新唐 M451 无感 FOC 方案代码说明

www.nuvoton.com

nuvoTon

概要

- 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
- 起转电流配置
- 起转加速度配置
- ADC 中断代码流程图
- 代码中的计算公式
- 数学函数简介

符号定义

- #Define定义的常量，全大写

```
#define  VIN_WORK_MIN          (  11*10)        // 工作电压下限，0.1V电压值，所以乘10
#define  VIN_WORK_MIN_UP       (  13*10)        // 最低工作电压，与上面值形成回差
#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

```
int32_t const CURRENT_Pull_Max_f12  = CURRENT_Max_f12*9 >>5 ;    // 拖动时电流最大值
int32_t const CURRENT_MotorLock_f12 = CURRENT_Max_f12*3 >>5 ;    // 锁定时电流值
```

- 某个变量的位变量，变量名 + 全大写位定义名

```
INT_EXT uint16_t volatile Stop_Runing ;                  // 非0就停转
#define  Stop_15V_LOW                0x0001              // 15V 电压低
#define  Stop_TEMPERATURE_OVER       0x0002              // 超温
#define  Stop_SHORT                  0x0004              // 短路了
#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

- 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

- 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通道号

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

```
#if 1
  Lq_Inductor   = 690 ;                    // 电机电感 uH,  风机
  Ld_Inductor   = 665 ;                    // 必须 Lq >= Ld
  Unit_Magnify = CURRENT_Adc1000*25*8 ;    // H=8,电流ADC值乘8后才用于计算
#else
  Lq_Inductor   = 690 >>3;                 // 电感太大若LqIq会溢出(32位符号数),此仨变量都除8即可
  Ld_Inductor   = 665 >>3;                 // 建议LqIq最大29位: 0x1FFF_FFFF
  Unit_Magnify = CURRENT_Adc1000*25 ;      // H=8,与除8抵消
#endif
//电流ADC出12位符号数,乘8后15位, Lq超32.768mH就可以除2,4,8了
```

- 测两相电阻,毫欧值除2后在interrupt.c中赋值给RESISTER_Coil
  - 可三三测量求平均

```
#define   RESISTER_COIL            1000                  // 一相线圈电阻,毫欧值
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),
```

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 0.01欧 * 5倍 * 4096/5V，再乘1000， 算式如下

```
25  #define   RESISTER_COIL              1000                    // 一相线圈电阻，毫欧值
26  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)
27
```

- Vbus_0v1是0.1V的数值

```
417                         // 电压 =(ADC值/4096)*5V*(分压比(91+10)/10)，再乘10变0.1V值 =ADC值*505/4096
418   temp32 = ((EADC->DAT[4]&0xFFFF)*505 +1024) >>11 ;          // 少右移一位， 2x
419   temp32 = temp32 + (Vbus_0v1 <<1);                          // (2x+2y)， 25mV数值
420   Vbus_0v1 = temp32 >>2 ;                                    // 母线电压0.1V的数值，(2y+2x)/4
421   Section = M4_Svpwm(&temp_Vd, &temp_Vq, &temp32, Pwm_Duty_Uplimit);  // 计算PWM 占空比，用25mV数值
```

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
  - 若启转时电机滋滋响，电流快速波动，就是PI参数过大了，取值小点再测。

```
41
42  // 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4位小数是 16MI
43  // 16MI 做比例运算V=Kp*I得17位小数的0.1V电压值,所以比例运算是下(10*2^17)*V =[(10*2^17)*Kp/16M] * (16MI)
44  // 所以电流数据 16MI 前面的系数 Kp_Current =10*2^17*Kp/16M =(10/M)*Kp*(2^13)  =100Kp/(Ar)
45
46  // Kp 取值 2*3.1415*F_pwm*L/N, N 取值 =10*3.1415 可约掉, Kp =F_pwm*L/5 代入Kp_Current公式, 得
47  // Kp_Current = 20*F_pwm*L/(Ar),    A=运放倍数,r=电流采样电阻, L=电机电感
48
49  // 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
50  // Ki_Current =Ki*T =Kp*R/L/F_pwm =20R/(Ar),              R=电机电阻, A=运放倍数,r=电流采样电阻
51
52  // PI运算:电流ADC值先增4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13位小数
53  int32_t     Kp_Current = 3000,   Ki_Current = 200;    // PI前加4位小数,PI结果是17位小数,所以此值相当于有13位小数
54  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13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

