



无传感器PMSM 马达FOC控制算法详解

课程目标

通过本课程学习，您将：

- 了解一些目前最新的电机控制设计解决方案
- 了解一种新的永磁同步电机（PMSM）无传感器磁场定向控制（FOC）算法
- 了解如何查找更多关于该算法的信息

课程安排

- **PMSM概述**
- **PMSM的FOC控制**
- **无传感器技术**
- **DMCI介绍——一种有用的工具**
- **演示1： 整定PI参数**
- **演示2： 整定无传感器控制参数**
- **回顾，答疑（Q&A）**

课程安排

● PMSM概述

- PMSM应用
- PMSM与BLDC的比较
- PMSM结构
- PMSM特性
- PMSM操作

PMSM应用

- 高效率和高可靠性
- 设计用于高性能伺服应用
- 可实现有/无位置编码器的运行方式
- 比**ACIM**体积更小、效率更高、重量更轻
- 采用**FOC**控制可实现最优的转矩输出
- 平滑的低速和高速运行性能
- 较低的噪声和**EMI**

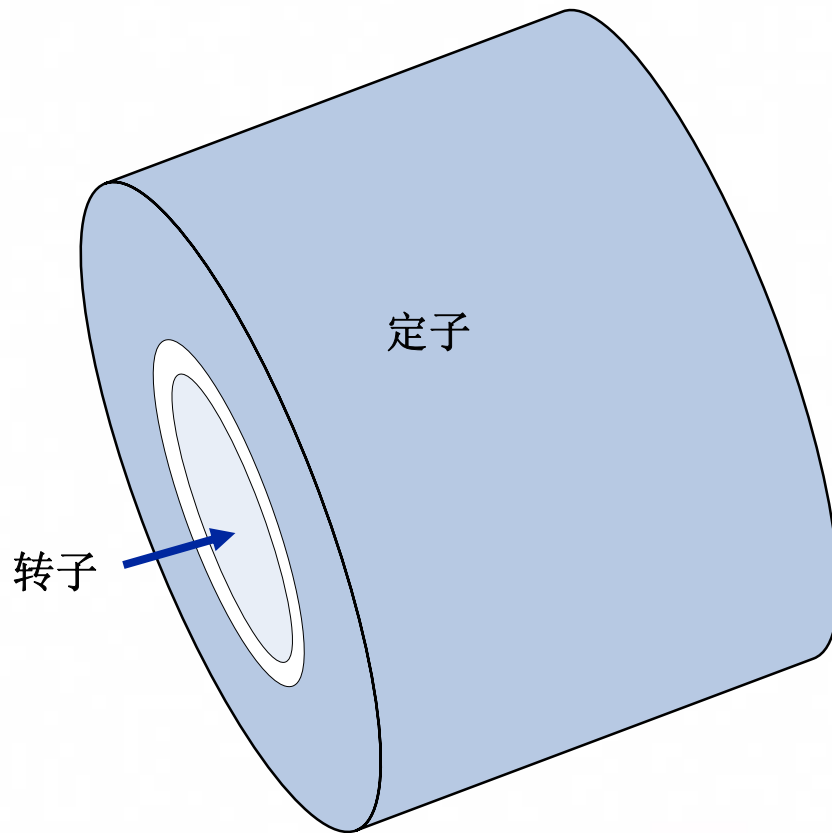
PMSM 应用

- 空调机和冰箱（**AC**）压缩机
- 直接驱动洗衣机
- 高精度机床工具
- 汽车电动转向
- 牵引控制
- 数据储存

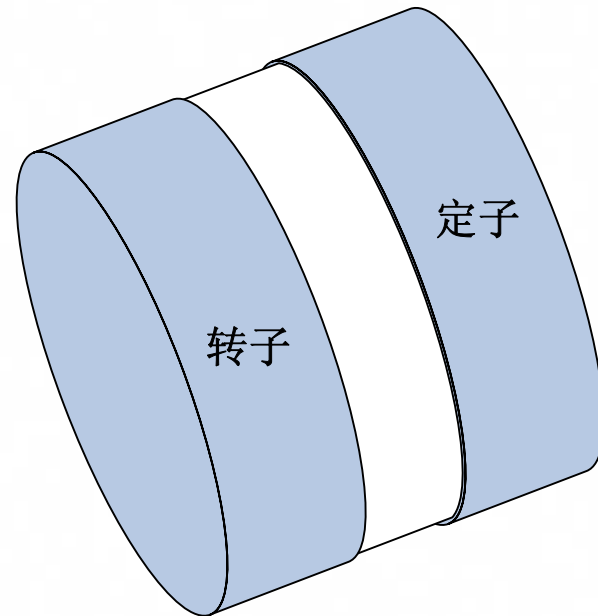
PMSM与BLDC的比较

- 从其发展历史来看，两种电机发源于不同的领域
- 转矩产生的机理相同
- **BLDC**是**PM BDC**的一个派生词
- **PMSM**表示一个励磁磁场由**PM**提供的**AC**同步电机
- 控制方法不同（六步控制与**FOC**）

PMSM结构

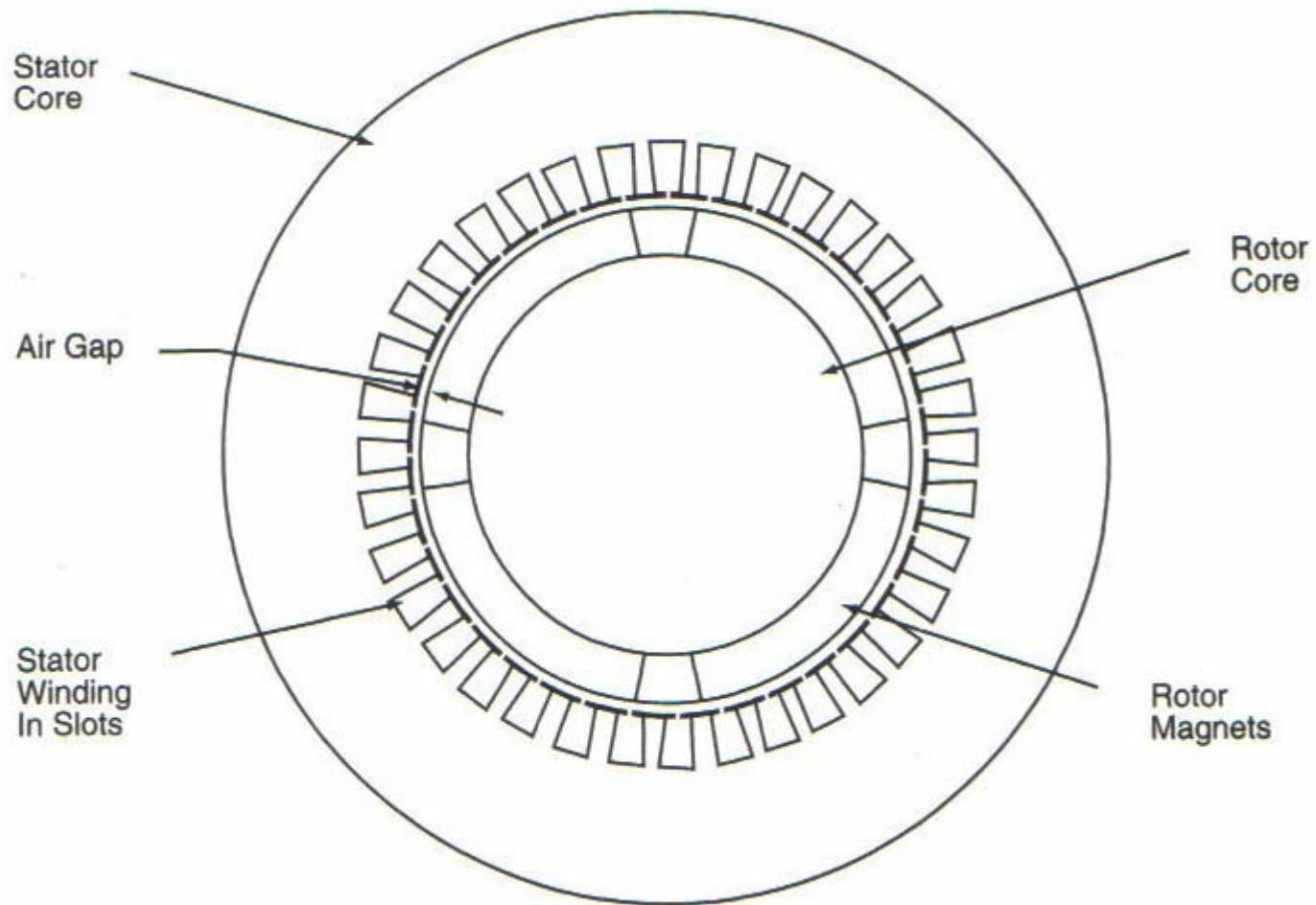


径向



轴向

PMSM结构



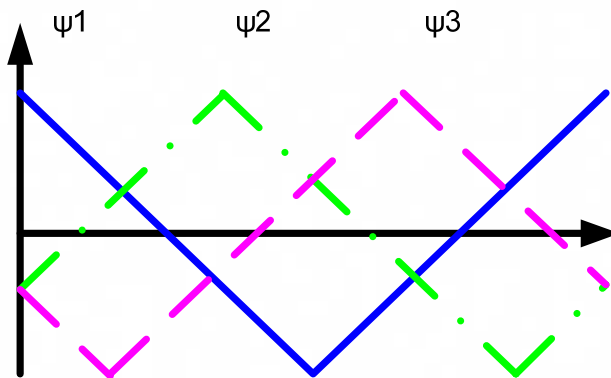
PMSM结构

- **PMSM**具有与**BLDC**类似的结构，但是，**PMSM**反电势信号为正弦的，而**BLDC** **PMSM**梯形波
- 数学模型不同
- **PMSM**采用正弦电流驱动
- 与三相**ACIM**类似，但气隙磁通由转子上安装的磁钢产生

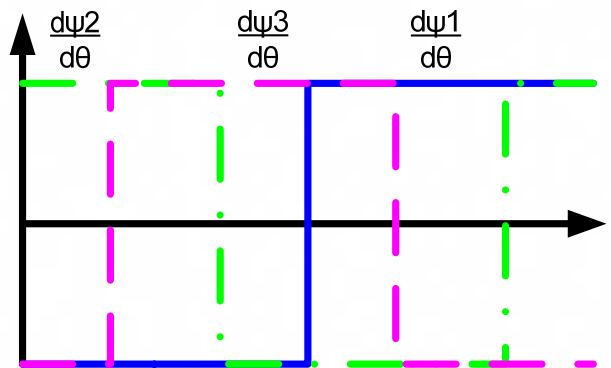
PMSM特性

BLDC

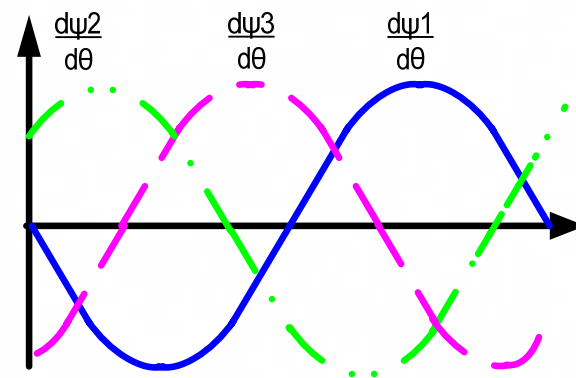
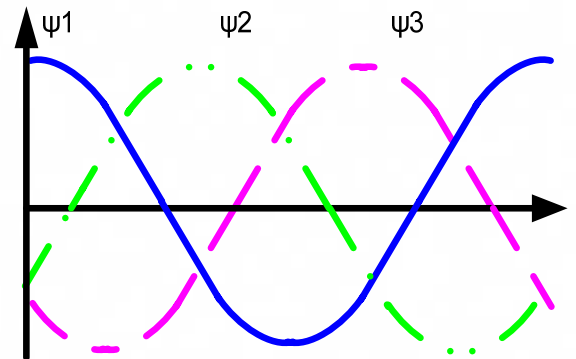
定子磁链



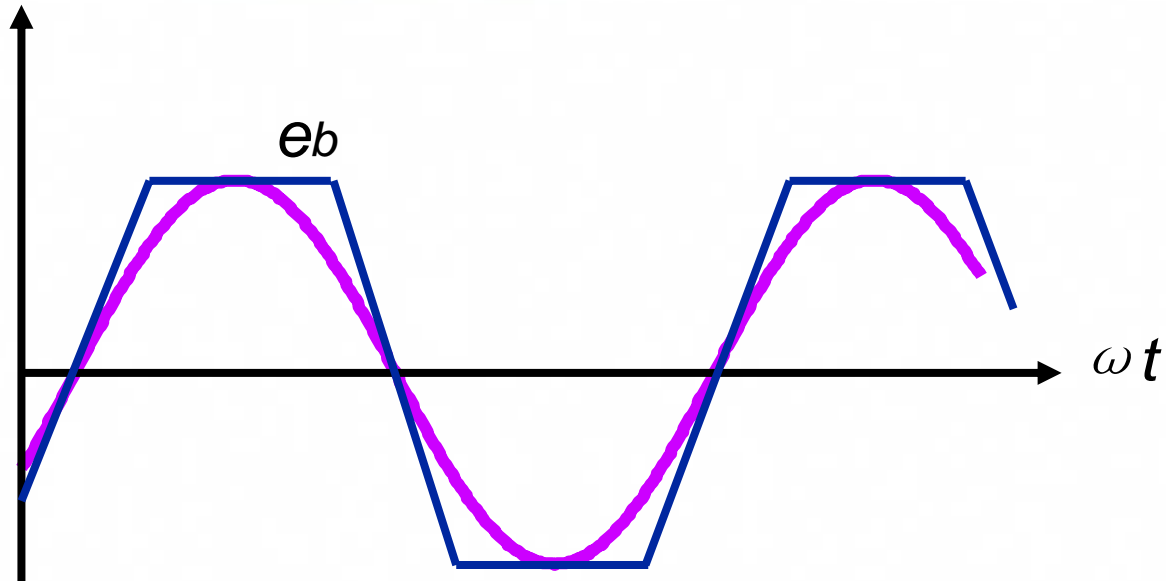
反电势



PMSM

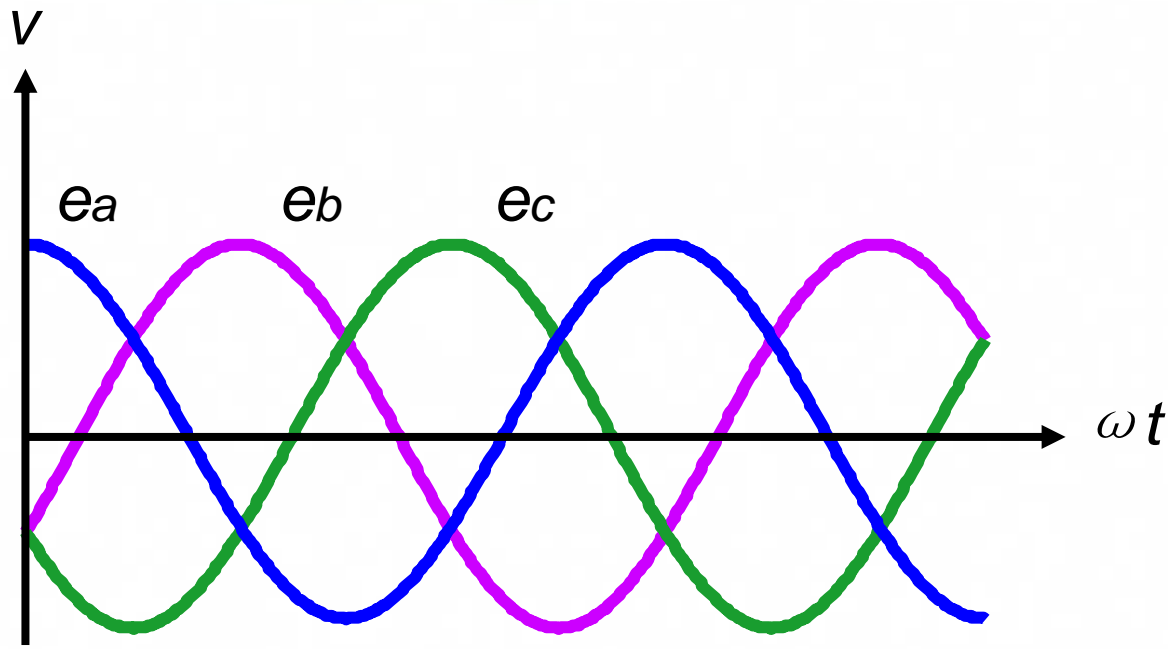


PMSM特性



- 波形形状主要受到定子设计的影响
- 每相每极槽数是一个关键参数
- 分数槽、绕组和磁极电机可实现波形设计
- 制造容差决定波形的质量

PMSM特性



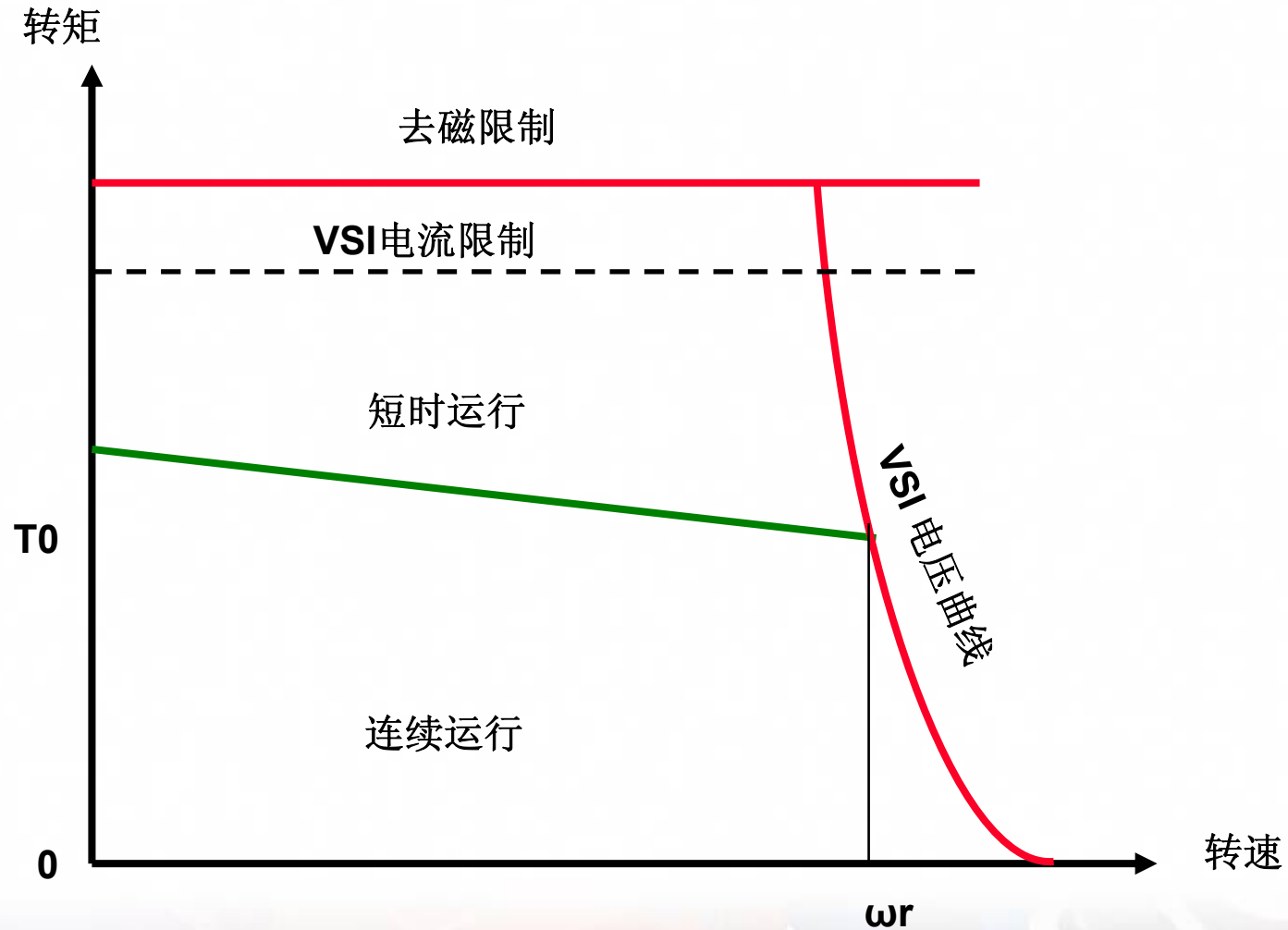
PMSM的反电势波形

- 具有正弦反电势波形的无刷电机
- 同步**AC**电机
- **BLAC**
- **PMSM**

PMSM特性

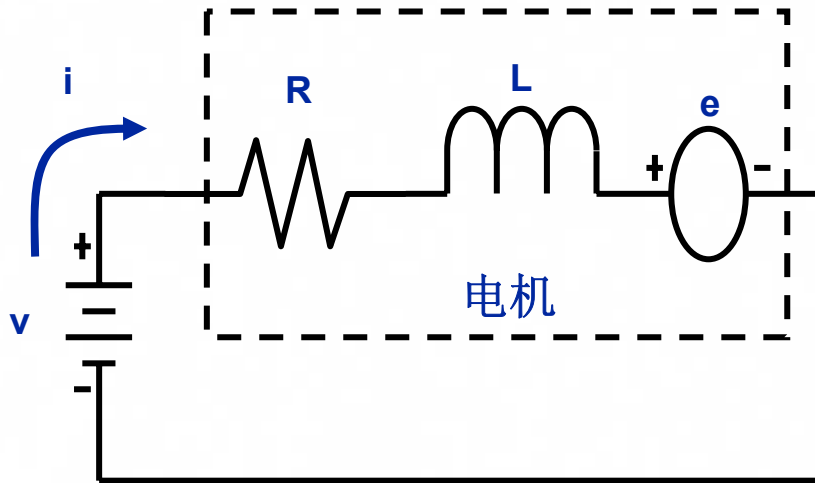
- 理想的反电势不含有谐波
- 使得音频噪声减少
- 更高的效率——减少了寄生能量，这种能量可激发机械部件、导致其处于不可控的状态

