

利用滑模观测器实现永磁同步电机的无传感器磁场定向控制

AN4398



简介

永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）是电机控制应用的首选之一。由于使用永磁转子，它还有较高的转矩与较小的外形尺寸，并且没有转子电流，这些方面均优于交流感应电机（AC Induction Motor, ACIM）。由于功率尺寸比很高，PMSM 可以帮助减小设计尺寸，同时不会损失转矩。得益于上述优势，PMSM 能够在各种可变频率驱动（Variable Frequency Drive, VFD）应用中使用。

磁场定向控制（Field Oriented Control, FOC）是控制基于 PMSM 的 VFD 的传统选择。FOC 将三相交流电机的相电流和转子磁通角作为输入，为三相电压源逆变器生成换相模式，使得到的定子磁通与转子磁通形成特定角度，从而提供最佳转矩和速度性能。FOC 主要通过将定子参考坐标系中的三相分量转换为转子磁通参考坐标系中的两个去耦分量实现此目标：一个去耦分量用于控制电机中的总磁通，另一个去耦分量用于控制转矩。

从定子参考坐标系转换为转子参考坐标系需要准确了解转子磁通角。可通过使用适当的位置传感器（在有传感器 FOC 中）或位置估算器（在无传感器 FOC 中）获得转子磁通角。在无传感器 FOC 中，面临的挑战是实现一个能够抑制温度、开关噪声和电磁噪声等干扰的稳定速度估算器。在存在未知信号和不确定性的情况下，滑模观测器是转子位置估算器的一种绝佳选择。

Microchip 提供了几个阐述 FOC 基本原理的文档。例如 AN2520《利用 PLL 估算器和基于公式的弱磁技术（FW）实现永磁同步电机（PMSM）的无传感器磁场定向控制（FOC）》（见[参考资料](#)）。

本文档涵盖以下主题：

- 永磁同步电机（PMSM）
- 磁场定向控制（FOC）原理
- 通过滑模观测器（Sliding Mode Observer, SMO）估算转子位置和速度
- 设计并实现无传感器 FOC 示例软件

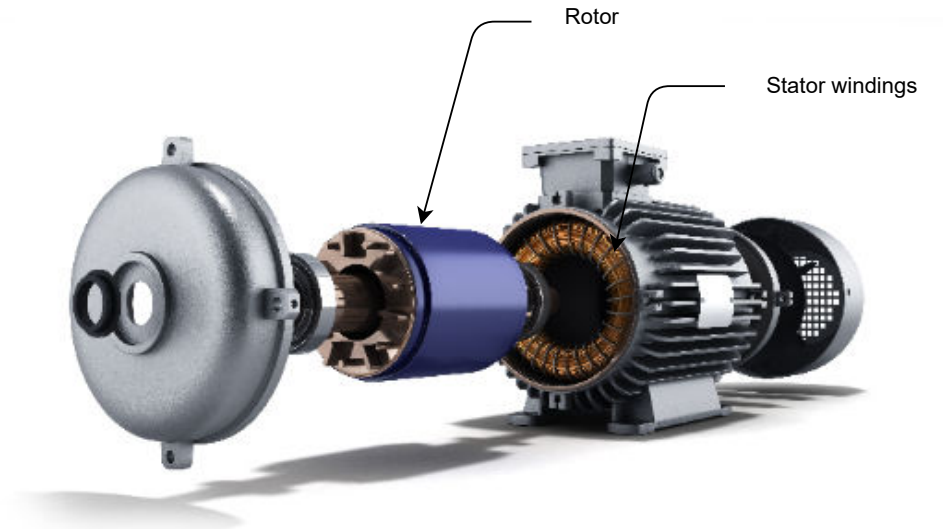
目录

简介.....	1
1. 永磁同步电机.....	3
1.1. 数学模型.....	4
2. 磁场定向控制.....	6
2.1. 基于 FOC 的可变频率 PMSM 驱动.....	6
3. 转子位置和速度估算.....	14
3.1. 启动过程.....	14
3.2. 滑模观测器.....	14
3.3. 转子角度计算.....	17
3.4. 转子速度计算.....	17
4. 磁场定向控制 (FOC) 实现.....	18
4.1. SAME70 MCU 特性和外设设置.....	18
5. 结论.....	21
6. 附录: 适用于电机控制应用的 32 位 MCU 的架构亮点.....	22
6.1. PIC32CM MC 系列.....	22
6.2. SAM D2x 和 C2x 系列.....	22
6.3. SAM D5x 和 SAM E5x 系列.....	22
6.4. PIC32MK 系列.....	23
6.5. SAM S70 和 SAM E70 系列.....	23
7. 参考资料.....	24
Microchip 网站.....	25
产品变更通知服务.....	25
客户支持.....	25
Microchip 器件代码保护功能.....	25
法律声明.....	25
商标.....	26
质量管理体系.....	27
全球销售及服务网点.....	28

1. 永磁同步电机

永磁同步电机（PMSM）是由三相控制交流电源驱动的交流同步电机。下图给出了典型 PMSM 的拆分视图。

图 1-1. PMSM 电机的拆分视图



PMSM 由称为定子的静止部分和称为转子的旋转部分组成。定子由三相绕组组成，当用平衡的三相电压激励时，它会产生旋转磁场。转子的磁芯上插入了永磁体，会产生转子磁场。转子磁场与定子旋转磁场相互作用，产生转子转矩。

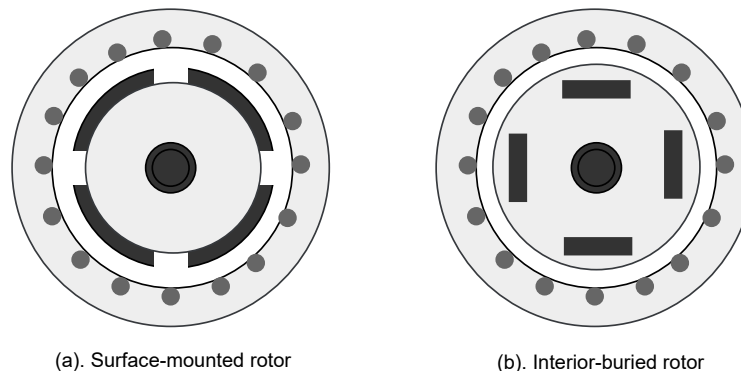
根据转子的结构，PMSM 大致分为以下两类：

- 表面贴装 PMSM（Surface-mounted PMSM，SPMSM）
- 内置 PMSM（Interior-buried PMSM，IPMSM）

SPMSM 将永磁体固定在转子表面，这会在转子和定子磁芯之间形成对称径向气隙磁阻路径。IPMSM 将永磁体插入到转子磁芯内部，这会在转子和定子磁芯之间形成非对称径向气隙磁阻路径。

下图给出了 SPMSM 和 IPMSM 转子配置的横向剖面图。

图 1-2. 转子横向剖面



1.1 数学模型

在设计基于 PMSM 的可变频率驱动 (VFD) 的控制器和观测器时, PMSM 的有效数学模型至关重要。即使 PMSM 本质上是非线性系统, 在大多数实际应用中, 都可以近似建模为不随时间变化的线性动态系统。本节简要介绍了 PMSM 在静止和旋转参考坐标系中的简单线性动态模型。

1.1.1 静止参考坐标系模型

以下公式代表 PMSM 的静止模型:

公式 1-1. 静止参考坐标系模型

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + p \mathbf{L}_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

其中:

- $\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$ 是静止参考坐标系中的定子电压
- $\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$ 是静止参考坐标系中的定子电流
- $\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$ 是静止参考坐标系中的定子反电动势
- R_s 是定子每相电阻
- $p = d/dt$ 是微分算子

公式 1-2. 电感矩阵

$$\mathbf{L}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) & \frac{L_d - L_q}{2} \sin(2\theta_e) \\ \frac{L_d - L_q}{2} \sin(2\theta_e) & \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) \end{bmatrix}$$

- L_d 是绕组轴与转子磁通轴对齐时的电感
- L_q 是绕组轴与转子磁通轴正交时的电感
- θ_e 是转子磁通角

公式 1-3. 反电动势

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = w_e \lambda_m \begin{bmatrix} -\sin(2\theta_e) \\ \cos(2\theta_e) \end{bmatrix}$$

- λ_m 是永磁体磁链
- w_e 是电机的电气速度

1.1.2 旋转参考坐标系模型

PMSM 的旋转参考坐标系模型通过 PMSM 公式从静止参考坐标系到旋转参考坐标系的线性变换 (Park 变换) 得到。这种变换实质上是将所有正弦变化的分量转换为两个直流分量, 从而简化了利用经典控制理论进行控制和分析的过程。第一个分量与转子磁通 (d 轴) 对齐, 而第二个分量与转子磁通 (q 轴) 正交。模型的分步推导超出了本文档的范围, 因此不做讨论。

