

交流感应电机 (ACIM) 的 无传感器磁场定向控制 (FOC)

第一作者: *Mihai Cheles*
Microchip Technology Inc.
第二作者: *Dr.-Ing. Hafedh Sammoud*
APPCON Technologies SUARL

引言

交流感应电机 (AC Induction Motor, ACIM) 是适应市场对电机低成本、易维护以及可靠的电机的需求而兴起的, 并在行业中占据主导地位。需要使用感应电机驱动的典型应用有很多, 从消费应用到汽车应用, 涉及到多种功率等级和尺寸规格。

如何实现高效率、低成本的感应电机驱动控制是一个备受关注的问题, 而无传感器的磁场定向控制 (Field Oriented Control, FOC) (也称为矢量控制) 为其提供了最佳解决方案。“无传感器”这一术语并非表明省却全部的传感器, 只是与同类型磁场定向控制的其他驱动进行比较, 它指的是缺少速度和 / 或位置传感器。该特征降低了驱动系统的成本, 这也是业界一直所期望的, 但这并不是使用这种控制方法的唯一原因, 因为有些应用对体积有要求, 有些应用缺少用来将传感器或器件安装在轴上时所需的额外电缆 (由于高温、腐蚀性接触等恶劣环境), 这些应用场合中可使用这种方法。

本应用笔记的目的是介绍一种利用 dsPIC® 数字信号控制器 (Digital Signal Controller, DSC) 来进行感应电机的无传感器磁场定向控制 (FOC) 的解决方案。

概述

交流感应电机

由于交流感应电机 (ACIM) 具有结构简单以及耐久性强特点, 是工业和民用电机应用中的主要设备。这种电机不存在电刷磨损或由于使用磁钢而导致成本增加的问题。转子采用简单的钢质鼠笼结构。

ACIM 设计为运行于恒定输入电压和频率条件, 但通过改变电机输入电压的频率也可使 ACIM 高效运行在开环调速的应用中。当电机未机械过载时, 电机运行速度就与输入频率大致成正比。当降低驱动电压的频率时, 也应同时按比例减小电压的幅值。否则, 当输入频率较低时, 电机会出现过电流。这种控制方法称为压频比控制。

磁场定向控制的优点直接体现为能耗较低, 从而提高效率、降低运行费用以及驱动元件成本。

在无传感器磁场定向控制中, 速度或位置是不能直接测量的; 它们的值是利用相电压和电流等其他可直接测量的参数来估计的。

如需了解关于 ACIM 的建模方程和其他感应电机的拓扑结构的额外信息, 请参阅“参考文献”部分, 从中可以得到 Microchip 公司提供的相关文档的完整清单。

控制策略

传统的控制方法, 如上文介绍的压频比控制方法, 都是对电机驱动电压的频率和幅值进行控制。与之相比, 磁场定向控制法则同时控制电机驱动电压的频率、幅值以及相位。磁场定向控制的关键在于产生一个三相电压矢量以控制三相定子电流矢量, 该电流矢量可以控制转子磁通矢量, 进而控制转子电流矢量。

理解磁场定向控制如何工作的关键是要在头脑中设想参考坐标的变换过程。当考虑交流电机如何工作时, 您可能从定子的角度来设想其运行过程。从这一角度看, 定子绕组上施加了正弦输入电流, 该时变信号产生了旋转的磁通。转子的速度将是该旋转磁通矢量的函数。从定子静止坐标系的角度来看, 定子电流和旋转磁通矢量看似交流量。

现在, 不再采用前面的观察角度, 而是设想您进入电机。您自己以相同的速度随着定子电流产生的旋转磁通矢量进行同步旋转。从这一角度来观察稳态运行的电机, 定子电流看似常量而转子磁通矢量则是静止的! 最终, 您只要控制定子电流来获得期望的转子电流 (不能直接测量获得)。通过坐标变换, 可使用标准的控制环, 如同控制直流量一样实现对定子电流的控制。

应用笔记 AN908 《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》(见“参考文献”)中介绍了一种关于感应电机的有传感器的磁场定向控制方法。这种无传感器控制方案的框图与有传感器控制方案的不同之处在于少了速度测量环节而增加了估计器模块。该无传感器控制的估计器模块需要电压和电流作为输入,如以下各节所述。

控制模块原理图

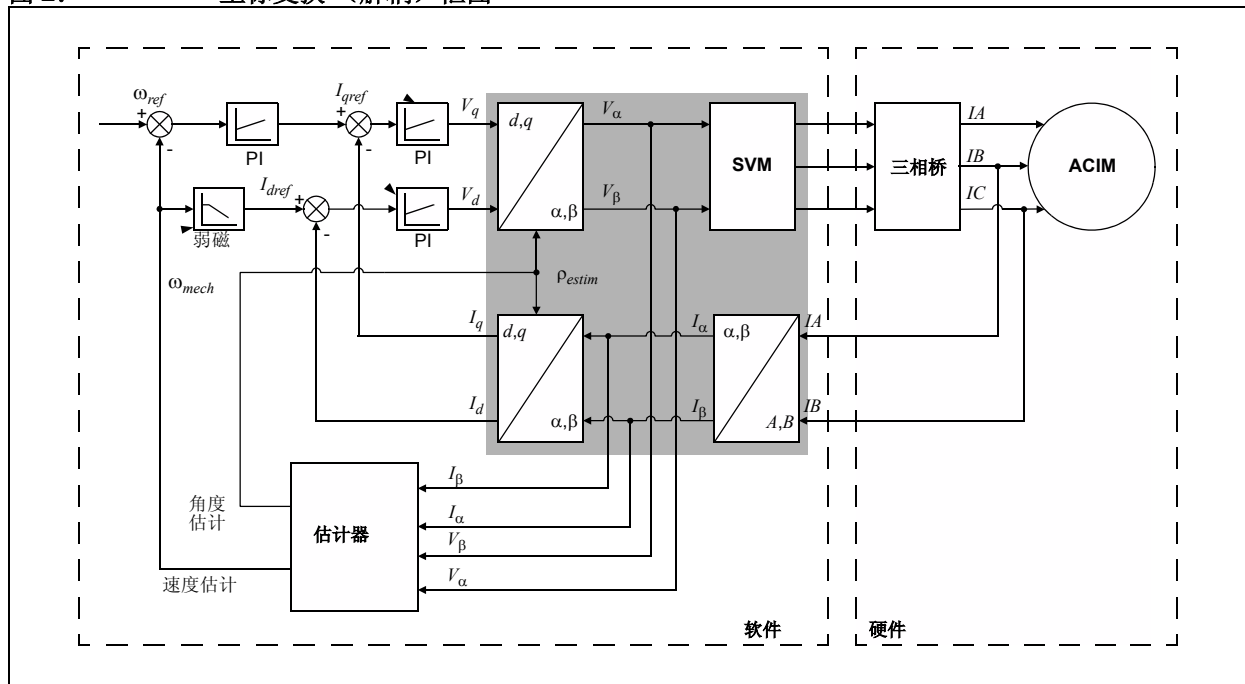
图 1: ACIM 无传感器磁场定向控制 (FOC) 模块框图



电流解耦

解耦模块（图 2 中的阴影部分）由 Clarke 变换模块和 Park 变换模块构成。Clarke 变换模块的作用是将基于 3 轴、2 维的定子静止坐标系的各物理量变换到 2 轴的定子静止坐标系中。Park 变换模块的作用是将基于 2 轴的定子静止坐标系的各物理量变换到转子旋转坐标系中。读者可参阅 AN908《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》（见“参考文献”）以了解更多详细信息。

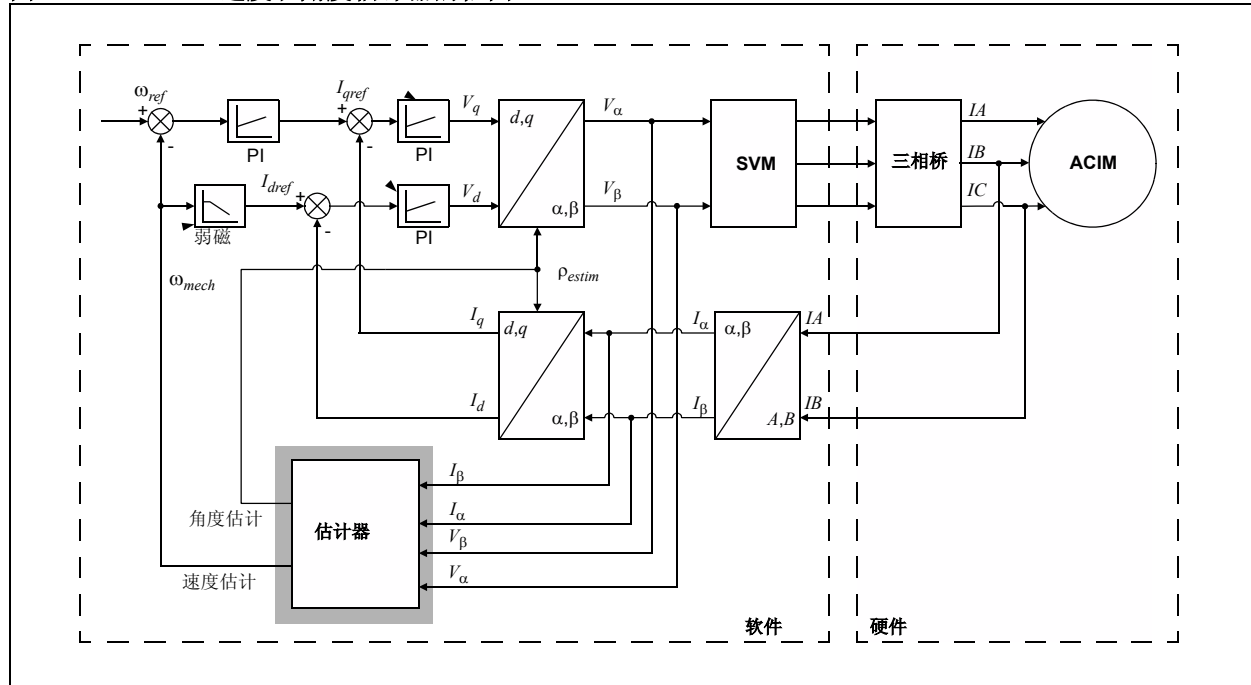
图 2: 坐标变换 (解耦) 框图



速度和角度估计器

速度和角度估计器（图 3 中的阴影部分）的输入是定子静止参考坐标下的两相电压和电流。反电动势（Back Electro Motive Force, BEMF）用来估计速度和角度。当励磁电流恒定时，BEMF 公式（见公式 4 和公式 5）得以简化。

图 3: 速度和角度估计器的框图



首先，用估计器模块的输入计算 BEMF，如公式 1 所示。

公式 1:

$$E_{\alpha} = V_{\alpha} - R_S I_{\beta} - \delta L_S \frac{dI_{\alpha}}{dt}$$

$$E_{\beta} = V_{\beta} - R_S I_{\alpha} - \delta L_S \frac{dI_{\beta}}{dt}$$

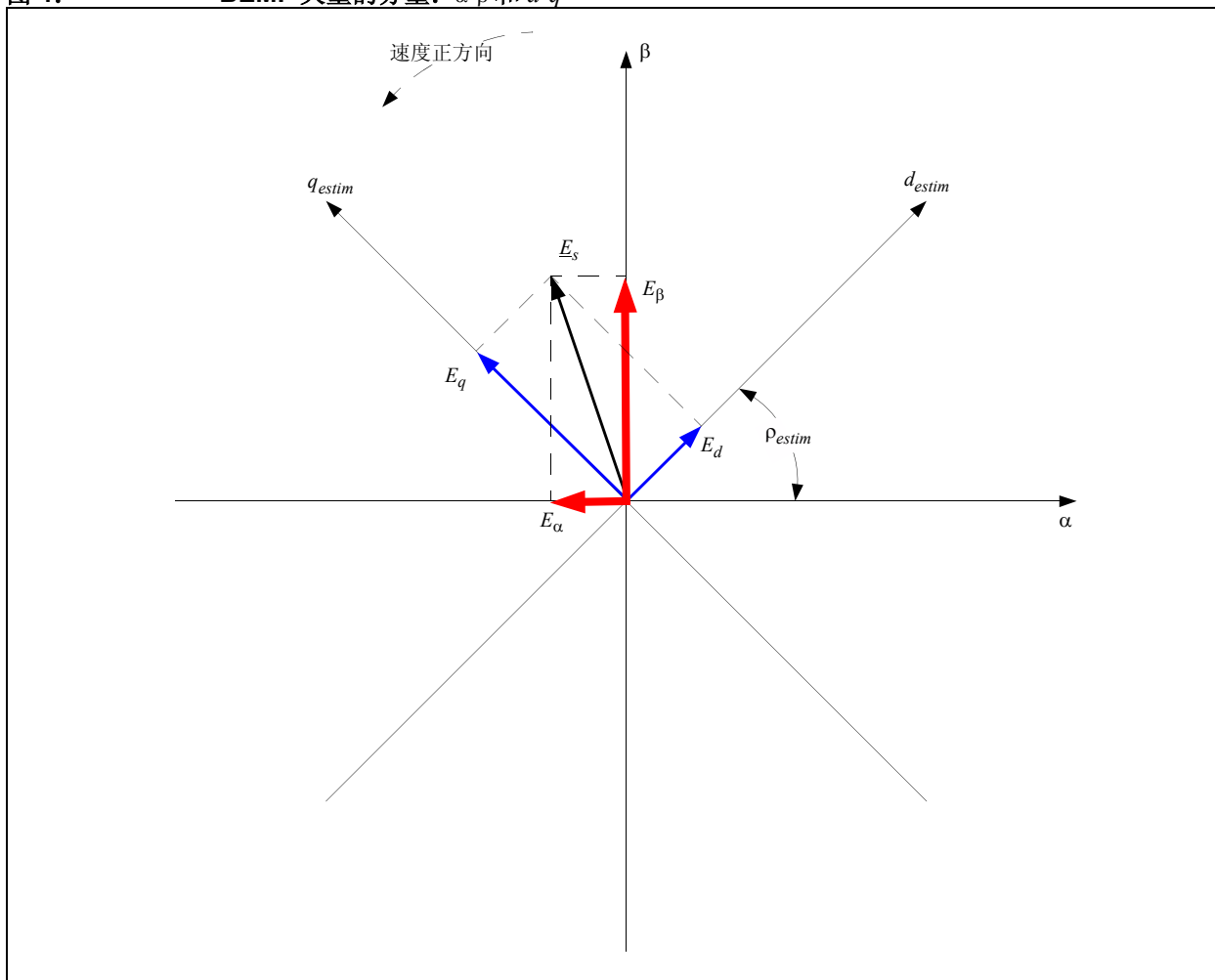
公式 2 给出了从 α-β 坐标到 d-q 坐标变换的计算公式。

公式 2:

$$E_d = E_{\alpha} \cos(\rho_{estim}) + E_{\beta} \sin(\rho_{estim})$$

$$E_q = -E_{\alpha} \sin(\rho_{estim}) + E_{\beta} \cos(\rho_{estim})$$

图 4 表征的是估算的 BEMF 的 d-q 分量；但当励磁电流恒定时，BEMF 的 d 轴分量为 0。

图 4: BEMF 矢量的分量: α - β 和 d - q 

如果估算的 BEMF 与实际的 BEMF 不相等，那么两者之间的角度为 $\Delta\rho = \rho - \rho_{estim}$ ，如图 5 所示。

在图5中，估算的BEMF的 d 轴分量大于0，使得 $\Delta\rho < 0$ 。

如果 BEMF 小于 0，则 $\Delta\rho > 0$ ，如图 6 所示。

图 5: 当 $E_d > 0$ 时的角度估计和正速度

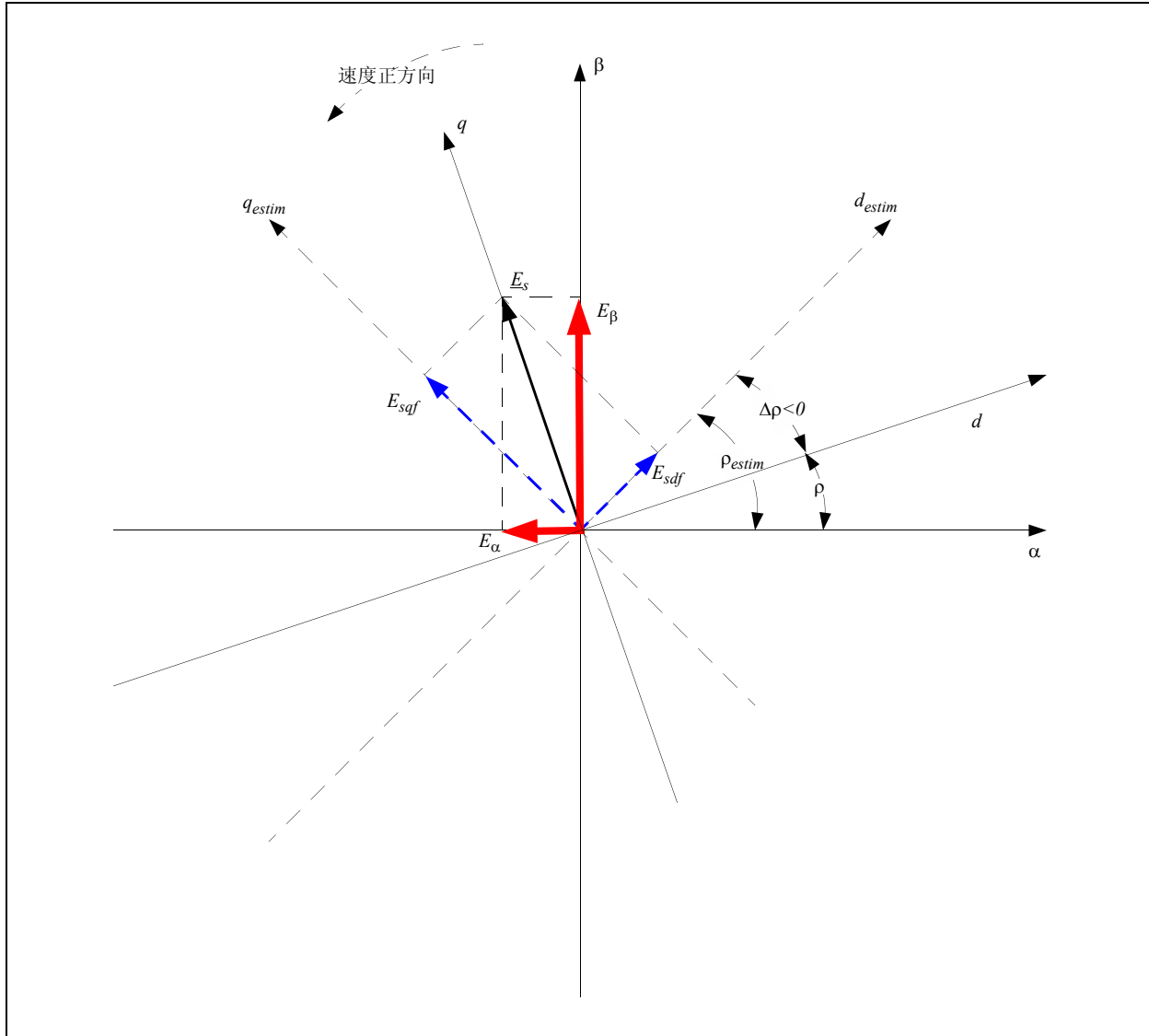
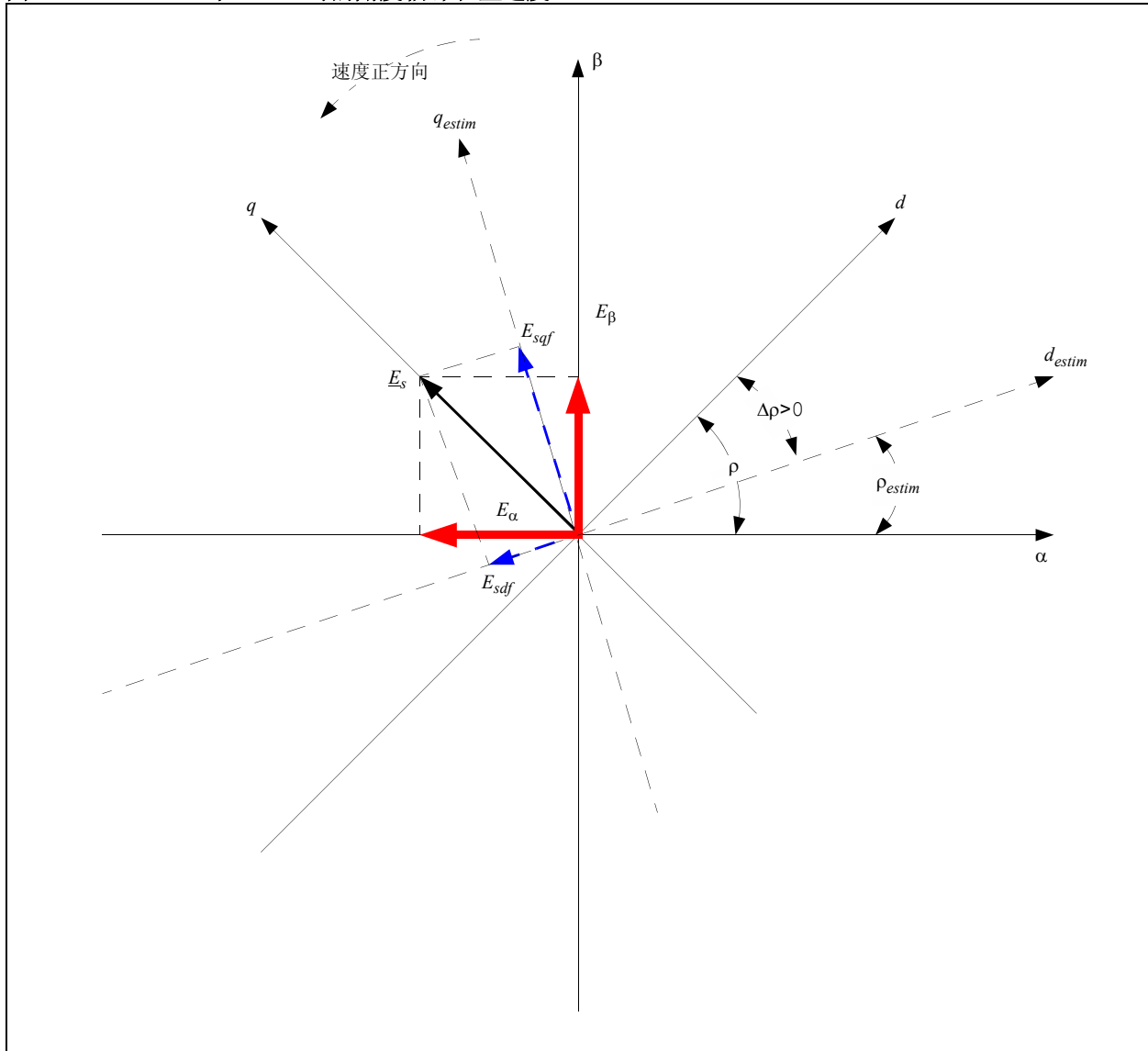


图 6: 当 $E_d < 0$ 时的角度估计和正速度

在对 BEMF 估算值与实际 BEMF 值之间的误差进行校正时,可采取的一种简单方法是将误差 $\Delta\rho$ 从估计角度 ρ_{estim} 中减去。但这可能导致数值的不稳定。

解决角度估计校正问题的一个办法是用速度代替角度。由于角度是速度的积分,因此这种方法可以避免数值的不稳定。

BEMF 与磁通变化成正比。公式 3 给出了 d - q 轴分解的结果。

公式 3:

$$\underline{E} = \frac{1}{1 + \delta_R} \frac{d\Psi_{mR}}{dt}$$

公式 4 和公式 5 (认为转子磁通是恒定的) 给出了反电动势在 d - q 轴上的分量形式。

公式 4:

$$E_d = \frac{1}{1 + \delta_R} \frac{d\Psi_{mR}}{dt} \rightarrow 0$$

公式 5:

$$E_q = \frac{1}{1 + \delta_R} \omega_{mR} \Psi_{mR}$$

因此, 转子速度可表示为公式 6。

公式 6:

$$\omega_{mR} = \frac{1 + \delta_R}{\Psi_{mR}} E_q$$

估计误差将产生非零的 E_d 。而且， E_d 越大，误差就越大，这将导致估算转子速度时出现了一个校正项，如公式 7 所示。

公式 7:

$$\omega_{mR} = \frac{1 + \delta_R}{\Psi_{mR}} \left(E_q - \underbrace{\text{sgn}(E_q) \cdot E_d}_{\text{校正}} \right)$$

如何校正角度估计误差取决于旋转方向，如表 1 所示。

表 1:

条件	对 ω_{mR} 所起的作用	校正项
速度为正, $E_d > 0$	减小	$- E_d$
速度为正, $E_d < 0$	增加	$- E_d$
速度为负, $E_d > 0$	增加	$+ E_d$
速度为负, $E_d < 0$	减小	$+ E_d$

