

用择多函数实现反电动势滤波的无传感器 BLDC 控制

作者: *Adrian Lita 和 Mihai Cheles*
Microchip Technology Inc.

引言

本应用笔记介绍一种采用 dsPIC[®] 数字信号控制器 (Digital Signal Controller, DSC) 或 PIC24 单片机来实现无刷直流 (Brushless Direct Current, BLDC) 电机无传感器控制的算法。该算法利用对反电动势 (Back-Electromotive Force, BEMF) 进行数字滤波的择多函数来实现。通过对电机的每一相进行滤波来确定电机驱动电压换相的时刻。这一控制技术省却了分立的低通滤波硬件和片外比较器。需指出, 这里论述的所有内容及应用软件, 都是假定使用三相电机。该电机控制算法包括四个主要部分:

- 利用 DSC 或单片机的模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 来采样梯形波 BEMF 信号
- PWM 导通侧 ADC 采样, 以降低噪声并解决低电感问题
- 将梯形波 BEMF 信号与 $V_{bus}/2$ 进行比较, 以检测过零点
- 用择多函数滤波器对比较结果信号进行滤波
- 以三种不同模式对电机驱动电压进行换相:
 - 传统开环控制器
 - 传统闭环控制器
 - 比例 - 积分 (Proportional-Integral, PI) 闭环控制器

这种新的控制方法是一种基于单片 16 位 PIC[®] MCU 或 dsPIC DSC 器件的解决方案。所需的外部硬件仅为几个电阻, 用来将 BEMF 信号限制在器件 ADC 模块的工作电压范围内。

有传感器控制与无传感器控制的对比

由于 BLDC 电机具有尺寸小、可控制好、效率高的特点, 常用于消费和工业应用中。BLDC 电机还愈来愈多地出现在汽车应用中用来取代传送带和液压系统, 提供额外功能和提高燃油经济性, 同时消除维护成本。

由于电励磁必须与转子位置同步, 因此 BLDC 电机在运行时, 通常需要一个或多个转子位置传感器。由于成本、可靠性、机械包装的原因, 特别是当转子在液体中运行时, 电机适宜在无位置传感器的条件下运行, 即通常所说的无传感器运行。

通过检测不通电相绕组上的 BEMF 电压可以确定电机驱动电压的换相时间。然而, 无传感器控制也有一些缺点:

- 由于 BEMF 足够大时才能被检测到, 因此电机必须运行在最低转速以上
- 电机负载突变可能引起 BEMF 驱动环失锁

如果低成本是应用中关注的主要问题, 且无需电机在低速下运行, 以及预料电机负载不会发生快速的变化, 那么在这种情况下, 无传感器梯形波控制就可能是应用中的较好选择。但某些特定算法能够克服上面所列出的全部缺点。

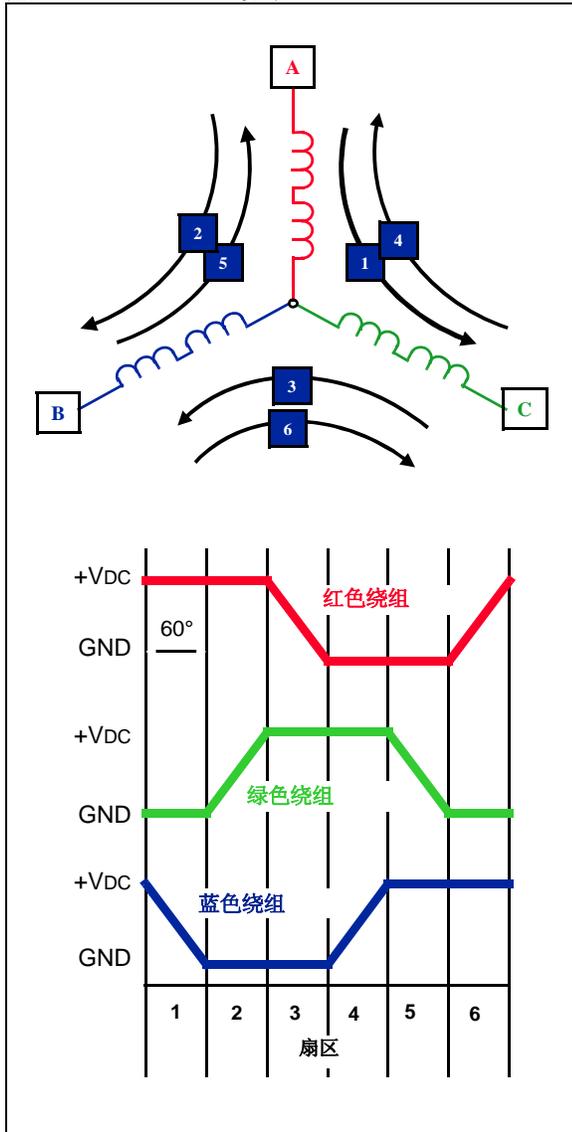
基于以下几个原因, 推荐您采用本文档所述的 BEMF 过零检测技术:

- 适用于多种电机类型
- 理论上, 这种技术可用于星形和三角形连接三相电机
- 无需详细了解电机参数
- 对于电机的制造公差差异不太敏感

六步（梯形）换相

在该应用笔记所介绍的无传感器算法中，可以按六步梯形换相或 120° 换相的方式对电机绕组进行通电。图 1 显示了六步换相的工作原理。每一步，即一个扇区，等于 60° 电角度。六个扇区就构成 360° 电角度，即一个电周期。

图 1: 六步换相



绕组图中的箭头表示六步的每步中电机绕组内电流的流向。下面的曲线图显示了六步的每一步中电机每一绕组端上的反电势波形。六步依次换相推动电机运转一个电周期。

六步换相

- 第 1 步
 - 红色绕组正向通电。
 - 绿色绕组负向通电。
 - 蓝色绕组断电。
- 第 2 步
 - 红色绕组仍正向通电。
 - 蓝色绕组负向通电。
 - 绿色绕组断电。
- 第 3 步
 - 绿色绕组正向通电。
 - 蓝色绕组负向通电。
 - 红色绕组断电。
- 第 4 步
 - 绿色绕组正向通电。
 - 红色绕组负向通电。
 - 蓝色绕组断电。
- 第 5 步
 - 蓝色绕组正向通电。
 - 红色绕组负向通电。
 - 绿色绕组断电。
- 第 6 步
 - 蓝色绕组正向通电。
 - 绿色绕组负向通电。
 - 红色绕组断电。

对于每一个扇区，都有两相绕组通电，一相绕组断电。实际上，在每个扇区内都有一相绕组断电是适宜使用无传感器控制算法的六步控制的一个重要特性。

BEMF 的产生和检测

当 BLDC 电机旋转时，根据楞次定律，每相绕组都会产生与加到该相绕组上的主电压方向相反的 BEMF。该 BEMF 的极性与通电电压的极性相反。BEMF 主要取决于以下三个电机参数：

- 定子绕组匝数
- 转子角速度
- 转子磁铁产生的磁场

可以采用公式 1 根据电机参数和角速度来计算 BEMF。

公式 1: 反电动势 (BEMF)

$$BEMF = NlrB\omega$$

其中：
 N = 每相绕组匝数
 l = 转子长度
 r = 转子内半径
 B = 转子磁场
 ω = 角速度

如果避免了定子的磁饱和，或者忽略磁场与温度的相关性（即 B 为常数），则唯一变化的项是电机的角速度。因此，BEMF 与转子速度成正比，速度增加则 BEMF 也增大。

扇区的切换频率取决于电机的转速；扇区切换速度越快，可以达到的机械转速越高。BEMF 电压与转子速度成正比。因此，在极低转速下通过在 BEMF 为零时检测位置是不可行的。然而，有许多应用（如风扇和泵）不需要在低速时进行位置控制或闭环操作。对于这些应用，非常适合采用 BEMF 检测方法。

施加到定子上的换相电压对电机的正常工作也有直接的影响。为了进行高效率控制，所施加电压必须至少足以产生 BEMF，另外还要加上电机绕组上用于产生转矩的压降。此压降等于绕组阻抗与电流的乘积。

一般来说，如果换相电压设置为最大值，无论电机转速或产生的转矩如何，电机的驱动效率将很低，能量将转换为电机绕组上的热量耗散掉。为实现所需的正确控制，采用脉宽调制（Pulse-Width Modulation, PWM）来获得正确的电压值。PWM 是高效率的电机驱动方法，但当试图采集控制反馈信号（即 BEMF 电压）时会引入一些噪声问题。

BLDC 电机和无传感器控制的重要关系可概括为：

- BEMF 信号的幅值和转速成正比
- BEMF 信号的频率等于机械转速与极对数的乘积
- 电机转速与电流成正比（假设电机的温度恒定）
- 电机驱动电压等于 BEMF（与转速成正比）加上绕组阻抗压降（与给定转矩对应的电流成正比）

