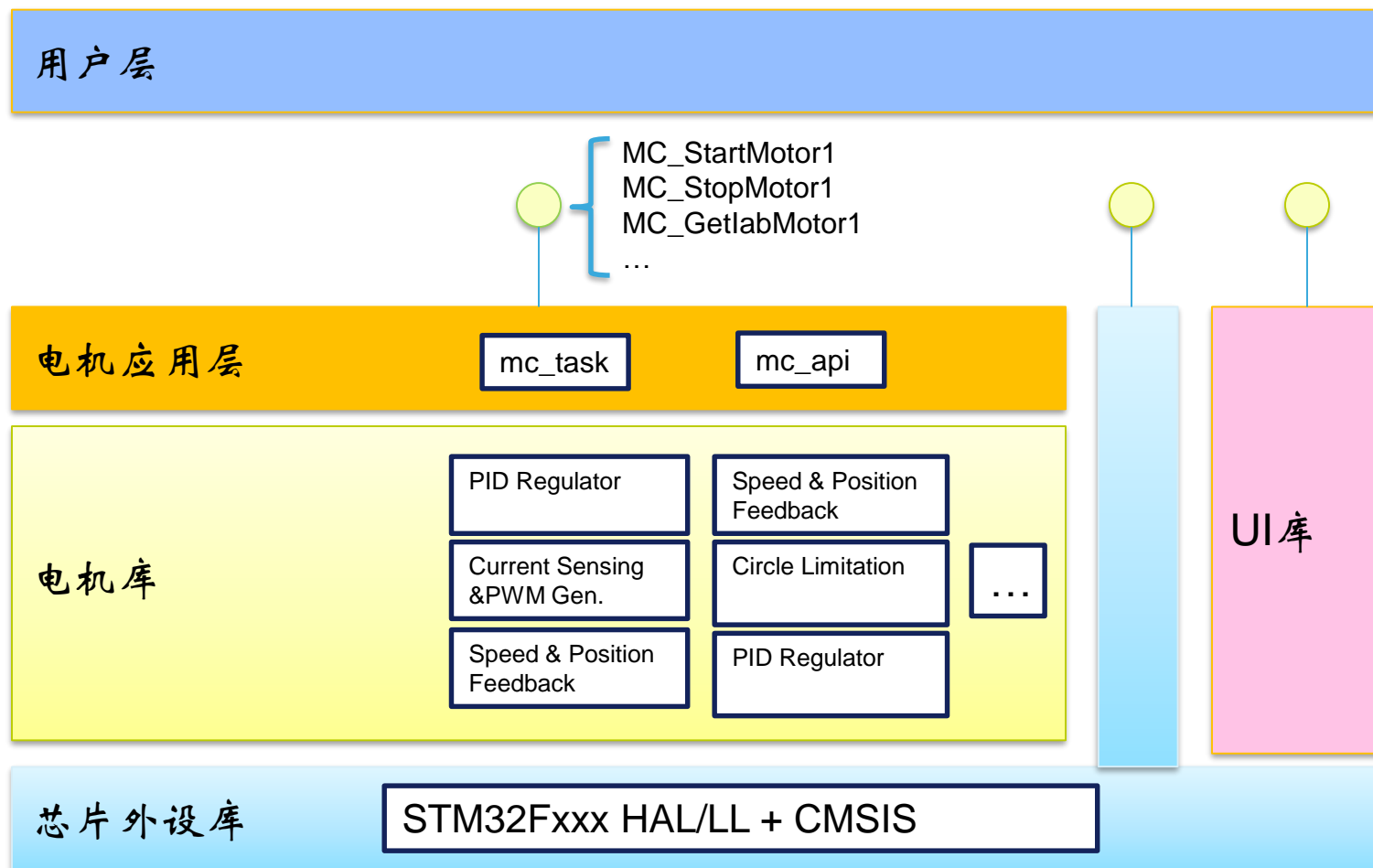
# 电机库构成

28



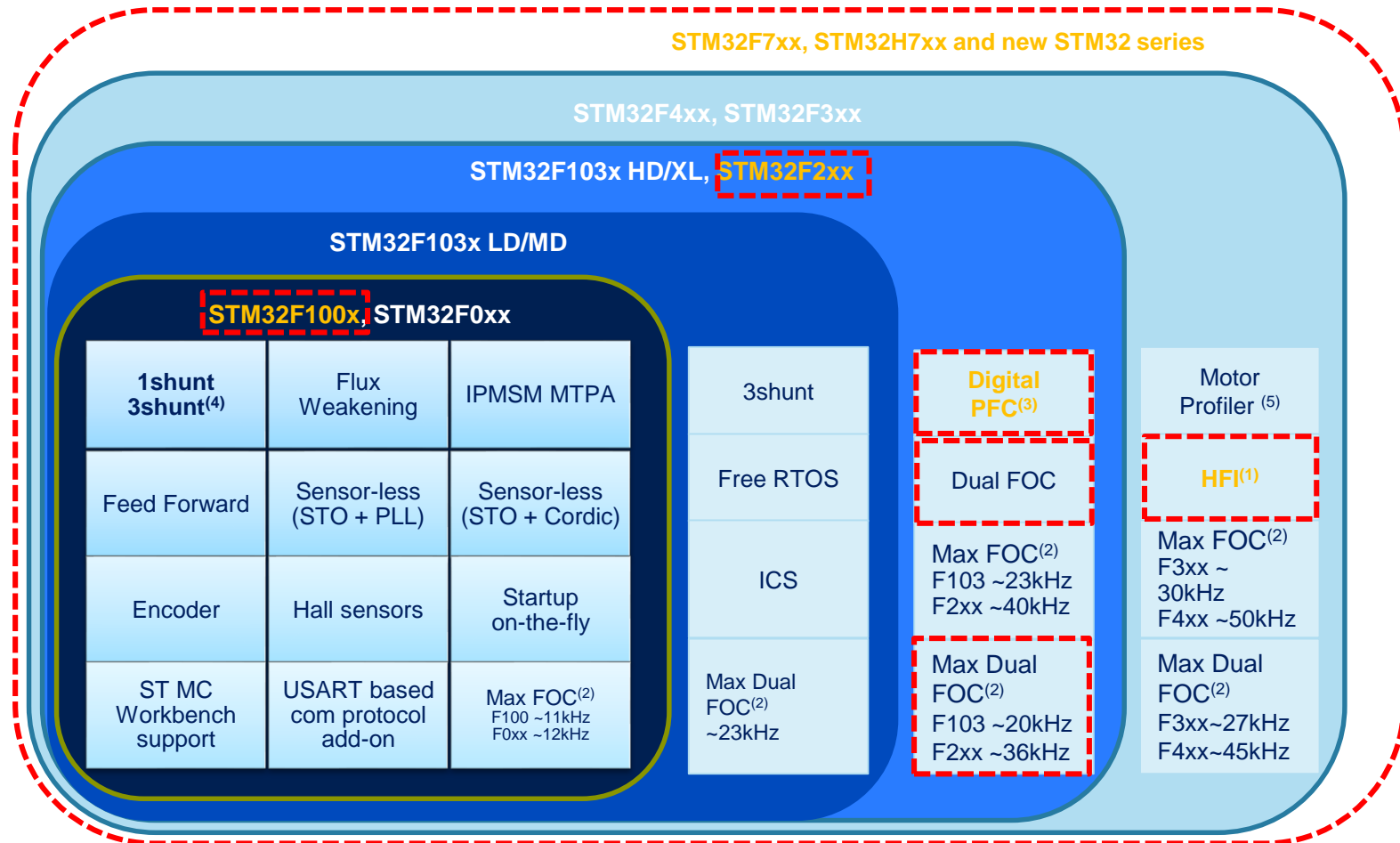
# 电机软件库架构

29



# 电动机控制固件库

30



XXX MC SDK5.x将要支持的功能

- (1) High Frequency Injection
- (2) Max FOC estimated in sensorless mode
- (3) STM32F103xC/D/E/F/G and STM32F303xB/C
- (4) Not for STM32F100
- (5) For STM32F30x

