

使用反电动势滤波进行无传感器 BLDC 控制

作者: Reston Condit
Microchip Technology Inc.

简介

本应用笔记说明了无传感器无刷直流 (Brushless DC, BLDC) 电机控制算法, 该算法采用 dsPIC® 数字信号控制器 (digital signal controller, DSC) 实现。该算法对电机每相的反电动势 (back-EMF) 进行数字滤波, 并基于滤得的反电动势信号来决定何时对电机绕组换相。这种控制技术不需要使用离散式低通滤波硬件和片外比较器。

BLDC 电机的应用非常广泛。本应用笔记中描述的算法适合于电气 RPM 范围在 40k 到 100k 的 BLDC 电机。运行于此 RPM 范围内的一些 BLDC 电机应用可以是模式化 RC 电机、风扇、硬盘驱动、气泵以及牙钻等。

本应用笔记中描述的算法可在以下两个 Microchip 开发板平台上实现:

- PICDEM™ MC LV 开发板
- dsPICDEM™ MC1 开发板

PICDEM™ MC LV 开发板包括一片 dsPIC30F3010 DSC。上述算法在该器件上得以实现, 因为该器件包含在 PICDEM™ MC LV 开发板中。然而, 您也可使用 dsPIC30F2010 作为替代处理器以节约成本。

该板的默认配置包含一个 5 MHz 的晶振。在测试该算法时使用 7.37 MHz 的晶振。

PICDEM MC LV 开发板上所使用的资源如下:

处理器类型:	dsPIC30F3010 或 dsPIC2010
MIPS:	21 MIPS
程序存储器:	2000 个 24 位指令字
RAM:	280 字节
晶振:	7.68 MHz

dsPICDEM MC1 开发板上所使用的资源如下:

处理器:	dsPIC30F6010A
MIPS:	21 MIPS
程序存储器:	2089 个 24 位指令字
RAM:	280 字节 ⁽¹⁾

注 1: 在信号缓冲器使能的情况下, RAM 的使用率为 4400 字节。

以下规范适用于上述两种硬件平台:

- 最大电机速度: 100,000 电气 RPM
- 可调节的 PID 速度控制环
- 可配置的开环启动加速过程
- 支持 DMCI 工具 (见本文档的“实现算法”部分)

图 1: PICDEM™ MC LV 开发板

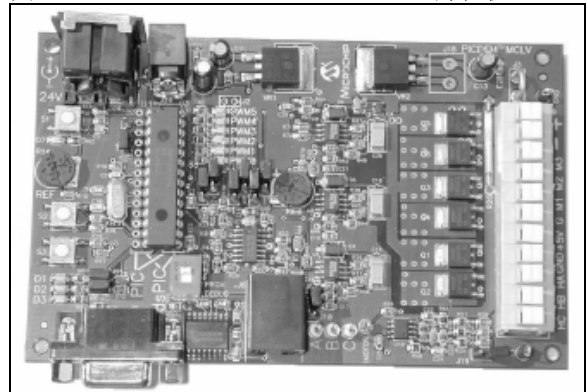


图 2: 带附加功率模块的 dsPICDEM™ MC1 开发板



BLDC 电机结构

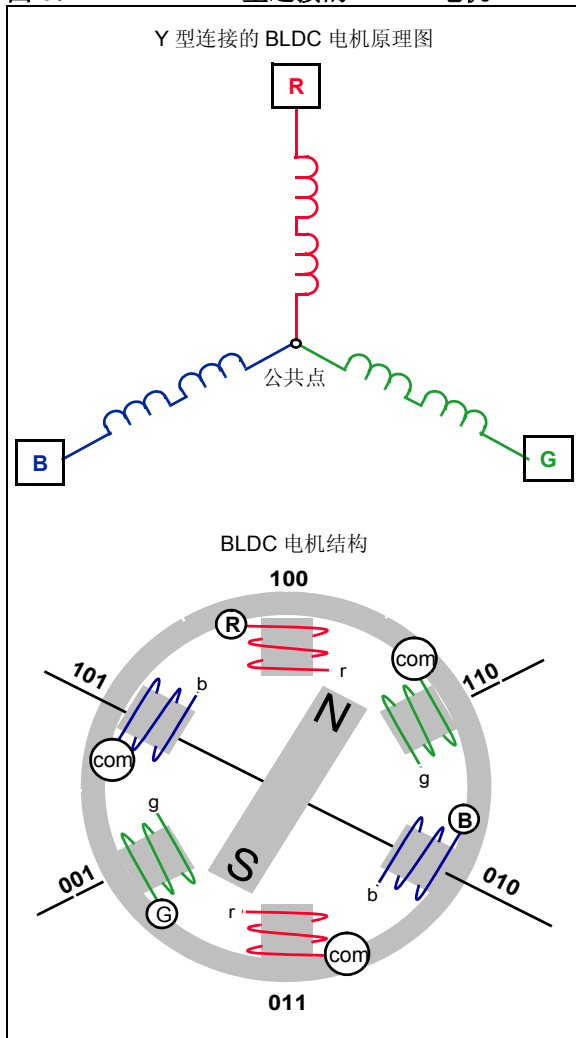
该算法已在下列电机上经过测试：

- 4 极、12V、10A 风扇电机，最高转速为 29,000 RPM
- 14 极、12V 航空发动机模型，最高转速为 13,000 RPM
- 4 极、24V、1A Hurst BLDC 电机模型 DMB0224C10002

这些电机已使用与转速成正比的负载进行了测试——低速时负载较轻，高速时满载。

在 Y 型连接的 BLDC 电机（见图 3）中，电机具有三条引线，每条引线与一个绕组相连。每个绕组（或串联绕组）与一个公共点相连，该公共点为所有三个绕组共同使用，如图 3 中上部所示。一个简单的 BLDC 电机的基本构造如图 3 的下部所示。

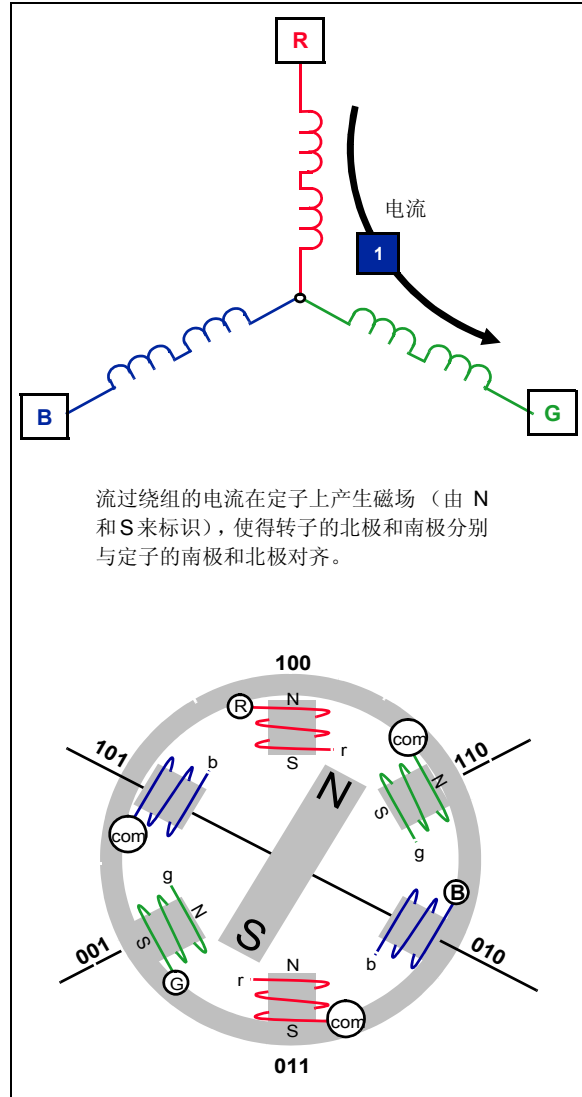
图 3: Y 型连接的 BLDC 电机



电机外层是定子，包含电机绕组。电机内部是转子，转子由围绕电机圆周的极性相反的磁极组成，图 4 显示了仅带有两个磁极（南北磁极）的转子。在实际应用中，大多数电机的转子具有多对磁极。

当电流流过电机绕组时（如图 4 中的箭头（1）所示），电机起动。在该示例中，红色（R）引线上施加了正电势，而绿色（G）引线上施加了反电势。在这种情况下给电机绕组充电会在定子上产生磁场，由 N 和 S 标记指示。然后转子旋转，以使转子的北磁极与定子磁场的南磁极对齐。同样的，转子的南磁极与定子磁场的北磁极对齐。

图 4: 流过绕组的电流

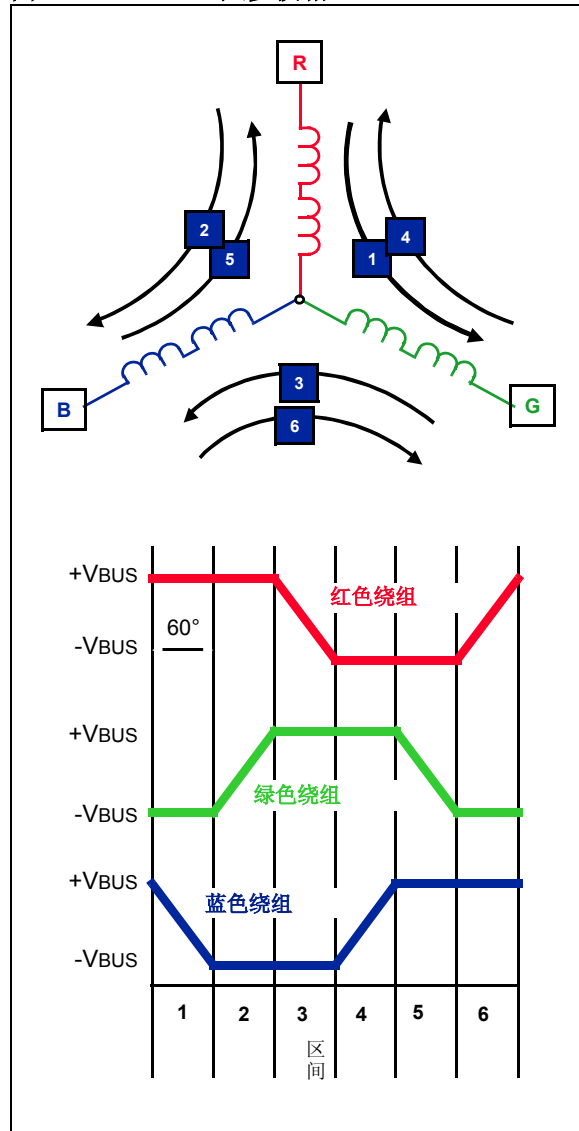


六步（梯形）换相

在本应用笔记描述的无传感器算法中，使用六步梯形或 120° 换相法为电机绕组通电。图 5 说明了六步换相的工作原理。每一步或每一区间，相当于 60 个电角度。六个区间组成了 360 个电角度或一次电气旋转。

绕组图中的箭头显示了在每一步中流过电机绕组的电流方向。图中显示了在六步换相期间每个电机引线上施加的电势。六步换相序列使电机进行了一次电气旋转。

图 5: 六步换相



步骤 换相

- 1 给红色绕组加正电。
给绿色绕组加负电。
蓝色绕组未通电。
- 2 保持红色绕组电势为正。
给蓝色绕组加负电。
绿色绕组未通电。
- 3 给绿色绕组加正电。
给蓝色绕组加负电。
红色绕组未通电。
- 4 给绿色绕组加正电。
给红色绕组加负电。
蓝色绕组未通电。
- 5 给蓝色绕组加正电。
给红色绕组加负电。
绿色绕组未通电。
- 6 给蓝色绕组加正电。
给绿色绕组加负电。
红色绕组未通电。

每一区间上都有两个绕组通电，一个绕组未通电。每一区间均有一个绕组未通电，是六步控制的重要特征，无传感器控制算法就是基于此实现的。

本应用笔记使用下面的术语来说明电机速度：

- 每分钟电气旋转次数 (RPM_{Elec})
- 每秒钟电气旋转次数 (RPS_{Elec})

使用这些术语来说明电机速度比机械 RPM 要容易的多，因为在涉及到电气 RPM 时，不用考虑电机极数这个因素。机械 RPM 和电气 RPM 之间的关系可用以下公式来表示：

公式 1: 机械 / 电气 RPM 关系

$$RPM_{Mech} = \frac{(2 * RPM_{Elec})}{(\text{电机极数})}$$

$$RPM_{Elec} = \frac{(RPM_{Mech} * \text{电机极数})}{2}$$

$$RPS_{Elec} = \frac{RPM_{Elec}}{60}$$

要保持定子中的磁场超前于转子磁场，那么一区间到另一区间的转变必须发生在转子处于特定位置的时刻，从而获得最佳转矩。下一部分将讨论在带传感器的 BLDC 控制应用中如何确定转子位置。

AN1083

带传感器的 BLDC 控制

在大多数带传感器的 BLDC 控制应用中，霍尔效应传感器用于确定转子位置。霍尔效应传感器位于电机壳内，每个传感器输出状态每经 180 个电角度就会变化一次

(见图 6)。传感器 B 输出信号的上升沿与传感器 A 输出信号的上升沿之间有 120 个电角度的偏移。传感器 C 输出信号的上升沿相对于传感器 B 也有 120 个电角度的偏移。这样放置传感器是为了在电机换相时，传感器的输出状态会发生改变。

图 6: 带传感器的控制

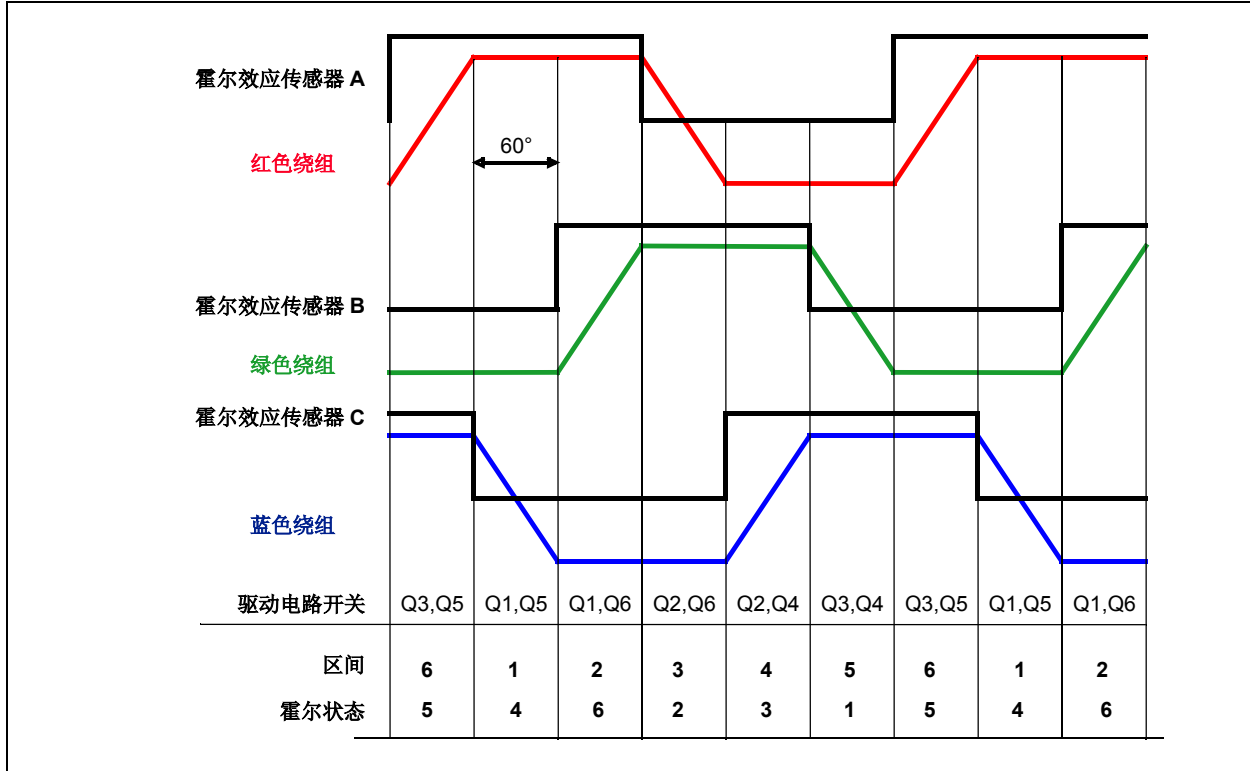
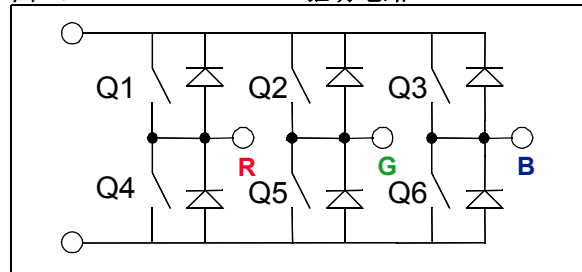