PMSM特性



PMSM运行

PMSM电气模型



$$i_s e_s = T \omega$$

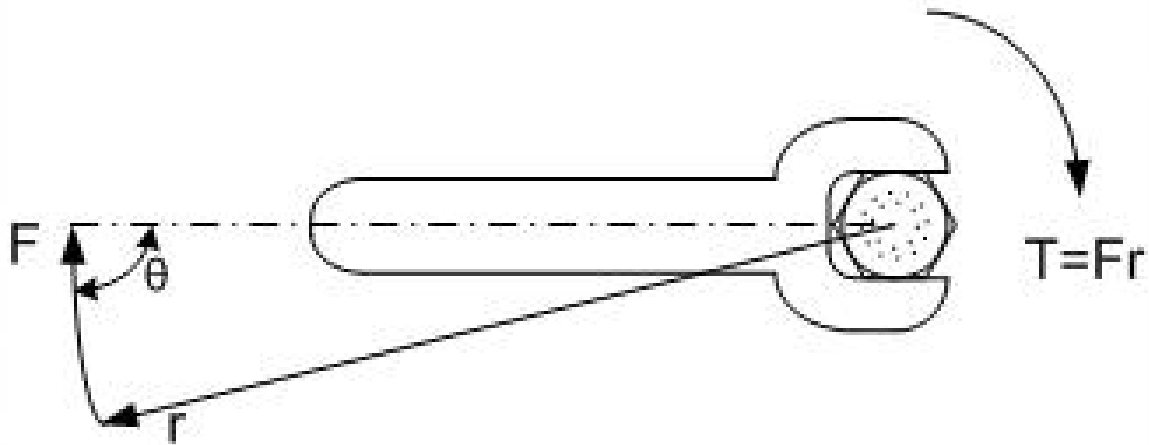
$$T \propto i_s$$

● 瞬时功率

– 转矩 \times 转速 = 反电势 \times 相电流

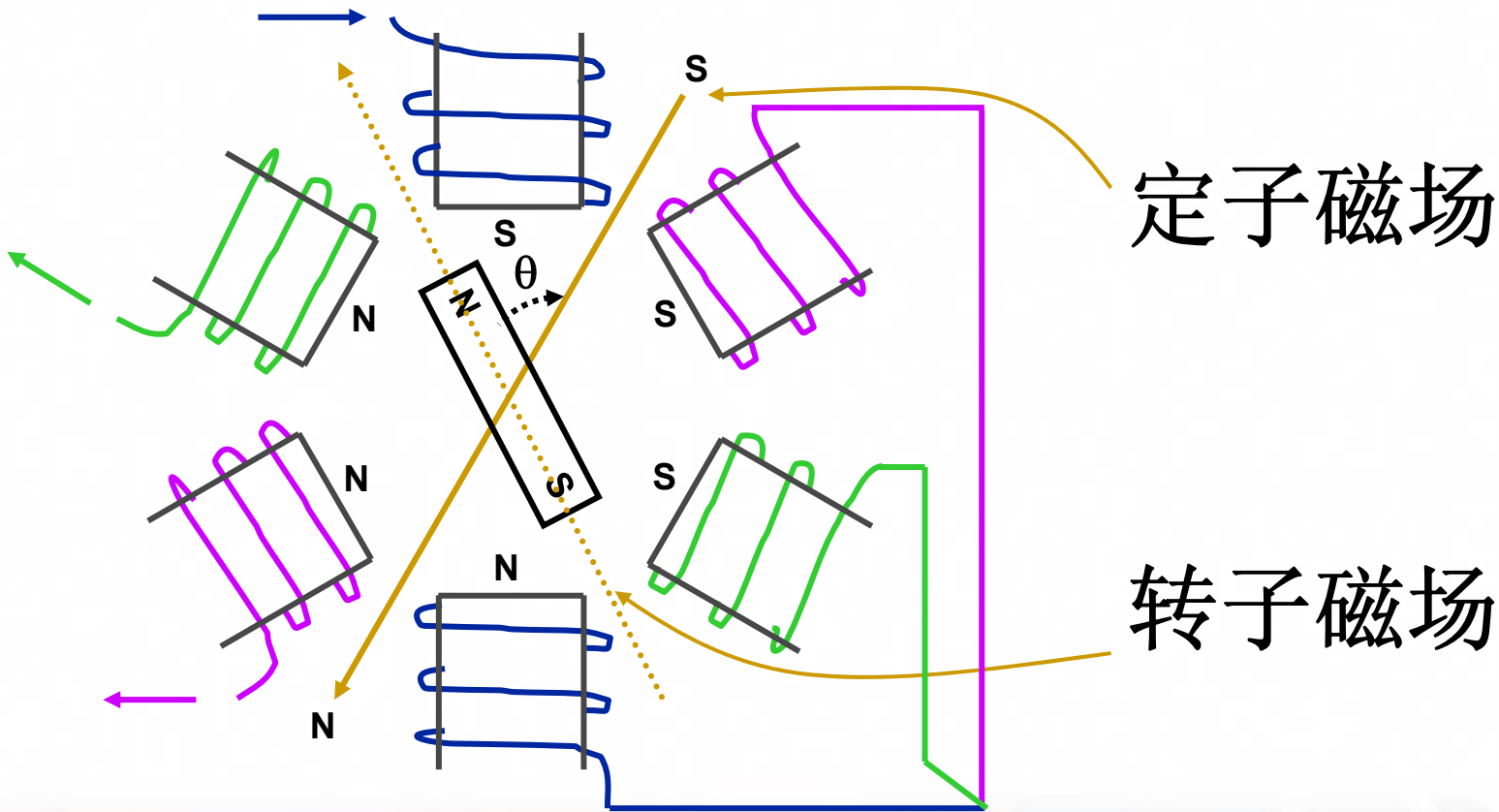
PMSM运行

转矩产生



考虑到 F 的方向, $T = Fr \sin \theta$

PMSM运行

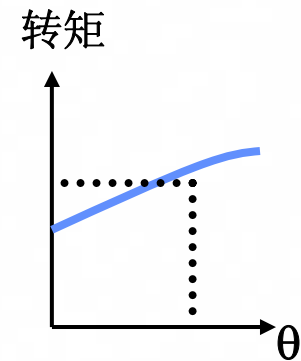
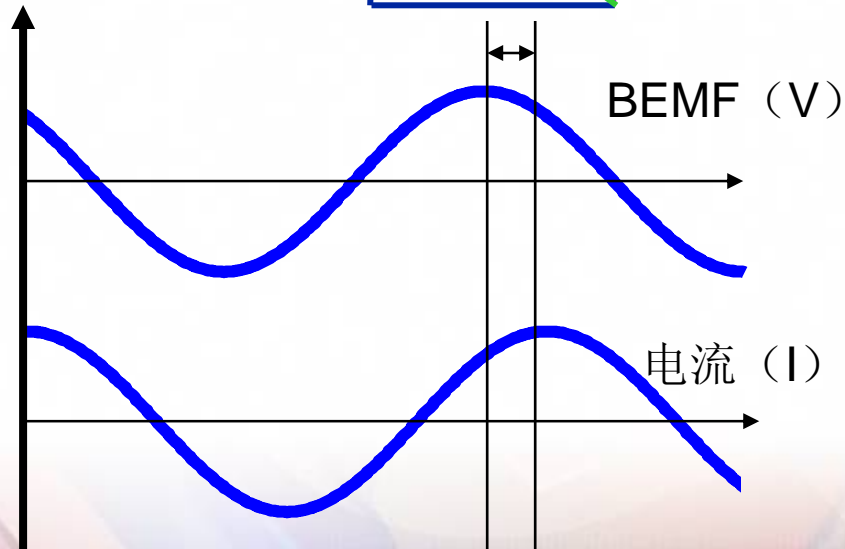
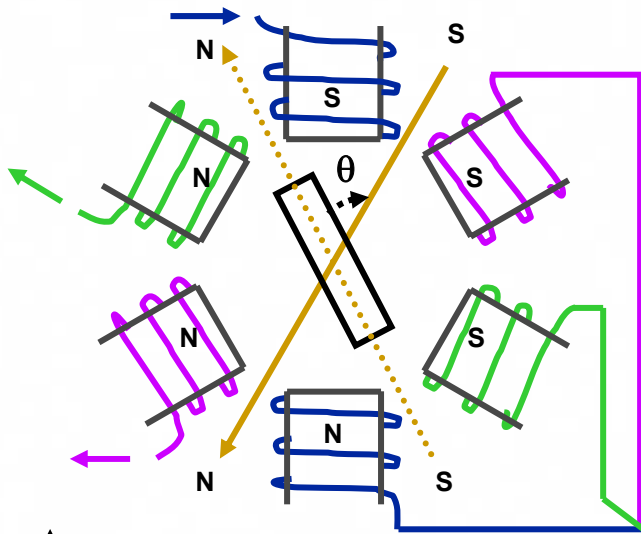


PMSM运行

- 定子磁场可分解为与转子磁场平行和正交两个分量
- 只有正交（交轴）磁场分量产生转矩
- 平行（直轴）磁场分量产生作用于轴承的压力
- 相电流产生定子磁场且可被测量

PMSM运行

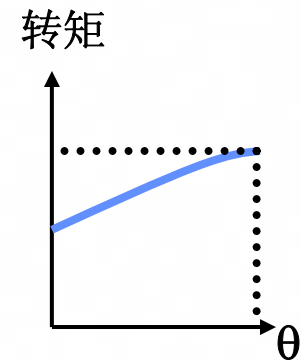
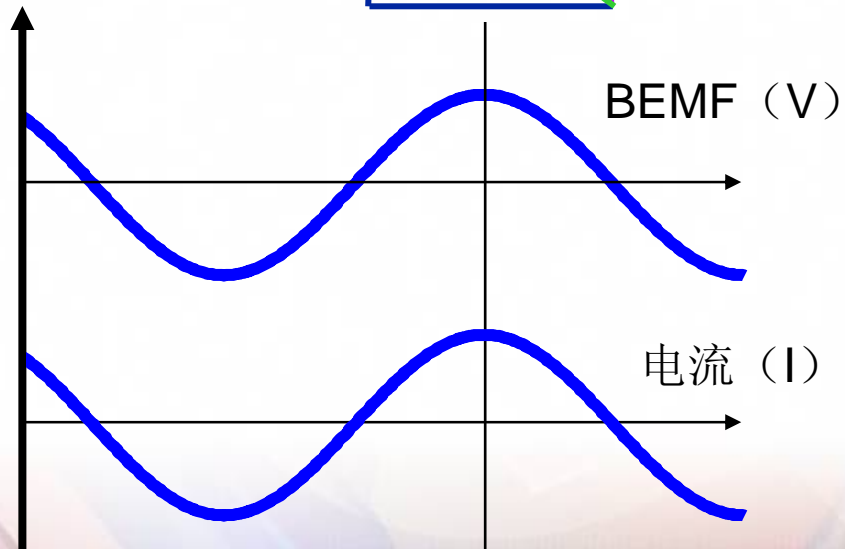
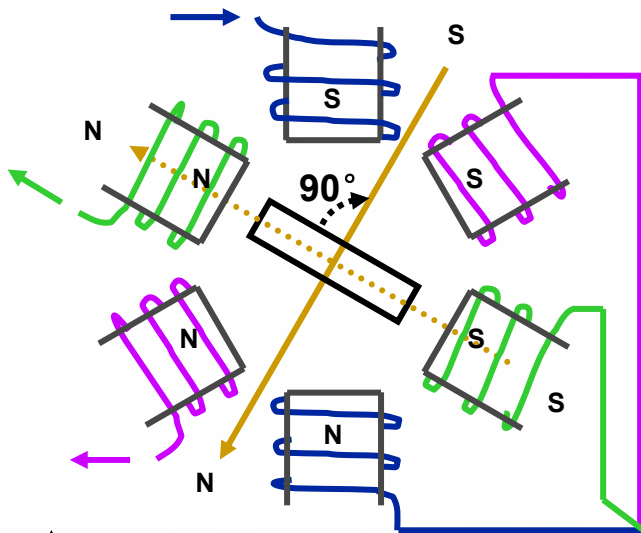
未采用FOC



$$T = F_s \cdot R_s \cdot \sin\theta$$

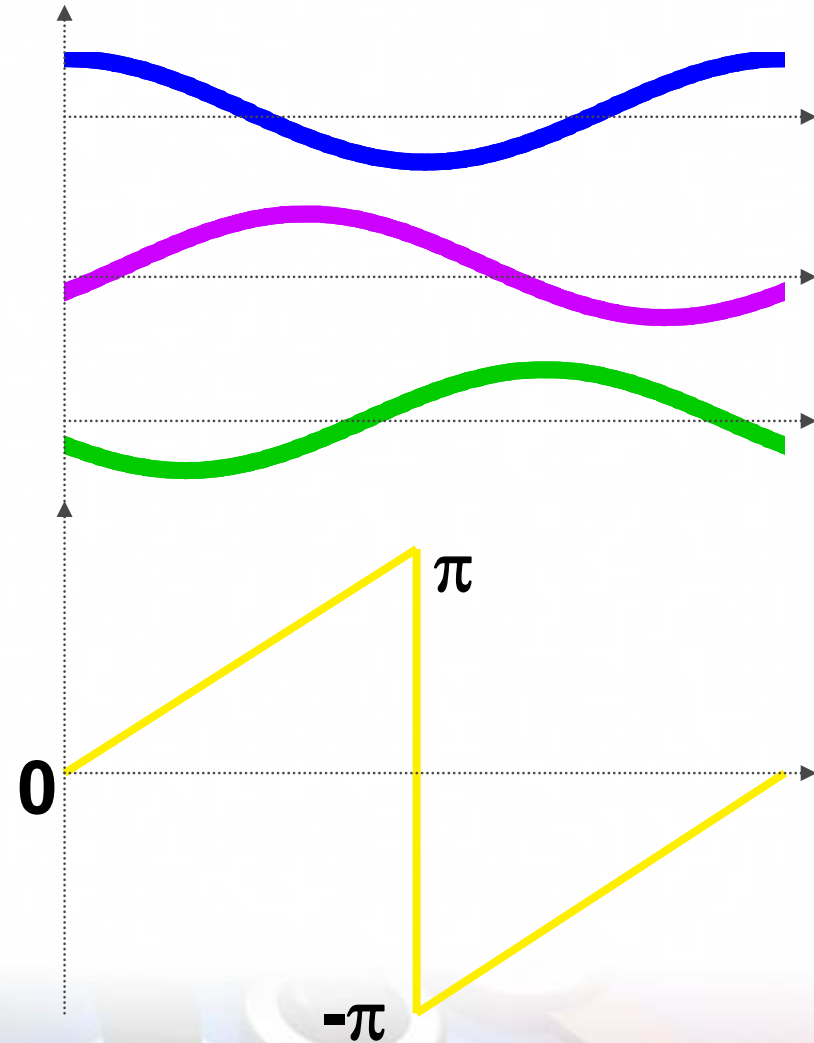
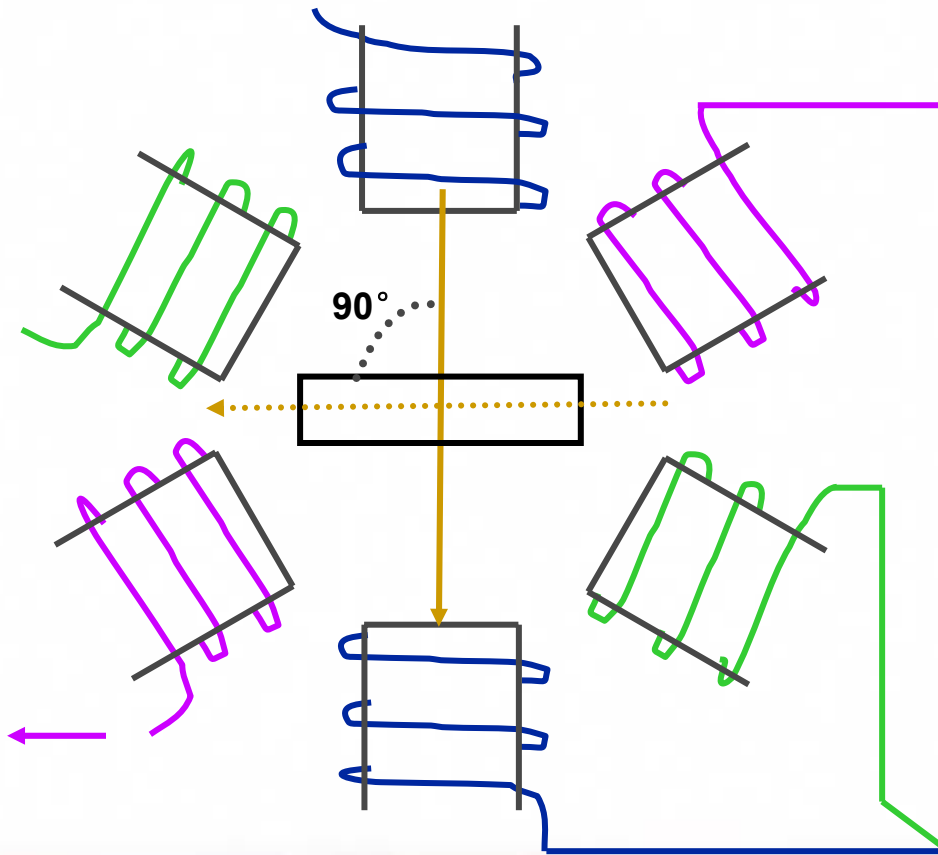
PMSM运行

采用**FOC**



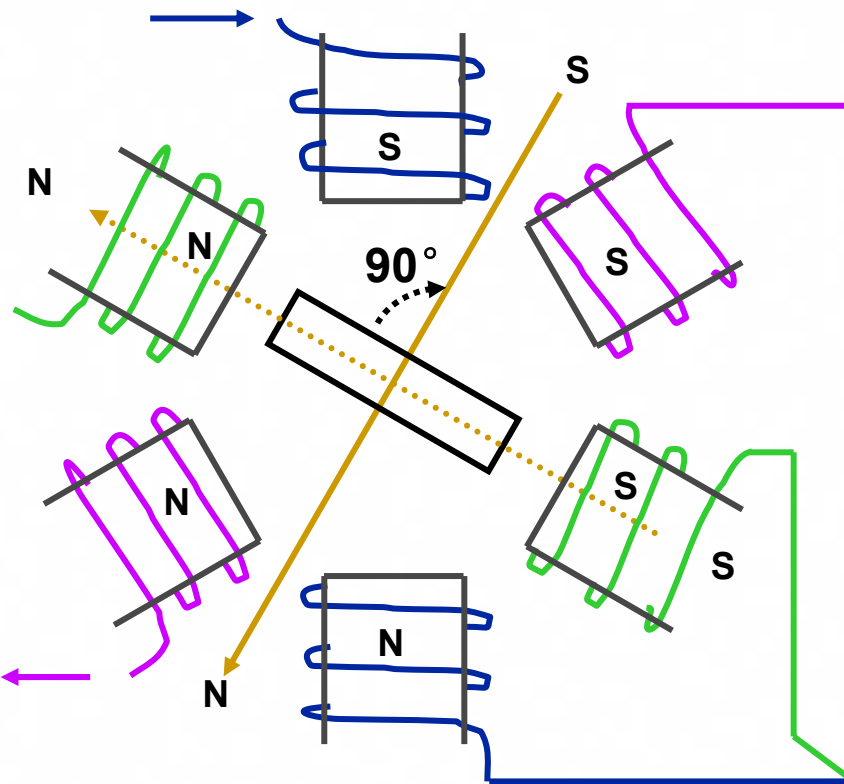
$$T = F_s \cdot R_s \cdot \sin\theta$$

PMSM运行



PMSM使用FOC控制

- 保持电流超前于转子位置 90°
- 需要一直获取连续的转子位置信息
- 更好的转矩性能
- 无转矩脉动



课程安排

- PMSM概述
- **PMSM的FOC控制**
- 无传感器技术
- DMCI介绍——一种有用的工具
- 演示1： 整定PI参数
- 演示2： 整定无传感器控制参数
- 回顾， 答疑（Q&A）