# 电机库V5.0性能测试数据

31

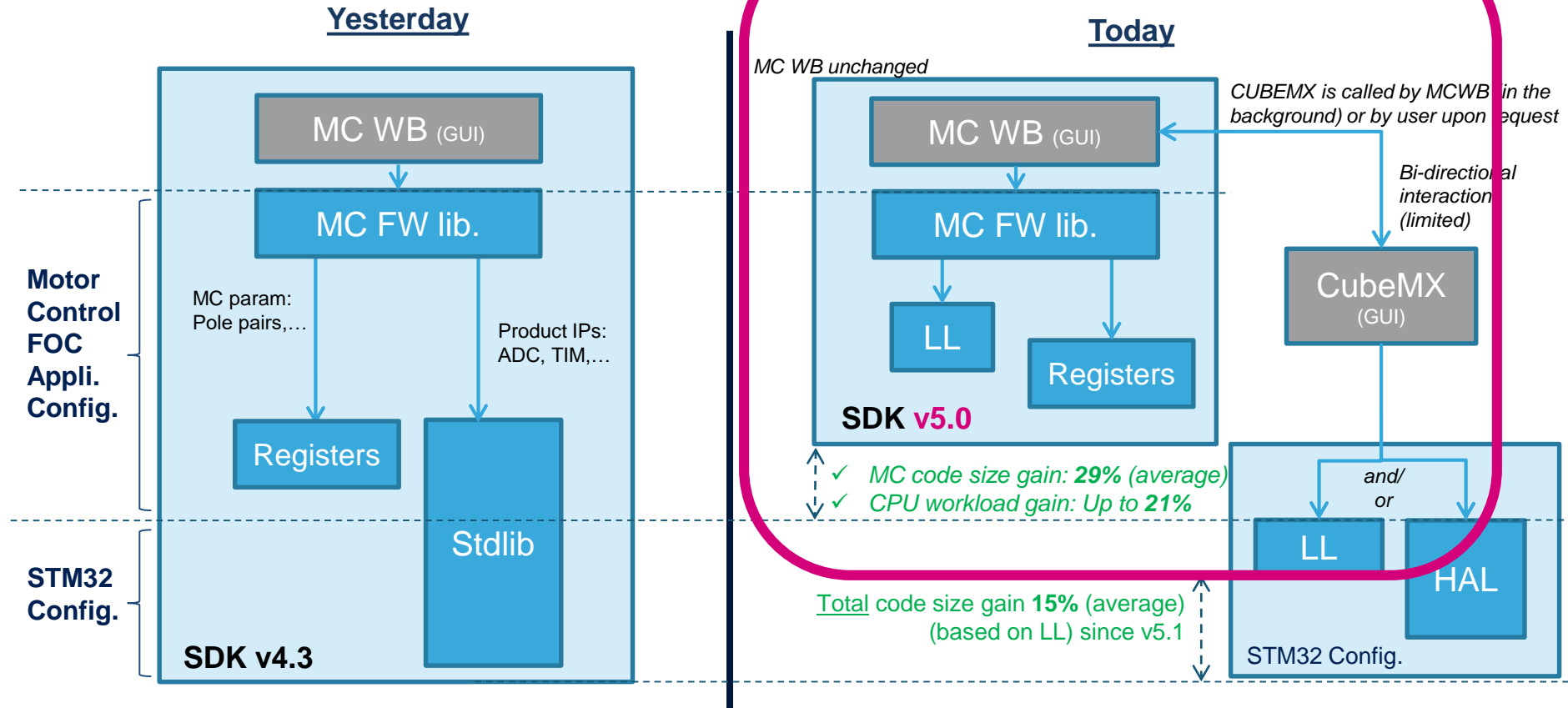
测试条件: PWM 频率20KHz / FOC 电流环控制频率

MCSDK5.0							
MCU	Config	Workload (%)	Total Code size (kB)	ro data (B)	RAM (B)	FOC Lib (kB)	HAL (kB)
F072RB	1 Shunt	44.3	18.8	609	3126	12.8	5.1
F072RB	3 Shunt	39.4	19.5	653	2910	12.9	4.5
F303RE	1 Shunt	20.4	22.3	4427	2940	14.4	7.8