以下公式给出了 Park 变换后旋转参考坐标系中的最终模型。

公式 1-4. 旋转参考坐标系模型

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + p \mathbf{L}_{dq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \mathbf{J} \omega_e \mathbf{L}_{dq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + w_e \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_m \end{bmatrix}$$

其中:

- $\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$ 是旋转参考坐标系中的定子相电压矢量
- $\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$ 是旋转参考坐标系中的定子相电流矢量
- $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 是旋转矩阵

公式 1-5. 旋转参考坐标系中的电感矩阵

$$\mathbf{L}_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}$$

其中:

- L_d 是 d 轴电感
- L_q 是 q 轴电感

2. 磁场定向控制

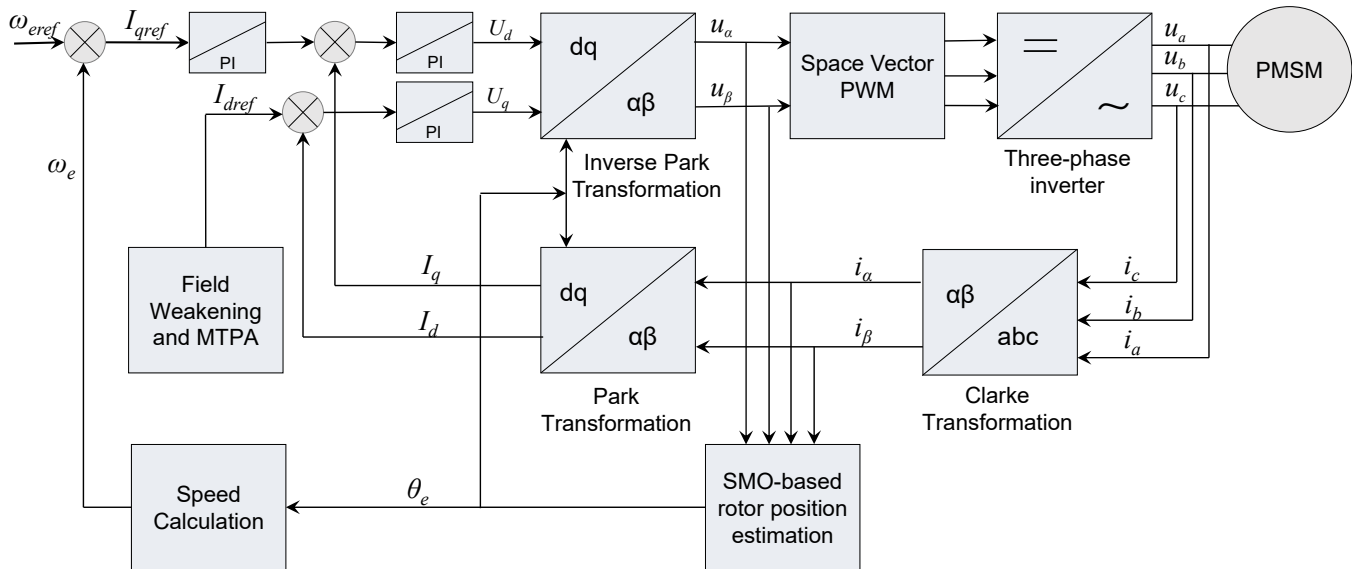
磁场定向控制（FOC）将三相交流电机的相电流和转子磁场矢量角作为输入，为三相电压源逆变器生成换相模式。得到的定子磁通与转子磁场矢量成特定角度，从而提供最佳转矩和速度性能。

下一节讨论了用于控制 PMSM VFD 的基本 FOC 方案。

2.1 基于 FOC 的可变频率 PMSM 驱动

下图给出了基于 FOC 的典型 PMSM 可变频率驱动简单框图：

图 2-1. FOC 框图



以下步骤总结了基本无传感器 FOC 操作：

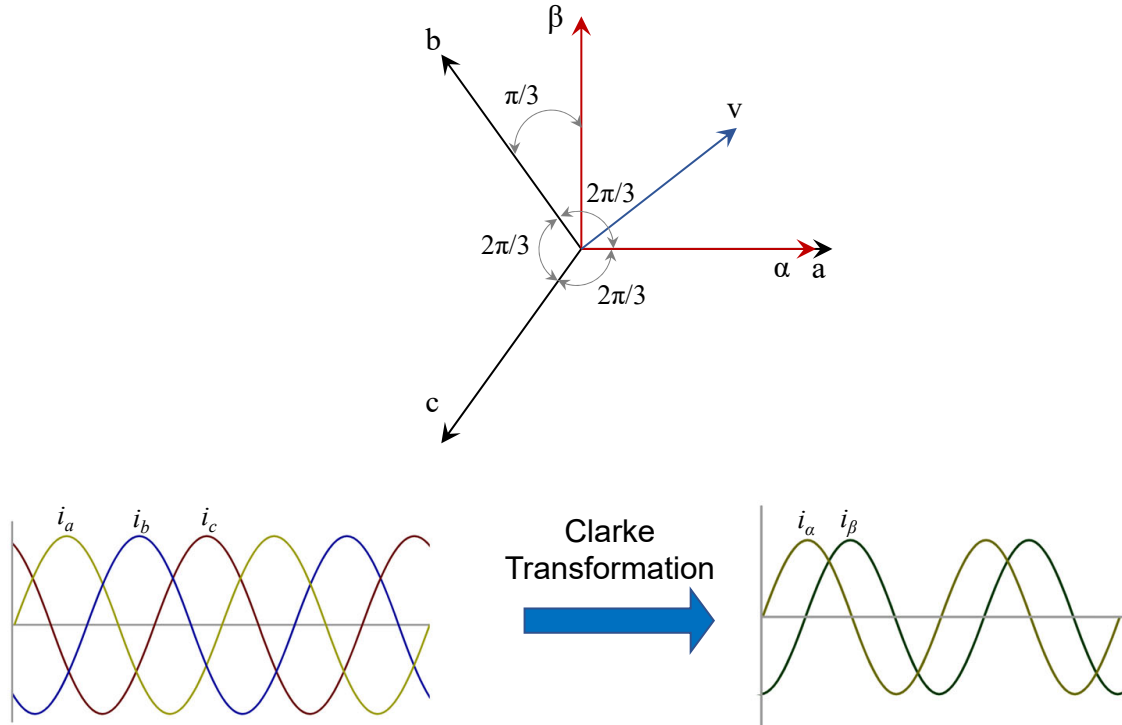
1. **测量流入电机的电流：**可通过多种方法测量流入电机的三相电流。一些常见选项包括使用基于变压器的霍尔效应磁场传感器或者使用策略性放置的一个、两个或三个电流检测电阻进行测量。
2. **估算转子磁通角：**可通过基于反电动势的算法或通过高频脉冲注入来估算转子磁通角。
3. **将测得的电流转换为 $\alpha\beta$ 参考坐标系：**通过 Clarke 变换将测得的电机相电流转换为 $\alpha\beta$ 参考坐标系中的两个正交分量。
4. **将 $\alpha\beta$ 电流转换为 dq 电流：**使用估算的转子磁通角通过 Park 变换将 $\alpha\beta$ 转换为 dq 参考坐标系中的两个正交分量。
5. **将测得的 dq 电流与所需电流进行比较，生成误差信号：**将控制转矩所需的 q 轴参考电流与控制磁通所需的 d 轴电流与其对应的测得量进行比较以生成相应误差信号。
6. **通过误差信号计算控制电压：**使用误差信号计算校正电压。通常通过使用 PI 稳压器的闭环反馈机制执行此任务。
7. **将控制电压施加到电机端子：**将 dq 参考坐标系中的校正电压转换回 abc 参考坐标系中的电压。通过一些功率切换技术将这些电压施加到电机端子。在基于 MCU 的系统中，通常使用空间矢量调制等 PWM 调制技术执行此任务。

下一节更加详细地介绍了基于 FOC 的可变频率驱动的各个模块。

2.1.1 Clarke 变换

Clarke 变换将三轴参考坐标系 (abc) 中的电气信号转换为两轴正交参考坐标系 ($\alpha\beta$) 中的信号，如下图所示。

图 2-2. Clarke 变换



此变换用以下公式表示：

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$i_\alpha = i_a$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c)$$