内容安排

- **PMSM的FOC控制**
 - FOC概述
 - 信号处理
 - PMSM的FOC控制

FOC概述

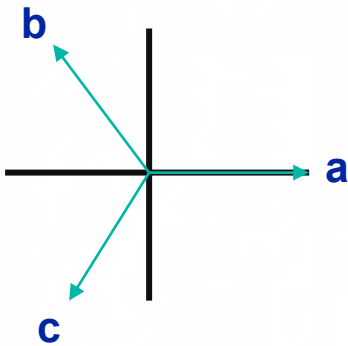
- 采用正弦激励，并使所施加电流空间矢量与转子位置保持一定关系
- 定子电流和转子（磁钢）磁通相互作用产生转矩，从而使转子转动
- 需要采用电子控制实现电流矢量超前于转子位置**90度**，以实现最优转矩输出
- $T \propto$ 电流空间矢量

FOC概述

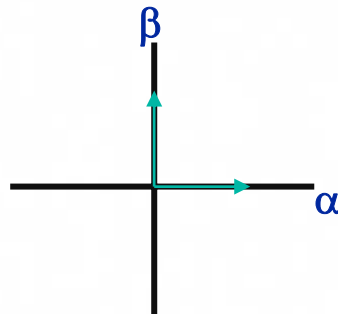
- 提升动态响应
- 减少转矩脉动
- 可扩展转速范围
- 低噪声和**EMI**

信号处理

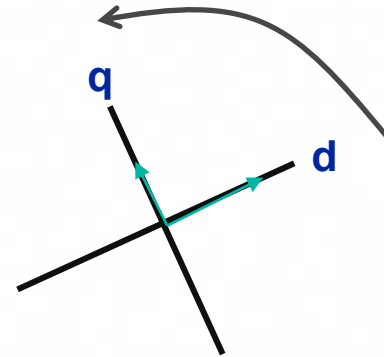
矢量坐标系



3-轴定子坐标系



2-轴定子坐标系

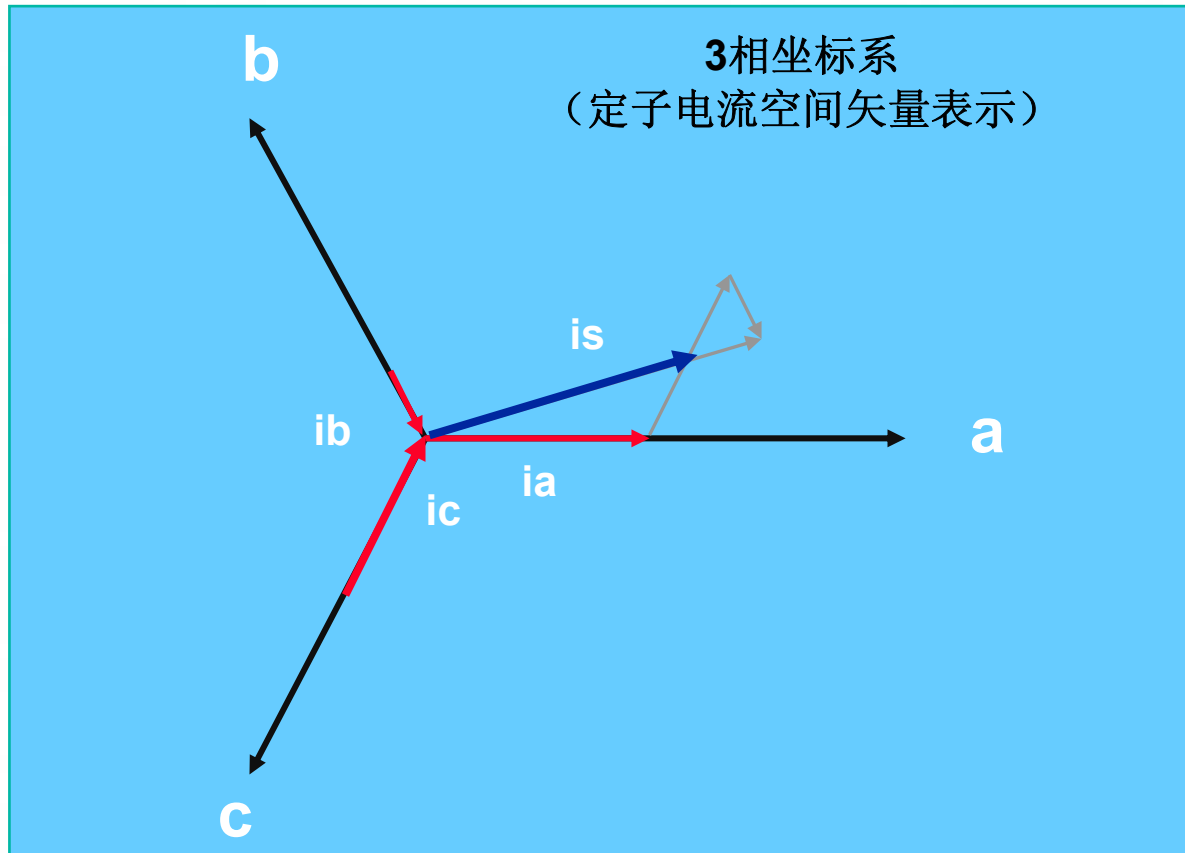


2-轴旋转坐标系

信号处理

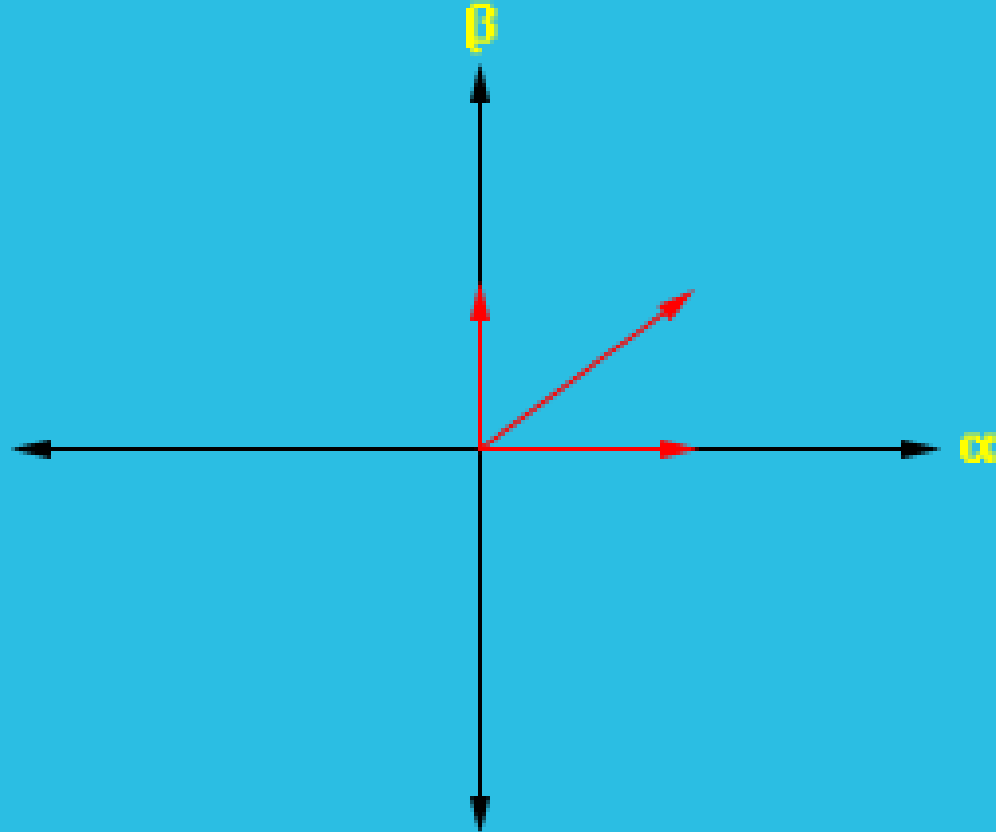
- 通过三相电压控制电流空间矢量
- 坐标变换简化了数学方程，使得三相电机控制可采用与直流电机相同的传统方法
- 三相时间变量变换到**2**轴时间常量

信号处理



信号处理

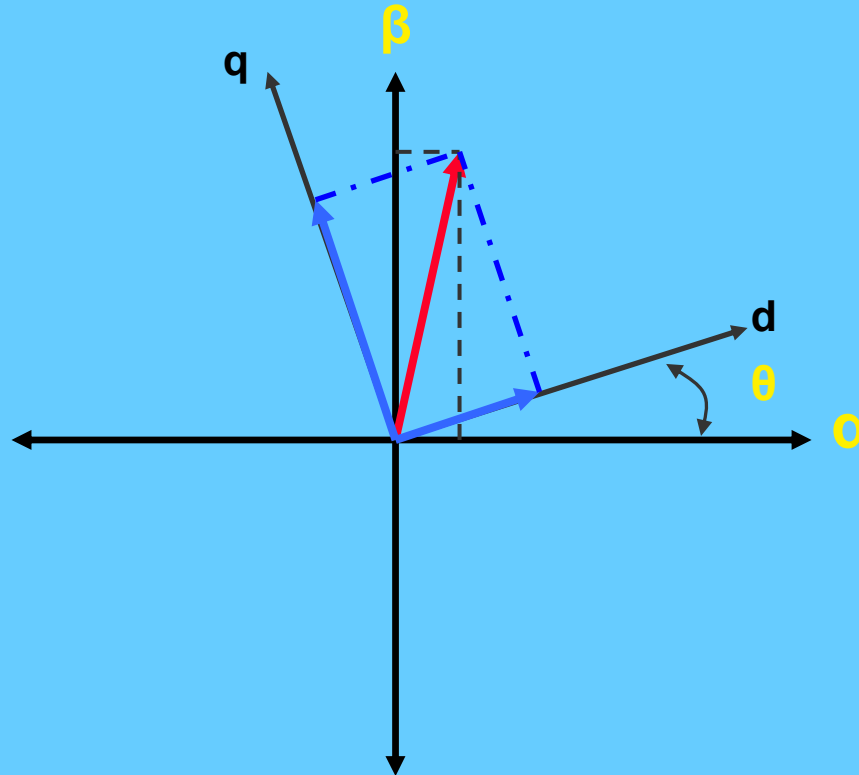
投射到2相系统（Clarke变换）



实部 α 和虚部 β 分量为 $= i s \alpha + j i s \beta$ 。变换至正交静止坐标系。

信号处理

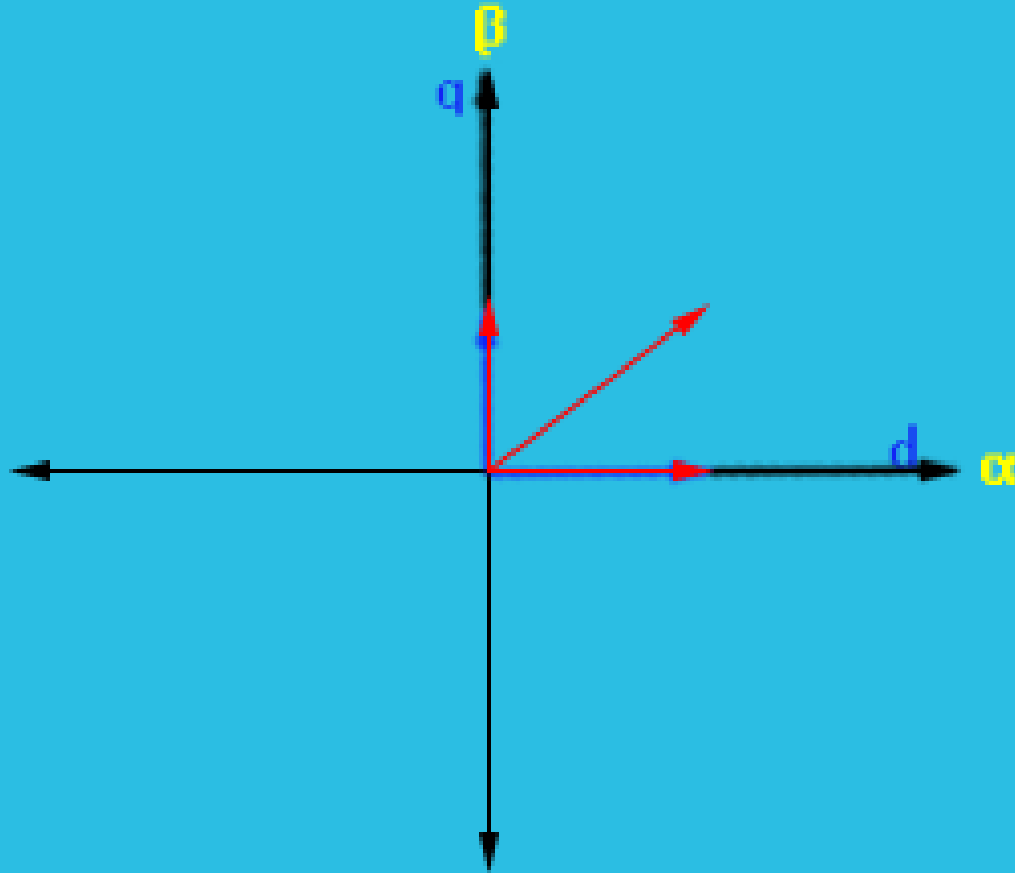
投射到旋转坐标系（**Park**变换）



从静止坐标系变换到旋转坐标系。直轴和交轴定子电流分量的表征

信号处理

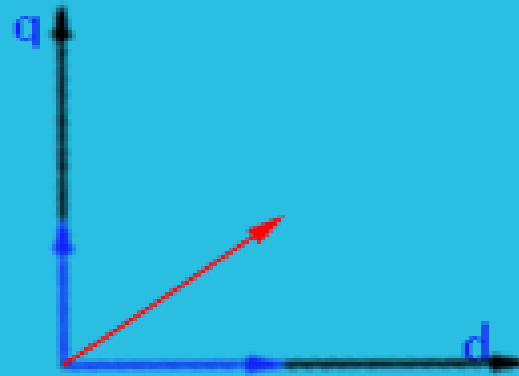
投射到旋转坐标系 (**Park**变换)



从静止坐标系变换到旋转坐标系 (该坐标系以转子速度旋转)