过零检测

按照 BLDC 电机控制理论，为产生最大转矩，定子的磁通应该比转子磁通超前 90 电角度。因此，为获得最大转矩，相电流需要与相 BEMF 电压同相。

对于我们所讨论的三相 BLDC 电机，三相之间的相移为 120°，所以在定子中产生旋转转子磁通的简便方法是我们前面所述的六步换相方案，三相电压每 60 电角度换相一次。在最大转矩和满载情况下，忽略电感电抗，相电流应该与驱动电压具有相同的波形，且两个信号需要同相，通过比较图 2（高电流，带载）和图 3（低电流，空载）可以观察到这一点。图 6 显示了各相的理想 BEMF 波形以及相电流，假定带载情况下进行高效率换相。

BEMF 相电压的中心位于 1/2 驱动电压处。这意味着任何过零事件实际上都指示了 BEMF 波形与 1/2 电源电压 ($V_{BUS}/2$) 点相交。过零点发生在自最后一次换相结束 30 电角度的地方，也是距下一次换相点 30 电角度的地方。从而可以通过两次过零事件之间的间隔时间来计算电机转速。识别到当前过零事件时，就可以实现对将来各步换相的精确调度。

一个电周期由六个相等的 60° 部分组成，每个扇区与其中的一个部分相对应（扇区编号任意）。换相发生在每个扇区的边界。因此，我们需要检测的是扇区的边界。在 BEMF 过零事件与需要换相的位置之间，有一个 30° 的偏移。

AN1160

图 2: 带载情况下的相电压和相电流

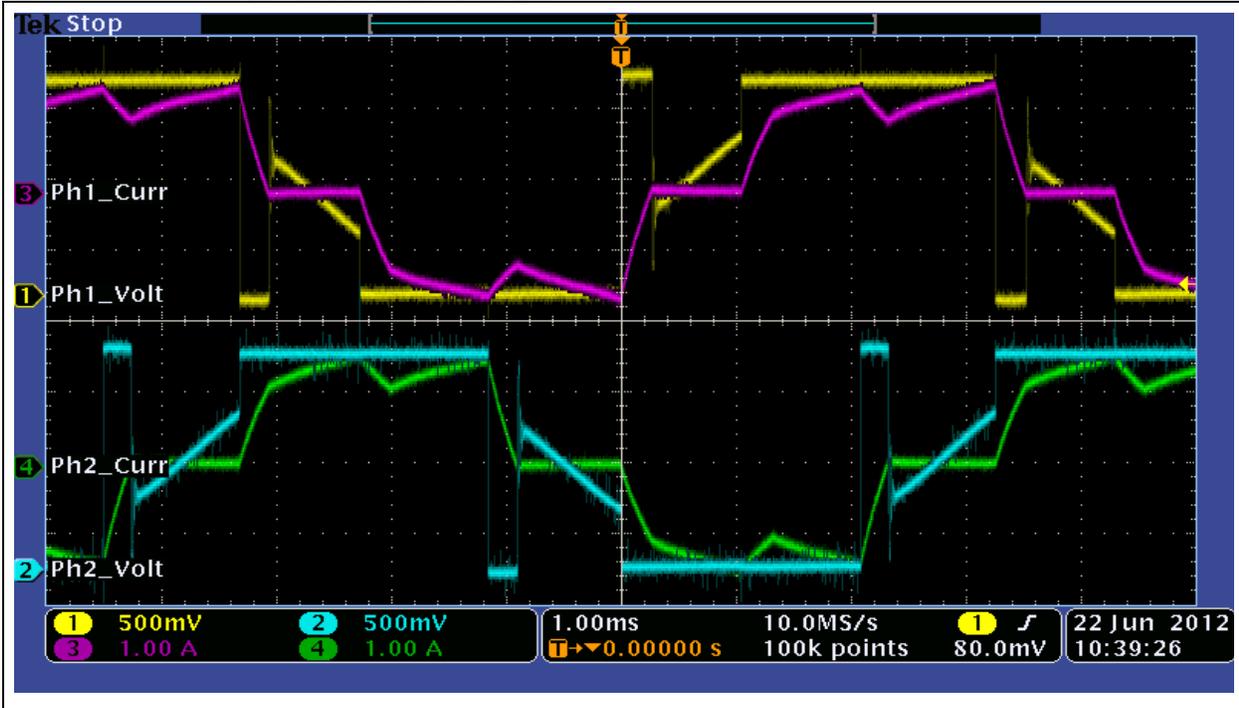
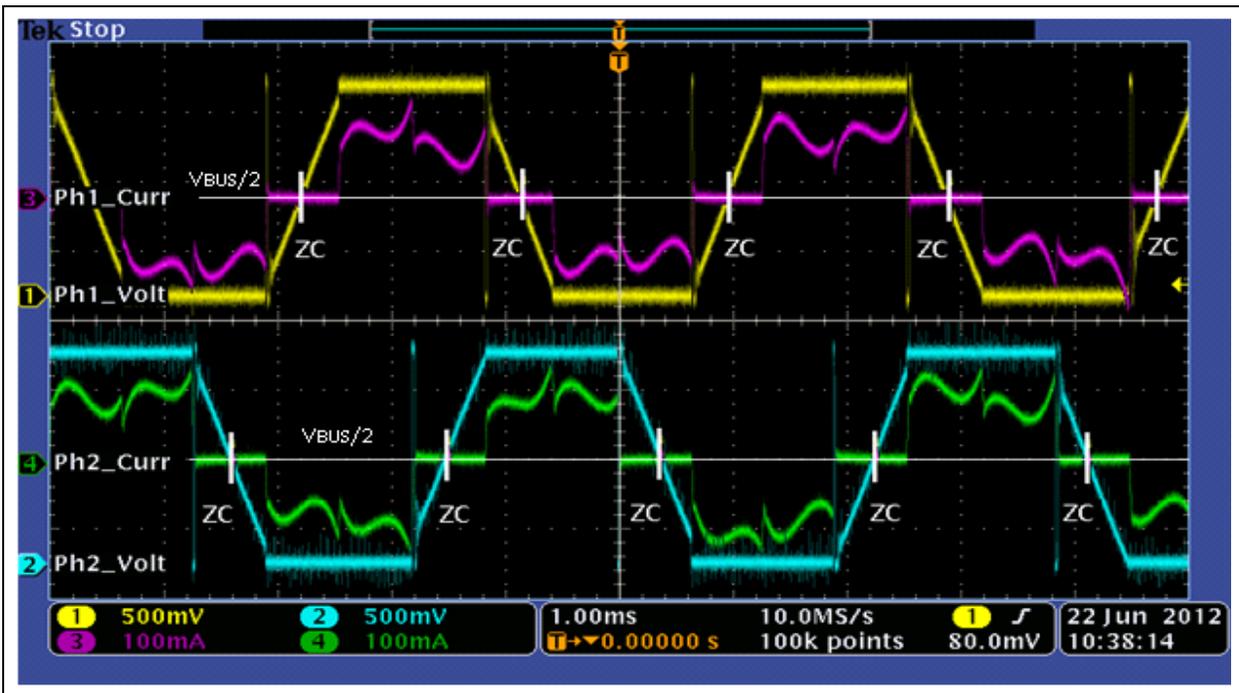


图 3: 过零点发生的确切位置



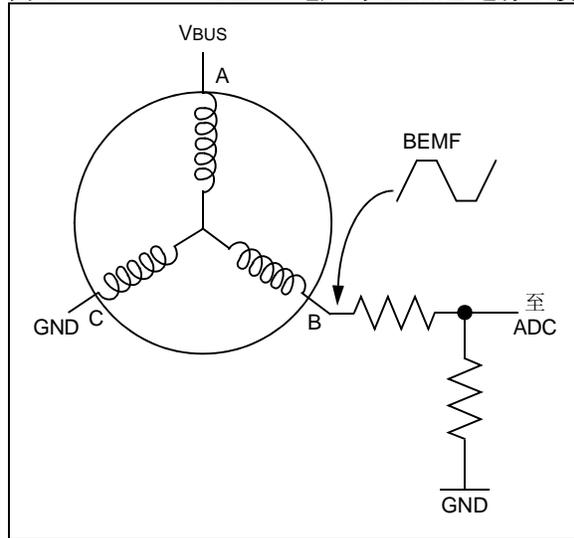
BEMF 过零信号检测

可以使用不同的方法来检测 BEMF 电压过零信号。这一节将介绍其中的两种。所有这些方法都有各自的优缺点，这将在下一节中讲到。所有这些方法都假定电机的中性点没有用导线引出或者电机定子绕组是三角形连接方式。

BEMF 电压与直流母线电压的一半进行比较

该方法是在假定 BEMF 电压等于 $V_{DC}/2$ 时发生过零事件的情况下，利用比较器将 BEMF 电压与直流母线电压的一半 ($V_{BUS}/2$) 进行比较。图 4 显示了实现该方法所用的电路。