F303RE	3 Shunt	18.1	23.6	4179	2884	16.1	7.5
F446RE	1 Shunt	10.2	19.7	625	3122	14.4	5.3
F446RE	3 Shunt	8.2	17.8	603	2840	13.1	4.7
F303VE	DUAL/3S	38.2	20.8	4449	4724	13.1	7.7
F415ZG	DUAL/3S	18.3	19.3	761	4484	14.7	4.6

# 固件库程序架构对比- v4.3 vs v5.0

32

code size < 22KB

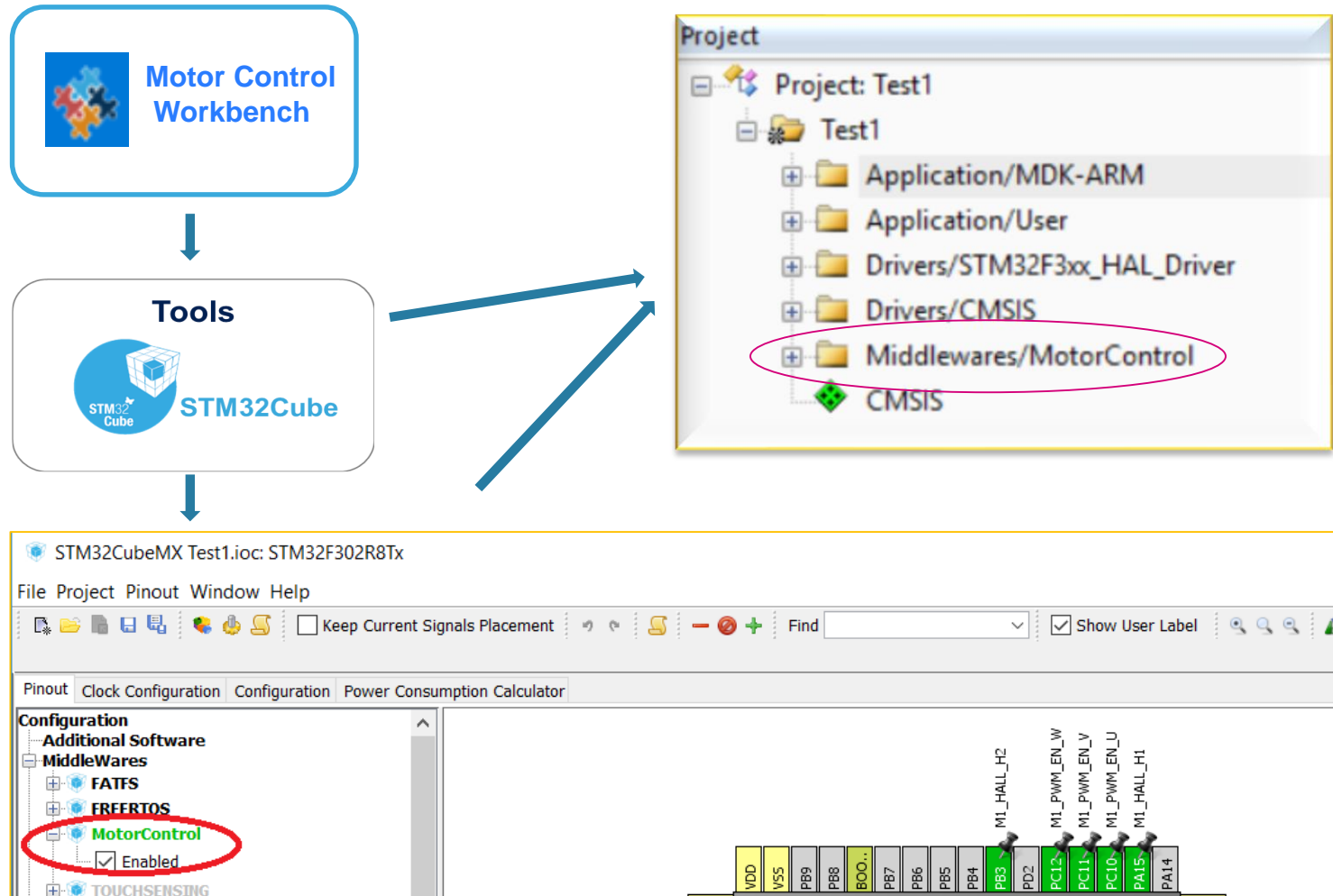


15% code size gain from v4.3 to V5.0 !



