

## 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）

### 简介

目前的行业趋势表明，永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）是电机控制应用设计人员的首选电机之一。与同类别的其他电机相比，它具有高功率密度、快速动态响应和高效率等优势，再结合其能够降低制造成本和改善磁性能的特点，永磁同步电机是产品大规模实现的理想推荐。

Microchip生产各种16位和32位单片机（MCU）以实现对所有类型电机的高效、稳健和多功能控制，并且提供必要工具集的参考设计，这将加快新产品的学习速度并缩短新产品的开发周期。有关适用于电机控制的32位MCU的更多信息，请参见[“适用于电机控制应用的32位MCU的架构亮点”](#)。

### 磁场定向控制（FOC）

在使用PMSM时，转子磁场的速度必须等于定子（电枢）磁场的速度（即同步）。转子磁场和定子磁场之间失去同步会导致电机停转。

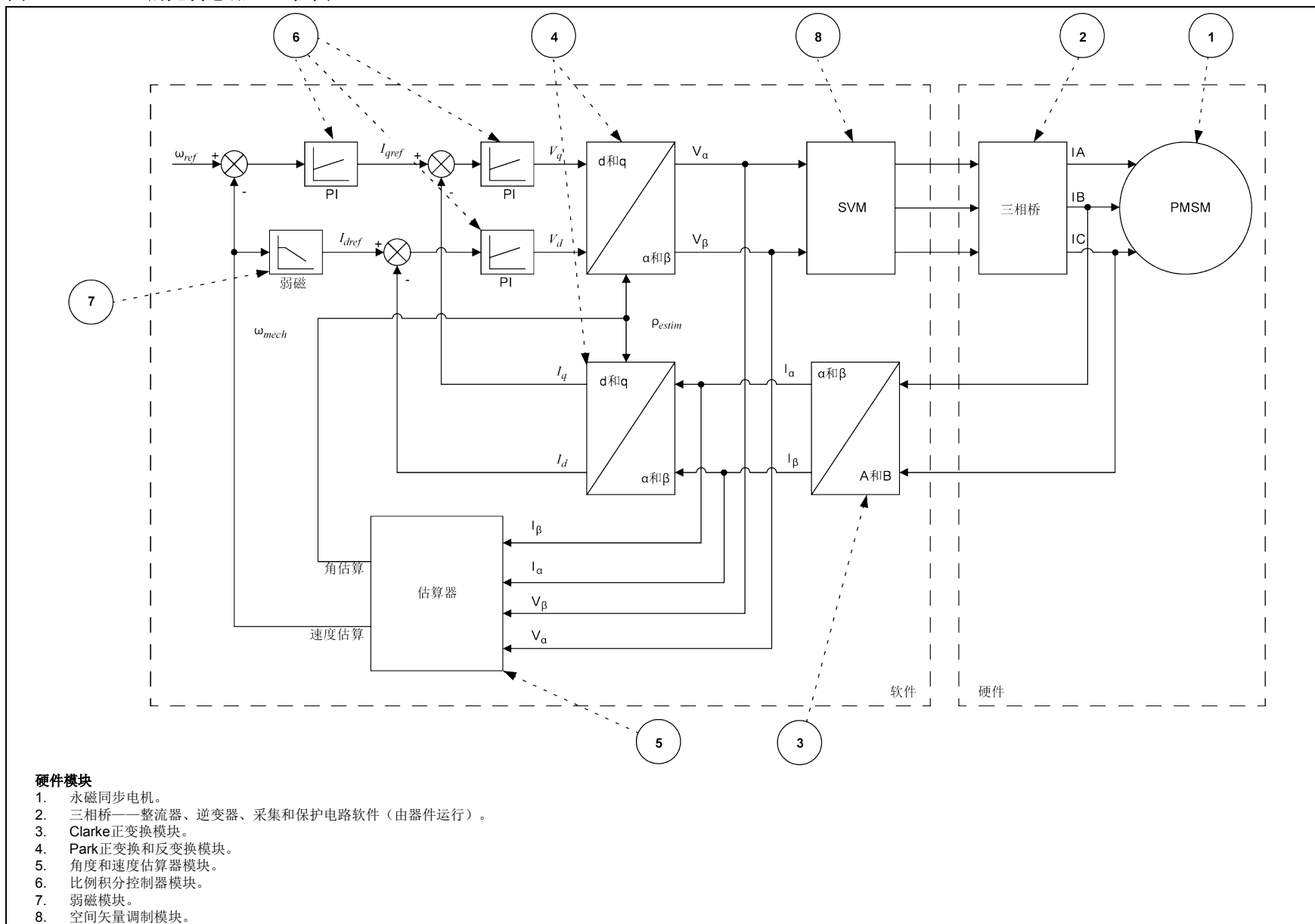
磁场定向控制（Field Oriented Control, FOC）表示这样一种方法：将其中一个磁通（转子、定子或气隙）视为用于为其他磁通之一创建参考坐标系的基础，其目的是将定子电流解耦为用于产生转矩的分量和用于产生磁通的分量。这种解耦保证了复杂三相电机的控制方式与采用单独励磁的直流电机一样简单。这意味着电枢电流负责产生转矩，而励磁电流（对于PMSM电机，为永磁）负责产生磁通。本应用笔记中将转子磁通视为定子磁通和气隙磁通的参考坐标系。

Microchip提供了几个阐述FOC基本原理的应用笔记。其中的两个应用笔记为：AN1078《PMSM电机的无传感器磁场定向控制》和AN908《使用dsPIC30F实现交流感应电机的矢量控制》（见[“参考资料”](#)）。阐述FOC的详细信息不在本应用笔记的探讨之列；但文中涵盖的新实现方案均遵照了前述应用笔记中的原理。

