

基于PSoC3 芯片的步进电机微步控制方案

步进电机的结构特点使之适合于精细的位置控制应用。与直流电机相比较，在这类应用场合中，步进电机的优点有：

- 电机停止时具有保持转矩
- 控制简单，开环控制定位精度高且具有较高的重复定位精度
- 不需要电刷，因而提高了电机的可靠性与使用寿命
- 调速方便，改变输入脉冲的频率即可改变电机的速度

然而，步进电机也具有一定的局限性。比如说电机力矩小，转速低等。

在实际应用中，为了达到更紧密的位置控制精度和更好的性能，会对步进电机进行微步细分控制。步进电机细分技术是通过控制步进电机励磁绕组中的各相电流，使其在零电流和最大电流之间能有多个稳定的中间状态，其产生的合成磁场矢量实现了对磁场的细分，从而实现步距角的细分。

在步进电机微步细分控制中，要求对电流进行闭环控制。而在 PWM 关断时刻电流衰减的速度往往会影响控制系统的动态性能。而灵活可调的电流衰减策略是对精密步进电机细分控制系统的又一要求。

基于新一代 PSoC 芯片 CY8C3666AXI-040 的精细步进电机控制方案实现了对两项混合式步进电机的细分控制。细分精度可以达到 128 细分。其片上强大的 UDB 数字模块和精确的模拟模块可以实现对电流的精确控制，并可以在软件中实现对电流衰减进行动态配置。

细分控制两相步进的电机的转矩决定于两项励磁电流产生的合成矢量磁场。要使电机平稳匀速，等距角转动，关键是使合成矢量磁场幅值恒定，合成磁场的角度变化均匀。

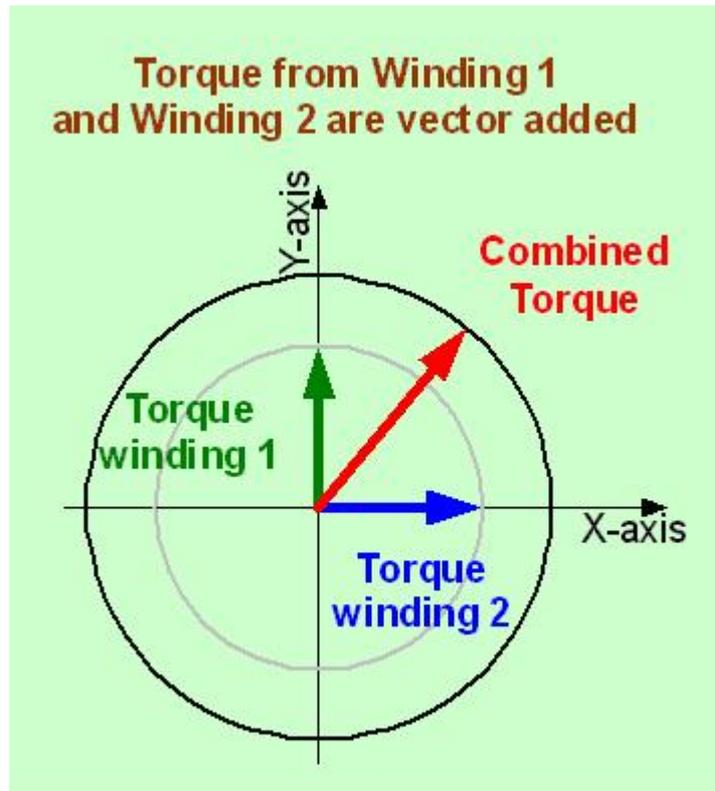


图 1 步进电机合成转矩示意图

步进电机的位置决定于 T1 和 T2 所形成角度，如下公式所示：

$$position = \phi_{\text{rotor}} = \frac{2 \cdot \text{step angle}}{\pi} \arctan\left(\frac{T_1}{T_2}\right)$$

T1, T2 取决于励磁磁通，进而取决于绕组电流。要取得细分就是更加精细的控制绕组电流幅值及绕组之间的相位关系。N 细分就是将相电流的幅值在整步控制基础上细分出 N 个台阶，每走一个微步，电流幅值就上/下一个台阶。