```
51
52  // PI运算:电流ADC值先增4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13位小数
53  int32_t     Kp_Current = 3000,   Ki_Current = 200;    // PI前加4位小数,PI结果是17位小数,所以此值相当于有13位小数
54  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13位小数
```

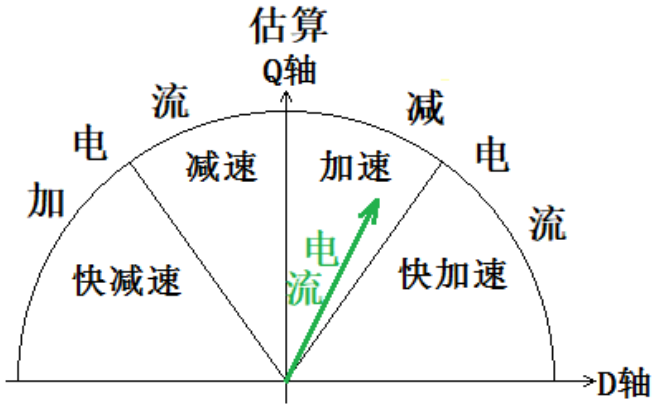
起转电流配置

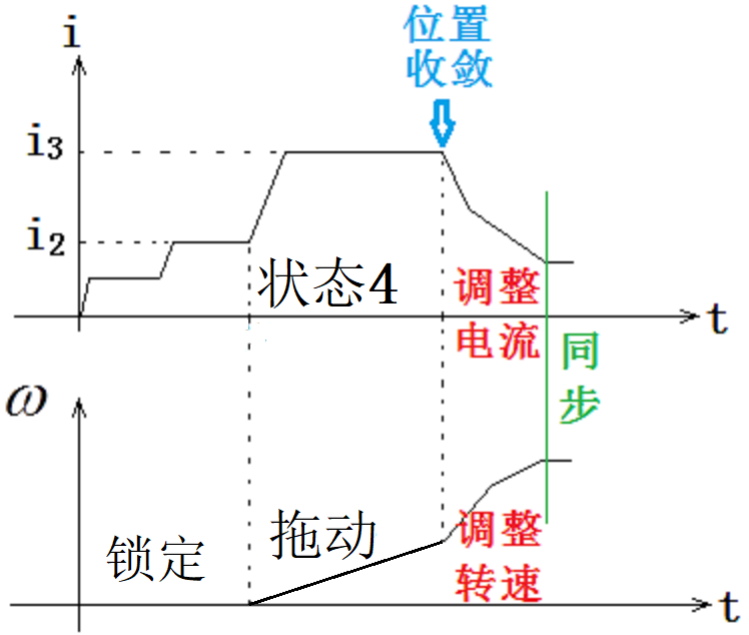
- 起转时最大电流可先取正常转动时最大电流的一半左右，再按起转效果增减。