图1显示了FOC的控制方案。本方案使用dsPICDEM™ MCLV-2开发板（DM330021-2）来实现和测试，该开发板可以使用不同控制技术来驱动PMSM电机，而无需任何额外的硬件。

除弱磁之外，该控制方案与应用笔记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）》（见[“参考资料”](#)）中的控制方案类似。

图1: PMSM的无传感器FOC框图



PMSM中FOC的特殊性在于，定子的d轴电流参考 $I_{dref}$ （对应于d轴的电枢反应磁通）设置为零。转子的磁体产生转子磁链 $\Psi_{PM}$ ，这一点与ACIM不同，ACIM需要恒定参考值 $I_{dref}$ 来磁化电流，从而产生转子磁链。

气隙磁通等于转子磁链（由永磁体产生）和电枢反应磁链（由定子电流产生）的总和。对于FOC的恒转矩模式，d轴气隙磁通仅等于 $\Psi_{PM}$ ，d轴电枢反应磁通为零。

而在恒定功率运行中，定子电流中产生磁通的分量（即 $I_d$ ）用于弱化气隙磁通以实现更高速度。

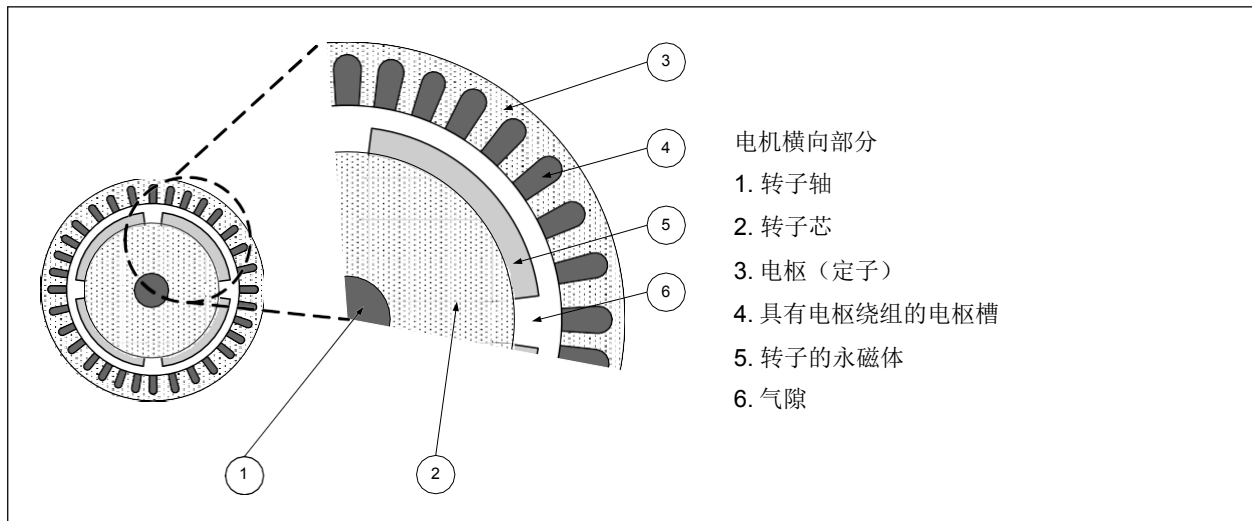
在无传感器控制（不需要位置传感器和速度传感器）中，面临的挑战是实现一个能够抑制温度和电磁噪声等干扰的稳定速度估算器。当应用对成本敏感（往往不允许运动部件，例如位置传感器）时或电机在不利电气环境下运行时，通常需要采用无传感器控制。但对于给定应用，不应将精确控制要求（特别是在低速情况下）视为关键问题。

位置和速度估算基于电机的数学模型。因此，模型与实际硬件越接近，估算器的性能就越好。PMSM数学建模依赖于其拓扑，主要分为两种转子类型：表面贴装式和内置永磁式。每种类型在不同应用需求方面都有各自的优势和劣势。本应用笔记提出的控制方案针对表面贴装式永磁同步电机进行开发，请参见图2，与其他类型的PMSM相比，其具有低转矩纹波和低成本的优点。由于所考虑电机类型的气隙磁通是平滑的，因此定子的电感值 $L_d = L_q$ （非凸极PMSM），反电动势（Back Electromotive Force, BEMF）是正弦曲线。

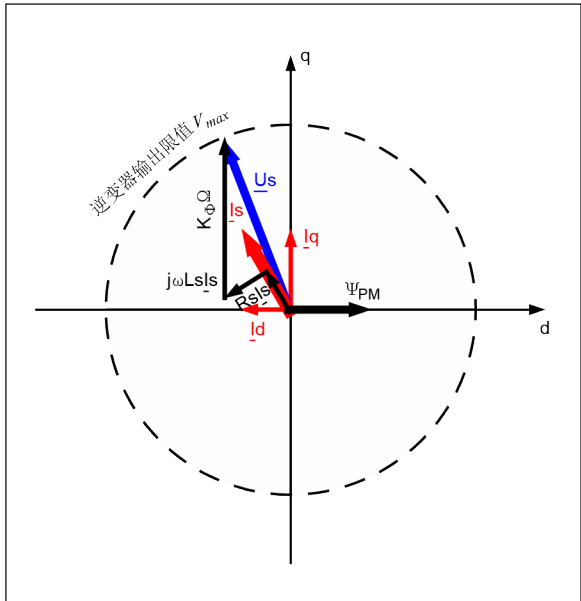
事实上，气隙很大（其包含表面贴装式磁体，置于定子齿部与转子芯之间），这意味着此类型的PMSM与同尺寸和标称功率值的其他类型电机相比，电感更小。上述电机特性可以简化速度和位置估算器中使用的数学模型，同时可以有效使用FOC。