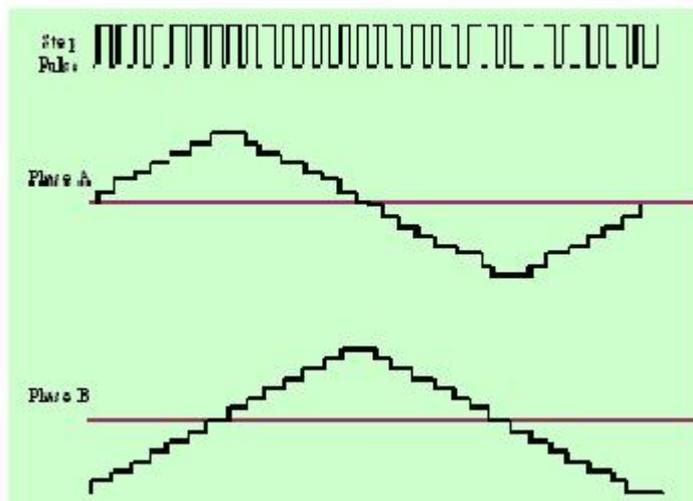


图2 步进电机电流细分示意图

图2所示为一个8细分的电流波形。如果细分足够大，相电流波形就逼近于正弦波。

电流衰减控制

在电流控制中，在PWM关断时，电机绕组内电流是自然衰减的。在H桥驱动电路中，其衰减模式（即续流模式）有两种：快速衰减和慢速衰减。

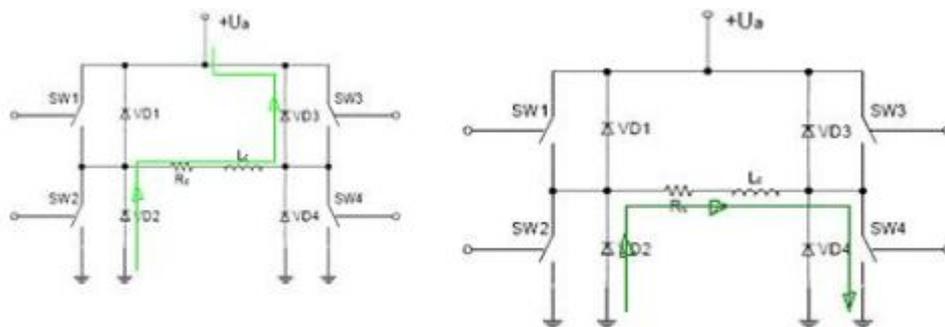


图3 电流衰减模式（左为快速衰减，右为慢速衰减）

图3左图为快速衰减模式。右图为慢速衰减模式。区别在于上管关断时，下管SW4的开通与否。

快速衰减有利于提高电机的响应速度，适合与高速场合。但缺点是电流纹波大，电机噪声也响应增加。慢速衰减的电流波形平滑，但是电流的控制精度和响应速度会变差。而更好的做法是给SW4驱动以PWM信号，这样电流衰减的快慢将取决于PWM的占空比。这种衰减模式称为混合衰减模式。混合式电流衰减提高了系统的灵活性，但是带来了系统的复杂性。但是在PSOC3芯片中，借助于数字系统的灵活性，很容易实现这个功能。

PSOC3 芯片介绍

PSoC 是独一无二的可编程嵌入式片上系统。它是在一片芯片上集成了可编程模拟和数字外设功能、内存和一个微控制器。赛普拉斯的可扩展PSoC平台可根据设计需要进行调整，因此不必频繁地更改设计来适应不同的微控制器体系架构。

PSoC1 是第一代 PSoC 芯片，它的特点是借助经过成本优化的 8 位 M8C CPU 子系统，获得优异性能、可编程性和灵活性。易用的设计软件无需编写很多代码或根本不需要编写代码，从而缩短了创建嵌入式解决方案的时间。

PSoC3 在 PSoC1 的基础上，赛普拉斯新推出地一款新架构，高集成化芯片。它增加了新设计的高精度、可编程模拟模块，单循环、通道式 8 位 8051 内核和可配置的高性能数字系统。由于具有一个高性能 8 位 8051RISC 内核（提供高达 67MHz 和 33MIPS），PSoC3 体系架构可以比标准 8051 运行速度快 10 倍之多。同时，片内还配置了直接内存访问接口（DMA），加速了数据在片内不同外设/内存之间的传输，减少了 CPU 的开销。