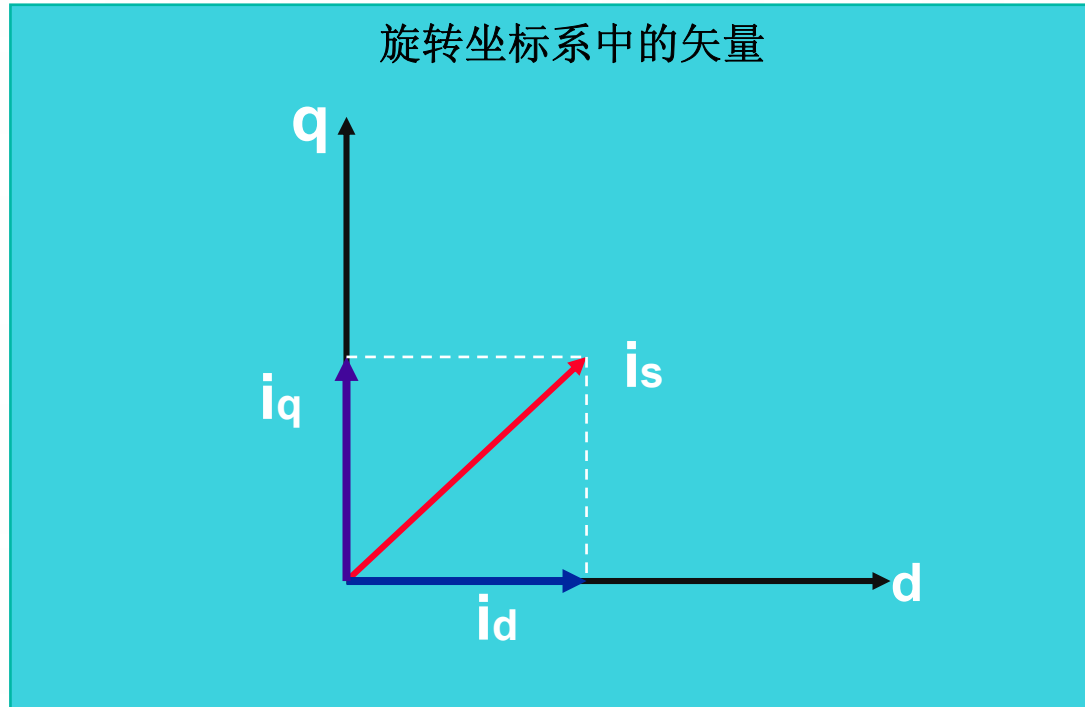
信号处理

旋转坐标系中的矢量



电机绕组中通入对称的电流将产生一个合成的旋转电流空间矢量，该矢量与转子位置正交。为实现最优控制，
 I_q 应取最大值而 I_d 应取最小值

信号处理

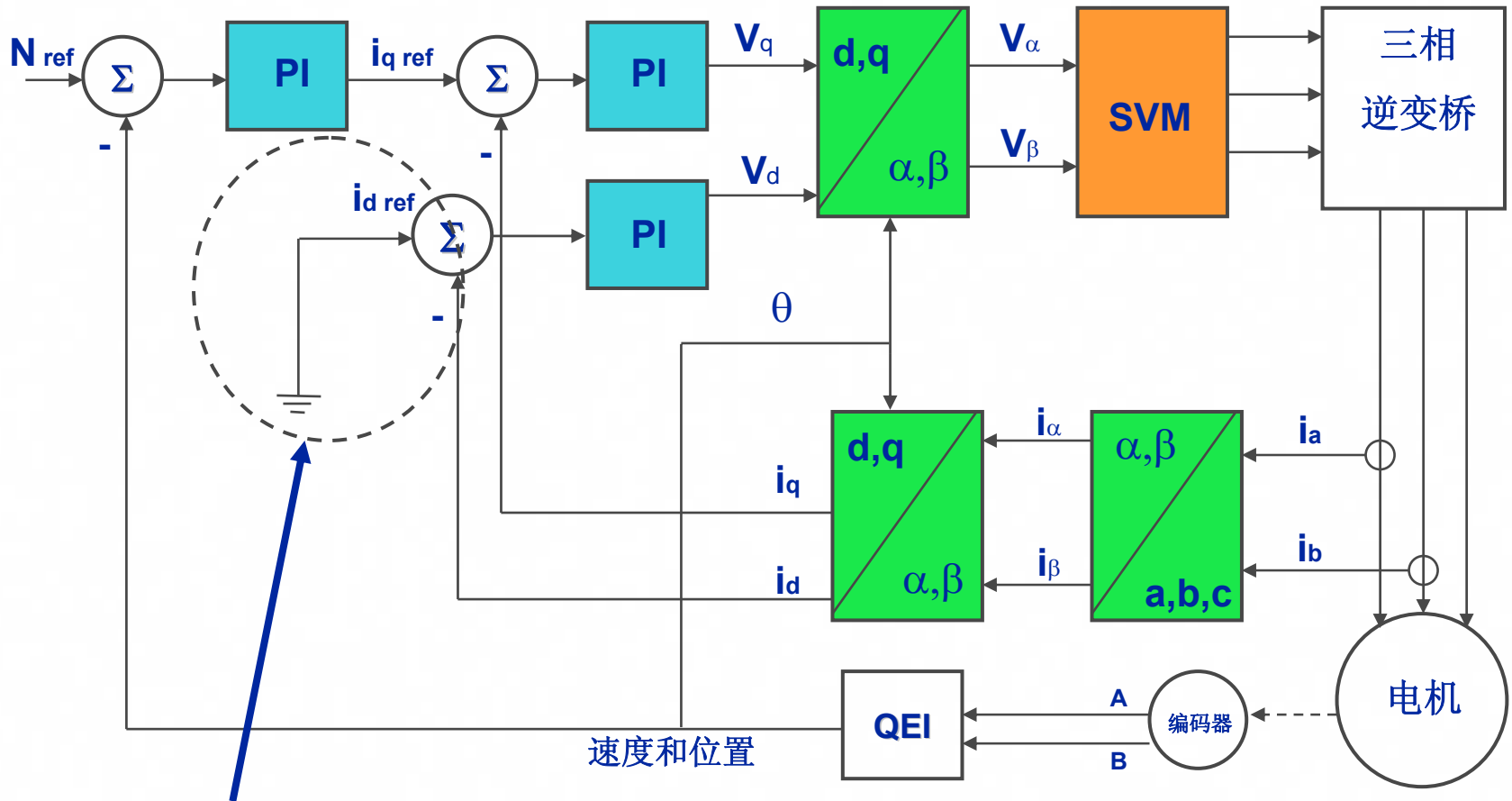


转矩 $\propto i_q$

磁通 $\propto i_d$

它们都是不随时间变化的量，可看作**DC**参数，这使得它们可被独立地进行控制

PMSM的FOC控制



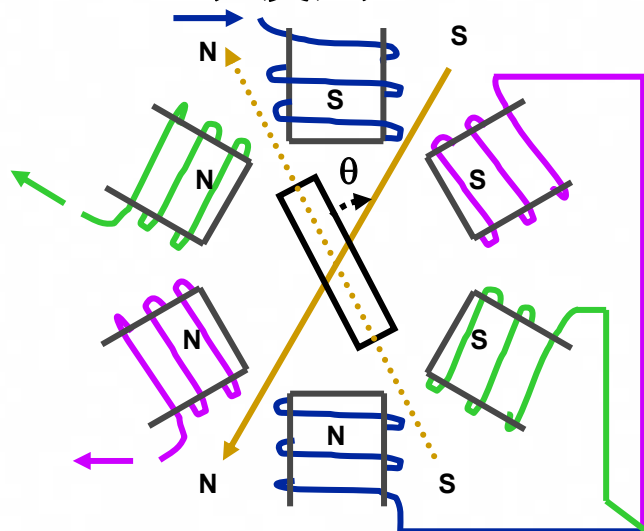
这将使能最优的转矩控制

PMSM的FOC控制

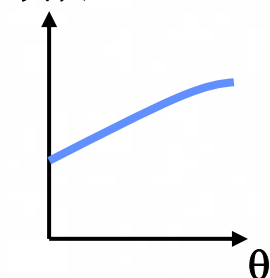
- **PI**控制器运行于转子定向的**d-q**坐标系，它们为直流量，不同于电机电压和电流（为正弦变化量），因此在电机低速和高速运行时都能运行良好。
- **I_q**跟踪给定转矩，**I_d**参考值为零；这将产生最优的转矩输出
- **PI**控制器输出将被变换为三相电压信号以输出到三相逆变桥（反**Park**变换，反**Clarke**变换包含在**SVM**中）

PMSM的FOC控制

未使用FOC

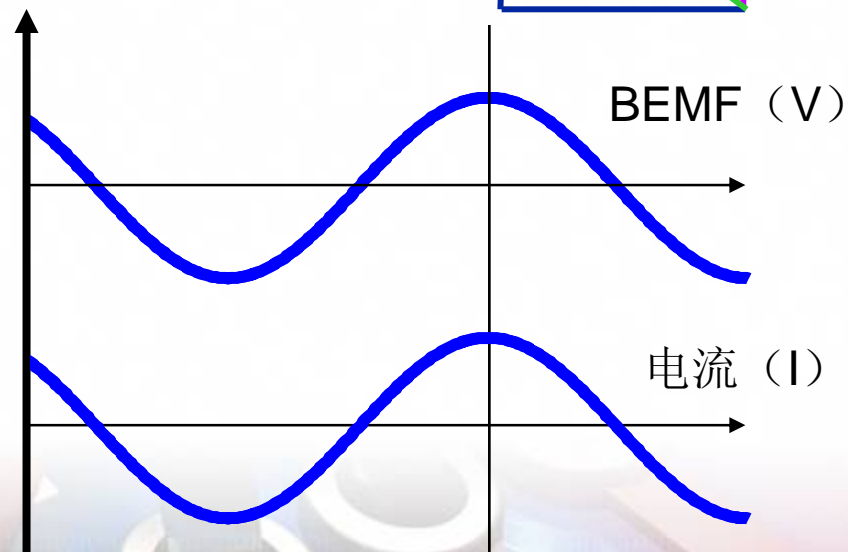
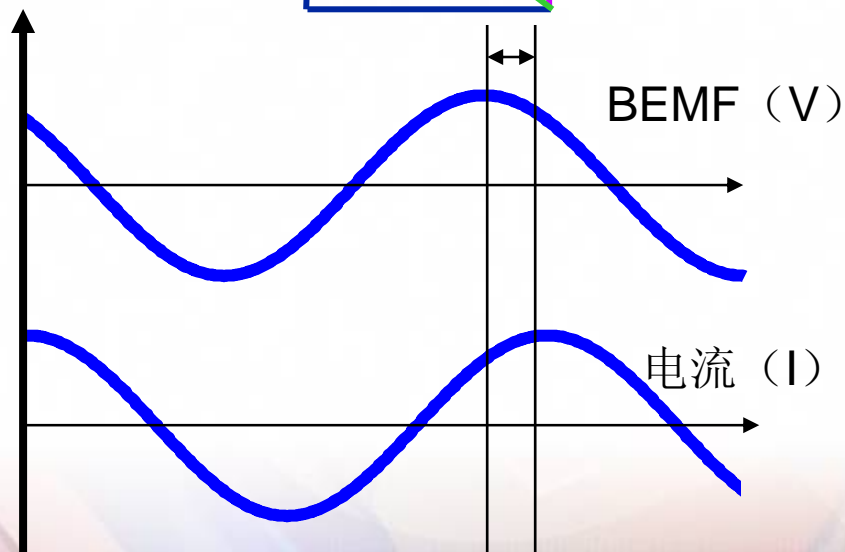
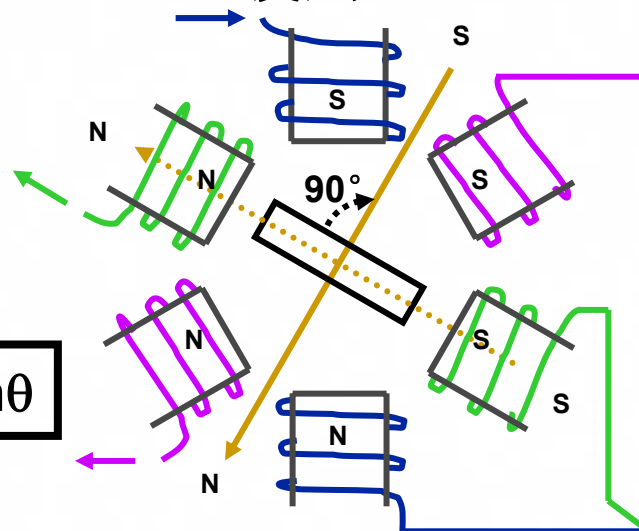


转矩



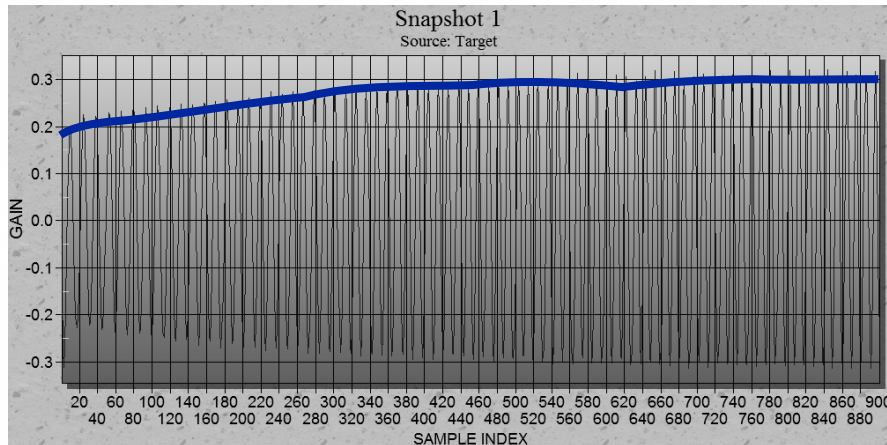
$$T = F_s \cdot R_s \cdot \sin\theta$$

使用FOC

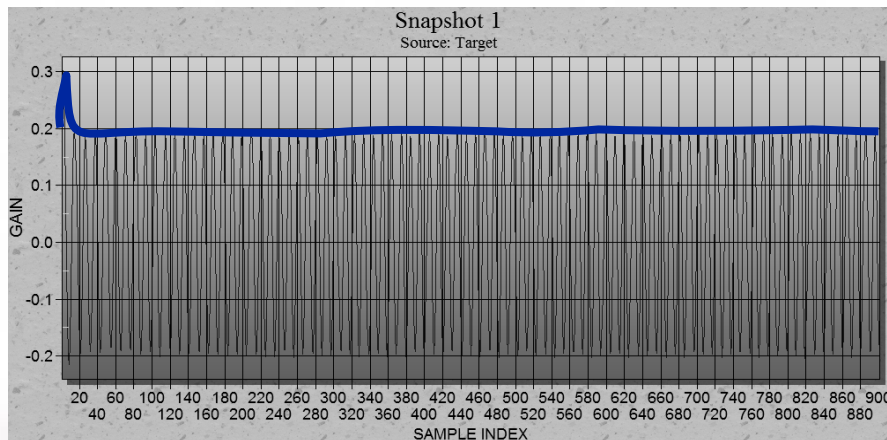


PMSM的FOC控制

相电流响应



PI 速度控制

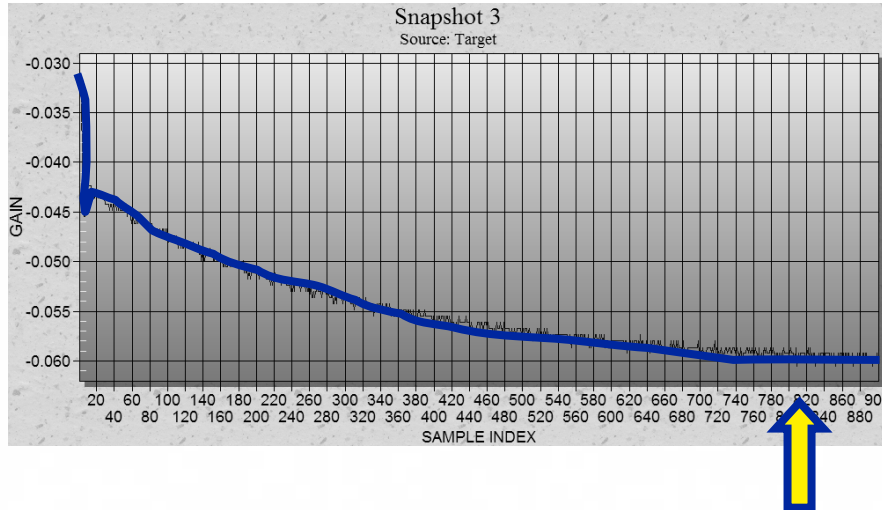


PI 速度 + FOC控制

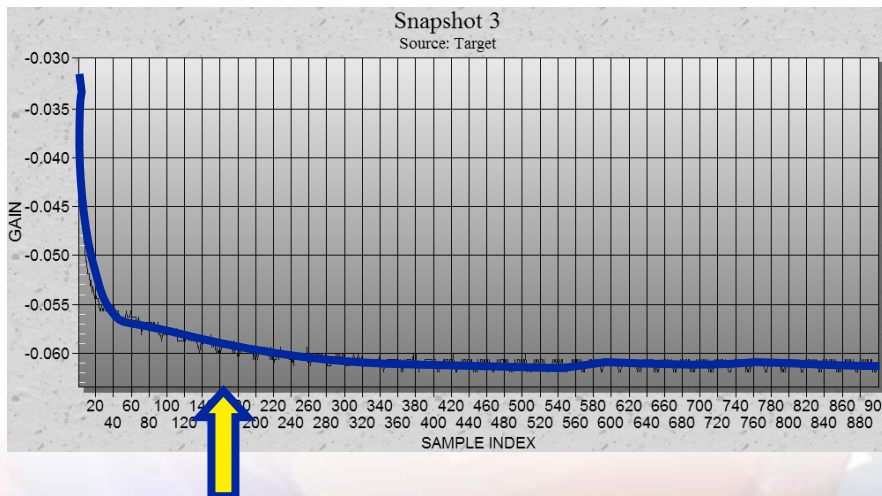
PMSM的FOC控制

速度响应

PI 速度控制



PI 速度+ FOC控制



PMSM的FOC控制

● 弱磁运行

- 当反电势接近供电电压时会发生什么？
- 为获得更高的速度必须削弱转子磁场
- 定子d轴电流设置为负值
- 弱磁运行时转矩减小、速度升高

PMSM的FOC控制

- **FOC**可实现低速的平滑控制和高速的高效控制
- 梯形波（**BLDC**）换相可实现高速运行时的高效率，但在低速时产生转矩脉动和音频噪声
- 正弦驱动方式可实现低速的平滑控制，但在高速运行时效率不高
- **FOC**是克服上述两种缺陷的最好方案

课程安排

- PMSM概述
- PMSM的FOC控制
- 无传感器技术
- DMCI介绍——一种有用的工具
- 演示1： 整定PI参数
- 演示2： 整定无传感器控制参数
- 回顾，答疑（Q&A）