使用表面PMSM时，通过以下方式来获取FOC最大转矩/安培：使电机的转子磁链滞后电枢产生的磁链90度，请参见图3。

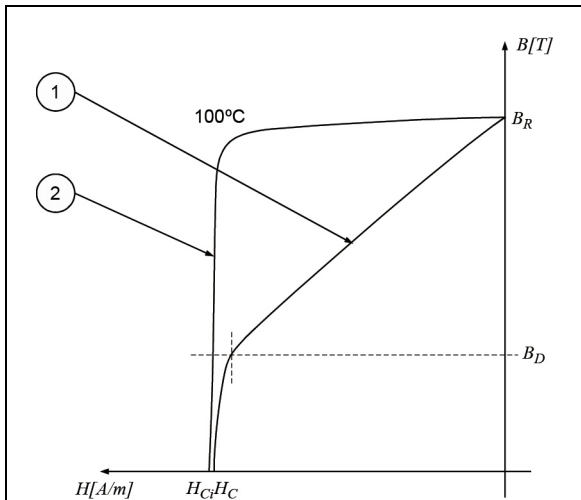
图2： 表面贴装PM PMSM横向部分



**图4: FOC向量图 (高速——FW)**



**图5:** 永磁体的滞后曲线（理论上）

 $H_{Ci}$  = 固有矯頑性

## PLL型估算器

本应用笔记中使用的估算器就是AN1162《交流感应电机（ACIM）的无传感器磁场定向控制（FOC）》，（见“参考资料”部分）中使用的估算器，只是其在本应用笔记中用于PMSM电机。

估算器采用PLL结构。其工作原理的依据是：在稳态工作模式下，反电动势（BEMF）的d分量必须等于零。估算器的框图如图6所示。

从图6所示的闭环开始，对转子的估算速度（ $\omega_{Restim}$ ）进行积分以获得估算角，如公式1所示：

公式1：

$$\rho_{estim} = \int \omega_{Restim} dt$$

将BEMF值的q分量除以电压常量 $K_\Phi$ 得到估算速度 $\omega_{Restim}$ ，如公式2所示。

公式2：

$$\omega_{Restim} = \frac{1}{K_\Phi} (E_{qf} - \text{sgn}(E_{qf}) \cdot E_{df})$$

考虑到公式2显示的初始估算前提条件（在稳态下BEMF的d轴值为零），BEMF q轴值 $E_{qf}$ 将使用d轴BEMF值 $E_{df}$ 来校正，具体取决于其符号。BEMF d-q分量

值在通过Park变换进行计算（如公式3所示）之后，通过一阶滤波器进行滤波。

公式3：

$$\begin{aligned} E_d &= E_\alpha \cos(\rho_{estim}) + E_\beta \sin(\rho_{estim}) \\ E_q &= E_\alpha \sin(\rho_{estim}) + E_\beta \cos(\rho_{estim}) \end{aligned}$$

使用固定的定子参考系时，定子电路公式如公式4所示。

公式4：

$$\begin{aligned} E_\alpha &= V_\alpha - R_S I_\alpha - L_S \frac{dI_\alpha}{dt} \\ E_\beta &= V_\beta - R_S I_\beta - L_S \frac{dI_\beta}{dt} \end{aligned}$$

在公式4中，包含 $\alpha - \beta$ 的项从经过Clarke变换的三相系统的相应测量值得到。 $L_S$ 和 $R_S$ 分别表示每相的定子电感和电阻（假设采用Y形（星形）连接的定子相）。如果电机采用 $\Delta$ 形（三角形）连接，则应计算等效的Y型连接相电阻和电感，并在上述公式中使用。

图7所示为估算器的参考电路模型。电机的A、B和C端子连接到逆变器的输出端。电压 $V_A$ 、 $V_B$ 和 $V_C$ 表示对电机的定子绕组施加的相电压。 $V_{AB}$ 、 $V_{BC}$ 和 $V_{CA}$ 表示逆变器桥臂之间的线电压，相电流为 $I_A$ 、 $I_B$ 和 $I_C$ 。

