



# 新唐 M451 无感 FOC 方案

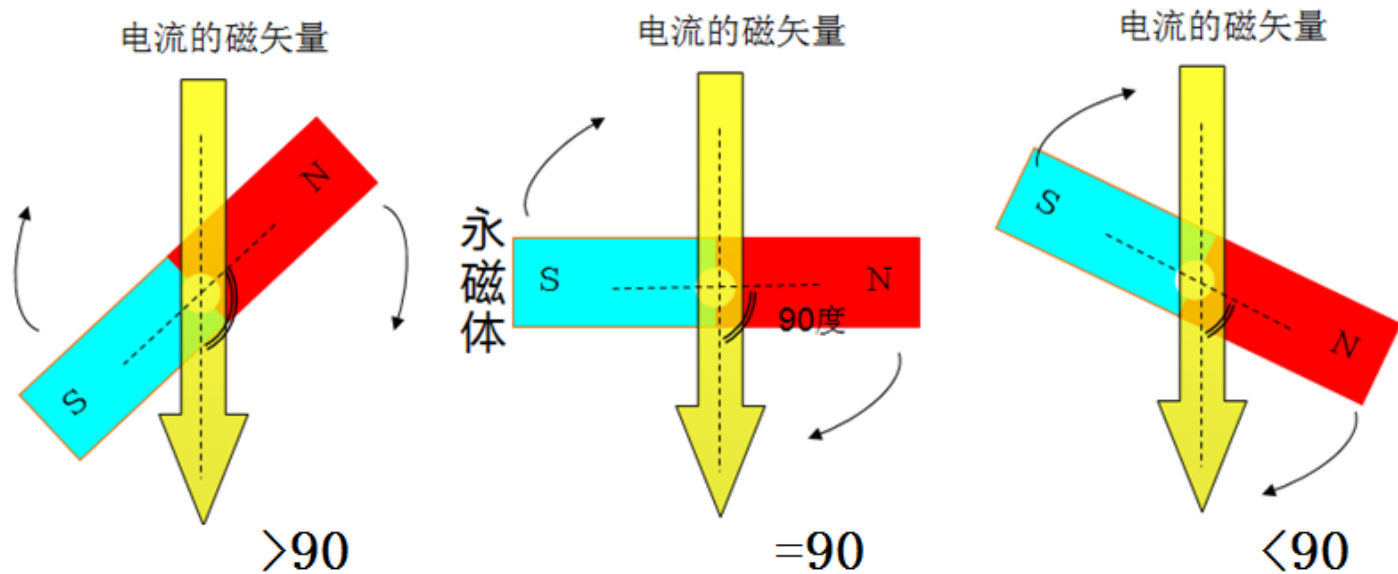
[www.nuvoton.com](http://www.nuvoton.com)



# nuvoTon

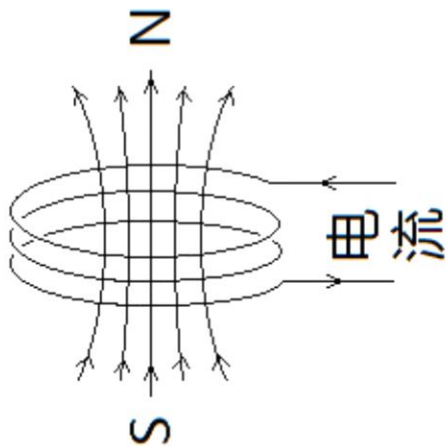
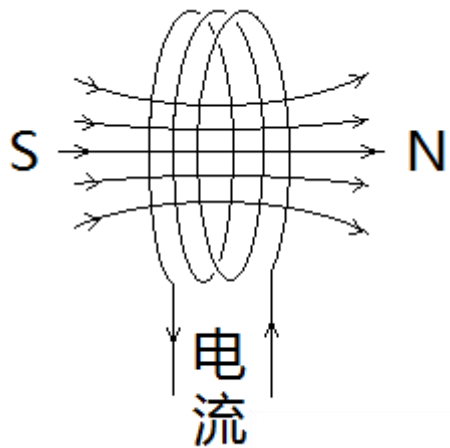
- ◆ 线圈、电感、或电机基础
- ◆ 电流向量的计算
- ◆ FOC控制总体框图
- ◆ 磁体位置观测器
- ◆ **新唐M451**系列适于电机控制的特性
- ◆ 硬件简介
- ◆ 代码简介

很多电机最佳工作状态是：无论永磁体转到哪个位置，电流磁场总是与其保持 90 度夹角  
引出两个关键问题：1>永磁体在什么位置？ 2>怎么控制电流磁场在磁铁前90度位置？