图 7 是 BLDC 电机的基本驱动电路。每个电机引线都连接到一个高边 / 低边开关。区间和开关状态之间的相互关系由驱动电路开关 (如图 6 所示) 表示。

图 7: BLDC 驱动电路



为什么使用无传感器控制？

在带传感器的控制中，使用传感器来确定电机转子相对于电机定子的位置。这可使电机的控制相当简单。处理器只需等待霍尔效应传感器改变状态，然后根据三个霍尔效应传感器的输出来确定转子所处的区间，并相应的对电机绕组进行换相。

带传感器的控制具有如下缺点：

- 传感器价格昂贵。除了需要购买传感器外，还需要在制造期间将传感器安装在电机上，这就增加了安装和接线费用。
- 传感器给电机添加了潜在的故障因素。如果传感器发生故障，则电机也无法继续工作。
- 在某些环境下，使用传感器不符合实际需要。例如，在电机处在浸没的环境中（如压缩机或泵），传感器可能首先会发生故障。

基于各种各样的原因，在许多应用中需要使用无传感器的 BLDC 控制。本应用笔记的下一部分将介绍所述无传感器 BLDC 控制技术的理论知识。

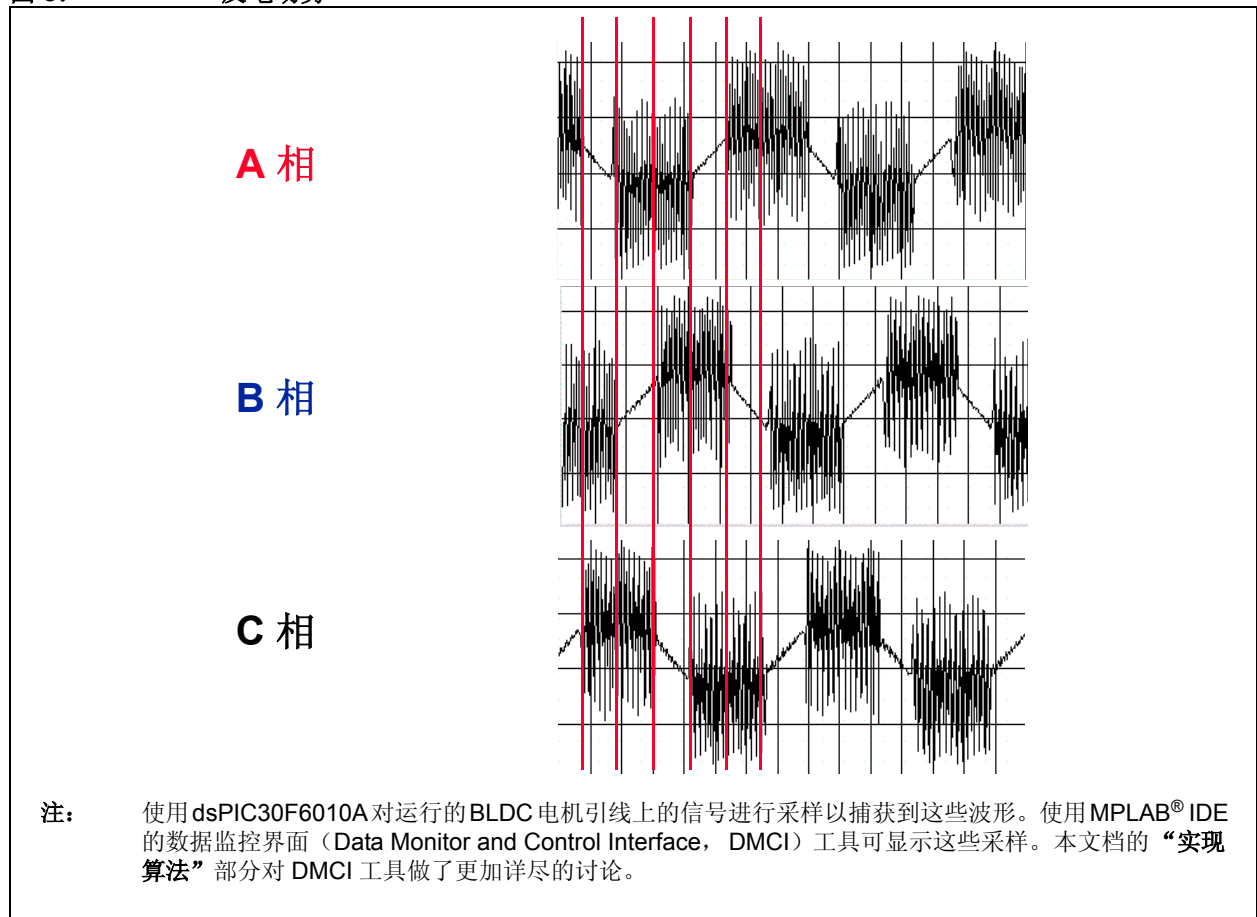
无传感器的 BLDC 控制

确定电机绕组换相的时刻或一区间到另一区间转换的适当时间的关键就是转子的位置。如果使用带传感器的控制，则可立刻获得转子的位置。然而，在无传感器控制中，则必须采用其他方法确定转子位置。

该算法中使用的方法是分析电机的反电动势（EMF）。简单的说，反电动势是永磁式电机转子转动时，由定子绕组所产生的电压。反电动势的幅值与电机转速成正比。

图 8 将有助于理解反电动势。该图显示了带有传感器控制的电机在转动时三条引线上的电势。产生的三个信号的形状与图 5 中的梯形形状非常相似。图中添加了竖线以帮助区分六个区间。PWM 信号给每个绕组供电。例如，每三个区间，A 相就失电一次。然而，在不驱动某一特定相的区间内，在电机引线上仍可看到电压。这个电压就是反电动势。

图 8：反电动势



在未驱动区间期间的反电动势信号实际上是由于磁性转子转过定子绕组而产生的。反电动势信号具有三个对无传感器控制来说非常重要的特征。这些特征包括：

- 速度上升时，反电动势信号的电压幅值也增大。
- 速度上升时，反电动势信号的斜率变大。
- 反电动势信号以 0V 电压为中心对称（假设驱动电源轨为对称的正 / 负电压）。

第三个特征的细节如图 9 所示，它表示 A 相在非驱动区间期间的反电动势信号。在本例中，电机由 $\pm 12V$ 电压驱动。反电动势信号以 0V 为中心对称。（如果驱动电源轨为 12V 和 0V，则信号以 6V 为中心对称。）如果反电动势信号为一条直线，那么信号将在该区间的一半处（也就是该区间的 30° 电角度处）通过零线。该点称为过零点。在过零事件后再经过 30° 电角度进行下一次换相。

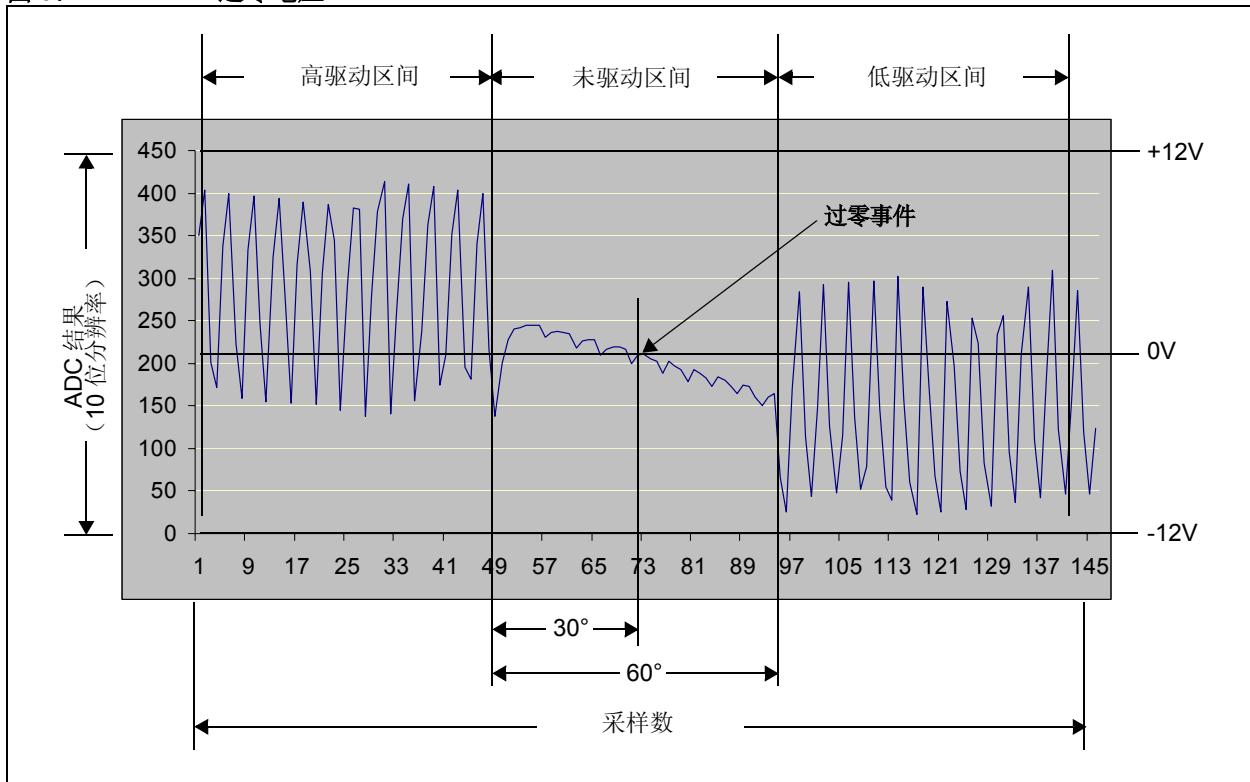
相。因此，给出一个可精确识别过零事件的算法，从而可估算转子位置，使电机绕组在正确的时间进行换相。

理想状态下，未驱动区间的反电动势信号是一条直线。实际情况下，反电动势信号耦合有来自驱动区间的噪声。使用 PWM 信号来改变电压，从而改变电机转速。由于电机绕组位置十分接近，一个绕组的 PWM 驱动信号可耦合到另一个绕组的反电动势信号上。

存在耦合的 PWM 噪声时很难检测到过零事件。例如，如果单片机需要识别在某一相的未驱动区间内反电动势信号首次穿过 0V 阈值的事件，由于 PWM 噪声导致信号过早穿过 0V 阈值，从而使得单片机不能在该区间的 30° 电角度位置检测到过零事件。在图 9 中，显而易见，反电动势信号在 30° 电角度标记已过零两次。

能否准确地检测到过零事件是实现该无传感器算法的关键。

图 9： 过零电压



数字滤波

再次重申，反电动势信号不是一个平滑的信号。从其他相耦合的 PWM 噪声使得不能准确检测到该信号的过零事件。图 10 显示了实际的反电动势信号，理想的反电动势信号标识在它上面。

通过使用 dsPIC® DSC 来实现数字滤波，即可获得与理想信号类似的滤波反电动势信号。这是本应用笔记所讨论的。

论的算法的前提——给出一个滤波反电动势信号，则可更准确且方便地检测到实际过零事件（ 30° 电角度标记）。当检测到一个过零事件时，dsPIC DSC 启动一个定时器从设定值开始向下计数，定时器为 0 时电机绕组换相。

但是，对信号进行滤波也存在一个缺点。无论信号滤波是以数字式完成还是在硬件中完成，滤波信号与实际信号相比总是存在一些相位延迟。图 11 对相位延迟进行了说明。

图 10: 实际和理想的反电动势信号

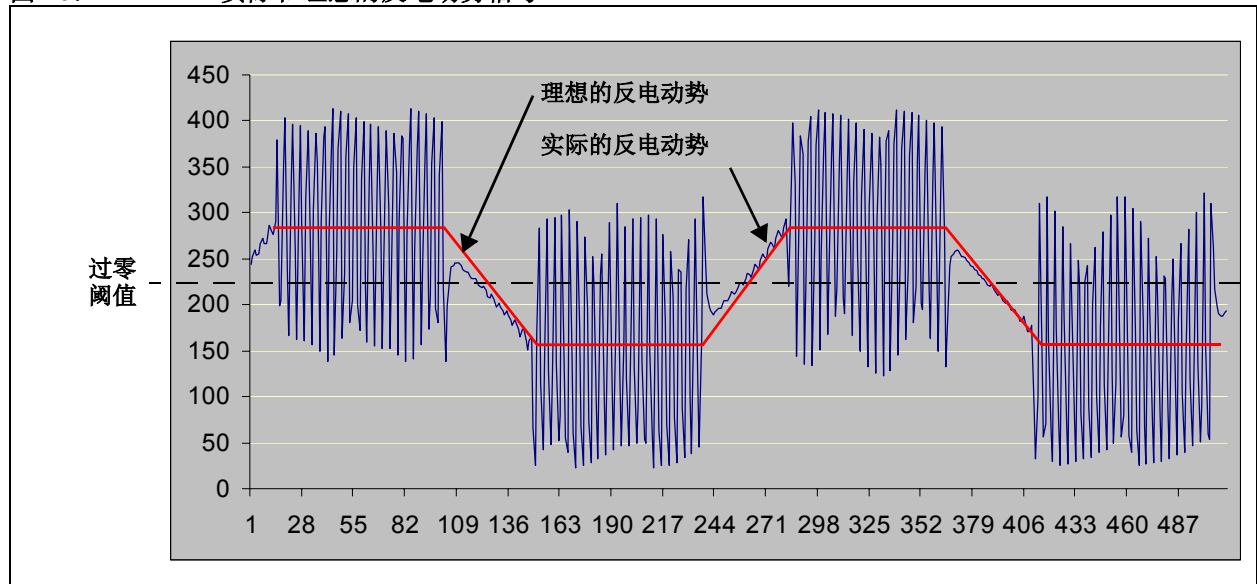
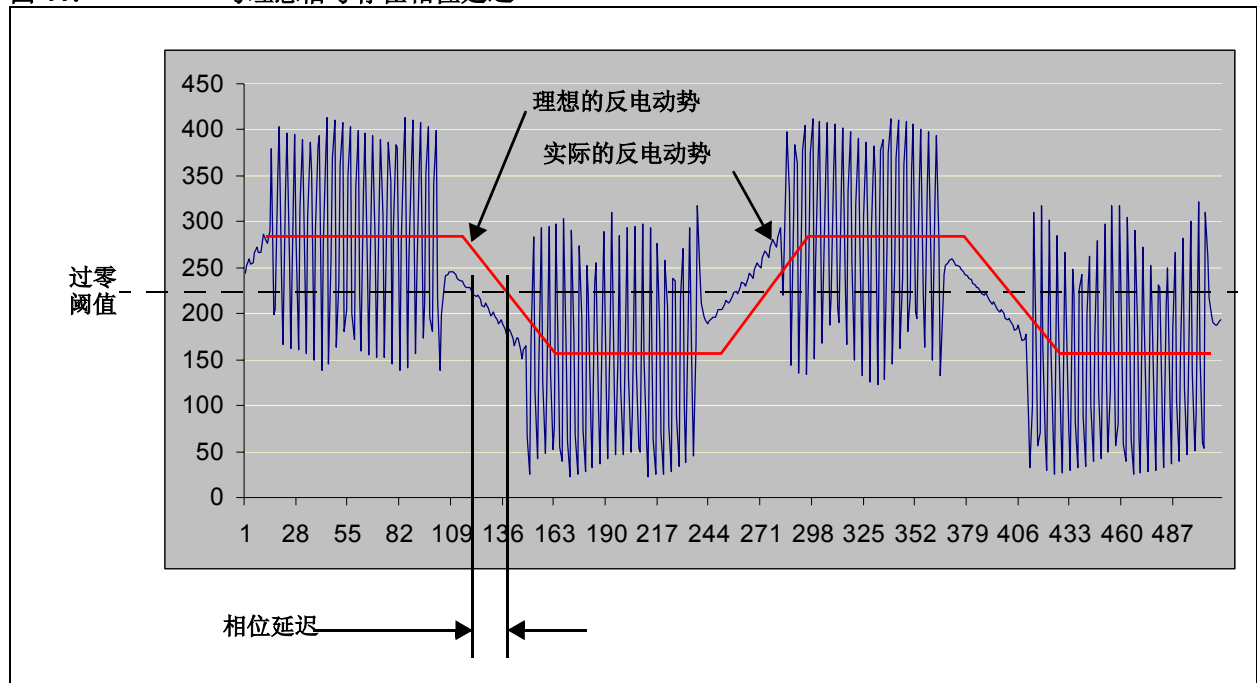