YOU + MICROCHIP ENGINEERING THE FUTURE TOGETHER

无传感器控制技术

课程内容

- 无传感器控制技术
 - 用于BLDC的六步控制
 - PMSM的FOC控制

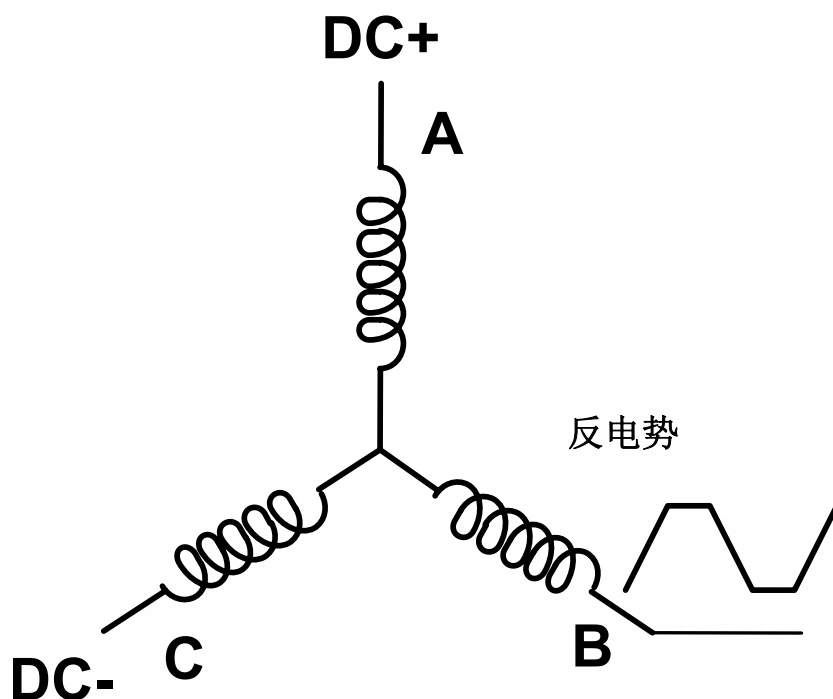
BLDC的六步控制

- 每个电周期内进行六步换相
- 可使用霍尔传感器来确定何时进行换相
- 反电势可用来提供相同的信息

BLDC的六步控制

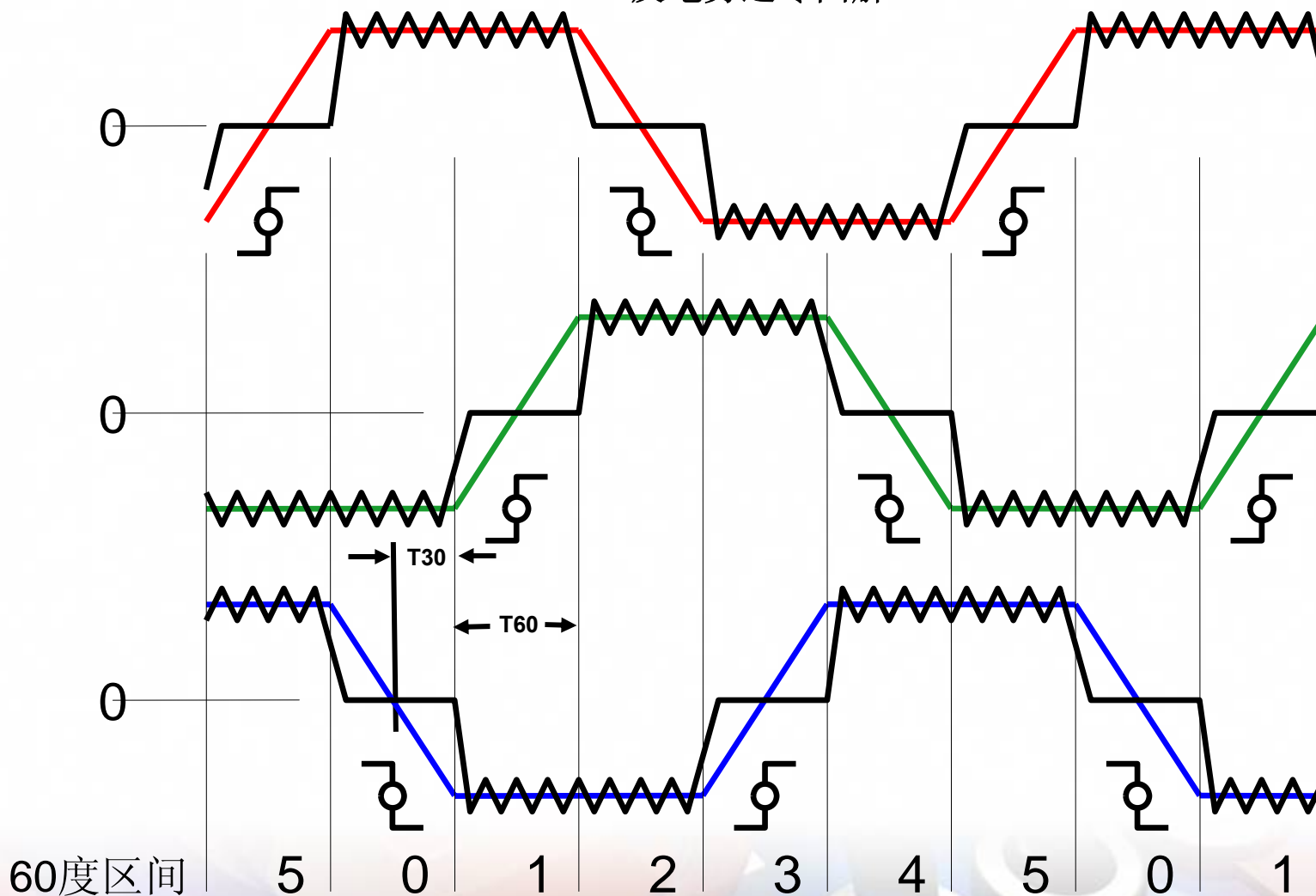
BLDC电机的反电势

- **A相和C相通电**
- 未通电的**B**相将感应反电势
- 通常对未通电的相进行反电势监测



BLDC的六步控制

BLDC 反电势过零图解



BLDC的六步控制

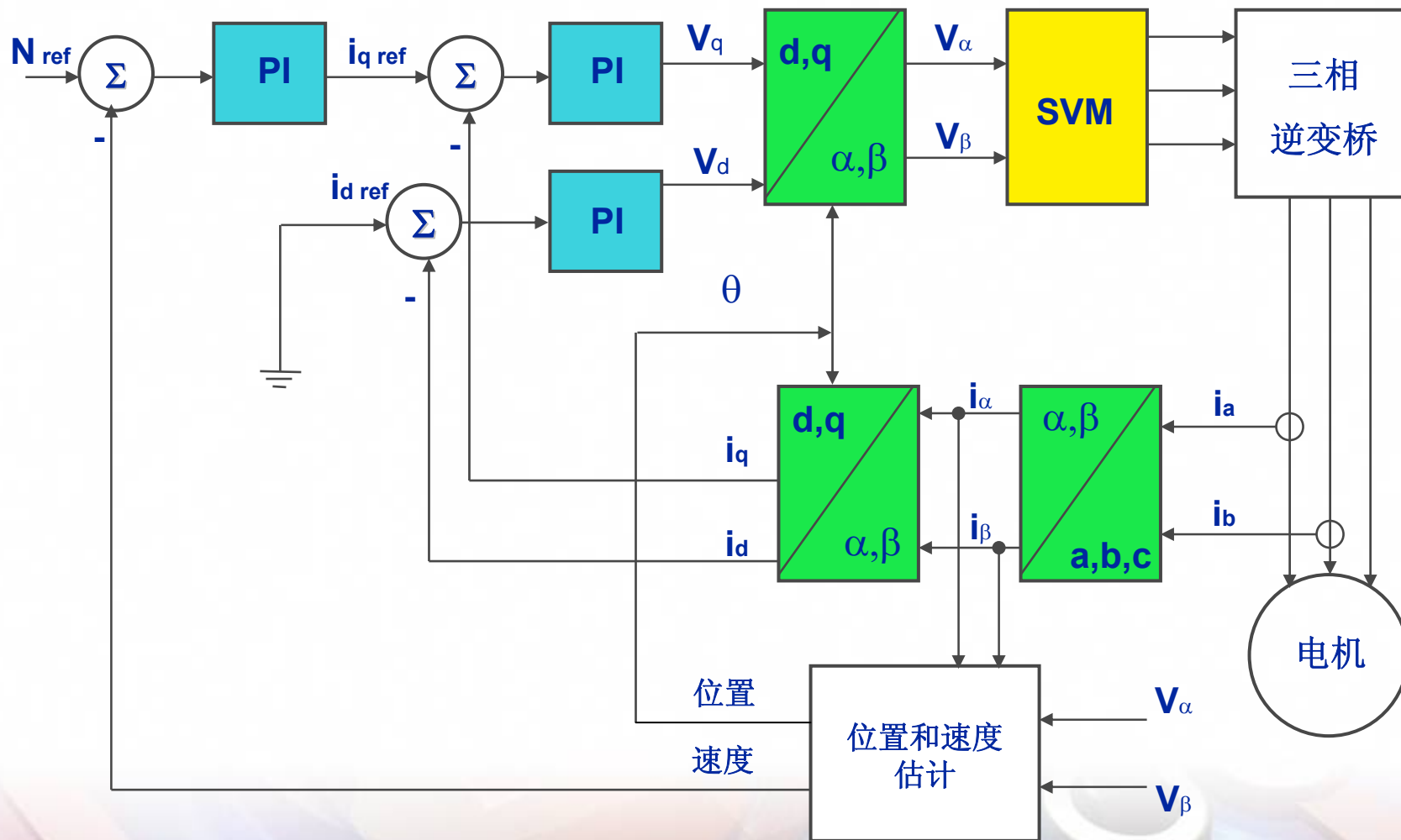
反电势过零法的详细介绍

- 在每个电周期中，都存在每一相未通电的区域
- 在这些区域中，以未通电相绕组的一端作为星形点的参考点，并对另一端进行监测
- 被监测电压在30电角度处穿越 $1/2 V_{DD}$ 点
- 在知道上一个过零时刻之后，即可知60电角度（T60）
- 将 $T60 \div 2 = T30$ 的值装载入TMR2
- TMR2的ISR将在后面的T30时刻对下一对绕组进行换相

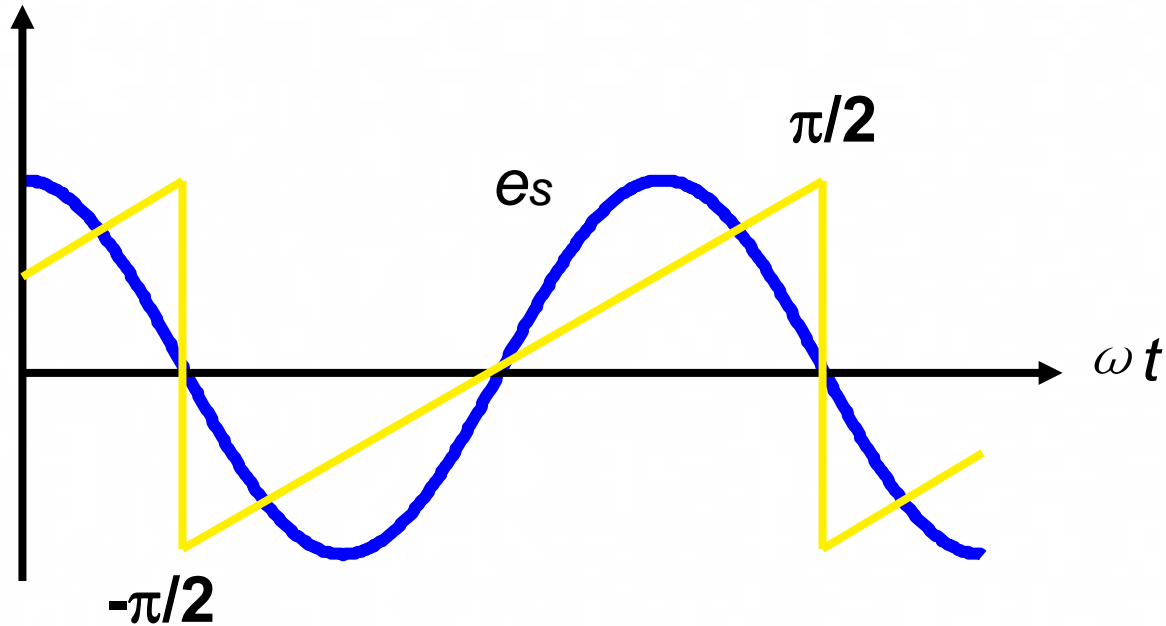
BLDC六步控制——汇总

- 相对来说，六步控制将产生更多的转矩脉动
- 相电流为方波
- 对控制器的处理能力要求不高
- 不需要检测换相点之间的转子位置
- 起动斜坡参数必须反映出反电势信号
- **BLDC比PMSM出力更大**

PMSM的无传感器FOC控制



PMSM的无传感器FOC控制

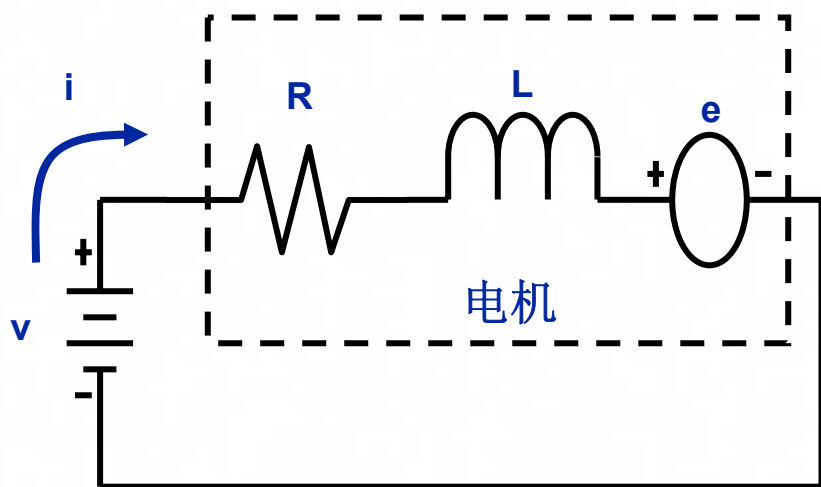


● 位置估计

- 转子位置通过反电势信息进行计算

PMSM的无传感器FOC控制

PMSM电气模型



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

$$\frac{d}{dt} i_s = -\frac{R}{L} i_s + \frac{1}{L} (v_s - e_s)$$

● 位置估计

- PMSM电机与有刷DC（BDC）、BLDC和AC感应电机具有相同的基本电气模型

PMSM的无传感器FOC控制

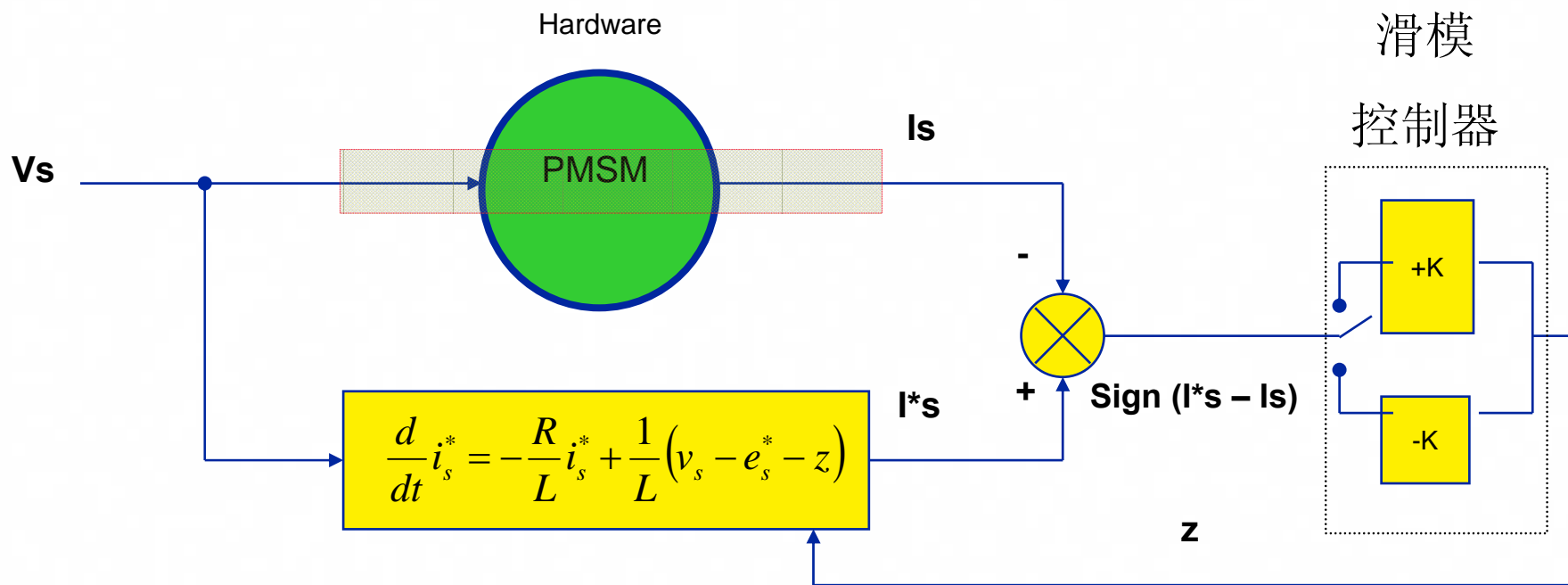
位置估计

$$\frac{i_s(n+1) - i_s(n)}{T_s} = -\frac{R}{L} \cdot i_s(n) + \frac{1}{L} \cdot (v_s(n) - e_s(n))$$

$$i_s(n+1) = \left(1 - T_s \cdot \frac{R}{L}\right) \cdot i_s(n) + \frac{T_s}{L} \cdot (v_s(n) - e_s(n))$$

PMSM的无传感器FOC控制

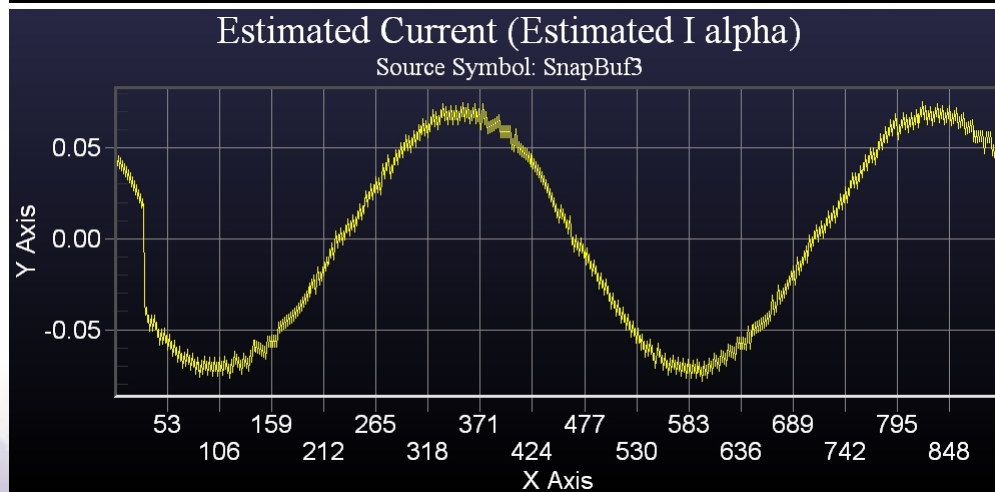
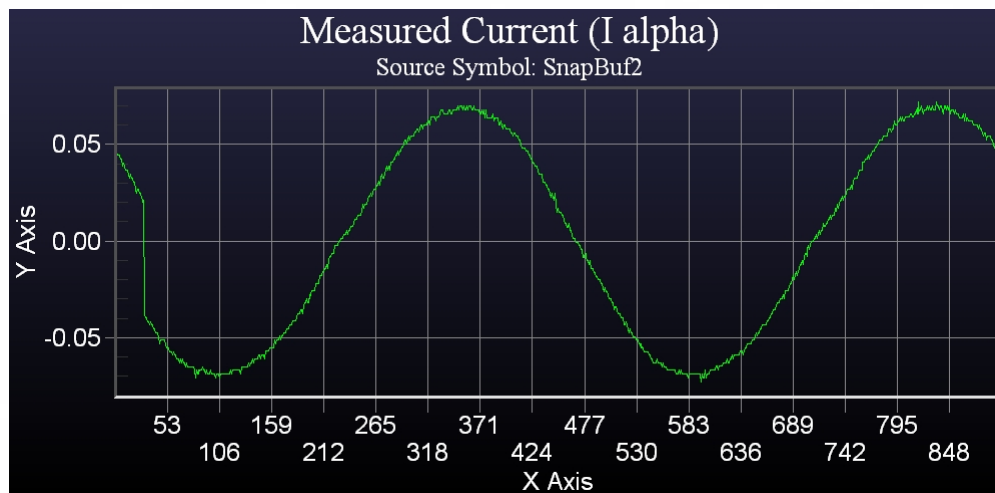
电流观测器



* 被估计变量

PMSM的无传感器FOC控制

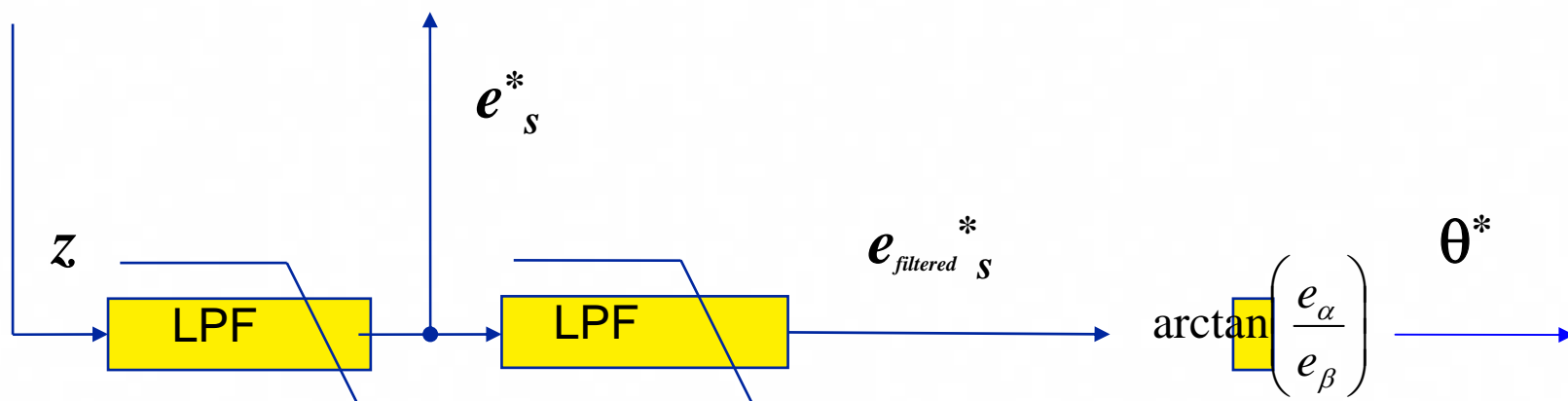
电流曲线图



PMSM的无传感器FOC控制

反电势估计

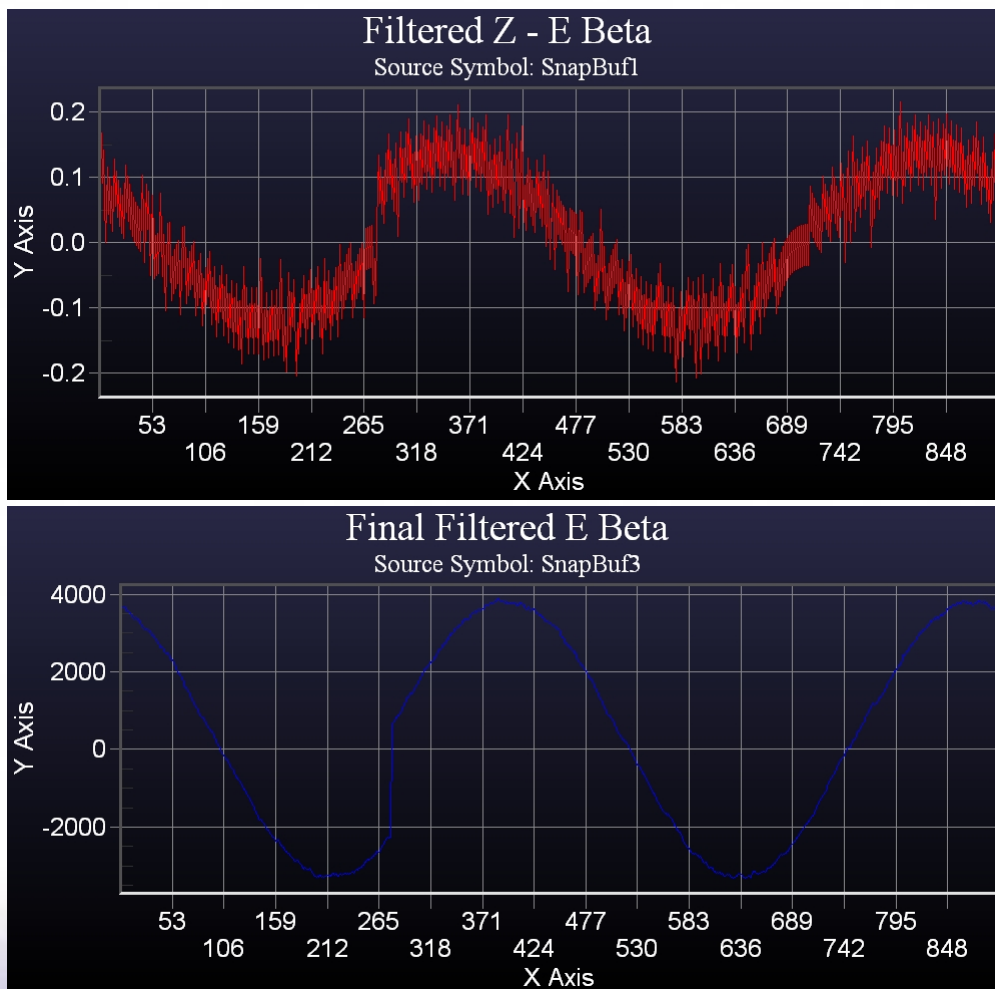
$$\frac{d}{dt}i_s^* = -\frac{R}{L}i_s^* + \frac{1}{L}(v_s - e_s^* - z)$$