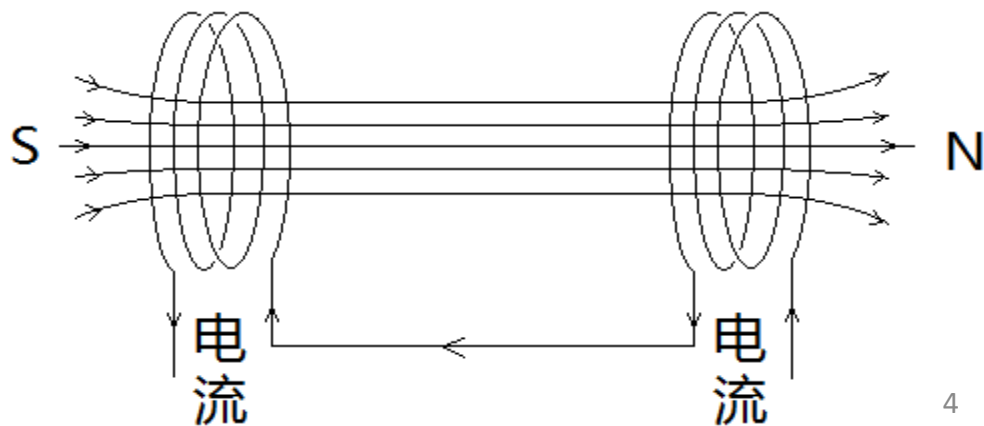


FOC控制，就是控制电流磁场方向，总是超前永磁体90度，引领永磁体旋转

# 预备知识：先看单个线圈



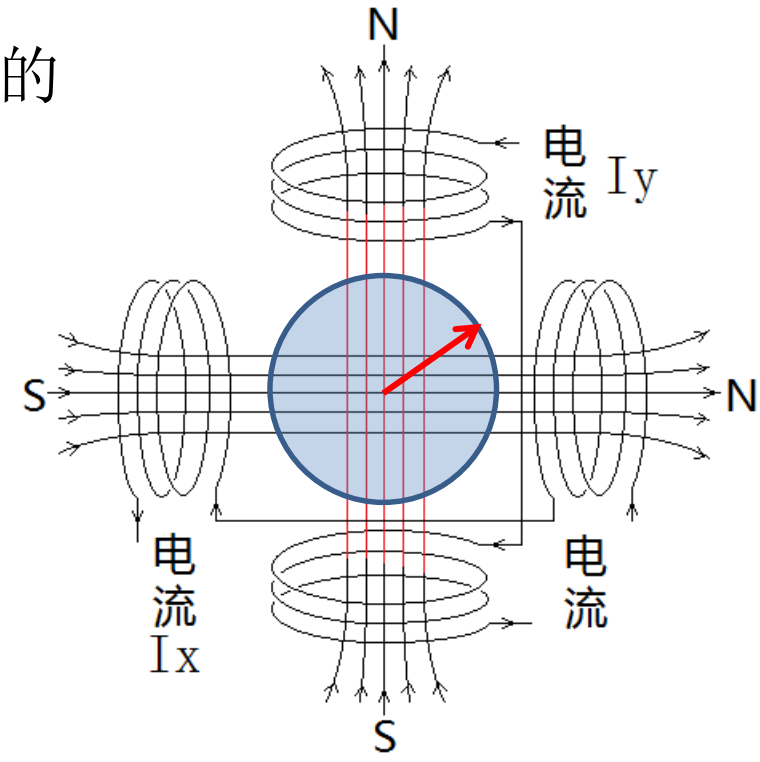
- ◆ 磁感应强度 $B$ 乘区域面积 $S$ , 叫磁通量:  $\phi = BS$
- ◆ 电感 $L$ 乘电流 $I$ , 叫磁链 $\psi$ ,  $N$ 匝线圈磁链公式:  
$$\psi = N\phi = LI = NBS$$
- ◆ 线圈中心的磁场, 空间方向垂直于线圈平面



# 预备知识:水平垂直线圈的组合

◆ 中间区域磁链, 是水平磁链与垂直磁链的  
矢量合成:

$$\psi = \psi_x + j\psi_y = L_x I_x + jL_y I_y$$



# 预备知识:线圈的电压电流关系式

◆ 线圈的电压V与电流I关系式为  $V = RI + L \frac{dI}{dt}$

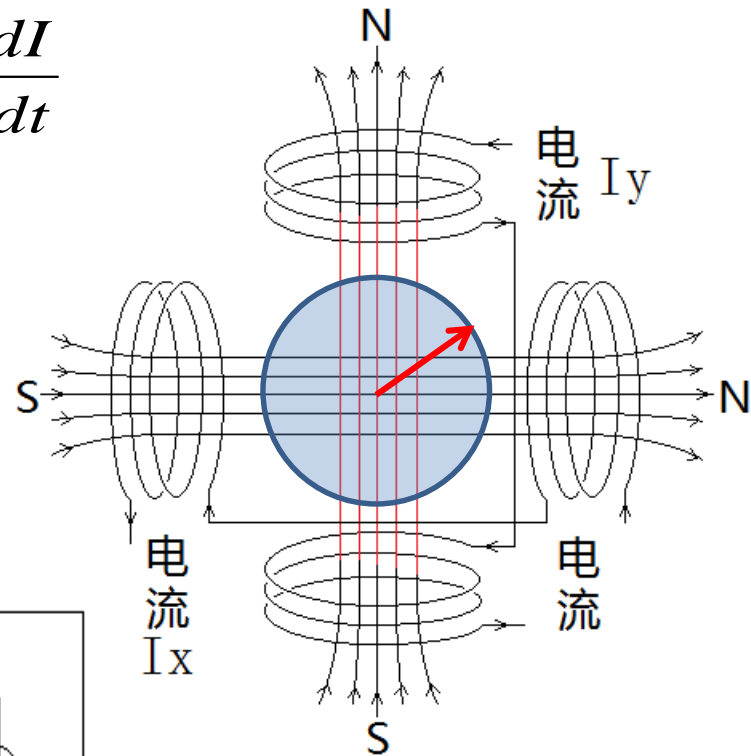
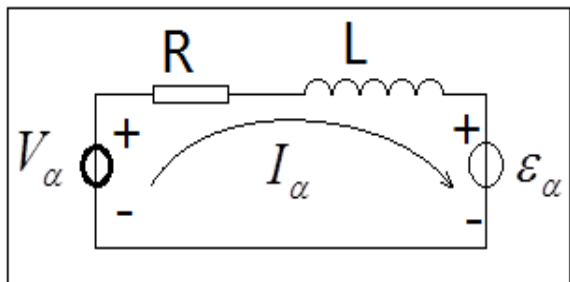
◆ 线圈周围若有运动的磁铁,线圈中还会产生感应电压  $\epsilon$ , 公式变为

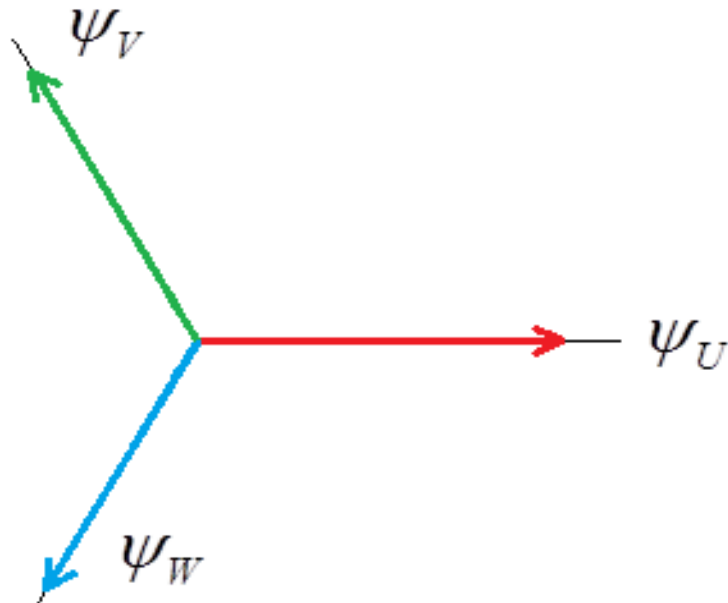
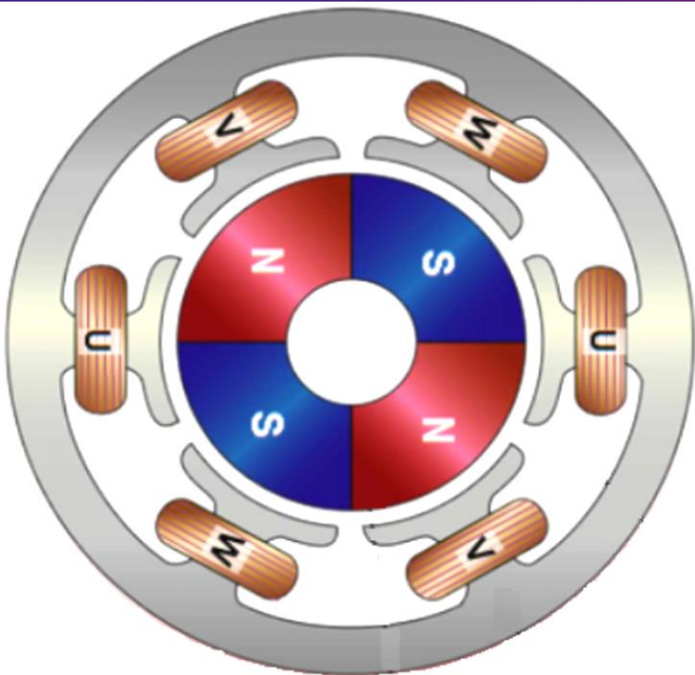
$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + \epsilon$$