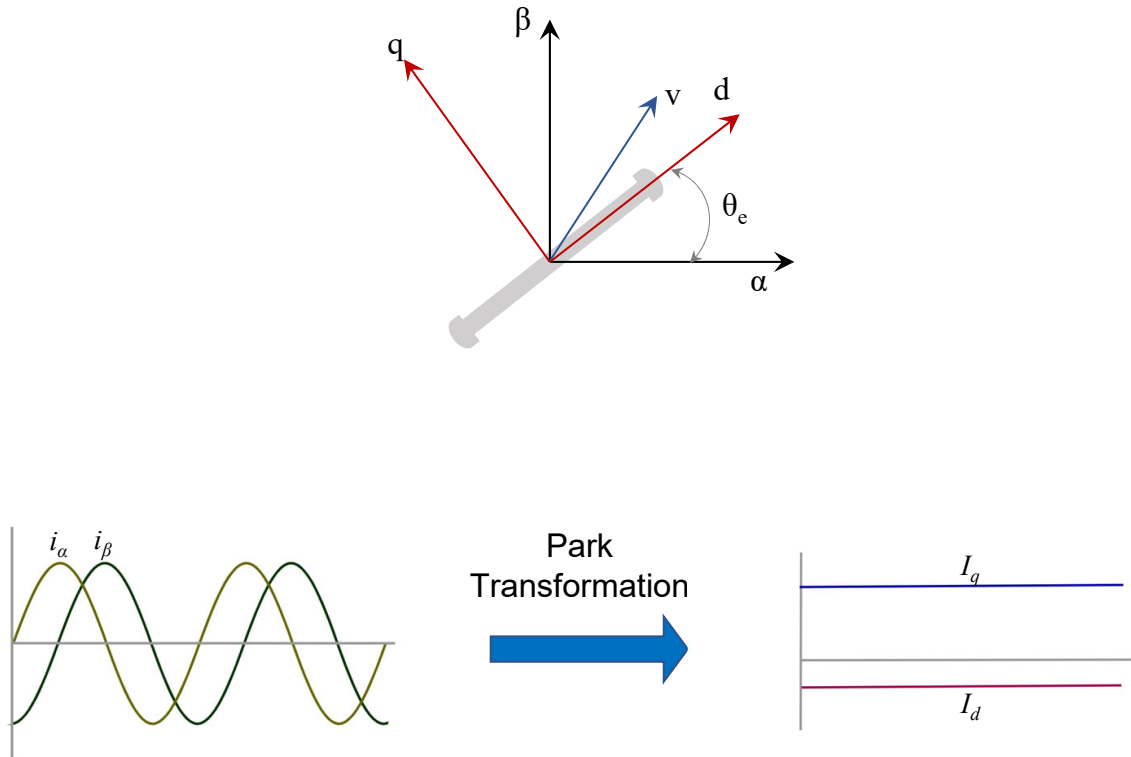
其中：

i_a 、 i_b 和 i_c 是 abc 参考坐标系中的三相电流， i_α 和 i_β 是 $\alpha\beta$ 参考坐标系中的两相正交电流。

2.1.2 Park 变换

Park 变换将两轴正交静止参考坐标系 ($\alpha \beta$) 中的电气信号转换为两轴正交旋转参考坐标系 (dq) 中的信号，如下图所示。

图 2-3. Park 变换



此变换用以下公式表示：

$$I_d = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta$$

$$I_q = -i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta$$

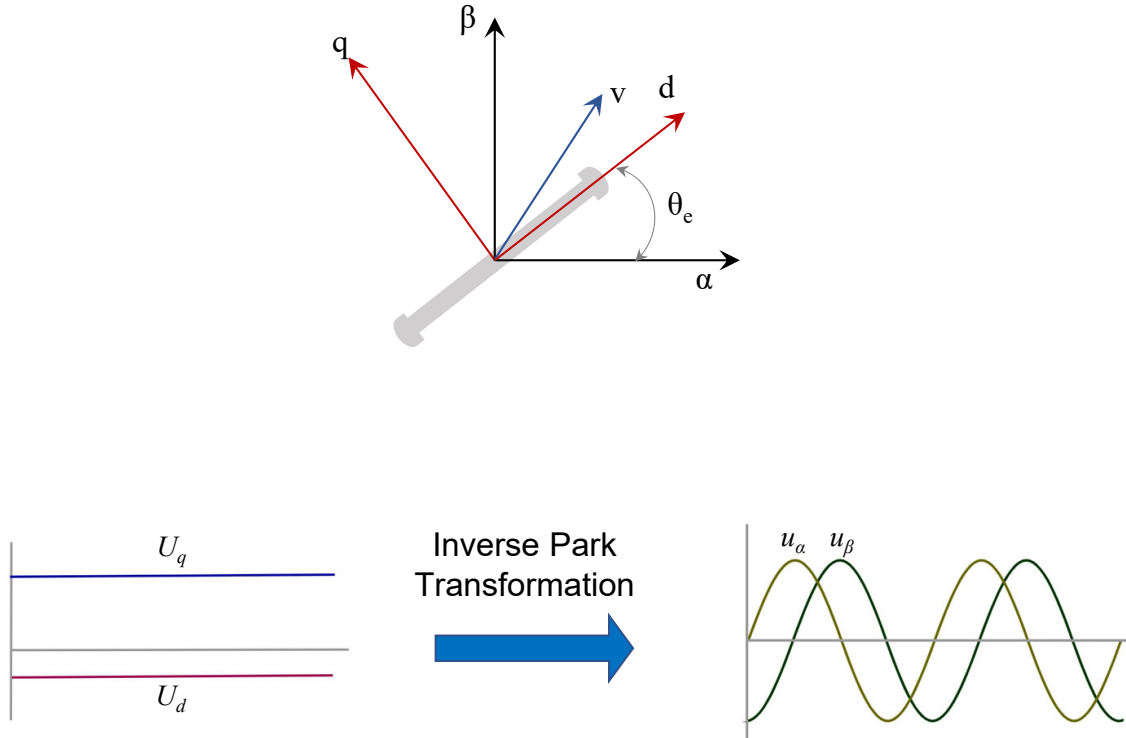
其中：

i_α 和 i_β 是两轴正交 $\alpha \beta$ 参考坐标系中的电流， I_d 和 I_q 是两轴正交 dq 旋转参考坐标系中的电流。

2.1.3 Park 反变换

Park 反变换将两轴正交旋转参考坐标系 (dq) 中的电气信号转换为两轴正交静止参考坐标系 ($\alpha\beta$) 中的信号，如下图所示。

图 2-4. Park 反变换



此变换用以下公式表示：

$$u_\alpha = U_d \cos(\theta_e) - U_q \sin(\theta_e)$$

$$u_\beta = U_d \sin(\theta_e) + U_q \cos(\theta_e)$$

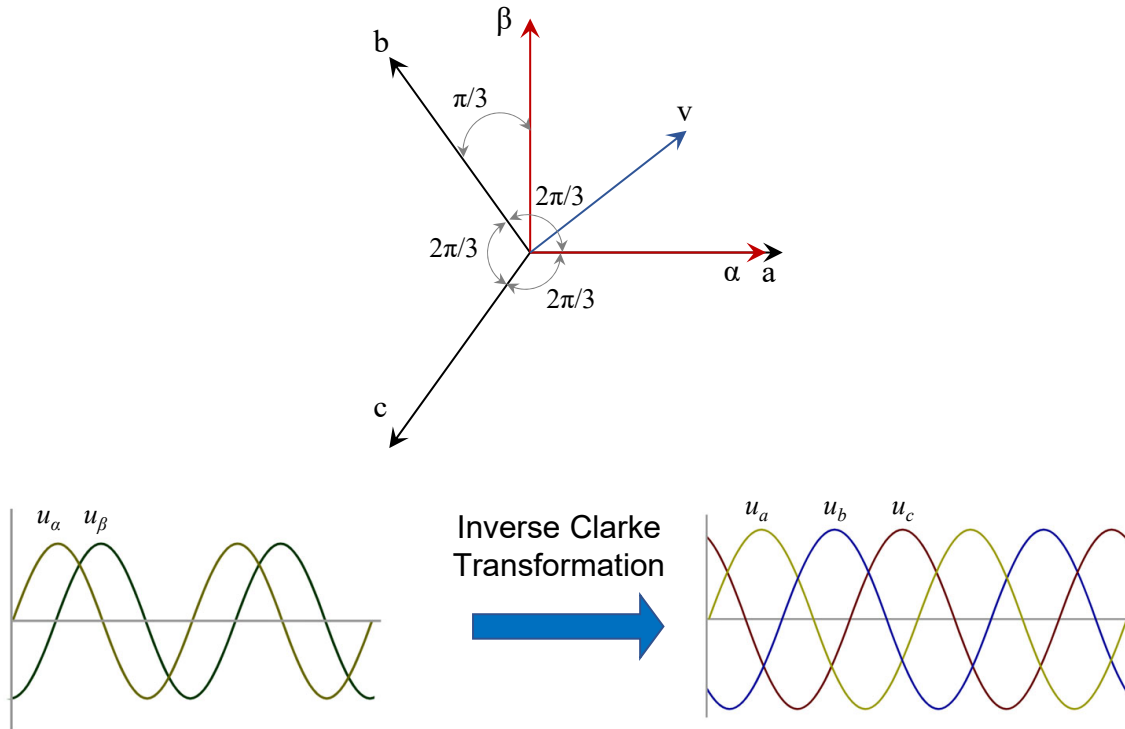
其中：

U_d 和 U_q 是两轴正交 dq 旋转参考坐标系中的电压， U_α 和 U_β 是两轴正交 $\alpha\beta$ 参考坐标系中的电压。

2.1.4 Clarke 反变换

Clarke 反变换将两轴正交静止参考坐标系 ($\alpha \beta$) 中的电气信号转换为三轴参考坐标系 (abc) 中的信号，如下图所示。

图 2-5. Clarke 反变换



此变换用以下公式表示：

$$U_a = U_\alpha$$

$$U_b = -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta$$

$$U_c = -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta$$

其中：