图6： PLL估算器的原理框图

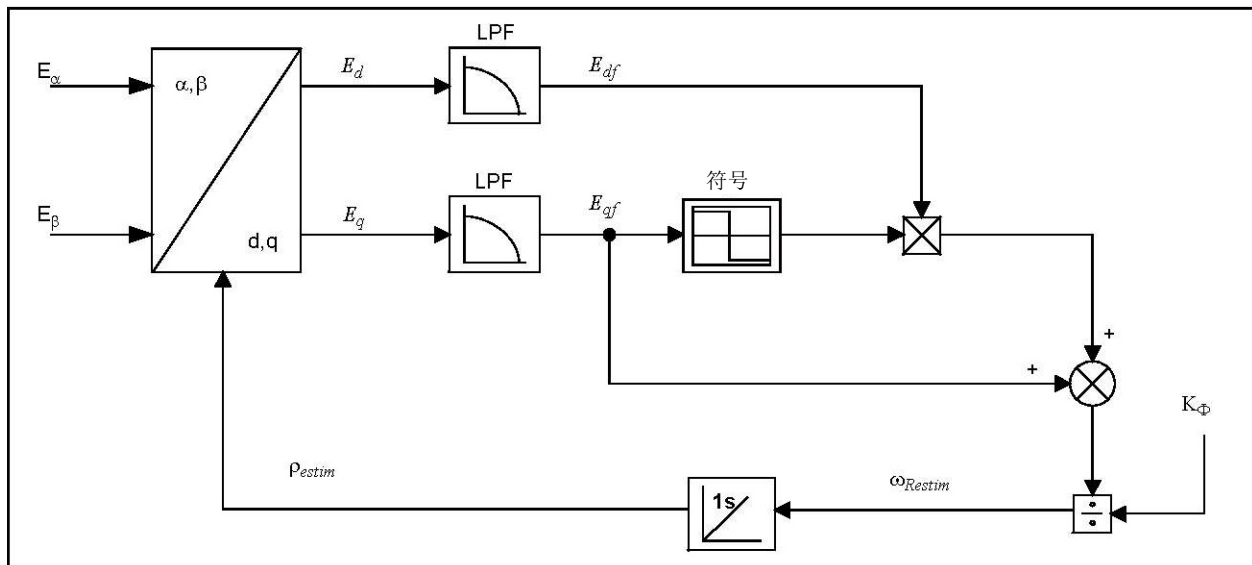
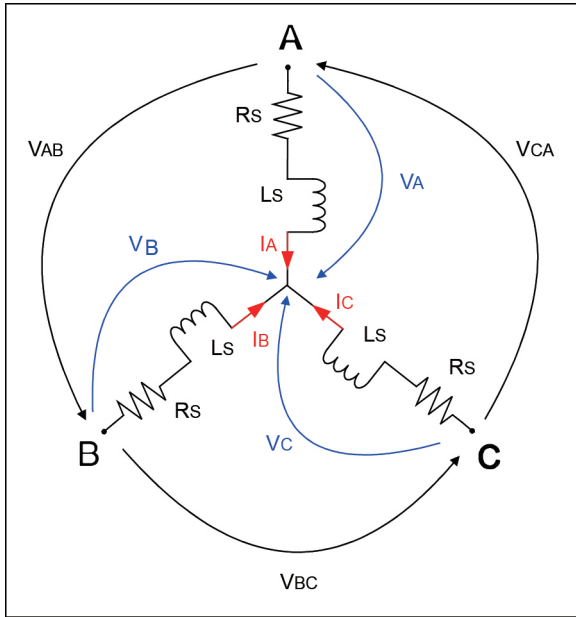


图7: PLL估算器的电路模型



将控制系统中实现的公式做进一步演化，估算器公式4中的电压 $V_\alpha$ 和 $V_\beta$ 是FOC的上一个周期计算结果，其不仅在控制的前一步中馈送给空间矢量调制（Space Vector Modulation, SVM）模块，而且在当前步中还馈送至估算器模块。 $I_\alpha$ 和 $I_\beta$ 是相电流的Clarke变换结果，在每个估算器周期都被读取。

根据公式3，将得到的BEMF  $E_\alpha$ 和 $E_\beta$ 值通过Park变换转换为转子磁通的旋转参考系，得到 $E_d$ 和 $E_q$ 值。Park变换中使用的角 $\rho_{estim}$ 基于估算器的上一执行周期计算而得。然后，BEMF的d-q值通过一阶滤波器来滤波，并将滤波后的值代入估算器的主条件（基于 $E_d$ 等于0）。

公式2反映了 $\omega_{estim}$ 的计算，该值表示得到的电气速度。对电气速度进行积分可得到转子磁通与 $\alpha-\beta$ 固定的定子参考系之间的角度（ $\rho_{estim}$ ）。在公式2中， $K_\Phi$ 表示表1所示的电压常量。电气速度计算中使用的 $K_\Phi$ 如公式5所示。

公式5:

MotorEstimParm.qInvKFi表示:

$$\frac{1}{K_{\Phi\_Electrical}} = \sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \frac{1000}{60 \cdot K_\Phi} \cdot P$$

其中:

$P$  = 前述极对和其他输入的数量

速度反馈通过BEMF案例中使用的一阶滤波器来滤波。滤波器的一般形式如公式6所示:

公式6:

$$y(n) = y(n-1) + K_{filter} \cdot (x(n) - y(n-1))$$

其中:

$y(n)$  = 当前周期滤波器输出

$y(n-1)$  = 上一周期滤波器输出

$x(n)$  = 当前周期滤波器输入

$K_{filter}$  = 滤波器常量

滤波器输出的直流类型值应不含有ADC采集产生的噪声或软件计算引入的高频变化。滤波器的调整取决于滤波的值（BEMF d-q分量和电气速度）的变化速度，目的是留出足够的带宽，进而降低有用信号损失的可能性。对于BEMF d-q分量，有两种情况: (1) 高速。在弱磁模式下，其变化缓慢，因为缺少转矩突变或高加速斜坡; (2) 低速。速度变化取决于电机的机械常量（以及电机轴上耦合的负载）和针对速度参考的斜升或斜降的斜率限制（以更快者为准）。

## 调整和实验结果

速度低于基本速度时（此时应用最大转矩模式），算法调整非常简单。通常，将电机的参数（由制造商测量或规定）添加到配置文件mc\_app.h即可。

参数的测量包括转子的电阻 $R_S$ 、电感 $L_S$ 以及电压常量 $K_\Phi$ 。

可使用精密LCR测量计在电机的端子上测量定子电阻和电感。对于星形连接的电机：定子相电阻（ $R_S$ ）和电感（ $L_S$ ）值通过将电机端子处的电阻和电感测量值除以因数2获得。对于三角形连接的电机：定子相电阻和电感值通过将电机端子处的电阻和电感测量值乘以因数1.5获得。

将三角形连接电机的定子相电阻和电感值除以因数3可得到其星形连接电机的等效相电阻（ $R_S$ ）和电感（ $L_S$ ）。

所有电机制造商均会给出此电压常量 $K_\Phi$ ；不过，也可以通过一个非常简单的步骤来测量，即，以恒定速度旋转转子轴，同时在电机的端子上测量输出电压。如果在1000 RPM下完成读数，则交流电压测量值为典型RMS值。将读数值乘以 $\sqrt{2}$ 将返回 $V_{peak}/KRPM$ 格式的值。

