

Brian Wang

## 摘要:

步进电机因其低速大扭矩特性被广泛应用，但传统开环控制带来的噪音与震动问题限制了步进电机的应用场景。虽然基于 MCU 采样反馈的磁场定向控制 (FOC) 能有效解决上述痛点，但其对 MCU 算力及 ADC 采样带宽的高要求限制了系统的性价比。本文将深入探讨步进电机控制技术的演进：从基础的开环控制原理出发，介绍软件电流环 FOC 实现方案。最后，本文提出一种基于 TI 步进电机控制芯片的创新控制架构——通过解耦电流环与速度环，利用芯片的 VREF 模拟接口直接控制 H 桥电流，实现硬件电流闭环方案，在大幅降低 MCU 算力负担的同时，实现了媲美传统 FOC 的静音与平顺性能。

## 传统步进电机开环控制

传统上，步进电机多应用于开环控制，例如 TI 经典的 DRV8818 等产品，使用 STEP/DIR (脉冲/方向) 接口模式，通过 MCU 发波，实现基础的开环控制。为了进一步改善分辨率和平滑度，驱动芯片中还引入了细分技术，在 STEP 脉冲到来时，按照内置的 Microstepping Indexer 更新两相电流参考值，使两相电流近似满足正弦/余弦关系。DAC 参考电压随之更新，通过电流斩波环路控制 H 桥输出：

$$I_A = I_{FS} \cdot \cos(\theta)$$

$$I_B = I_{FS} \cdot \sin(\theta)$$

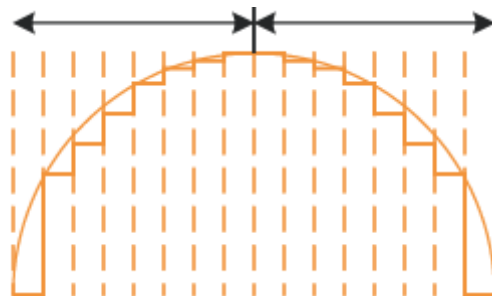


图 1. Micro-stepping 示意图

虽然细分技术使得相电流波形在时域上接近正弦波，但本质上是不考虑电机转子位置的开环控制。在每个细分步内，驱动器输出的电流相位保持恒定，不随负载扰动或转子实际位置进行动态调整。这种非连续的磁场跳变会产生转矩脉动，导致机械系统的静音和平顺性受到影响。

此外，在工作状态中，无论电机负载大小，驱动器始终维持线圈电流处于预设峰值。即使电机处于空载静止状态，驱动器依然向线圈注入满额电流，大量的电能被无谓地转化为热能，降低了系统能效，也限制了电机的过载能力和温升性能。

综上所述，传统的开环步进电机控制，虽然极大地降低了控制器的算力需求，但由于其缺乏位置反馈，无法实现最优的效率和驱动效果。要实现真正的高效、静音控制，必须引入闭环机制，步进电机的磁场定向控制 (FOC) 应运而生。

## 基于 MCU 的数字 FOC 算法实现

下图为步进电机的 FOC 控制框图。本质上，步进电机的 FOC 控制与常见的 PMSM 步进电机控制非常类似，将常见的 2 相式步进电机看作一个多极对数的 PMSM 电机可以帮助我们更加清楚理解该问题。