图 4: BEMF 电压与 $V_{BUS}/2$ 进行比较



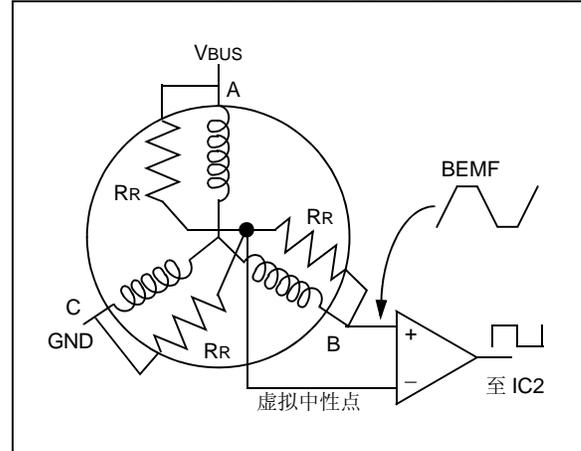
假设电机处于第一个换相步（见图 1），即 A 相通过一个电子开关与 $+V_{BUS}$ 相连，C 相通过一个电子开关与 GND 相连，而 B 相开路。就在第二个换相步将要到来时，从 B 相上观察到的 BEMF 信号的斜率为负，其最小值接近 $+V_{DC}$ 。当第二个换相步发生时，B 相电压达到 GND 值。

此时，B 相通过一个电子开关与 GND 相连，C 相开路，而 A 相仍与 V_{DC} 相连。就在第三个换相步将要到来时，从 C 相上观察到的 BEMF 信号的斜率为正，其最大值接近 V_{DC} 。为了确定过零事件的发生，将 B 相和 C 相上观察到的斜率与 $V_{DC}/2$ 进行比较。这种电路易于实现，将三个运放配置为比较器即可。

BEMF 电压与电机中性点电压比较

前面介绍的过零检测法可以通过使用可变阈值电压点检测过零事件来加以简化。该可变电压就是电机的中性点。大多数 BLDC 电机的中性点不会用导线引出。但可以用电阻网络来构造中性点。将三个电阻 (R_R) 的一端分别与电机的三相绕组并联，另一端连在一起以产生一个虚拟中性点，如图 5 所示。

图 5: BEMF 电压与虚拟中性点电压进行比较



中性点信号也可通过软件重构，其值等于三个同时采样的 ADC 通道的平均值（公式 2）。然后将重构的电机虚拟电压与每个 BEMF 信号比较来确定是否发生过零事件。BEMF 信号与电机中性点电压相等时即发生过零事件。

公式 2: 虚拟中性点电压与 BEMF 信号的关系

$$V_n = \frac{BEMF A + BEMF B + BEMF C}{3}$$

其中：
 V_n 表示电机中性点电压
 $BEMF A$ 表示 A 相 BEMF 电压
 $BEMF B$ 表示 B 相 BEMF 电压
 $BEMF C$ 表示 C 相 BEMF 电压

AN1160

图 6 显示了在所有三相上测量的 BEMF 信号。

图 7 显示了一个完整的 BLDC 控制系统所需的电路。

图 6: 所有三相的 BEMF 信号

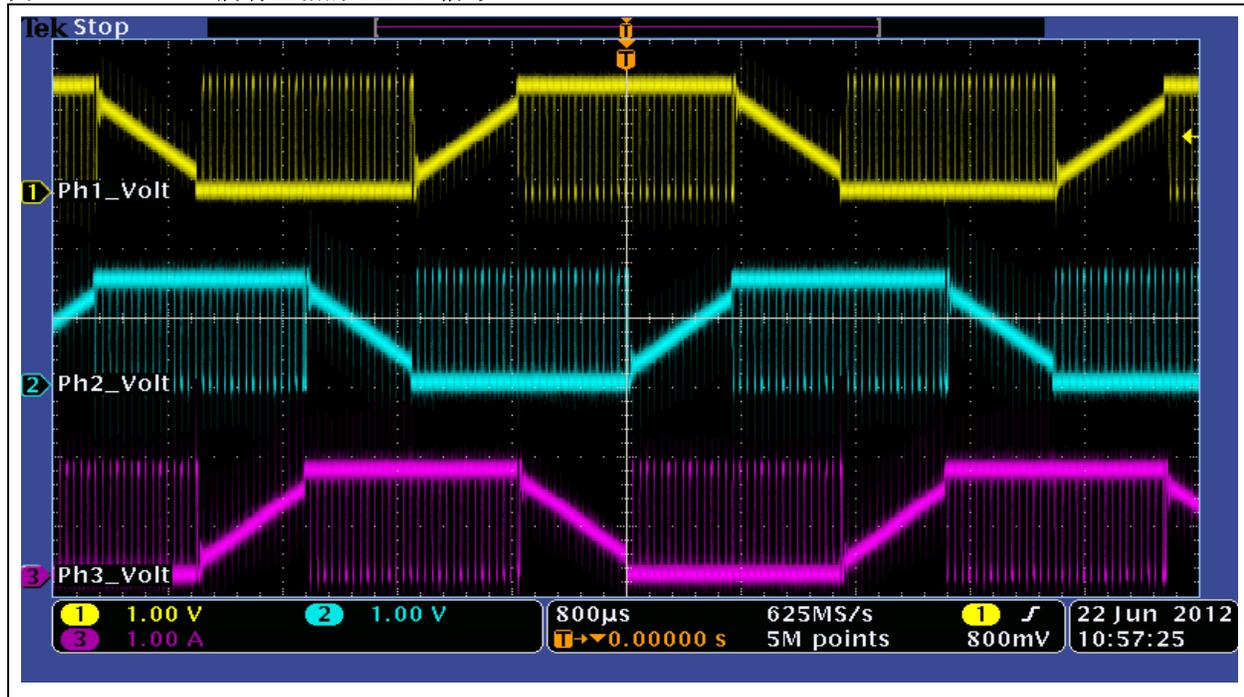


图 7: 利用 dsPIC[®] DSC 的 ADC 来检测 BEMF 电压

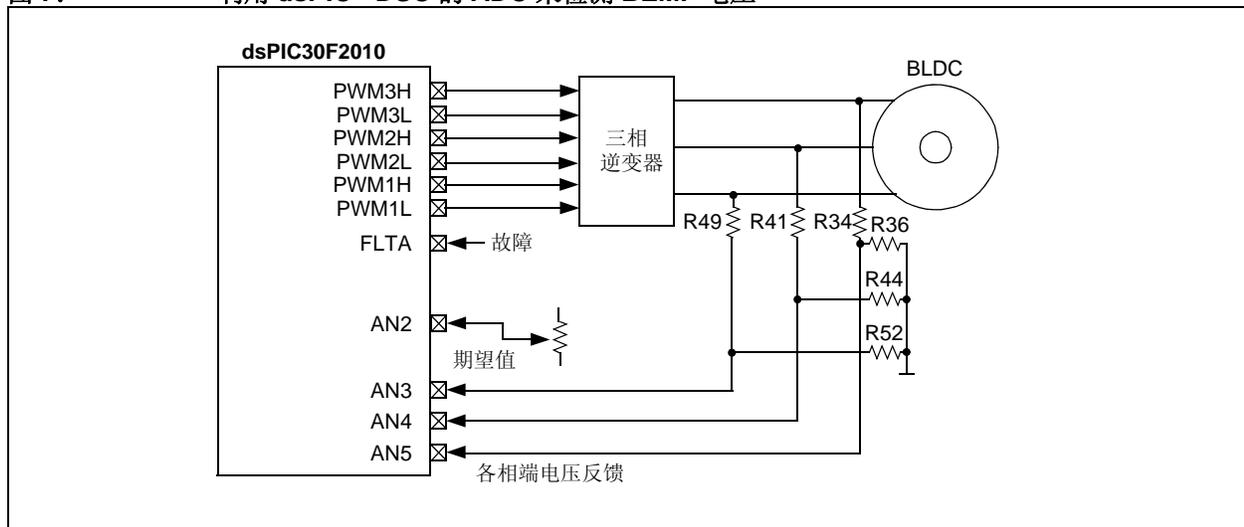


图 8 显示了一个扇区（60°）中的采样过程。下面的窗口提供了发生 ADC 采样时的时序的增强视图。ADC_Read 信号表示 ADC 采样 BEMF 电压信号的时刻。请注意，在所有的 BEMF 衰减斜坡期间，仅采样周期的前半部分。这是因为一旦检测到过零事件，将不再进行采样。这允许上层应用程序有更多的时间执行其他重要任务。