# SDK V5.0 电机库开发过程

33

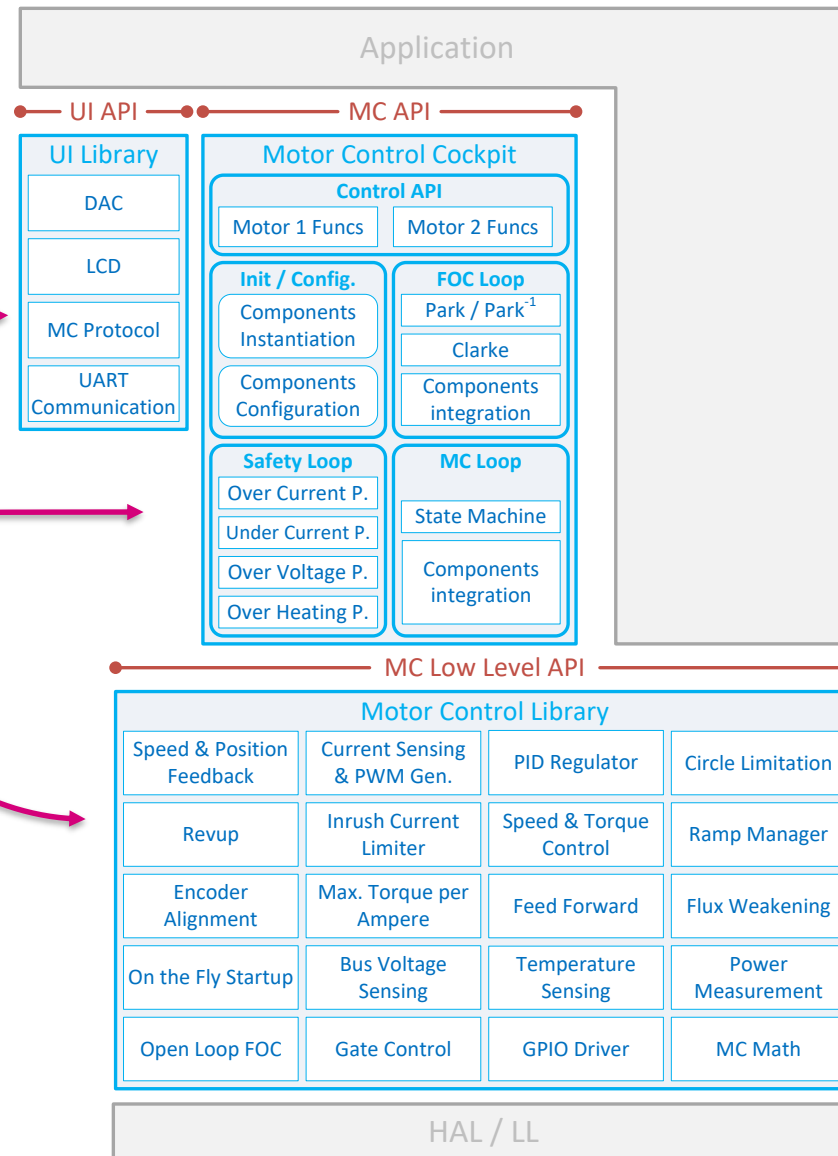


# STM32 电机控制开发套件 5.0 概览-软件库架构

34

整个软件库由三部分组成

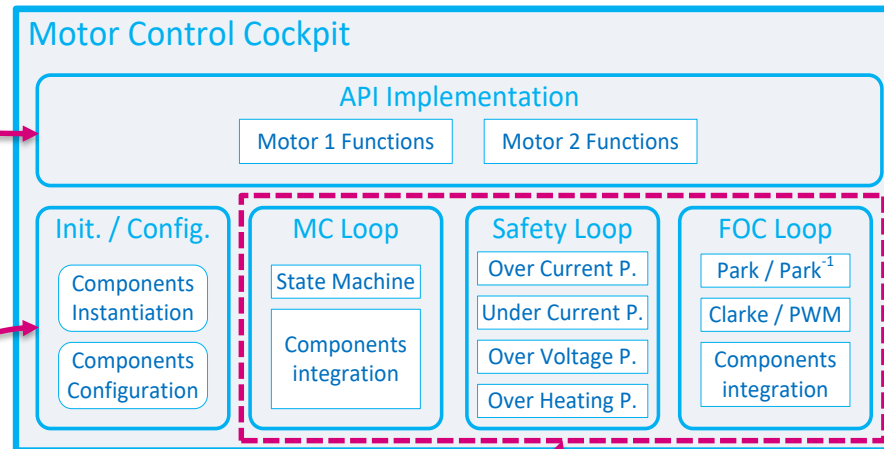
- 用户界面库
- 电机驾驶舱
- 电机控制库



## 电机驾驶舱

电机控制接口  
通过 MC API 来  
实现

电机控制配置  
实例化并配置  
所有需要的组  
件。

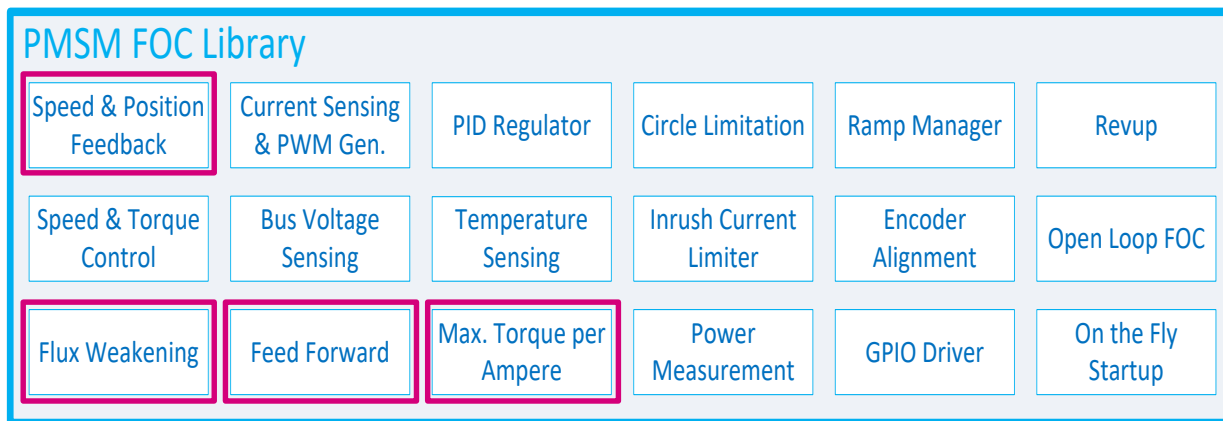


### 电机控制动态


实现对电机的动态控制:

- FOC控制环路(高频任务)
- 电机控制环路(中频任务)
- 安全控制环路(安全任务)

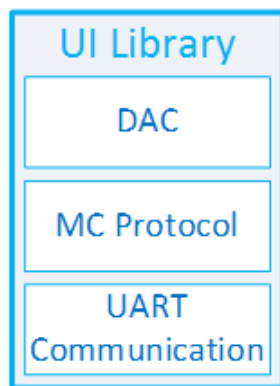
## 电机控制库



### 软件控制库

- 是诸多组件的集合。每一个组件实现电机控制的一个功能例如，速度和位置检测，电流检测，PID算法等等...
- X-CUBE-MCSDK  中的组件不提供源代码，以库的形式提供。

## 用户界面库



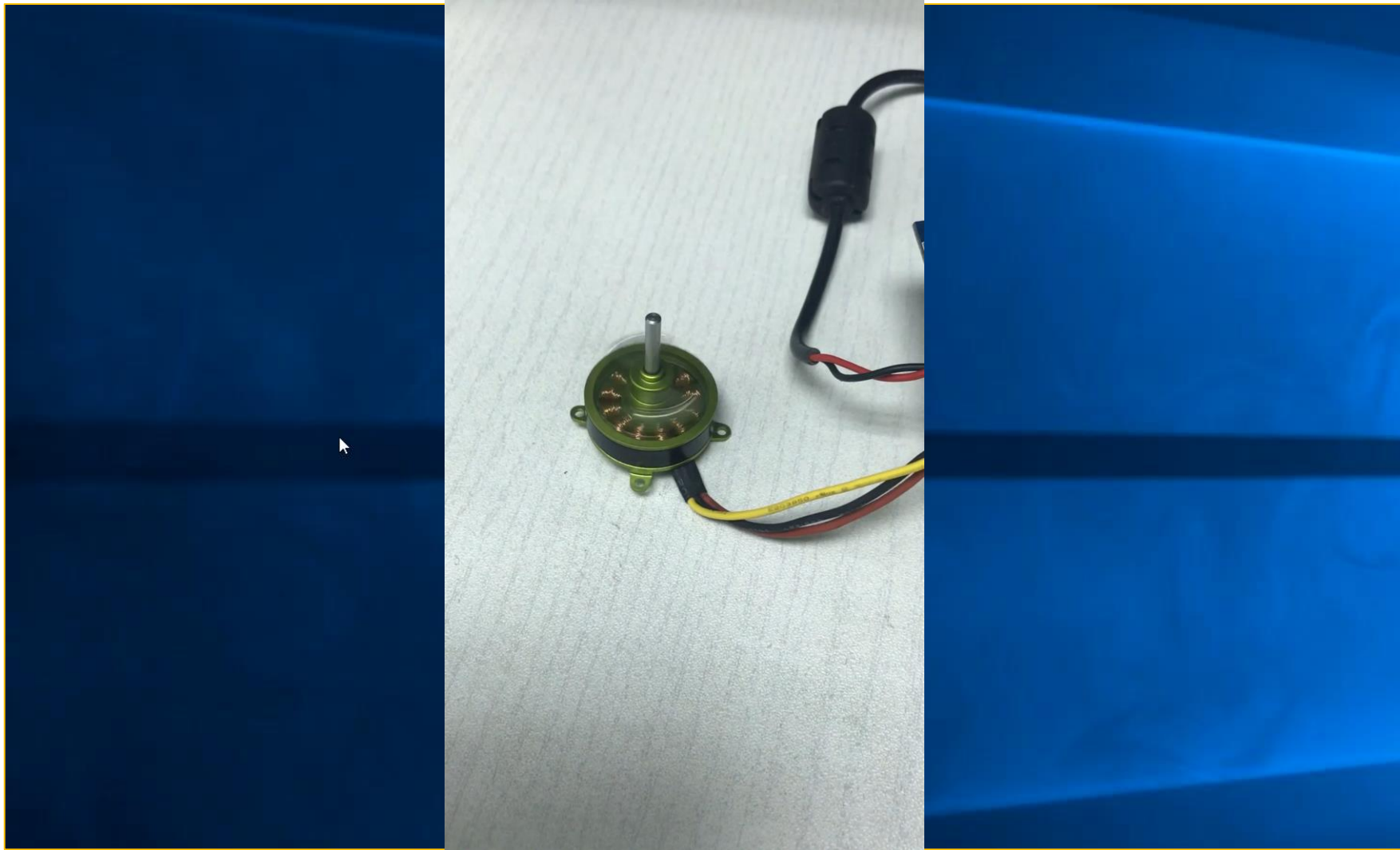
用户界面库 包含负责通讯的组件。电机控制代码通过这些组件控制串口和DAC与外界通讯。通过这个库我们可以连接MCU和Workbench。在Workbench中实现对电机运行状态的监控。