◆ 垂直的俩线圈不会相互感应  
电压电流关系式各自独立

$$V_x = R_x I_x + L_x \frac{dI_x}{dt} + \epsilon_x$$

$$V_y = R_y I_y + L_y \frac{dI_y}{dt} + \epsilon_y$$





中间区域合成磁链矢量为下式，三相电感相等时，计算电流向量就可以

$$\psi = \psi_U + \psi_V e^{j120} + \psi_W e^{j240} = L(I_U + I_V e^{j120} + I_W e^{j240})$$

# 三组线圈等效成两组线圈

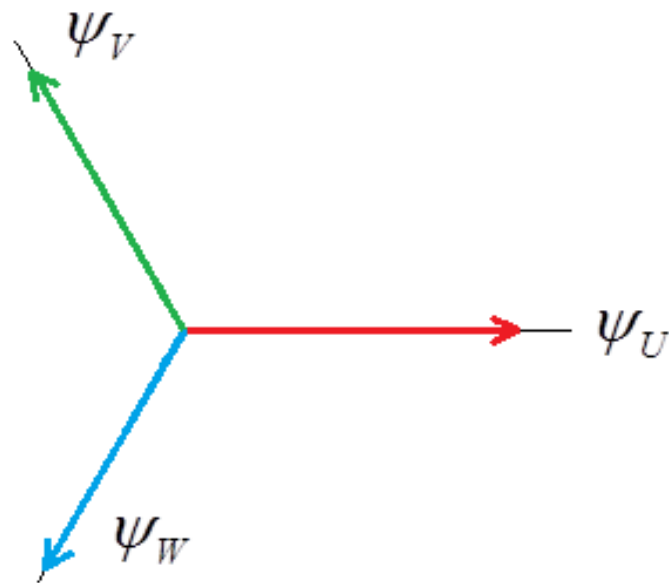
◆ 三相电感相等时，磁链合成，计算电流向量就可以

$$I = I_U + I_V (\cos 120 + j \sin 120) + I_W (\cos 240 + j \sin 240)$$

$$I = (I_U - \frac{1}{2} I_V - \frac{1}{2} I_W) + j(\frac{\sqrt{3}}{2} I_V - \frac{\sqrt{3}}{2} I_W) = I_x + j I_y$$

任一时刻，电流向量都可按上式算出实部和虚部

三相电机就可等效为**水平和垂直俩线圈**的电机



三相电机等效成水平垂直  
**两组线圈电机**就是  
Clark变换或 3S/2S变换

$$\begin{cases} I_x = I_U - \frac{1}{2} I_V - \frac{1}{2} I_W \\ I_y = \frac{\sqrt{3}}{2} I_V - \frac{\sqrt{3}}{2} I_W \end{cases}$$



# 水平垂直两组线圈的电机

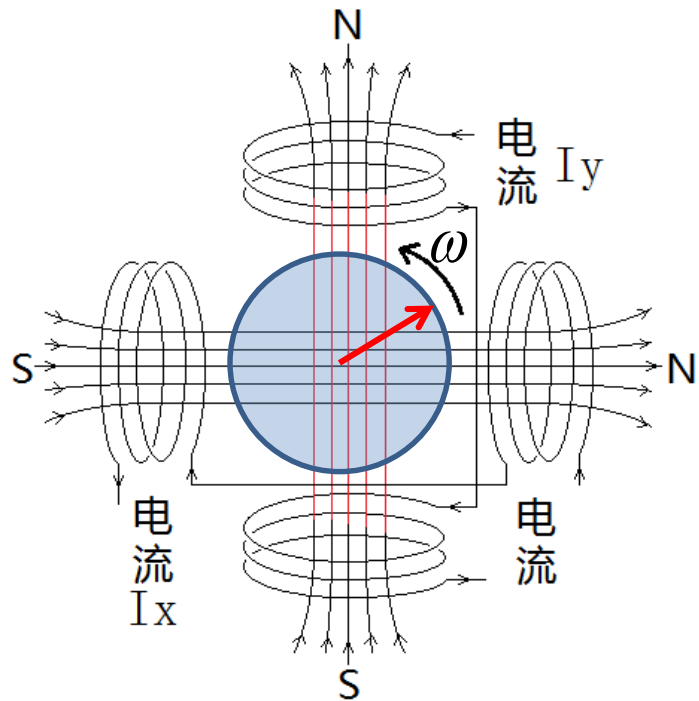
◆ 俩线圈电流，若一个正弦一个余弦

$$I_x = I \cos \omega t, I_y = I \sin \omega t$$

电感相等时, 合成磁链为:

$$\psi = LI_x + jLI_y = LI \cos \omega t + jLI \sin \omega t = LIe^{j\omega t}$$

上式表明中间区域电磁场以角速度  $\omega$  匀速转动



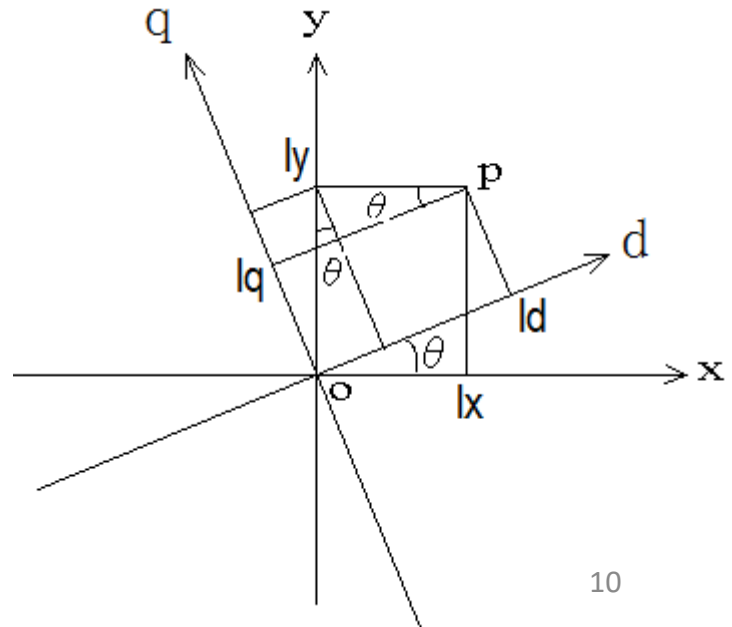
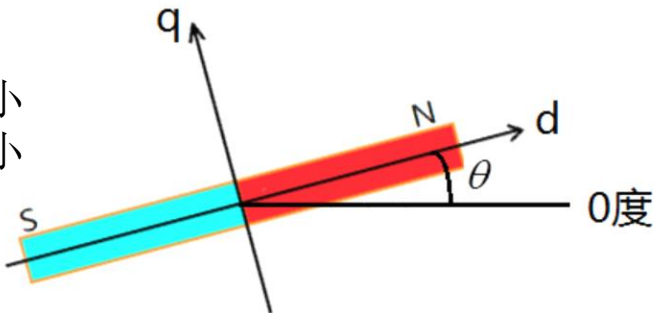
◆ 将X轴转个角度, 与磁体一致, 改称D轴或直轴

● Y轴比磁体超前90度, 称Q轴或交轴

坐标旋转公式

$$\begin{cases} I_d = +I_x \cos \theta + I_y \sin \theta \\ I_q = -I_x \sin \theta + I_y \cos \theta \end{cases}$$
$$\begin{cases} V_d = +V_x \cos \theta + V_y \sin \theta \\ V_q = -V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \end{cases}$$

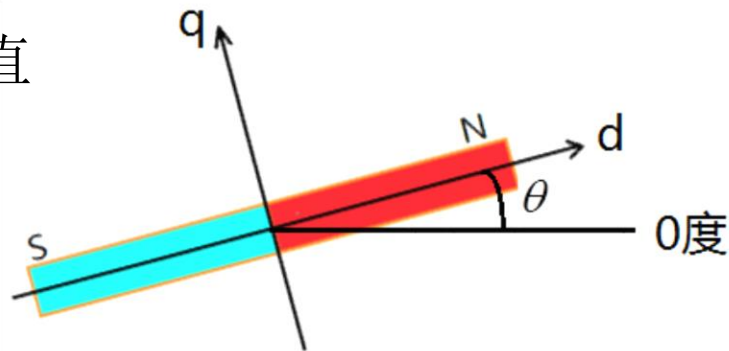
欲改变 $I_d$ , 就调节 $V_d$ 大小  
欲改变 $I_q$ , 就调节 $V_q$ 大小



◆ 坐标旋转后电流的控制变得简单

◆ 控制  $I_d=0$  是常用方法

- $I_d=0$  时电流大小就是  $I_q$ , 方向与磁铁垂直
- 电流幅度 10A, 可写成设定值  $0+j10$

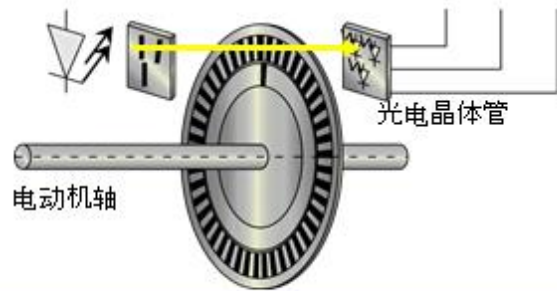


另一关键：磁体位置角  $\theta$  怎么知道？

# 用传感器测量磁体角度

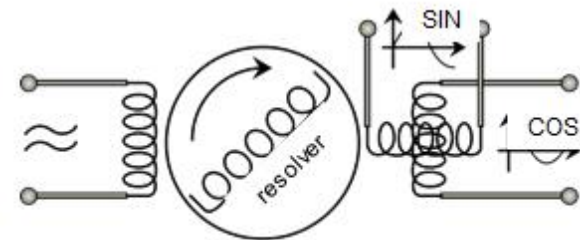
## ◆ 光电编码器：把一圈分成几千到几万刻度线

- 优点：**精度高**, QEI计数, 操作简单
- 缺点：价格昂贵, 易粉尘污染, 上电后需找起点



## ◆ 旋转变压器：输出sin, cos电压ADC算角度

- 优点：**静止时也能算出磁体位置**
- 缺点：成本稍高, 角度计算量大, 还需一路正弦信号驱动



## ◆ 霍尔：把一圈分成6个扇区

- 优点：**成本很低**
- 缺点：扇区内角度按转速预测, 转速变化时, 因预测不准造成扇区边界角度有跳跃

传感器增加电机成本, 还增加额外生产和维护成本

- ◆ 测量电流  $I_u, I_v, I_w$  求出向量式  $I_x + jI_y$  的实部虚部
- ◆ 更新磁体位置角  $\theta$
- ◆ 计算dq坐标下的电流  $I_d + jI_q$ , 与设定值比较, 调节  $V_d + jV_q$ 
  - 比如电流设定值是  $0 + j10$ , 测量值是  $-1 + j11$ ,  $I_d$  要增加,  $I_q$  要减小
  - 电流误差经PI计算得到中间变量  $V_d + jV_q$
- ◆  $V_d + jV_q$  经坐标旋转, 算出  $xy$  坐标的电压  $V_x + jV_y$
- ◆ 由  $V_x + jV_y$  算出  $V_u, V_v, V_w$  (占空比), 死区补偿后输出

每个PWM周期, 重复上面测电流, 更新角度, 电流误差算电压, 算占空比更新PWM  
以上任务在72MHz的M451中执行时间不到20us, 使用了DSP指令

# 无感控制磁体角度计算

**楞次定律:** 面积S区域磁通  $\phi$  若在变化, 则面积S一圈的感应电压等于区域磁通的时间导数  $\varepsilon = -d\phi / dt$ , 负号表示方向:磁通增加时按磁通反方向用右手定律

磁通为  $\phi$  的磁铁以角速度  $\omega$  旋转, 线圈磁通为  $\phi e^{j\omega t}$ , N匝线圈的感应电压为  $N\varepsilon = Nd(\phi e^{j\omega t}) / dt = j\omega N\phi e^{j\omega t} = \psi\omega e^{j(\omega t + 90)} = \psi\omega(\cos\theta + j\sin\theta) = \varepsilon_x + j\varepsilon_y$