U_α 和 U_β 是 $\alpha \beta$ 参考坐标系中的两相正交电压， U_a 、 U_b 和 U_c 是 abc 参考坐标系中的三相电压。

2.1.5 比例积分控制器

比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器是电机控制应用中最广泛使用的算法。尽管它可能不是所有应用的最优控制器，但很容易理解和调整。以下公式描述了传统 PI 控制器：

公式 2-1. 跟踪误差

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

公式 2-2. PI 控制器

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

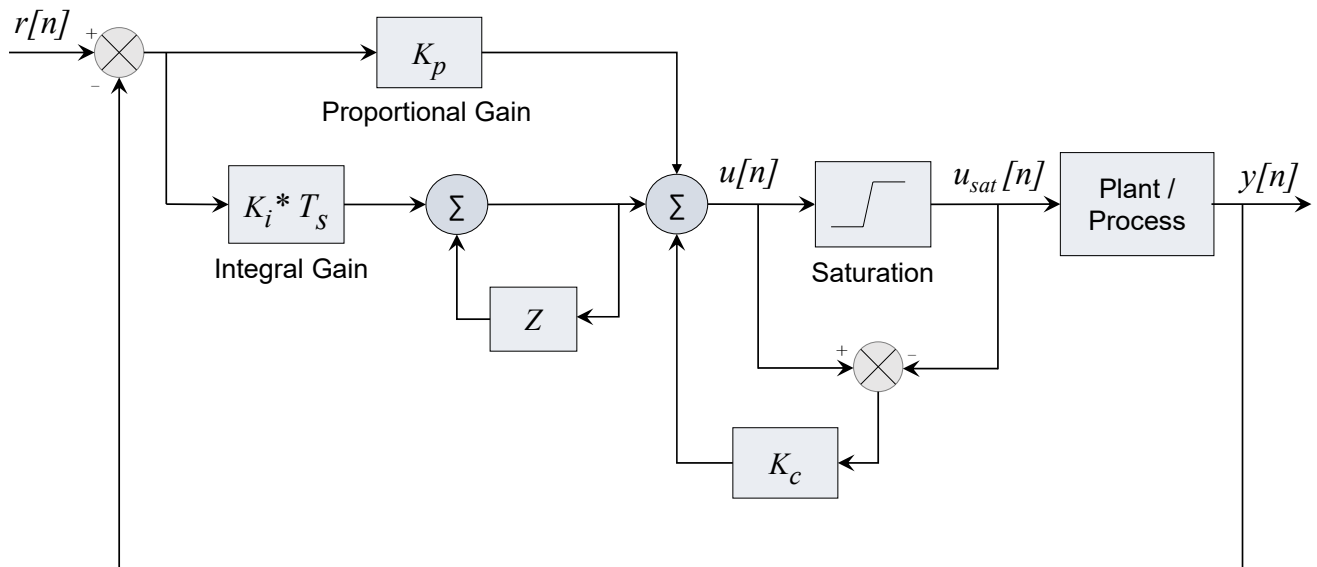
其中：

- $r(t)$ 和 $y(t)$ 是参考和实际过程/被控对象信号
- K_p 和 K_i 是比例增益和积分增益

实际 PI 控制器会面临积分器饱和的问题。积分器饱和是被控对象或过程中出现较大跟随误差时发生的现象。即使输出已经饱和，在这种跟随误差条件下，积分器也会继续累加。随后，在被控对象达到其最终值而导致过大振荡时，积分器会解除饱和状态。为了避免积分器在输出饱和时进行累加，应采用抗饱和技术。

下图给出了采用反计算抗饱算法的 PI 控制器。

图 2-6. 分立 PI 控制器



2.1.6 空间矢量脉宽调制

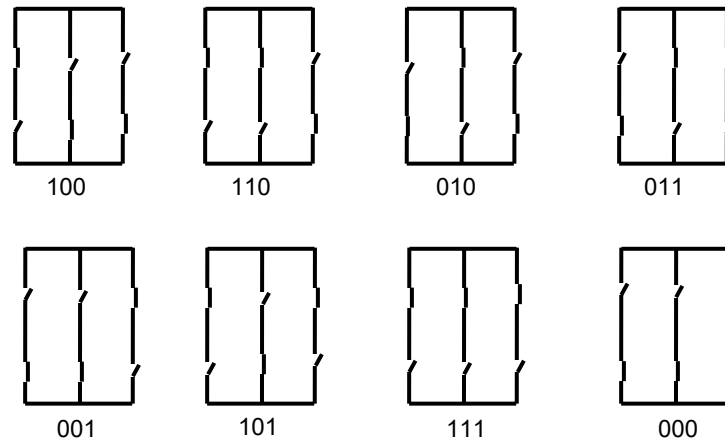
空间矢量脉宽调制（Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM）是驱动两级电压源逆变器的传统技术，具有以下优势：

- 改善相电压的谐波内容
- 将直流总线利用范围提高约 15%

下一节介绍了 SVPWM 的原理。

逆变器每相输出可以是两种状态中的任一种：连接到负电源轨时为 0，连接到正电源轨时为 1。因此，三相逆变器可以有 $2^3 = 8$ 种可能的状态，如下图所示。

图 2-7. 空间矢量调制



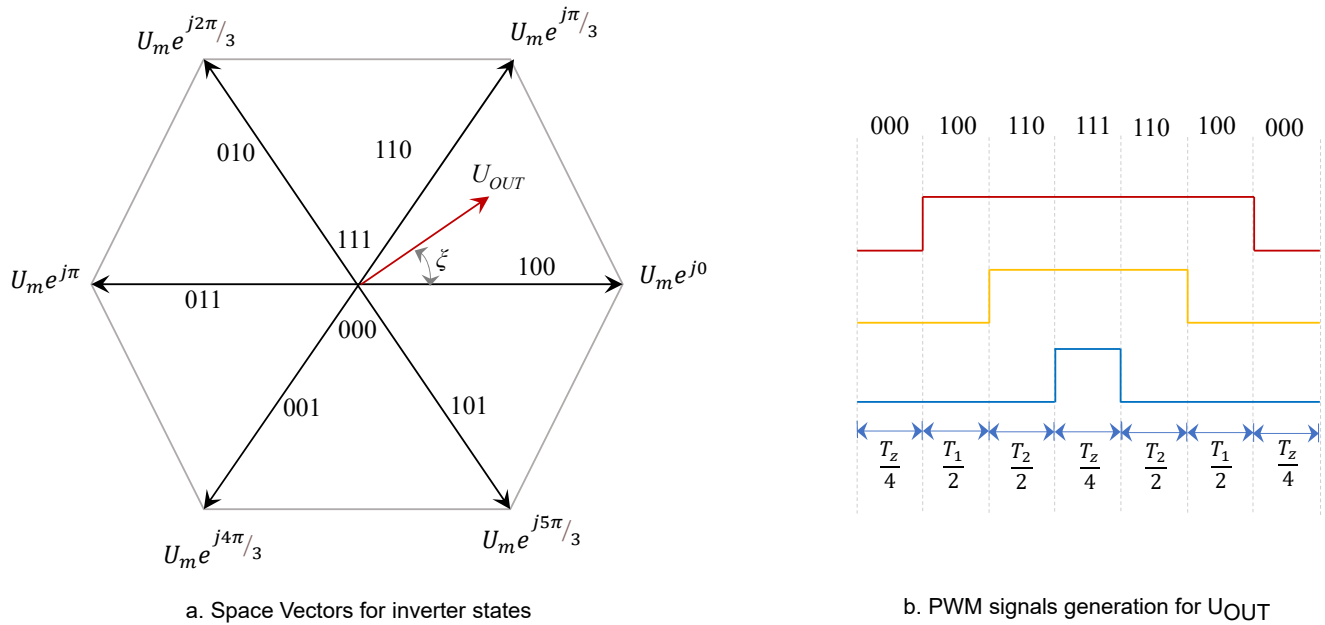
每种状态代表一种幅度和相位角的空间矢量，如下表所示：

表 2-1. 幅度和相位角

索引	状态	空间矢量
0	000	0
1	100	$U_m e^{j0}$
2	110	$U_m e^{j\pi/3}$
3	010	$U_m e^{j2\pi/3}$
4	011	$U_m e^{j\pi}$
5	001	$U_m e^{j4\pi/3}$
6	101	$U_m e^{j5\pi/3}$
7	111	0