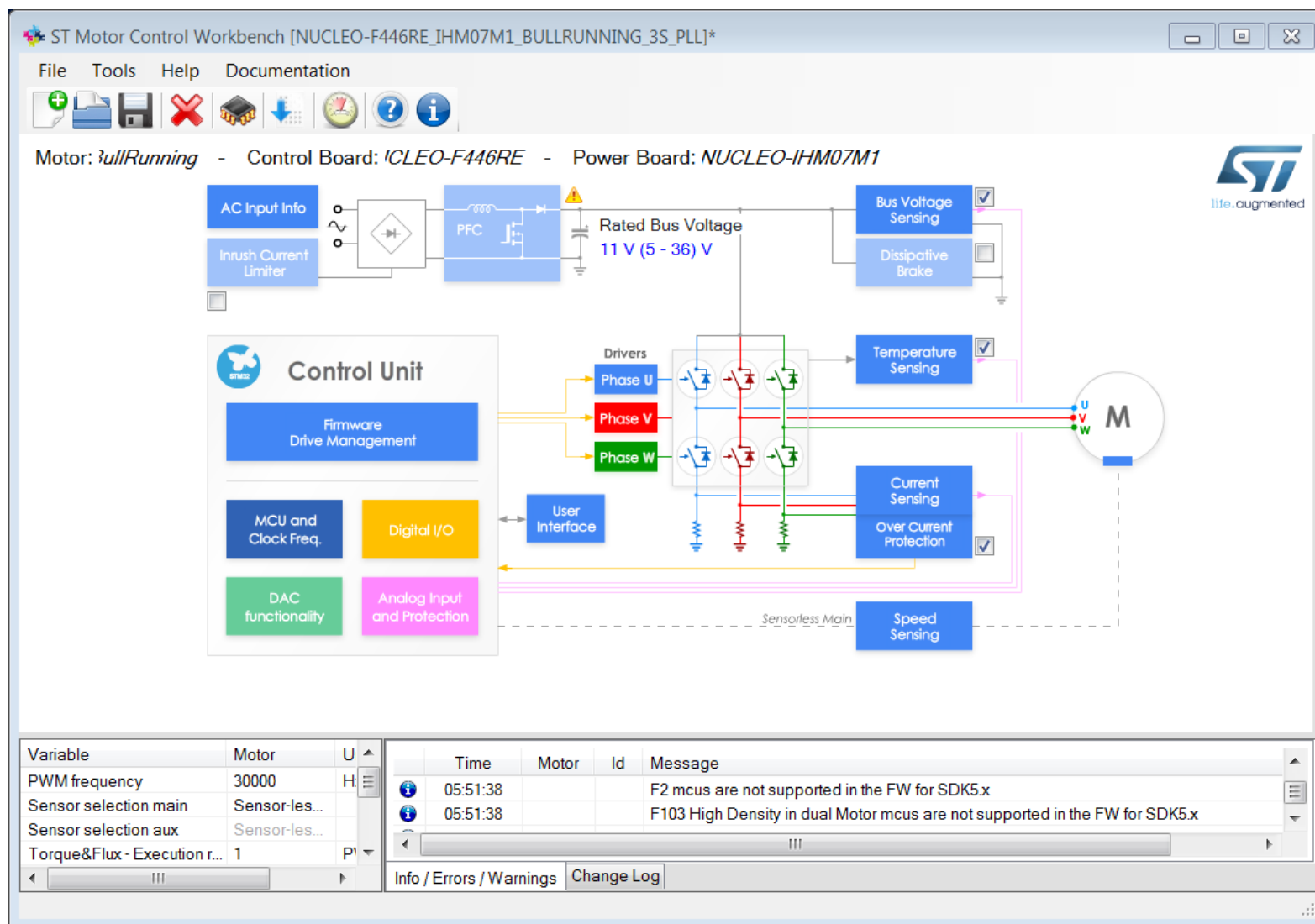
- pMCI : MCI\_Handle\_t\*
- MC\_StartMotor1(void)
- MC\_StopMotor1(void) : void
- MC\_ProgramSpeedRampMotor1(int16\_t, uint16\_t) : void
- MC\_ProgramTorqueRampMotor1(int16\_t, uint16\_t) : void
- MC\_SetCurrentReferenceMotor1(Curr\_Components) : void
- MC\_GetCommandStateMotor1(void) : MCI\_CommandState\_t
- MC\_StopSpeedRampMotor1(void)
- MC\_HasRampCompletedMotor1(void)
- MC\_GetMecSpeedReferenceMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetMecSpeedAverageMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetLastRampFinalSpeedMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetControlModeMotor1(void) : STC\_Modality\_t
- MC\_GetImposedDirectionMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetSpeedSensorReliabilityMotor1(void)
- MC\_GetPhaseCurrentAmplitudeMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetPhaseVoltageAmplitudeMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetIabMotor1(void) : Curr\_Components
- MC\_GetIalphaseMotor1(void) : Curr\_Components
- MC\_GetIqdMotor1(void) : Curr\_Components
- MC\_GetIqdrefMotor1(void) : Curr\_Components
- MC\_GetVqdMotor1(void) : Volt\_Components
- MC\_GetValphaseMotor1(void) : Volt\_Components
- MC\_GetElAngledppMotor1(void) : int16\_t
- MC\_GetTereffMotor1(void) : int16\_t
- MC\_SetIdrefMotor1(int16\_t) : void
- MC\_Clear\_IqdrefMotor1(void) : void
- MC\_AcknowledgeFaultMotor1(void)
- MC\_GetOccurredFaultsMotor1(void) : uint16\_t
- MC\_GetCurrentFaultsMotor1(void) : uint16\_t
- MCI\_GetSTMStateMotor1(void) : State\_t
- MC\_ProgramRegularConversion(uint8\_t, uint8\_t) : void
- MC\_GetRegularConversionValue(void) : uint16\_t
- MC\_GetRegularConversionState(void) : UDRC\_State\_t

在 mc\_api.c 中有一系列的函数来实现与对电机的控制，我们称之为 MC API。这些函数是用户和 SDK 之间的桥梁。

下面列出了一些最常用的函数：

- MC\_StartMotor1 -- 启动电机
- MC\_StopMotor1 -- 停止电机
- MC\_ProgramSpeedRampMotor1 -- 设定速度
- MC\_ProgramTorqueRampMotor1 -- 设定力矩
- MC\_GetMecSpeedReferenceMotor1 -- 得到电机参考速度
- MC\_GetMecSpeedAverageMotor1 -- 得到电机实际运行的平均速度
- MCI\_GetSTMStateMotor1 -- 得到电机运行当前状态
- MC\_GetOccurredFaultsMotor1 -- 得到当前电机停转原因
- MC\_AcknowledgeFaultMotor1 -- 异常状态清除
- MC\_GetImposedDirectionMotor1 -- 得到电机运行方向







