新唐 M451 无感 FOC 方案代码说明

www.nuvoton.com

nuvoTon

概要

- 代码总体架构
- 起转、停转的代码流程
- PWM 输出极性和ADC 配置
- 电机参数配置
- 电流、电压测量电路参数的配置
- 电流PI参数、转速PI参数的调整方法
- 代码中的计算公式
- 数学函数简介

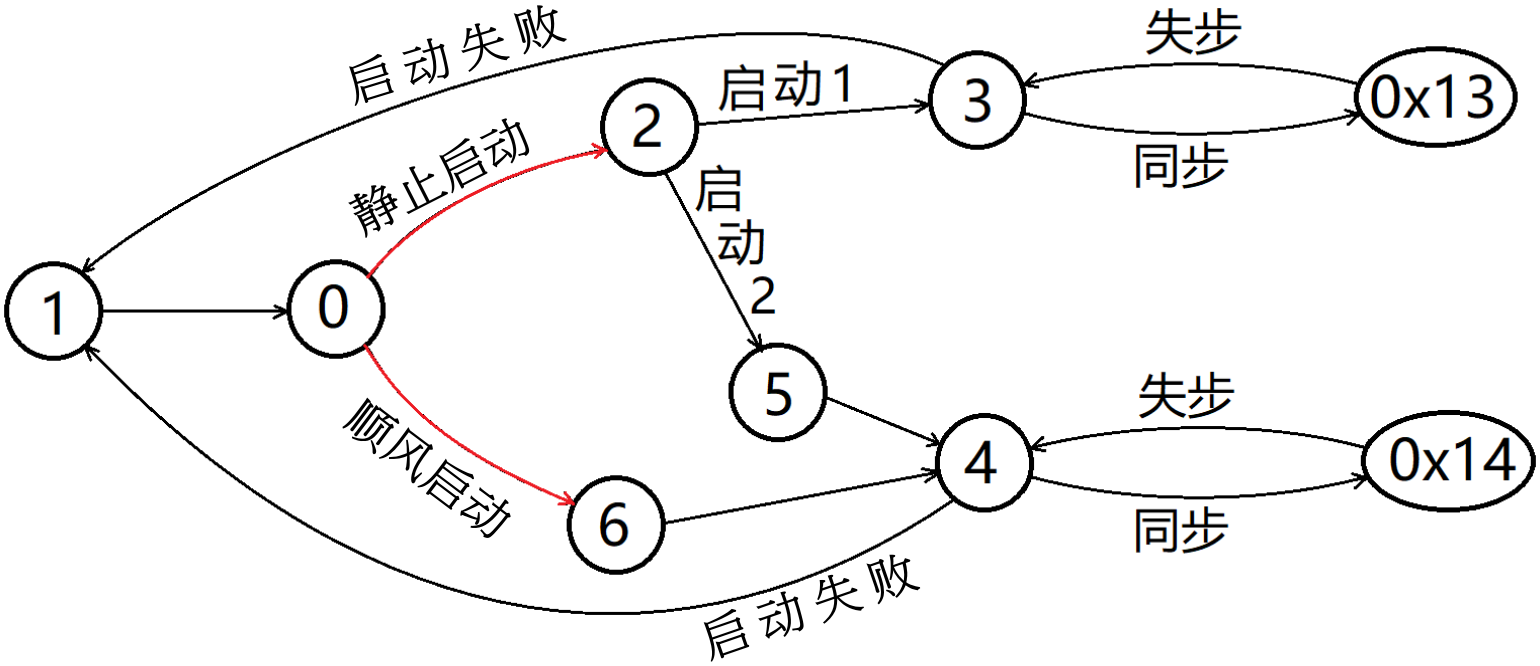
代码架构：main,ADC中断，SysTcik中断

nuvoTon 新唐科技

代码架构三大部分：main()+两个中断

- Main()： 故障监测,控制启转、停转等
  - 判断是否欠压、过温，调速旋钮值是多少等等
  - 启转：设定转速 RPM_Set 大于最小值,状态0变2
  - 停转：设定转速 RPM_Set <= 0,启动时又不想启动了就变状态1
- ADC中断： 磁体位置估算,电流PI运算,PWM占空比计算、输出
  - 坐标变换q轴角度总是用 Angle_q
  - 启转时代码控制 Angle_q 递增，控制电流设定值
  - 同步后 Angle_q 用估算值，电流设定值用转速 PI 运算的结果
- Systick中断： 转速PI运算,功率计算,故障显示等