图 11: 与理想信号存在相位延迟



幸运的是，使用数字滤波器时，给定滤波器规范以及反电动势信号的频率就可计算出相位延迟。然后将向下计数器的值减去计算出来的相位延迟。

针对该算法，Microchip dsPIC DSC 数字滤波器设计工具（Digital Filter Design）工具用来设计反电动势滤波器。该设计工具可自动计算滤波器的相位延迟。下面几段将介绍如何使用 dsPIC DSC 数字滤波器设计工具来设计 20 kHz PWM 信号的滤波器。

数字滤波器设计工具需要输入下列信息：

- 滤波器类型
- 采样频率
- 带通频率
- 带阻频率
- 带通纹波 (db)
- 带阻纹波 (db)
- 滤波器阶数

本应用中使用了 IIR 滤波器，而不是 FIR 滤波器，因为 IIR 滤波器执行时间相对较短。与具有类似响应特征的 IIR 滤波器相比，FIR 滤波器需要更高阶数。此外，IIR 滤波器与具有类似响应的 FIR 滤波器相比，具有更短的相位延迟周期。

该算法中使用的滤波器参数如表 1 所示。

表 1: 滤波器参数

参数	值
滤波器类型	低通 Butterworth IIR
采样频率	49152 Hz
带通频率	4000 Hz
带阻频率	8000 Hz
带通纹波	0.1 db
带阻纹波	60 db
滤波器阶数	5 阶

注： 实际上在无传感器 BLDC 算法中使用了两个滤波器。使用两个滤波器的原因及其规范将在本文档后面给予介绍。

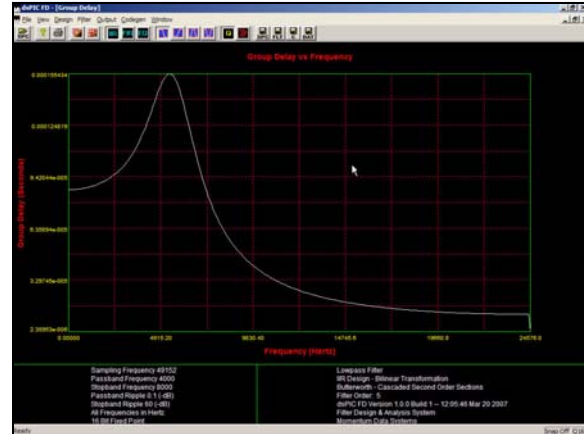
指定这些参数后，dsPIC DSC 数字滤波器设计工具即可计算 IIR 滤波器的系数，并生成实现滤波器所必需的源文件和头文件。然后将这些文件添加到 MPLAB® IDE 中的无传感器 BLDC 电机控制项目中。

dsPIC DSC 数字滤波器设计工具使用几个图来显示滤波器的响应。这些图包括：

- 幅频关系曲线
- 对数幅频关系曲线
- 相频关系曲线
- 群延迟与频率关系曲线
- 冲激响应与时间关系曲线
- 阶跃响应与时间关系曲线

本应用笔记中描述的算法着重强调了群延迟与频率关系曲线，如图 12 所示。

图 12: 群延迟曲线



群延迟曲线显示了滤波信号相对于给定电气旋转频率的实际反电动势信号的延迟（单位为秒）。假设电机最大转速为 100,000 电气 RPM，则每秒最大电气旋转为 1666。按照群延迟曲线，在 1666 Hz 处滤波信号将有约 90 μ s 的相位延迟。在 0 Hz 时，相位延迟约为 87 μ s。两个延迟时间的差异可忽略，因此在电机的整个速度范围中可将相位延迟当作一个常量。

下一部分将介绍相位延迟对无传感器 BLDC 电机控制算法的影响。

反电动势的特征

电机转速的快慢使得反电动势信号的特征完全不同。因此无传感器 BLDC 控制算法根据电机速度，可使用两种方式对反电动势进行分析。要了解为什么会存在两种实现方法，首先应该先了解反电动势信号在电机高速和低速运行时的特征。

低速反电动势特征

速度非常低时，不会产生明显的反电动势。某一特定相的非驱动区间的反电动势信号基本上是平的。因此也无法分辨过零点。随着电机转速加快，反电动势信号开始出现斜坡。

除非反电动势信号具有足够的斜率以允许准确的确定过零事件，否则无传感器算法将不起作用。所以，所有无传感器 BLDC 算法必须具有一个开环起动加速度，然后无传感器算法才能够起作用，并对电机绕组换相。在开

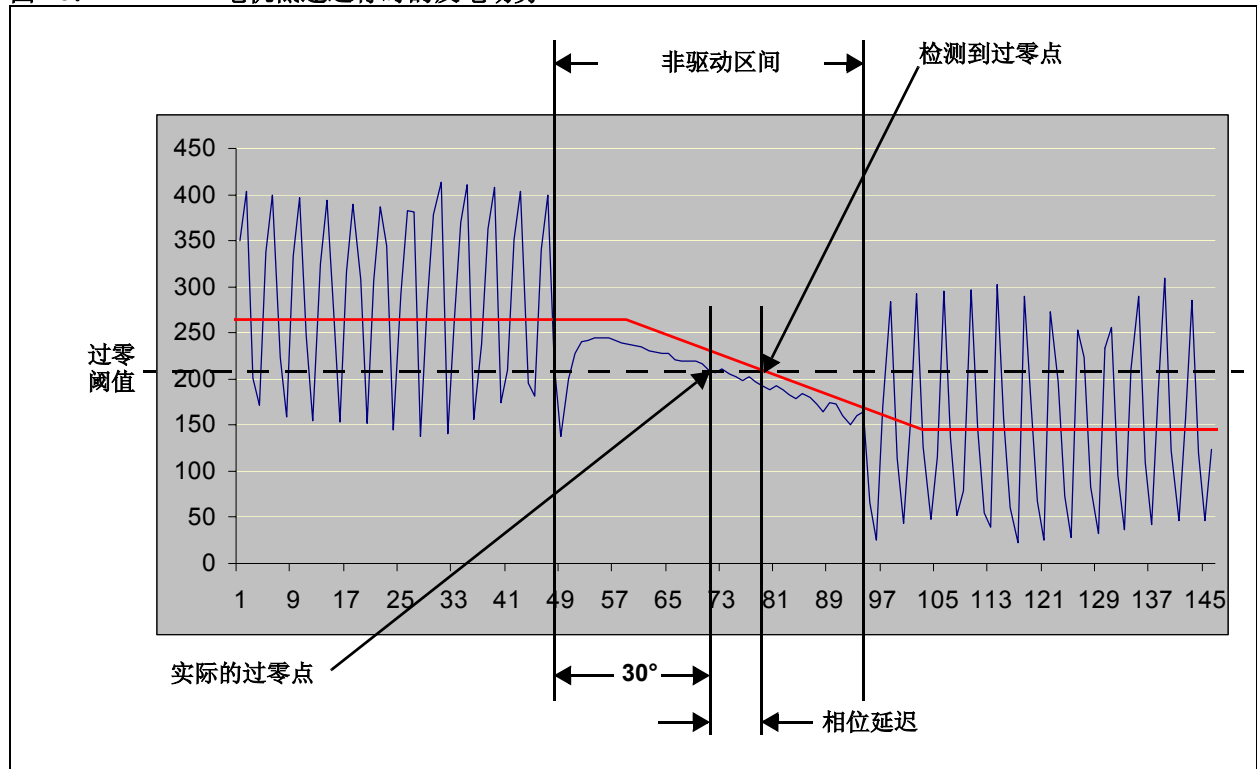
环起动加速期间，直到反电动势信号开始呈现梯形形状时电机才开始明确换相，如图 8 所示。电机低速运行时的反电动势信号如图 13 所示。

在低速时，由于反电动势信号的斜率较小，使得很有可能非驱动区间中心的某点检测到过零事件。反电动势信号上的所有噪声，甚至是滤波信号，都可导致过早地检测到过零事件。

对无传感器算法来说，对所有三个反电动势信号进行采样和分析非常重要。通过在电机的所有三相中查找过零事件，算法可在下一区间纠正由过早检测到过零事件而导致过早换相。

图 13 显示了理想滤波信号的相位延迟。在低速时，相位延迟相对于区间长度来说非常的小。注意，滤波反电动势信号上的过零事件在下次换相之前发生。这点非常重要，因为低速时，一旦算法确定发生了过零事件，就将开始准备进行下次换相。

图 13: 电机低速运行时的反电动势



高速反电动势特征

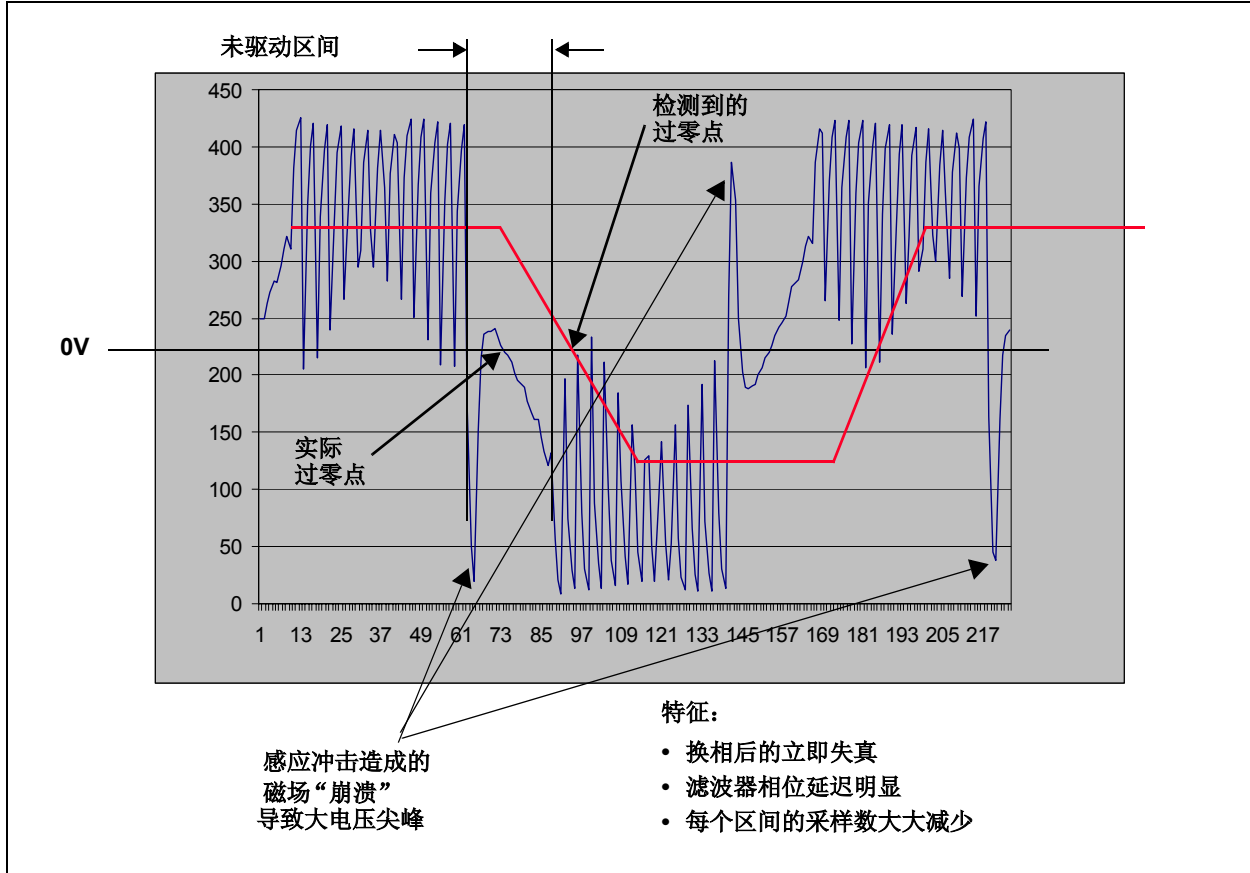
当电机高速运行时，反电动势具有不同的特征，如图 14 所示。一个明显的区别为在区间开始处反电动势信号具有较大的电压尖峰。该电压尖峰由感应冲击所导致。高速时，电机绕组可存储更多的能量。当电机的某一相从被驱动变为三态时，绕组中的能量将流向某处，因此会出现大电压尖峰。

在高速时，反电动势信号斜率更大。因此可更容易地检测到过零事件。

随着电机速度的增加，每区间所消耗的时间变短。这具有两个影响：

- 因为电气旋转频率变高，滤波器的相位延迟相比区间宽度来说变得 longer。因此，将在下一次换相之后检测到滤波信号的过零事件。
- 若在电机的整个速度范围内，使用同一个恒定的采样频率，则在电机高速运行时，每区间 ADC 所能采样到的 BEMF 数也将减少。也就是说，与区间长度有关，随着电机速度变快，检测到过零事件的几率将降低。

图 14: 反电动势和电机高速运行



无传感器实现

根据反电动势在电机低速和高速运行时的特征，有两种实现方法可优化无传感器算法的低速和高速性能。从低速到高速实现方法的转换为无缝转换（反之亦然），且具有内置的磁滞区。默认情况下认为电机转速增加时，从低速到高速实现方法的转换发生在电机转速达到每秒 300 次电气旋转时；电机转速减小时，从高速到低速的转换发生在电机转速为每秒 200 次电气旋转时。用户可设置转换速度（见“调节过程”部分以获得更多详细信息）。