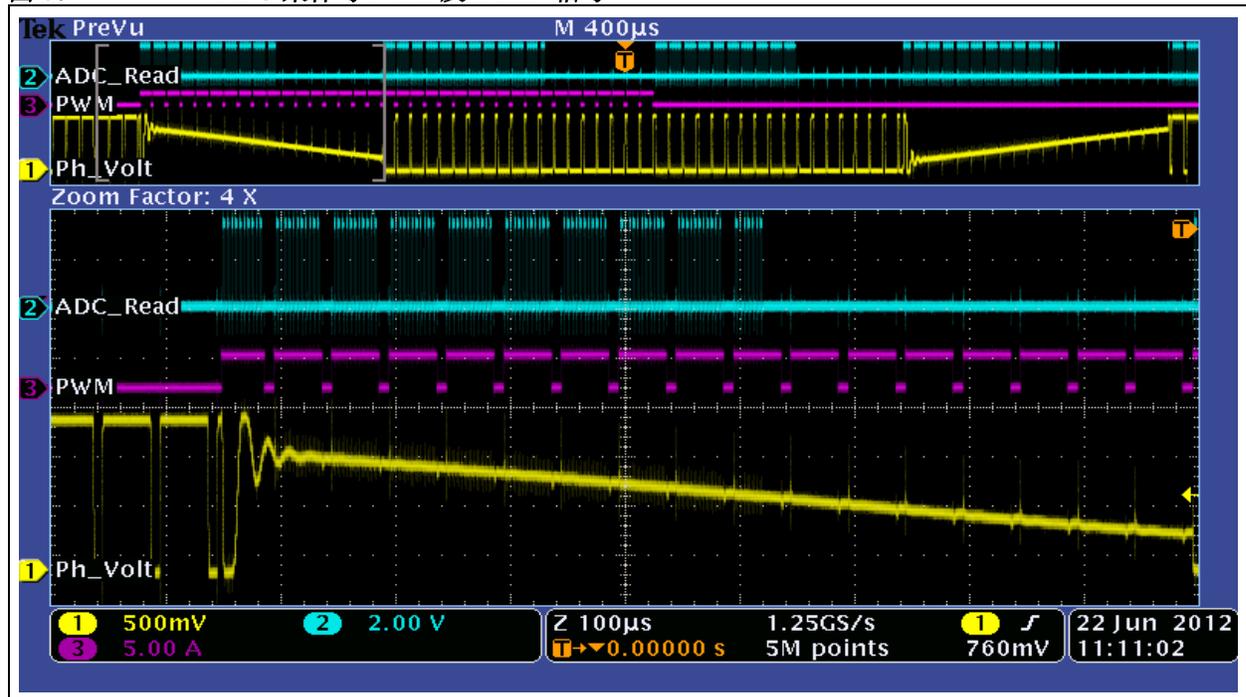
图 9 和图 10 比较了 ADC 采样和 PWM 占空比之间的差别。采样和转换的速度配置为 ADC 和控制器允许的最快速度。同时，仅在 PWM 信号的高电平期间采集 BEMF 电压，因此采样速率和 PWM 频率成正比。如图 9 和图 10 所示，采样的次数取决于占空比。占空比的值（对应于 PWM 高电平导通状态）与电机绕组上施加的电压成

正比；同时高电机转速需要高电压。由于在 PWM 高电平导通状态采样 BEMF 信号，可得知高占空比（高转速）意味着发生更多次 ADC 采样。采样次数更多，则对过零事件的检测更快、更精确，从而扇区切换也更快。

使用 $V_{BUS}/2$ 方法的好处是，仅需要采样一个 ADC 通道，而中性点重构方法需要按顺序采样三个通道。

这种方法的挑战是，需要确定采样 BEMF 信号的正确时间，因为 ADC 采集的采样可能受到 PWM 开关频率产生的谐振跳变电压的影响。ADC 模块配置为在 PWM 导通期间进行采样，以避免由电子开关产生的振铃噪声以及其他噪声（例如，当电机绕组断电时产生的高电压尖峰）。这些噪声可能产生假的过零事件。

图 8: ADC 采样与 PWM 及 BEMF 信号



AN1160

图 9: 一个 PWM 周期中的 BEMF 采样 (低 PWM 占空比)

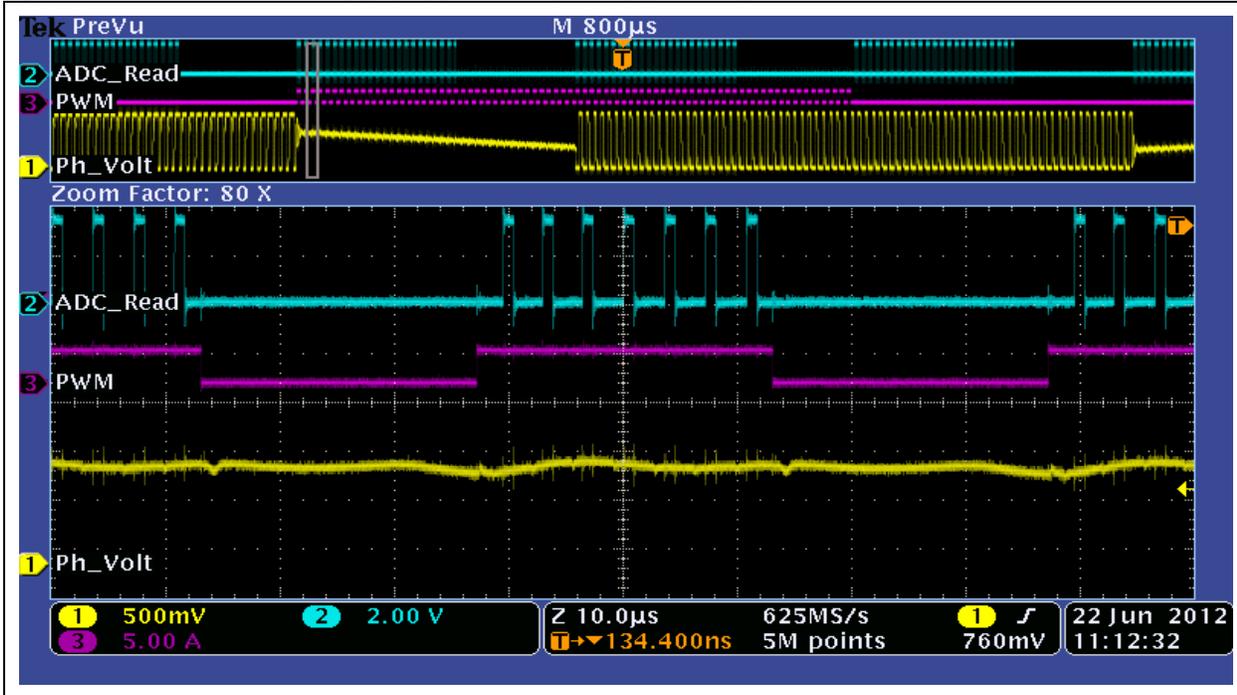
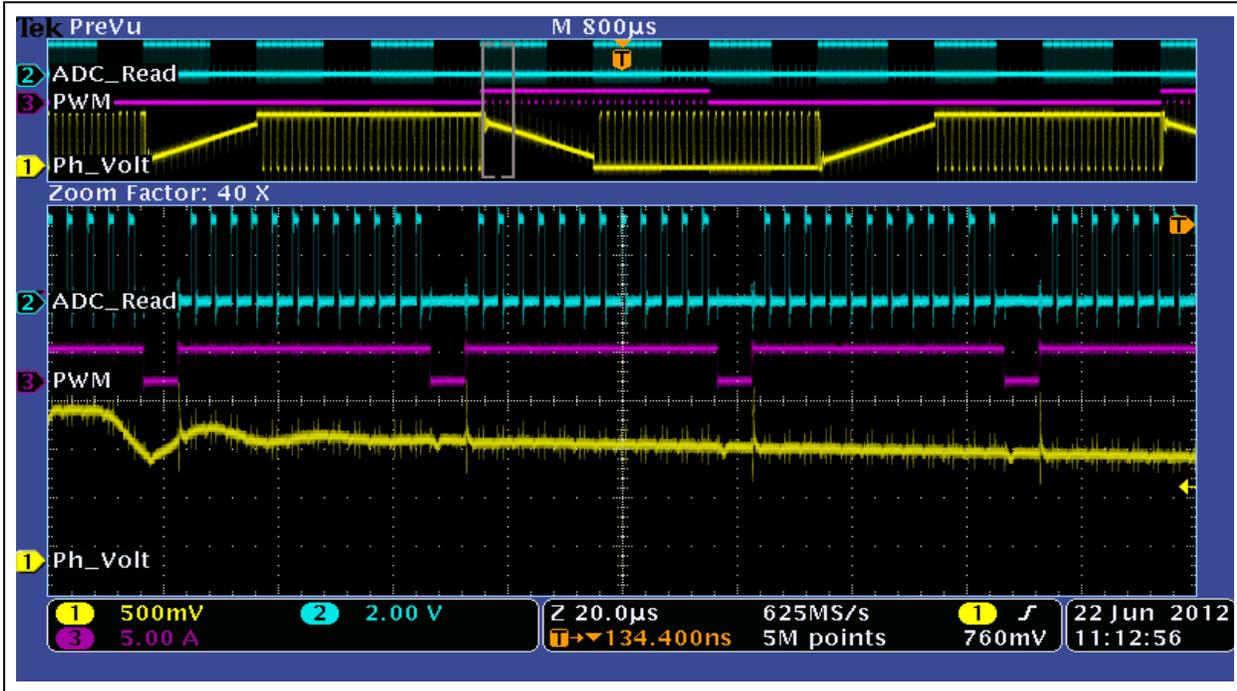


图 10: 一个 PWM 周期中的 BEMF 采样 (高 PWM 占空比)