ADC中断里的状态机 Motor_Status

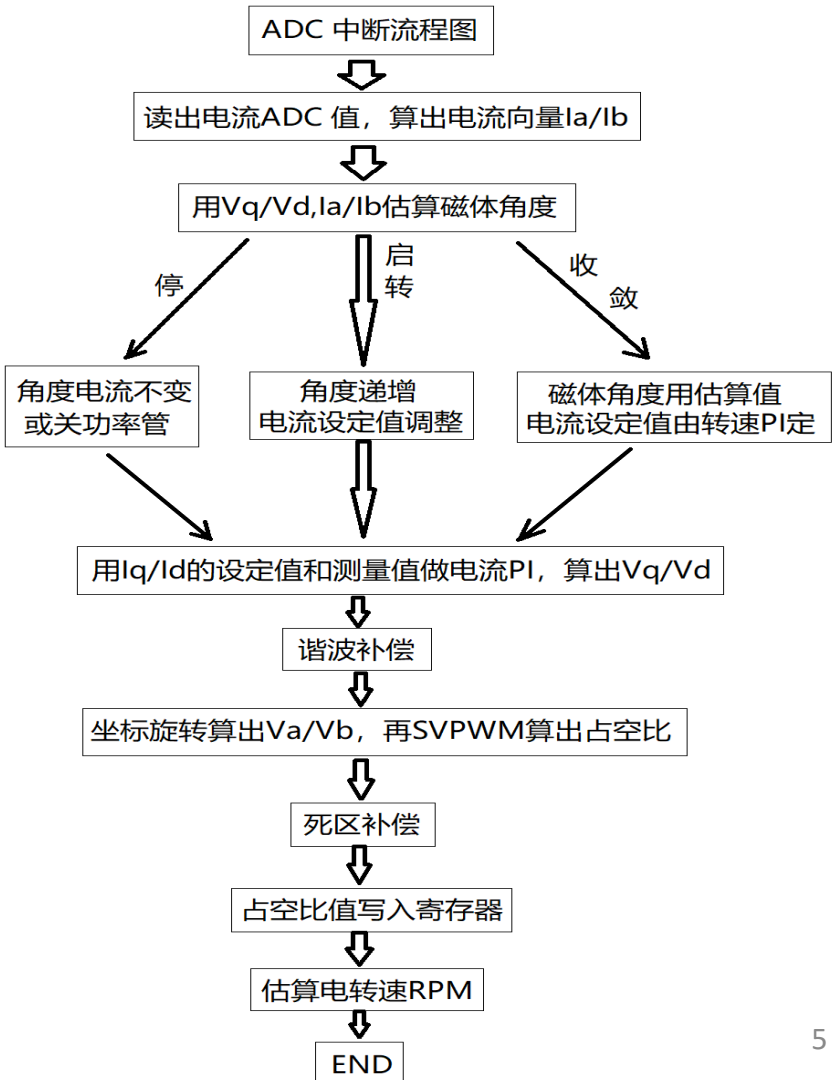


红线在Main()中启动时转变

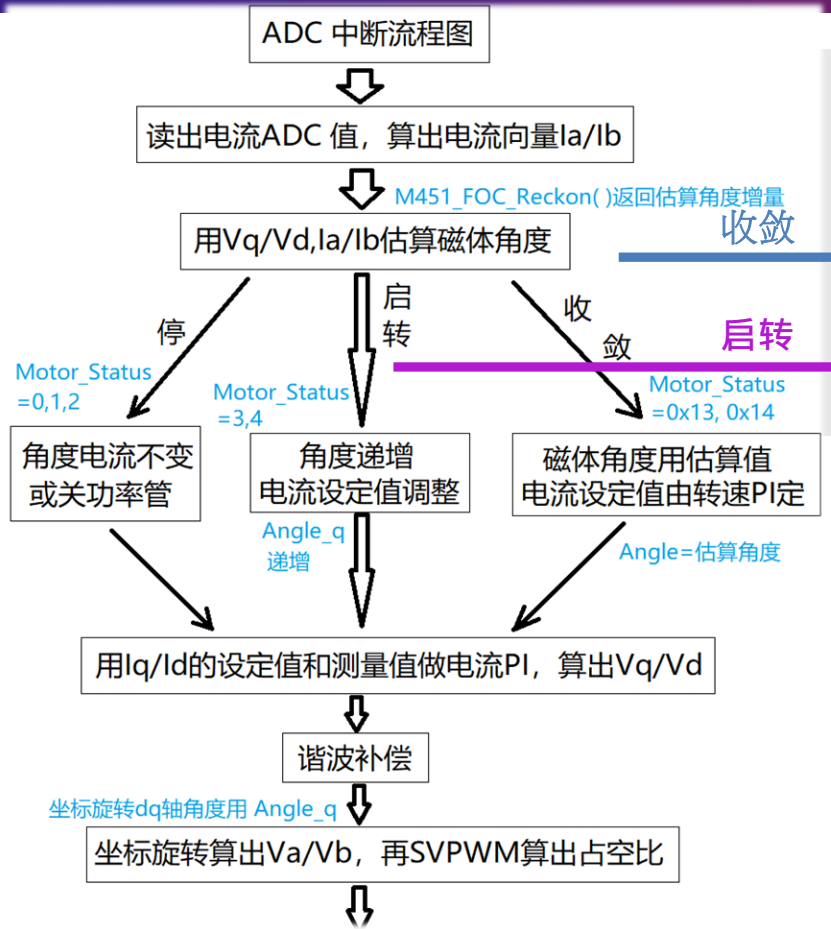
启动1和启动2, 由宏定义二选一

ADC 中断代码流程

- 起转，停转，同步由以下状态机控制
  - 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，只下MOS输出，用于自举电容充电
  - 状态3， V/F 起转
  - 状态4， I/F 起转
  - 状态5，起转前的锁定，然后去状态4
  - 状态6，顺风起转准备，然后去状态4
  - 状态7， 啥也不做，用于调试
  - Bit4=1， 同步转动状态（0x13，0x14）
  - 其它，变状态0



ADC 中断代码流程