低速实现方案

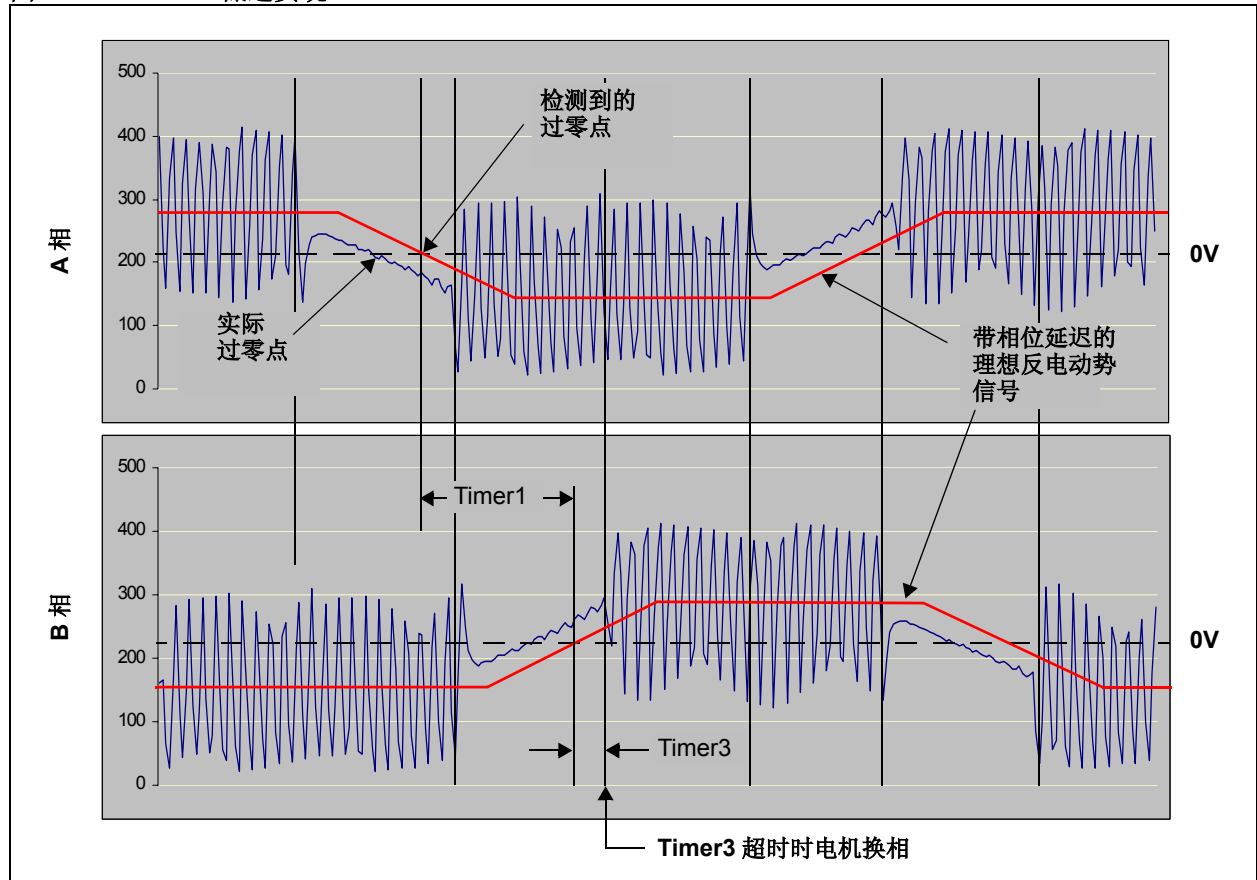
在该算法的低速实现方案中，dsPIC30F ADC 模块对电机的所有三个相进行采样。得到三个采样结果之后，将产生一个 ADC 中断。然后这些采样被送至三个相同的 IIR 滤波器，每相一个，以产生三个滤波采样。每相的采样频率为 49,152 Hz，比 PWM 频率（20 kHz）快两倍多。

在所有区间（无论驱动与否）都要对每相进行采样。由于采样频率大于 PWM 频率的两倍，如果采用 PWM 信号对相通电，则滤波信号反映在各区间期间施加到电机绕组上的平均电势。这有助于创建一个类似梯形的滤波信号。

注： 从技术上来讲，反电动势仅指电机引线上的电势，该电势是电机作为发电机时产生的。也就是说，当 PWM 信号施加到电机上时，产生的不是反电动势。然而，为简单起见，本文档将每相的连续采样描述为“采样反电动势信号”。

图 15 显示了对两相进行采样得到的反电动势信号。此外，还在图中标注了各自的理想滤波信号（带相位延迟）。通过比较滤波信号和过零阈值来确定过零事件。算法目前正在分析的相，以及反电动势信号是在上升还是下降，都由电机目前所处的区间来决定。

图 15: 低速实现



dsPIC30F 数字信号控制器有五个片上 16 位定时器。Timer1 用于测量从一个过零事件到下一个过零事件所消耗的时间。该时间相当于一个 60° 电角度。假设在检测过零事件时没有相位延迟，则下一次换相将在经过 30° 电角度时发生。将 Timer1 捕获到的值除以 2，得到经过 30° 电角度所需的时间。理论上，该值可被装入 Timer3 周期寄存器，以用于另一个称为换相定时器的定时器。当产生换相定时器中断时，将电机绕组换相到下一状态。

必须从 30° 电角度的时间中减去几种延迟。第一个是数字滤波器的相位延迟。使用 dsPIC DSC 滤波器设计工具，该延迟约为 90 μs。

另一个延迟是处理 ADC 中断所需的时间。ADC 中断服务程序 (Interrupt Service Routine, ISR) 先执行三个 IIR 滤波器，然后才能确定是否发生了过零事件。该过程约需要 1.7 μs。必须从 30° 电角度的时间中减去每个延迟，然后才能将其装入换相定时器周期寄存器。

Timer3 用作换相定时器。当发生过零事件时，将由公式 2 指定的值装入 Timer3 周期寄存器。

公式 2: 针对低速实现方案的 TIMER3 周期

$$PR3 = T_{30} - DFILT - DPROC - DPA$$

其中:

PR3 = Timer3 周期寄存器的值

T₃₀ = 计算得到的转过 30° 电角度的值

DFILT = 低速滤波器相位延迟

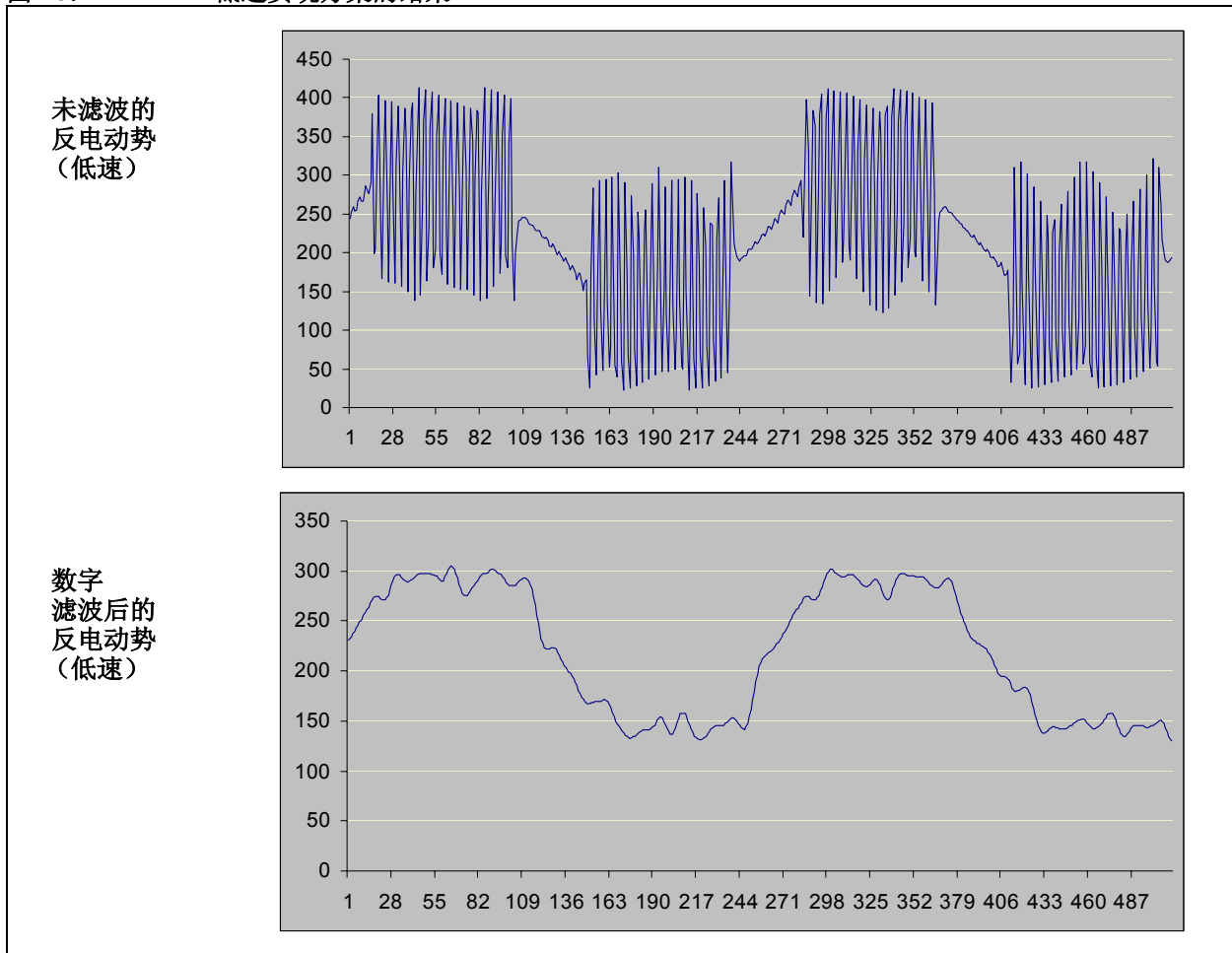
DPROC = 低速 ADC 中断处理延迟

DPA = 相位超前 (见“相位超前”部分以获得更多详细信息)

随后启动 Timer3 并允许 Timer3 中断。Timer3 中断发生时，电机绕组换相到下一状态。

图 16 所示为低速实现方案的结果。

图 16: 低速实现方案的结果

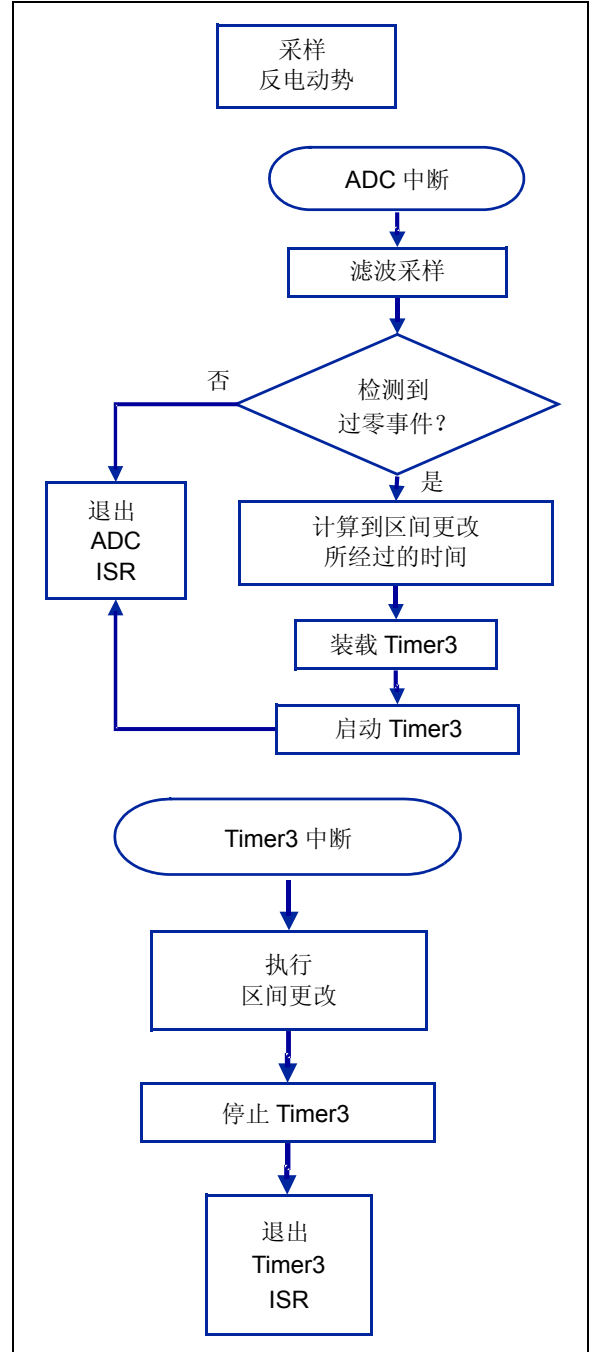


总的来说，低速实现方案的工作原理如下：

1. 电机的所有三相都是由 ADC 模块以 49,152 sps 采样速率采样得到的。
2. 所有三相的采样信号都经过滤波。
3. 根据电机当前状态，对相应相滤波后的采样信号进行分析以查看是否发生了过零事件。
4. 当检测到过零事件时，保存 Timer1 的值，然后将 Timer1 复位。
5. 将所保存的 Timer1 值（与经过 60° 电角度的时间相同）除以 2，再减去 IIR 滤波器相位延迟、处理延迟以及相位超前，得到的结果表示到下一次换相的时间。
6. 将该结果装入 Timer3 周期定时器，随后启动 Timer3，并允许 Timer3 中断。
7. 当发生 Timer3 中断时，Timer3 停止计数并复位，且禁止 Timer3 中断。电机绕组换相到下一状态。

图 17 所示为无传感器 BLDC 算法的低速实现方案的流程图。

图 17: 低速实现方案的流程图



高速实现方案

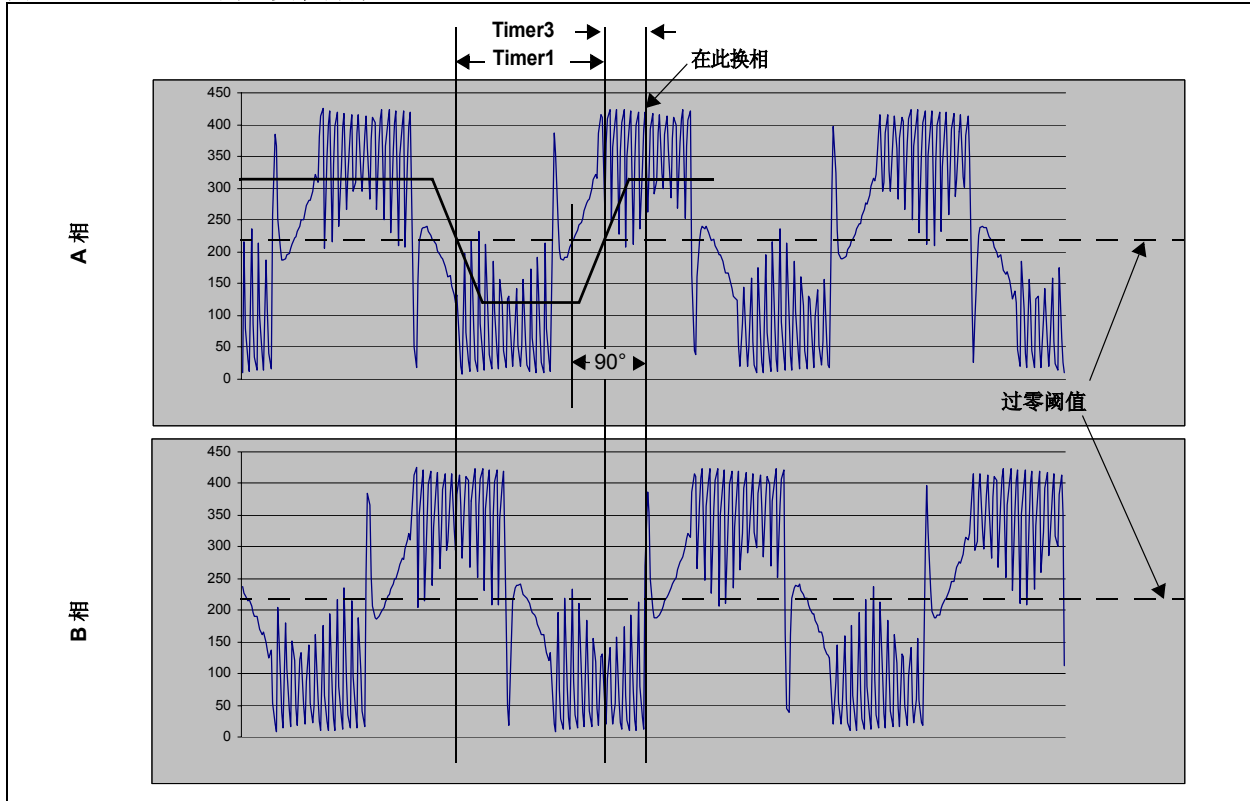
图 18 中所示为该算法的高速实现方案。在此实现方案中，仅采样和滤波一相的信号。采样频率增加到 81,940 sps。

