

# 平头哥 CDK 助力中科昊芯 HX2000 系列芯片之双电机有感 FOC 控制系统专题（四）永磁电机双闭环 FOC 控制

V2.12.1, 平头哥剑池集成开发环境（CDK）推出最新版。

资源名称	更新时间	资源大小	操作
剑池CDK集成开发环境V2.8.4	2022-01-13 16:38:47	554.15MB	下载
剑池CDK集成开发环境V2.12.1	2022-01-06 15:34:17	962.80MB	下载
Release Note V2.12.1	2022-01-06 15:54:49	26.65KB	

自中科昊芯推出专题阐述 HXS320F28034 双电机有感 FOC 控制系统实现以来，第一期主要分析了双电机有感 FOC 控制原理，第二期着重分析了永磁 BLDC 的霍尔位置开环控制，第三期着重分析了永磁 BLDC 的双闭环调速，本期基于平头哥半导体有限公司的剑池集成开发环境（简称“CDK”）V2.12.1 版本与 HXS320F28034 驱动一体板联合开发永磁 PMSM 的双闭环有感 FOC 调速，永磁双闭环有感 FOC 双电机协调控制内容将在下期展开。

PMSM 双闭环有感 FOC 原理如图 1，系统给定转速  $n^*$  与差分增量式编码器计算所得实际转速  $n_{fbk}$  相比较，经速度 PI 运算得到 q 轴电流给定值  $i_q^*$ ，采用  $i_d^*=0$  控制，与霍尔电流采样得到三相实际电流  $i_a, i_b, i_c$ ，经 CLARK 与 PARK 变换所得 d 轴与 q 轴电流  $i_d, i_q$  进行比较，经电流 PI 输出调节电压  $U_d^*, U_q^*$ ，经反 PARK 变换得到调节电压  $U_a^*, U_b^*, U_c^*$ ，经空间矢量脉宽调制 SVPWM 输出三路开关管切换时间  $T_{cm1}, T_{cm2}, T_{cm3}$ ，与三路 PWM 输出的三角载波相比较得到六路调制脉宽，驱动控制三相六桥臂 MOSFET 逆变器通断，实现双闭环调速。

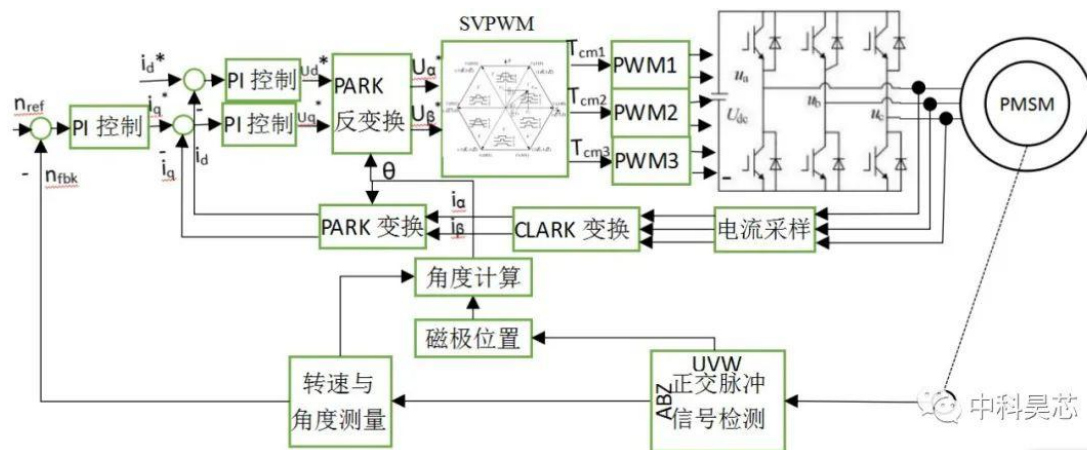


图 1

依照上述原理，设计 HXS320F28034 PMSM 双闭环有感 FOC 系统如图 2，通过 GPIO 按键控制电机使能与转速给定，转子位置与速度检测通过 QEP 模块实现，电流采样通过 ADC 模块实现，经双闭环 PI 调节输出 PWM 波的导通脉宽，从而实现电机调速。硬件连接如图 3，图中的小黑色电路板为差分编码转换器，读者可根据需要自行采购。