数字滤波器（择多函数）

如前所述，BEMF 信号可能会受到在其他两个通电绕组中 PWM 换相的不利影响。电机参数之间的耦合，尤其是电感，可能在与 PWM 换相同步的 BEMF 信号中引起纹波。这种影响在具有集中绕组的电机中不是很明显。

产生的纹波可能造成错误换相，因此有必要对 BEMF 信号进行滤波。理论上有两种滤波方法：模拟或数字。模拟滤波的缺点是需要额外增加元件和成本，相位受频率影响以及幅值变化。

BEMF 检测法以名为“择多函数”的非线性数字滤波器为基础。在某些情况下，它也被称为“中值法”。择多函数是一种布尔函数，它取 n 个二进制数作为输入并返回这些数中出现次数最多的那个数。假如有 3 个布尔输入，那么它返回的是那个至少出现了两次的数（真或假）。在这种情况下，这两个相等的值占总数的 66%。择多函数总是返回那个占总数的比例为多数（> 50%）的数。

表 1 给出了一个具有 3 输入的择多函数示例。数值中的多数可以用逻辑运算符“与”（ \wedge ）和“或”（ \vee ）来表示，如公式 3 所示。

表 1: 使用 3 个输入的择多函数示例

A	B	C	大多数
1	1	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
1	0	0	0
0	1	1	1
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0

公式 3: 择多函数的布尔表示法

$$\text{Majority} = (A \wedge B) \vee (A \wedge C) \vee (B \wedge C)$$

用择多函数滤波器对 BEMF 信号进行滤波

这种非线性滤波器的实现是基于一个 6 样本窗口，其中，三个最重要的样本中至少有 51% 应该等于“1”，而剩下三个不重要样本应该等于“0”，以识别已数字化的 BEMF 信号中是否发生过零事件。这一步滤波处理使算法功能变得更加强大。

执行择多函数的第一步是利用两个逻辑操作符，其中，“与”操作符用来检测与当前换相状态相对应的当前 BEMF 信号，“异或”（XOR）操作符用来检测当前 BEMF 信号的下降沿或上升沿。在以下各节中，将该逻辑运算的输出称为“当前屏蔽的 BEMF 信号”。

然后，利用择多检测滤波器来对当前屏蔽的 BEMF 信号进行滤波。该滤波器在实现时，用到了一个由 64 个数值组成的数组以及一个用于修改下一个数组的指针的特殊逻辑测试条件。该逻辑测试条件还能识别当前屏蔽 BEMF 信号的下降沿和上升沿；这两个沿都能表征为逻辑测试条件输出端的“真到假”事件。该条件的输出还能用作择多检测滤波器的一个输入。

这 64 个数值表示 6 样本窗中含有当前屏蔽 BEMF 信号的 2^6 种可能的组合；在查找表中的每个数值都是一个指向随时间变化的下一个信号状态的指针。该滤波器不断地查找逻辑测试条件输出端的“真到假”变化，如果这个“真到假”的条件被检测到，滤波器就会查找三个连续的假状态来验证发生的过零事件。一个逻辑测试输出端的“真到假”条件表示一个过零事件，亦表示电机的一个换相状态，其在一段延时后发生。该延时等于 30 电角度对应的时间减去执行数字滤波所需要的时间。换相之后，就该检测下一个 BEMF 信号了。

64 个数组值在表 2 中列出。这些数组值可按以下方法计算（公式 4）：

- 前 32 个值的计算方法是用数组元素下标乘以 2
- 后 32 个值的计算方法是用数组元素下标减去 32，然后乘以 2

公式 4: 计算数组值

$$\text{前 32 个值} \quad \text{Array Value}[N] = N \cdot 2$$

$$\text{后 32 个值} \quad \text{Array Value}[N] = (N - 32) \cdot 2$$

表 2: 数组值

数组元素下标 [N]	数组值
0	0
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10
6	12
7	14
8	16
9	18
10	20
11	22
12	24
13	26
14	28
15	30
16	32
17	34
18	36
19	38
20	40
21	42
22	44
23	46
24	48
25	50
26	52
27	54
28	56
29	58
30	60
31	62

数组元素下标 [N]	数组值
32	0
33	2
34	4
35	6
36	8
37	10
38	12
39	14
40	16
41	18
42	20
43	22
44	24
45	26
46	28
47	30
48	32
49	34
50	36
51	38
52	40
53	42
54	44
55	46
56	48
57	50
58	52
59	54
60	56
61	58
62	60
63	62

其中，共有 16 个能够表征“真到假”条件的独特数组元素下标编号。这些编号使用如下择多函数准则，根据其 6 位二进制值来选择：

- 三个最高有效位（Most Significant bit, MSb）中包含了大多数“1”（> 50%）
- 三个最低有效位（Least Significant bit, LSb）中包含了大多数“0”（> 50%）

表 3 显示了与这两个条件相匹配的 16 个可能的编号。由这些独特数组元素下标指向的值用“1”来代替，以表示“真到假”条件的发生。

表 3: 能够表征真到假条件的独特编号

编号	6 位二进制表示
24	011000
25	011001
26	011010
28	011100
40	101000
41	101001
42	101010
44	101100
48	110000
49	110001
50	110010
52	110100
56	111000
57	111001
58	111010
60	111100

剩下的 48 个数组编号是指向独特值的指针，以防真到假条件发生。有些数值从不指向任何一个独特值，因为它们不是这 16 个独特编号中任何一个的倍数。表 4 给出了一些符合这种条件的编号。

表 4: 值为独特编号倍数的编号

编号	6 位二进制表示	左移的次数	被指向的独特编号	独特编号的 6 位二进制表示
3	000011	3	24	011000
11	001011	3	24	011000
54	110110	1	44	101100
7	000111	2	28	011100

然后，这些编号（从不指向任一个 16 位独特编号）指向其倍数并以滤波器不断等待一个指向独特值的新值的方式陷入循环。表 5 显示了那些其值不是独特值的倍数的编号。

完整的滤波器系数数组以及具有独特编号指针的初始数组，如表 6 所示。

表 5: 从不指向独特值的编号

编号	6 位二进制	在变为零前指向的编号	右移的次数
1	000001	2, 4, 8, 16, 32	5
9	001001	18, 36, 8, 16, 32	5
36	100100	8, 16, 32	3
17	010001	34, 4, 8, 16, 32	5

表 6: 全部择多滤波器系数

数组元素下标 [N]	数组值	数组（独特编号）	数组元素下标 [N]	数组值	数组（独特编号）
0	0	0	32	0	0
1	2	2	33	2	2
2	4	4	34	4	4
3	6	6	35	6	6
4	8	8	36	8	8
5	10	10	37	10	10
6	12	12	38	12	12
7	14	14	39	14	14
8	16	16	40	16	1
9	18	18	41	18	1
10	20	20	42	20	1
11	22	22	43	22	22
12	24	24	44	24	1
13	26	26	45	26	26
14	28	28	46	28	28
15	30	30	47	30	30
16	32	32	48	32	1
17	34	34	49	34	1
18	36	36	50	36	1
19	38	38	51	38	38
20	40	40	52	40	1
21	42	42	53	42	42
22	44	44	54	44	44
23	46	46	55	46	46
24	48	1	56	48	1
25	50	1	57	50	1
26	52	1	58	52	1
27	54	54	59	54	54
28	56	1	60	56	1
29	58	58	61	58	58
30	60	60	62	60	60
31	62	62	63	62	62

表 7 给出了一个完整的滤波过程示例，其输入是一些用二进制数表示的无噪声的 BEMF 信号。

表 8 也给出了一个完整的滤波过程示例，但其输入是一些用二进制数表示的有噪声的 BEMF 信号。

为保持定子磁场超前于转子磁场，必须在精确的转子位置进行一个扇区到另一个扇区的切换，才能获得最佳转矩。从过零检测时刻开始，该换相延迟时间等于 30 电角度对应的时间减去执行数字滤波过程所需要的时间。为了确定这一换相延迟时间，需使用器件的一个通用定时器来测量两个过零事件之间的时间间隔。

AN1160

表 7: 使用无噪声的 BEMF 信号的数字滤波计算示例

电角度	BEMF 相			“异或”屏蔽相			“与”屏蔽相			逻辑测试	换相步	滤波器输出	过零事件	“与”屏蔽	“异或”屏蔽
	C	B	A	C	B	A	C	B	A						
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	假	000	000
3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	假	010	000
6	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	假	001	111
9	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	6	假	100	000
12	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	14	假	010	111
15	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	30	假	001	000
18	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	100	111
21	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	000	000
24	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
27	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
30	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
33	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
36	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
39	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
42	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
45	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
48	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
51	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
54	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
57	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	62	假	—	—
63	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	60	假	—	—
66	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	假	—	—
69	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	真	—	—
72	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	假	—	—
75	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	假	—	—
78	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	22	假	—	—
81	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	46	假	—	—
84	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	30	假	—	—
87	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
90	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
93	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
96	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
99	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
102	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
105	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
108	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
111	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
114	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
117	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	假	—	—
120	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	62	假	—	—
123	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	60	假	—	—
126	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	假	—	—
129	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	真	—	—
132	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	3	4	假	—	—