# 适用于电动机控制的ST硬件评价板

41

## 覆盖不同的需求

控制板 + 功率板  
Control + Power

Eval/Nucleo + Power/Expansion

Control stages



MC Connector



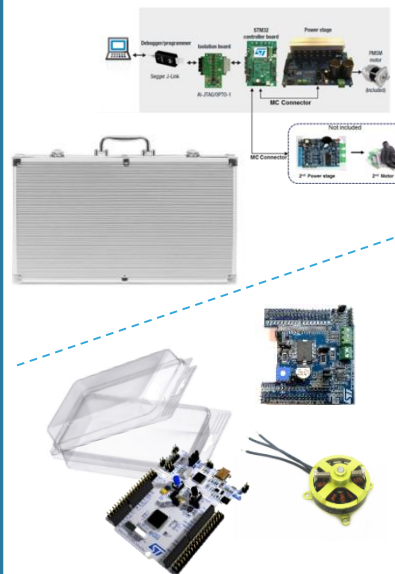
Power stages



控-驱一体板  
(Complete Drive)



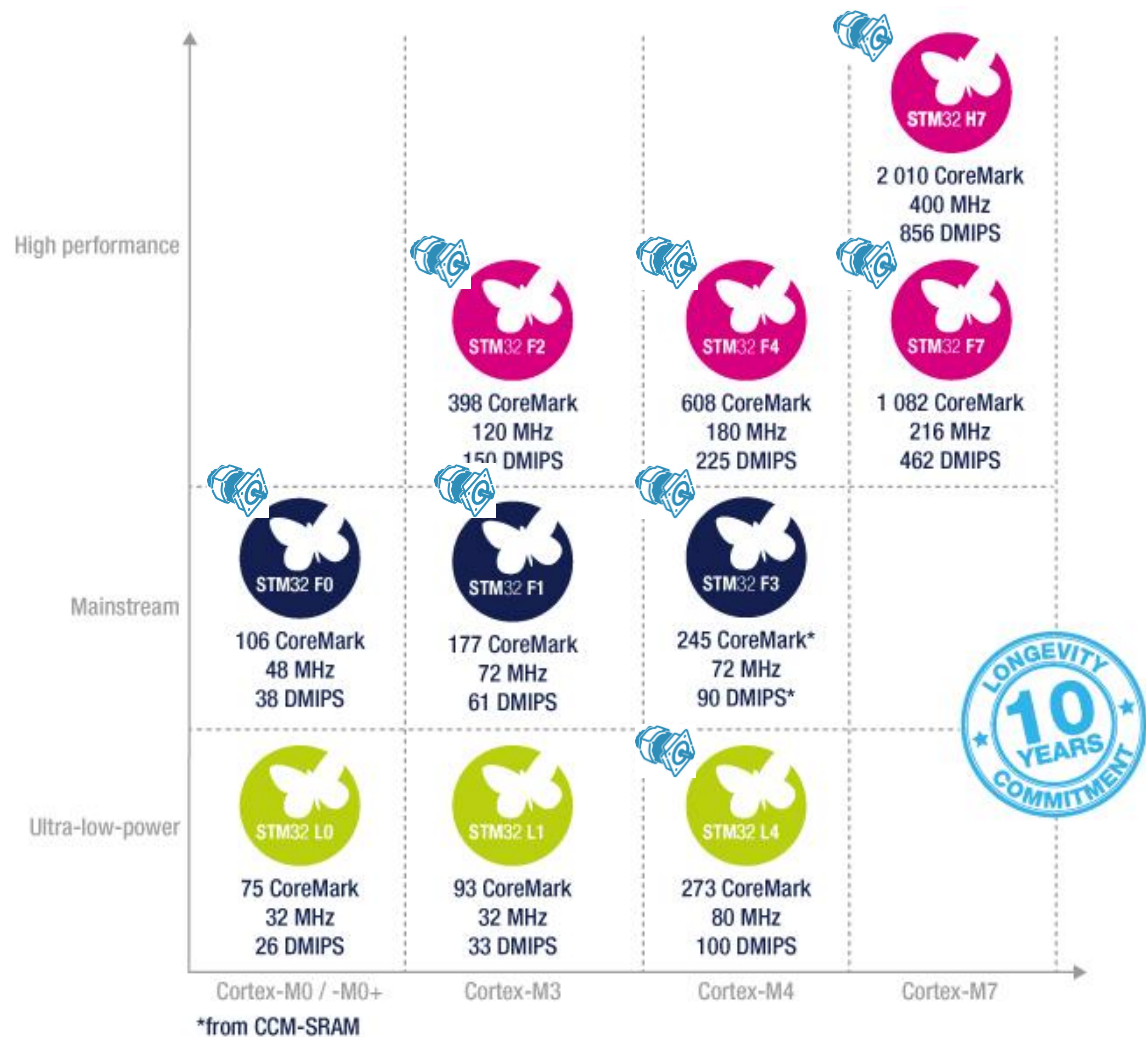
电动机开发套件  
Motor Control Kit



# 适用于FOC控制的STM32产品线

42

10 product series / More than 40 product lines



# FOC5.2电机库支持的芯片型号

43

STM32F7xx	<ul style="list-style-type: none"><li>• STM32F746</li><li>• STM32F769</li></ul>
STM32F4xx	<ul style="list-style-type: none"><li>• STM32F405xx, STM32F407xx,</li><li>• STM32F415xx, STM32F417xx,</li><li>• STM32F446xx, STM32F401</li></ul>
STM32L4xx	<ul style="list-style-type: none"><li>• STM32L476</li><li>• STM32L452</li></ul>
STM32F3xx	<ul style="list-style-type: none"><li>• STM32F302x6/x8</li><li>• STM32F302xB/C</li><li>• STM32F303xB/C/E</li></ul>
STM32F1xx	<ul style="list-style-type: none"><li>• STM32F103</li></ul>
STM32F0xx	<ul style="list-style-type: none"><li>• STM32F030/STM32F031</li><li>• STM32F051</li><li>• STM32F072</li></ul>