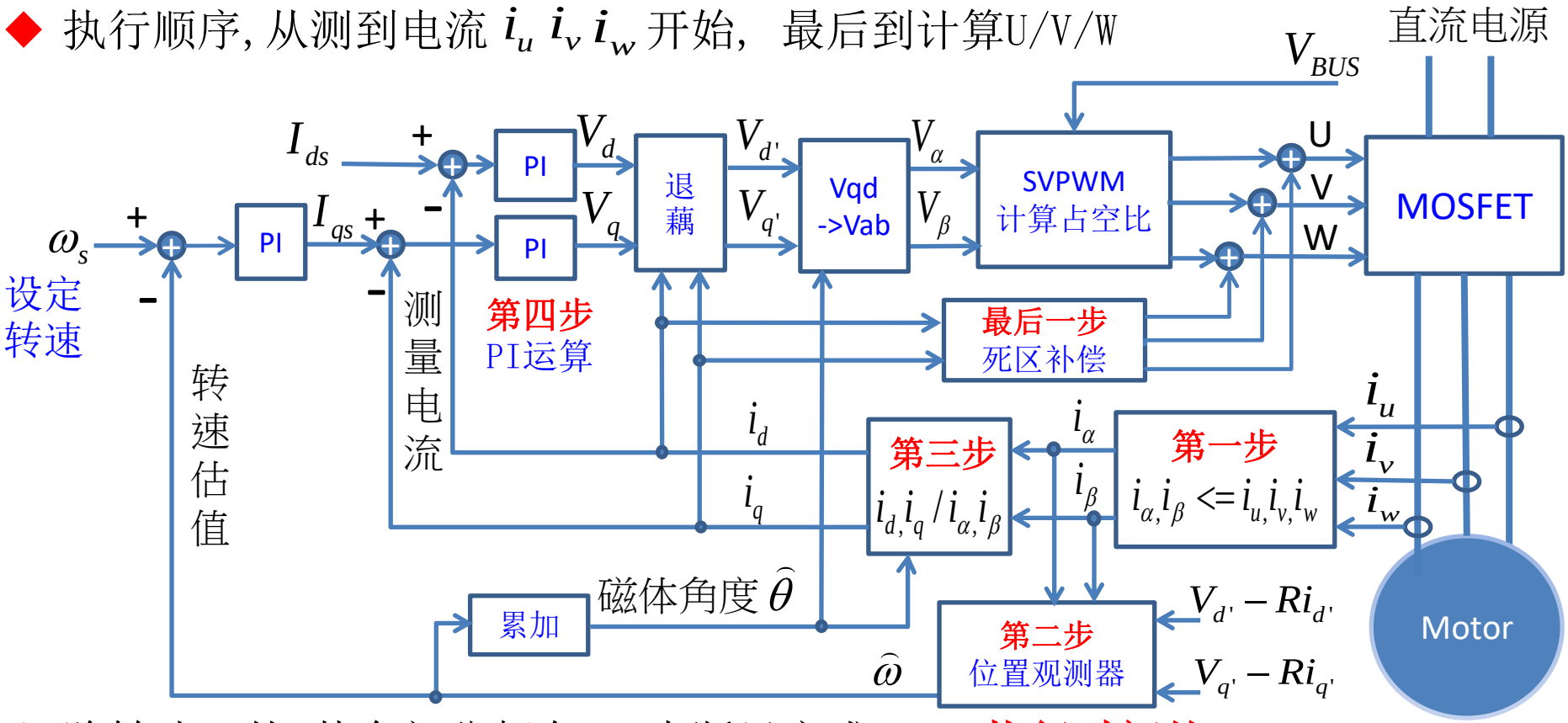

```
217   //=================================================
218   //   接下来，按 Motor_Status 不同的值，执行不同代码
219   //=================================================
220
221   //Pwm_Duty_Uplimit = gPWM_Period -500 ;
222
223   if(Motor_Status & 0x10){ Angle_q += temp16 ;
224
225   }
226
227   //==== 状态3 电压拖动起转：每转一扇区限压值Emf_ADC_Max
228   else if(Motor_Status == 3){
229
```