角度是速度的积分，如公式 8 所示。

公式 8:

$$\rho = \int \omega_{mR} dt$$

估计器中的 “PLL” 校正模块的示意图如图 7 所示。

图 7: 估计转速和角度（BEMF 以及恒定磁通的函数）

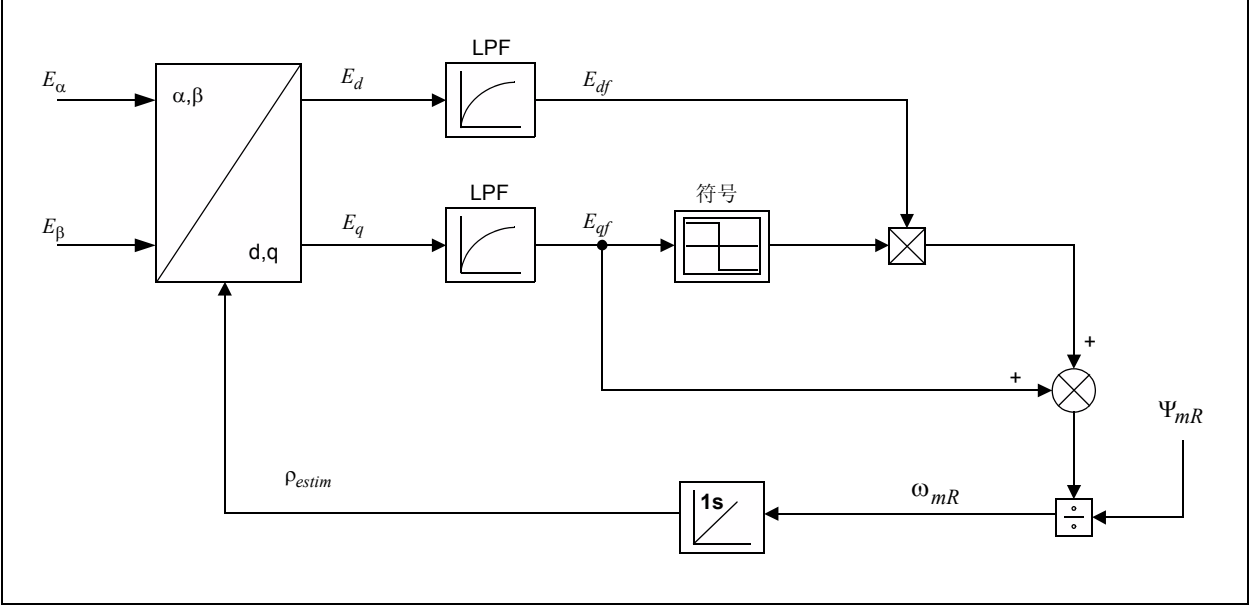
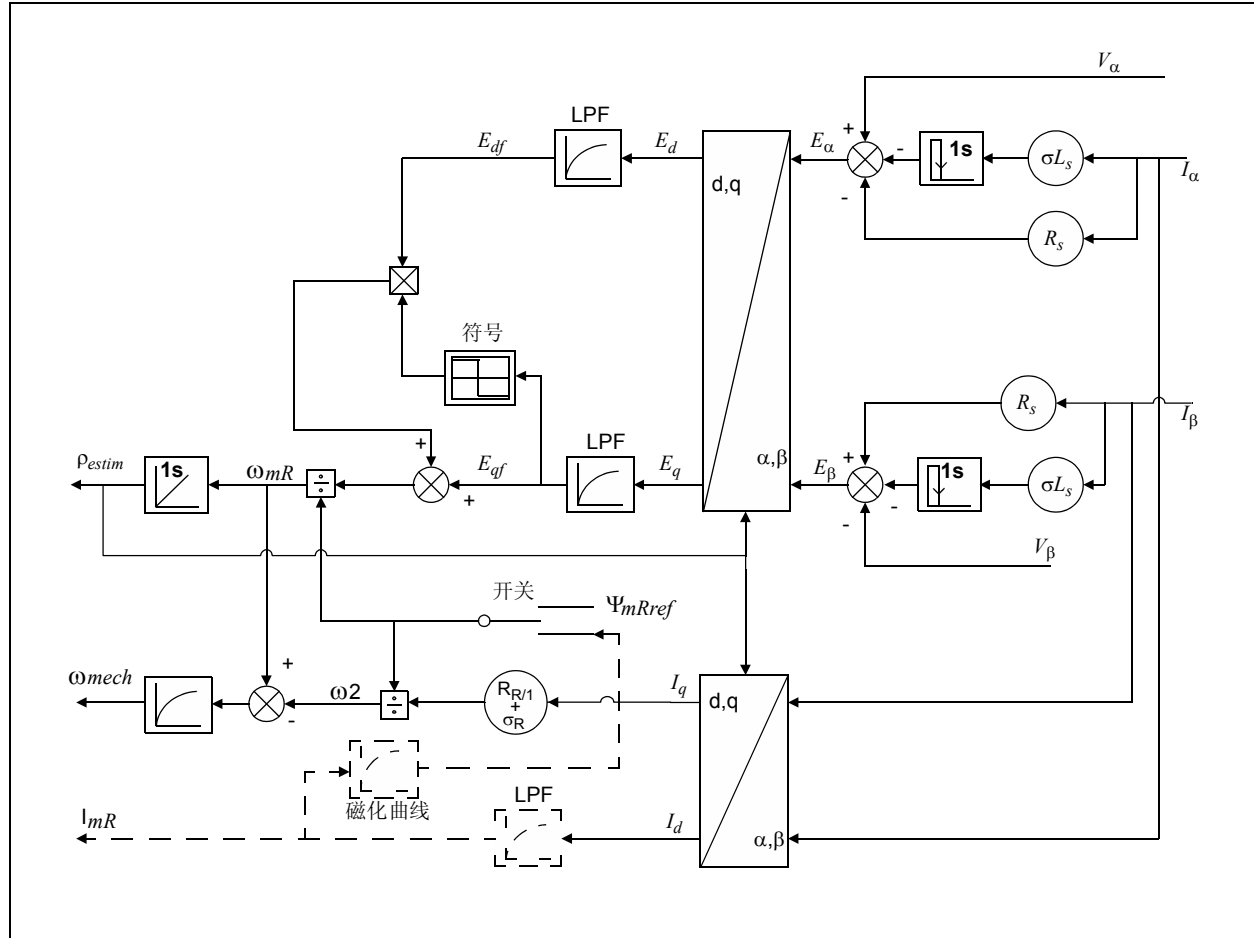


图 8 显示的是将校正模块加到了估计器的整体框图中，以获得在无传感器 FOC 框图（图 1）中呈现的输入 / 输出。

估计 BEMF 取决于经 Park 变换再进行低通滤波后得到的数据。一阶滤波器用来降低由电流微分引入的噪声。该滤波器的常量的选择应使信号中的噪声能够显著降低。同时，滤波器也不会引起估计 BEMF 的动态变化。

图 8: 速度和角度估计器的框图



PI 控制器

该 PI 控制器是一种控制环反馈装置，用来校正被测过程量与其参考值之间的误差，其输出对控制过程进行调整。在感应电机的控制实例中，需要使用 3 个 PI 控制器，一个控制与磁通和转矩产生相对应的每个电流分量，一个是转速控制环。

有关 PI 控制器的更多信息可参阅应用笔记 AN908 《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》（见“参考文献”）。

弱磁

当电机转速超过其额定转速时，必须削弱转子磁通。电机机械速度的增加需要相应增加定子电流频率，但必须遵循简单方程式 $V/Hz = ct$ 的约束。由于电压增加时不能超过电机的额定电压，因此转速的增加必须以产生的转矩减小为代价，以保持恒定的功率曲线。

在闭环磁场定向控制中，当电机的转速超过额定转速时， I_d 和 I_q 的控制环饱和，限制了电机磁通。当电机转速增加时，使用弱磁算法能够减小 I_d 电流，从而解除控制环的饱和。

空间矢量调制

由 Clarke 变换模块得到的电压供给 SVM 模块，其能够产生逆变器门极的命令信号。有关 SVM 模块的原理在应用笔记 AN908 《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》（见“参考文献”）中有详细的解释。

与正弦 PWM 相比，SVM 的主要优点为：

- 在线性工作区域中，线电压增加（15% 以上）——这使得相同额定功率下的额定电流较小；而较小的电流意味着功率逆变器的成本较低，且换相时的功耗较小；
- 由于模块的输入是一个定义在定子静止坐标系下的矢量，因此，仅使用一个量就可以控制三相正弦波的生成，从而减小了计算所需的开销。

高阶系统的分解

本应用实例的设计具有一个优点，即将 Microchip 提供的电机控制演示中的一些现成的硬件模块组件拿来使用。此外，使用 Microchip 提供的开发板及其特殊适配增强板使得开发过程更为容易，缩短任何系统的输出时间。

硬件

组件模块

该系统使用的组件包括：

三相交流感应电机（ACIM）

这里推荐使用的三相 ACIM 为 Lesson ACIM，这种电机可从 Microchip 或电机分销商处买到。如果使用其他种类的电机，就须在软件中修改电机参数和 PI 控制器系数。

由制造商标示的电机参数必须进行归一化，以适应实际软件实现的需要。为了支持参数归一化功能，在应用软件档案内制作了一个转换表（EstimParameters.xls 文件），它提供了应用软件所需的归一化参数。

MICROCHIP dsPICDEM™ MC1H 三相高压功率模块

三相高压功率模块包括：电力电子门驱动级、故障检测和锁存电路，以及隔离的霍尔效应电流传感器。该模块的详细描述可参见 DS70096 “dsPICDEM™ MC1H 3-Phase High Voltage Power Module User's Guide”（见“参考文献”）。

Microchip 提供的开发板

对于控制开发板来说，有几种选择，取决于所选的 dsPIC 种类。例如，与 dsPIC30F 相对应的开发板为 dsPICDEM™ MC1，而与 dsPIC33F 对应的开发板为 Explorer 16。这些开发板提供了直接与 dsPICDEM™ MC1H 相连的连接器，或对于 Explorer 16 来说，可以使用像 PICTail™ Plus 电机控制子板这样的适配器板与其进行连接。读者可参阅“参考文献”，以了解那些先前提到的开发板的相关文档信息。本应用笔记提供了一些软件档案，其中包含有几种 dsPIC 的实现方案。在软件档案里，对每一种推荐使用的设置（Readme.doc 文件），都列举了相应的硬件元件。

dsPIC 应用

dsPIC 器件具有高性能的 16 位数字信号控制器架构（改进的 RISC CPU），且包含了丰富而强大的 DSP 功能。

- 高性能 CPU 特点：
 - 改进的哈佛结构
 - 具有灵活寻址方式的 C 编译器优化指令集架构
 - 24 位宽的指令，16 位宽的数据路径
 - 83 条基本指令
 - 多达 40 MIPS 工作速度
 - 44 个中断源
 - 16 x 16 位工作寄存器阵列
- DSP 引擎特点：
 - 单周期乘 - 累加
 - 模寻址与位翻转寻址方式
 - 两个具有可选饱和和逻辑的 40 位宽累加器
 - ± 16 位单周期移位
- 电机控制 PWM 模块特点：
 - 8 个 PWM 输出通道
 - 互补或独立输出模式
 - 边沿和中心对齐模式
 - 4 个占空比发生器
 - 专用时基
 - 可编程输出极性
 - 针对互补模式的死区时间控制
 - 手动输出控制
 - A/D 转换触发
- 正交编码器接口模块特点：
 - A 相、B 相和索引脉冲输入
 - 16 位递增 / 递减位置计数器
 - 计数方向状态
 - 位置测量（x2 和 x4）
 - 输入端接有可编程数字噪声滤波器
 - 16 位定时器 / 计数器模式交替
 - 位置计数器上溢 / 下溢中断

软件

组件模块

软件项目组件使用模块化设计方法，即每个函数由它本身的文件所包含。控制算法由一个中断服务程序（由控制测量采样触发）和一个由用户参与和控制的任務组成，该任务与控制状态机一起进行处理。

该控制算法在开发时，是将应用笔记 AN908 《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》（见“参考文献”）中介绍的 ACIM 有传感器矢量控制的算法进行

改编，以适应无传感器控制的需要，修改部分仅涉及到估计器部分模块以及原先存在的模块与估计器的连接部分。因此，关于现有软件组件的详细资料也可在同一应用笔记中找到。

表 2 列出了最重要的软件模块：

表 2:

模块	描述
acim.c	ISR、用户界面和控制任务。包括控制算法，用户接口和控制状态处理。
estim.c	转子转速和角度估计器。
pi.s	比例 - 积分控制器。
trig.s	正弦计算。
svgen.s	SVM 生成。
clkpark.s	Clarke-Park 直接变换。
invclark.s	Clark 反变换。
invpark.s	Park 反变换。
curmodel.s	励磁电流和角度计算。
fdweak.s	弱磁算法。

与上文所列举的源文件相关联的文件是头文件，一个重要的头文件是用户参数配置头文件（UserParams.h 文件）。用户参数包括电机参数和逆变器参数。电机参数需进行归一化以适应软件控制算法——为了使电机的实际控制方案可易于移植到软件档案内的其他系统元件上，可以找一个转换实用程序，将物理测量值转化为归一化值（EstimParameters.xls 文件）。

调试能力和 DMCI

Microchip 的 MPLAB® IDE 提供了 dsPIC 产品开发环境的所有功能。除了功能增强的代码编辑器外，IDE 还提供了一个高效的 C 代码编译器和一个支持具有增强的断点和跟踪能力的单步运行的调试器。在易于使用的统一 GUI 下，可以使用所有这些功能。

DMCI 工具提供了一个图形界面，它允许和系统关键变量之间进行快速、动态且易于使用的交互。通过使用滑动条、开 / 关按钮以及进行程序生成数据分析的动态分配图形窗口，系统变量的这种直观表征方式缩短了开发和校准 / 调整时间。此外，DMCI 还提供了程序变量的项目认知导航，它使界面的专用控制与可视化功能易于选择与分配。

执行与数据流

软件程序执行由两个主要任务构成：**ACIM** 的无传感器控制和用户命令与信息处理。

当电机从零速启动时，还不能进行无传感器的控制；因此本应用实例必须使用简单的压频比控制进行开环启动。一旦电机转动起来，可以利用 **BEMF** 来进行无传感器控制——用户可以拨动按钮开关将开环控制切换到闭环磁场定向矢量控制上。为了整定 **PI** 控制器参数，可以选择将参考转速加倍，使系统响应阶跃激励。

由于控制电机的转速是主要的控制任务，因此，参考转速是算法输入中的一个——它从电位计中读取。表 3 显示了控制状态机中的各种状态。

表 3:

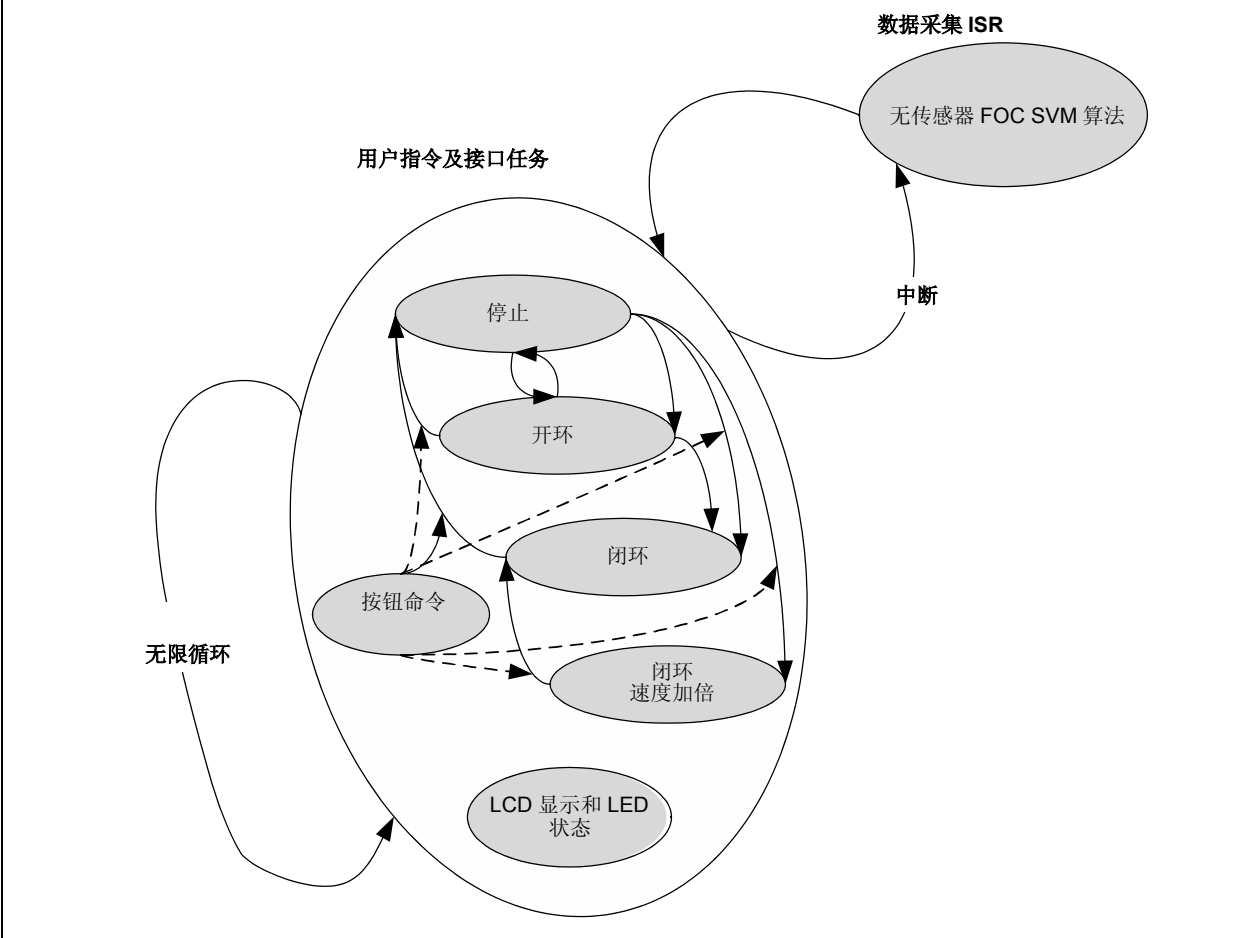
状态	描述
停止	电机停转。
开环	为启动电机，必须通过该状态，它决定了转子的位置。
闭环	执行实际的无传感器磁场定向控制 SVM 。
闭环速度加倍	参考速度加倍的闭环算法。这对 PI 控制器参数整定和数据采集来说都是必要的。

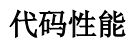
通过按动开发板上的特定按钮，可以步入这些状态。每一个软件档案中的硬件设置描述会确切地表明是哪一个电位计和哪些按钮被使用。

对于无传感器磁场定向控制的输入来说，被测电流是必需的。控制输出是三个用来控制逆变器门极的 **PWM** 模块信号。

在计算转子参考磁通时，可以使用电机参数，若是使用弱磁控制，那么转子参考磁通是作为转子速度的函数被确定的。

图 9: 软件状态机





对于 MC1 板, 使用 dsPIC30F 时, 可以达到以下性能:

- 执行时间: 212-250 个周期
- 时钟速度: 7.2-8.5 μs @29.491 MHz
- 代码大小: 226 个字
- RAM: 小于 76 个字

执行及其结果

转速和角度估计器

估计器模块的输入是经 Park 变换后得到的电流和电压（见图 3）。在应用软件中实现的估计器公式如下所述。

BEMF 电压的计算如公式 9 所示。

公式 9:

```
EstimParm.qVIndalpha = ((long)MotorEstimParm.qLsDt * (long)(EstimParm.qDIalpha))>>10;
```

其中 MotorEstimParm.qLsDt 为 $2^{10} \cdot \delta \cdot L_s \frac{I_o}{(U_o \cdot 8 \cdot T_{sample})}$

如图 11 所示，阴影部分表征的是公式 9 中的内容。

图 11: 转速和角度估计器的框图

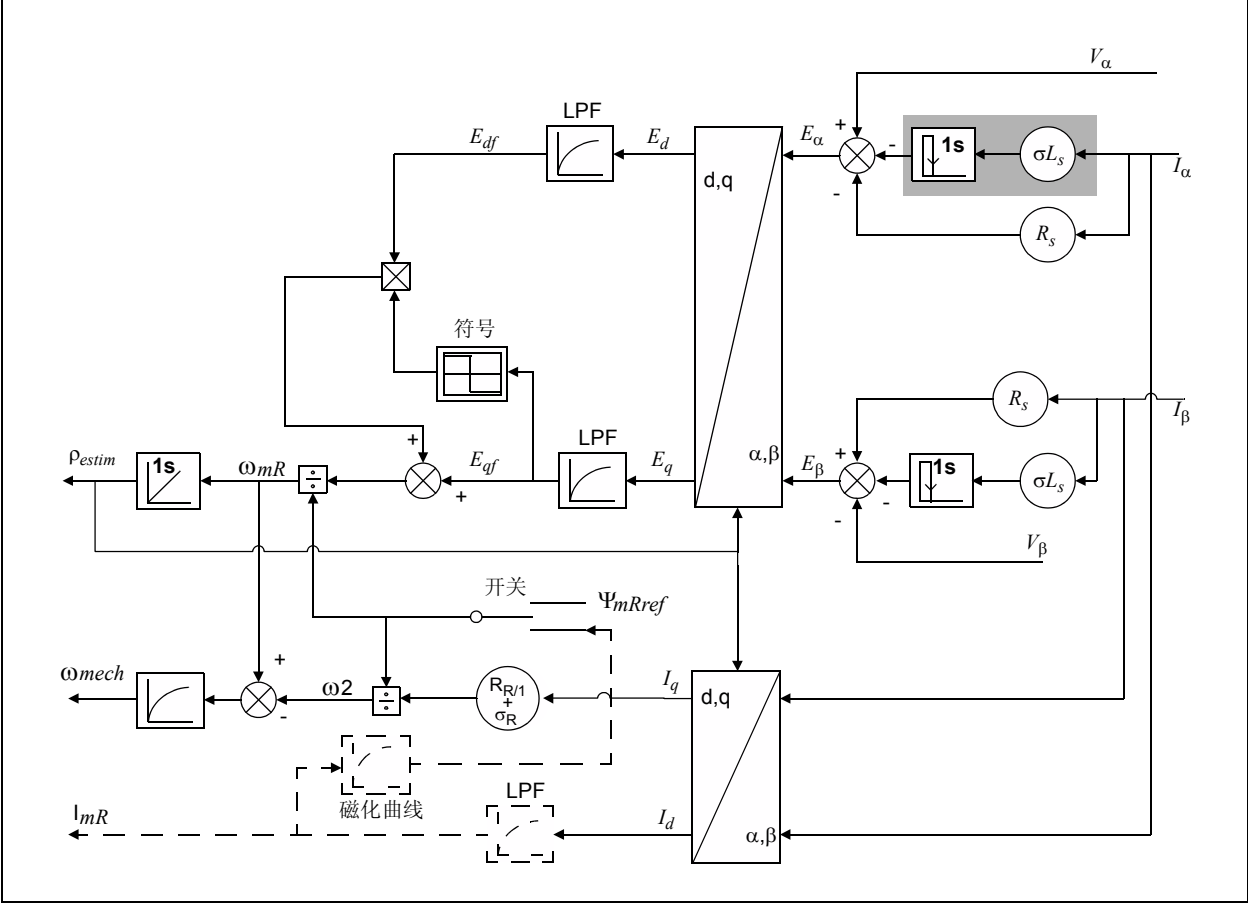
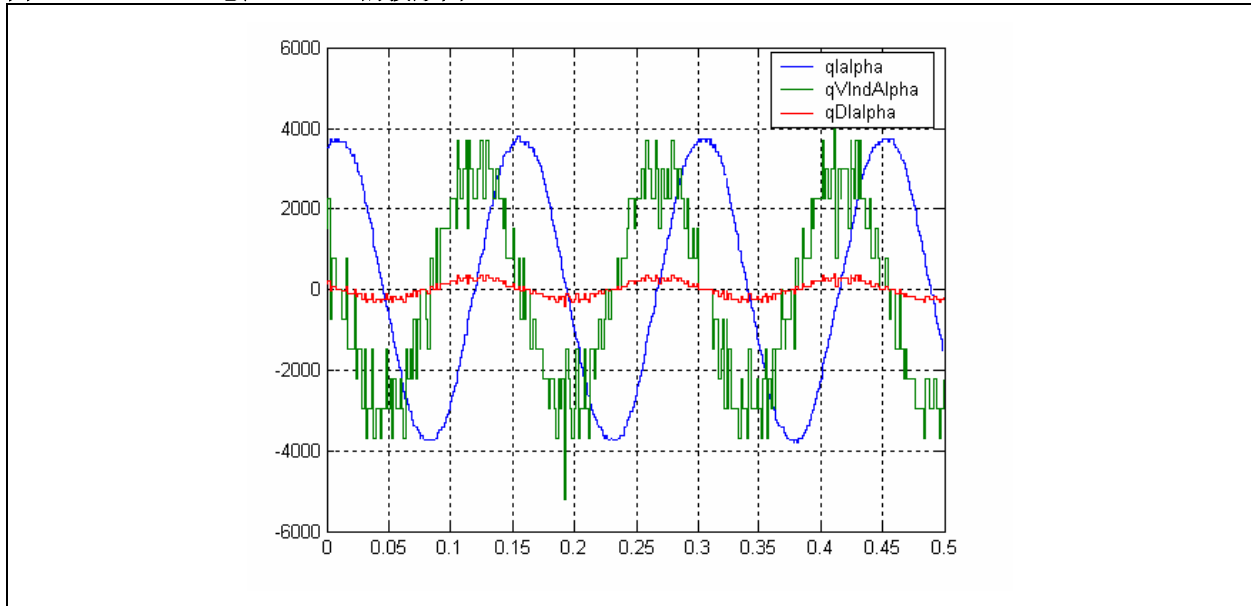


图 12 显示了由此产生的感应 BEMF 波形。

图 12: 感应 BEMF 的波形图



为减小噪声，每 8 个中断周期对电流作一次微分。由于 MotorEstimParm.qLsDt 是以 2^{10} 来标度的，因此有必要限制 EstimParm.qDlalpha 和 EstimParm.qDlbeta 在 -1023 和 1023 之间。公式 10 显示了 BEMF 的 α 分量是如何计算的。

公式 10:

```
EstimParm.qEsa = ParkParm.qValpha - (((long)MotorEstimParm.qRs * (long)ParkParm.qIalpha) >> 15) - EstimParm.qVindalpha;
```

