

使用 dsPIC33CK 实现三相 BLDC 电机的有传感器 (基于霍尔效应传感器) 磁场定向控制

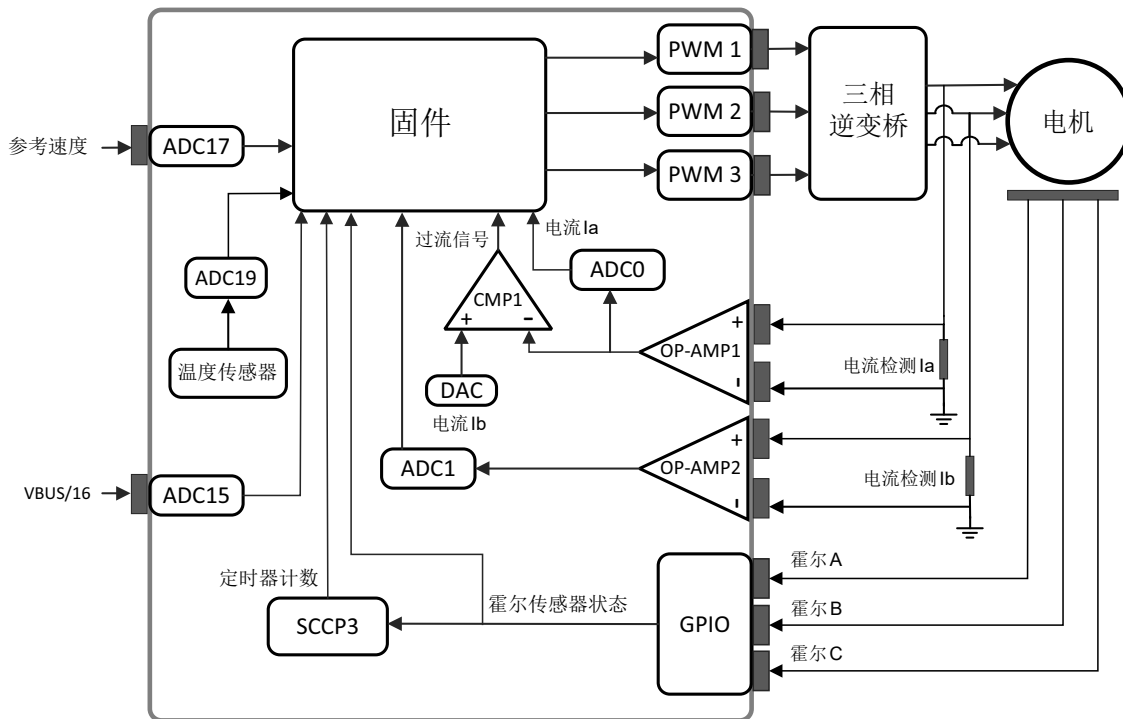
作者: Maria Loida Canada

简介

现代 BLDC 电机的构造与永磁同步电机相似，因此可以采用相同的技术进行控制。这意味着，一种称为磁场定向控制 (Field Oriented Control, FOC) 的复杂技术也适用于 BLDC 电机。FOC 算法适用于需要通过独立控制转矩和磁通来实现快速动态响应的应用。基于传感器的 FOC 有利于提供低速时的转子位置。

本应用笔记介绍了如何使用 Microchip 的 16 位 dsPIC33CK DSC 针对三相 BLDC 电机实现基于霍尔效应传感器的 FOC 算法。DSP 引擎执行数学计算和变换，同时 PWM、SCCP、运放、带 DAC 的比较器等片上外设则用于简化实现并减少总体系统元件数量。下图给出了该解决方案的框图。