对于经过测试的电机参数，表1提供的数据就是通过上述步骤测得的。

表1:

电机类型	Hurst电机 DMB00224C10002	单位
连接类型	Y	—
L-L电阻	$2.1 \cdot 2$	$\Omega$
L-L电感（1 kHz）	$1.92 \cdot 2$	mH
电压常量 $K_\Phi$	7.24	$V_{peak}/KRPM$
环境温度	22.7	°C

两个必要的相电流在dsPICDEM MCLV-2开发板上的两个电流检测电阻中读取，其值被换算为ADC模块的可接受输入范围。总电流换算因数取决于电流检测电阻上差分运放读数的增益以及流经电机的电流最大值。例

如，如果相电流为4.4A（峰值）且增益为75，则对于0.005 $\Omega$ 的电流检测电阻，ADC输入的电压将为3.3V。

对于初始校准，可在有负载的情况下启动，在这种情况下，需要调整开环斜坡参数。

开环调整参数包括锁定时间、最终加速度和电流参考值。锁定时间表示转子对齐所需的时间，这取决于负载初始转矩和转动惯量（二者的值越大，锁定时间值就越长）。应将初始斜坡的最终转速（以RPM表示）设置的足够高，这样估算器的计算所得BEMF才足够精确，而达到该转速的时间取决于开环q轴电流和附在电机轴上的阻性负载；负载越大，达到最终参考速度所需的时间就越长。

采用开环控制代替闭环控制可达到简化的目的，其中转子磁通与固定参考系之间的估算角被替换为开环加速中使用的强制角。强制角不考虑转子的位置，而是使转子位置增加一个角度，从而使转子的位置成为一个不断增加的量。图1给出了控制环的进一步简化形式，即，缺少速度控制器，且q轴的电流参考采用硬编码。

q轴电流参考用于提供在开环斜坡阶段强制流经电机的电流；初始负载越高，所需的电流就越大，其在总体上用作转矩参考。

要使算法在开环系统中正常工作，从而禁止闭环过渡以进行最初的调整，则应启用例1中给出的特定宏代码定义。

例1:

```
#define OPEN_LOOP_FUNCTIONING
```

这对于在激活闭环控制之前，潜在PI控制器的重新校准，甚至是一些初始过渡阶段的校验（比如强制角和估算角之间的角误差以及实验确定电流缩放常量），以及初始开环斜坡参数的精调非常有用。



## 基于公式的弱磁技术

电机的反电动势随速度呈线性增大。因此，为了抵消反电动势并支撑负载，施加的电压将随速度呈线性增大。最大直流母线电压（ $V_{BUS}$ ）受限于绕组绝缘和电机安全工作区域等实际考量因素。在SVPWM调制方案中，最大适用相电压如公式7所示。对于给定PMSM电机和直流母线电压，最大适用相电压不足以抵消生成的反电动势电压和支撑负载（超过电机基本速度）。为提高电机速度（超过基本速度），必须降低生成的反电动势，这可通过减弱转子磁通来实现，即所谓的“弱磁”模式。

### 公式7:

$$V_{PHASE\_MAX_{SVPWM}} = \frac{V_{BUS}}{\sqrt{3}}$$

公式8给出了PMSM电机的D-Q轴的稳态电压公式。q轴施加的电压 $V_{qs}$ 可抵消反电动势（ $\omega \cdot \Psi_{PM}$ ），进而以特定速度驱动负载。 $V_{qs}$ 电压受最大直流母线电压限制。为了在不增大直流母线电压的情况下增大电机的速度，必须通过降低转子磁体磁链 $\Psi_{PM}$ 来降低反电动势。但是在PMSM电机中，转子永磁体产生的磁链（ $\Psi_{PM}$ ）恒定。因此，在PMSM电机中，通过在d轴中注入负电流（即， $-i_{ds}$ ，这样可抵消转子磁体磁链 $\Psi_{PM}$ ）来实现弱磁。

### 公式8:

PMSM的动态d/q轴电压公式为:

$$V_d = R_s \cdot i_d - \omega \cdot L_s \cdot i_q + L_s \cdot \frac{di_d}{dt}$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + \omega \cdot L_s \cdot i_d + \omega \cdot \Psi_{PM} + L_s \cdot \frac{di_q}{dt}$$

由于 $i_d$ 和 $i_q$ 为直流值，它们在稳态下可忽略不计，因此电压公式可重新编写为如下形式:

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot L_s \cdot i_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot L_s \cdot i_{ds} + \omega \cdot \Psi_{PM}$$

其中，

$V_{ds}$  = 稳态d轴电压（单位为V）

$V_{qs}$  = 稳态q轴电压（单位为V）

$i_{ds}$  = 稳态d轴电流（单位为A）

$i_{qs}$  = q轴电流（单位为A）

$\omega$  = 目标电机电气速度（单位为rad/s）

$L_s$  = 电机相电感（单位为H）

$R_s$  = 电机相电阻（单位为 $\Omega$ ）

在弱磁期间，必须注入负的d轴电流，这样施加的电压幅值才会始终处于电压限值环 $V_{max}$ 上，如图4所示。因此，可按公式9所示计算d轴电流 $i_{ds}$ 。

### 公式9:

$$V_{qs\_ref} = \sqrt{V_{max}^2 - V_{ds}^2}$$

$$i_{ds\_flux\_weakening} = \frac{V_{qs\_ref} - R_s \cdot i_{qs} - \omega \cdot \Psi_{PM}}{\omega \cdot L_s}$$