```
34  // 12位小数设定值 =CURRENT_Adc1000 就是=1000A/4096=1/4安,  ADC=1时,电流=1000/CURRENT_Adc1000 =1/45 =22mA
35  #define       CURRENT_MIN          (4<<12)                          // 电流PI时右移8
36  int32_t const CURRENT_Min_f12 = -CURRENT_MIN;                       // 下限负防0漂,负多了降速充母线
37  int32_t const CURRENT_Max_f12 =(4*CURRENT_Adc1000<<2)+(8<<12);      // 正常转动时电流上限,加一点显示时高位不跳动
38
39  int32_t const CURRENT_Pull_Max_f12  = CURRENT_Max_f12*9 >>5 ;       // 拖动时电流最大值
40  int32_t const CURRENT_MotorLock_f12 = CURRENT_Max_f12*3 >>5 ;       // 锁定时电流值
```

启转过程

- 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





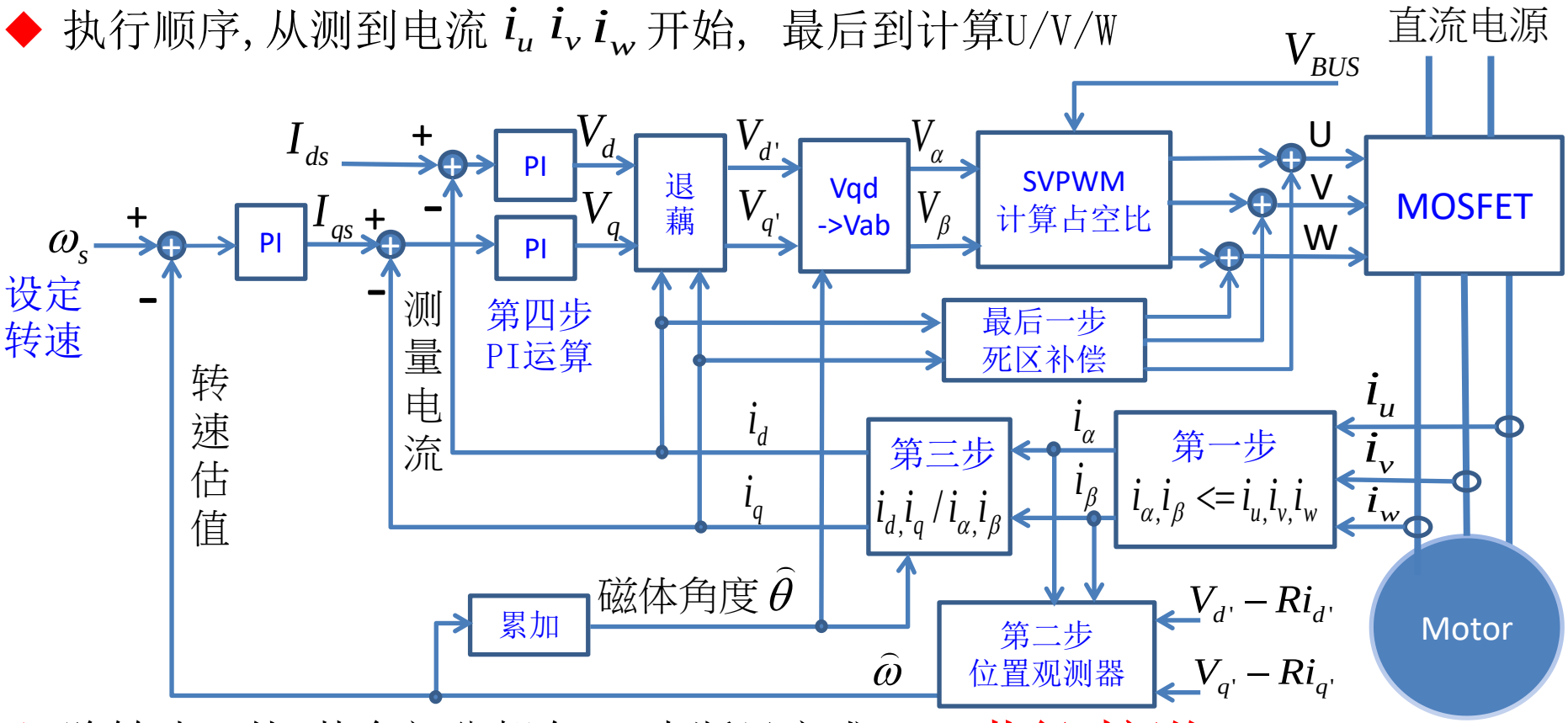
起转加速度配置

- 拖动转速上限PULL_Ommega_Max_16,取能同步转的转速
- 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