低速实现使得电机转速低于约 40,000 电气 RPM（假设没有相位超前）。随着速度加快，滤波器和处理延迟将大于转过 30° 电角度所需要的时间。运行速度过快可导致在电机绕组应该被换相的时刻之后才检测到过零事件。

在低速实现方案中，由于电机低速运行时反电动势的斜率较小而要采样所有三相。反电动势信号的斜率较小会使过早检测到过零事件的可能性升高。如果检测到每一次过零事件，将最大限度地减小无传感器算法失效的可能性。

在电机高速运行时，由于反电动势信号斜率加大，对过零事件的检测就更加准确。因此就没有必要对所有三相都进行采样。此外，仅采样电机的一相可释放带宽以更加快速地对该相进行采样。这可增加过零事件检测的准确性。

图 18: 高速实现方案



在图 18 中，滤波信号的过零点比实际过零点滞后超过 30°。高速实现方案在下一区间换相，而不是在实际过零事件之后立即对电机绕组进行换相。也就是说，算法超前 90° 电角度，而不是 30° 电角度。

Timer1 测量一相上的两个过零事件之间所消耗的时间。该时间相当于一个 180° 电角度。然后对 Timer3 进行设置，除由经过 90° 电角度的时间减去适当的延迟得到的时间来装载 Timer3 周期寄存器外，与低速实现方案一样。公式 3 显示该关系。

公式 3: 针对高速实现方案的 TIMER3 周期

$$PR3 = T_{90} - DFILT - DPROC - DPA$$

其中：

- PR3 = Timer3 周期寄存器的值
- T_{90} = 计算得到的经过 90° 电角度的值
- DFILT = 高速滤波器相位延迟
- DPROC = 高速处理延迟
- DPA = 相位超前延迟（见“相位超前”部分以获得更多信息）

Timer3 中断发生时，电机绕组换相到相应区间。Timer3 中断仅在每三区间对电机进行换相。其他区间由 Timer2 进行换相。检测到过零事件后，将相当于经过 60° 电角度的时间值装入 Timer2 周期寄存器。Timer2 在后台递增运行，将电机绕组换相到下一区间。

如果 Timer2 在后台独立运行，那么如何将它应用到实际过零事件呢？答案是 Timer3 中断始终强制每三区间将电机换相到特定区间状态。当 Timer3 中断事件发生

时，Timer3 清零并停止计数。此外，Timer2 也在 Timer3 中断期间被复位。因此，Timer3 与 Timer2 在区间边界同步。图 19 显示了上述过程。

前面已经讨论过，当电机高速旋转时，反电动势信号中会出现感应冲击。反电动势信号中的这种干扰太大很难被滤掉。因此应在滤波前，首先将其“移除”，否则它将导致过零检测错误。要解决此问题，无传感器算法具有一个称为 Blanking Count 的可配置参数。Blanking Count 指的是 ADC 采样数，算法应在每区间开始时忽略该值（见图 20）。

图 19: 高速模式下的定时器工作

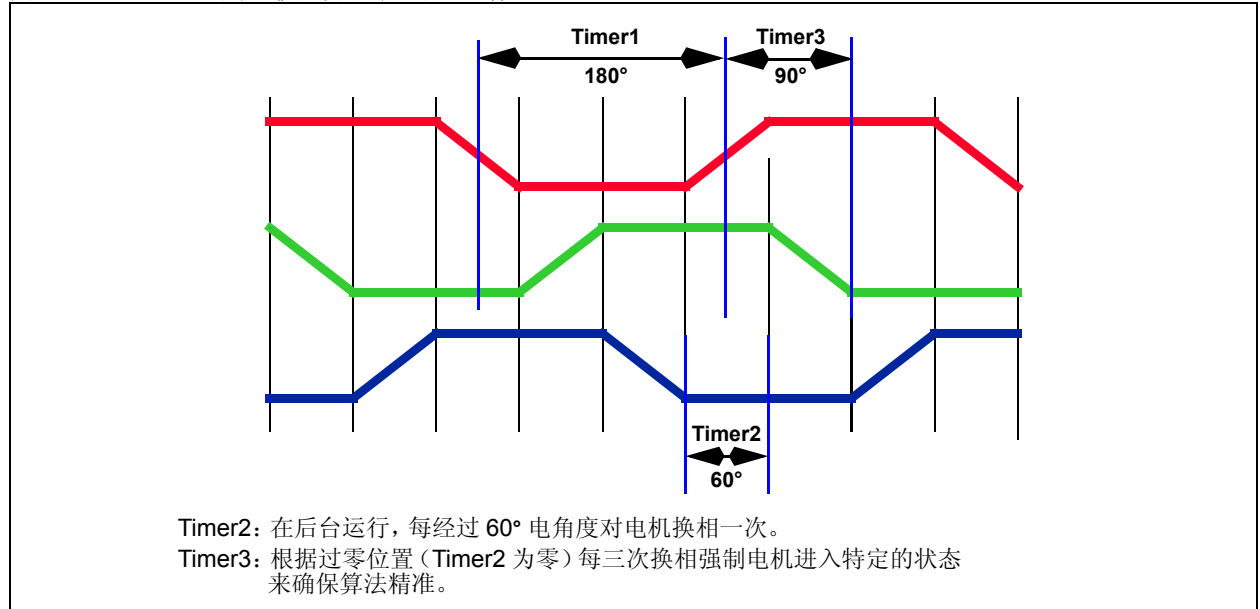
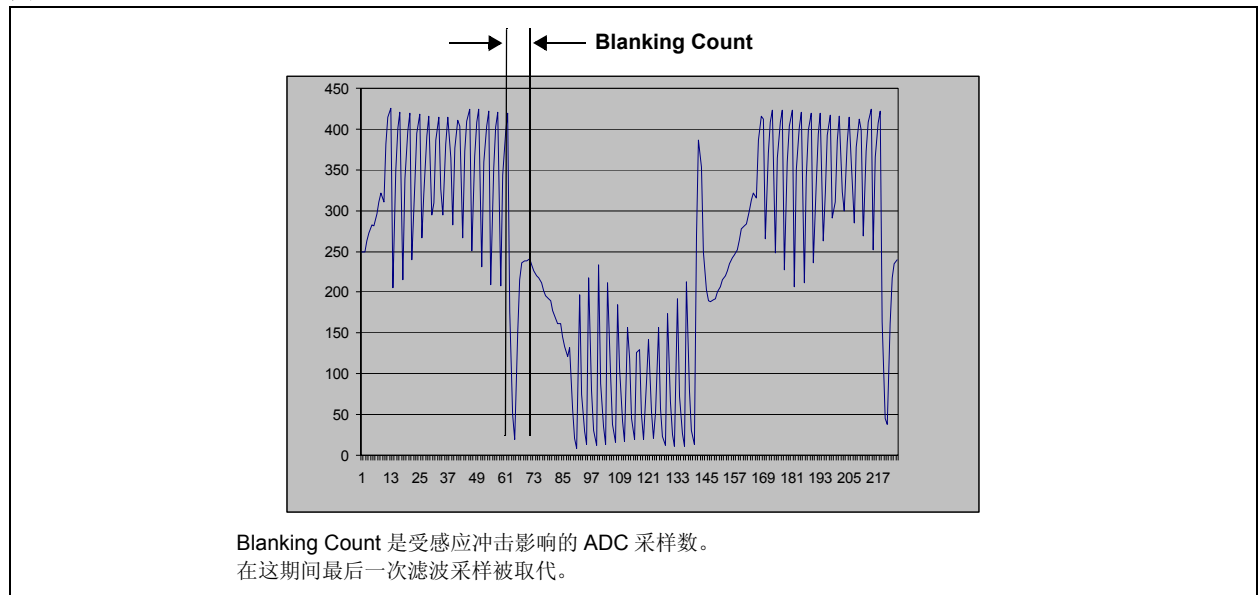


图 20: BLANKING COUNT

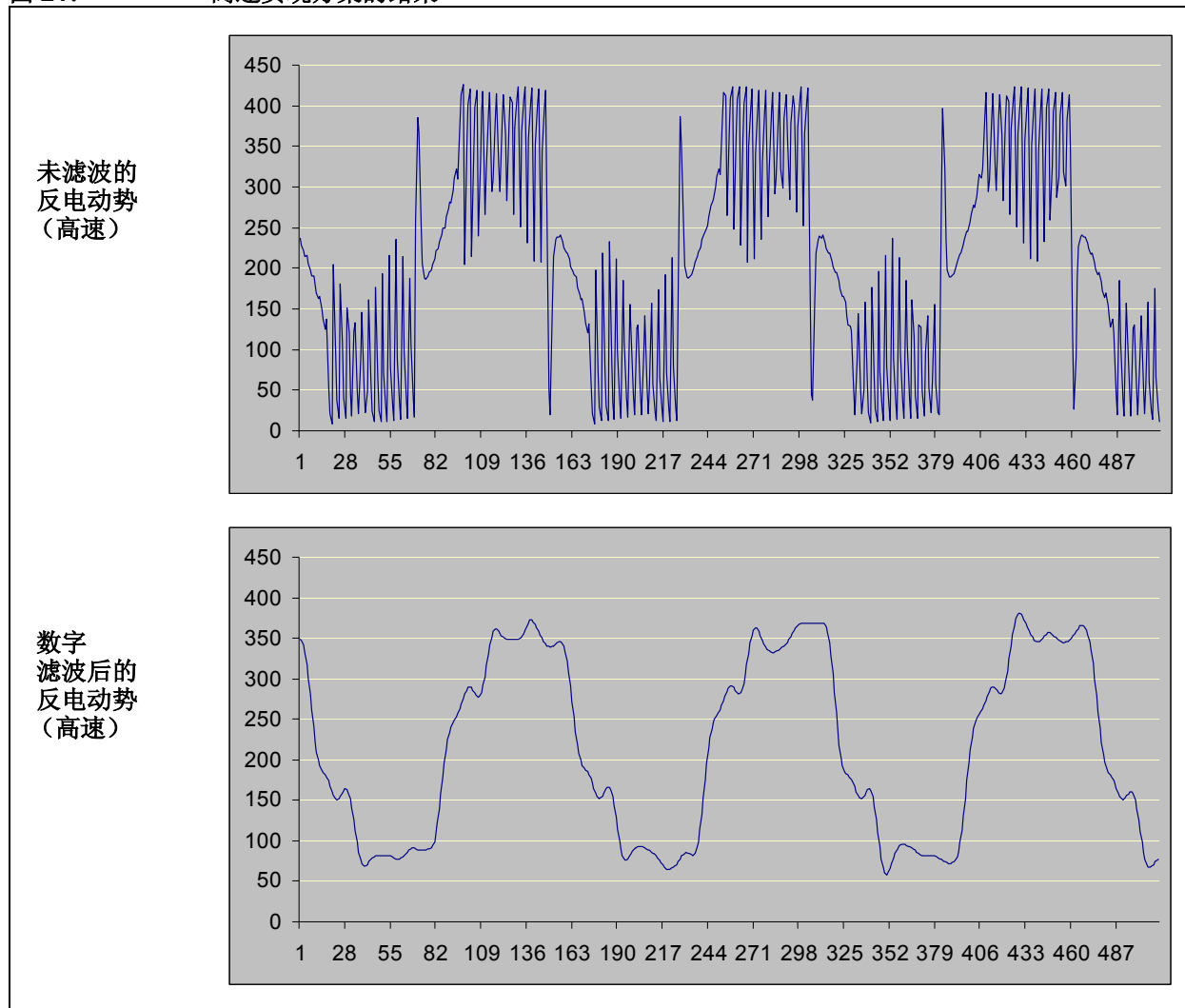


AN1083

实际上，算法在消隐（Blanking）期间并未忽略反电动势信号。相反，在每区间开始，送入数字滤波器的是最后滤波的采样，而不是 blanking count 期间的实际反电动势采样。

图 21 中所示为高速实现方案的结果。

图 21: 高速实现方案的结果



总的来说，高速算法的工作原理如下：

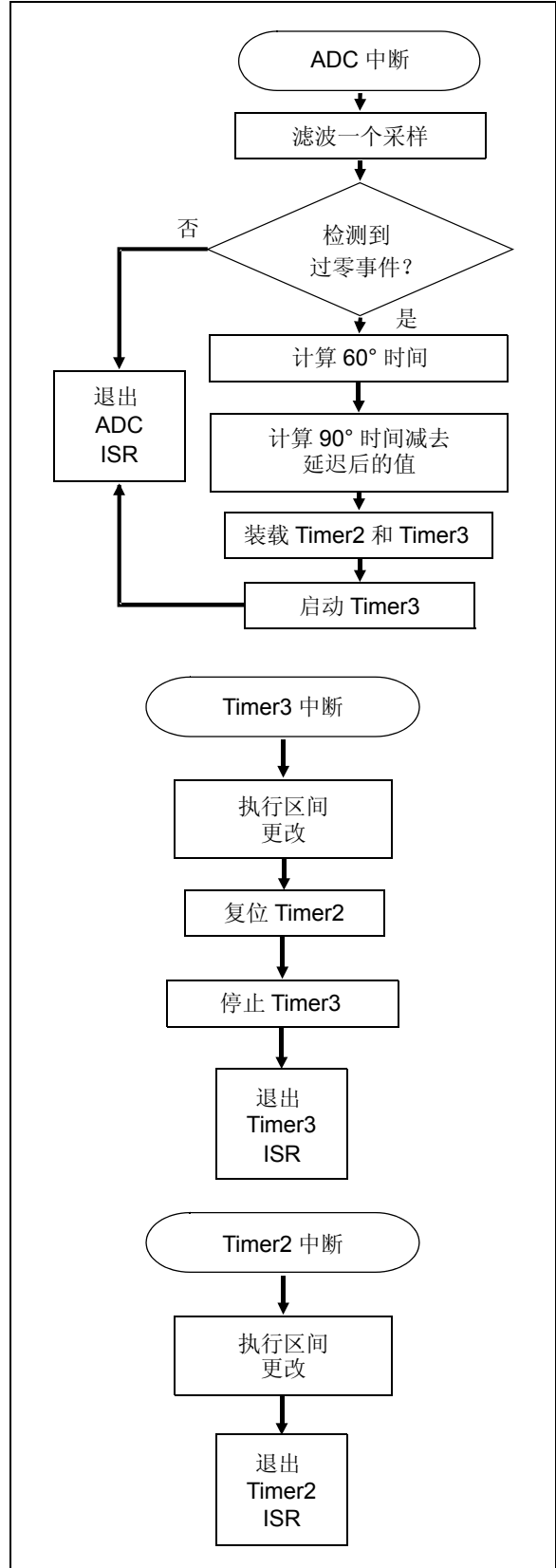
1. 使用 ADC 模块在 81,940 sps 采样速率下对电机的某一相进行采样。
2. 对采样进行滤波。