图 1: 系统框图

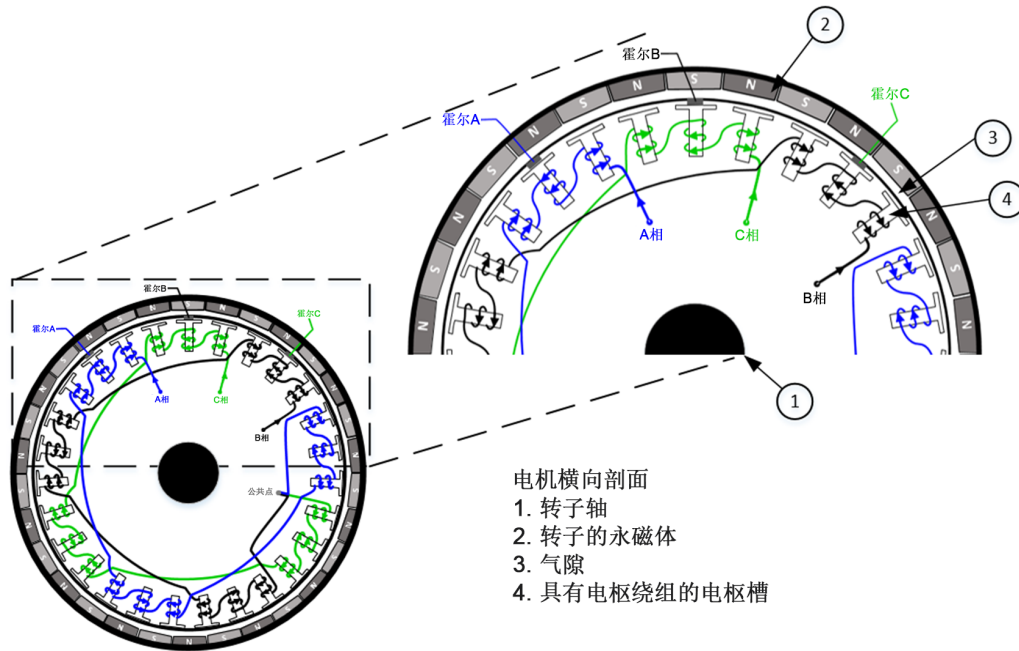


1.0 有传感器BLDC中的磁场定向控制

磁场定向控制是一种使转子和定子磁场在所有条件下呈90度的换相方法，能够让电机产生最大转矩以及在不断变化的负载条件下调节速度/转矩。此方法可以处理定子、转子和气隙的磁通。其中一个磁通用作所有其他量的参考坐标系，其目的是将电流解耦为用于产生转矩的分量和用于产生磁通的分量。这种解耦可确保三相电机采用简单的控制方式，类似于采用单独励磁的直流电机。这意味着电枢电流负责产生转矩，而励磁电流负责产生磁通。在本应用中，转子磁通用作参考坐标系。

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。此电机的气隙磁通是平滑的，因此反电动势（Back Electromotive Force, BEMF）是正弦曲线。该控制方案专为用作电动滑板车中的轮毂电机的有传感器BLDC电机定制。电机的横向剖面图如下图所示。

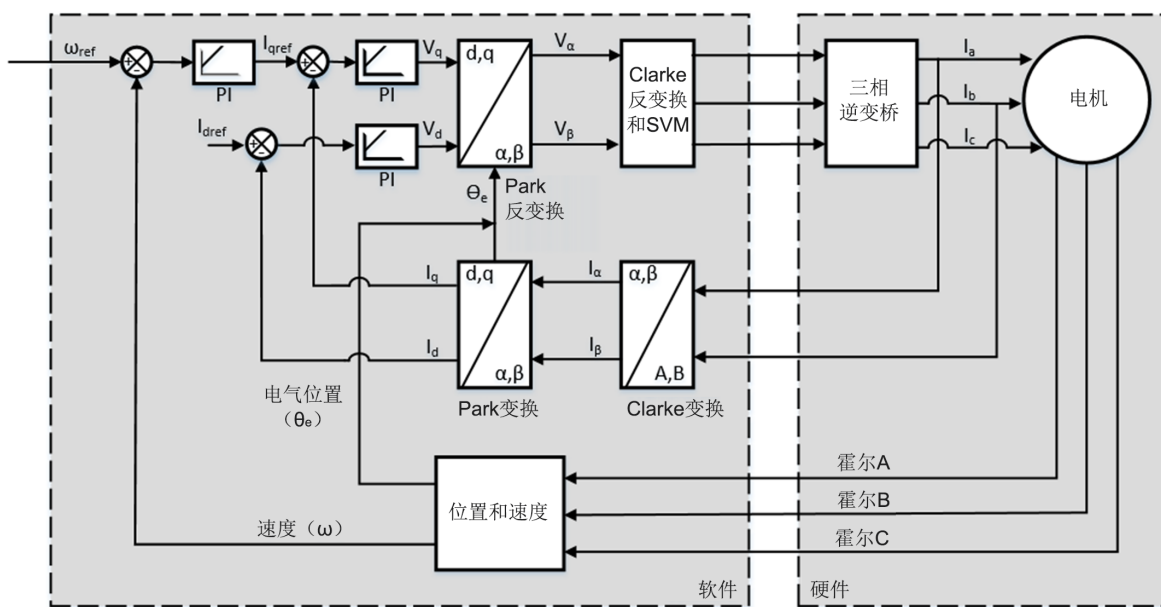
图2： 电机的横向剖面图



对于需要精确控制或以较低电机速度产生高转矩的应用，首选方案是有传感器控制。在有传感器FOC实现中，使用编码器、解析器或霍尔效应传感器确定转子位置和速度。本应用笔记介绍了一种基于霍尔传感器的实现，其目标应用为驱动电动滑板车的轮毂电机。