启转

状态机 **Motor_Status** 控制代码流程

总体框图

- 执行顺序，从测到电流 i_u i_v i_w 开始， 最后到计算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**

起转、停转的代码流程

- 1,main()中读调速旋钮ADC值,算出转速并限定在最大最小值之间后，赋值给转速设定值变量RPM_Set，此值大于转速下限，就会起动

```
395     //== 调速旋钮,获得转速设定值 ========================================
396     temp32    = ((uint16_t)EADC->DAT[3]) ;
397     Speed_Adc = (temp32 + Speed_Adc*31 +16) >>5 ;        // 低通, 可稳定旋钮 ADC 数据
398     temp32 = Speed_Adc ;
399
400     RpmMechanical_Set = temp32 ;                         // 机械转速设定值,注释此句仿真可实时赋值
401
402     temp32 = RpmMechanical_Set * POLE_PAIR ;             // 电转速 = 机械转速*极对数
403
404     //===  把电转速设定新值temp32, 限定在上下限之内 ================================
405     if(Rotation_Direction != Expect_Direction)temp32 =RPM_STOP_VALUE;  //设定转向与实际转向不同,停转
406     else if( Stop_Runing ) temp32 = RPM_STOP_VALUE ;                  // "停转变量"非0, 转速 =停转值
407     else if(temp32 > RPM_SET_MAX) temp32 = RPM_SET_MAX  ;             // 设定转速超上限, 算上限
408
409     if(temp32 < RPM_SET_MIN){
410       if(RPM_Set <= 0){                                            // 未转时
411         if(temp32 <(RPM_SET_MIN*3 >>2)) temp32 =RPM_STOP_VALUE;    // 大于下限值的 3/4 才起转
412         else temp32 = RPM_SET_MIN ;
413       }
414       else if(temp32 <(RPM_SET_MIN >>1))temp32 =RPM_STOP_VALUE;    // 在转动时, 小于下限值1/2, 就停转
415       else temp32 = RPM_SET_MIN;
416     }
417
418     // 若限最大功率(或平均电流),转速设定值RPM_Set不能直接赋值,要加个PI 运算, 或慢慢加减
419
420     RPM_Set = temp32 ;                                           // 电转速设定值 =最小~最大间, 停转时=负值
```

起转、停转的代码流程

- 2,若在同步转,第1步仅是更新转速设定值RPM_Set(318行)。
- 3,若不是在同步转,状态2,3,4,5,6是已在起动,main()中不必做什么(361行)，若是在状态0，就要在状态0执行次数=0时，开始起动(362行)。
- 4,起动前先测是否在顺风转，然后就跳转到状态2给自举电容充电后起动

```
317     //============================ 在同步转 ======================================
318     if((Motor_Status & 0x10) == 0x10){
319
320       if((RPM_Set <=0)
321          &&((RPM_Measure*65536/60/PWM_Frequency) <(PULL_Ommega_Min_f16>>16))){
322         Exec_Counter = 3*PWM_10th_sec;  Motor_Status = 1;            // 转速低了就停吧,防止
323       }
324
325     }
326     //====================== 未同步(停转或在起转), 且设定转速 RPM_Set 小于0, 不需要启转 ==
327     else if(RPM_Set <= 0){
```

```
360     //======================== 未同步,且设定转速 RPM_Set 大于0,  需要启转 ================
361     else{                                                  // 状态2,3,4,5,6是在起转,只有状态0不自动变其它状态
362       if(Motor_Status + Exec_Counter ==0){
363
364       #if 1
365         temp32 = Test_Period();                            // 若在顺风转,此函数在 Angle_q =-16384 时刻返回转速
366
367       #else
368         temp32=0;  Emf_ADC_Max=0;                          // 水泵无顺风转,不执行Test_Period()可早点起转
369
370       #endif
```