表 8: 使用有噪声的 BEMF 信号的数字滤波计算示例

电角度	BEMF 相			“异或”屏蔽相			“与”屏蔽相			逻辑运算	找相步	出靠路步数	零噪声	“与”屏蔽	“异或”屏蔽
	C	B	A	C	B	A	C	B	A						
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	假	000	000
3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	假	010	000
6	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	假	001	111
9	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	4	假	100	000
12	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	10	假	010	111
15	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	22	假	001	000
18	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	46	假	100	111
21	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	假	000	000
24	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	假	—	—
27	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	6	假	—	—
30	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	14	假	—	—
33	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	30	假	—	—
36	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	假	—	—
39	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	假	—	—
42	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	假	—	—
45	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	6	假	—	—
48	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	12	假	—	—
51	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	26	假	—	—
54	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	54	假	—	—
57	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	假	—	—
60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	真	—	—
63	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	假	—	—
66	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	假	—	—
69	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	22	假	—	—
72	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	44	假	—	—
75	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	假	—	—
78	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	假	—	—
81	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	假	—	—
84	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	假	—	—
87	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	22	假	—	—
90	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	44	假	—	—
93	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	假	—	—
96	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	假	—	—
99	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	假	—	—
102	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	假	—	—
105	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	22	假	—	—
108	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	46	假	—	—
111	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	假	—	—
114	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	2	假	—	—
117	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	6	假	—	—
120	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	14	假	—	—
123	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	28	假	—	—
126	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	假	—	—
129	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	真	—	—
132	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	3	4	假	—	—

控制环

该应用软件中有三种控制模式可供电机进行无传感器运行时使用。这三种模式为：

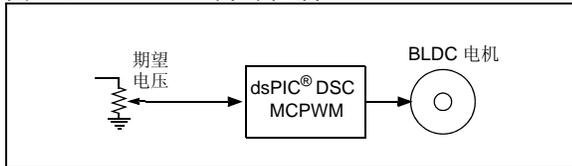
- 开环
- 闭环
- 闭环（PI 控制器）

开环模式

当电机上所带负载在其运行范围内恒定时，电机转速对所施加电压的响应曲线是线性的。如果电源电压非常稳定，且转矩负载恒定，那么电机可在整个速度范围内开环运行。

假定进行脉宽调制时，有效电压与 PWM 占空比线性成比例。那么，将 PWM 占空比与一个 16 位变量对应起来就可以实现开环控制器。该 16 位变量的值可通过一个电位器来产生，由 ADC 对电位器进行采样。该模式的框图如图 11 所示。

图 11: 开环控制



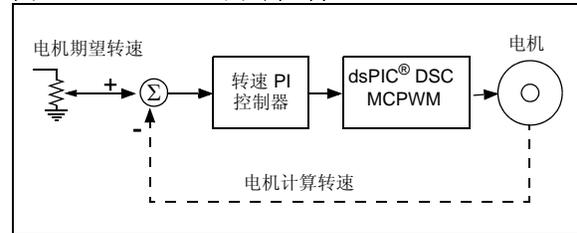
该模数转换值以 10 位无符号整数的形式进行传送；因此，这些转换值的取值范围是 0-1024。为了与 PWM 占空比的范围相匹配，需要对该转换值进行换算。假定 PWM 频率为 20 kHz，则对于运行速度为 40 MIPS 的单片机，PWM 占空比的取值范围是 0 到 2000；对于运行速度为 70 MIPS 的器件（如 Microchip 的 16 位器件），PWM 占空比的取值范围是 0 到 3500。

闭环和比例 - 积分（PI）模式

闭环模式有两种软件实现方式。传统闭环模式通过增大和减小系统每次运行的占空比来维持恒定转速。

比例 - 积分（PI）模式使用 PI 转速控制器来计算电机计算转速和转速期望值之差，然后进行适当的校正。转速期望值通常由电位器的值设置，该值需进行换算以满足所期望的转速范围。图 12 显示了转速闭环模式的框图。

图 12: 闭环控制



如果已知电机的极对数和每秒钟电转速，就可以确定电机的转速。对于一台具有两个极对（4 个极）的电机来说，需要执行两次六步换相周期才能完成一个完整的机械周期。因此，可以通过计算六步换相周期的个数，然后将其与电机的极对数进行比较来计算每秒机械转速。

为测量机械转速（RPM），采用 Timer2 来测量 30 电角度。如果已知 Timer2 的 N 个节拍对应于 30 电角度，则可以使用基本的电机控制公式计算出最终的机械 RPM。

一旦当前转速计算出来，就将其与电位器换算值设定的期望转速进行比较。然后计算期望转速与当前转速之间的比例 - 积分误差，再乘以 PI 常数，如公式 5 所示。之后对 PI 输出进行换算，以匹配 PWM 占空比的范围。

公式 5: PI 控制器计算

$$\begin{aligned} \text{转速误差} &= \text{期望转速} - \text{当前转速} \\ \text{积分误差} &= \text{积分误差} + \text{转速误差} \\ \text{PI 输出} &= (k_p) \cdot (\text{转速误差}) + (K_i) \cdot (\text{积分误差}) \end{aligned}$$

启动序列

电机启动序列分为两个阶段：用户可定义线性启动斜坡和持续时间。该启动序列对于所有控制模式都适用。

在启动斜坡和持续时间期间，电机以强制旋转换相运行。在此期间，不检测 BEMF。对于启动斜坡，可定义的参数如下：

- 斜坡长度（以时间计）：斜坡所用的时间
- 斜坡最终 RPM：斜坡末端的目标电机转速
- 斜坡启动占空比：用来使电机以强制换相方式旋转的 PWM 占空比

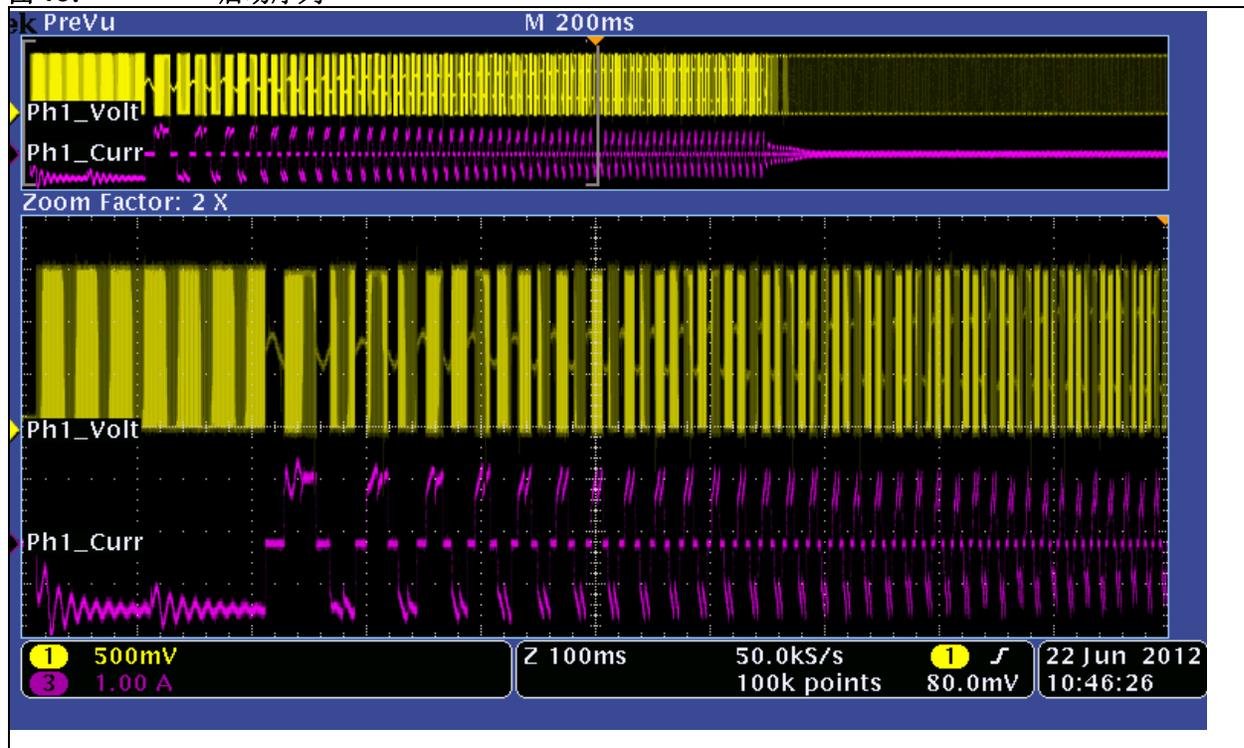
持续时间是紧跟在斜坡结束后用于保持电机以强制换相方式旋转所需的时间。在这段时间内，如果使能了 PI 闭环模式，则要针对所需转速对 PI 控制器进行调节。