2.0 有传感器FOC的框图

图3: FOC框图



上图中的控制过程总结如下：

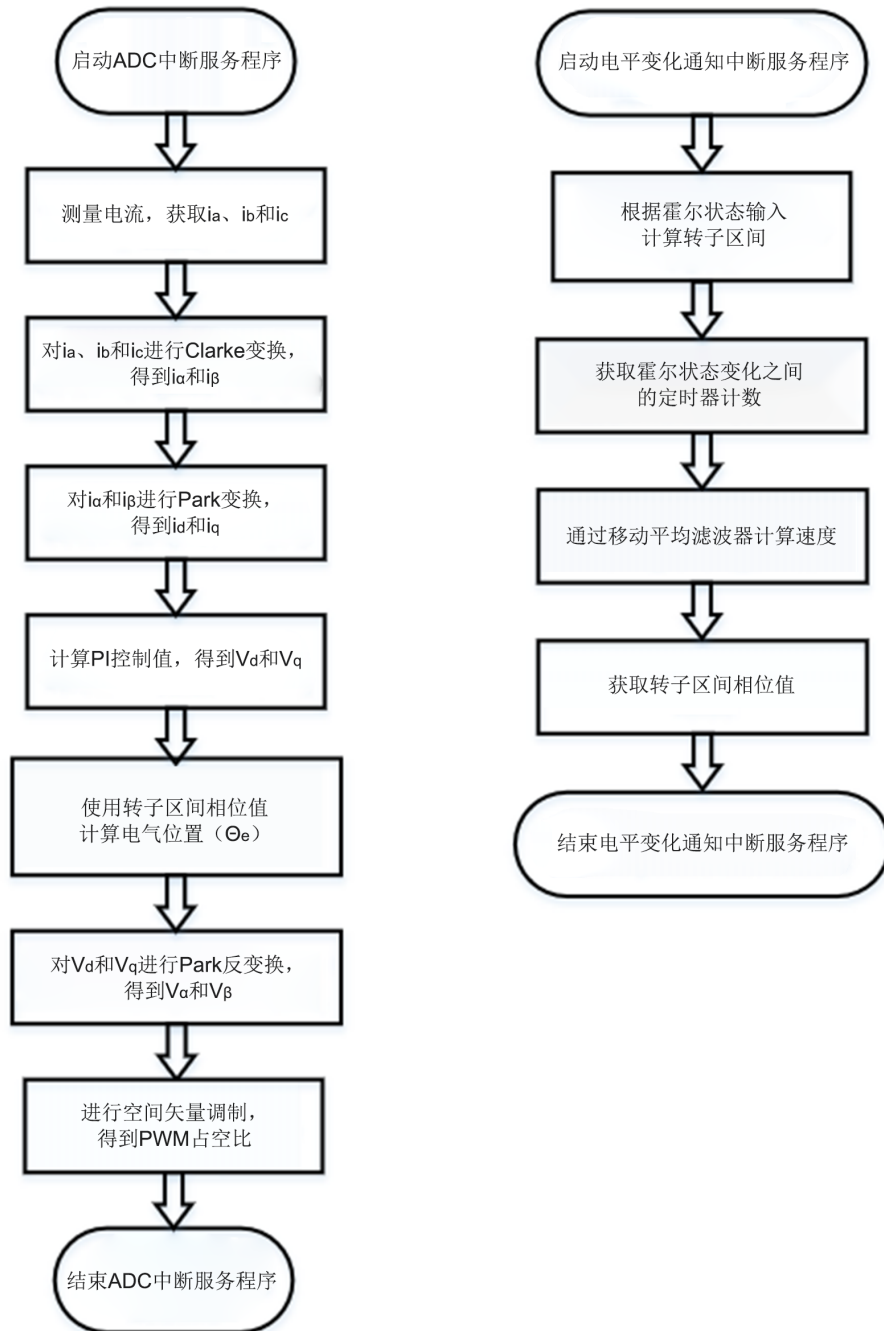
- 测量三相定子电流。对于具有平衡三相绕组的电机，只需测量两相电流。使用以下公式计算第三相电流： $i_a + i_b + i_c = 0$ 。
- **Clarke变换**：将三相电流转换到静止双轴系统。该转换将通过测量的 i_a 和 i_b 值提供 i_d 和 i_{β} 变量。从定子的角度来看，值 i_{α} 和 i_{β} 是随时间变化的正交电流值。
- **Park变换**：使用变换（基于在控制环最后一次迭代时测量的角度）旋转静止双轴坐标系，以与转子磁通对准。该转换通过 i_{α} 和 i_{β} 提供 i_d 和 i_q 变量。变量 i_d 和 i_q 是变换到旋转坐标系的正交电流。对于稳态条件， i_d 和 i_q 恒定。
- 电流的参考值定义如下：
 - i_d 参考：控制转子磁通
 - i_q 参考：控制电机转矩输出
- 将误差信号馈入PI控制器。控制器的输出提供 v_d 和 v_q ，它们是将施加到电机上的电压矢量。
- 基于霍尔传感器的状态测量和计算新的变换角度。新角度将引导FOC算法确定放置下一个电压矢量的位置。
- **Park反变换**：使用新的角度将来自PI控制器的 v_d 和 v_q 输出值旋转回静止参考坐标系。该计算可提供后续的正交电压值 v_{α} 和 v_{β} 。
- **Clarke反变换和SVM**： v_{α} 和 v_{β} 值用于计算将生成所需电压矢量的新PWM占空比值。
- 在每次霍尔状态变化时计算速度（ ω ），此过程在每个离散的PWM周期后发生。