起转、停转的代码流程

- 5，在ADC中断里,状态2执行次数=0后，因RPM_Set>0，状态变为3(388行)。当然在变状态3之前，要做起动前的准备工作(371行开始）。

```
366     if(Exec_Counter) --Exec_Counter ;                          // 执行计数非0 就递减
367     else if(Motor_Status != 0){
368
369       if(RPM_Set < RPM_STOP_VALUE) Motor_Status = 0 ;          // 转速设定值比停转值还负，是在给自举电容充电
370       else if(RPM_Set <=0)Motor_Status =MOTOR_STOP_STATUS;     // 这个停转状态可以是0,也可以是5
371       else{                                 //  LED_LIGHT_0() ;
372
373       #ifdef  __IF_ACTIVE_MODE                                 // 定义了IF 起转方式
374         Exec_Counter = TIME_MotorLock ;
375         Motor_Status = 5 ;                                     // 状态5 会跳转到状态4 I/F起转
376
377       #else
378         Iq_set_f12 = CURRENT_Max_f12 ;                         // 这个是状态3起转时的限流值
379         Emf_ADC_Max = 10 <<17;                                 // 初始电压值让轻载能转起来,并且不会触发短路保护
380                                                  // 状态3 Emf_ADC_Max逐步加到VOLTAGE_UpLimit_while_Active_f17
381         Angle_q = -16384 -65536;                               // 负角度线性加速,从-90度起转A相电流刚好从0开始上升
382         Pull_Ommega_f16 = 0 ;
383         Init_Variable(Angle_q, 0, 0);                          // 三个参数是：当前角度、转速和反电势
384         ptrSectionClear = 0 ;                                  // 赋0值让Motor_Active()清0静态变量(函数内赋非0值)
385
386         Do_Spd_PI = -SECTION_RPM_AVERAGE -2;    // 计算转速时加1,一个机械周期后加到正值,SysTick中断里才做转速PI
387         Exec_Counter = 3 ;                                     // 在状态3,4, 此值非0 被认为是刚起转
388         Motor_Status = 3 ;                                     // 下个PWM周期变状态3
389         //Angle_Jump = 0 ;
390       #endif
391
392       }
393     }
```

起转、停转的代码流程

- 6，状态3是V/F 拖动起动。在状态2也可以跳转到状态5(再变状态4)开始I/F起动过程
- 7，状态3起动成功后，状态码变 0x13，开始同步转动。

```
238   if((Motor_Status & 0x10) == 0 ){                    // 函数 Motor_Active() 未切同步
239     Circle_Tick = Angle_q ;                           // 起转时 Angle_q 是负值,就会先执行到此
240     if(RPM_Set <= 0){                                 // 指令停转
241       Exec_Counter = 3*PWM_10th_sec;  Motor_Status = 1;  // 刹车, 尽快停转
242     }
243     else if((Angle_q > 65536*20)||(Exec_Counter == 0)){  // N 圈起转不成功, 或同步转后又失步执行到此
244       Exec_Counter = 9*PWM_10th_sec;  Motor_Status = 0;  // 去状态0休息一下, 功率管需要散热
245     }
246     else if(LastptrSection != ptrSectionClear){ LastptrSection = ptrSectionClear;    // 转到了下一个扇区
247       if(Emf_ADC_Max < VOLTAGE_UpLimit_while_Active_f17) Emf_ADC_Max += 2<<17;       // 起转电压增加到上限
248     }                                                 // 顺风转时限压值(反电势)或高于此值,不能减,减会降速
249   }
```

- 8，同步转时，若转速设定值RPM_Set<=0，实际转速低到无法同步时，状态码0x13变成0x03，又回到起动状态，而这时会因Exec_Counter=0而变到停转状态0(243行)。

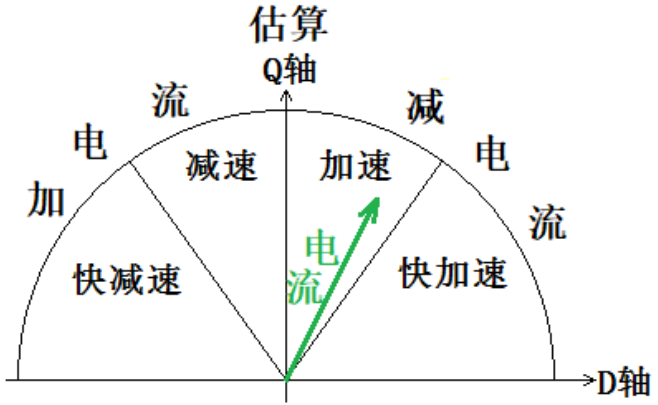
起转、停转的代码流程

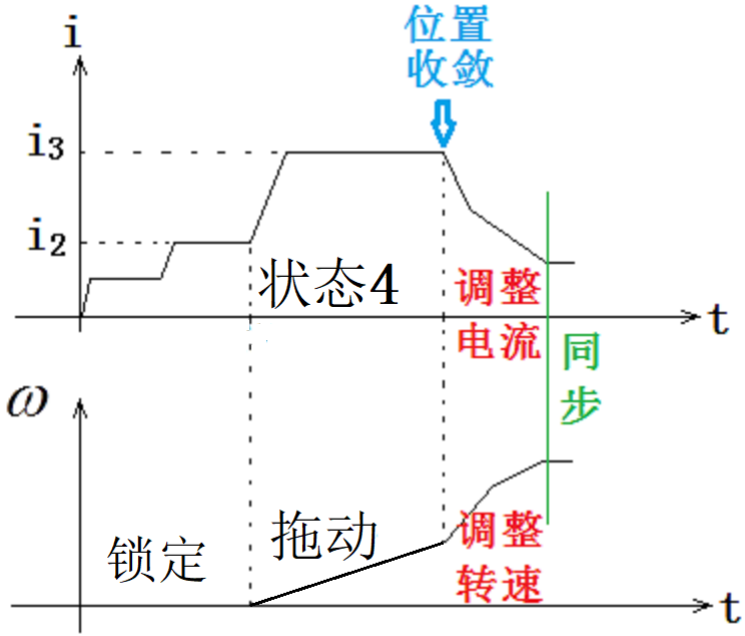
- 9，同步转时，若RPM_Set<0,基本都会转速降到观测器不收敛，又回到状态3(或状态4)。但理论上不排除迭代运算一直收敛的情况。所以在main()里，320行，增加一个判断，若转速已很低，直接变状态1刹车尽快停转，这里也可以变状态0慢慢停转。

```
317     //========================== 在同步转 ======================================
318     if((Motor_Status & 0x10) == 0x10){
319
320       if((RPM_Set <=0)
321          &&((RPM_Measure*65536/60/PWM_Frequency) <(PULL_Ommega_Min_f16>>16))){
322         Exec_Counter = 3*PWM_10th_sec;  Motor_Status = 1;            // 转速低了就停吧,防止
323       }
324
325     }
326     //===================== 未同步(停转或在起转), 且设定转速 RPM_Set 小于0, 不需要启转 ==
327     else if(RPM_Set <= 0){
```