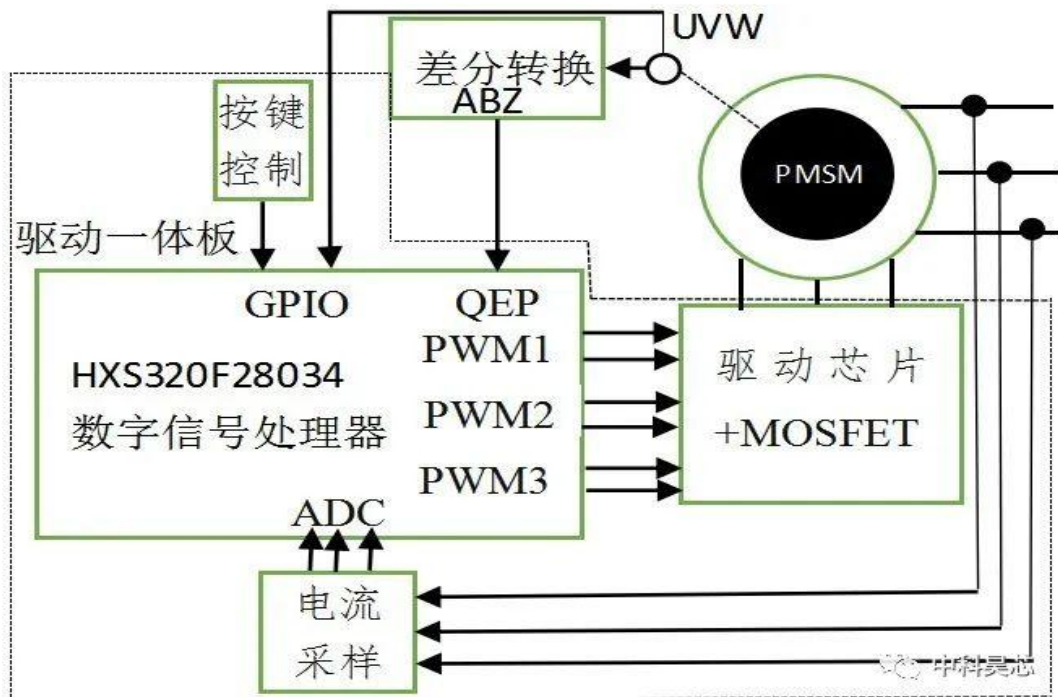


图 2



图 3

系统所采用的软硬件开发环境详见《芯教程|平头哥 CDK 助力中科昊芯 HX2000 系列芯片之双电机有感 FOC 控制系统专题（一）第一期：双电机有感 FOC 控制原理》。