FOC固件在ADC中断服务程序（Interrupt Service Routine, ISR）中实现，运行速度与PWM开关频率相同。

3.0 有传感器FOC的流程图

下图中的流程图给出了软件中FOC的等效顺序程序，以及用于测量速度和转子位置的电平变化通知程序。有关解决方案的完整源代码，请参见附录A：“源代码列表”。

图4：流程图



4.0 PI控制器

4.1 PI控制器背景

有关比例积分（Proportional Integral, PI）控制器的完整讨论超出了本文档的范围。但是，本节会提供PI运算的一些基础知识。

PI控制器响应闭环控制中的误差信号，并尝试对控制量进行调节，以获得期望的系统响应。被控参数可以是任何可测量系统量，例如速度或磁通。PI控制器的优点在于，它可通过改变一个或多个增益值并观察系统响应的变化以试验为根据进行调节。

以周期性采样间隔执行数字PI控制器。假设控制器的执行频率足够高，这样便可正确控制系统。通过将实际测量值减去该参数的期望设置即可获得误差信号。误差的符号表示控制输入所需的变化方向。

控制器的比例（P）项是由误差信号乘以一个“P”增益形成，可使PI控制器产生的控制响应为误差幅值的函数。当误差信号变大时，控制器的“P”项也会变大以提供更大的校正量。

随着时间的流逝，“P”项的作用趋向于减小总误差。但是，P项的作用将随着误差趋近于零而减小。对于比例控制，在大部分系统中，被控参数的误差会非常接近于零，但是并不会收敛。因此始终会存在一个较小的稳态误差。

控制器的积分“I”项用于消除较小的稳态误差。“I”项计算连续运行的总误差信号。因此，较小的稳态误差会随时间累积为一个较大的误差值。该累积误差信号与一个“I”增益因子相乘，即成为PI控制器的“I”输出项。

4.2 调节PI增益

PI控制器的“P”增益设置整个系统的响应。刚开始调节控制器时，需将“I”增益设置为0。随后可增大“P”增益，直到系统能够很好地响应设定点的变化，不存在过大超调或振荡。使用较小的P增益值将缓慢地控制系统，而较大的值则会更快地控制系统。此时，系统将有可能不收敛到设定点。

选择了合适的“P”增益后，可缓慢地增大“I”增益以将系统误差强制变为0。在大多数系统中，只需要较小的“I”增益。如果“I”增益取值过大，则可能抵消“P”项的作用，减缓整个控制系统的响应，并使系统在设定点附近振荡。如果发生振荡，通过减小“I”增益并增大“P”增益通常可解决问题。

本应用中包含限制积分饱和的项，当积分误差使输出参数饱和时，会产生积分饱和。此时，再增加积分误差将不会影响输出。当累积误差减小时，它必须减小（下降）到导致输出饱和的值以下才能对输出产生影响。