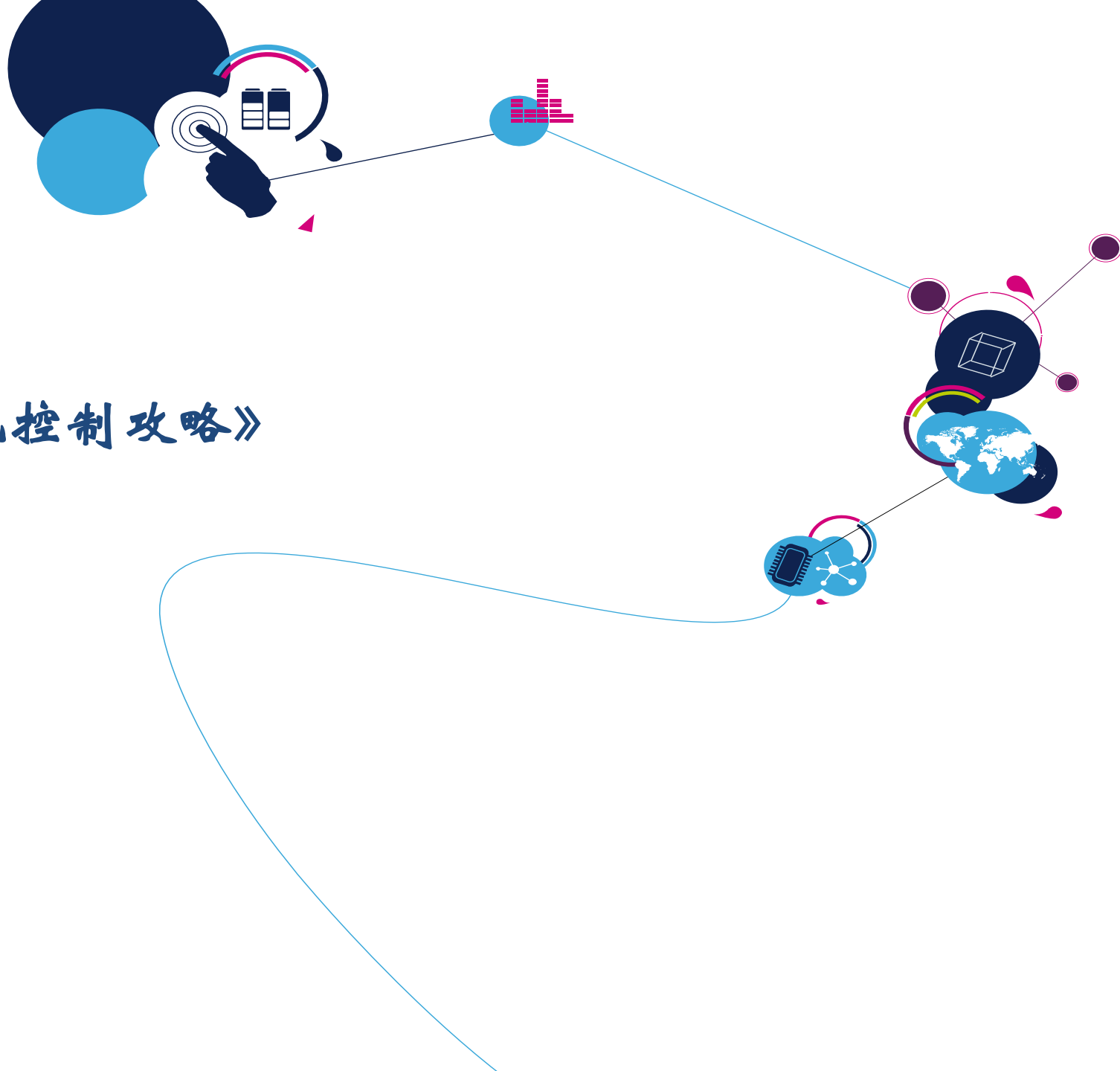


- SDK5.0有两个发布软件包:
  - X-CUBE-MCSDK
    - 开放除了MTPA, CORDIC, flux weakening, STO+PLL, rev up,HFI以外全部源程序
    - 从 ST.com 直接下载,无需注册
  - X-CUBE-MCSDK-FUL
    - 开放全部源程序
    - 注册批准以后,可以在ST.com下载
- 使用许可: ST license SLA0048, Ultimate Liberty
  - <http://www.st.com/SLA0048>
- 前SDK v4.3 所在的网站:
  - 保留 STSW-STM32100 超链接,但是在这里无法下载SDK 4.3
  - 增加提醒信息:该链接已经自动转到下载MC SDK5.0的页面

- 计划内发布的版本: MC SDK5.x
  - 内容:
    - 新功能
    - Bug 修改
  - 测试: 完成全部非递归测试
- Bug 修复发布版本: MC SDK5.x.y
  - 内容:
    - 仅修复影响性能的bug
  - 测试: 只测试修复部分
- 工具/固件 版本兼容:
  - 发布MC SDK时 WB与固件的版本是经检查完全对应的
  - 持续更新CubeMX 与电动机控制相适应的功能

# 《基于STM32的电机控制攻略》

问答环节



# Releasing your creativity

47



- Thank you -