在弱磁期间q轴电流的最大值受限，以确保注入电流的最大幅值不会超过电机的最大额定电流，如公式10所示。因此，工作在弱磁条件下会降低产生转矩的能力。

### 公式10:

$$I_{qs\_refmax} = \sqrt{(I_{motor\_max}^2 - I_{ds\_flux\_weakening}^2)}$$



基于PLL的转子速度估算器使用反电动势（ $BEMF = \omega * K\phi$ ）来估算转子速度。工作在低于基本速度的条件下时，反电动势随速度呈线性增大，因此 $1/K\phi$ 恒定，其根据电机反电动势常量导出，如公式5所示。不过，在弱磁期间，通过对d轴注入负电流来抵消转子磁体磁链，进而可保持反电动势恒定。因此，在高于基本速度的情况下保持反电动势恒定会导致 $1/K\phi$ 出现变化，如公式11所示。对于高电感电机或者在深度弱磁（即，d轴负电流较高）期间， $1/K\phi$ 的变化更为显著。 $L_s \bullet i_{ds}$ （用V-s来表示）除以 $2\pi$ 便可匹配 $K\phi_{Electrical}$ 单位（用V-s/rad来表示）。

公式11:

$$MotorEstimParm.InvKFI_{FW} = \frac{1}{K_{\phi_{Electrical}} + \left(\frac{L_s \cdot i_{ds}}{2 \cdot \pi}\right)}$$

在弱磁模式下，需要注意的另一个问题是逆变器的电压限制。此电压限制将转换为d-q电流分量的最大可实现值。如果两个分量都遵循其参考值，则得到的标量相加值将覆盖最大值1。因此，电流q分量允许的最大电流值（电流的转矩分量）将取决于用于弱磁的电流d分量的优先级，这对于弱化气隙磁通尤为重要。图8显示了转换为电压的d-q分量的动态调整（电压的d分量优先）。

由于估算器性能严重依赖于电机的参数，因此实验结果的测量条件遵循了这一前提。电机的转子电阻和磁通常

量的首要依赖条件是温度。高转矩通过最大电流输入实现，这会导致焦耳损失变大，且电机温度增高。这对于估算器输出的有效性具有负面影响。请注意，纠正或补偿温度对估算的影响不在本应用笔记探讨之列。可基于温度进行参数补偿，但对于不同的电机类型、工作条件和运行模式，差别很大。因此，以下所示的测试结果的前提是：限制温度对估算器输出的影响——实现扭矩所需的时间被限制为在室温下连续工作一分钟，请参见表2。

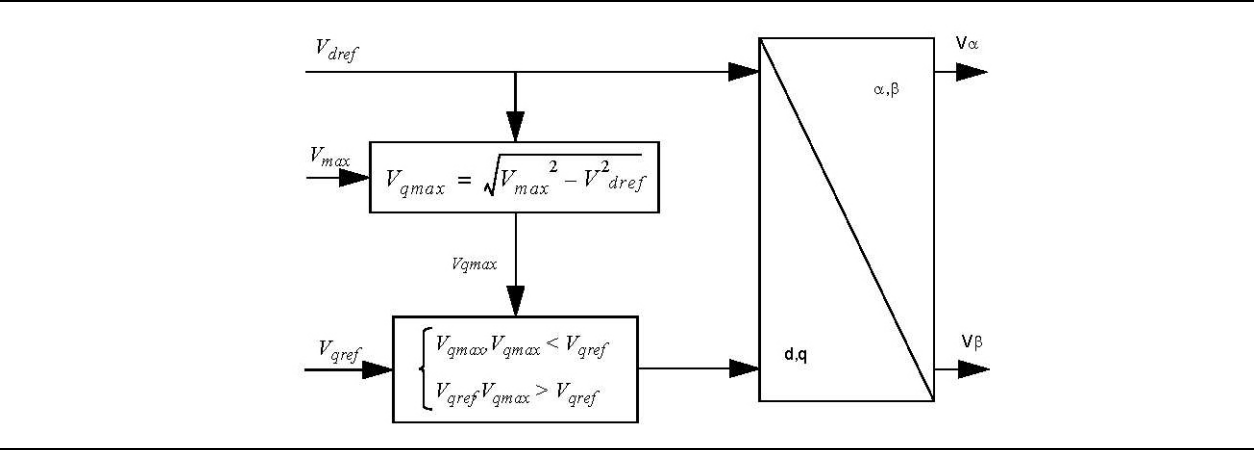
可以发现，针对表2中最后两个条目测量的相电流（对应于弱磁操作）高于其前面紧邻条目的相电流（在正常工作速度下）。

表2: 有负载时的实验测试结果

参考速度 (RPM)	实现的速度 (RPM)	负载转矩 (Nm)	相电流 (A RMS)
500	500	0.1	1.280
1000	1000	0.09	1.140
1500	1500	0.08	1.035
2000	2001	0.07	0.943
2500	2501	0.04	0.542
3000	3001	0.025	0.56
3500	3504	0.029	1.06
4000	3985	0.03	1.462

注： 显示的实验测试结果是在DMB0224C10002电机上测量的。

图8: 动态电压调整原理框图



## 适用于电机控制应用的32位MCU的架构亮点

### SAME70系列

#### CPU

- 32位Arm® Cortex®-M7内核——300 MHz (2.14 DMIPS/MHz)
- DSP指令支持 (DSP性能为Cortex-M4的2倍)
- 双精度浮点单元 (Floating Point Unit, FPU) ——符合IEEE 754标准
- 紧耦合存储器 (Tightly Coupled Memory, TCM) ——对时间敏感的代码和数据进行高速、低延时且确定性的访问