索引为 0 和 7 的状态为零状态，因为这两个状态下的所有相都没有线间电压。除了零状态以外的所有状态均为有效状态，代表空间矢量平面中某种幅度和相位的相。下图给出了这些空间矢量。

图 2-8. 空间矢量调制



SVPWM 技术通过在两个相邻有效矢量（二者之间有所需矢量）和零矢量之间进行调制生成具有特定幅度和角度的空间矢量。由于会在不同状态之间转换，因此状态转换之间仅会发生一次功率开关转换。

公式 2-3. 计算所需空间矢量

$$U_{OUT} = \frac{1}{T_s} \left(T_k U_m e^{jk\pi/3} + T_l U_m e^{jl\pi/3} + \frac{T_z}{2} U_0 + \frac{T_z}{2} U_7 \right)$$

$$T_s = T_k + T_l + T_z$$

其中：

- U_m 是最大交流峰值电压
- T_s 是 PWM 周期
- T_k 和 T_l 是施加相邻有效矢量的时间。
- U_0 和 U_7 分别是 0 状态和 7 状态对应的零矢量
- T_z 是施加零矢量的时间

3. 转子位置和速度估算

转子位置的精确值对于独立控制 PMSM 转矩和磁通十分重要。可通过使用专用转子位置传感器（有传感器技术）或使用位置估算器（无传感器技术）获得转子位置。

基于反电动势信号的无传感器技术是一类常见的无传感器技术。观测器将相电流和电压作为输入，然后确定 PMSM 的转子反电动势，接着使用反电动势来计算转子位置。这些技术的一个主要弊端是，需要使用反电动势的最小值来估算转子的电气位置。因此，这些技术需要通过开环启动过程在执行 FOC 之前启动电机。

下一节先介绍简单的开环启动过程，接着介绍如何使用滑模观测器实现基于反电动势的角度和速度估算技术。

3.1 启动过程

基于反电动势的无传感器位置估算技术需要使用反电动势的最小值来估算转子的电气位置。开环启动过程驱动 PMSM 至其速度达到最小值，此时反电动势值足以估算转子位置。

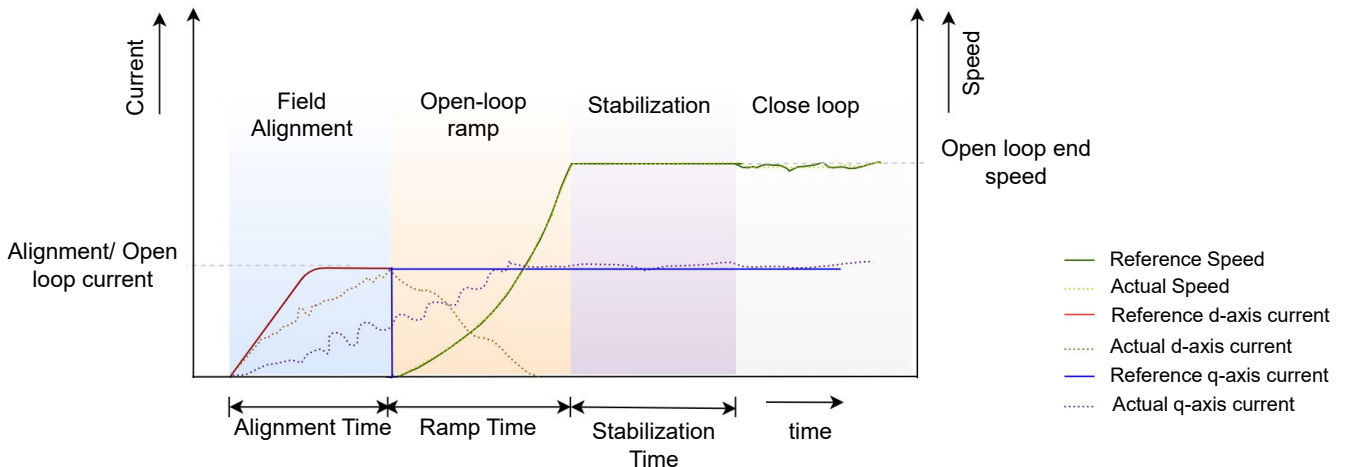
在开环启动过程中，速度环被禁用。通过使用假定的转子位置角进行转换以在 dq 参考坐标系中直接控制电流。

完整启动过程可分为以下三个阶段：

- **初始磁场对齐：** 该阶段通过在定子相绕组中施加直流电流将 PMSM 转子锁定到特定转子位置。可通过两种方法实现： d 轴对齐和 q 轴对齐。下图给出的是 d 轴对齐方法，其中 d 轴电流在固定转子位置角度下逐渐上升至特定值。
- **开环斜坡：** 在该阶段，转子位置在用户定义的斜坡时间内以特定 q 轴电流不断上升，以实现反电动势观测器所需的最小速度。最小斜坡时间和速度取决于 PMSM 驱动的电气和机械参数。为了实现可靠启动，需要正确调整斜坡时间和参考电流。
- **稳定：** 该阶段允许 PMSM 以恒定开环速度旋转。该步骤确保平滑转换到闭环模式。

完整启动过程如下图所示：

图 3-1. 开环启动过程

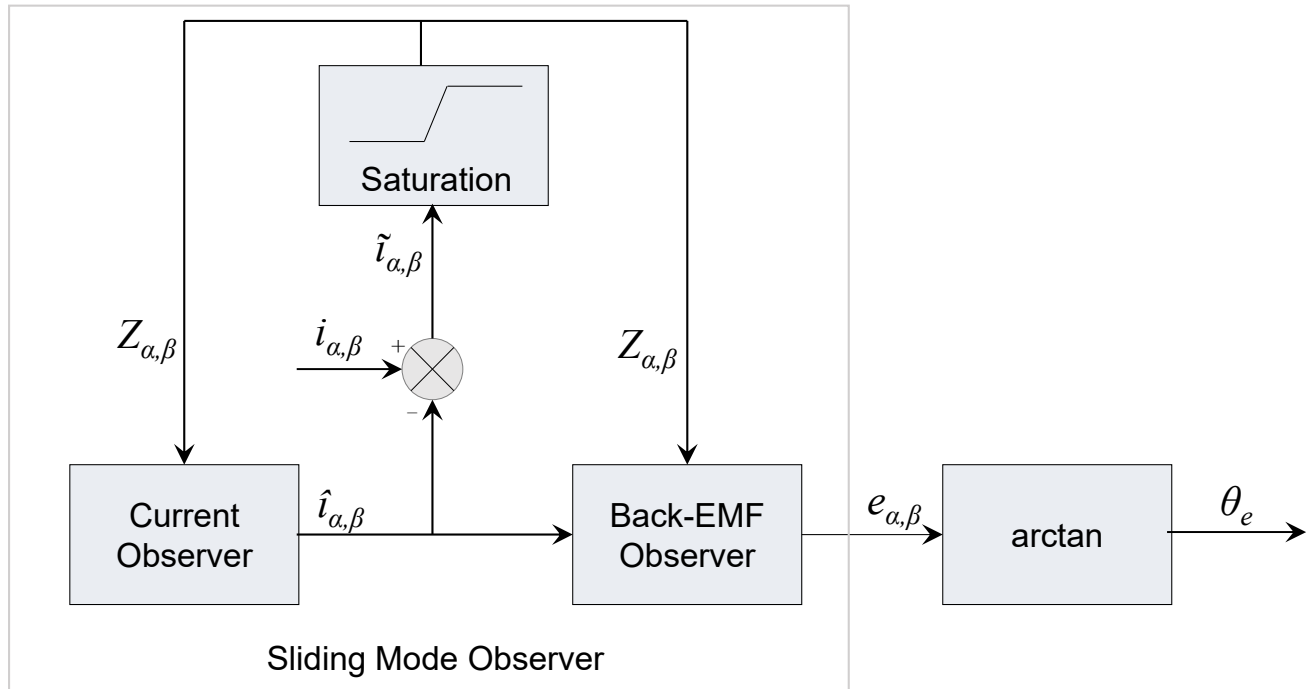


3.2 滑模观测器

滑模观测器（SMO）是一种非线性观测器，用于根据测得的输入和输出估算可观测系统的内部状态。在此应用中，SMO 用于估算 PMSM 的反电动势。与传统线性反电动势转子位置和速度估算相比，使用 SMO 的主要优势在于，当存在未知信号和不确定性时，SMO 的稳健性极高。