I/F 启转过程简介

- 状态4先匀加速托动，位置收敛后调整转速和电流
  - 电流方向(绿)与估算Q轴重合时，变为同步
  - 锁定过程分俩阶段是考滤轻重载
  - 起动时限压,启动成功后电流自然就会下降





符号定义

- #Define定义的常量，全大写

```
8  #define  VIN_WORK_MIN          (  11*10)        // 工作电压下限，0.1V电压值，所以乘10
9  #define  VIN_WORK_MIN_UP       (  13*10)        // 最低工作电压，与上面值形成回差
10 #define  VIN_WORK_MAX          (1600*10)        // 最高工作电压,大于1638.3V坐标旋转溢出
```

- const前缀常量，第一个单词全大写,最后一个词小写

```
41  int32_t const CURRENT_MotorLock_f12 = CURRENT_Max_f12*3 >>5 ;     // 锁定时电流值
42  int32_t const VOLTAGE_UpLimit_while_Active_f17 = 30 << 17 ;       // 起转时的电压上限,
```

- 某个变量的位变量，变量名 + 全大写位定义名

```
44  INT_EXT uint16_t volatile Stop_Runing ;                  // 非0就停转
45  #define  Stop_15V_LOW                0x0001              // 15V 电压低
46  #define  Stop_TEMPERATURE_OVER       0x0002              // 超温
47  #define  Stop_SHORT                  0x0004              // 短路了
48  #define  Stop_OPEN                   0x0008              // 缺相
```

- 多个字母定义的普通变量，只有首字母大写
  - 后缀_f4,_f12,_f16 表示小数位数
  - 电压标准值是0.1V,电流以ADC数据为基准,加小数后缀加 _fxx

PWM 输出极性配置

nuvoTon 新唐科技

- 函数PWM0_Init()中，配置PWM引脚输出信号的极性
  - 若PWM024输出高时MOS导通，124行注释掉就可以了

```
124 //   PWM024_Out_0_MOS_On() ;
125   PWM135_Out_1_MOS_On() ;
```

ADC 配置

nuvoTon 新唐科技

◆ADC引脚转换的先后次序，可任意配置

- 三相电流ADC完成后产生中断，开始计算

```
23  void ADC_Init(void)
24  {
25      EADC->SCTL[0] = EADC_PWM0TG0_TRIGGER | 1 ;      //PWM0 立即触发,低4位是通道号,ADC_PWM01
26      EADC->SCTL[1] = EADC_PWM0TG0_TRIGGER | 2 ;      // ADC_PWM23
27      EADC->SCTL[2] = EADC_PWM0TG0_TRIGGER | 3 ;      // ADC_PWM45
28      EADC->SCTL[3] = EADC_PWM0TG0_TRIGGER | 4 ;      // Speed
29      EADC->SCTL[4] = EADC_PWM0TG0_TRIGGER | 15 ;     // VBUS
30
31      EADC->SCTL[5] = EADC_SOFTWARE_TRIGGER | 6 ;     // 软件触发ADC测初始位置
32
33      EADC->STATUS2 = 1 ;                             // 清中断标志
34      EADC->INTSRC[0] = 1ul << 2 ;                    // 使能模块2触发ADC中断0
35  }
```