本应用中使用三个PI控制环控制三个相互影响的变量。外环控制转子速度；两个内环分别控制转子磁通和电机转矩。

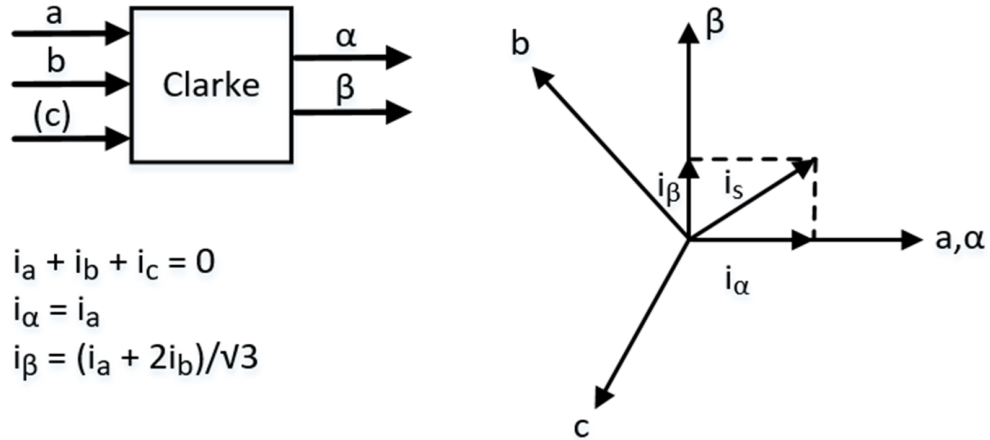
5.0 坐标变换

通过一系列坐标变换，用户可以通过经典的PI控制环间接确定和控制不随时间变化的转矩和磁通值。该过程从测量三相电机电流开始。实际上，由于平衡相绕组的原因，三个电流值的瞬时总和为零。因此，只需测量三相电流中的两相，即可确定第三相电流，这样便无需第三个电流传感器，这有助于降低硬件成本。