SMO 使用 PMSM 系统模型、电压和电流矢量输入估算反电动势。下图给出了基于 SMO 的转子位置和速度估算方法的简化框图。

图 3-2. 基于滑模观测器的角度计算



下面一组公式代表 PMSM 电机的状态空间模型：

公式 3-1. 当前状态空间

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}' = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$$

公式 3-2. 反电动势状态空间

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}' = w_e \mathbf{J} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

观测器可表示为：

公式 3-3. 滑模电流观测器

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix}' = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \hat{U}_\alpha \\ \hat{U}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma(i_\alpha - \hat{i}_\alpha) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

公式 3-4. 反电动势观测器

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix}' = w_e \mathbf{J} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} - \mathbf{L} \begin{bmatrix} \sigma(i_\alpha - \hat{i}_\alpha) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

其中：

- σ 是滑动函数， \mathbf{L} 是反电动势观测器极点放置矩阵

根据公式，估算误差可表示为：

公式 3-5. 电流估算误差动态特性

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix}' = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma(i_a - \hat{i}_a) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

公式 3-6. 反电动势估算误差动态特性

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}' = w_e \mathbf{J} \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} + \mathbf{L} \begin{bmatrix} \sigma(i_a - \hat{i}_a) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

其中：

- $\begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - \hat{i}_a \\ i_\beta - \hat{i}_\beta \end{bmatrix}$ 是电流估算误差
- $\begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a - \hat{e}_a \\ e_\beta - \hat{e}_\beta \end{bmatrix}$ 是反电动势估算误差

在设计中，滑动函数 σ 是估算误差的不连续函数，以便使滑动条件得到保证，并且系统状态在有限时间内强制为 0。本文档使用以下滑模函数：

公式 3-7. 滑模函数

$$\sigma(x) = \begin{cases} \frac{mx}{\varphi} & \text{if } |x| < \varphi \\ m, & \text{if } x \geq \varphi \\ -m & \text{if } x \leq -\varphi \end{cases}$$

如果滑模函数中的 m 值足够大，将达到滑动条件，此时误差动态特性变为 0。这意味着：

$$\begin{bmatrix} \sigma(i_a - \hat{i}_a) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix} \rightarrow -\frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}$$

因此，从公式可知，反电动势观测器的误差动态特性可表示为：

公式 3-8. 达到滑动条件后的反电动势观测器

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}' = \left(w_e \mathbf{J} - \frac{1}{L_s} \mathbf{L} \right) \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}$$

对于稳定的反电动势观测器，矩阵 $\left(w_e \mathbf{J} - \frac{1}{L_s} \mathbf{L} \right)$ 应具有负特征值。换句话说，特征值为 λ 时，可通过以下公式确定矩阵 \mathbf{L} ：

$$w_e \mathbf{J} - \frac{1}{L_s} \mathbf{L} = \lambda \mathbf{I}$$

或者，

公式 3-9. 反电动势观测器极点放置矩阵

$$\mathbf{L} = -L_s(\lambda \mathbf{I} - w_e \mathbf{J})$$

3.3 转子角度计算

根据观察到的反电动势，使用以下公式计算转子位置：

$$\theta_e = \tan^{-1}(e_\beta/e_\alpha) - \text{sign}(w_e) \pi/2$$

其中：

- 符号(ω_e)等于速度符号(ω_e)

3.4 转子速度计算

可使用观测到的转子位置值计算转子速度。在移动平均滤波器中，使用转子位置角度的增量变化来计算速度。

$$\theta_e(n) = \frac{1}{NT_s} \left[\Delta\theta_e(n) + \Delta\theta_e(n-1) + \dots + \Delta\theta_e(n-N+1) \right]$$

其中：

N 是移动平均滤波器中的采样数， T_s 是采样时间， $\Delta\theta_e$ 是电气转子位置的增量变化。

使用截止频率为 ω_c 的低通滤波器（Low Pass Filter, LPF）对计算的转子速度进一步滤波，以避免可能影响结果的意外干扰。LPF 可在采样时间 T_s 如下的离散时间内实现：

$$\theta_{eFilt}(n) = (1 - \theta_c T_s) \theta_{eFilt}(n-1) + \theta_c T_s \theta_e(n)$$

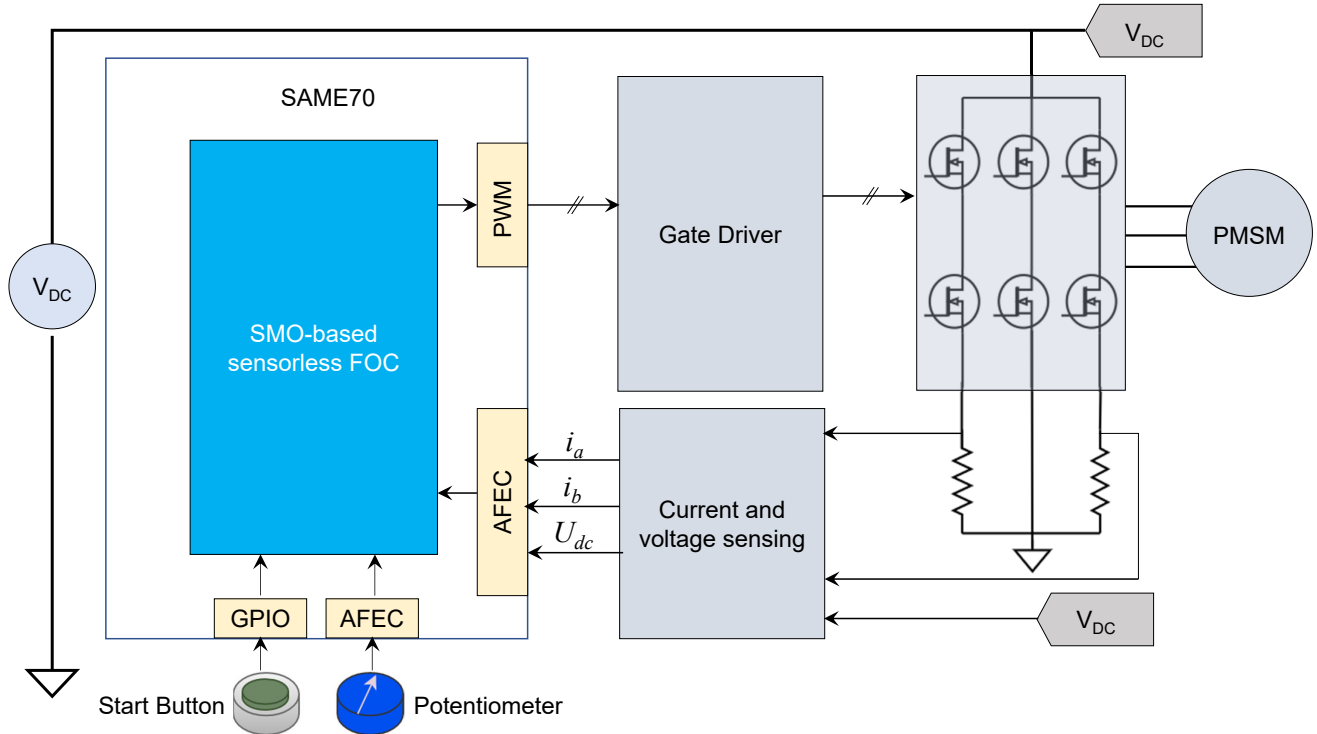
4. 磁场定向控制（FOC）实现

Microchip 丰富的 32 位单片机可满足各种应用，因此成为电机控制应用的常见选择。有关 Microchip 32 位电机控制 MCU 产品组合的更多详细信息，请参见附录。

本章以 Microchip 的 SAME70 MCU 为例概述了基于 SMO 的无传感器 FOC 实现细节。相关实现细节同样适用于其他 Microchip 32 位 MCU。