上式表明, **反电势的方向比磁铁超前90度**, 只要知道感应电压的水平和垂直分量  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ , 反正切  $\tan\theta = \varepsilon_y / \varepsilon_x$  求出角度  $\theta$  就能知道磁铁角度为  $\omega t = \theta - 90$

求磁铁角度, 变成求反电势的两个分量  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$



$$\left\{ \begin{array}{l} V_y = RI_y + L \frac{dI_y}{dt} + \varepsilon_y \\ V_x = RI_x + L \frac{dI_x}{dt} + \varepsilon_x \end{array} \right.$$

# 直接计算法和间接方法

◆ **直接计算法的缺点**：电流测量值的跳动，算出的  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  跳动，导致算出的角度跳动大，最终影响控制精度

- 消除数值跳动的方法：滤波，如适于运动预测的卡尔曼滤波

◆ **间接方法, 状态观测器法**

$$V_x = Ri_x + L(di_x / dt) + \varepsilon_x \implies Li_x = \int (V_x - Ri_x - \varepsilon_x) dt \implies Li_x = \Sigma (V_x - Ri_x - \varepsilon_x) \Delta T$$

- 累加  $(V_x - Ri_x - \varepsilon_x) \Delta T$  算出下次  $Li_x$  的估值，下次测电流求出  $Li_x$  与其估值比较，用二者差值调整  $\varepsilon_x$ ，如此不断调整得到  $\varepsilon_x$
- 状态观测器最早由龙伯格 (Luenberger) 1964年提出，并用数学方法证明多次计算后**状态估值会收敛于真实值**

N匝线圈中的感应电压:

$$N\varepsilon = Nd(\phi e^{j\omega t}) / dt = j\omega N\phi e^{j\omega t} = \psi\omega e^{j(\omega t + 90^\circ)} = \psi\omega(\cos\theta + j\sin\theta) = \varepsilon_x + j\varepsilon_y$$

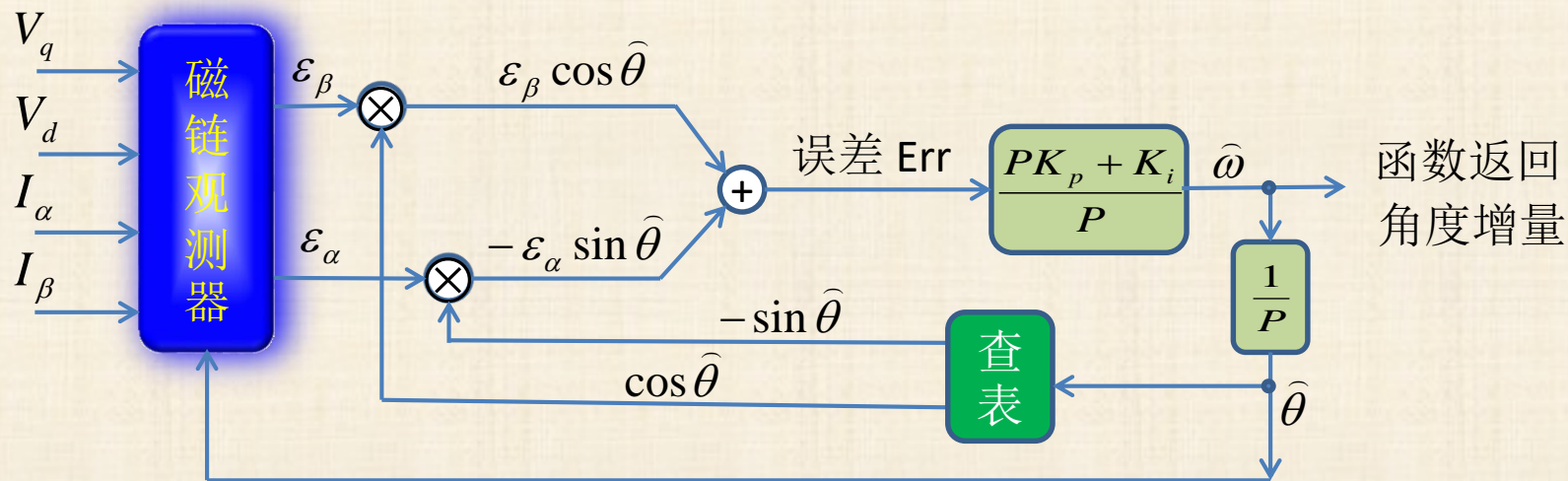
用  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  的估值计算的磁体角度为  $\hat{\theta}$ , 角度实际值为  $\theta$ , 则下式成立

$$\varepsilon_\beta \cos \hat{\theta} - \varepsilon_\alpha \sin \hat{\theta} = \psi\omega \sin \theta \cos \hat{\theta} - \psi\omega \cos \theta \sin \hat{\theta}$$

$$= \psi\omega \sin(\theta - \hat{\theta})$$

$$\approx \psi\omega \cdot \Delta\theta \quad // \theta \approx \hat{\theta} \text{ 时, } \sin(\theta - \hat{\theta}) \approx \theta - \hat{\theta}$$