5.1 Clarke 变换

Clarke变换将来自以定子为参考的三相二维坐标系的量变换到双轴静止坐标系。

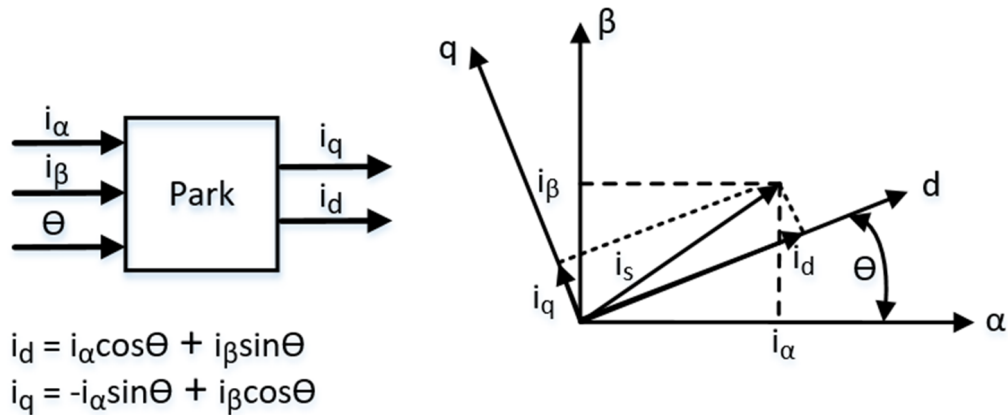
图5: CLARKE变换



5.2 Park 变换

Park变换将来自双轴静止坐标系的量变换到随转子磁通旋转的双轴旋转坐标系。 θ 是转子磁通与静止参考坐标系的夹角。

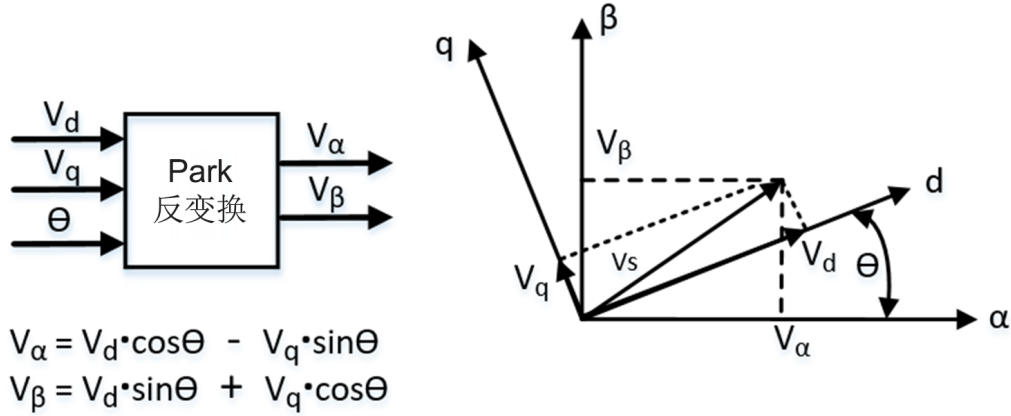
图6: PARK变换



5.3 Park反变换

Park反变换将来自随转子磁通旋转的双轴旋转坐标系的量变换到双轴静止坐标系。

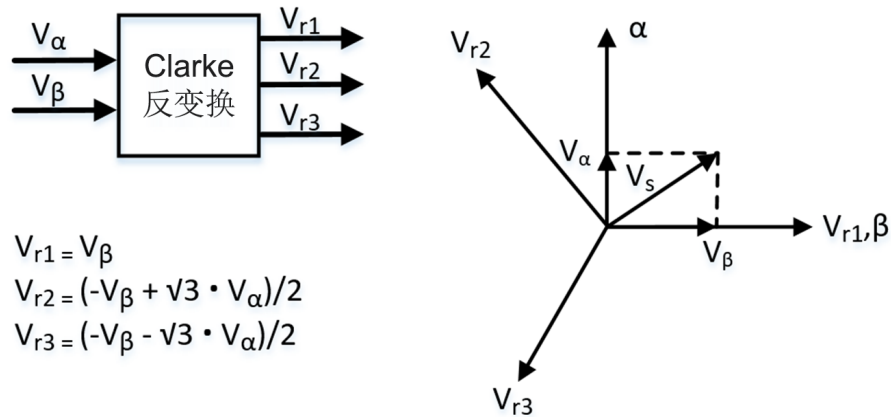
图7: PARK反变换



5.4 Clarke反变换

Clarke反变换将来自双轴静止坐标系的量变换到以定子为参考的三轴二维坐标系。α轴和β轴与传统Clarke反变换的轴互换以简化SVPWM实现，下一章中将对此进行进一步讨论。

图8: CLARKE反变换



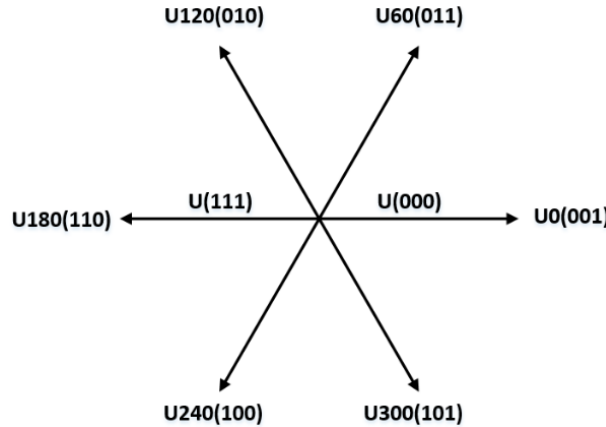
6.0 空间矢量脉宽调制 (SVPWM)

矢量控制过程的最后一步是产生三相电机电压的脉宽调制信号。如果使用空间矢量调制 (Space Vector Modulation, SVM) 技术, 那么三相中的每一相生成脉宽的过程均可简化为几个简单的公式。在本实现中, SVM 程序包含 Clarke 反变换, 可进一步简化计算。

三个逆变器输出中的每个输出都可处于两种状态之一。逆变器输出可连接到正 (+) 母线轨或负 (-) 母线轨, 这样输出便有 $2^3 = 8$ 种可能的状态。

全部三个输出均连接到正 (+) 母线或负 (-) 母线的两种状态视为零状态, 因为此时任意两相之间都不存在线电压。这两种状态在 SVM 星型图中被绘制为原点。其余六种状态表示为每两个相邻状态间相位差为 60 度的矢量。

图 9: 三相逆变器的空间矢量



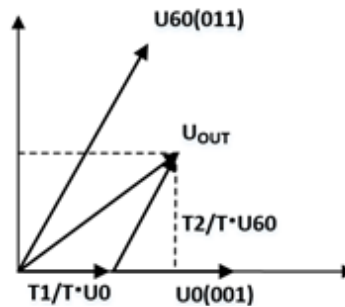
SVM 的过程允许通过两个相邻矢量的各分量之和来表示任何合成矢量。在下图中, U_{OUT} 是期望的合成矢量。它位于 U_{60} 和 U_0 之间的区间内。如果在给定的 PWM 周期 T 内, U_0 的输出时间为 T_1/T , U_{60} 的输出时间为 T_2/T , 则周期 T 内产生的电压为 U_{OUT} 。