注： 在高速实现中使用的数字滤波器与“数字滤波”部分中描述的滤波器相同，但采样频率不同——采样频率为 81,940 Hz 而不是 49,152 Hz。

3. 当检测到过零事件时，保存 Timer1 的值，然后将 Timer1 复位。
4. 将 Timer1 的值（与转过 180° 电角度的时间相同）除以 2，再减去 IIR 滤波器相位延迟、处理延迟以及相位超前延迟，得到的结果表示到下一次换相发生（在实际过零事件发生后又转过 90° 电角度）的时间。
5. 将结果装入 Timer3 周期定时器，随后启动 Timer3，并允许 Timer3 中断。
6. Timer2 周期寄存器装入用于计时 60° 电角度的时间的数值。
7. Timer2 在后台继续运行。Timer2 中断发生时，电机绕组换相到下一区间。
8. 当发生 Timer3 中断时，Timer3 停止并复位，这时禁止 Timer3 中断。电机绕组换相到预先确定的区间。
9. Timer2 也复位。这可确保 Timer2 恢复到与实际过零事件同步。

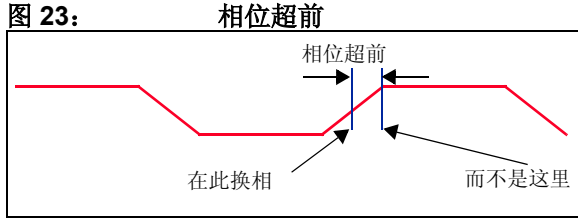
图 22 所示为无传感器 BLDC 算法高速实现方案的流程图。

图 22: 高速实现方案的流程图



相位超前

相位超前可使电机在高于其额定转速的条件下运行。当发生相位超前时，电机绕组在每一区间都提前换相。相位超前以电角度来表示。该算法可实现最大 30° 电角度的相位超前。图 23 说明了相位超前。



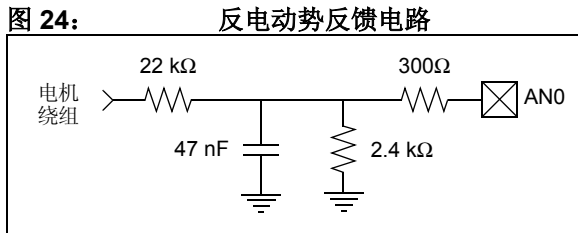
使用相位超前来提高电机速度的方法代价昂贵。电机比以额定条件运行时要消耗更多的电流，这可使电机过热，从而缩短电机寿命。

注： 请参考前面章节中的公式 2 和公式 3，以查看相位超前对低速和高速实现方案的影响。

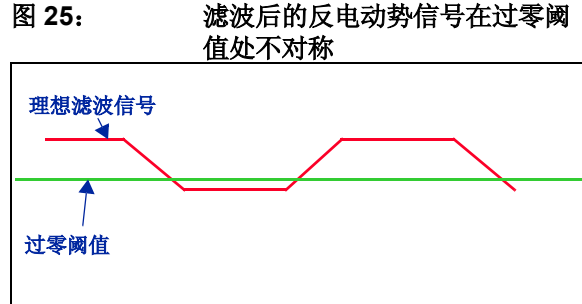
过零电压补偿

理想情况下，过零电压阈值位于驱动 BLDC 电机的电压满幅值的中心点。如果驱动电压为 $\pm 12V$ ，那么过零电压阈值为 $0V$ 。如果驱动电压的范围为 $0-12V$ ，那么理想的过零电压阈值为 $6V$ 。

图 24 显示了用来提前调节要施加到 dsPIC DSC 上 ADC 通道的反电动势电压的电路。将电压调节到 dsPIC DSC 的模拟输入电压范围之内。



理想状态下，ADC 通道将对母线电压进行采样，将其结果除以 2（驱动电压的两轨分别为零和正电压）以确定过零电压阈值。该阈值与滤波后的反电动势采样信号进行比较来确定是否发生了过零事件。如果滤波信号在过零阈值处不对称，则不能准确确定过零事件。图 25 显示了上述条件下将发生的情况。



有两个滤波器源用于滤波反电动势信号：

- 反馈电路中的 RC 滤波器（见图 24）用于滤除高频瞬态干扰
- 数字低通滤波器

低通滤波时，信号并不总是围绕过零电压对称。随着电机速度增加，反电动势信号的实际过零点相对于过零电压阈值略有上升。

要进行补偿，反电动势滤波采样与过零阈值进行比较。软件累加器记录大于过零阈值和小于过零阈值的采样数的差值。如果大于和小于阈值的采样数不等，那么随着时间推移累加器的值将变成一个非常大的有符号数。累加器的高位加在一起以作为相对于过零阈值的偏移量。这可确保反电动势信号始终关于过零阈值对称。

注： 在源代码中，过零阈值存储在变量 `signal_average` 中。可在 `CheckZeroCrossing()` 函数 (`motor_isr.c`) 中对 `signal_average` 进行计算。

速度控制

您可选择启用一个 PID 速度控制环。速度控制环可通过数据监控界面工具来使能。“调节过程”部分将给出使能和调节 PID 速度控制环的详细信息。

注： 本算法中所使用的 PID 函数为由 Microchip C30 C 编译器提供的 DSP 库的一部分。《16 位语言工具函数库》(DS51456D_CN) 中给出了本应用笔记中所使用的 PID 函数的详细信息。

PID 速度控制环由 MediumEvent() 函数调用。在主程序循环中每 1 ms 调用一次 MediumEvent()。

实现算法

要运行本应用笔记中所描述的算法，您必须：

- 设置硬件。
- 设置开发工具并在 MPLAB IDE 中载入项目工作区。
- 使用数据监控界面 (DMCI) 工具来调节电机。

硬件设置

无传感器 BLDC 算法是针对以下两个硬件平台开发的：

- PICDEM™ 低电压电机控制 (MC LV) 开发板 (DM183021)
- dsPICDEM™ MC1 电机控制开发板 (DM300020)，与 dsPICDEM™ MC1L 三相低压功率模块 (DM300022) 相结合。

这些开发板及其相关文档可从 Microchip 网站 (www.microchip.com) 上下载。

PICDEM™ MC LV 开发板

该开发板上提供了电机接线排、三相电压源逆变器桥、传动装置输入、过流保护、温度传感器、按钮式开关、9 个 LED、电机电流和反电动势检测的测试点、速度控制电位器以及一个 RS-232 端口。该板必须如表 2 所示进行配置。电机必须如表 3 所示进行连接。

表 2: PICDEM™ MC LV 开发板的跳线设置

跳线	设置
J7	短路引脚 2 和 3
J8	开路
J10	短路
J11	短路引脚 2 和 3
J12	开路
J13	短路引脚 2 和 3
J14	开路
J16	短路
J17	短路
J19	开路
J15	开路

表 3: 到 PICDEM™ MC LV 开发板的电机连接

J9 上的标号	连接
M1	A 相
M2	B 相
M3	C 相
G	接地线 (如果适用)
+(1)	12-36V
-(1)	接地

注 1: 仅当未使用 J20 连接器时，才可将开发板 / 电机电源和地连接到 J9。请参见“PICDEM™ MC LV Development Board User's Guide” (DS51554A) 以获得更多信息。

该无传感器 BLDC 电机控制算法设计为在 30 MIPS 下运行。为达到 30 MIPS，PICDEM MC LV 板上的 5 MHz 晶振必须由 7.37 MHz 晶振来取代，这样就可使算法在 29.49 MIPS 下运行。

注： 限制性测试将显示算法在默认 5 MHz 晶振 (20 MIPS) 下运行的情况。使用 5 MHz 晶振运行代码需要用户将 Fcy 的定义从 29490000 改为 20000000 (在 general.h 中)。

按表 2 和表 3 来配置该板与 dsPIC30F3010 器件连接，以使器件上的引脚功能如表 4 所示。该表仅显示了该算法要用到的引脚。

表 4: dsPIC30F3010 引脚功能

引脚	名称	功能
1	MCLR	器件通过 S1 复位
2	AN0	母线电压检测
3	AN1	电机电流检测
4	AN2	电位器 (R14) 输入
5	AN3	相 1 反电动势检测
6	AN4	相 2 反电动势检测
7	AN5	相 3 反电动势检测
8	Vss	接地
9	OSC1	晶振输入
10	OSC2	晶振输入
11	RC13	开关 (S3) 输入
12	RC14	开关 (S2) 输入
13	VDD	+5V
14	EMUD2	在线调试器数据引脚
15	EMUC2	在线调试器时钟引脚
16	FLTA	过电流故障输入 (由 R60 设置的电流跳闸值)
17	PGD	在线串行编程数据引脚
18	PGC	在线串行编程时钟引脚
19	Vss	接地
20	VDD	+5V
21	PWM3H	驱动相 3 上高端 MOSFET (Q5)
22	PWM3L	驱动相 3 上低端 MOSFET (Q6)
23	PWM2H	驱动相 2 上高端 MOSFET (Q3)
24	PWM2L	驱动相 2 上低端 MOSFET (Q4)
25	PWM1H	驱动相 1 上高端 MOSFET (Q1)
26	PWM1L	驱动相 1 上低端 MOSFET (Q2)
27	AVss	接地
28	AVDD	+5V

“PICDEM™ MC LV Development Board User's Guide” (DS51554A) 提供了如何对需要大于 36V 的电机使用该板的详细信息。

如果要在额定电压小于 24V 的电机上运行 BLDC 电机控制算法, 则需要对此开发板进行修改, 特别是电阻反馈网络。该用户指南还给出了此修改的详细信息。

PICDEM MC LV 板上的触点开关提供了一些功能, 如表 5 所示。

表 5: 开关功能

按钮	功能
S1	器件复位
S2	开始起动加速
S3	全部停止

dsPICDEM™ MC1 电机控制开发板和 dsPICDEM™ MC1L 三相低压功率模块

dsPICDEM MC1 电机控制开发板包括 dsPIC30F6010A、各种外设接口以及用户定制的接口接头系统, 从而可以将不同的电机功率模块连接到 PCB。该开发板还包括用于连接诸如增量旋转编码器和霍尔效应传感器等机械位置传感器的连接器, 以及用于定制电路的实验布线区。由标准接插式变压器为主控制板供电。

dsPICDEM MC1L 三相低压功率模块经过优化, 可适用于一些要求直流母线电压小于 50V、输出功率达到 400W 的三相电机应用。

dsPICDEM™ MC1 电机控制开发板

必须如表 6 所示对 dsPICDEM MC1 电机控制开发板进行跳线设置。

表 6: dsPICDEM™ MC1 跳线设置

跳线	设置
LK1	开路
LK2	开路
LK3	开路
LK4	短路引脚 2 和 3
LK5	短路引脚 2 和 3
LK6	开路
LK7	开路
LK8	开路
LK9	开路

此外, 可将 dsPICDEM MC1 电机控制开发板进行如下配置:

1. 将开关 S2 设定在 ICD 位置。
2. 将 R37 和 R40 短路。如果电路中存在这两个电阻, 那么 MPLAB ICD 2 不可用于 dsPIC30F6010A 的调试模式。
3. 确保 DSC 是 dsPIC30F6010A。
4. 在接地点和实验布线区的 AN12、AN13 和 AN14 连接之间添加 3 个 4 nF 电容, 可将反电动势反馈线路上的高频瞬态噪声滤除。

在 dsPICDEM MC1 电机控制开发板上运行的无传感器算法也允许电机以带传感器模式运行。如果需要该功能, 可如表 7 所示连接霍尔效应传感器。

表 7: 霍尔效应传感器连接 (可选)

J3 上的标号	连接
+5	霍尔效应电源
G	霍尔效应传感器地
A	R 相位置霍尔传感器
B	Y 相位置霍尔传感器
C	B 相位置霍尔传感器

将 dsPICDEM MC1 电机控制开发板进行如上配置, 并按照“dsPICDEM™ MC1L 三相低压功率模板”部分对低压功率模块进行配置后, dsPIC30F6010A 的引脚将实现表 8 中所描述的功能。

表 8: dsPIC30F6010A 引脚功能

引脚	名称	功能
6	RG6	开关 (S4) 输入
7	RG7	开关 (S5) 输入
8	RG8	开关 (S6) 输入
9	MCLR	器件通过 S1 复位
10	RG9	开关 (S7) 输入
11	VSS	接地
12	VDD	+5V
13	FLTA	支路过流 / 过压 / 霍尔 (过流) / LV 功率模块的制动斩波故障输入
14	RE9	复位功率模块故障
19	PGC/EMUC	在线串行编程 / 调试时钟引脚
20	PGD/EMUD	在线串行编程 / 调试数据引脚
22	AN7	电位器 (VR2) 输入
23	RA9	LED (D6) 控制
24	RA10	LED (D7) 控制
25	AVDD	+5V
26	AVSS	接地
27	AN8	母线电流检测
30	AN11	母线电压检测
31	VSS	接地
32	VDD	+5V
33	AN12	相 1 (R) 反电动势检测
34	AN13	相 2 (Y) 反电动势检测
35	AN14	相 3 (B) 反电动势检测
48	VDD	+5V
49	OSC1	晶振输入
50	OSC2	晶振输入
51	VSS	接地
52	RA14	LED (D8) 控制
53	RA15	LED (D9) 控制
54	RD8	相 1 (R) 位置霍尔效应传感器

表 8: dsPIC30F6010A 引脚功能 (续)

引脚	名称	功能
55	RD9	相 2 (Y) 位置霍尔效应传感器
56	RD10	相 3 (B) 位置霍尔效应传感器
69	RD7	LED (D5) 控制
70	VSS	接地
71	VDD	+5V
76	PWM1L	驱动相 1 (R) 上低端 MOSFET (Q4)
77	PWM1H	驱动相 1 (R) 上高端 MOSFET (Q3)
78	PWM2L	驱动相 2 (Y) 上低端 MOSFET (Q6)
79	PWM2H	驱动相 2 (Y) 上高端 MOSFET (Q5)
80	PWM3L	驱动相 3 (B) 上低端 MOSFET (Q8)
1	PWM3H	驱动相 3 (B) 上高端 MOSFET (Q7)

dsPICDEM MC1 板上的触点开关提供了以下功能:

表 9: 开关功能

按钮	功能
S1	器件复位
S3	模拟故障
S4	霍尔模式
S5	开始启动加速
S6	无传感器模式
S7	全部停止

dsPICDEM™ MC1L 三相低压功率模板

必须为无传感器算法配置低压功率模块, 这需要卸下功率模块上的金属盖子。

警告

卸下金属外壳的顶盖可能会导致电击。模块断电后至少等待 5 分钟后才能触摸壳内的 PCB。卸下金属外壳的顶盖时, 请阅读“dsPICDEM™ MC1L 3-Phase Low-Voltage Power Module User's Guide” (DS70097A) 中的所有警告。

卸下低压功率模块的盖子后, 将 51 Ω 电阻跨接到表 10 所示的连线上。

表 10: 要接 51 Ω 电阻的连线

连线	连接
LK22	母线电流检测
LK24	相 3 (B) 反电动势检测
LK25	相 2 (Y) 反电动势检测
LK26	相 1 (R) 反电动势检测
LK30	母线电压检测

仅当低压功率模块的电源电压为 24V 到 48V 之间时才进行上述修改。

在以下两种情况下需要其他修改：(a) 提供的电压小于 24V，或者 (b) 需要更高的电流。有关这些修改的详细信息，请参阅“*dsPICDEM™ MC1L 3-Phase Low-Voltage Power Module User's Guide*” (DS70097A)。

完成这些修改之后，使用卸下的螺丝重新将盖子固定。

表 11 列出了螺丝端子连接。仅当低压功率模块的盖子盖牢后才进行这些连接。

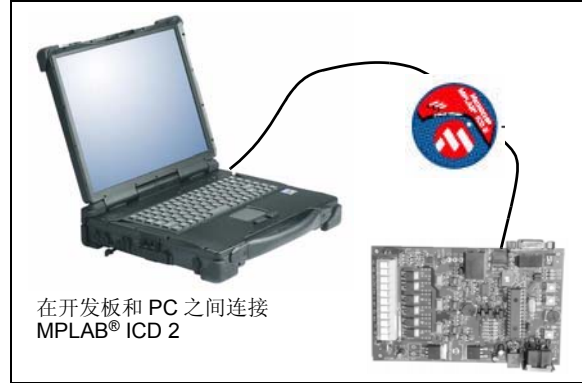
表 11: 螺丝端子连接

标号	螺丝端子连接
+	正电压轨
-	负电压轨
Earth	接地 (可选)
R	电机相 1 (R)
Y	电机相 2 (Y)
B	电机相 3 (B)
Gnd 符号	电机接地