ADC通道

SCTL[2]转换完产生中断

电机参数配置

- Main.c中给Ld,Lq赋值
  - 慢慢转电机测两相电感，最大值除2赋值给 Lq， 最小值除2 = Ld
  - 必须 Lq >= Ld

```
242 #if 1
243   Lq_Inductor   = 690 ;                    // 电机电感 uH,  风机
244   Ld_Inductor   = 665 ;                    // 必须 Lq >= Ld
245   Unit_Magnify = CURRENT_Adc1000*25*8 ;    // H=8,电流ADC值乘8后才用于计算
246
247 #else
248   Lq_Inductor   = 690 >>3;                 // 建议LqIq最大29位: 0x1FFF_FFFI
249   Ld_Inductor   = 665 >>3;                 // 电感太大若LqIq会溢出(32位符号
250   Unit_Magnify = CURRENT_Adc1000*25 ;      // H=8 与除8 抵消
251
252 #endif                                     //电流ADC出12位符号数,乘8后15位, Lq超32.
```

- 测两相电阻,毫欧值除2后在interrupt.c中赋值给RESISTER_Coil

```
26 #define   RESISTER_COIL              1000                  // 一相线圈电阻,毫欧值
27 int32_t const CURRENT_Adc1000 = 50*4096/5 ;                // 1安电流ADC值乘1000的常数值(10毫欧5倍)
28 int32_t const CURRENT_1A_Value_f12 = (CURRENT_Adc1000<<9)/125;  // 12位小数的 1A 电流值常量 (应除1000乘4096)
```

电流、电压测量电路参数的配置

- Interrupt_Fun.c中，1A电流的ADC值，再乘1000的数值，赋值给CURRENT_Adc1000
  - DEMO代码按10毫欧运放5倍配置的，Vref=5V，所以1A的ADC值是 10毫欧*5倍*4096/5V，再乘1000， 算式如下

```
26  #define    RESISTER_COIL              1000                    // 一相线圈电阻，毫欧值
27  int32_t const CURRENT_Adc1000 = 50*4096/5 ;                   // 1安电流ADC值乘1000的常数值(10毫欧5倍)
28  int32_t const CURRENT_1A_Value_f12 = (CURRENT_Adc1000<<9)/125;  // 12位小数的 1A 电流值常量 (应除1000乘4096)
```

- Vbus_0v1是0.1V的数值

```
456                         // 电压 =(分压比(91+10)/10)*5V*ADC值/4096,再乘10变0.1V值 =50*(91+10)/10*ADC值/4096
457     temp32 = (50*(91+10)/10*(EADC->DAT[4]&0xFFFF) +1024) >>11 ;      // 少右移一位, 2x
458     temp32 = temp32 + (Vbus_0v1 <<1);                                // (2x+2y), 25mV数值
459     Vbus_0v1 = (temp32 +2) >>2 ;                                     // 母线电压0.1V的数值,(2y+2x)/4
460     Section = M4_Svpwm(&temp_Vd, &temp_Vq, &temp32, Pwm_Duty_Uplimit);  // 用25mV数值计算PWM 占空比、低电平时间
```

电流PI参数的调整方法

- 电流P参数=ωL，L是电机电感，低通滤波频率转折点 ω 一般取PWM 频率的 20~100分之一
  - 启转时若偶有滋滋声，电流快速波动，就是PI参数过大了，取值小点再测。

```
// 1A电流的ADC 值是 M =(A*r*4096)/5V, 电流 I 的ADC 值是 MI, 做电流 PI 时再增5位小数是 32MI
// 32MI 做比例运算V=Kp*I,得17位小数的0.1V电压值, 所以比例运算是:  (10*2^17)*V = [(10*2^17)*Kp/32M] * (32MI)
// 所以电流数据 32MI 前面的系数 Kp_Current = 10*2^17*Kp/32M = (10/M)*Kp*(2^12) = 50Kp/(Ar)

// Kp 取值 2*3.1415*F*L/N, N 取值 =10*3.1415 得 Kp =F*L/5,  代入 Kp_Current公式得
// Kp_Current = 10*F*L/(Ar),  F=PI运算频率, L=电机电感, A=运放倍数, r=电流采样电阻

// 积分系数Ki/R <=Kp/L 阶跃响应无上冲,若加大积分参数,响应会加快,但转速调整时会有点过冲
// Ki_Current =Ki*T =Kp*R/(F*L) =10R/(Ar),          R=电机电阻, A=运放倍数,r=电流采样电阻

// PI运算:电流ADC值先增5位小数,PI运算结果是17位小数的0.1V数值, 从数值上看是 PI 运算让数据又增加了12位小数

int32_t     Kp_Current = 1500,  Ki_Current = 50;    // PI前加5位小数,PI结果是17位小数,所以此值相当于有12位小数
int32_t     Kp_Speed   = 200,   Ki_Speed   = 3;     // 转速PI运算结果是12位小数的电流设定值,相当于此有12位小数
```