下图所示为基于 SMO 的无传感器 FOC PMSM 驱动的简化系统级图：

图 4-1. 基于 SMO 的无传感器 FOC PMSM 驱动的系统级图



4.1 SAME70 MCU 特性和外设设置

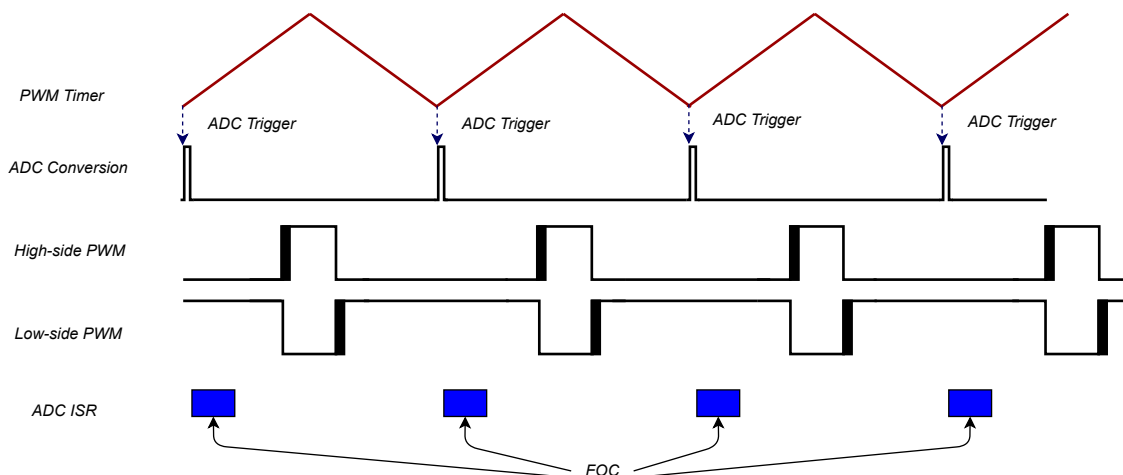
SAME70 单片机包含 300 MHz Arm® Cortex®-M7 内核、最高 64 KB 的紧密耦合内核存储器（用于快速 FOC）以及最高 2 MB 的闪存（用于创建高性能应用）。它有一对双采样保持（S/H）12 位 ADC 引擎，12 位模式下的采样速率最高 2 MS/s，最多八个 PWM 通道，能够在边沿对齐或中心对齐模式下生成带死区的互补 PWM。更多信息，请参见 SAME7x 数据手册。

4.1.1 硬件时序和同步

磁场定向控制需要准确的时序来执行硬件和软件功能以实现最佳电机控制性能。SAME70 MCU 的电机控制专用外设能够以最少用户设置在硬件级处理这些时序要求。

下图说明了硬件时序和同步的实现。

图 4-2. 硬件时序和同步



除了生成三相 PWM 信号以外，单片机的 PWM 外设还会在发生周期匹配事件时周期性触发 ADC 通道。触发的 ADC 通道将相电流 A 和相电流 B 作为输入并将这些信号转换为其数字等效信号，以供软件使用。为了获得最佳性能，会同时对两个相电流进行采样。除了相电流以外，软件还测量直流总线电压。完成相电流的 ADC 转换后，将产生中断。使用产生的中断执行启动和后续 FOC 任务。在 PWM 模块中更新计算的 PWM 周期以启动电机。

4.1.2 电机控制关键外设使用情况

4.1.2.1 AFEC 外设

使用 AFEC (ADC) 测量模拟量。使用四个通道测量相电流 A、相电流 B、直流总线电压和电位器读数。通过 PWM 触发转换 (零匹配 + 开关延时偏移)。

4.1.2.2 PWM 外设

使用该外设来生成三对互补 PWM 信号。还需使能故障功能来异步关闭输出波形。

4.1.3 软件架构

软件执行以下任务：

- 单片机和电机控制外设初始化
- ADC ISR 中的 FOC 状态机
- 通过 GPIO 按钮实现的电机启动和停止命令
- 来自电位器的电机速度命令

4.1.3.1 电机控制外设初始化

上电复位 (Power-on Reset, POR) 时，软件将根据用户要求初始化单片机和电机控制外设。

4.1.3.2 电机控制状态机

软件在 ADC ISR 中实现电机控制任务。ADC ISR 包括以下状态：

- **空闲**：在该状态下，电机不旋转。软件等待用户发出有效按钮按下信号来启动电机。
- **启动**：在该状态下，软件将执行 [启动过程](#) 中所述的 PMSM 启动步骤。
- **闭环速度控制**：在该状态下，软件将执行基于 SMO 的无传感器 FOC。

4.1.3.3 来自电位器的电机速度命令

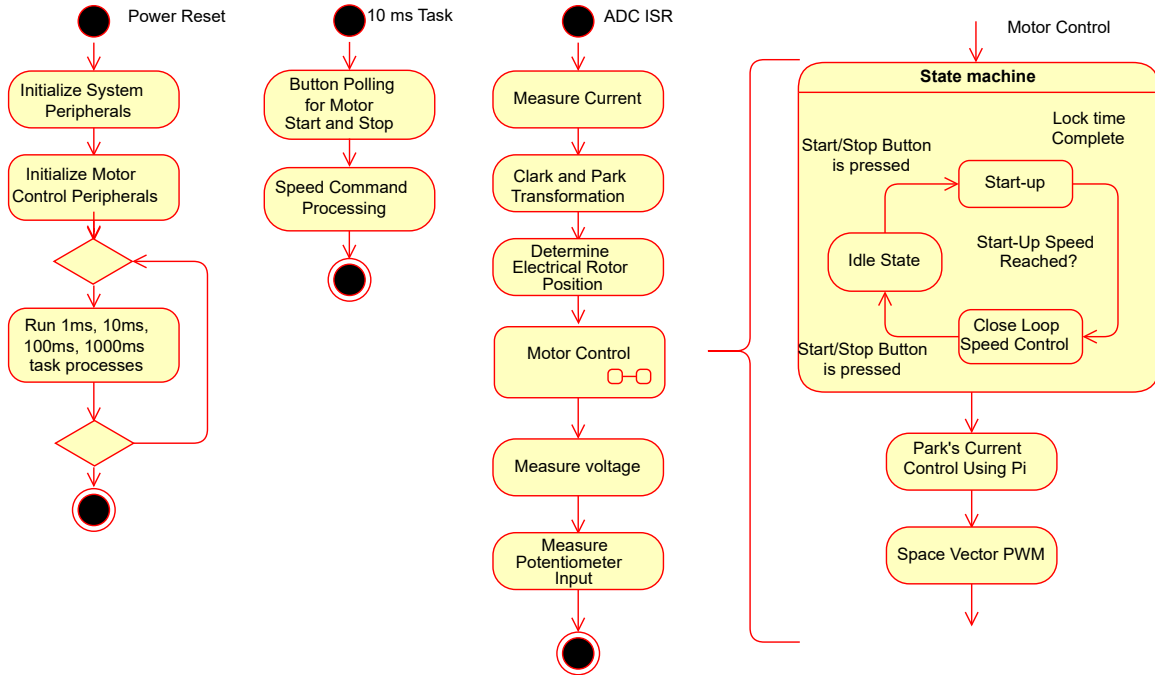
软件根据测得电位器输入计算参考速度。

4.1.3.4 通过 GPIO 实现的电机启动和停止命令

软件每 10 ms 轮询一次 GPIO 按钮，检查按钮是否已按下。如果检测到按钮按下，软件会将电机控制状态从空闲更改为启动。这会使电机以指定参考速度开始旋转。

下图给出了示例项目的软件流程图：

图 4-3. 软件流程图



5. 结论

本文档介绍了如何通过基于滑模观测器的磁场定向控制实现 PMSM 的速度控制应用。

此外，还说明了线性 PMSM 模型、磁场定向控制、启动过程、基于滑模观测器的位置和速度估算的理论概念。最后则以 Microchip SAME70 MCU 为例说明了应用的软件实现。

Microchip 提供的 SAME70 MCU 和电机控制软件可帮助客户显著缩短上市时间。

6. 附录：适用于电机控制应用的 32 位 MCU 的架构亮点

以下几节列出了适用于电机控制应用的 Microchip 32 位 MCU 产品组合以及关键特性。有关更多信息，请参见相应器件的数据手册。

6.1 PIC32CM MC 系列

主要特性

- 基于 48 MHz Arm Cortex- M0+的 MCU，最高 128 KB 闪存
- 最高 1 Msps ADC
- 双 12 位 ADC 和 10 位 DAC
- 电机控制 PWM
- 用于电机控制的位置解码器（PDEC）
- 模拟比较器
- 16 位 Σ - Δ ADC（SDADC）
- 工作电压：2.7V 至 5.5V
- 除法和平方根加速器（DIVAS）
- 用于控制的定时器/计数器（Timer/Counter for Control，TCC）外设提供工业和电机控制的专用定时器