图 10: 平均 SVPWM

$$T_0 = \text{零向量}$$

$$T = T_1 + T_2 + T_0 = \text{PWM 周期}$$

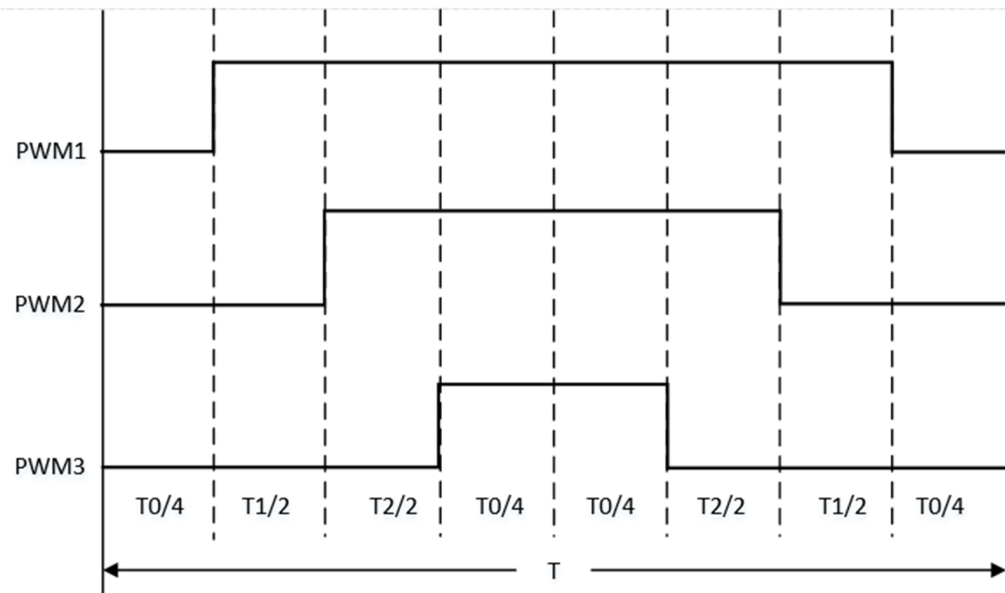
$$U_{OUT} = (T_1/T) \cdot U_0 + (T_2/T) \cdot U_{60}$$



T_0 表示绕组上无有效电压的时间; 即施加了零矢量。通过使用改进后的 Clarke 反变换, 无需多余计算即可得到 T_1 和 T_2 的值。如果将 V_α 和 V_β 颠倒, 则会产生一个相对于 SVM 星型偏移 30 度的参考轴。因此, 在六个区间的每个区间中, 一个轴与该区间正好相反, 而其他两个轴对称形成该区间的边界。沿着这两个边界轴的矢量分量的时间分别为 T_1 和 T_2 。在开关周期 T 的剩余时间 T_0 内施加了零矢量。

dsPIC[®] DSC 器件配置为中心对齐PWM模式，可产生下图所示的对称脉冲模式。这种配置可减少纹波电流，同时最大程度减小功率器件中的开关损耗。

图 11: 周期T内的PWM信号

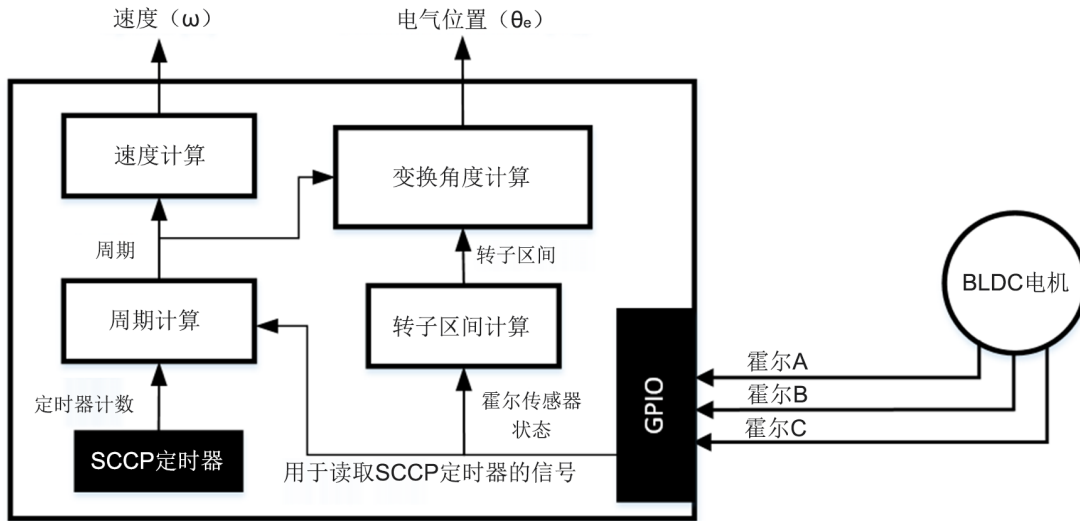


7.0 位置和速度测量的有传感器实现

算法的重要部分是如何计算FOC所需的转子角度。本章介绍了转子角度 (Θ) 和电机速度 (ω) 的估算过程。有传感器控制技术通过从霍尔传感器输入的离散状态获取的信息估算这两个参数。