其中 MotorEstimParm.qRs 为 $R_s \cdot 2^{15} \cdot \frac{I_o}{U_o}$

如图 13 所示，阴影部分表征的是公式 10 中的内容。

图 13: 转速和角度估计器的框图

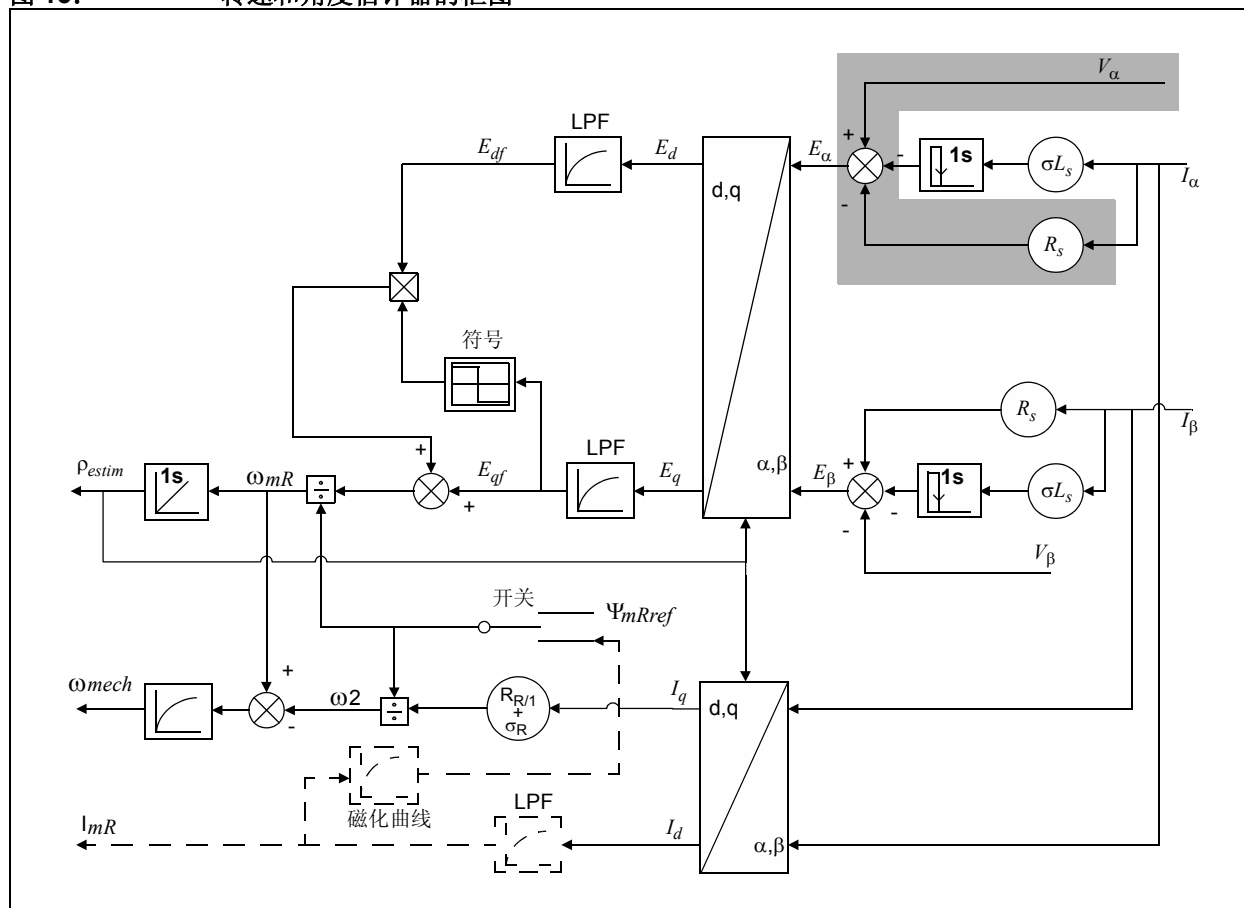
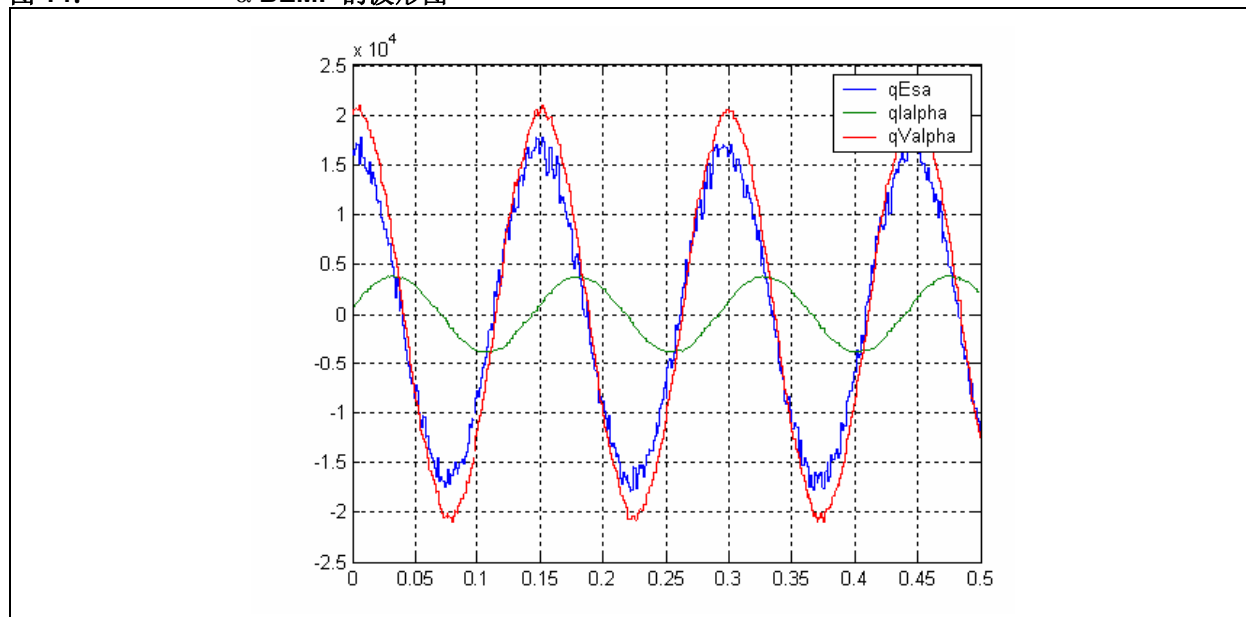


图 14 显示了由此产生的 α BEMF 的波形。

图 14: α BEMF 的波形图

接下来，将计算出的 BEMF 的 α - β 分量变换到 d - q 坐标系下，如公式 11 所示。变换角是上一个控制步骤计算出的估计磁通角 ρ_{estim} ，如图 15 所示。

公式 11:

```
EstimParam.qEsd = (((long)EstimParam.qEsa * (long)SincosParam.qCos) >> 15) + (((long)EstimParam.qEsb * (long)SincosParam.qSin) >> 15);
```

如图 15 所示，阴影部分表征的是公式 11 的内容。

图 15: 转速和角度估计器的框图

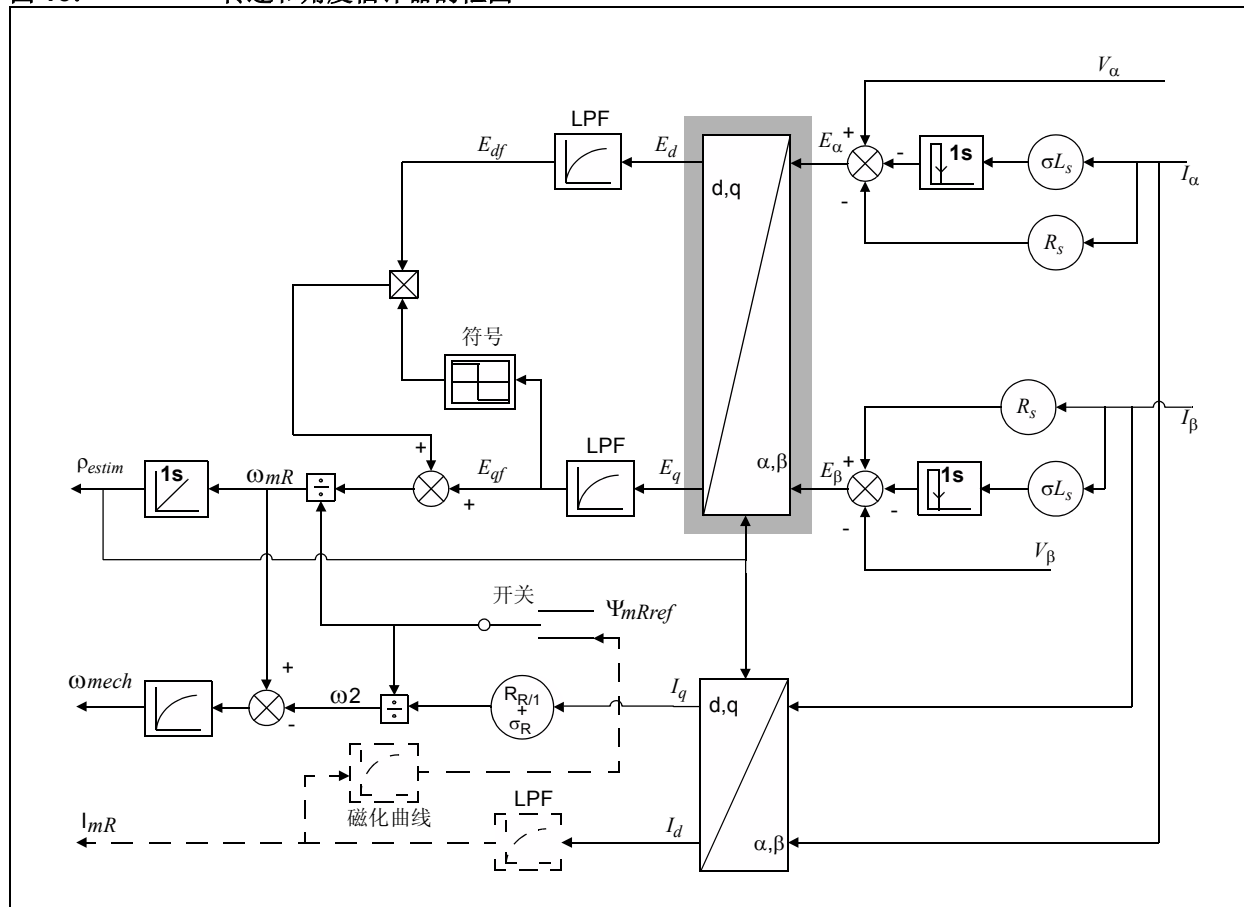
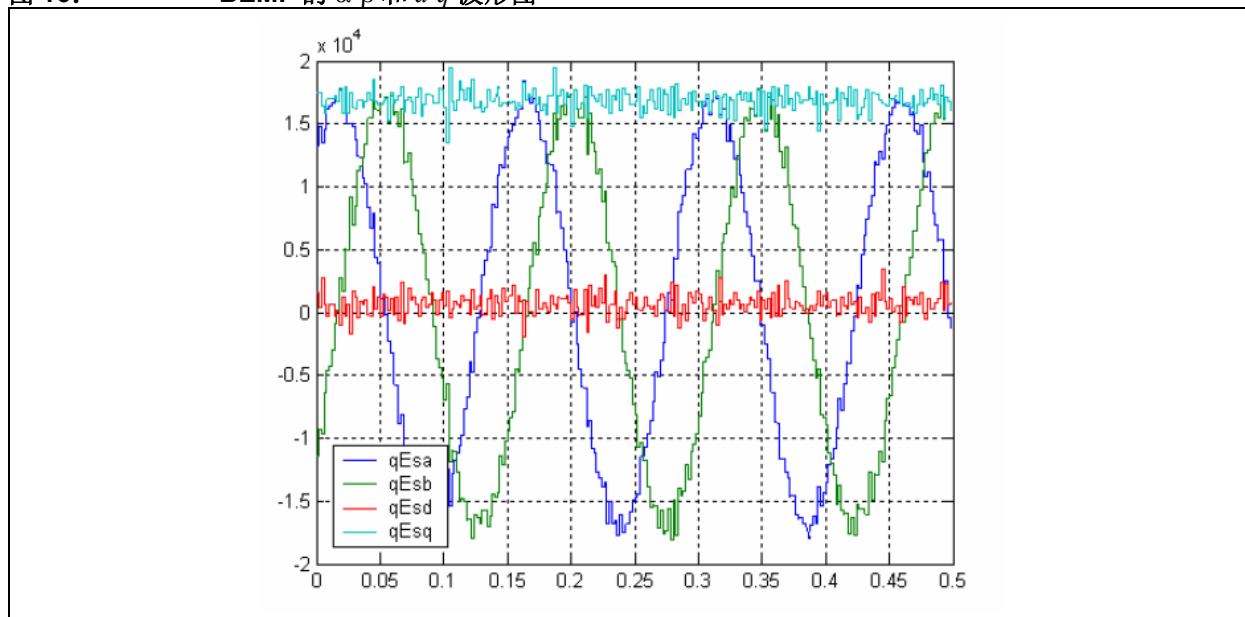
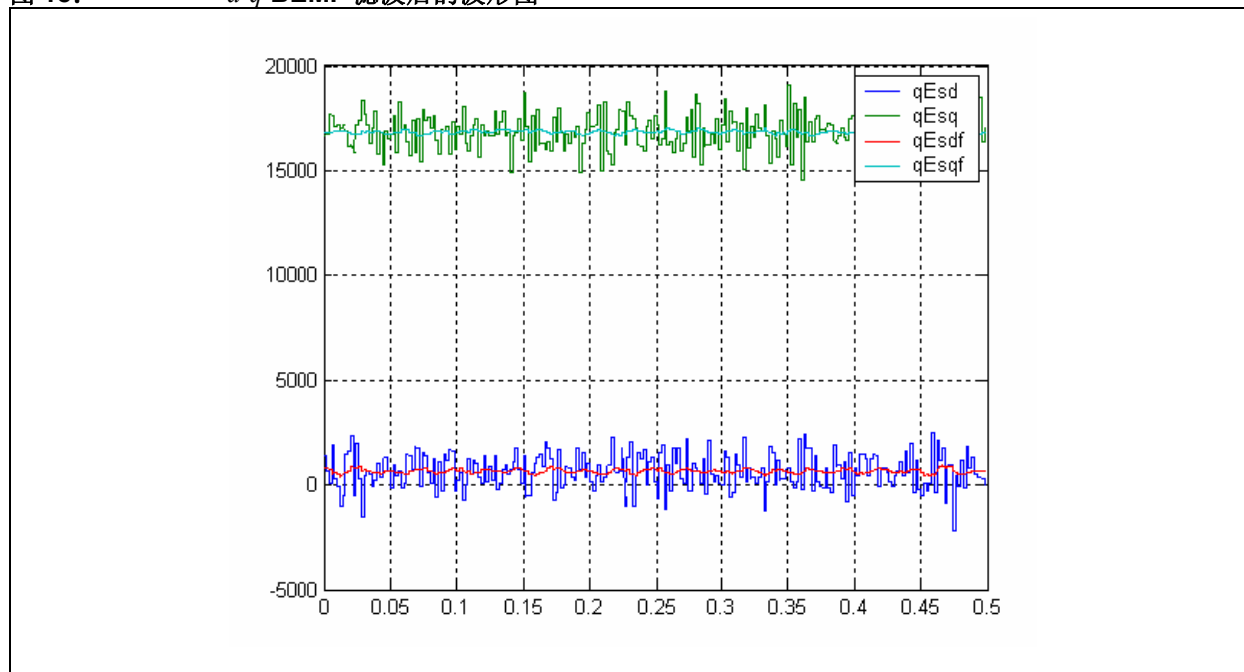


图 16 显示了由此产生的 BEMF 的 α - β 和 d - q 分量的波形。

图 16: BEMF 的 α - β 和 d - q 波形图

--



图 18: d - q BEMF 滤波后的波形图

估计角速度的校正方法是，根据 BEMF 的 q 轴分量的符号，加上或减去 BEMF 的 d 轴分量。

公式 13:

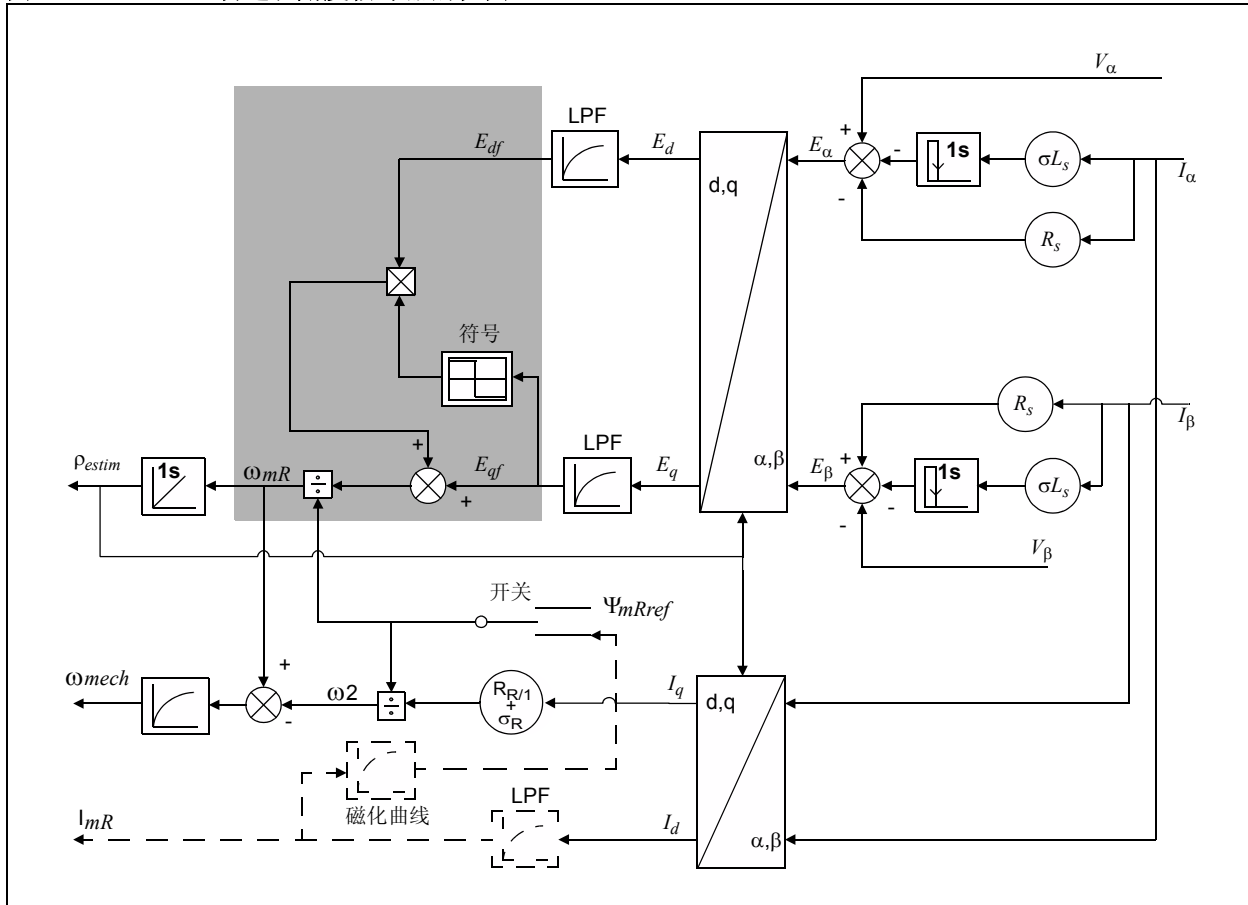
```
if (EstimParm.qEsqf > 0)
{
    EstimParm.qOmegaMr = (((long)MotorEstimParm.qInvPsi * (long)EstimParm.qEsqf) >> 15) - EstimParm.qEsdf;
} else
{
    EstimParm.qOmegaMr = (((long)MotorEstimParm.qInvPsi * (long)EstimParm.qEsqf) >> 15) + EstimParm.qEsdf;
}
```

其中 $\text{MotorEstimParm.qInvPsi}$ 等于

$$\frac{(1 + \delta_R) \cdot U_0 \cdot 2^{15}}{\Psi_{ref} \cdot \omega_0}$$

如图 19 所示，阴影部分表征的是公式 14 的内容。

图 19: 转速和角度估计器的框图



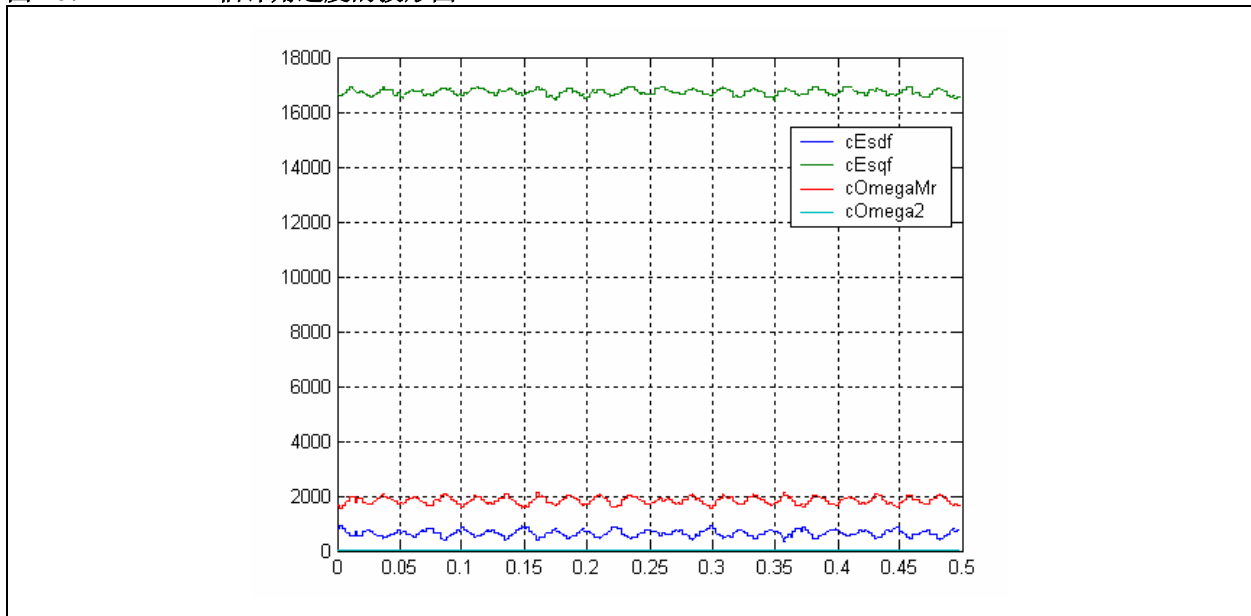
如公式 14 所示，为了增加估计器算法的稳定性以及收敛性，应对磁通频率加以限制。

公式 14:

```
if (EstimParm.qOmegaMr > EstimParm.qOmegaMrMax)
{
    EstimParm.qOmegaMr = EstimParm.qOmegaMrMax;
}
if (EstimParm.qOmegaMr < EstimParm.qOmegaMrMin)
{
    EstimParm.qOmegaMr = EstimParm.qOmegaMrMin;
}
```

图 20 显示了由此产生的估计角速度的波形图。

图 20: 估计角速度的波形图



励磁电流角可以通过对磁通频率积分来计算。

公式 15:

```
EstimParm.qRhoStateVar = EstimParm.qRhoStateVar + (long)(EstimParm.qOmegaMr) *
(long)(EstimParm.qDeltaT);
EstimParm.qRho = (int)(EstimParm.qRhoStateVar>>15);
```

其中 EstimParm.qDeltaT 为 $2^{15} \cdot T_{sample} \cdot \frac{\omega_0}{\varepsilon_0}$

如图 21 所示，阴影部分表征的是公式 15 的内容。

图 21: 转速和角度估计器的框图

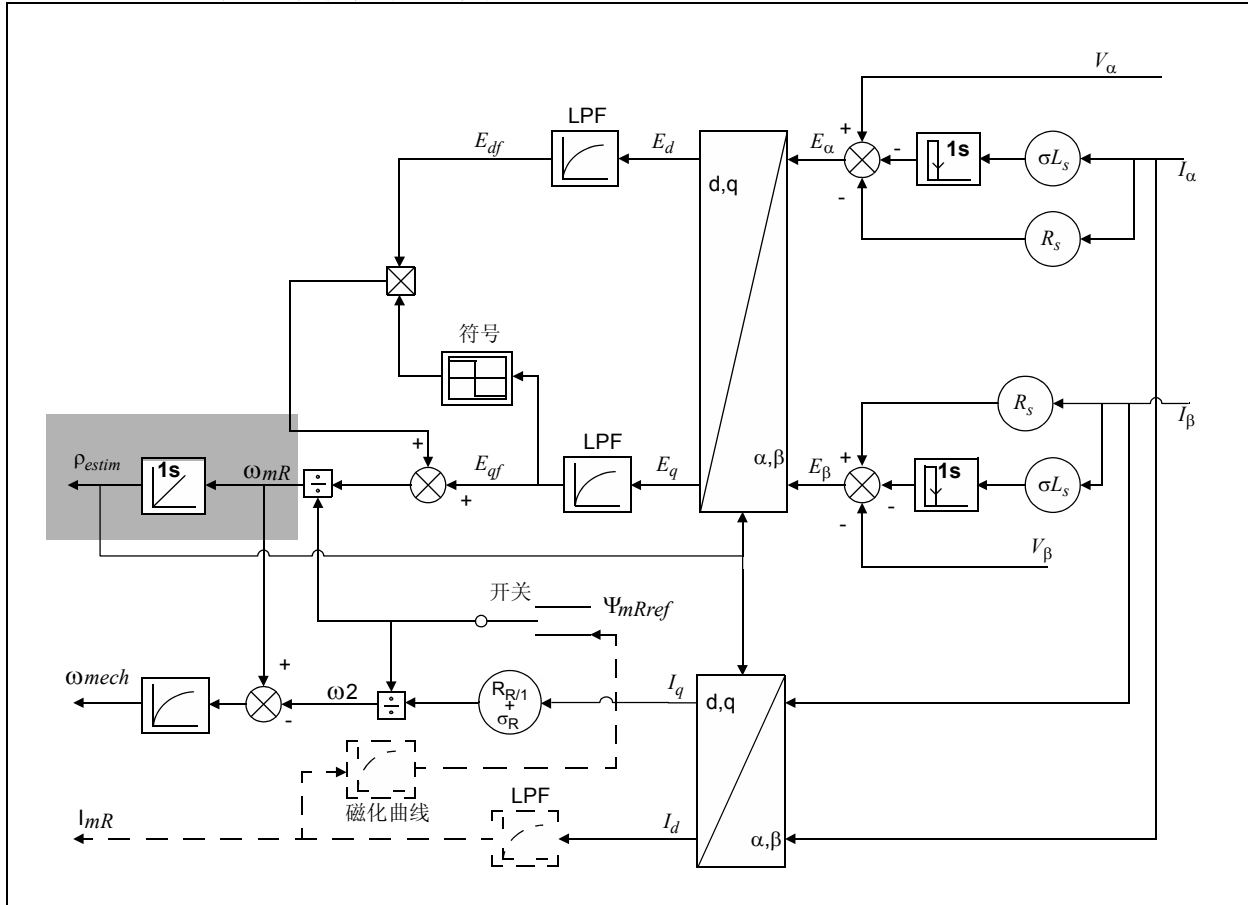
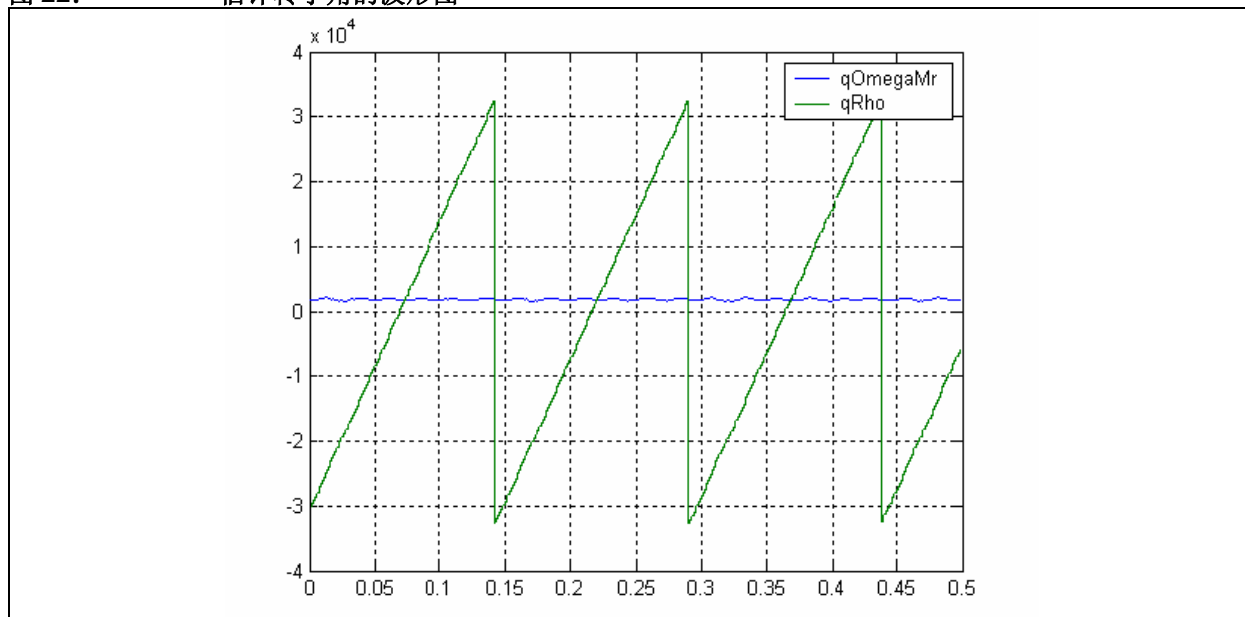