*被估计变量

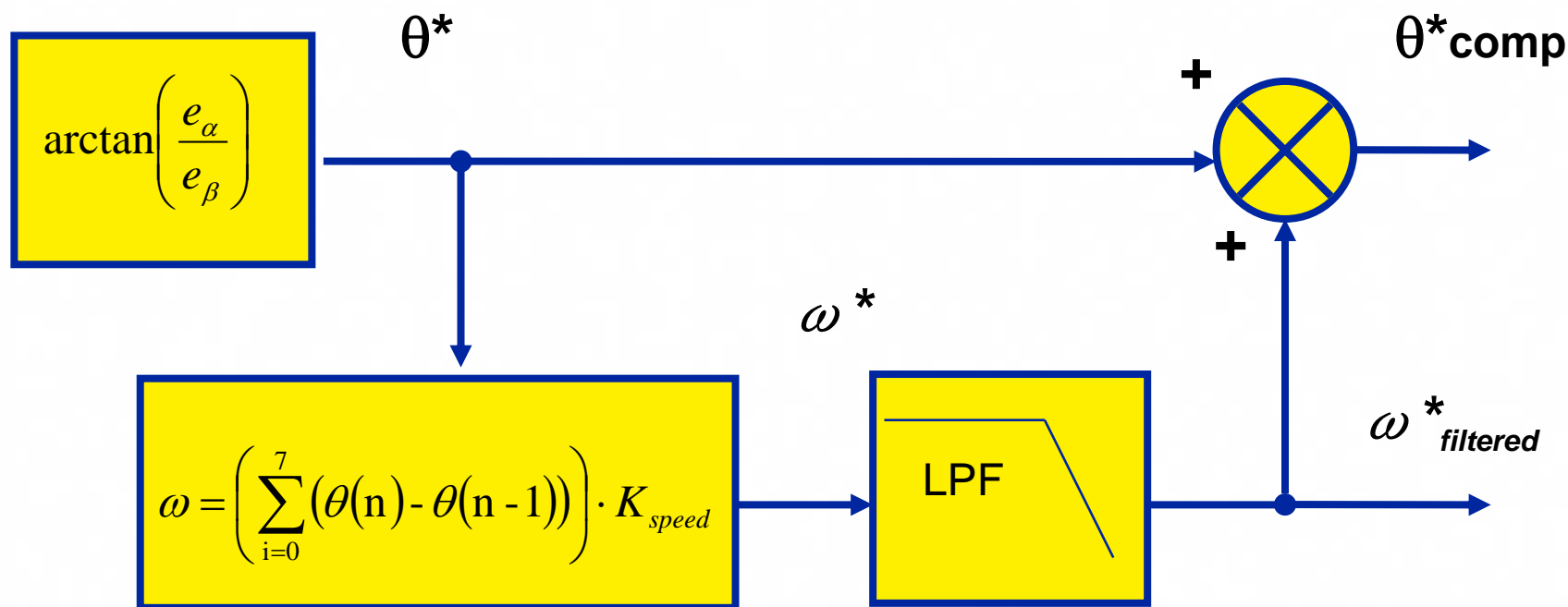
PMSM的无传感器FOC控制

反电势曲线图



PMSM的无传感器FOC控制

位置和速度估计



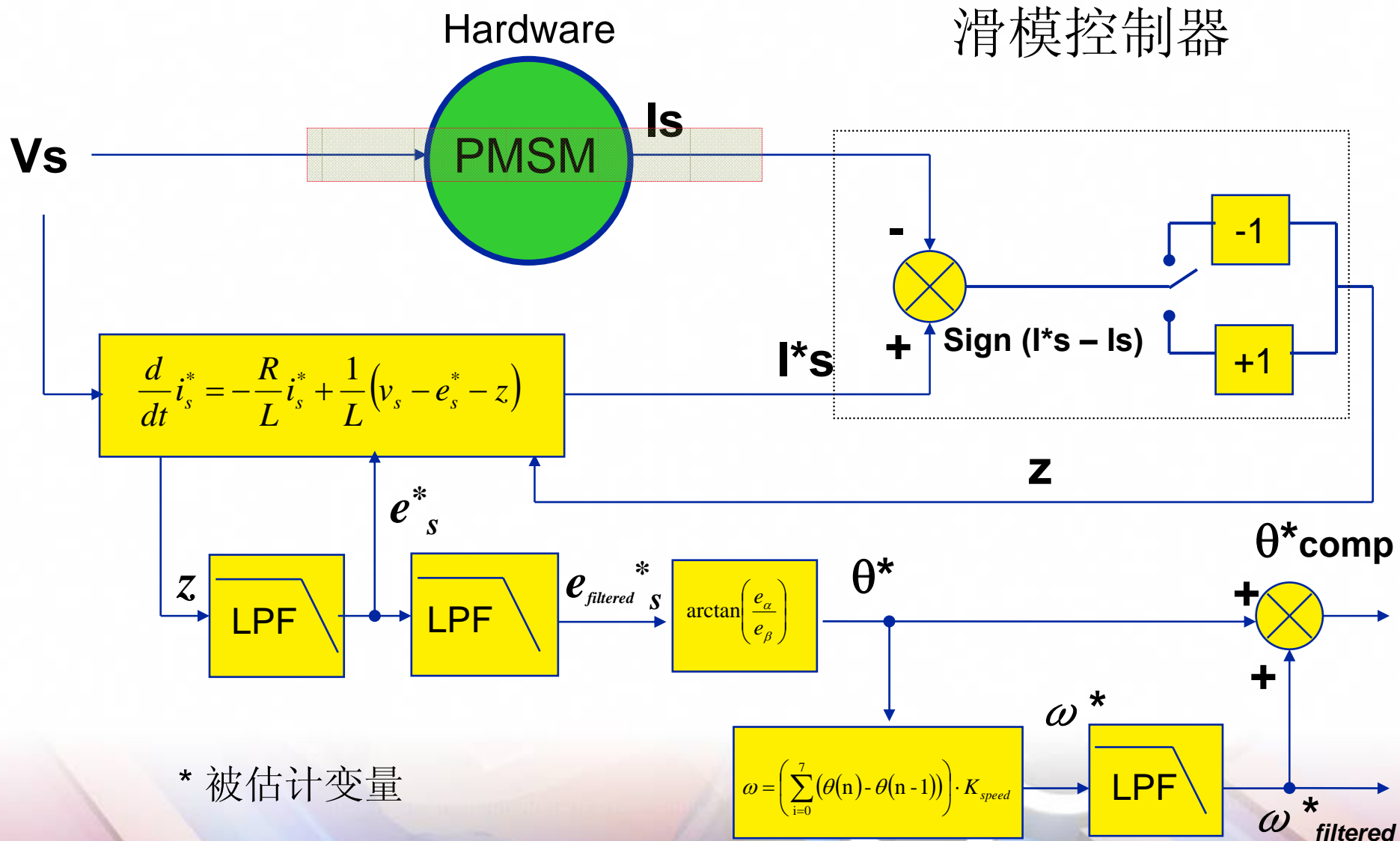
*被估计变量

PMSM的无传感器FOC控制

● 相位补偿

- 对内在位置滤波进行补偿
- 速度范围分为若干部分并对其中每一个部分进行补偿
- 提供了Excel电子表格计算器

PMSM的无传感器FOC控制

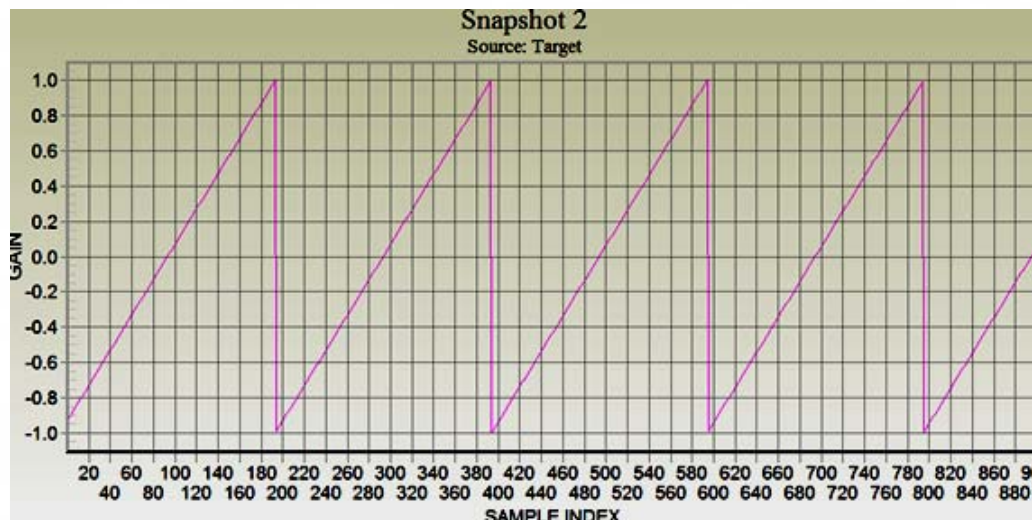


* 被估计变量

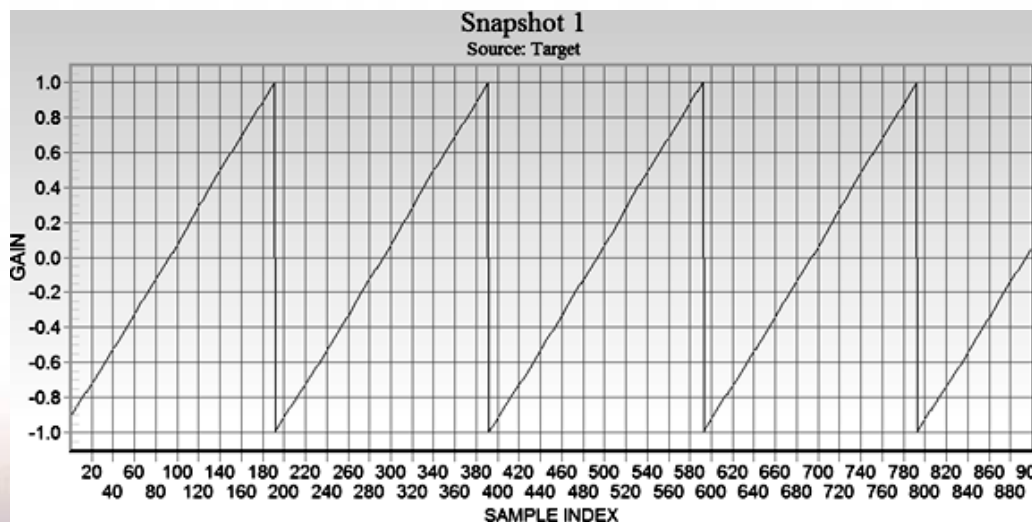
PMSM的无传感器FOC控制

实际结果

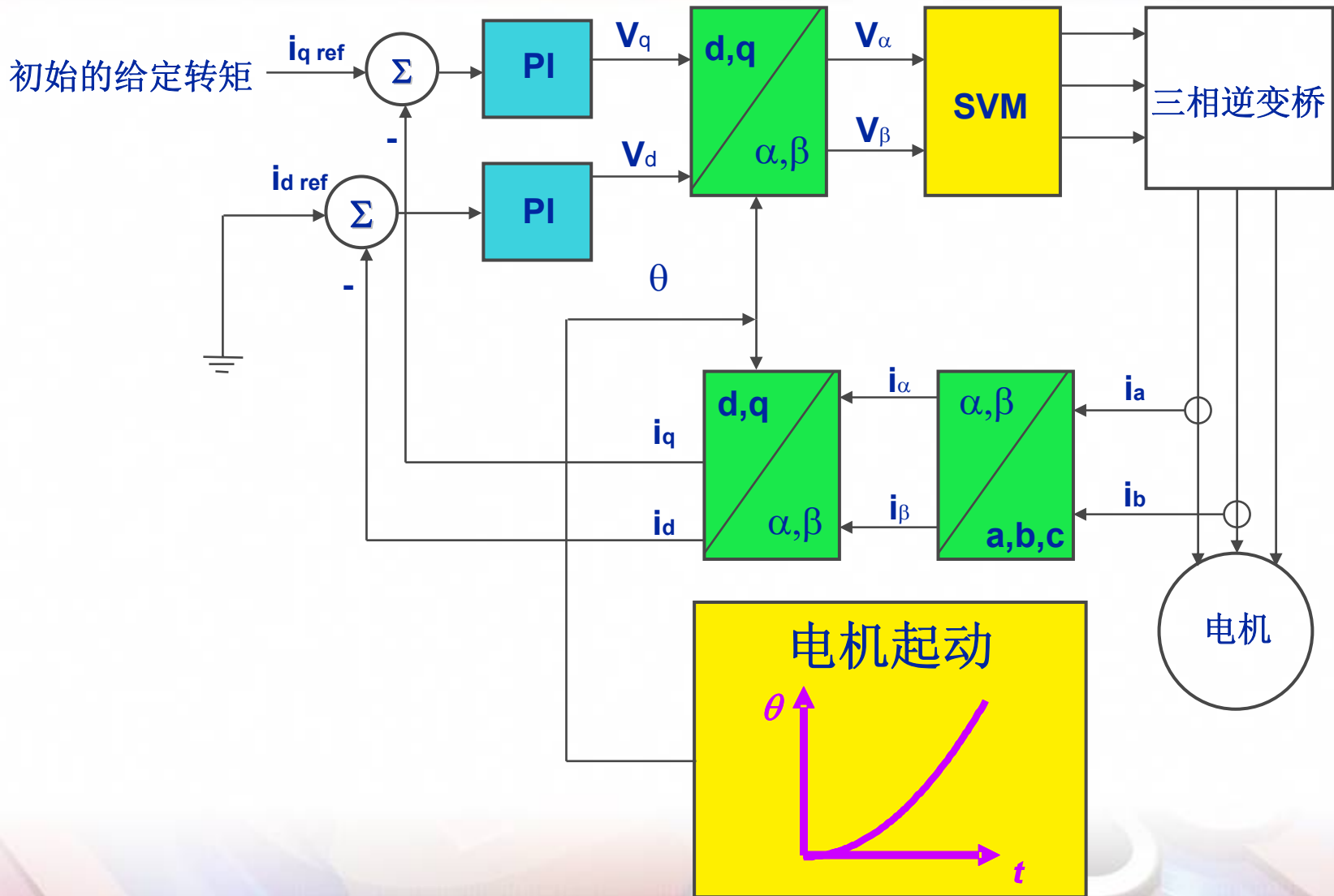
● 编码器转子位置



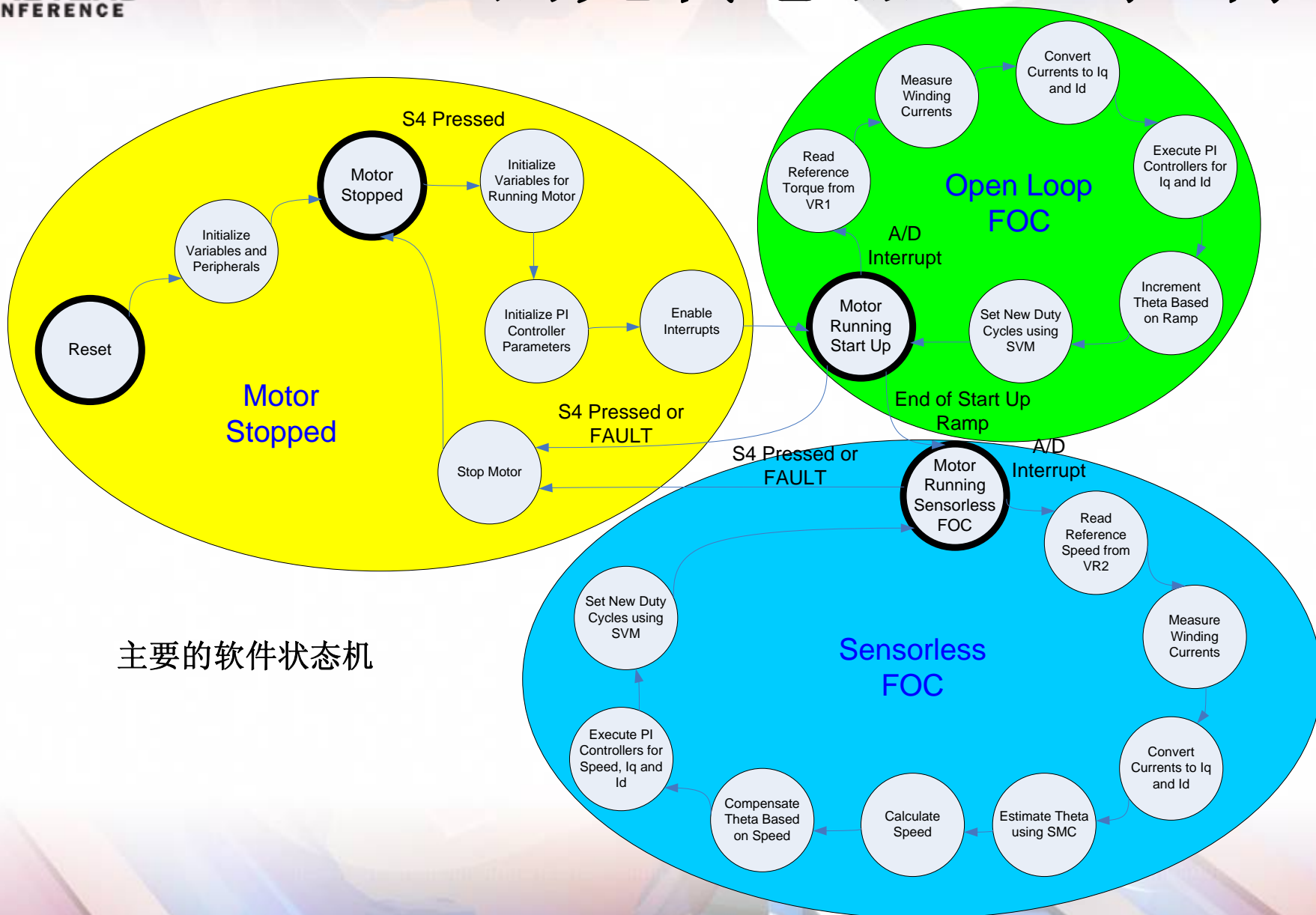
● 估计的转子位置



PMSM的无传感器FOC控制

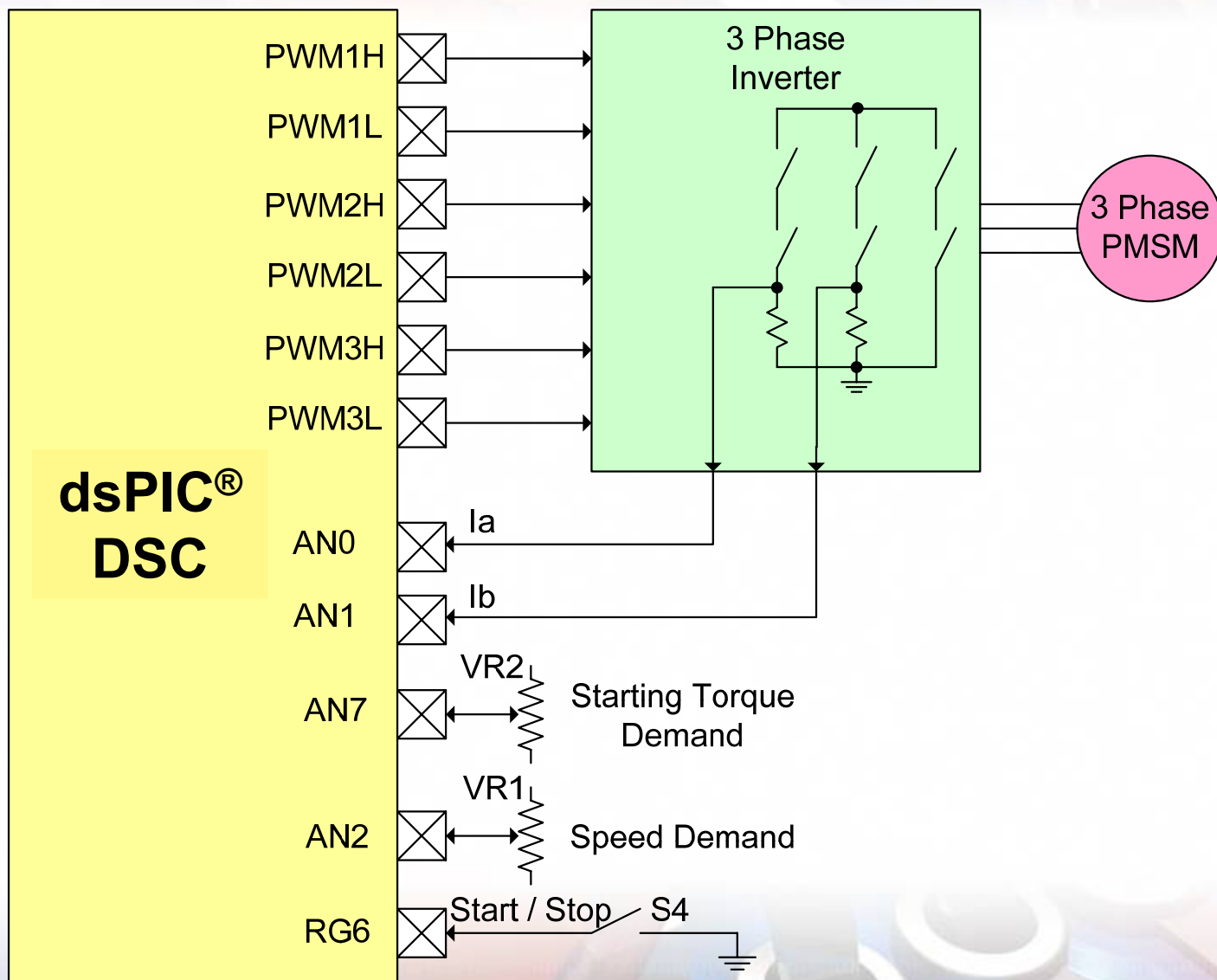


PMSM的无传感器FOC控制



主要的软件状态机

未增加额外成本



课程安排

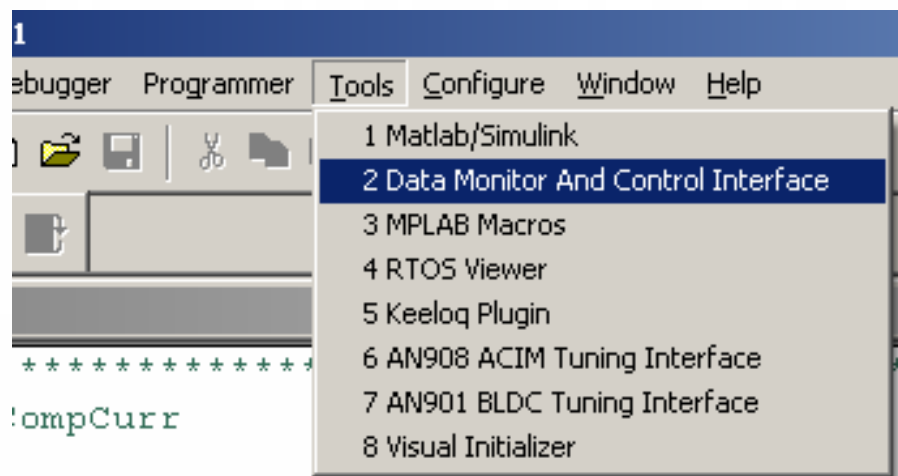
- PMSM概述
- PMSM的FOC控制
- 无传感器技术
- **DMCI介绍——一种有用的工具**
- 演示1： 整定PI参数
- 演示2： 整定无传感器控制参数
- 回顾，答疑（Q&A）