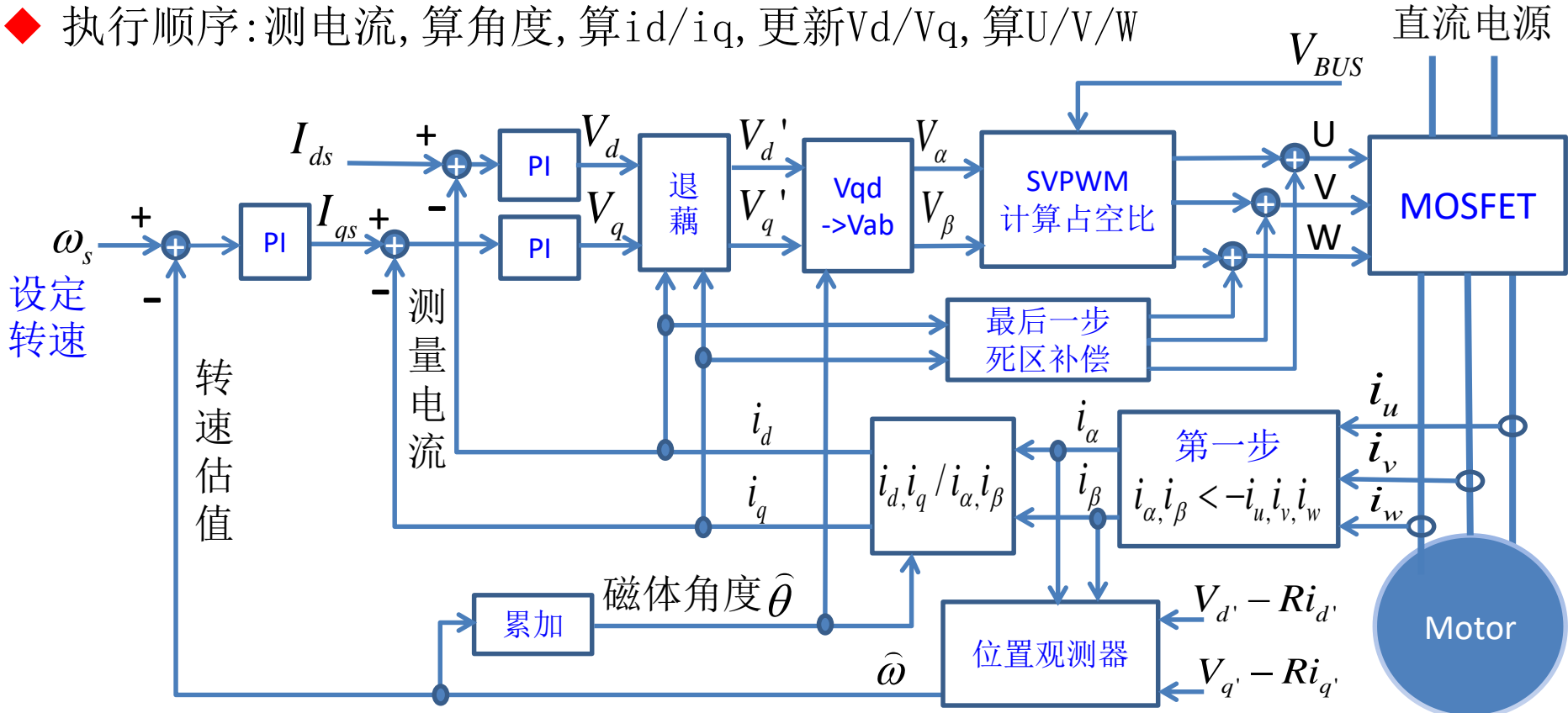


PI 控制的结果是PI的输入等于0,  $Err \approx \psi \omega (\theta - \hat{\theta}) = 0$  即角度估值  $\hat{\theta}$  等于真实值

若角度估值  $\hat{\theta}$  滞后, 误差 Err 会变大, PI 运算后转速估值  $\hat{\omega}$  增大, 角度估值就会加快追上

# 总体框图

◆ 执行顺序:测电流, 算角度, 算 $i_d/i_q$ , 更新 $V_d/V_q$ , 算 $U/V/W$



◆ 除转速PI外, 其余部分都在ADC中断里完成, M451执行时间约20us

◆ M4内核@72MHz，**DSP指令**加快了PI运算和滤波运算

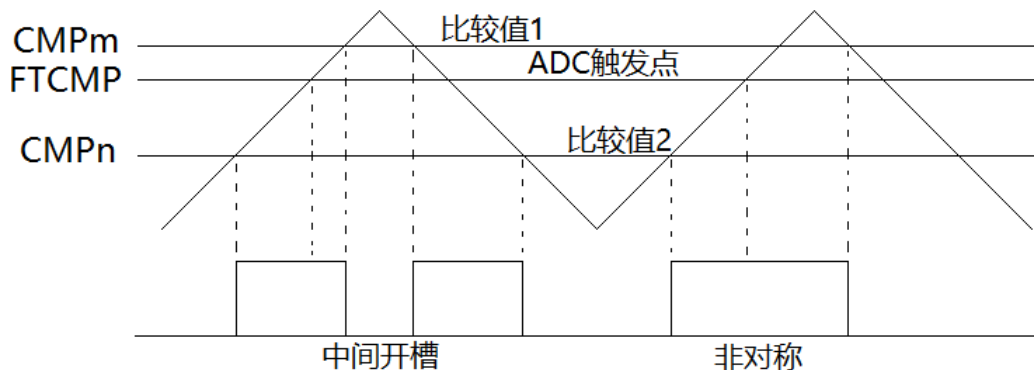
◆ 12路PWM同步工作

- PWM计数频率可达144MHz (20KHz时周期7200)
- 双比较值, 可产生中间开槽或非对称波形
- 可配置**任意时刻触发ADC**
- 有Brake短路保护功能