图 22 显示了估计转子角的波形图。

图 22: 估计转子角的波形图



电流模型的软件模块 (curmodel.s) 能够计算励磁电流值, 但这对于估计器来说, 并不需要。将励磁电流设置为一个恒定的参考值就可以避免这种多余的计算。

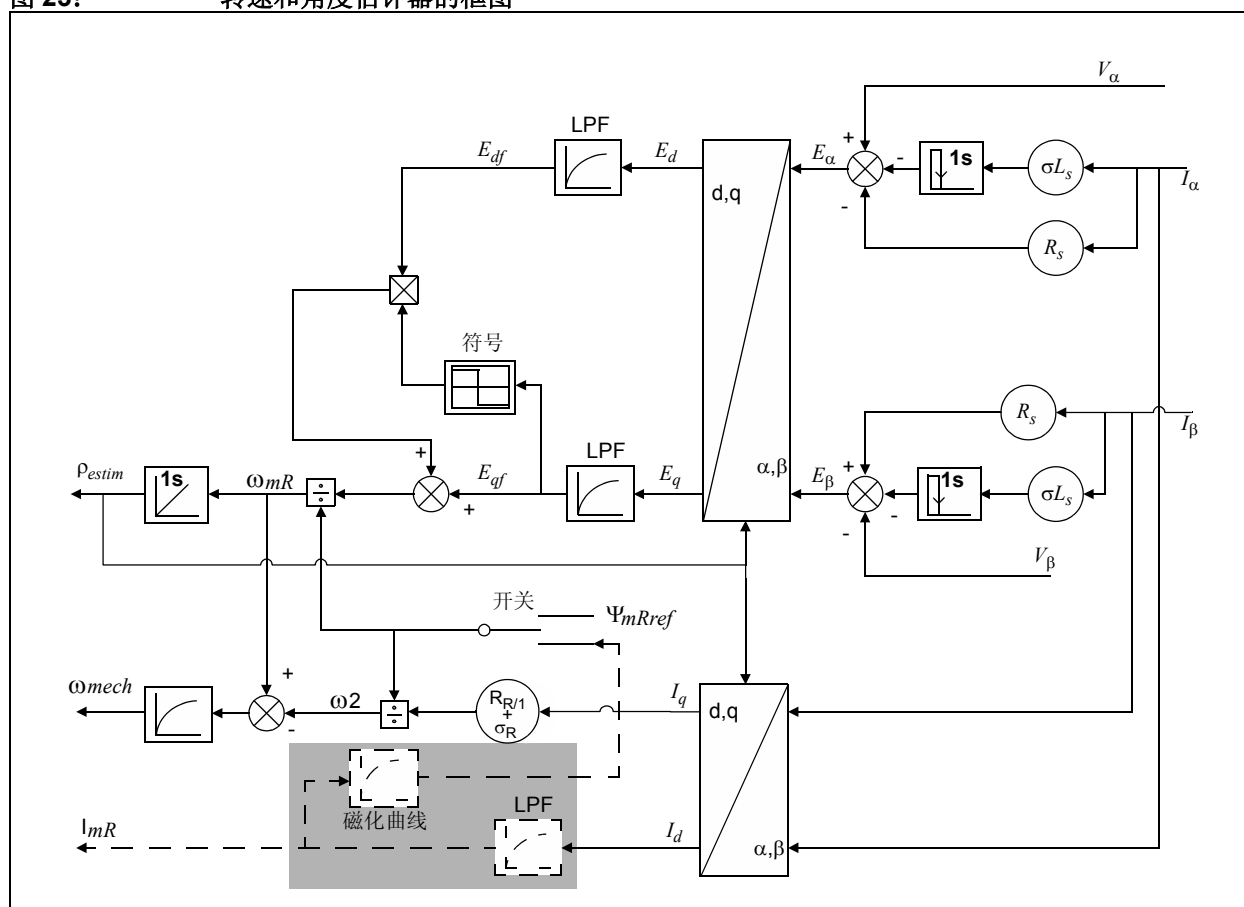
公式 16:

```
EstimParm.qImrStateVar=EstimParm.qImrStateVar+
( (long)(ParkParm.qId - EstimParm.qImr) * (long)MotorEstimParm.qInvTr) ;
EstimParm.qImr = (int)(EstimParm.qImrStateVar>>15);
```

其中 $\text{MotorEstimParm.qInvTr}$ 为 $2^{15} \cdot \frac{T_{\text{sample}}}{T_r}$

如图 23 所示, 阴影部分表征的是公式 16 的内容。

图 23: 转速和角度估计器的框图



计算机械转速有两个步骤。第一步是在假定电流模型不执行的情况下，计算转差速度，如公式 17 所示。

公式 17:

```
EstimParm.qOme2Estim = ((long)ParkParm.qIq*(long)MotorEstimParm.qRrInvTr)>>15;
```

其中 MotorEstimParm.qRInvTr 为 $2^{15} \cdot \frac{I_0}{\omega_0 \cdot T_r \cdot I_{dref}}$

第二步是从转子磁通速度中将转差速度减去，然后滤波，如公式 18 所示。

公式 18:

```
EstimParm.qVelEstimStateVar=EstimParm.qVelEstimStateVar+
( (long) (EstimParm.qOmegaMr-EstimParm.qOme2Estim
-EstimParm.qVelEstim)*(long)EstimParm.qVelEstimFilterK );
EstimParm.qVelEstim = (int) (EstimParm.qVelEstimStateVar>>15);
EstimParm.qVelEstim= (int) ((long)EstimParm.qVelEstim*(long)Polpair)>>15);
```

其中 EstimParm.qVelEstimFilterK 为 $2^{15} \cdot \frac{T_{sample}}{T_\omega}$ 而 Polpair 为 $\frac{2^{15}}{P_{pol}} - 1$

如图 24 所示，阴影部分表征的是公式 17 和公式 18 的内容。

图 24: 转速和角度估计器的框图

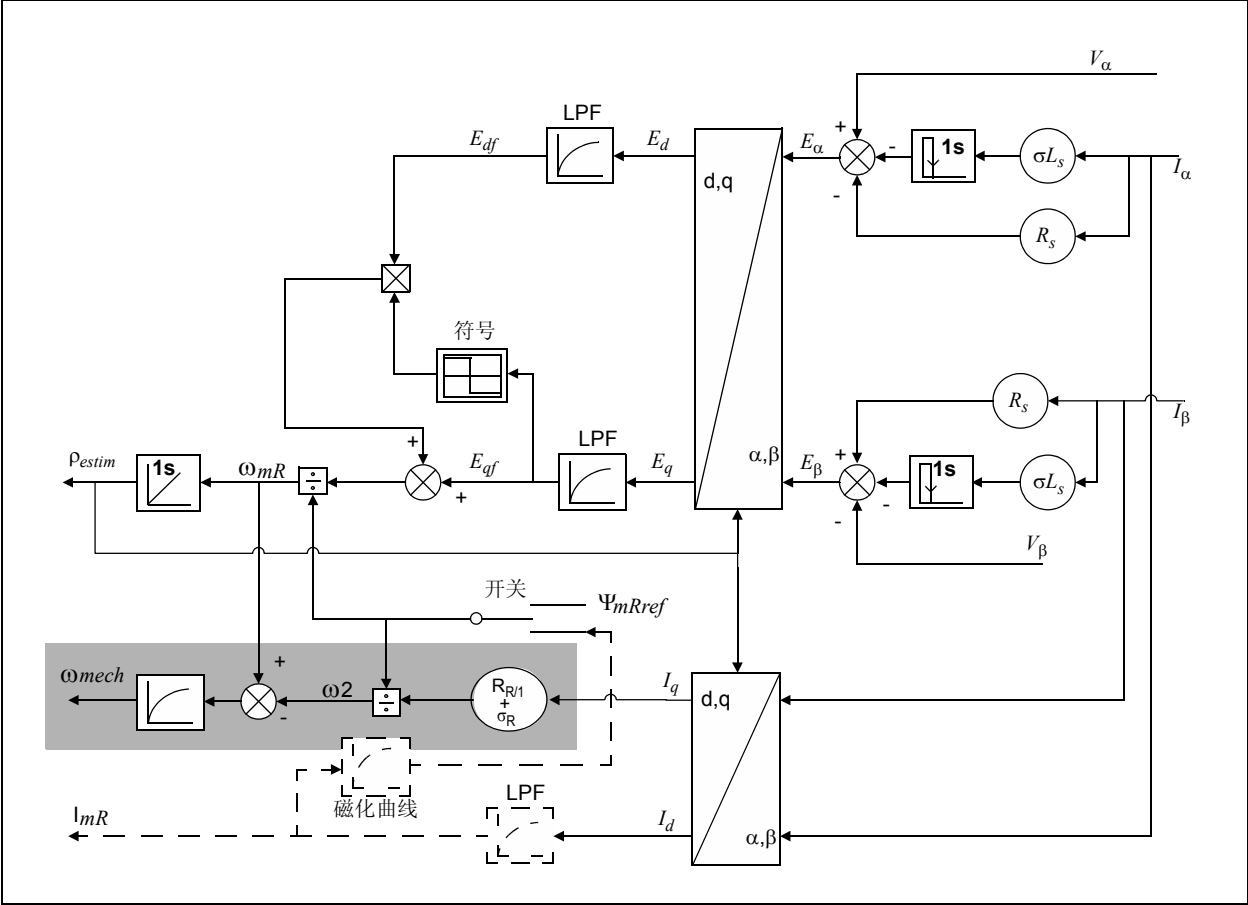
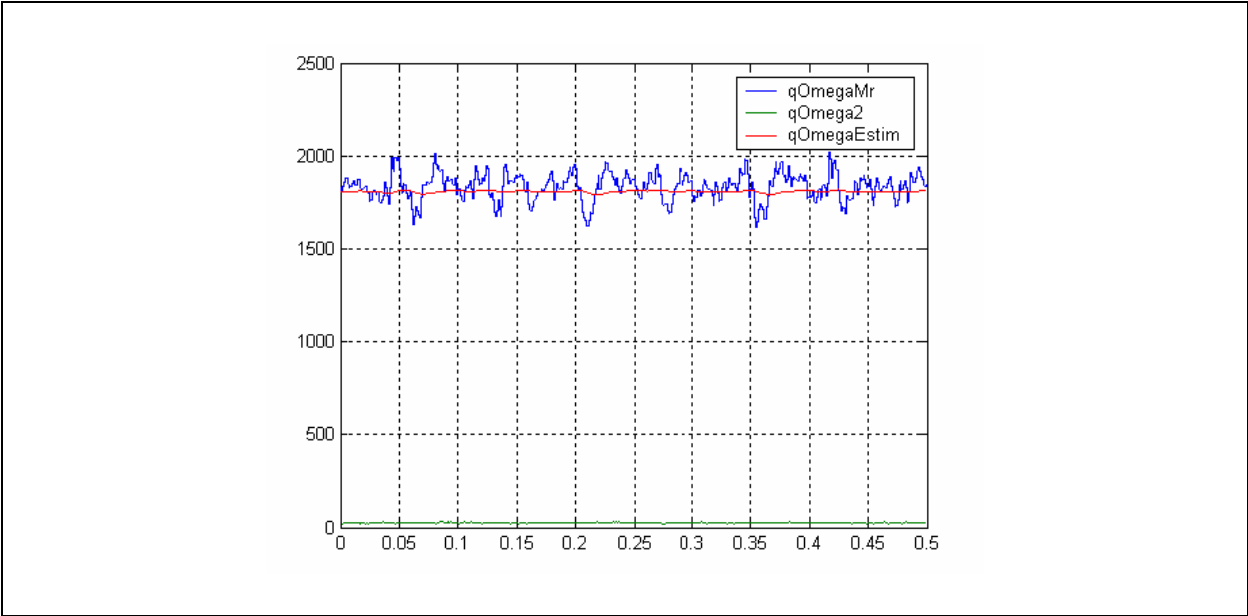