开发板设置

通过 MPLAB ICD 2 调试器将 PC 与开发板连接之后，按照以下步骤将算法工作区和 DMCI 工具载入到开发板。

图 26: 开发工具设置



PICDEM™ MC LV 开发板

第一步——配置工作区：

1. 解压 AN1083 MCLV.zip 文件。
2. 打开 MPLAB IDE (7.50 或更高版本)。
3. 打开 Sensorless.mcw 工作区。
4. 在 Tools (工具) 菜单中，选择 DMCI 工具。
5. 将 AN1083 MCLV.DMCI 载入到 DMCI 工具。

第二步——对 dsPIC30F 器件编程：

1. 将 S4 拨到 PRGM 位置。
2. 选择 ICD 2 作为调试工具。
3. 连接到 ICD 2。
4. 在 Project Manager (项目管理器) 工具栏中选择“Debug” (调试)。
5. 编译代码。
6. 对器件编程。

第三步——运行算法：

1. 将 S4 拨到 DEBUG 位置。
2. 复位器件。
3. 运行调试器。
4. 停止调试器。

dsPICDEM™ MC1 电机控制开发板和 dsPICDEM™ MC1L 三相低压功率模块

第一步——配置工作区：

1. 解压 AN1083 MC1.zip 文件。
2. 打开 MPLAB IDE (7.50 或更高版本)。
3. 打开 Sensorless.mcw 工作区。
4. 在 Tools 菜单中，选择 DMCI 工具。
5. 将 AN1083 MC1.DMCI 载入到 DMCI 工具。

第二步——对 dsPIC30F 器件编程：

1. 将 S2 拨到 ICD 位置。
2. 选择 ICD 2 作为调试工具。
3. 连接到 ICD 2。
4. 在 Project Manager 工具栏中选择 “Debug”。
5. 编译代码。
6. 对器件编程。

第三步——运行算法：

1. 复位器件。
2. 运行调试器。
3. 停止调试器。

数据监控界面工具

数据监控界面 (DMCI) 工具通过提供图形化用户界面来对电机参数进行配置，从而节省了试验和纠错的时间。该工具包含在 MPLAB IDE (7.50 或更高版本) 中。DMCI 工具使用滑动条和文本框控件来分配全局变量。通过调节滑块或更改文本字段，即可轻松更改这些变量。还可使用该工具将数组分配给四个图之一。

对电机参数进行优化之后，保存图形界面设置 (分配给不同控制参数的变量)，以便其他人可访问该设置。

DMCI 包含以下这些屏幕和控制参数：

- 动态数据输入屏幕
- 动态数据控制屏幕
- 动态数据查看屏幕

动态数据输入屏幕

动态数据输入屏幕 (图 27) 用来定义电机特征。表 12 用来确定用于无传感器算法的控制参数。

动态数据控制屏幕

动态数据控制屏幕 (图 28) 用来设定无传感器算法的参数。表 13 用来确定所使用的控制参数。

图 27: 动态数据输入屏幕

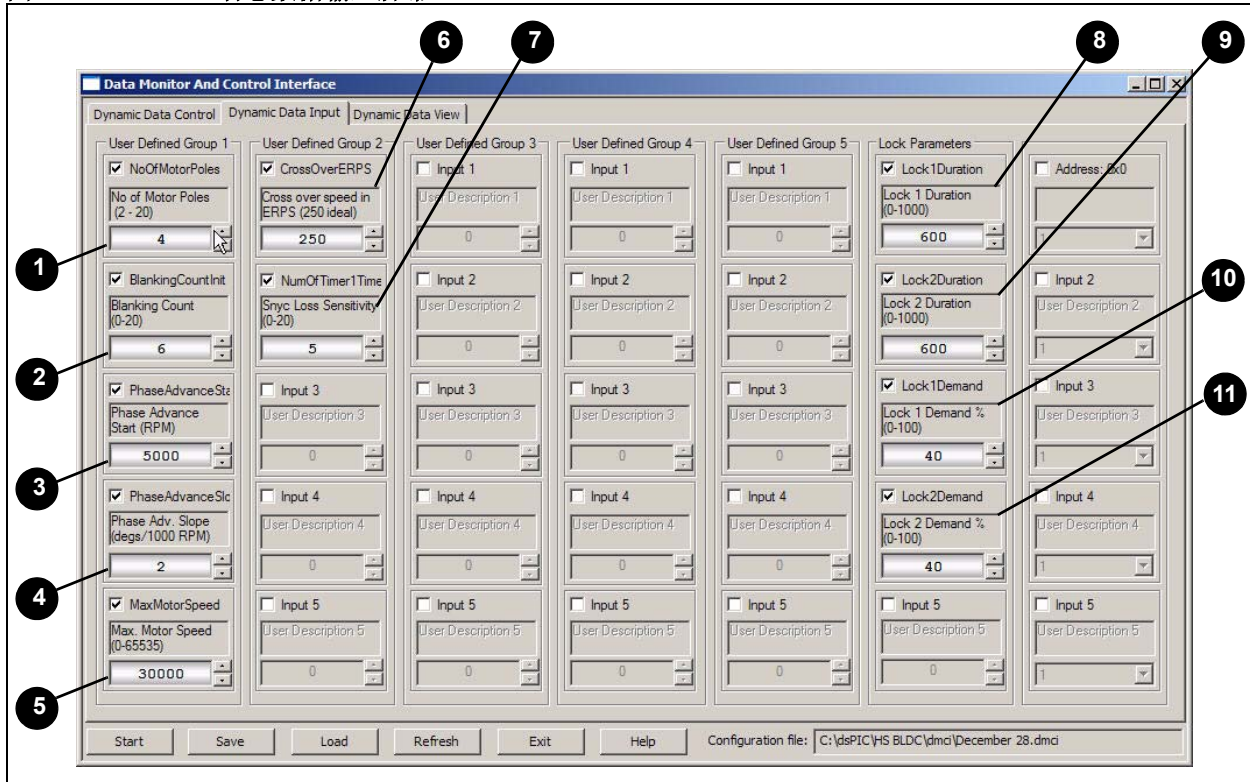


表 12: 动态数据输入屏幕控制参数

参考	控制功能
1	电机极数（应该是一个偶数）。
2	12 ms 计数时间内的 Blanking count（0-20）。 ⁽¹⁾
3	相位超前开始时的电机速度（单位为 RPM）。
4	每 1000 RPM 的相位超前斜率（单位为度，最高为 30 度）。
5	电机最大转速，单位为 RPM。该值用于设定当 PID 速度控制环使能时控制电位器的满量程。 ⁽²⁾
6	算法从低速实现到高速实现或从高速实现到低速实现转换时的速度（电气 RPS）。默认值为 250，一般不需要更改。交叉速度不可小于 50，这是因为固有的磁滞会造成每秒 ± 50° 的电气旋转。
7	Timer1 溢出次数指定的停转灵敏度。如果 Timer1 溢出时，电机已经停止或算法已经失去同步，增加该值以使算法灵敏度降低。
8	第一次锁定持续时间，单位为毫秒。 ⁽³⁾
9	第二次锁定持续时间，单位为毫秒。 ⁽³⁾
10	第一次锁定的给定（PWM 占空比，单位为 %）。 ⁽³⁾
11	第二次锁定的给定（PWM 占空比，单位为 %）。 ⁽³⁾

- 注 1: 当算法为高速模式时，12 ms 对应于 ADC 的中断频率（近似）。
- 2: dsPICDEM™ MC1 电机控制开发板上的 VR2；PICDEM™ MC LV 开发板上的 R14。
- 3: 锁定参数是描述开环起动加速过程的因素。锁定时间用于驱动电机运行到区间 0（第一次锁定），然后快速到达区间 1（第二次锁定），从而使电机在起动加速开始前对齐到已知区间。

图 28: 动态数据控制屏幕设置

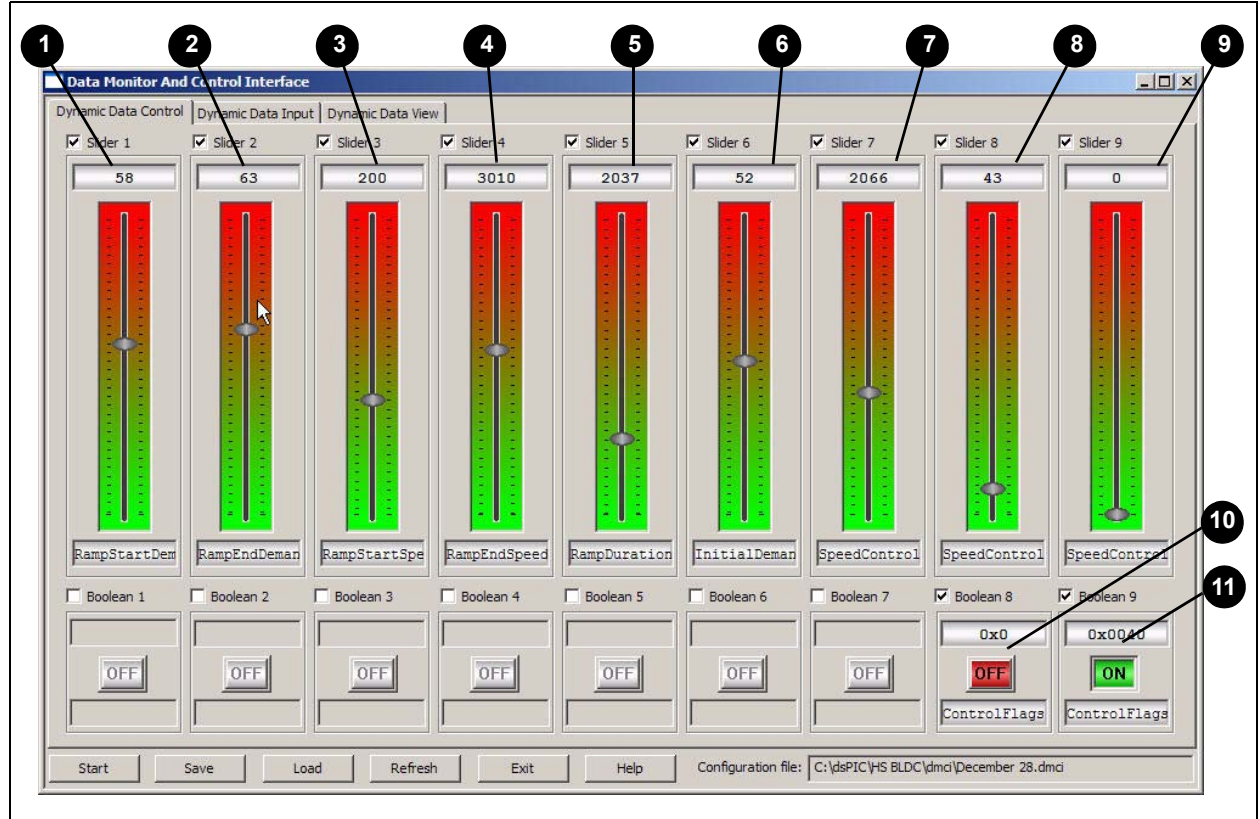


表 13: 动态数据控制屏幕控制参数

参考	控制功能
1	开始加速的给定（开环起动加速开始时的占空比，单位为 %）。
2	结束加速的给定（开环起动加速终止时的占空比，单位为 %）。
3	开始加速时的速度值，单位为 RPM。
4	结束加速时的速度值，单位为 RPM。
5	加速过程持续时间（单位为 ms，长度为 0.5 到 6.5 秒）。
6	初始给定（在起动加速后立即设置此给定）。
7	速度控制环 P 误差增益项。
8	速度控制环 I 误差增益项。
9	速度控制环 D 误差增益项。
10	速度控制环使能。在开环状态下，控制电位器用于调节电机速度。在闭环状态下，控制电位器用于调节 PWM 占空比。(1)
11	控制电位器使能 / 禁止。在开环状态下，电位器调节 PID 速度控制环的速度基准或者 PWM 占空比（参考上述的控制参数 10）。在闭环状态下，控制电位器对电机速度没有影响。

注 1: dsPICDEM™ MC1 电机控制开发板上的 VR2；PICDEM™ MC LV 开发板上的 R14。

AN1083

动态数据查看屏幕

注： 本部分仅适用于在 dsPICDEM MC1 平台上使用 dsPIC30F6010A 进行无传感器控制。

DMCI 工具上的第三个选项卡可用来访问动态数据查看屏幕（图 29）。默认情况下，该屏幕以图形方式显示 4 个 512 字节的缓冲区。这些图形显示以下信息：

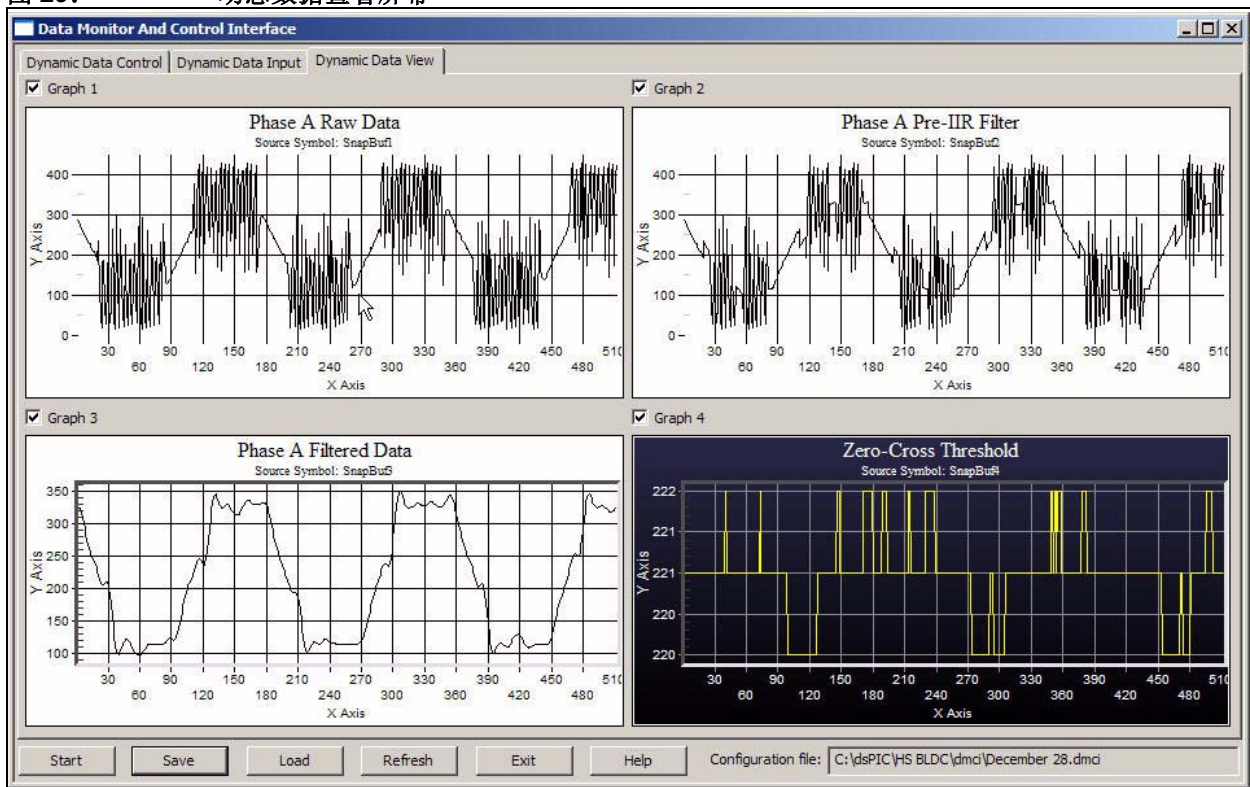
- 图 1: A 相反电动势的原始采样
- 图 2: A 相反电动势的原始采样（忽略 blanking count 采样）
- 图 3: A 相滤波采样
- 图 4: 过零参考