根据上述分析，基于 CDK 开发 PMSM 双闭环 FOC 有感调速，代码包括：PWM、QEP 的外设 GPIO 引脚配置、三路三相 PWM 波输出配置，QEP 初始化配置与差分编码器位置采样、转速与电角度计算、ADC 初始化配置与电流采样、PMSM 斜坡启动编码器校正、PI 调节算法、CLARK、PARK 正逆变换、SVPWM 算法调制的 EPWM 事件触发中断服务程序，主程序执行调用，其中 SVPWM 算法调制的 EPWM 事件触发中断服务程序代码为：

```
void INTERRUPT epwm1_isr(void) {
    /*出于安全考虑，默认驱动板上电时封波，按下 GPIO7 后，电机开始启动*/
    if(GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO7==0)
    {
        epwm_flag++;
    }
    /*判断启动脉冲信号是否产生，产生后电机开始启动*/
    if(epwm_flag!=0)
    {
        /*启动计时*/
        start_step++;
        /*扇区读取：用于获取确定的转子初始位置与对应的 SVPWM 初始扇区*/
        sector_uvw();

        /*斜坡启动与调速：300rpm 斜坡加速启动后调速，300 个计数内完成启动*/
        if((speed_ref<300)&&(start_step<=300))
        {
            /*斜坡启动*/
            start_ramp();
        }
        else
        {
            /*调速*/
            speed_regulated();
        }
    }
}
```

```

/*转速闭环*/
speed_loop();
/*电流闭环*/
current_loop();

/*给定固定初始角度使电机转过最大反电势点，读取校正值=此时脉冲计数*/
theta=theta_open;

/*根据差分编码器的霍尔信号判断电机反电势是否处于最大值*/
if(theta==NA*_IQ7(PI/3)+_IQ7(PI/6))
{
    iel_int++;
}
/*反电势最大时，切电角度闭环，使编码器零位与电机零位对齐，完成启动*/
if(iel_int!=0)
{
    /*计算电角度*/
    theta=freq*_IQ7(2*PI);
}

/*两相旋转坐标系变换到两相静止坐标系*/
iPark();

/*空间矢量旋转变换*/
svpwm_motor();
/*调制占空比输出配置*/
epwm_compare();
}
/*清除事件中断的 INT 全局中断*/
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT=1;
/*中断应答，锁定 IER 的第 3 组中断向量*/
PieCtrlRegs.PIEACK.all=PIEACK_GROUP3;
}