DMCI简介

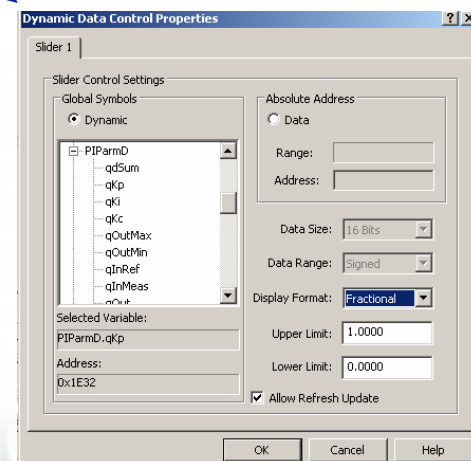
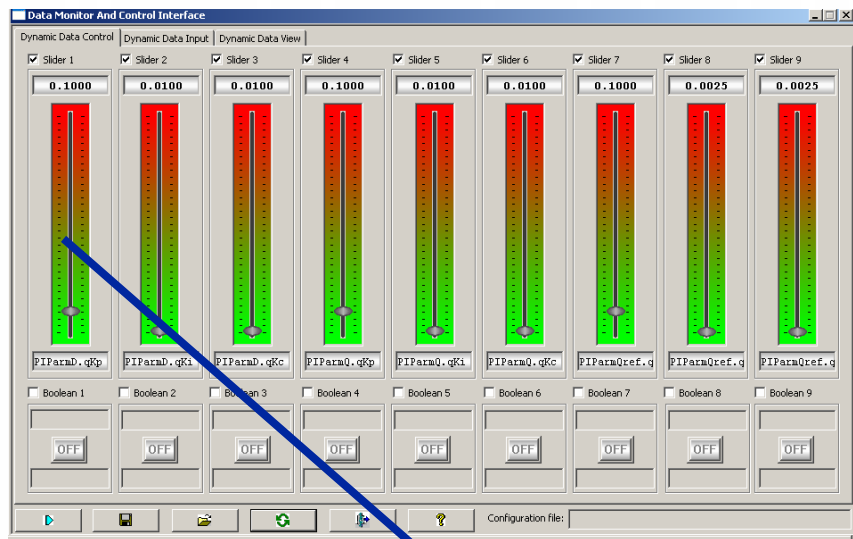
DMCI简介

- 数据监视和控制界面
- 智能观察窗口
- 9个滑动条
- 35个输入控制
- 4幅图表



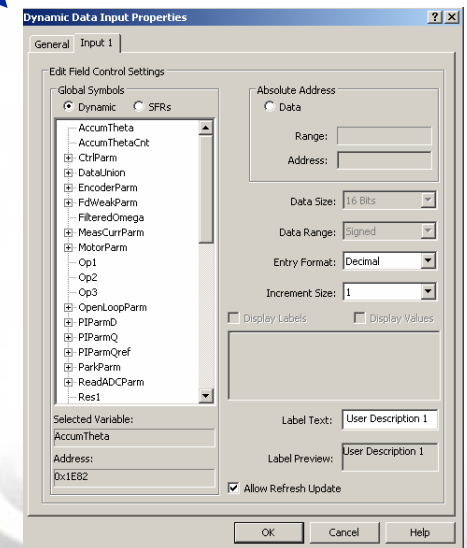
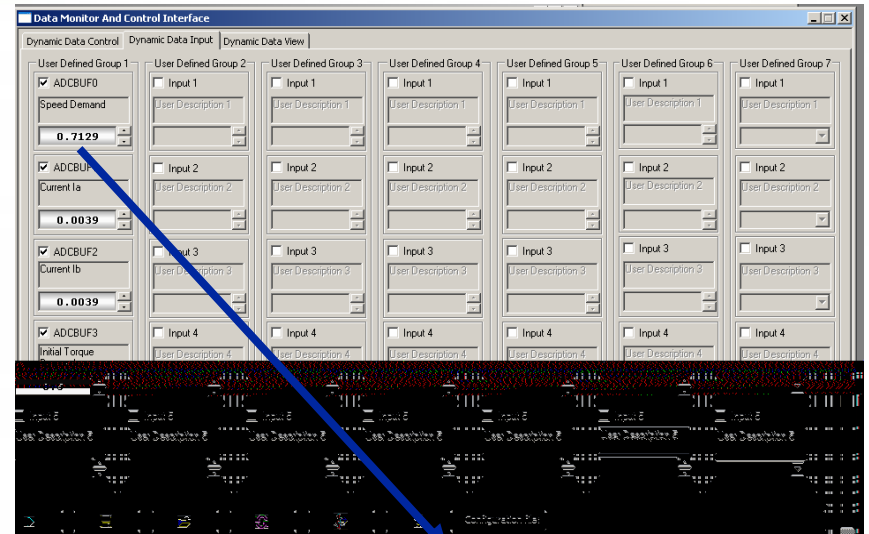
滑动条

- 分配控制变量
- 适合用于PID控制环整定
- 动态数据控制
- 9个布尔变量可用于标志表征



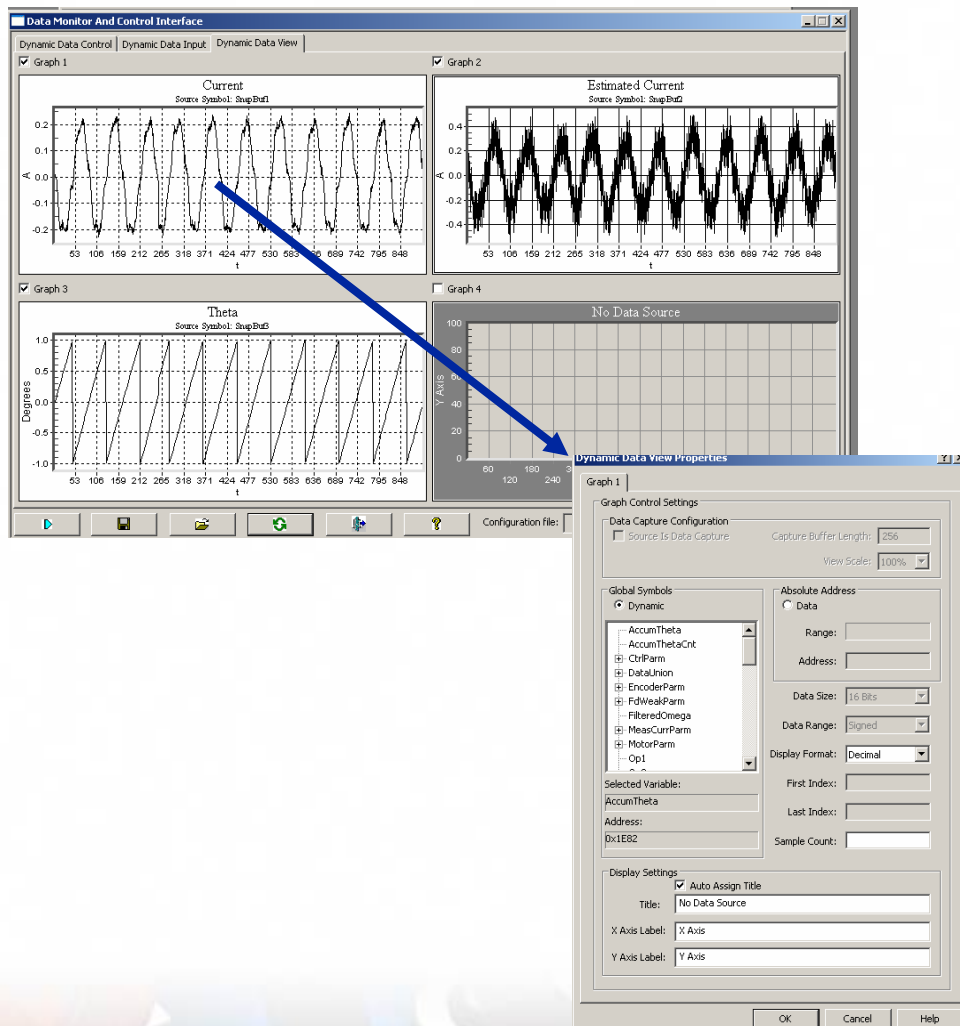
输入控制

- 文本框类型
- 可配置增量
- 动态数据输入
- 十六进制 (Hex)、小数、分数和枚举列表 (Enum List) 数据类型



图表

- 多达4幅曲线图表
- 特性包括
 - 视图缩小/放大
 - 标示数据点
 - 打印
 - 导出为数据
- 动态数据视图



课程安排

- PMSM概述
- PMSM的FOC控制
- 无传感器技术
- DMCI介绍——一种有用的工具
- 演示1： 整定PI参数
- 演示2： 整定无传感器控制参数
- 回顾，答疑（Q&A）



YOU + MICROCHIP ENGINEERING THE FUTURE TOGETHER

演示1 整定 PI参数

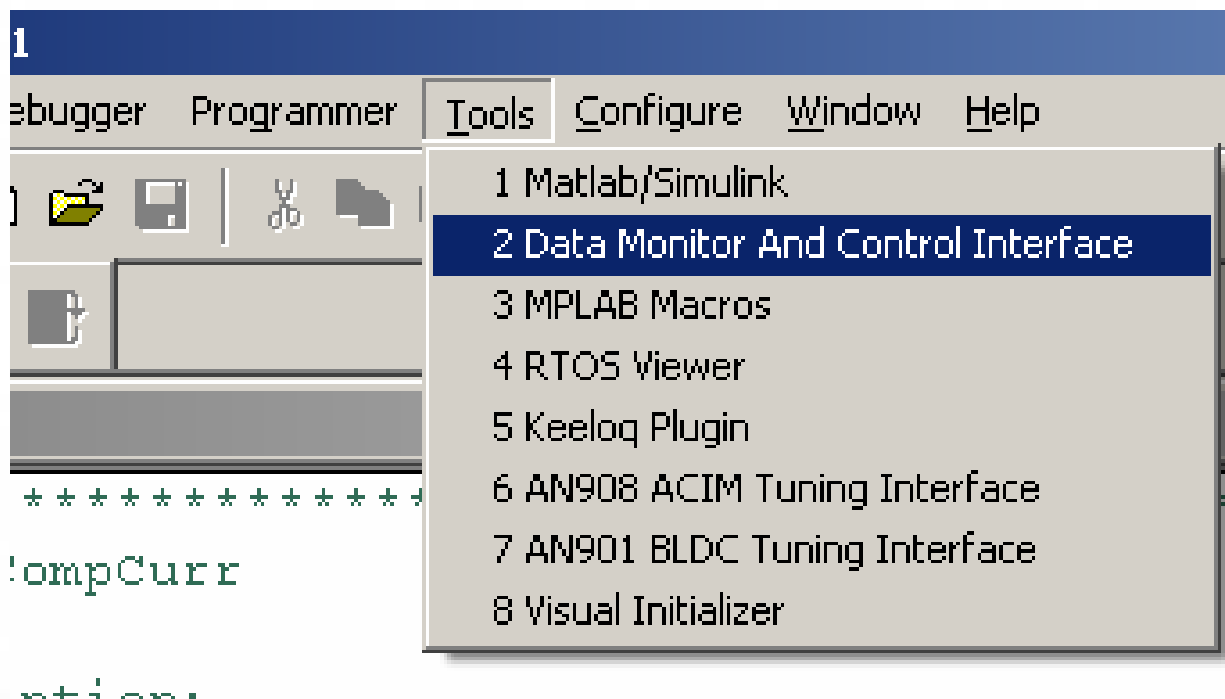
演示1的主要内容

- 整定电流和速度PI参数
- 使用DMCI工具中的滑动条

演示1

- 演示1的步骤说明:

- 在 MPLAB[®] IDE中, 打开DMCI, 选择“Tools -> Data Monitor And Control Interface”

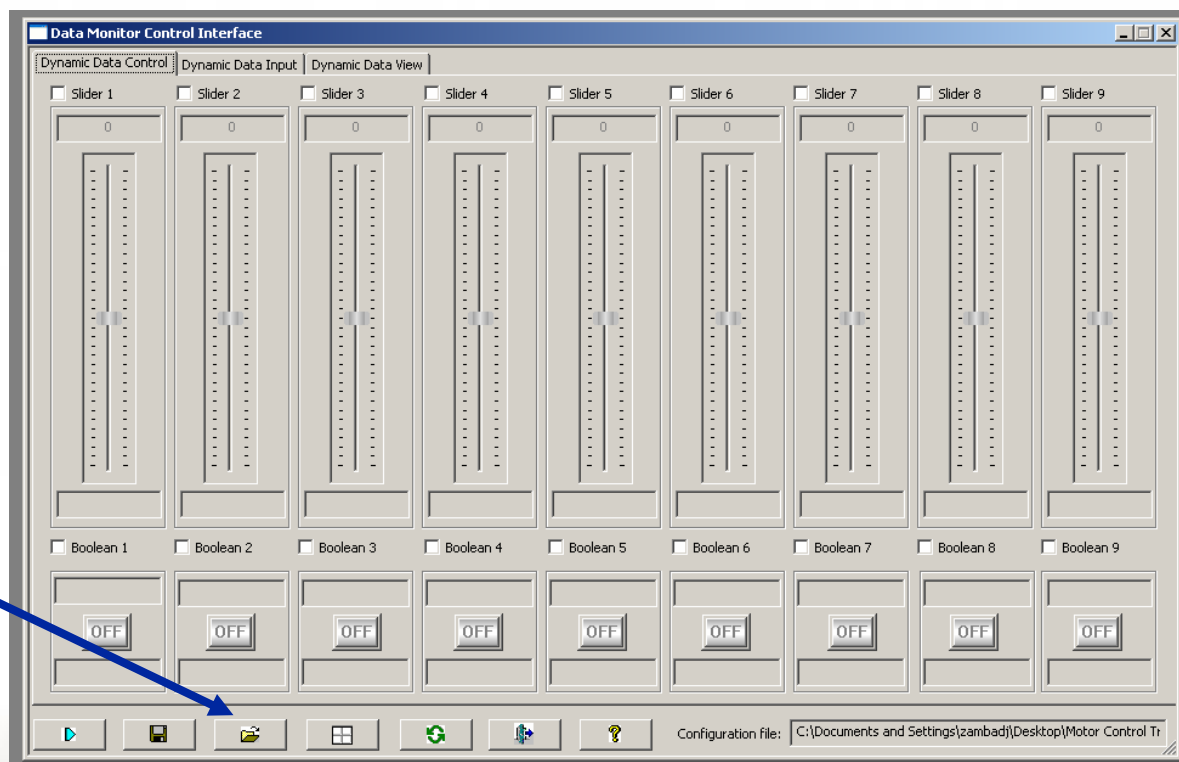


演示1

- 演示1的步骤说明:

- 在DMCI中，点按Open图标，并选择：“Demo 1\Demo1.dmci”文件

Demo 1.dmci

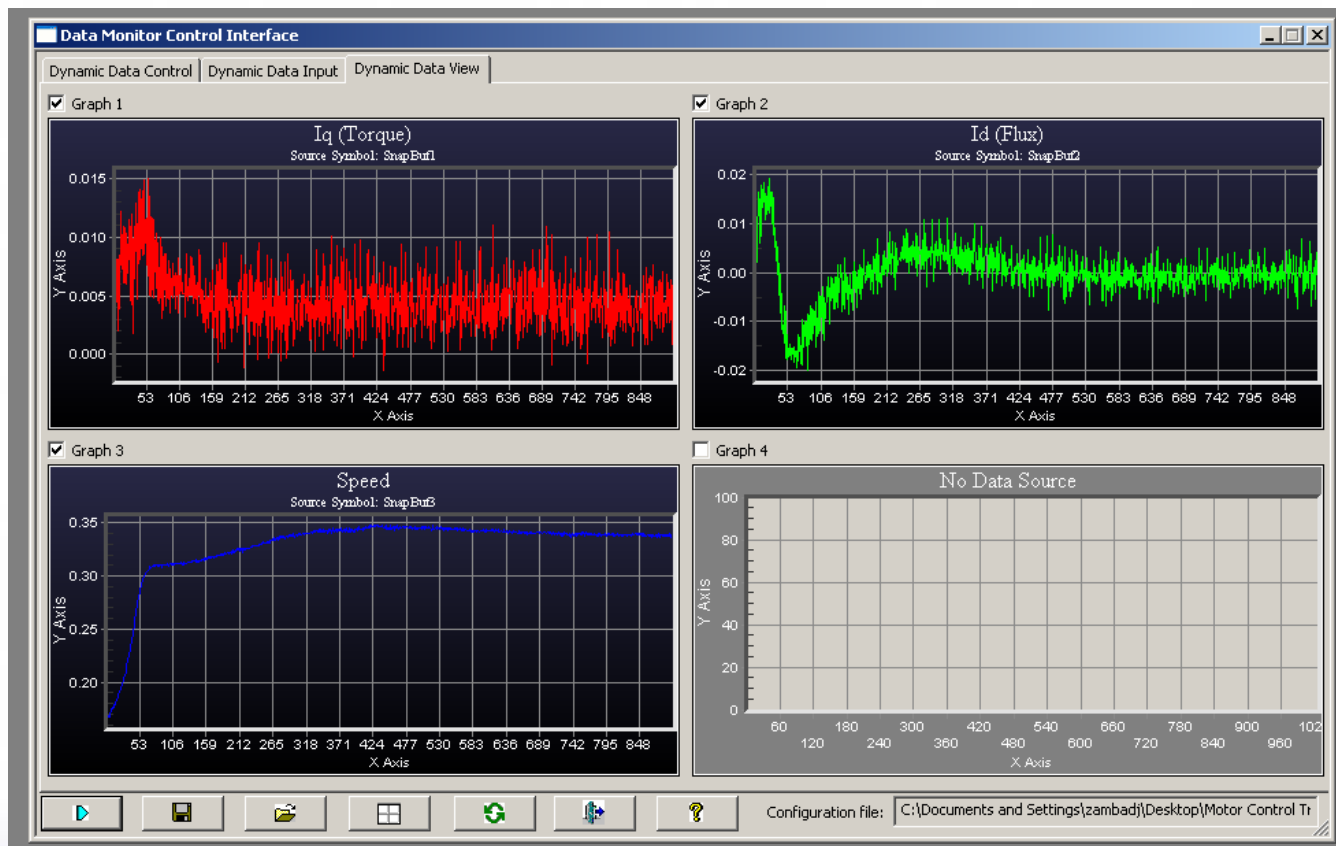


演示1（续）

- 演示1的步骤说明（续）：
 - 打开Lab3项目
 - 编程dsPIC[®] DSC
 - 设置**POT1**为“←”位置
 - 点按**S2**使电机运行
 - 通过按下**S3**使参考速度加倍
 - 通过曲线图表分析瞬态响应
 - 整定速度**PI**参数减少超调
 - 整定**Iq** **PI**参数使得速度振荡最小