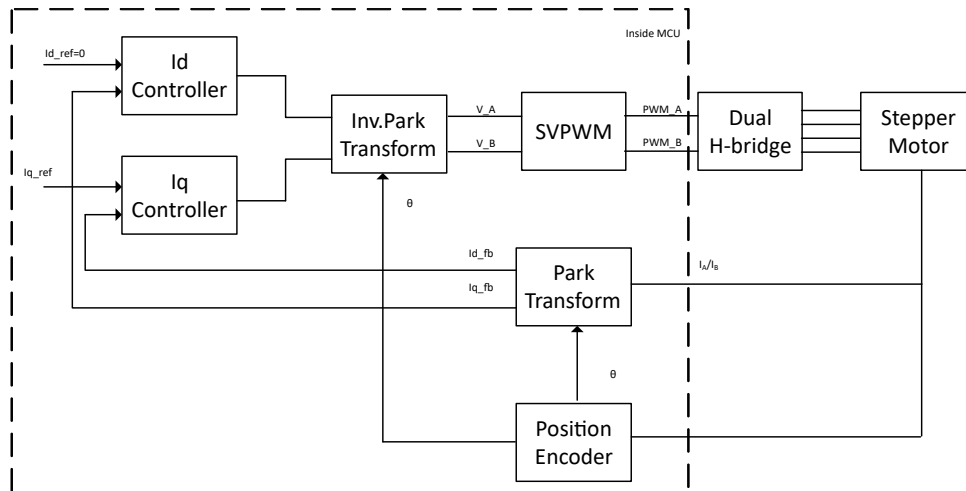


图 2. 基于 MCU 的数字步进电机 FOC 控制方案

首先，由于步进电机的 A 相和 B 相线圈在物理空间上呈  $90^\circ$  正交分布，我们采样得到的两相电流已经构成了一个静止的直角坐标系 ( $\alpha - \beta$  坐标系)。因此，在步进电机的控制中我们并不需要进行将三相坐标系转化为直角坐标系的 clark 变换。为了消除转子旋转对控制系统的非线性时变影响，必须引入同步旋转坐标系 ( $d-q$  轴)。利用 **Park 变换**，可将静止坐标系下的交流电流矢量投影至随转子磁场同步旋转的正交坐标系中：

其中  $\theta$  为通过编码器获取的转子电角度。

- **Id (直轴电流)**：产生沿着转子磁极方向的磁通。对于表贴式永磁体 (Surface PMSM) 特性的步进电机，该分量通常控制为 0，以避免定子磁场对转子永磁体造成去磁或产生无效热损耗。
- **Iq (交轴电流)**：产生垂直于转子磁极方向的磁通。该分量直接正比于电磁力矩  $T_{em}=k_t \cdot I_q$

通过这种变换，原本复杂的交流耦合系统被解耦为两个独立的直流控制回路，由于 Iq 始终垂直于转子磁场，力矩输出平滑恒定，大幅改善了前文提到开环系统的转矩脉动问题，使得对交流电机的控制可以像控制直流有刷电机一样线性且高效。在此基础上，我们可以再依照系统需求，为系统增加额外的速度和位置环，从而实现对于步进电机的完整闭环控制。

在 MCU 中，软件 FOC 的实现包含以下主要环节：

1. 模拟量采样：MCU 通过 ADC 模块采集 H 桥下臂采样电阻 (Shunt Resistor) 两端的电压信号，或通过霍尔、电流采样运放直接采样电机相电流。位置信号通常使用 MCU 的正交编码外设采集磁编芯片的 ABZ 输出信号。
2. 位置速度环路计算：根据当前位置进行路径规划和速度曲线规划，生成目标给定值 Iq 输入给到电流内环进行环路计算。
3. 坐标变换与误差计算：结合当前转子角度，系统执行前向 Park 变换解算出 Id, Iq 反馈值，并将其与目标指令值进行差值计算。利用比例积分 (PI) 控制器对电流误差进行补偿，计算出  $d-q$  坐标系下的电压指令  $U_d, U_q$ 。随后，通过逆 Park 变换将其转换回静止坐标系下的  $U_A, U_B$ 。
4. 空间矢量调制 (SVPWM)：通过空间矢量脉宽调制算法，将电压指令转化为各功率开关管的占空比信号 PWM\_A, PWM\_B 来驱动全桥电路生成所需的正弦驱动电流。

尽管 FOC 技术在抑制低频共振、降低噪声以及提升能效方面有明显优势，但 MCU 必须在极短的 PWM 周期内完成包含三角函数、矩阵运算及 PID 迭代在内的浮点运算。这对 MCU 的主频、指令集 (如 FPU、TMU 支持) 以及中断响应延迟提出了较高要求，需要配合 C2000 系列高性能实时控制 MCU 才能实现较好的控制效果。

综上所述，基于 MCU 的软 FOC 方案虽是目前精密步进电机控制的理想方案，但其对软硬件资源的高依赖性，限制了其在成本敏感系统中的应用。

## 基于 DRV8262 独立 H 桥模式的硬件级 FOC 控制架构

鉴于传统软件 FOC 方案对 MCU 算力及 ADC 采样带宽的高要求，本文优化提出一种基于“半闭环”的硬件级电流环架构。该方案旨在利用 TI DRV8262 驱动芯片内部集成的高速模拟比较器与电流调节逻辑，替代传统的软件 PID 电流控制环路，降低对 MCU 算力的要求。