#### 模拟特性

- 两个专用12位ADC模块, 支持双采样和保持 (Sample and Hold, S&H) (即, 能够同时对四个通道进行采样)
- 一个片上模拟比较器
- 两个片上DAC模块

#### PWM

- 最多八个PWM通道, 能够在边沿对齐/中心对齐模式下生成带死区的互补PWM
- 两个2位格雷码递增/递减通道, 用于步进电机控制
- 对于每个通道都独立进行输出改写, 这对于梯形控制很有用
- 两条独立的可编程事件线, 能够生成精确的同步ADC触发信号, 无需任何软件干预
- 异步故障输入允许在故障状态下快速响应PWM关断, 无需任何软件干预
- 扩频计数器——降低PWM驱动电机的噪声/电磁干扰

#### 位置检测

片上正交解码器 (QDEC) ——输入线路滤波、解码以及定时器/计数器 (用于读取转子位置和速度)

### PIC32MK系列

#### CPU

- 32位MIPS32® microAptiv™ MCU内核——120 MHz (198 DMIPS)
- DSP增强型内核
- 双精度浮点单元 (FPU) ——符合IEEE 754标准

#### 模拟特性

- 最多六个专用12位ADC通道, 外加一个共用12位ADC通道
- 最多四个片上运放模块
- 最多五个片上模拟比较器模块
- 最多三个片上DAC模块

#### PWM

- 最多12个PWM对, 能够在边沿对齐和对称/不对称中心对齐模式下生成带死区的互补PWM
- PWM通道能够生成精确的同步ADC触发信号, 无需任何软件干预
- 异步故障输入允许在故障状态下快速响应PWM关断, 无需任何软件干预

#### 位置检测

片上QE1通过与增量编码器接口来获取转子的机械位置

## 结论

本应用笔记介绍了永磁同步电机（PMSM）的磁通角和速度的估算方法。本应用笔记深入介绍了基于公式的闭环弱磁技术。

还介绍了估算器、基于公式的闭环弱磁以及调整方向的主要理论概念。本文档中介绍的应用使用了支持文件，以便轻松适应其他电机。此外，对您的应用使用Microchip提供的专用开发硬件平台可以显著缩短产品上市时间。

## 参考资料

*“Speed Estimators, Flux Weakening and Efficient Use of SPMSM and IPMSM”* ——Prasad Kulkarni, 20089 MC7, Microchip 2016年技术精英年会

本文档中引用的下列应用笔记可从Microchip网站（[www.microchip.com](http://www.microchip.com)）下载：

- 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）》
- AN908 《使用dsPIC30F实现交流感应电机的矢量控制》
- AN1078 《PMSM电机的无传感器磁场定向控制》
- AN1162 《交流感应电机（ACIM）的无传感器磁场定向控制（FOC）》

## 附录A： 源代码

### *软件许可协议*

Microchip Technology Incorporated（“公司”）随附提供的软件旨在提供给您（该公司的客户）使用，仅限于且只能在该公司制造的产品上使用。

该软件为公司和/或其供应商所有，并受适用的版权法保护。版权所有。任何违反前述限制的使用将使其用户遭受适用法律的刑事制裁，并承担违背此许可的条款和条件的民事责任。

该软件“按现状”提供。不提供保证，无论是明示的、暗示的还是法定的保证。这些保证包括（但不限于）对出于某一特定目的应用此软件的适销性和适用性默示的保证。在任何情况下，公司都将不会对任何原因造成的特别的、偶然的或间接的损害负责。

本应用笔记中提及的所有软件都以MPLAB Harmony应用程序的形式提供。此应用程序可以在MPLAB Harmony安装目录的<install-dir>\apps\motor\_control文件夹中找到。可从以下网址下载MPLAB Harmony集成软件框架：

[www.microchip.com/mplab/mplab-harmony](http://www.microchip.com/mplab/mplab-harmony)。

## 附录B： 版本历史

### 版本A（2017年8月）

本文档的初始版本。

### 版本B（2017年9月）

此版本包括以下更新：

- 第一页的应用笔记参考已更改为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）》
- 更新了表2：“有负载时的实验结果测试”
- 此外，还对第3页的文本进行了少量更新

注:

---

请注意以下有关 Microchip 器件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指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- 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。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

---

提供本文档的中文版本仅为便于理解。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。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。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，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。Microchip 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。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伤害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任，并加以赔偿。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中以其他方式转让任何许可证。

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、µVision 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。

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部、设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2009 认证。Microchip 的 PIC® MCU 与 dsPIC® DSC、KeeLoq® 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器及模拟产品严格遵守公司的质量体系流程。此外，Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM**  
**CERTIFIED BY DNV**  
**== ISO/TS 16949 ==**

## 商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、Heldo、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LINK MD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、tinyAVR、UNI/O 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、mTouch、Precision Edge 和 Quiet-Wire 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICNet、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、KleerNet、KleerNet 徽标、memBrain、Mindi、MiWi、motorBench、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、SAM-ICE、Serial Quad I/O、SMART-I.S.、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、ViewSpan、WiperLock、Wireless DNA 和 ZENA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

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

Silicon Storage Technology 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。

© 2018, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-3143-5



## 全球销售及服务中心

### 美洲

公司总部 **Corporate Office**  
2355 West Chandler Blvd.  
Chandler, AZ 85224-6199  
Tel: 1-480-792-7200  
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:  
<http://www.microchip.com/support>