转速PI参数的调整方法

- 按转速 Ω 与转动惯量 J 与转矩 M 的关系，理论上比例系数应取值 ωJ 。积分系数一般取比例系数的1/20~1/100

$$J\frac{d\Omega}{dt}+B\Omega=M$$

- 实际应用转动惯量和转矩常常是变化的。简单点可以预估一个小一点的 PI 系数，测试轻重载效果。若觉得转速响应太慢，可适当增大后再测试，只要调速时转速不出现忽快忽慢的波动就可以

```
54  // PI运算:电流ADC值先增5位小数,PI运算结果是17位小数的0.1V数值, 从数值上看是 PI 运算让数据又增加了12位小数
55
56  int32_t     Kp_Current = 1500,  Ki_Current = 50;    // PI前加5位小数,PI结果是17位小数,所以此值相当于有12位小数
57  int32_t     Kp_Speed   = 200,   Ki_Speed   = 3;     // 转速PI运算结果是12位小数的电流设定值,相当于此有12位小数
```

起转电流配置

- 起转时最大电流可先取正常转动时最大电流的一半左右，再按起转效果增减。

```
36  // 12位小数设定值 =CURRENT_Adc1000 就是=1000A/4096= 约1/4安,  ADC=1时,电流=1/CURRENT_Adc1000 毫安
37  #define       CURRENT_MIN          (30<<7)                    // 做电流 PI 时会先右移7位, 做小数对齐
38  int32_t const CURRENT_Min_f12 = -CURRENT_MIN;                  // 下限负值防0值下漂停不下来,负多了降速充母线
39  int32_t const CURRENT_Max_f12 = 4*CURRENT_1A_Value_f12 +(30<<7); // 正常转动时电流上限, 加一点显示时高位不跳动
40
41  int32_t const CURRENT_MotorLock_f12 = CURRENT_Max_f12*3 >>5 ;    // 锁定时电流值
42  int32_t const VOLTAGE_UpLimit_while_Active_f17 = 30 << 17 ;      // 起转时的电压上限,有限流并防转速上冲的作用
```

起转加速度配置

- 拖动转速上限PULL_Ommega_Max_16,参考能同步的最低转速
- 加速度PULL_Ommega_Inc_f16 先小点,磁铁能跟着转,后期再调整
- 拖动转速下限，可先取上限的 ½~¼，后期再调整
  - 一圈角度360 用 65536 表示，加16位小数就是低16位成了小数部分

```
61  #define  RPM_ACTIVATE_MAX          (600*POLE_PAIR)        // 拖动转速Pull_Ommega_f16上限,参考能同步的最低转速
62  #define  RPM_ACTIVATE_MIN          (300*POLE_PAIR)        // 拖动转速下限
63
64  int32_t const PULL_Ommega_Max_f16 = ((RPM_ACTIVATE_MAX*65536/60/PWM_Frequency)<<16);  // 拖动上限变成角度增量
65  int32_t const PULL_Ommega_Min_f16 = ((RPM_ACTIVATE_MIN*65536/60/PWM_Frequency)<<16); // 角度增量下限(转速下限)
66  int32_t const PULL_Ommega_Inc_f16 =  PULL_Ommega_Max_f16/(9*PWM_10th_sec);          // 启转加速度，转速增量
```

代码中的计算公式

- 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

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

  - 令电流ADC值Mi=i',微亨值L',电势变ε',公式变为

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

电压0.1V的数值,再乘4用于运算,**电感用微亨值,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

M451适于电机控制的特性

nuvoTon 新唐科技

- 72MHz Cortex_M4内核
  - 5V工作电压,-40~105度工作温度范围
  - 40~256K FLASH 取指令0等待
  - RAM 16/32K，带硬件校验功能
- CAN 2.0 接口(M453型号)
- 96位唯一序列号用于代码加密
- 12位 DAC 实时输出中间变量观察数值变化
- 其它:WDT,UART,SPI,I2C,RTC,EBI,USB-OTG,PDMA 等

数学函数简介

- uint32_t Get_SquareRoot(uint32_t Data)开方函数。如果实参太小,可对实参左移2,4,6,8后再开方,再把结果右移1,2,3,4……
- int16_t Get_Arctan(int64_t Xx, int64_t Yy)求反正切，返回-32768~32767 [-180~180度)
- int64_t Updata_Theta_Value(int32_t V_q,int32_t V_d,int32_t I_beta,int32_t I_alpha)
  迭代运算函数,做一次观测器迭代运算,对结果不做准确性判断。更新了偏差Theta_e (PLL输入,同步转时很小)和磁铁角度估值Estimate_Q_Position，返回值是反电势除Unit_Magnify后的值,返回值小数位与电压实参一样。函数内对I_beta,Ialpha做了静轴到动轴的坐标变换。
- Set_PWM_Frequency_LPF(uint32_t PWM_F,uint32_t LPF) 配置迭代运算频率和低通角频率,如果两次PWM做一次迭代运算,参数一就用PWM频率值的一半。
  用dq轴反电势求反正切前，先做一阶低通运算,减小数据波动

$$y_n = \frac{y_{n-1} f + x_n \omega}{f + \omega}$$

nuvoTon

Thank You !

更多资料见新唐论坛 www.nuvoton-mcu.com