```

CDK 上开发 PMSM 双闭环 FOC 有感控制程序，其编译结果为：

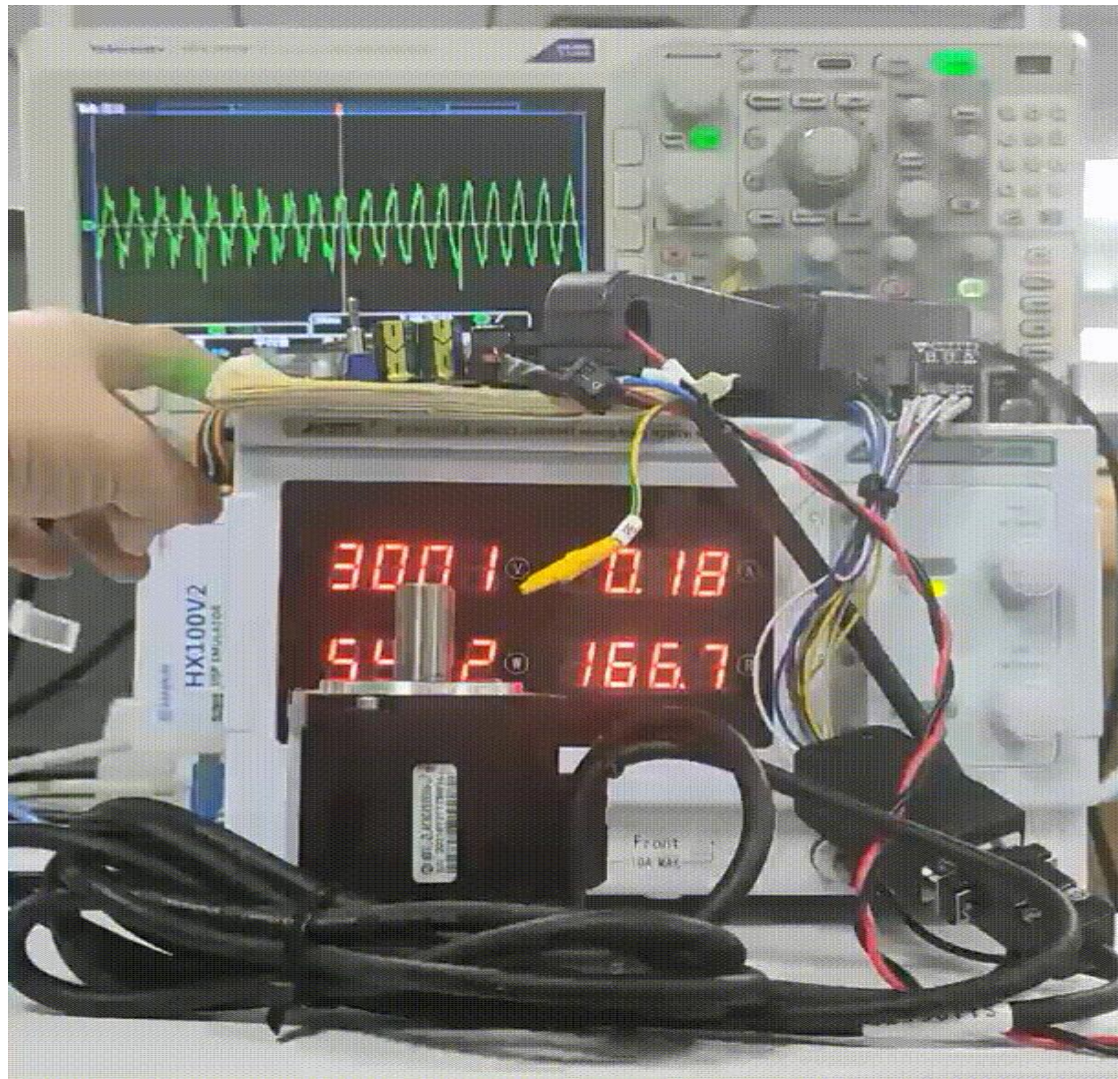
```
riscv32-haawking-elf-gcc --target=riscv32-unknown-elf --sysroot=D:/C-Sky/CDK/CSKY/MinGW/riscv-elf-gcc/riscv64-unknown-elf --gcc-toolchain=riscv32-haawking-elf-gcc --target=riscv32-unknown-elf --sysroot=D:/C-Sky/CDK/CSKY/MinGW/riscv-elf-gcc/riscv64-unknown-elf --gcc-toolchain=riscv32-haawking-elf-objcopy -O ihex ./Obj/HXS320F28034_PMSM_FOC.elf ./Obj/HXS320F28034_PMSM_FOC.ihex
riscv32-haawking-elf-objdump -D ./Obj/HXS320F28034_PMSM_FOC.elf > ./Lst/HXS320F28034_PMSM_FOC.asm
size of target:
text data bss dec hex filename
14446 24 2148 16618 40ea ./Obj/HXS320F28034_PMSM_FOC.elf
checksum value of target:0x4CDE74A (208,524)
Obj/HXS320F28034_PMSM_FOC.elf is modified at: 2022/3/8 11:10:10
```

编译通过后，就可以开始调试了，调试结果如下：

```
0x007c1780 <main+14>: fea42823 sw a0,-16(s0)
0x007c1784 <main+18>: 205010ef jal ra,0x7c3188 <InitSysCtrl>
0x007c1788 <main+22>: 3de1 jal 0x7c1660 <InitKEY>
```

Name	Value
all	
save	
restore	
system	
vector	
general	
float	
csr	

调试后，控制 PMSM 在 400rpm~600rpm 调速效果如下：



#### 关于中科昊芯

“智由芯生 创享未来”，中科昊芯是数字信号处理器专业供应商。作为中国科学院科技成果转化企业，瞄准国际前沿芯片设计技术，依托多年积累的雄厚技术实力及对产业链的理解，以开放积极的心态，基于开源指令集架构 RISC-V，打造多个系列数字信号处理器产品，并构建完善的处理器产品生态系统。产品具有广阔的市场前景，可广泛应用于数字信号处理、工业控制及电机驱动、数字电源、消费电子、白色家电等领域。