CY8C3866AXI-040 是 PSoC3 芯片家族中的一员，它的系统架构如图 5 所示：

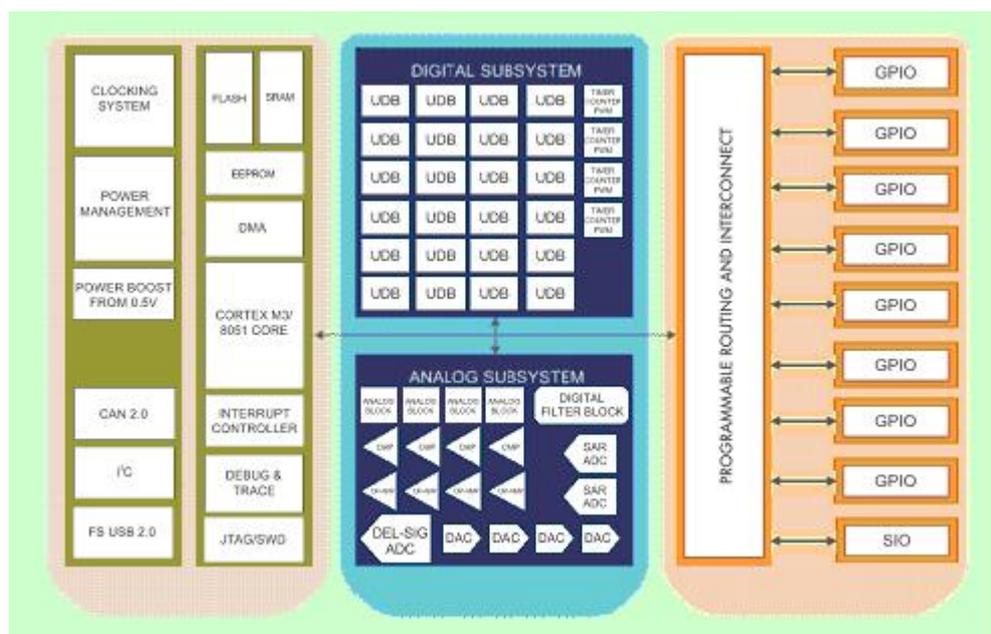


图 4 CY8C3866AXI-040 的系统架构

图 4 的左边部分为系统资源，包括 CPU，DMA，中断控制器，内存，电源管理器，内置的 I2C/USB 等通讯模块以及调试接口。中间部分为片上数字系统和模拟系统。数字系统包括 24 个可编程的通用数字模块（UDB）和固化的计数器，PWM 发生器等。而模拟系统包括 ADC 模块，DAC 模块，比较器，运算放大器以及通用的可编程模拟模块。右边部分为 IO 的端口。IO 口可以通过接口连接到任意的数字/模块单元上。

在本设计中，重点用到的模块包括：比较器，UDB 模块，DAC 模块等。

系统控制框图

下图为精细步进电机控制实现框图：

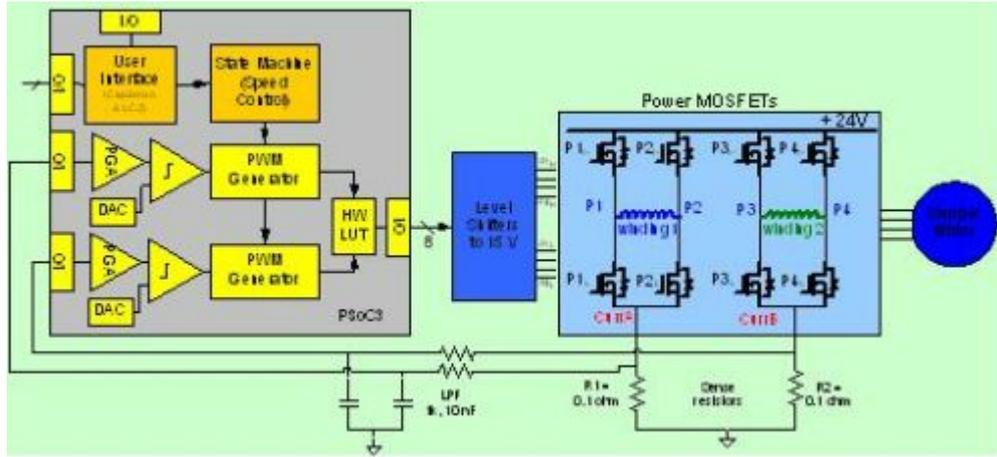


图5 步进电机细分控制结构框图

由图 5 所示，除了驱动电路和功率电路，整个系统的实现并不需要借助多于外部 IC。PSoC Creator 是 PSoC3 芯片的开发环境。PSoC Creator 向用户提供了便捷可视的原理图界面以方便配置片上硬件资源。下图为精细步进电机控制的片内原理图：