6.2 SAM D2x 和 C2x 系列

主要特性

- 基于 48 MHz Arm Cortex-M0+的 MCU，最高 256 KB 闪存
- 最高 1 Msps ADC
- 12 位 DAC
- 电机控制 PWM
- 模拟比较器
- CAN FD
- Σ - Δ ADC
- 5V 器件

6.3 SAM D5x 和 SAM E5x 系列

主要特性

- 基于 120 MHz Arm Cortex-M4 的 MCU，最高 1 MB 闪存
- 最高 1 Msps ADC
- 电机控制 PWM
- 12 位 DAC
- 模拟比较器
- CAN FD
- 位置编码器接口
- USB
- 以太网

6.4 PIC32MK 系列

主要特性

- 120 MHz MIPS®内核，最高 1 MB 双区实时更新闪存（带 ECC）
- 七个 12 位 ADC：3.75 Msps；25.45 Msps 组合电机控制 PWM
- 最多三个 12 位 DAC
- 五个模拟比较器
- 最多四个 CAN FD
- 正交编码器接口（QEI）
- 最多两个全速 USB
- 四个高带宽运放
- 单精度和双精度浮点单元（Floating Point Unit, FPU）和 DSP 扩展支持

6.5 SAM S70 和 SAM E70 系列

主要特性

- 基于 300 MHz Arm Cortex-M7 的 MCU，最高 2 MB 闪存
- 最高 2 Msps ADC
- 电机控制 PWM
- 12 位 DAC
- 模拟比较器
- CAN FD
- 位置编码器接口
- USB
- 以太网
- 紧耦合存储器

7. 参考资料

- Speed Estimators, Flux Weakening and Efficient Use of SPMSM and IPMSM, 20089 MC7, Microchip 2016 年技术精英年会
- 可从 Microchip 网站 (www.microchip.com) 下载以下文档:
 - PIC32CM MC00 系列数据手册 (DS60001638D) :
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32CM-MC00-Family-Data-Sheet-DS60001638D.pdf
 - SAM C20/C21 系列数据手册 (DS60001479H) :
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-C20-C21-Family-Data-Sheet-DS60001479H.pdf
 - SAM D20 系列数据手册 (DS60001504E) :
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-D20-Family-Data-Sheet-DS60001504E.pdf
 - SAM D21/DA1 系列数据手册 (DS40001882H) :
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-D21-DA1-Family-Data-Sheet-DS40001882H.pdf
 - SAM D5x/E5x 系列数据手册 (DS60001507G) :
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM_D5x_E5x_Family_Data_Sheet_DS60001507G.pdf
 - PIC32MK 通用和电机控制 (GP/MC) 系列数据手册 (DS60001402D_CN) :
www.microchip.com.cn/newcommunity/Uploads/Download/Library/60001402d_cn.pdf
 - SAM E70/S70/V70/V71 系列数据手册 (DS60001527E) :
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-S70-V70-V71-Family-Data-Sheet-DS60001527E.pdf
 - AN2520——《利用 PLL 估算器和基于公式的弱磁技术 (FW) 实现永磁同步电机 (PMSM) 的无传感器磁场定向控制 (FOC)》(DS00002520B_CN) :
www.microchip.com.cn/newcommunity/Uploads/201808/5b614ee686f4d.pdf
 - AN1292——《利用 PLL 估算器和弱磁技术 (FW) 实现永磁同步电机 (PMSM) 的无传感器磁场定向控制 (FOC)》(DS01292A_CN) :
www.microchip.com.cn/newcommunity/Uploads/Download/Library/01292a_cn.pdf
 - AN908——《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》(DS00908B_CN) :
www.microchip.com.cn/newcommunity/Uploads/Download/Library/00908b_cn.pdf

Microchip 网站

Microchip 网站 (www.microchip.com) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 www.microchip.com/support 获得网上技术支持。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》(Digital Millennium Copyright Act)。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他任何方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，

将来可能会发生更新。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 <https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservices>。

Microchip “按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、Clockstudio、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、KoD、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQL、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、Trusted Time、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2023, Microchip Technology Incorporated 及其子公司版权所有。

AMBA、Arm、Arm7、Arm7TDMI、Arm9、Arm11、Artisan、big.LITTLE、Cordio、CoreLink、CoreSight、Cortex、DesignStart、DynamIQ、Jazelle、Keil、Mali、Mbed、Mbed Enabled、NEON、POP、RealView、SecurCore、Socrates、Thumb、TrustZone、ULINK、ULINK2、ULINK-ME、ULINK-PLUS、ULINKpro、 μ Vision 和 Versatile 是 Arm Limited（或其子公司）在美国和/或其他国家/地区的商标或注册商标。

ISBN: 978-1-6683-2551-3

质量管理体系

有关 Microchip 的质量管理体系的信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务中心

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话: 480-792-7200 传真: 480-792-7277 技术支持: www.microchip.com/support 网址: www.microchip.com	澳大利亚 - 悉尼 电话: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 电话: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 电话: 86-28-8665-5511 中国 - 重庆 电话: 86-23-8980-9588 中国 - 东莞 电话: 86-769-8702-9880 中国 - 广州 电话: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 电话: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特别行政区 电话: 852-2943-5100 中国 - 南京 电话: 86-25-8473-2460 中国 - 青岛 电话: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 电话: 86-21-3326-8000 中国 - 沈阳 电话: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 电话: 86-755-8864-2200 中国 - 苏州 电话: 86-186-6233-1526 中国 - 武汉 电话: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 电话: 86-29-8833-7252 中国 - 厦门 电话: 86-592-2388138 中国 - 珠海 电话: 86-756-3210040	印度 - 班加罗尔 电话: 91-80-3090-4444 印度 - 新德里 电话: 91-11-4160-8631 印度 - 浦那 电话: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 电话: 81-6-6152-7160 日本 - 东京 电话: 81-3-6880-3770 韩国 - 大邱 电话: 82-53-744-4301 韩国 - 首尔 电话: 82-2-554-7200 马来西亚 - 吉隆坡 电话: 60-3-7651-7906 马来西亚 - 檳榔嶼 电话: 60-4-227-8870 菲律宾 - 马尼拉 电话: 63-2-634-9065 新加坡 电话: 65-6334-8870 台湾地区 - 新竹 电话: 886-3-577-8366 台湾地区 - 高雄 电话: 886-7-213-7830 台湾地区 - 台北 电话: 886-2-2508-8600 泰国 - 曼谷 电话: 66-2-694-1351 越南 - 胡志明市 电话: 84-28-5448-2100	奥地利 - 韦尔斯 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 丹麦 - 哥本哈根 电话: 45-4485-5910 传真: 45-4485-2829 芬兰 - 埃斯波 电话: 358-9-4520-820 法国 - 巴黎 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 德国 - 加兴 电话: 49-8931-9700 德国 - 哈恩 电话: 49-2129-3766400 德国 - 海爾布隆 电话: 49-7131-72400 德国 - 卡尔斯鲁厄 电话: 49-721-625370 德国 - 慕尼黑 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 德国 - 罗森海姆 电话: 49-8031-354-560 以色列 - 若那那市 电话: 972-9-744-7705 意大利 - 米兰 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 意大利 - 帕多瓦 电话: 39-049-7625286 荷兰 - 德卢内市 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 挪威 - 特隆赫姆 电话: 47-72884388 波兰 - 华沙 电话: 48-22-3325737 罗马尼亚 - 布加勒斯特 电话: 40-21-407-87-50 西班牙 - 马德里 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 瑞典 - 哥德堡 电话: 46-31-704-60-40 瑞典 - 斯德哥尔摩 电话: 46-8-5090-4654 英国 - 沃金厄姆 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820
亚特兰大 德卢斯, 佐治亚州 电话: 678-957-9614 传真: 678-957-1455 奥斯汀, 德克萨斯州 电话: 512-257-3370 波士顿 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 774-760-0087 传真: 774-760-0088 芝加哥 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 630-285-0071 传真: 630-285-0075 达拉斯 阿迪森, 德克萨斯州 电话: 972-818-7423 传真: 972-818-2924 底特律 诺维, 密歇根州 电话: 248-848-4000 休斯顿, 德克萨斯州 电话: 281-894-5983 印第安纳波利斯 诺布尔斯维尔, 印第安纳州 电话: 317-773-8323 传真: 317-773-5453 电话: 317-536-2380 洛杉矶 米慎维荷, 加利福尼亚州 电话: 949-462-9523 传真: 949-462-9608 电话: 951-273-7800 罗利, 北卡罗来纳州 电话: 919-844-7510 纽约, 纽约州 电话: 631-435-6000 圣何塞, 加利福尼亚州 电话: 408-735-9110 电话: 408-436-4270 加拿大 - 多伦多 电话: 905-695-1980 传真: 905-695-2078			