◆ 16通道12位ADC

- 转换通道的先后**顺序可配置**
- 采样率 1Mbps

◆ 1路**12位DAC**可用于输出中间变量波形



## ◆ 72MHz Cortex\_M4内核

- 5V工作电压, -40~105度工作温度范围
- FLASH 40~256K 取指令0等待
- RAM 16/32K, 带硬件校验功能

## ◆ CAN 2.0接口

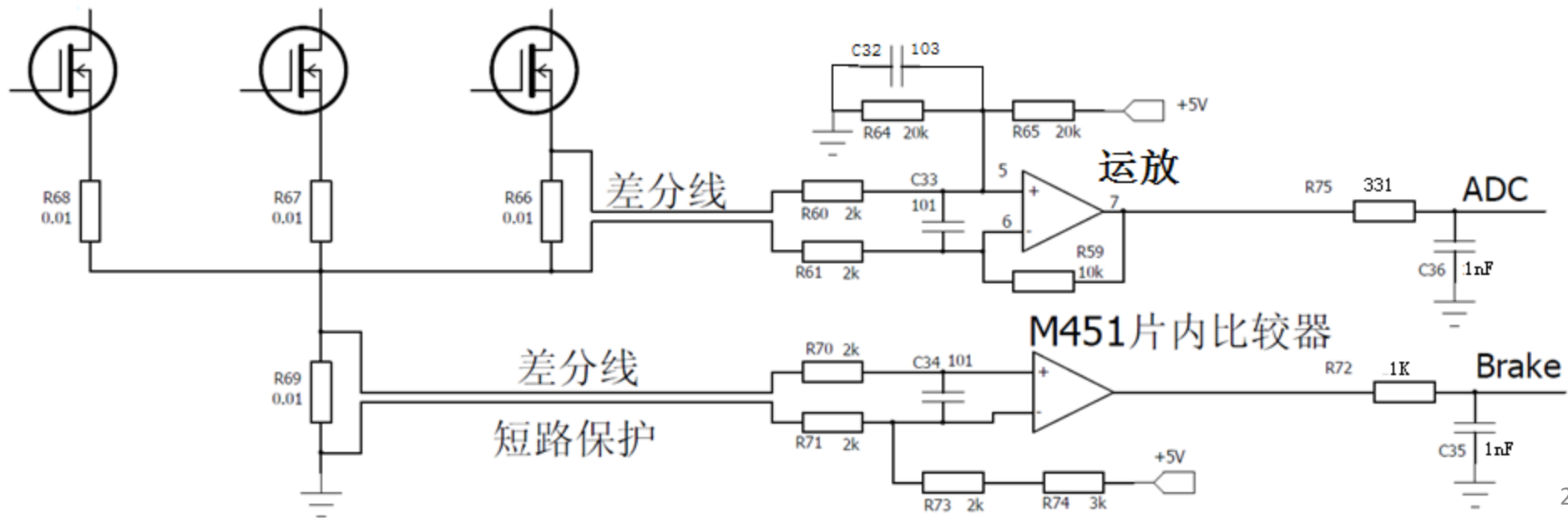
## ◆ 96位UID可用于代码加密

## ◆ 两个模拟比较器ACMP

## ◆ 其它:WDT, USB-OTG, PDMA, RTC, UART, SPI, I2C, EBI 等



- ◆ PWM偶数通道驱动上MOS，输出极性可配置
- ◆ 无论用哪个ADC引脚测电流，都可配置为测电流通道先转换
- ◆ 调节比较器负端的R71, R73, R74可配置短路保护电流门限。

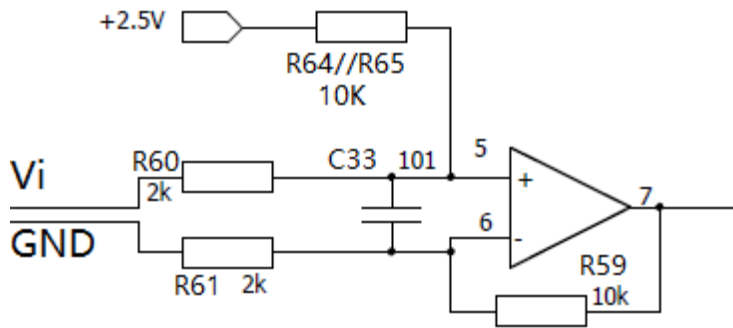


- ◆ 运放正端R64与R65电路等效为10K电阻接2.5V电压上
- ◆ 按叠加定理, 2.5V和Vi单独算再相加, 此电路输出为

$$U_o = (2.5V * \frac{R60}{R60 + R64 // R65} + V_i * \frac{10K}{2K + 10K}) * (1 + \frac{10K}{2K})$$

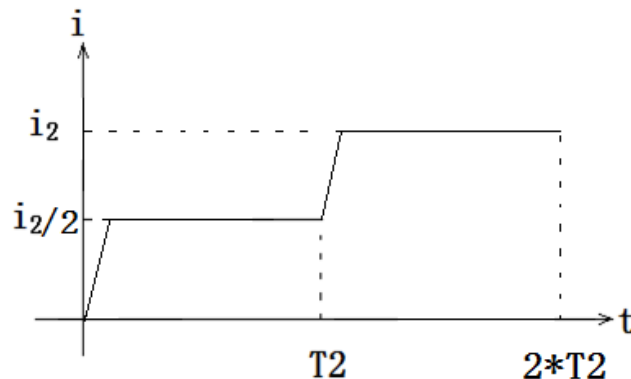
- ◆ 化简化后为  $U_o = 2.5V + 5V_i$

- ◆ 放大5倍, 可测正负值



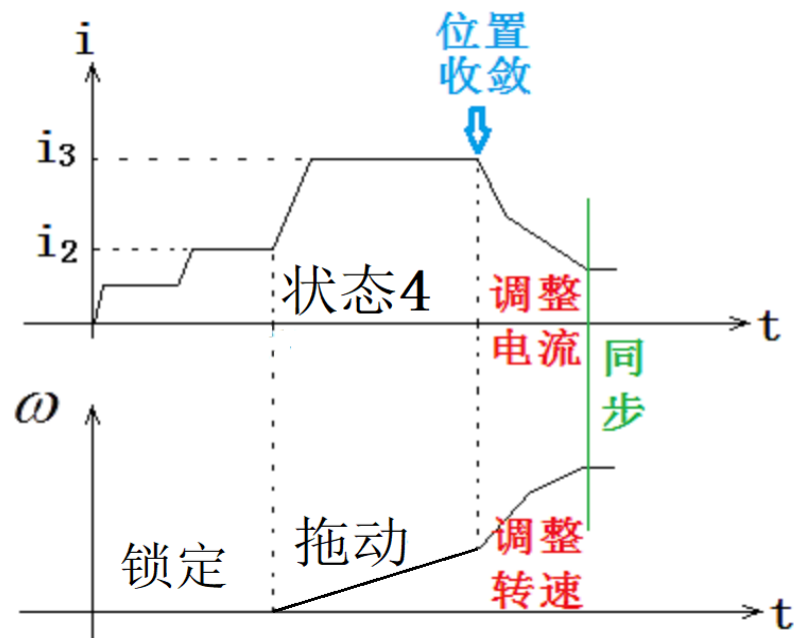
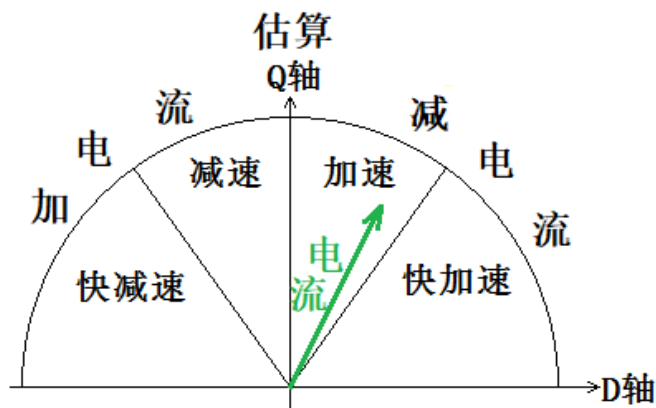
- ◆ 状态0, 关功率管, 不控制电机
- ◆ 状态1, 输出0电压, 用于刹车
- ◆ 状态2, 输出0电压, 只下MOS导通, 用于自举电容充电
- ◆ 状态3, 拖动启转, 不做电流PI
- ◆ 状态4, 拖动启转, 做电流PI
- ◆ 状态5, 电流锁定
- ◆ 状态6, 顺风起转前的准备
- ◆ Bit4=1, 同步转动状态
- ◆ 其它, 变回状态0