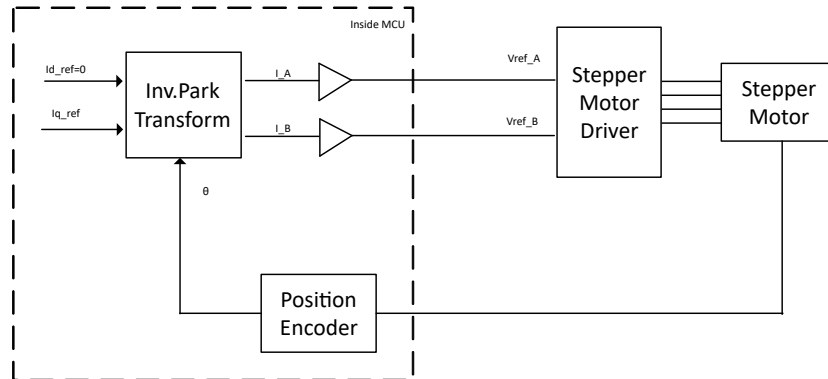


图 3. 基于电机控制芯片的半闭环 FOC 方案

实现步进电机矢量控制的核心约束，在于必须对定子 A、B 两相绕组的电流进行完全解耦和独立调节（即满足  $I_A = I_B$  的时变关系）。TI DRV8262 为代表的产品可以配置为独立 H 桥模式，通过芯片上两个独立的 Vref1 和 Vref2 分别独立设定两路独立 H 桥的参考电流值。

在此拓扑下，MCU 仅需计算经 Park 逆变换后的目标电流指令，并通过两路独立的 DAC 分别输出两个电压信号驱动芯片的 VREF1 与 VREF2 引脚。驱动芯片将通过内部的电流调制逻辑控制步进电机两相电流趋近 VREF1 和 VREF2 所对应的电流。此时驱动芯片可以等效为两路具备高带宽响应特性的压控电流源（VCCS），直接根据模拟电压指令对相电流进行闭环斩波控制。

需要注意的是，由于 DRV8262 的参考电压输入端仅支持正极性信号（ $VREF \geq 0$ ），而 FOC 算法输出的两项电流  $I_A, I_B$  为双极性正弦信号，因此需要在 MCU 侧实施特定的信号调制策略，在电流过零点进行“换相”。

具体而言，控制算法首先对目标电流指令取绝对值，并通过 DAC 输出；同时，提取目标电流的符号位，通过 GPIO 控制驱动器的相位引脚（PH）以切换电流极性。当正弦波经过零点时，DAC 输出电压降至零，同时 PH 引脚电平翻转，通过这种“DAC 调幅、GPIO 调相”的混合调制方式，在功率输出级无缝重构出完整的标准正弦波形。

与传统的全数字软件 FOC 方案相比，该硬件电流环架构在动态响应与资源占用方面表现出显著优势：

- **环路带宽的物理级提升：**软件电流环的带宽受限于 PWM 开关频率及 ISR 中断延迟（通常在 kHz 量级），而 DRV8262 内部模拟比较器的响应速度更快。这意味着系统对电流指令的跟踪几乎不存在相位滞后，极大地提升了电机在高动态负载下的稳定性。
- **计算资源的深度释放：**通过省略高频 PARK 变换、PID 运算与 SVPWM 调制模块，MCU 的算力要求大幅下降。这使得在资源受限的低成本 MCU（如 C2000 F28002x 系列或 Cortex-M0 平台）上部署高精度 FOC 算法成为可能，显著提升了系统的工程性价比。

## 结语

本文提出的基于 DRV8262 独立 H 桥模式的硬件 FOC 架构，创新性地结合了数字控制的灵活性与模拟电路的高带宽特性。通过硬件方案实现电流闭环调制该方案在保留矢量控制静音、平顺等核心优势的同时，大幅简化了软件架构。对于追求高性能、低成本且对静音性有严苛要求的机电系统设计而言，这种数模混合的控制方法具有重要的工程应用价值与参考意义。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月