图 25 显示了估计机械转速的波形图。

图 25: 机械转速估计波形图



无传感器控制与有传感器控制的比较

实验结果证明，无传感器控制和有传感器控制的阶跃响应波形图之间没有显著的差别（见图 26）。可以用估计器来取代传感器，这并没有降低控制的动态性能。

图 27 所示的波形图表明，稳态下的估计转速具有良好的精度，与传感器测得的转速相差无几。

图 26: 实验结果：有传感器控制（左）与无传感器控制（右）的对比波形图

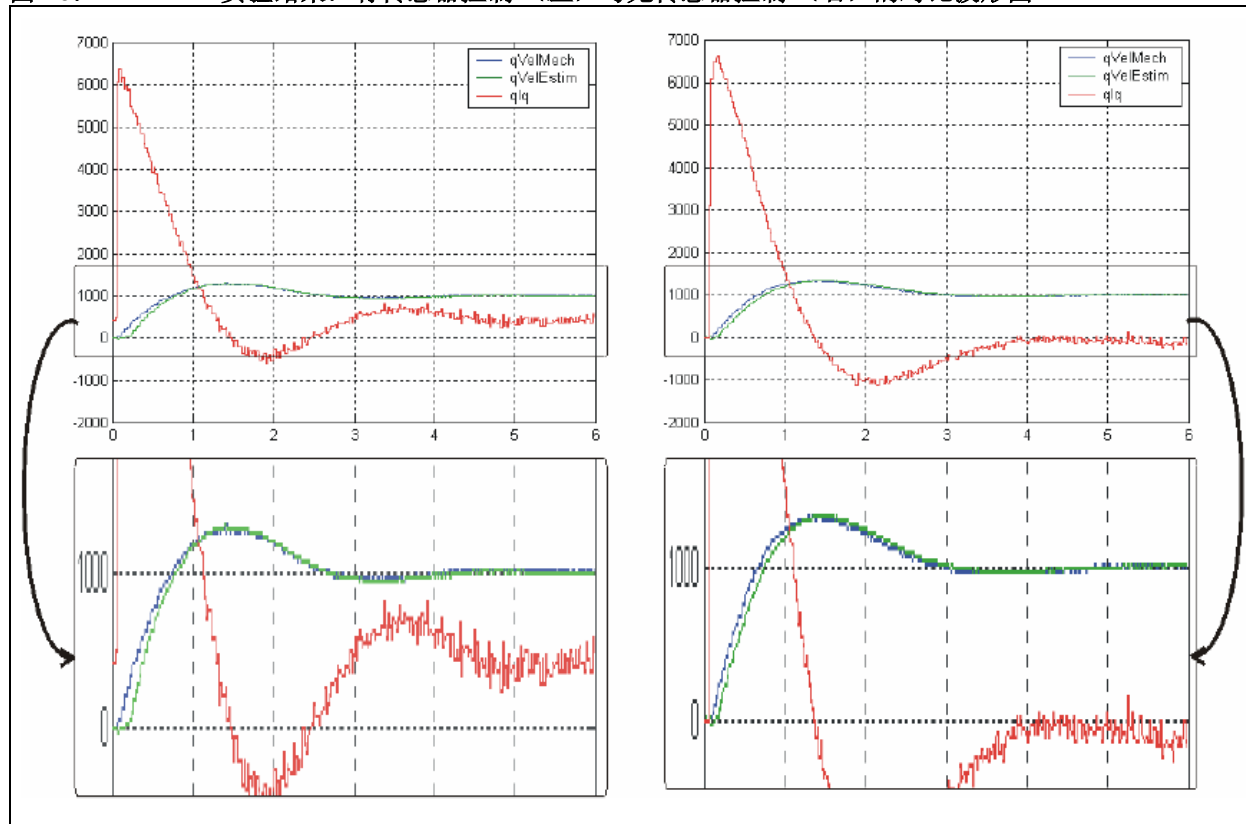
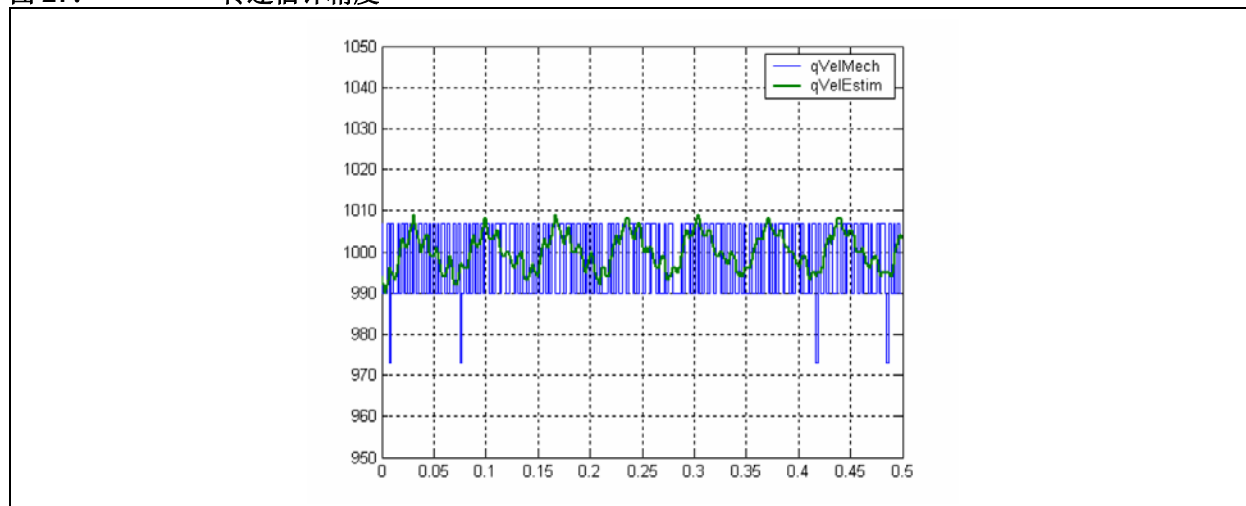


图 27: 转速估计精度



电机起动与参数整定

为了增加 ACIM 的无传感器控制的稳定性，可以使用以下起动方法，它限制了参考转速的最低允许值，能够使电机从零速安全起动。

- 当电机转动起来，且模拟转速参考值 (CtrlParm.qVelRef) 在软件 (qVelMinContrOff/2) 设定的最低限之下时，就将控制转速参考值 (PIParmQref.qInRef) 设置为 0。此时，转速控制器不起作用。
- 当电机转动起来，且模拟转速参考值 (CtrlParm.qVelRef) 大于软件 (qVelMinContrOff/2) 设定的最低限时，就将转速控制器参考值 (PIParmQref.qInRef) 设置为模拟参考转速值 (CtrlParm.qVelRef)。
- 当电机停转，且模拟转速参考值 (CtrlParm.qVelRef) 大于软件 (qVelMinContrOff) 设定的最低限时，就将控制转速参考值 (PIParmQref.qInRef) 设置为模拟参考值 (CtrlParm.qVelRef)。

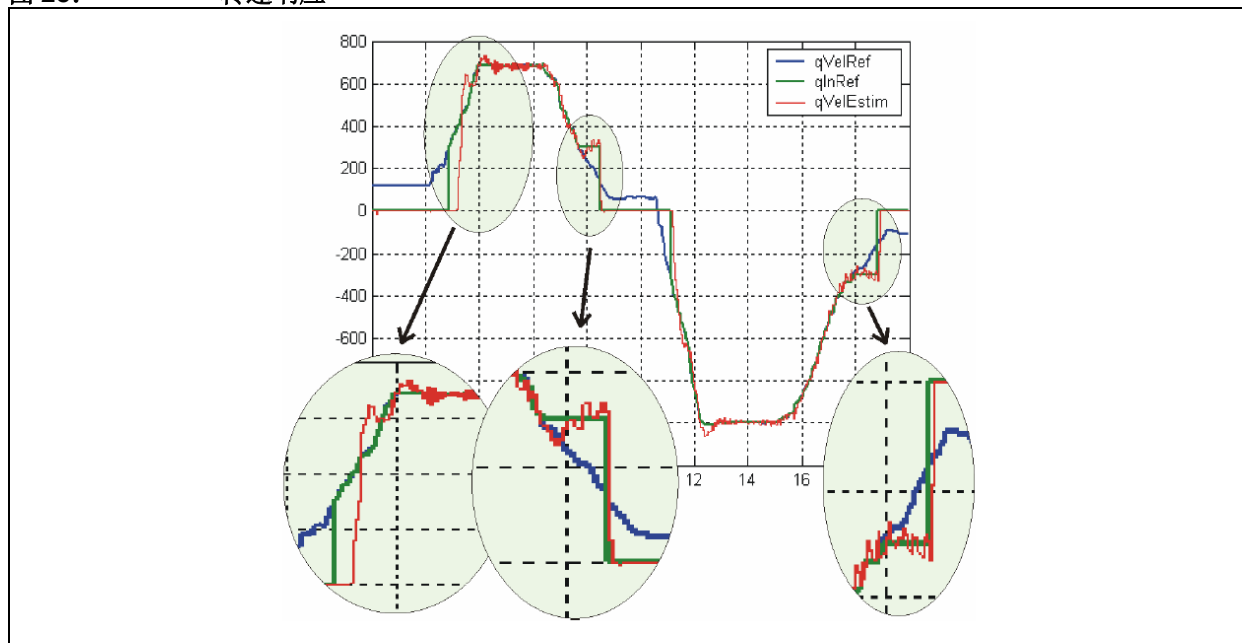
为了使 PI 控制器参数整定变得更加容易，可以使用转矩模式。在转矩模式下，转速控制器仍然不起作用，直接设置转矩参考值，将 PI 转速控制器旁路。转矩模式同样适用于低速和静止情况下的无传感器控制。当选择这种控制方式时，不需要使用起动或限制算法。

为选择转矩模式，需在 acim.c 文件中进行简单地定义，如下：

```
#define TORQUE_MODE
```

图 28 显示了参考值变化时的高动态转矩响应。励磁电流仍然保持不变，电机继续加速，直至达到电压极限，转矩降为零为止。

图 28: 转速响应



结论

本应用笔记介绍了一种利用 Microchip 的 dsPIC30F 和 dsPIC33F 数字信号控制器来进行 ACIM 的无传感器磁场定向控制的解决方案。从动态性能来看，这种控制方法所得结果与有传感器磁场定向控制的结果没有明显差别，却能显著地降低系统的成本。

参考文献

- AN887 “AC Induction Motor Fundamentals” (DS00887), Microchip Technology Inc., 2003
- AN908, 《使用 dsPIC30F 实现交流感应电机的矢量控制》(DS00908A_CN), Microchip Technology Inc., 2007
- dsPICDEM™ MC1 Motor Control Development Board User's Guide (DS70098), Microchip Technology Inc., 2003
- dsPICDEM™ MC1H 3-Phase High Voltage Power Module User's Guide (DS70096), Microchip Technology Inc., 2004
- 《Explorer 16 开发板用户指南》(DS51589A_CN), Microchip Technology Inc., 2005
- Motor Control Interface PICtail™ Plus Daughter Board User's Guide (DS51674), Microchip Technology Inc., 2007

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。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。在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中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、Accuron、dsPIC、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、rfPIC 和 SmartShunt 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL、SmartSensor 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、In-Circuit Serial Programming、ICSP、ICEPIC、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、PICKit、PICDEM、PICDEM.net、PICKtail、PIC³² 徽标、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、REAL ICE、rFLAB、Select Mode、Total Endurance、UNI/O、WiperLock 和 ZENA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

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

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2008, Microchip Technology Inc. 版权所有。

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

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-16949:2002 认证。公司在 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 and 模拟产品方面的质量体系流程均符合 ISO/TS-16949:2002。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。

全球销售及服务网点

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://support.microchip.com>
网址: www.microchip.com

亚特兰大 **Atlanta**

Duluth, GA
Tel: 678-957-9614
Fax: 678-957-1455

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**

Farmington Hills, MI
Tel: 1-248-538-2250
Fax: 1-248-538-2260

科科莫 **Kokomo**

Kokomo, IN
Tel: 1-765-864-8360
Fax: 1-765-864-8387

洛杉矶 **Los Angeles**

Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608

圣克拉拉 **Santa Clara**

Santa Clara, CA
Tel: 408-961-6444
Fax: 408-961-6445

加拿大多伦多 **Toronto**

Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 1-905-673-0699
Fax: 1-905-673-6509

亚太地区

亚太总部 **Asia Pacific Office**

Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 北京

Tel: 86-10-8528-2100
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都

Tel: 86-28-8665-5511
Fax: 86-28-8665-7889

中国 - 香港特别行政区

Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 南京

Tel: 86-25-8473-2460
Fax: 86-25-8473-2470

中国 - 青岛

Tel: 86-532-8502-7355
Fax: 86-532-8502-7205

中国 - 上海

Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

中国 - 沈阳

Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

中国 - 深圳

Tel: 86-755-8203-2660
Fax: 86-755-8203-1760

中国 - 武汉

Tel: 86-27-5980-5300
Fax: 86-27-5980-5118

中国 - 厦门

Tel: 86-592-238-8138
Fax: 86-592-238-8130

中国 - 西安

Tel: 86-29-8833-7252
Fax: 86-29-8833-7256

中国 - 珠海

Tel: 86-756-321-0040
Fax: 86-756-321-0049

台湾地区 - 高雄

Tel: 886-7-536-4818
Fax: 886-7-536-4803

台湾地区 - 台北

Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

台湾地区 - 新竹

Tel: 886-3-572-9526
Fax: 886-3-572-6459

亚太地区

澳大利亚 **Australia - Sydney**

Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

印度 **India - Bangalore**

Tel: 91-80-4182-8400
Fax: 91-80-4182-8422

印度 **India - New Delhi**

Tel: 91-11-4160-8631
Fax: 91-11-4160-8632

印度 **India - Pune**

Tel: 91-20-2566-1512
Fax: 91-20-2566-1513

日本 **Japan - Yokohama**

Tel: 81-45-471-6166
Fax: 81-45-471-6122

韩国 **Korea - Daegu**

Tel: 82-53-744-4301
Fax: 82-53-744-4302

韩国 **Korea - Seoul**

Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 或
82-2-558-5934

马来西亚 **Malaysia - Kuala Lumpur**

Tel: 60-3-6201-9857
Fax: 60-3-6201-9859

马来西亚 **Malaysia - Penang**

Tel: 60-4-227-8870
Fax: 60-4-227-4068

菲律宾 **Philippines - Manila**

Tel: 63-2-634-9065
Fax: 63-2-634-9069

新加坡 **Singapore**

Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

泰国 **Thailand - Bangkok**

Tel: 66-2-694-1351
Fax: 66-2-694-1350

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

法国 **France - Paris**

Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 **Germany - Munich**

Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

意大利 **Italy - Milan**

Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

荷兰 **Netherlands - Drunen**

Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

西班牙 **Spain - Madrid**

Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

英国 **UK - Wokingham**

Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820