演示1结果

- PI整定
- DMCI工具中滑动条的使用



课程安排

- PMSM概述
- PMSM的FOC控制
- 无传感器技术
- DMCI介绍——一种有用的工具
- 演示1： 整定PI参数
- 演示2： 整定无传感器控制参数
- 回顾，答疑（Q&A）



YOU + MICROCHIP

ENGINEERING THE FUTURE TOGETHER

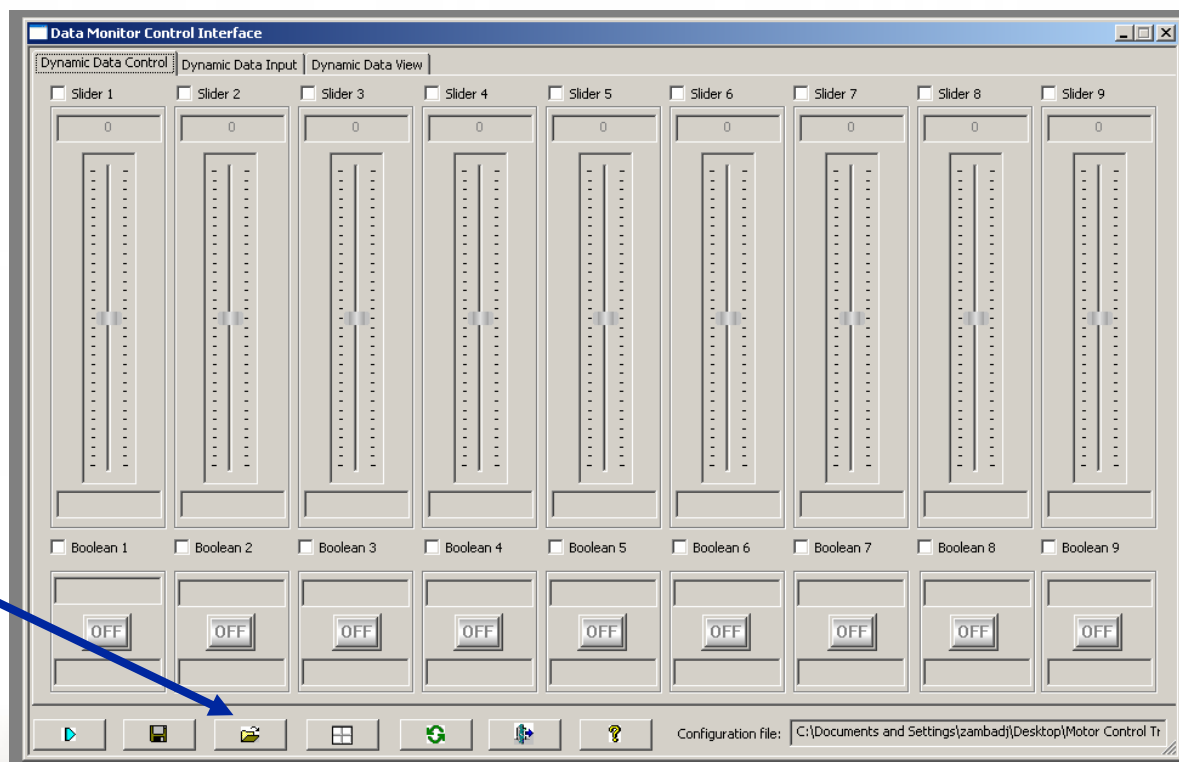
演示2 整定无传感器控制 参数

演示2

- 演示2的步骤说明:

- 在DMCI中，点击Open图标，并选择：“Demo2\Demo2.dmci” 文件

Demo2.dmci



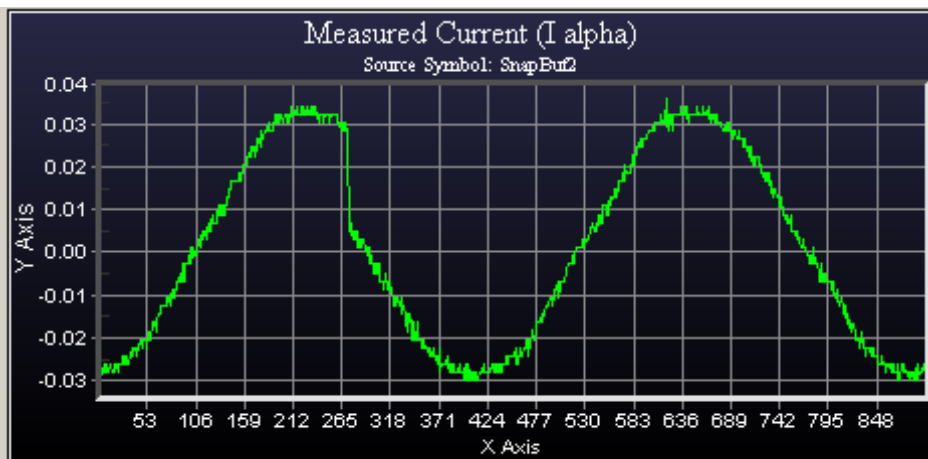
演示2（续）

- 演示2的步骤指令（续）：
 - 打开 Lab4项目
 - 编程dsPIC[®] DSC
 - 点按S2运行电机
 - 电机将不会转变到闭环方式
 - 暂停并分析曲线图表
 - 将K滑动条设置为.9. 运行并分析
 - 将K滑动条设置为.1.运行并分析
 - 通过滑动条来改变最终速度
 - 被估计电流会发生什么情况？
 - Theta会发生什么情况？

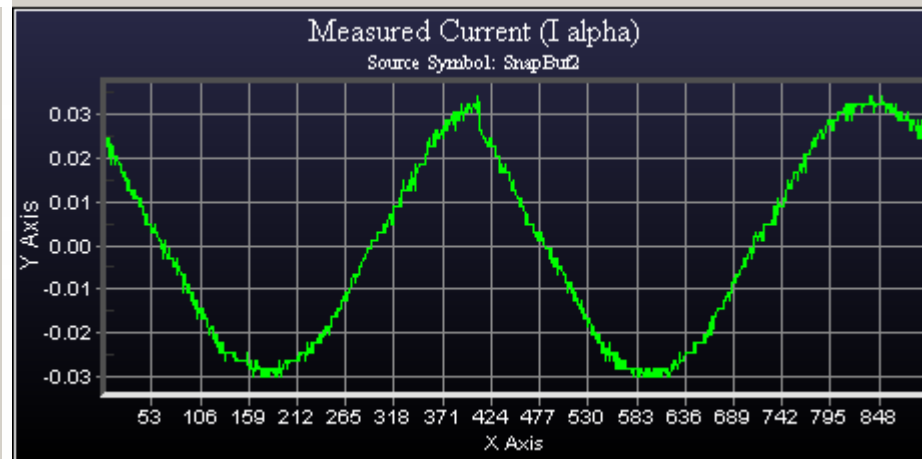
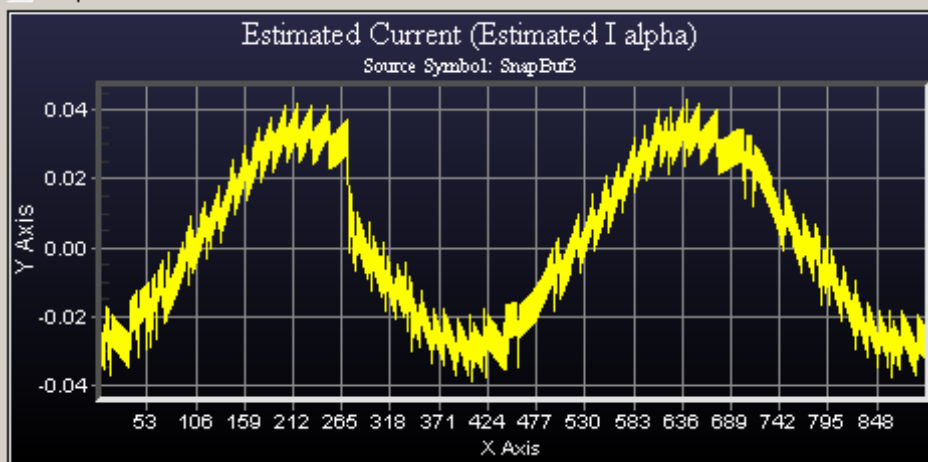
演示2

K滑动条 = 0.9 / 500 RPM

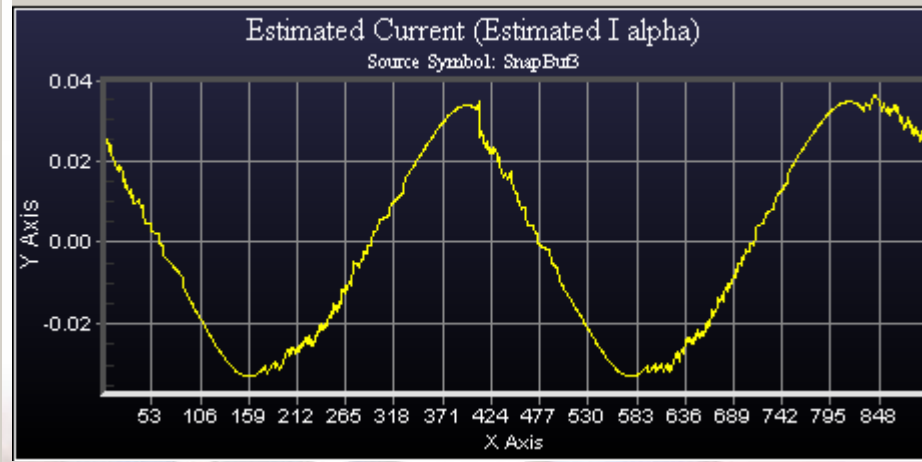
K滑动条 = 0.1 / 500 RPM



☒ Graph 4

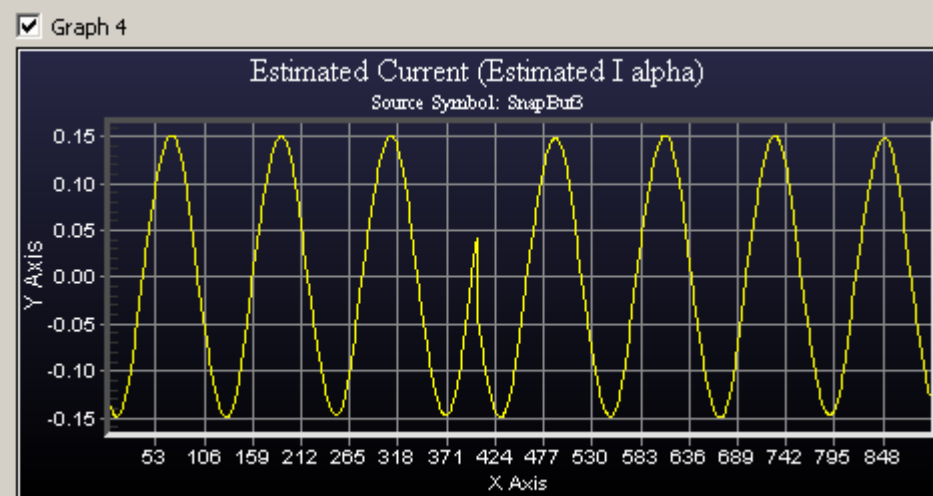
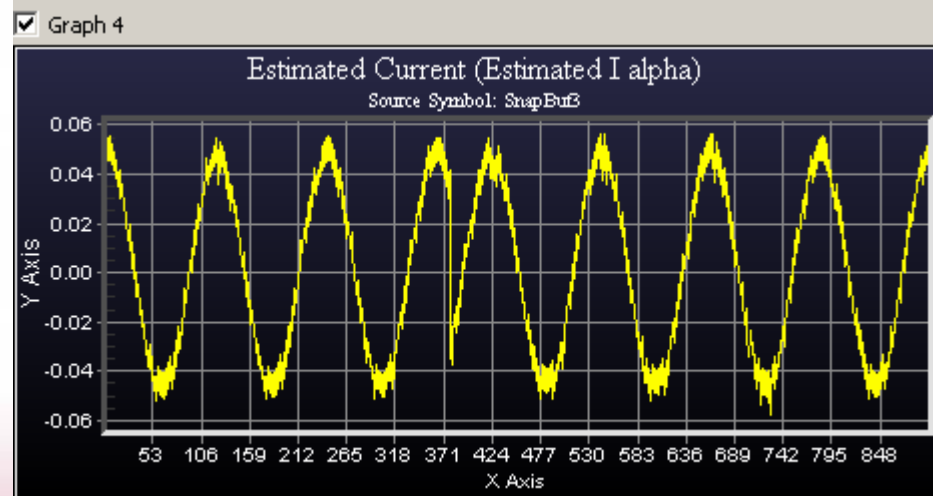
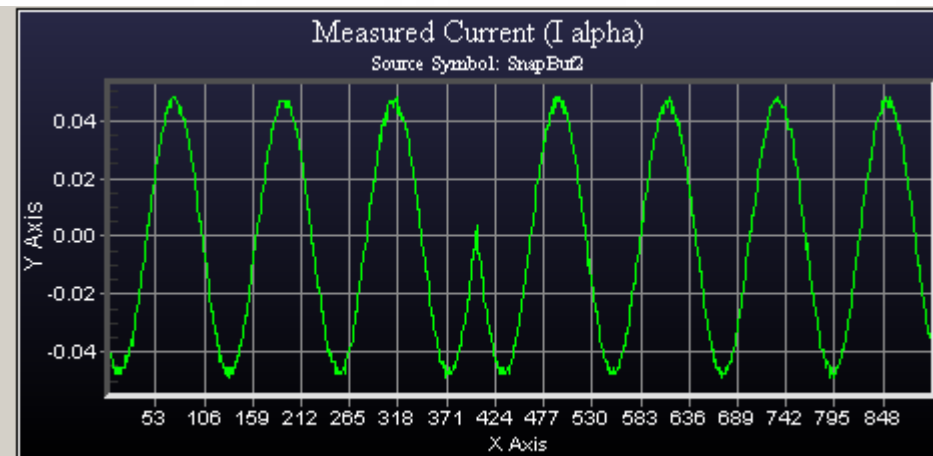
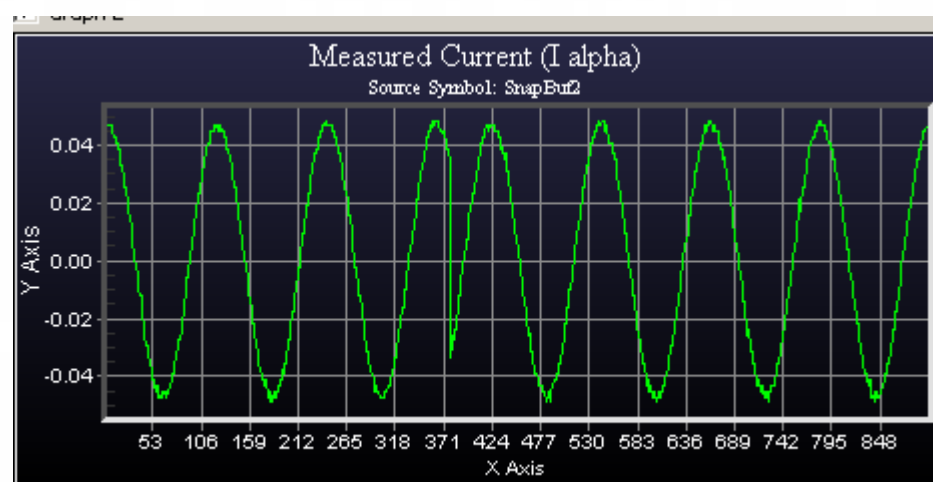


☒ Graph 4



演示2

K滑动条 = 0.9 / 2000 RPM K滑动条 = 0.1 / 2000 RPM



演示2结果

- **K**滑动条整定。滑动条模式控制器增益应足够高以跟踪被测电流。
- 增益应足够低以保持**Theta**尽量准确。
- 电流估计值和测量值应在同一数量级。
- 最终速度应足够高以获得准确的**Theta**。

课程安排

- PMSM概述
- PMSM的FOC控制
- 无传感器技术
- DMCI介绍——一种有用的工具
- 演示1： 整定PI参数
- 演示2： 整定无传感器控制参数
- 回顾，答疑（**Q&A**）

课程内容

- 回顾，Q&A
 - 汇总
 - 课程中使用的开发工具
 - 资源

总结

● PMSM

- 高效率和平滑的转矩输出是很有利的

● FOC

- 可提供最优的转矩控制性能
- 可在有或无位置传感器条件下使用
- 可应用于ACIM

本课程中使用的开发工具

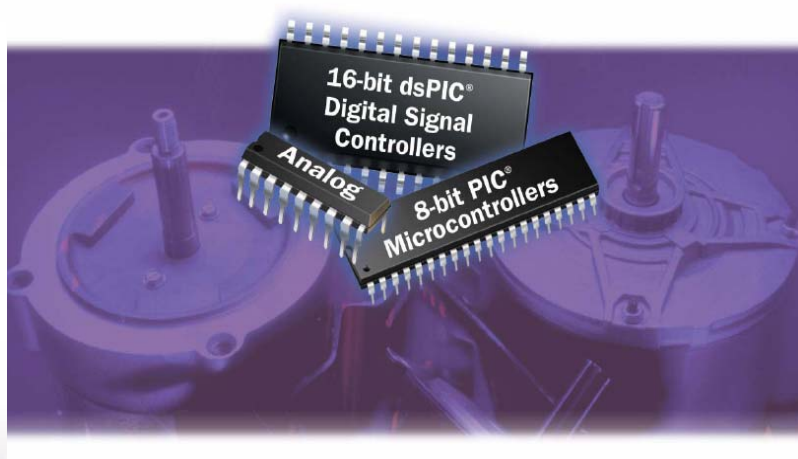
- **dsPICDEM™ MCLV**电机控制开发板（**DM300021**）
- 三相**BLDC**低压电机**24V**（**AC300020**）
- **MPLAB® ICD 2**在线调试器/编程器（**DV164005**）

资源

- 关于电机控制应用设计方面的资源和信息，请访问**Microchip**电机控制设计中心网址：www.microchip.com/motor
- **Microchip**提供的关于电机控制应用方面的应用笔记：

PIC18CXXX/PIC16CXXX Servomotor	AN696
Brushless DC Motor Control Made Easy	AN857
Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals	AN885
Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31	AN899
Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control	AN901
Using the dsPIC30F for Vector Control of an ACIM	AN908
Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010	AN957
Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control	AN970
An Introduction to ACIM Control Using the dsPIC30F	AN984
Sensorless BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010	AN992
Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F	AN1017
Sensorless Control of PMSM Motors	AN1078
Sensorless BLDC Control with Back EMF Filtering	AN1083
Sensorless Filtered BEMF with Majority Detect	AN1160
Sensorless Field Oriented Control of ACIM	AN1162
Sensorless BLDC Motor Control with PIC16	AN1175
Getting started with the BLDC Motors and dsPIC30F	GS001
Measuring speed and position with the QE1 Module	GS002
Driving ACIM with the dsPIC [®] DSC MCPWM Module	GS004
Using the dsPIC30F Sensorless Motor Tuning Interface	GS005

- 参见最新的电机控制设计解决方案小册子



谢谢

商标

- Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Accuron、dsPIC、KeeLoq、KeeLoq徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、rfPIC 和SmartShunt均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的注册商标。
- FilterLab、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL、SmartSensor和The Embedded Control Solutions Company 均为Microchip Technology Inc.在美国的注册商标。
- Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、In-Circuit Serial Programming、ICSP、ICEPIC、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、PICkit、PICDEM、PICDEM.net、PICtail、PIC32徽标、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、Total Endurance、UNI/O、WiperLock和ZENA均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的商标。
- SQTP是Microchip Technology Inc.在美国的服务标记。
- 在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。
- © 2008, Microchip Technology Inc.版权所有。