网址: [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

**亚特兰大 Atlanta**  
Duluth, GA  
Tel: 1-678-957-9614  
Fax: 1-678-957-1455

**奥斯汀 Austin, TX**  
Tel: 1-512-257-3370

**波士顿 Boston**  
Westborough, MA  
Tel: 1-774-760-0087  
Fax: 1-774-760-0088

**芝加哥 Chicago**  
Itasca, IL  
Tel: 1-630-285-0071  
Fax: 1-630-285-0075

**达拉斯 Dallas**  
Addison, TX  
Tel: 1-972-818-7423  
Fax: 1-972-818-2924

**底特律 Detroit**  
Novi, MI  
Tel: 1-248-848-4000

**休斯敦 Houston, TX**  
Tel: 1-281-894-5983

**印第安纳波利斯 Indianapolis**  
Noblesville, IN  
Tel: 1-317-773-8323  
Fax: 1-317-773-5453  
Tel: 1-317-536-2380

**洛杉矶 Los Angeles**  
Mission Viejo, CA  
Tel: 1-949-462-9523  
Fax: 1-949-462-9608  
Tel: 1-951-273-7800

**罗利 Raleigh, NC**  
Tel: 1-919-844-7510

**纽约 New York, NY**  
Tel: 1-631-435-6000

**圣何塞 San Jose, CA**  
Tel: 1-408-735-9110  
Tel: 1-408-436-4270

**加拿大多伦多 Toronto**  
Tel: 1-905-695-1980  
Fax: 1-905-695-2078

### 亚太地区

**中国 - 北京**  
Tel: 86-10-8569-7000

**中国 - 成都**  
Tel: 86-28-8665-5511

**中国 - 重庆**  
Tel: 86-23-8980-9588

**中国 - 东莞**  
Tel: 86-769-8702-9880

**中国 - 广州**  
Tel: 86-20-8755-8029

**中国 - 杭州**  
Tel: 86-571-8792-8115

**中国 - 南京**  
Tel: 86-25-8473-2460

**中国 - 青岛**  
Tel: 86-532-8502-7355

**中国 - 上海**  
Tel: 86-21-3326-8000

**中国 - 沈阳**  
Tel: 86-24-2334-2829

**中国 - 深圳**  
Tel: 86-755-8864-2200

**中国 - 苏州**  
Tel: 86-186-6233-1526

**中国 - 武汉**  
Tel: 86-27-5980-5300

**中国 - 西安**  
Tel: 86-29-8833-7252

**中国 - 厦门**  
Tel: 86-592-238-8138

**中国 - 香港特别行政区**  
Tel: 852-2943-5100

**中国 - 珠海**  
Tel: 86-756-321-0040

**台湾地区 - 高雄**  
Tel: 886-7-213-7830

**台湾地区 - 台北**  
Tel: 886-2-2508-8600

**台湾地区 - 新竹**  
Tel: 886-3-577-8366

### 亚太地区

**澳大利亚 Australia - Sydney**  
Tel: 61-2-9868-6733

**印度 India - Bangalore**  
Tel: 91-80-3090-4444

**印度 India - New Delhi**  
Tel: 91-11-4160-8631

**印度 India - Pune**  
Tel: 91-20-4121-0141

**日本 Japan - Osaka**  
Tel: 81-6-6152-7160

**日本 Japan - Tokyo**  
Tel: 81-3-6880-3770

**韩国 Korea - Daegu**  
Tel: 82-53-744-4301

**韩国 Korea - Seoul**  
Tel: 82-2-554-7200

**马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur**  
Tel: 60-3-7651-7906

**马来西亚 Malaysia - Penang**  
Tel: 60-4-227-8870

**菲律宾 Philippines - Manila**  
Tel: 63-2-634-9065

**新加坡 Singapore**  
Tel: 65-6334-8870

**泰国 Thailand - Bangkok**  
Tel: 66-2-694-1351

**越南 Vietnam - Ho Chi Minh**  
Tel: 84-28-5448-2100

### 欧洲

**奥地利 Austria - Wels**  
Tel: 43-7242-2244-39  
Fax: 43-7242-2244-393

**丹麦 Denmark - Copenhagen**  
Tel: 45-4450-2828  
Fax: 45-4485-2829

**芬兰 Finland - Espoo**  
Tel: 358-9-4520-820

**法国 France - Paris**  
Tel: 33-1-69-53-63-20  
Fax: 33-1-69-30-90-79

**德国 Germany - Garching**  
Tel: 49-8931-9700

**德国 Germany - Haan**  
Tel: 49-2129-3766400

**德国 Germany - Heilbronn**  
Tel: 49-7131-67-3636

**德国 Germany - Karlsruhe**  
Tel: 49-721-625370

**德国 Germany - Munich**  
Tel: 49-89-627-144-0  
Fax: 49-89-627-144-44

**德国 Germany - Rosenheim**  
Tel: 49-8031-354-560

**以色列 Israel - Ra'anana**  
Tel: 972-9-744-7705

**意大利 Italy - Milan**  
Tel: 39-0331-742611  
Fax: 39-0331-466781

**意大利 Italy - Padova**  
Tel: 39-049-7625286

**荷兰 Netherlands - Drunen**  
Tel: 31-416-690399  
Fax: 31-416-690340

**挪威 Norway - Trondheim**  
Tel: 47-7289-7561

**波兰 Poland - Warsaw**  
Tel: 48-22-3325737

**罗马尼亚 Romania - Bucharest**  
Tel: 40-21-407-87-50

**西班牙 Spain - Madrid**  
Tel: 34-91-708-08-90  
Fax: 34-91-708-08-91

**瑞典 Sweden - Gothenburg**  
Tel: 46-31-704-60-40

**瑞典 Sweden - Stockholm**  
Tel: 46-8-5090-4654

**英国 UK - Wokingham**  
Tel: 44-118-921-5800  
Fax: 44-118-921-5820