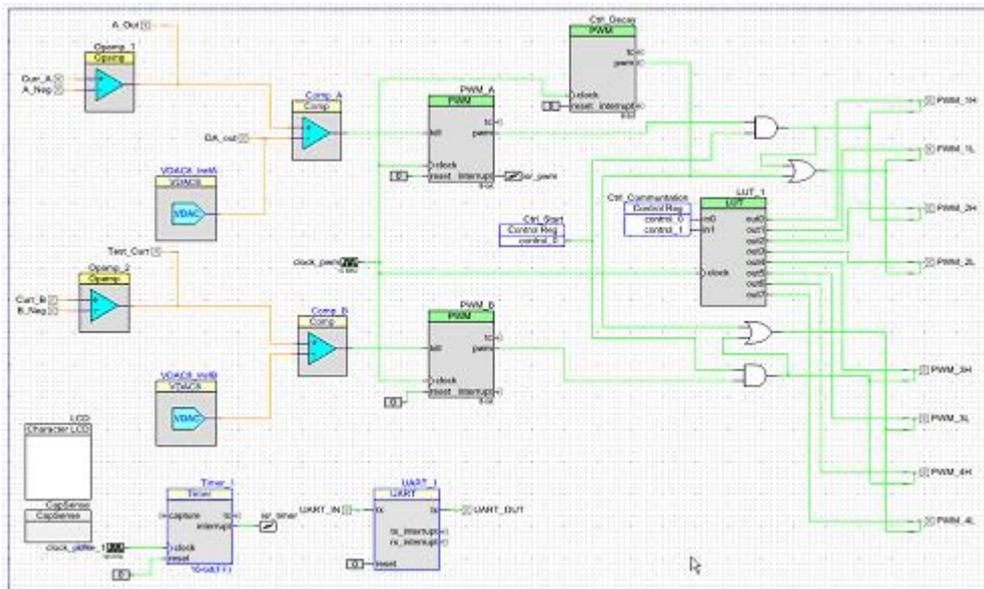


图6 PSoC Creator 中硬件设计原理图

其中，OP_AMP, VDACC8, COMP, PWM 构成了硬件的电流调节器。8 位的 DAC 给出类似正弦的参考波形。绕组电流采样电阻采样后再由片内放大器 OPAMP 放大，之后与 DAC 给定的参考波形相比较。当实际电流超过参考电流时，就通过 PWM 的 Kill 输入端关断 PWM,从而达到电流控制的目的。

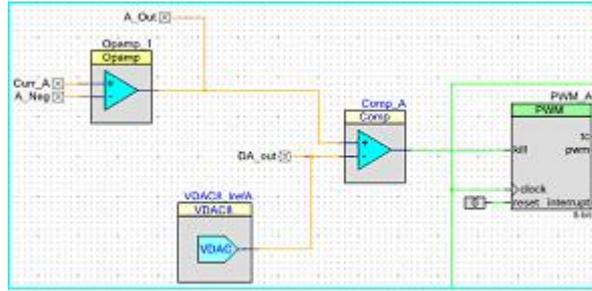


图7 步进电机细分电流控制原理图

LUT 是一个片上的硬件逻辑真值表，其根据控制寄存器 `Ctrl_Commutation` 给出的节拍而切换 PWM 在各个管脚的分配，从而起到硬件控制电流换向的功能。

`Ctrl_Decay` 则为调节电流衰减模式的控制器。它输出控制 PWM 信号来调节下桥臂开关管的状态。通过调节它的占空比大小就能动态的调节电流衰减的快慢。如下图所示，在 Kill 的时刻，上管被强制关断，而下管也被关断，这时电流为快速衰减。但是在 Decay Ctrl

输出信号翻转后，下管又被重新打开，这时电机又为慢速衰减。通过调节 Decay Ctrl 的脉宽就能实时的调节电流衰减的速度。

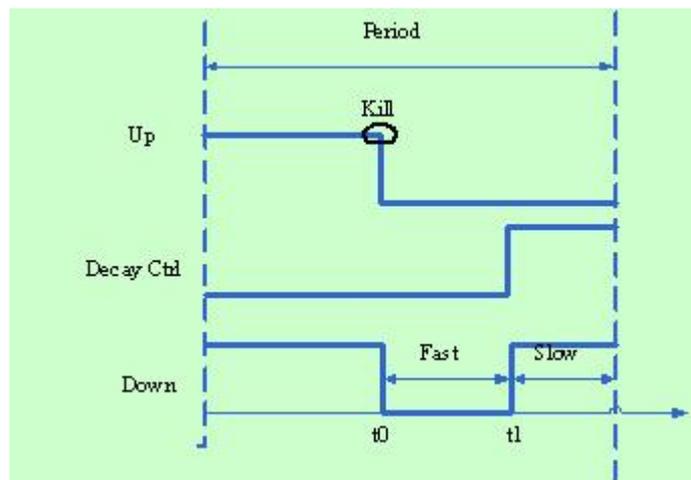


图8 步进电机电流衰减配置时序图

如图 8 所示，在上桥臂被强制关断后(Kill)，下桥臂在 $t_0 \sim t_1$ 时刻进行快速续流。而在 Decay-Ctrl 信号翻转后，下桥臂又被打开，进行慢速续流。

结语

基于 PSoC3(CY8C3866AXI-040)的步进电机控制方案利用片内丰富的资源实现步进电机的高精度控制。硬件电流细分控制由片上 8 位的 DAC，比较器，运放和带关断功能的 PWM 来完成。而可编程数字逻辑电路可以对电流衰减模式进行动态配置。