当电机在无传感器模式下运行时，按压板上的 S6 将启动一次缓冲器捕获。当调试器停止时，图形将显示缓冲的反电动势信号（以及其他三个缓冲信号）。

DMCI 工具允许在每张图上拖动框来确定所需区域，从而将选定的部分放大。

也可选定一个图形，然后按住 <M> 键将其放大到全屏。按下 <Esc> 返回到 DMCI GUI。

图 29: 动态数据查看屏幕



调节过程

必须完全按照以下步骤来调节电机参数：

1. 确保电机已停止运行（如果电机没有停止，则会在调试器重启时产生电流尖峰）。
2. 停止 MPLAB ICD 2 调试器。
3. 更改相应参数。
4. 再次启动 MPLAB ICD 2 调试器。
5. 起动电机。

每次调节电机参数时，都应重复该过程。表 14 详细说明了在每个开发板上起动和停止电机的开关。

表 14: 电机控制开关

开发板类型	开	关
dsPICDEM™ MC1	S5	S7
PICDEM™ MC LV	S2	S3

以下是用来调节起动加速和 PID 速度控制参数的基本步骤：

1. 设定初始参数，以与电机特征相匹配。
2. 初始化开环起动加速。
3. 调节开环起动参数。
4. 调节速度控制环。

请遵照以下详细步骤：

第一步： 设定初始参数，以与电机特征相匹配。

1. 在动态数据输入屏幕中，输入电机极数以及电机最大转速。保持 **blanking count** 为默认值。
2. 在初始调节电机参数期间禁止相位超前，这可通过将相位超前起始速度设为大于电机转速的某个 RPM 值来实现。
3. 将相位超前斜率设为零。这可确保在初始调节过程期间没有相位超前。
4. 交叉速度应该设为 250。如果具有一个无需相位超前的低速电机（最大 40k 电气 RPM），则可将该速度值增到很大，例如 700，用来确保算法总能运行在低速模式下。
5. 将停转灵敏度设为 20。这使得该算法检测停转条件的灵敏度降低（该值越低，算法越灵敏）。

第二步： 初始化开环起动加速。

1. 将第一次锁定和第二次锁定持续时间值设置为 600 ms。
2. 设定锁定给定。最好从较低给定值开始。第一次锁定和第二次锁定的起始锁定值为 10。增加第一次锁定和第二次锁定的给定直到电机到达锁定位置，但不能使灌电流过大，否则可能损坏电机绕组或驱动电路。锁定位置用来在起动加速开始前将电机置于已知区间。
3. 其他的起动加速参数可在动态数据控制屏幕中找到。将该屏幕右下角的使能布尔按钮设置为“OFF”来禁止速度控制环和控制电位器。这样做是为了获取无传感器算法，使之在电机运行后根据给定值的变化进行补偿。
4. 将加速过程持续时间设置为最大值——6500 ms。可通过减小该加速过程持续时间对起动加速过程进行调节，以使电机成功起动。

第三步： 调节开环起动参数。

1. 暂时忽略 PID 增益滑块。着力于获取开始加速时的速度值、结束加速时的速度、初始给定以及结束给定设置，从而使电机以足够快的转速旋转以同步无传感器算法。
2. 使用动态数据控制屏幕上的滑块来设定开始加速和结束加速时的速度。将结束加速时的速度设定为电机全速的 12-20%。

对于惯性较大和 / 或有多个磁极的电机来说，开始速度将低于 100 RPM。对于惯性较小和 / 或有少量磁极的电机来说，开始速度可能会高些（一般在 200 到 300RPM 之间）。

3. 将开始、结束和初始给定滑块设为相同值。将这三个参数设定为第一次锁定和第二次锁定规定的相同给定值。

单击 DMCI 工具上的“start”（起动）按钮，然后按下板上的按钮以初始化起动加速度（该值与硬件平台有关）。

如果电机没有开始旋转，则需要适量增加给定。按下板上的按钮以停止电机。单击 DMCI 工具上的“halt”（停止）按钮。开始、结束和初始给定值每次增加 5，直到电机起动。

注： 应该一点点的增加给定值。如果直接给了一个较大的给定值，电机上的电流可能过大，从而对电机或驱动电路造成损坏。

- 按下电机起动按钮后，现在电机应该开始旋转。如果电机转速跟不上电机换相频率，则增加结束和初始给定值。

结束给定不能比初始给定高 20%。一般来说，初始给定应该略微小于结束给定。如果电机仍呈现“滑转”，则减小结束速度。

- 电机现在应该正在旋转，在起动加速末期开始使用无传感器算法。精细调节加速参数，直到电机平稳起动。
- 多次减少加速过程持续时间来进行实验。找到电机平稳起动时加速过程持续时间的最小值。
- 现在可以使能控制电位器了。在 DMCI 工具中使能控制电位器。

不要使能速度控制。电位器的位置与 PWM 占空比相关联；将电位器的触头顺时针满旋对应于 PWM 占空比为 100% 的情况。

估算与初始给定值相对应的电位器位置。将电位器设置到该位置，开始起动加速过程。如果电机未起动，则调节电位器并再次尝试。电机运行后，可通过调节电位器来调节速度。

第四步：调节速度控制环。

- 现在可使能速度控制环。在 DMCI 界面中，使能速度控制环。电位器的位置当前与电机速度（单位为 RPM）相关。顺时针满旋与 DMCI 工具中动态数据输入屏幕上指定的最大电机速度相对应。
- 将初始给定滑动块移到结束给定值的 80% 左右。然后，将积分项和微分项置零，并将比例滑动块置于中心位置。
估算与起动加速过程结束速度相对应的电位器位置。尝试运行电机。调节控制电位器和 P 项直到电机成功起动。（降低初始起动给定有助于改善起动性能。）为成功起动电机可能还需要一些积分增益。

- 调节 P、I 和 D 项直到获得理想的电机性能。相对于比例项来说，所需的积分项较小。

请参阅“疑难解答”部分以获得相关问题解决方案的提示。

更改数字滤波器系数

低速和高速滤波器系数位于 BEMF_filter.s 中。这些滤波器系数可使用由 dsPIC DSC 滤波器设计工具生成的新系数替代。

算法的其他可调节功能

表 15 列示了一些可配置的 #define 声明，以及它们在源代码中的位置。

注： 不建议改变这些功能。调节这些功能所带来的风险自行承担。

表 15： 其他可调节参数

参数	定义位置	说明
FCY	general.h	处理器频率（以每秒执行的指令数表示）。
FPWM	general.h	PWM 频率。
FULL_DUTY	general.h	PWM 周期（FCY 和 FPWM 函数）。
FILTER_PHASE_DELAY	general.h	Timer3 计时的滤波器相位延迟。
PROCESSING_DELAY	general.h	低速模式下，Timer3 计时的 ADC 中断处理延时。
PROCESSING_DELAY_HS	general.h	高速模式下，Timer3 计时的 ADC 中断处理延时。
CYCLE_BY_CYCLE_PROTECTION FAULT_CAUSE_PWM_SHUTDOWN NO_FAULT_PROTECTION	pwm.c	当发生错误条件时，PWM 模块有三种选择。将“FLTACON =”更改为其中之一。
DEAD_TIME	pwm.c	PWM 死区时间，单位为秒。
SNAPSHOT	snapshot.h	将已定义的 RAM 分配给动态数据查看屏幕的时间。
SNAPSIZE	snapshot.h	四个快照缓冲区的大小，单位为字节。

总结

本应用笔记旨在帮助开发人员在不使用离散、低通滤波硬件以及片外比较器的情况下，即可驱动无传感器 BLDC 电机。

所描述的算法对由旋转中的 BLDC 电机产生的反电动势信号进行数字滤波。使用数字滤波可更准确地检测反电动势信号的过零事件。当 dsPIC DSC 检测到过零事件时，后者为算法提供了所需信息以对电机绕组进行换相。

准确地检测反电动势信号的过零事件是对使用六步或梯形换相 BLDC 电机进行无传感器控制的关键。与硬件滤波器或外部比较器相反，数字滤波需要较少的硬件，这等同于节省成本以及使用较小的 PCB。使用开源解决方案可使开发周期缩短。

最后，Microchip 开发工具支持 dsPIC DSC 器件系列，尤其是 MPLAB IDE 7.50 或更高版本中所包括的数据监控界面工具，使算法与特定电机和应用快速结合。

资源

对于 BLDC 电机控制，请参阅：

- AN901 《dsPIC30F 在无传感器 BLDC 控制中的应用》
- AN957 《使用 dsPIC30F2010 控制带传感器的 BLDC 电机》
- AN1017 《使用 dsPIC30F DSC 实现 PMSM 电机的正弦驱动》
- AN1078 《PMSM 电机的无传感器磁场定向控制》

关于与该算法兼容的硬件平台方面的信息，请参阅：

- “dsPICDEM™ MC1 Motor Control Development Board User’s Guide” (DS70098A)
- “dsPICDEM™ MC1L 3-Phase Low-Voltage Power Module User’s Guide” (DS70097A)
- “PICDEM™ MC LV Development Board User’s Guide” (DS51554A)

关于 PID 算法的信息，请参阅：

- 《16 位语言工具函数库》(DS51456D_CN)

疑难解答

问题：电机加速，但却在升到高速的中途停止。

可能的解决方案：尝试 (a) 增加 blanking count；(b) 如果是低速电机（最大速度远远低于 90,000 电气 RPM），且正在加入大量相位超前，那么您可能需要提前将算法从低速实现转换到高速实现。将交叉点调低（从 250 到 200，然后再到 150）。将相位超前斜率降低可能也会有所帮助。

问题：我的电机的反电动势在示波器中根本不呈现梯形走势。

可能的解决方案：该算法需要电机的反电动势信号为梯形形状。AN1078 《PMSM 电机的无传感器磁场定向控制》说明了如何以无传感器模式运行正弦电机。

问题：运行代码时，发生振荡器陷阱。

可能的解决方案：使用调试器对器件进行编程之后，请确保您复位了 MPLAB ICD 2。

问题：MPLAB ICD 2 无法调试 / 编程器件（当使用 PICDEM MC LV 板时）。

可能的解决方案：对器件进行编程时请确保 S4 在 PRGM 位置。一旦编程完器件就将 S4 设定到 DEBUG 位置，然后再进行调试。

问题：我如何知道电机的速度。

可能的解决方案：在 MPLAB ICD 2 的 View（视图）菜单中选择“Watch”（查看）。Watch 窗口随之出现。在 Watch 窗口中输入变量“Speed”。然后使用算法运行电机。当电机运行到理想速度时，按下“motor off”按钮。ICD 2 停止。“motor off”按钮按下时的电机速度（单位为 RPM）可在 Watch 窗口中显示。

问题：当前所用电机的转速不需要高于 40,000 电气 RPM，且不需要相位超前。

可能的解决方案：将交叉频率设定为最大允许值——每秒 900 次电气旋转。这可确保电机仅运行在低速模式下。运行速度低于 40,000 电气 RPM 的电机无需高速模式。通过添加处理和滤波相位延迟才可能使电机速度达到 40,000 电气 RPM。发生在低速模式下的延迟最大量是转过 30° 电角度所需要的时间。当增加延迟（假设无相位超前）使之等于转过 30° 电角度所需的时间时，计算得到的最快电气速度约为 48,000 RPM。

问题：电机在起动加速后就停止运行。电机似乎需要更大的速度才能起动。

可能的解决方案：当初次调节起动加速度时，请确保禁止电位器的输入以及速度控制环。这可通过 DMCI 工具动态数据控制屏幕上的布尔控件来实现。

问题：如何才能知道电机是否运行在高速模式下？

可能的解决方案：向 Watch 窗口添加位数组“ControlFlags”。当电机运行在高速模式下时，高速模式位置 1。当电机运行在低速模式下时，该位清零。当电机运行时，需要停止 ICD 2 以检查该位状态。

如果使用了 MC1 板还可以检查 LED D5——当电机处于高速模式下，该 LED 点亮。

问题：添加相位超前无法使电机进入高速模式。

可能的解决方案：电机运行在低速模式时，添加过多相位超前将导致电机运行不正常。将相位超前起动频率设置为超过交叉频率。交叉频率以每秒电气旋转来计算。要转换到 RPM，需要对交叉频率进行如下操作：加上 50，再与 60 相乘，然后除以极对数。

问题：当使用 MC1 板时，如果在对 dsPIC30F6010A 编程之后初次尝试运行 ICD 2 时，总是发生振荡器陷阱。

可能的解决方案：对 dsPIC30F6010A 编程之后，复位 ICD 2。然后运行 ICD 2，接着将其停止。随后单击 DMCI 工具上的“run”。如果再次发生陷阱，则需要重复上述步骤以清除陷阱，然后将 DMCI 工具中的参数载入到器件中。

问题：我在 DMCI 工具中更改了滑块的位置，但好像在 dsPIC DSC 中参数不能得到更新。

可能的解决方案：首先，DMCI 工具不是一个实时工具（至少目前为止）。为了将更改的参数载入 dsPIC DSC，您需要停止 ICD 2，并对参数进行更改，然后重新启动 ICD 2。

其次，确保代码中未产生陷阱。停止 ICD 2 并查看 trap.c 文件以检查器件是否产生陷阱。如果程序计数器（PC）箭头（绿色箭头）在该文件中，则表明发生了陷阱。复位 ICD 2 并检查其他故障源以清除陷阱。

问题：我如何知道电机的速度？

可能的解决方案：在 Watch 窗口中添加 “Speed” 变量。当电机运行到一定速度时，按下触点开关停止电机。停止 ICD 2。Watch 窗口将显示您停止电机时的瞬时速度。

问题：使用手持转速表测量电机速度。在 “Speed” 中显示的值与我的测量值不符。

可能的解决方案：假设手持转速表中的值正确，请确保处理器在由 `general.h` 中 `Fcy` 指定的指令周期速率下运行。也就是说，如果处理器运行在 30 MIPS 下，且 `Fcy` 设定为 20000000，则计算的电机速度将不准确。

问题：我遇到了振荡器陷阱。

可能的解决方案：对器件编程之后，在运行调试器之前应复位器件。

问题：为什么需要先运行，然后再停止调试器，才能在 DMCI 工具中对电机控制参数的任何调整生效。

可能的解决方案：电机起动参数在源代码中初始化。当初次运行调试器时，起动参数被初始化为源代码中指定的值（见 `TuningInterface.c`）。您必须以与这些参数的初始值不同的值来运行代码，才能使得在 DMCI 工具中对这些参数的调整生效。电机控制参数在源代码中初始化，以便当调节完电机后可将这些调整的参数“硬编码”到代码中，然后对器件进行编程。

AN1083

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 safest 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、适用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、microID、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PRO MATE、rPIC 和 SmartShunt 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AmpLab、FilterLab、Linear Active Thermistor、Migratable Memory、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、FlexROM、fuzzyLAB、In-Circuit Serial Programming、ICSP、ICEPIC、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、PICkit、PICDEM、PICDEM.net、PICLAB、PICtail、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、REAL ICE、rLAB、Select Mode、Smart Serial、SmartTel、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。

© 2007, 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、非易失性存储器和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。



MICROCHIP

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://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 - 福州
Tel: 86-591-8750-3506
Fax: 86-591-8750-3521

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 - 顺德
Tel: 86-757-2839-5507
Fax: 86-757-2839-5571

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

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

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

10/05/07