- ◆ 状态5电流上升到锁定值保持一段时间
  - ◆ 让转子旋转到某个角度，准备起转
- ◆ 保持时间到后，若设定转速大于0，就变状态4起转
  - 分俩阶段，先小电流锁定，再大电流锁定

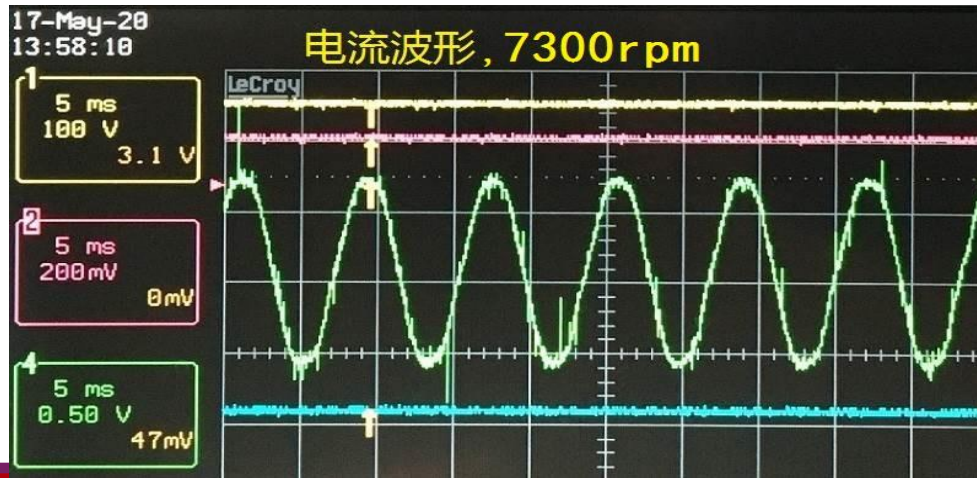
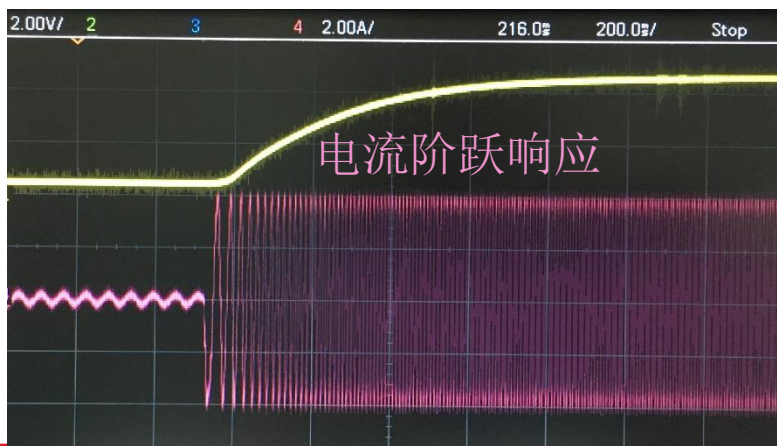
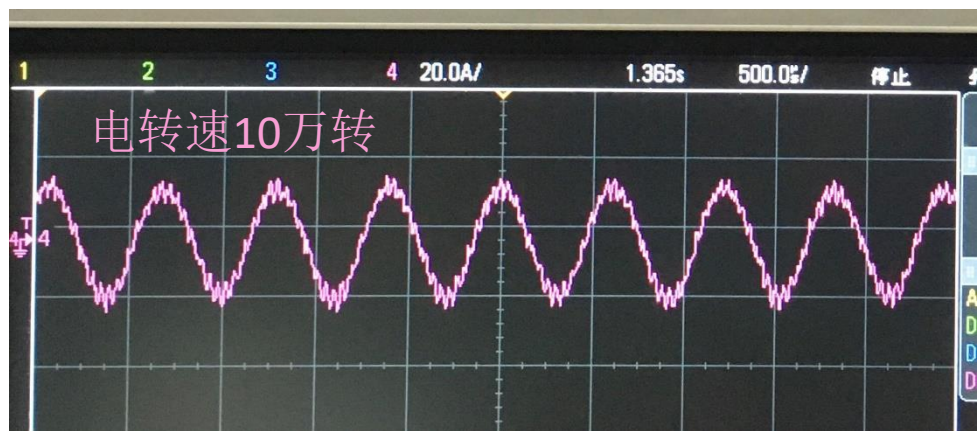
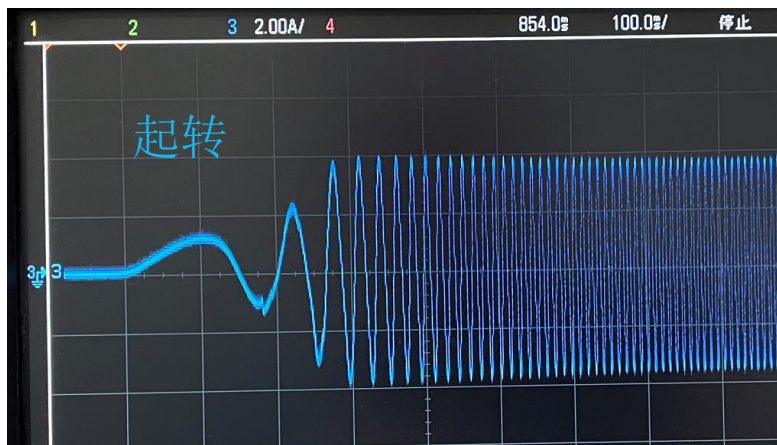




- ◆ 状态7先匀加速拖动，位置收敛后调整转速和电流
  - 电流方向与Q轴重合时，变为同步



# 电流 I\_alpha





## ◆ 电压、电流、电感计算单位

- 若1A的ADC值是M, 则电流i的ADC值是Mi
- $V - Ri = Ldi/dt + \varepsilon$  右端分子分母乘1000000M, 得

$$V - Ri = \frac{1000000Ld(Mi)/dt + 1000000M\varepsilon}{1000M * 25 * 40}$$

- 电流ADC值 $Mi=i'$ , 微亨值 $L'$ , 电势变 $\varepsilon'$ , 公式变为

$$\text{输入}(10V - 10Ri) * 4 = \frac{L'di'/dt + \varepsilon'}{1000M * 25} \text{ 估算}$$

电压用0.1V的数值, 运算时电压再乘4, 电感用微亨, 电流用ADC值, 常数1000M\*25赋给全局变量 Unit\_Magnify

母线电压不能超过  $65535/40=1638.3V$ , 否则坐标旋转时32位溢出

若LI超32位, 电感值要除以10或100, 常量Unit\_Magnify也除相应值即可

# nuvoTon

## Thank You !