对于开环控制，持续时间应该保持非常短，因为这段时间不会有任何影响。另外要注意斜坡的斜率通过所附的 Excel[®] 参数调整文件来计算。

图 13 中的示波器截屏显示了启动序列（从左到右）：

- 转子对齐序列（正好 200 ms）
- 启动斜坡，其中包括用于强制换相的持续时间（长达最上面波形图的 60%）
- 从强制换相切换到闭环（当电流下降到非常低时，所用时间为不改变显示比例的波形图的大约 60%）
- 闭环操作

图 13: 启动序列



软件概述

图 14、图 15 和图 16 概括了 BLDC 控制算法的流程图。

状态机（图 14）确认以下状态：

- **STATE_STARTING**：电机启动时的状态。在此状态中执行启动斜坡。
- **STATE_STARTED**：电机在所选模式（开环或闭环模式）下运行。
- **STATE_STOPPING**：发出命令使电机停止的状态。自动切换到 **STATE_STOPPED**。
- **STATE_STOPPED**：电机停止。
- **STATE_FAULT**：当当前故障或停转发生时的状态。这个状态与 **STATE_STOPPING** 基本相同，但停止是由于故障而不是用户命令。

ADC 中断服务程序（Interrupt Service Routine, ISR）（图 15）设置预换相状态，即检测到过零点之后的状态。预换相状态的持续时间为：30 电角度加上择多滤波器延时，然后减去相位超前角。在预换相状态期间，ADC 不采样任何信号，CPU 几乎空闲（见图 8，当 BEMF 电压到达其 1/2 点时）。

预换相状态清除如图 16 所示。当预换相状态清除时，发生换相，ADC 在消隐计数器到达预设的宏值后重新开始采样，整个过程重新开始。

PI 闭环控制包括新的 PI 调节程序，每当持续时间不为零时调用。该程序包含根据输入的实际测量值和参考计算 PI 控制器的输出；直到持续时间结束才施加输出。该过程确保从强制扇区换相到 PI 闭环操作的平滑切换。

图 14: 应用程序主程序和状态机

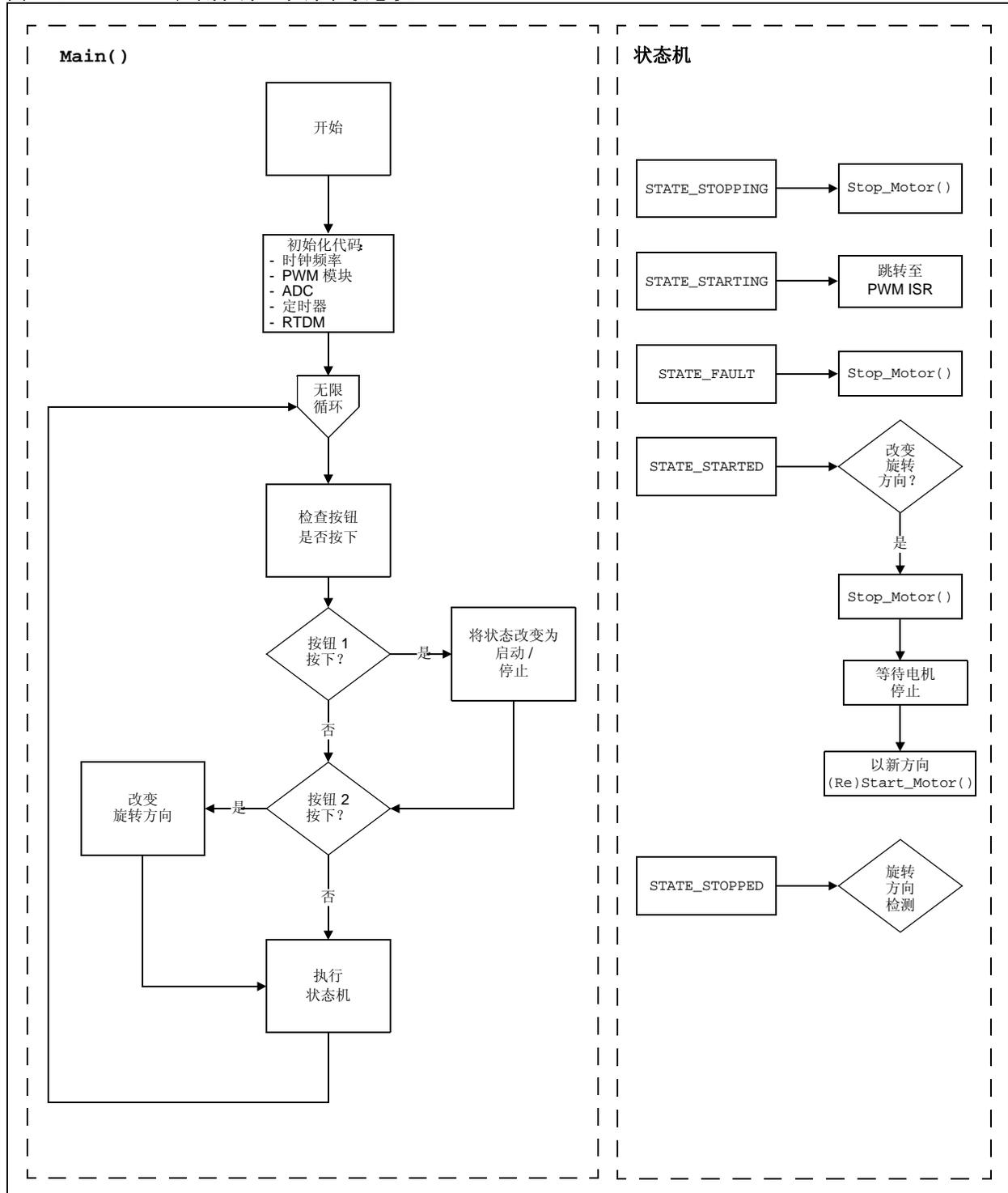


图 15: ADC 中断服务程序 (无传感器换相)