```
55
56  #define  NUM_SECTION_AVERAGE              12              // 计算转速时,在这些扇区内求平均, 一个机械周期
57  #define  RPM_ACTIVATE_MAX          (POLE_PAIR*600)       // 拖动转速上限,  这个转速要能保持同步转动
58  #define  RPM_ACTIVATE_MIN          (POLE_PAIR*300)  // 启动转速调整下限,参考能同步转动的最低转速,太小起转不顺
59                                                          // 起动时,Pull_Ommega_f16 调整的上下限
60  int32_t const PULL_Ommega_Max_f16 = ((RPM_ACTIVATE_MAX*65536/60/PWM_Frequency)<<16);  // 一PWM周期角度增量上限
61  int32_t const PULL_Ommega_Min_f16 = ((RPM_ACTIVATE_MIN*65536/60/PWM_Frequency)<<16); // 角度增量(转速)的下限
62  int32_t const PULL_Ommega_Inc_f16 =  PULL_Ommega_Max_f16/(9*PWM_10th_sec);          // 启转加速度,转速增量
```

总体框图

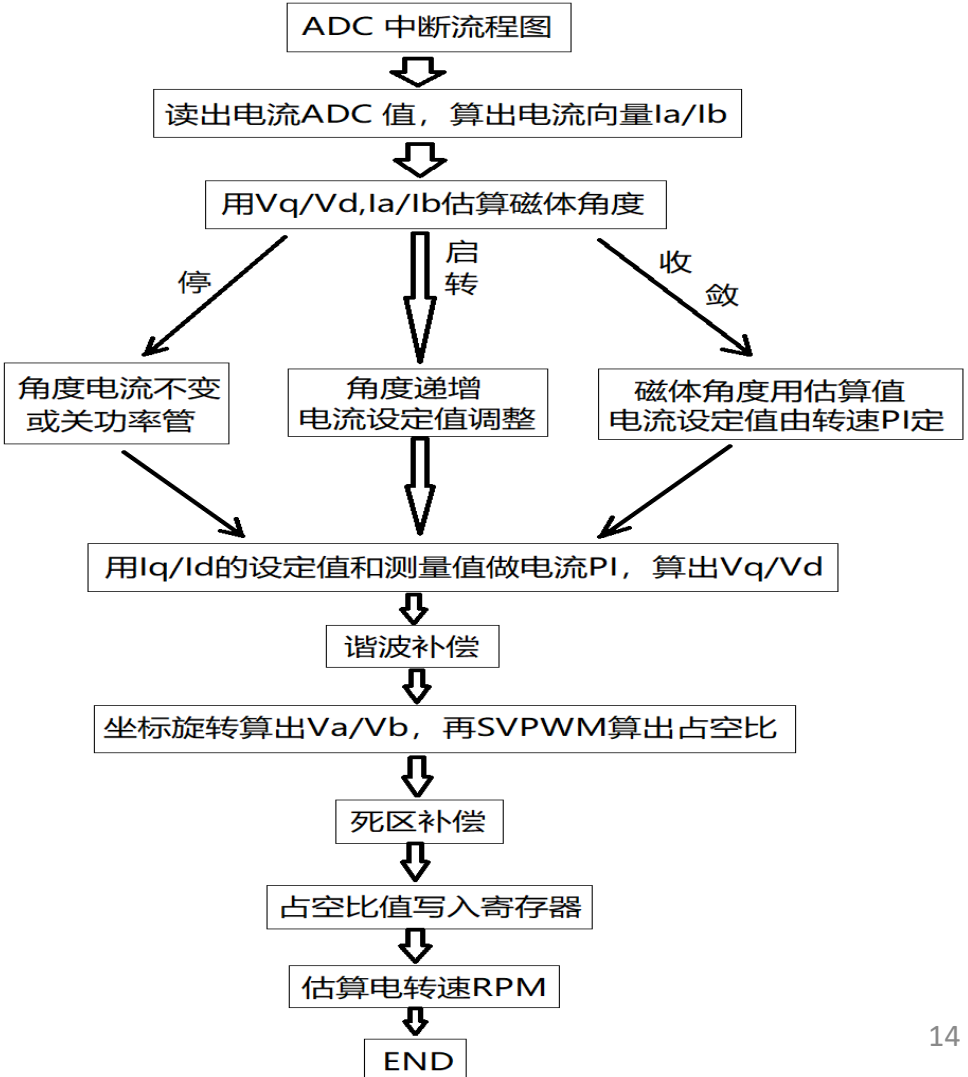
- 执行顺序，从测到电流 i_u i_v i_w 开始， 最后到计算U/V/W



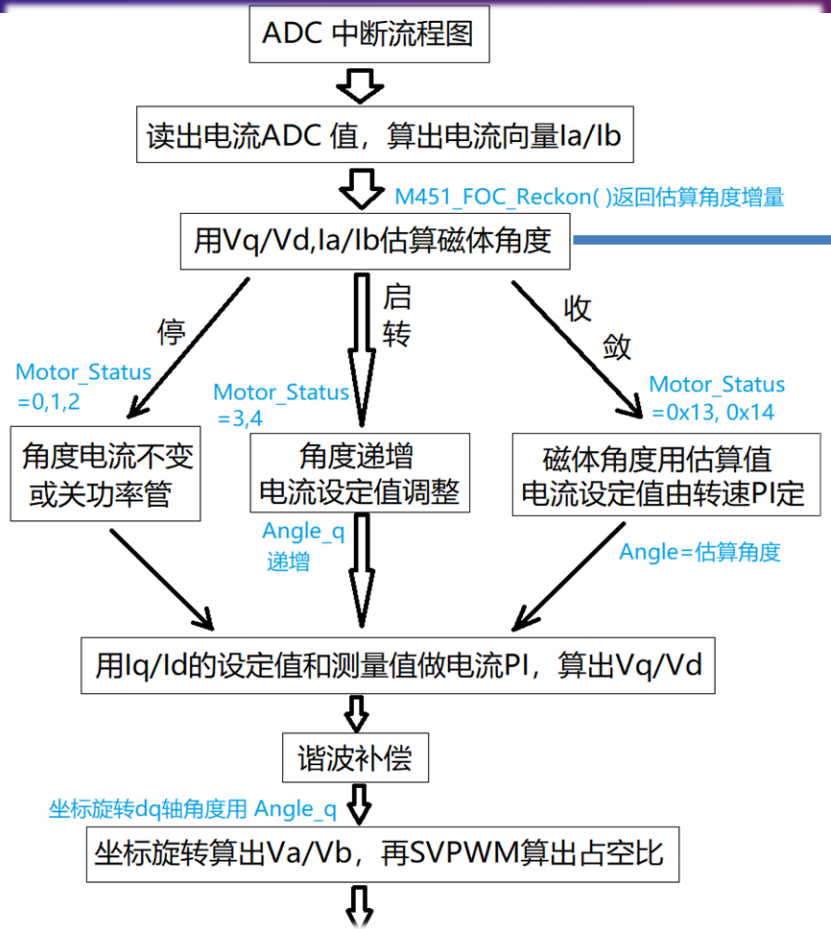
- 除转速PI外，其余部分都在ADC中断里完成，M451**执行时间约20us**

ADC 中断代码流程图

- Main()逻辑控制,转速设定等
  - 启转：设定转速大于最小值
  - 停转：设定转速<= 0
  - 可随时变转向
- ADC中断估算位置,电流PI运算
  - 坐标变换q轴角度总是用Angle_q
  - 启转未收敛时代码控制Angle_q 递增
  - 同步后Angle_q 用估算值
- Systick定时中断里做转速 PI运算



ADC 中断代码流程图




```
194
195   temp16 = M451_FOC_Reckon(temp_Vq,temp_Vd,I_beta,I_alpha); //函数不切
196   Sum_Ommega += temp16 ;                                    // 累加角度
197
198 //==== 接下来，按 Motor_Status 不同的值，执行不同代码 ================
199 //  Pwm_Duty_Uplimit = gPWM_Period -500 ;                   // 若占空比
200
201   if(Motor_Status & 0x10){ Angle_q += temp16 ;               // 已同步,
202
203   }
204         //==== 状态3电压拖动起转 ================================
```

状态机

- 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导通,七段式给自举电容充电
- 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
- Bit4=1， 同步转动状态（0x13,0x14）
- 其它，变状态0

中断外变状态码,要防止中断未执行过又变状态码

变量Exec_Counter是否=0 可判中断是否执行过

状态>=4才做电流PI 控制

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)
- 96位唯一序列号用于代码加密
- 12位DAC 实时输出中间量数值观察效果
- 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……，若不移位就是增加了小数位
- 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Estimate_Q_Position(PLL输出),返回值是反电势,除Unit_Magnify后,小数位与实参电压一样。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