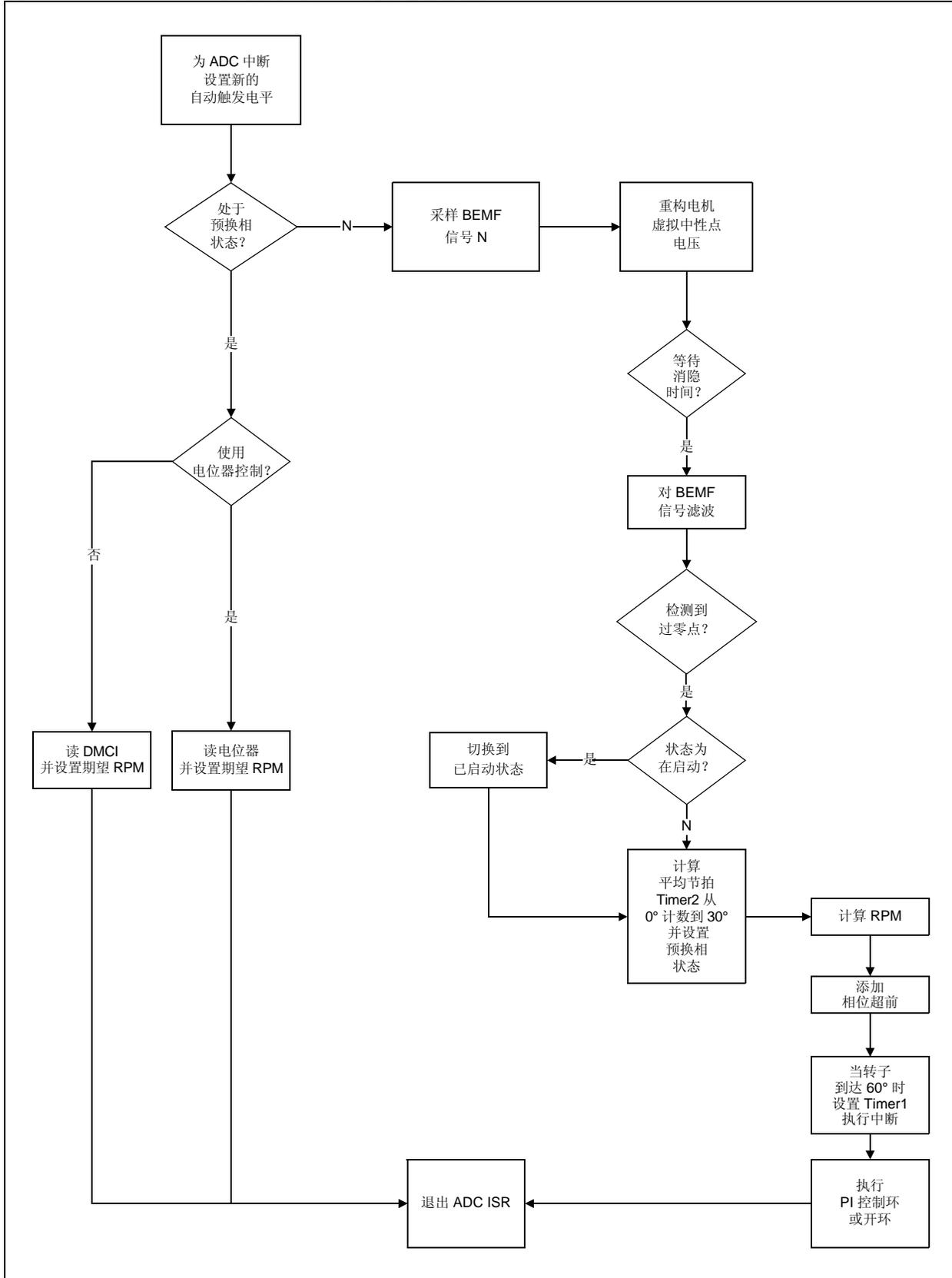
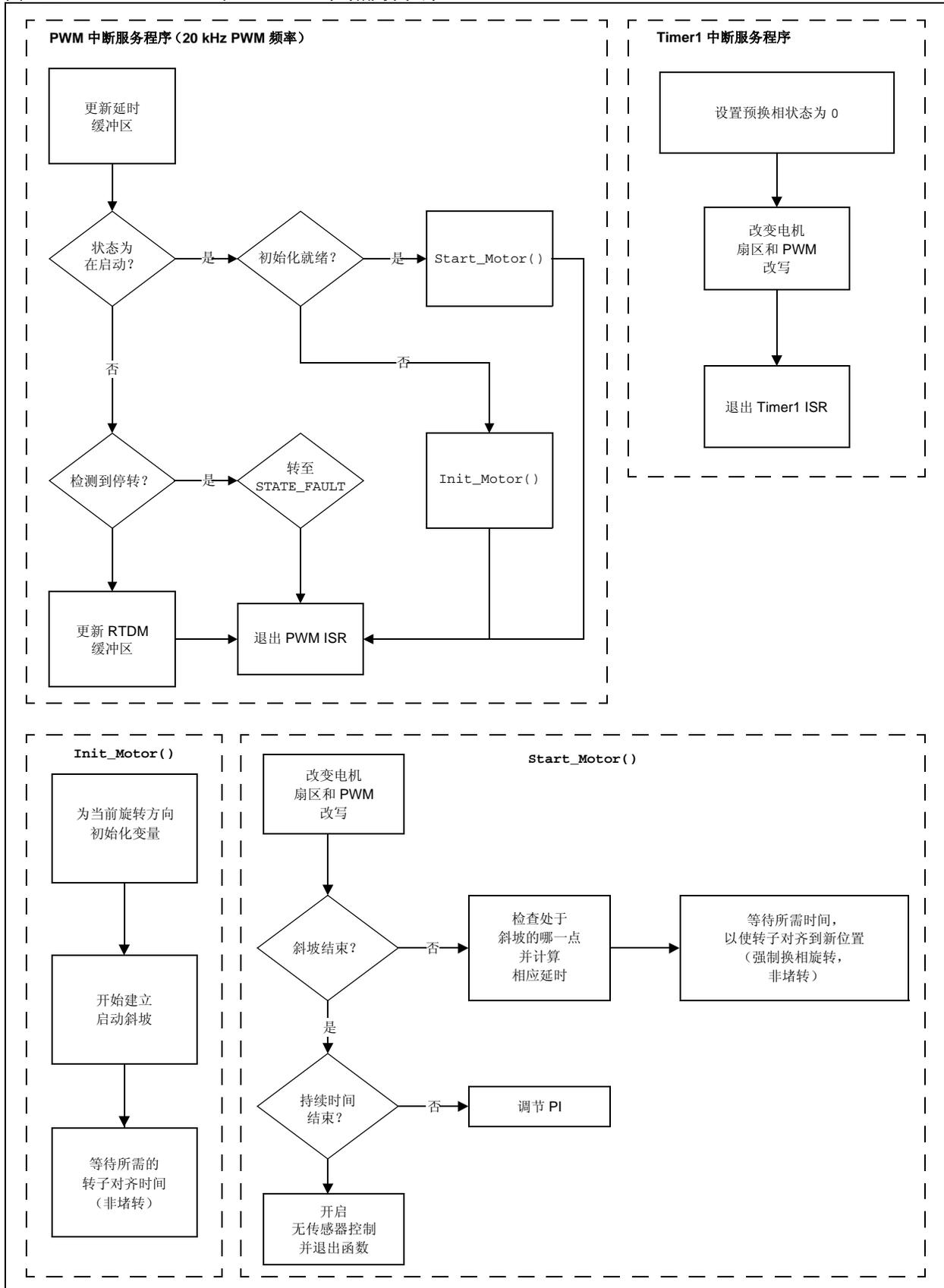


图 16: PWM 和 TIMER1 中断服务程序



结论

该应用笔记的对象是希望利用这种简单实用的新型 BLCD 控制技术来驱动无传感器 BLCD 电机的开发人员，这种方法无需使用分立的低通滤波硬件和片外比较器。

此外，这种新的控制方法是一种基于单片 16 位器件的解决方案，除了需要几个电阻用来将 BEMF 信号限制在 ADC 模块的工作电压范围之内之外，不需要其他外部硬件。该算法使用基于择多检测函数的非线性数字滤波器来检测旋转 BLDC 电机产生的反电动势信号。

数字滤波器的使用使得反电动势信号上过零事件的检测更为精确。当过零事件被 dsPIC DSC 器件检测到时，它就为算法提供了实现电机绕组换相所需要的信息。

精确检测反电动势上的过零事件是实现 BLDC 电机（由六步或梯形换相来驱动）无传感器控制的关键。与使用硬件滤波器或外部比较器的情况相比，使用数字滤波器所需的硬件少，从而节省了成本，减小了 PCB 的体积。

参考文献

- Valiant, L. (1984), "Short Monotone Formulae for the Majority Function", Journal of Algorithms 5:363–366.
- "Modern Power Electronics and AC Drives", B. Bose, Prentice Hall PTR, ISBN 0130167436
- "Electric Motors and Drives", A. Hughes, Heinemann Newnes, ISBN 0750617411
- "Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives", T. Miller, Oxford Clarendon, ISBN 0198593694
- K. Iizuka et. al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 21, No.4 1985, pp 595-601
- AN857, "Brushless DC Motor Control Made Easy", Microchip Technology Inc., 2002
- AN901, 《dsPIC30F 在无传感器 BLDC 控制中的应用》，Microchip Technology Inc., 2007
- AN957, 《使用 dsPIC30F2010 控制带传感器的 BLDC 电机》，Microchip Technology Inc., 2005
- AN970, "Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control", Microchip Technology Inc., 2005
- AN992, 《用 dsPIC30F2010 控制无传感器 BLDC 电机》，Microchip Technology Inc., 2005
- AN1017, 《使用 dsPIC30F DSC 实现 PMSM 电机的正弦驱动》，Microchip Technology Inc., 2005
- AN1078, 《PMSM 的无传感器磁场定向控制》，Microchip Technology Inc., 2007

附录 A: 版本历史

版本 A (2008 年 1 月):

本文档的初始版本, 作者为 D. Torres。

版本 B (2012 年 9 月):

由 A. Lita 和 M. Cheles 修订, 介绍仅采用一个 ADC S/H 电路的解决方案, 扩展了算法与具有电机控制 PWM 外设的所有 16 位器件的兼容性。仍旧采用 BEMF 控制方法和择多检测滤波。

AN1160

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，是您自身应尽的责任。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，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

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

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、dsPIC、FlashFlex、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PIC³² 徽标、rfPIC、SST、SST 徽标、SuperFlash 和 UNI/O 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MTP、SEEVAL 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Silicon Storage Technology 为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、BodyCom、chipKIT、chipKIT 徽标、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、SQI、Serial Quad I/O、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、WiperLock、ZENA 和 Z-Scale 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。

GestIC 和 ULPP 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。

© 2008-2012, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN: 978-1-62076-691-0

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、非易失性存储器和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。

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

亚特兰大 Atlanta

Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

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

克里夫兰 Cleveland

Independence, OH
Tel: 1-216-447-0464
Fax: 1-216-447-0643

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

印第安纳波利斯

Indianapolis
Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453

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: 1-408-961-6444
Fax: 1-408-961-6445

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: 86-10-8569-7000
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都

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

中国 - 重庆

Tel: 86-23-8980-9588
Fax: 86-23-8980-9500

中国 - 杭州

Tel: 86-571-2819-3187
Fax: 86-571-2819-3189

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 - 西安

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

中国 - 厦门

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

中国 - 珠海

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

亚太地区

台湾地区 - 高雄

Tel: 886-7-213-7828
Fax: 886-7-330-9305

台湾地区 - 台北

Tel: 886-2-2508-8600
Fax: 886-2-2508-0102

台湾地区 - 新竹

Tel: 886-3-5778-366
Fax: 886-3-5770-955

澳大利亚 Australia - Sydney

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

印度 India - Bangalore

Tel: 91-80-3090-4444
Fax: 91-80-3090-4123

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 - Osaka

Tel: 81-66-152-7160
Fax: 81-66-152-9310

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