下图给出了位置和速度测量的框图。有传感器技术使用GPIO和SCCP（捕捉/比较/PWM/定时器）外设。具有电平变化通知功能的GPIO配置为不匹配类型，这意味着它会检测相对于上次端口读操作的变化。SCCP外设配置为定时器模式，使用100 MHz的 F_{CY} 时钟和预分频比64。SCCP定时器周期基于最小电机速度来避免溢出和适应最大周期。

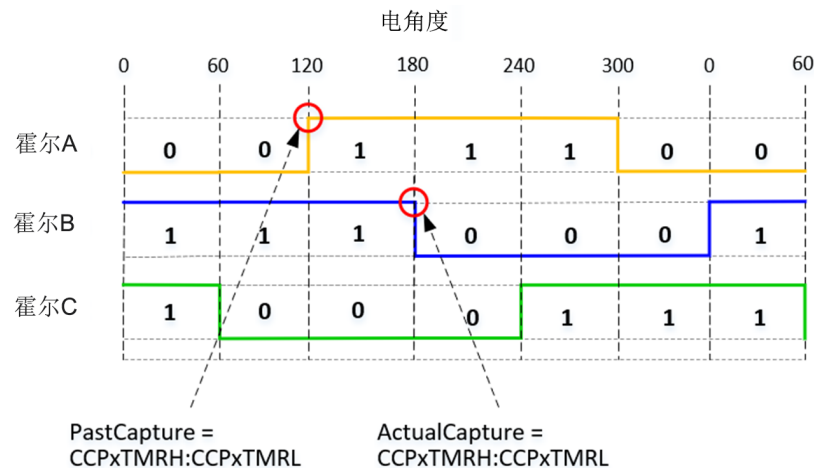
图12: 位置和速度测量图



每当电机旋转时，就会出现霍尔状态变化（每60电角度发生一次），随即执行电平变化通知ISR（CN_ISR()）。在ISR内，将读取霍尔传感器的状态，并计算转子区间。中断事件还会测量后续各中断之间SCCP定时器的定时器计数。

下图给出了霍尔状态及其变化（触发中断事件）。通过测量当前定时器计数（ActualCapture）并从前一次定时器计数（PastCapture）中减去该值来计算周期。使用移动平均滤波方法对计算的周期进行滤波。移动平均滤波方法是减少随机噪声并保持快速响应的最佳方案。其实现方式为一次获取多个周期采样，然后利用这些采样的平均值得到一个输出点。随后，使用平均周期计算转子位置，同时将原始计算周期传送到速度计算程序中。

图 13: 捕捉定时器计数以进行周期计算



7.1 位置测量

必须了解精确的转子位置才能确保FOC正常工作。来自霍尔效应传感器状态的低分辨率离散输入不足以确保FOC正常工作，因为FOC需要更高的角度分辨率才能正确执行控制。

需要利用转子区间来正确获得转子区间相位值。转子区间是转子的绝对位置（以电角度表示，步长为60度）。通过从三个霍尔效应传感器读取数字值来获取该信息。有六个有效区间，均分配有相应的相位值（有符号整数格式）。下表列出了这些相位值以及相应的霍尔状态和区间编号。

表 1: 区间与角度位置的关系

| 霍尔C | 霍尔B | 霍尔A | 区间 | 参考相位值 |
|-----|-----|-----|----|--------|
| 0 | 0 | 0 | 无效 | 无效 |
| 1 | 1 | 0 | 6 | 32767 |
| 0 | 1 | 0 | 2 | -21844 |
| 0 | 1 | 1 | 3 | -10922 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 5 | 10922 |
| 1 | 0 | 0 | 4 | 21844 |
| 1 | 1 | 1 | 无效 | 无效 |

这些相位值用作计算高分辨率变换角度的参考。在每个电平变化通知中断事件中采集基于区间的参考相位值，而变换角度的计算则在ADC_ISR()中完成。参考相位值最初会装入CN_ISR()内的变换角度，计算公式如下：

公式 1: 初始变换角度

$$\theta_{\text{Electrical}} = \text{参考相位值} + _90_Degrees_Phase_Offset$$

$_90_Degrees_Phase_Offset$ 使定子和转子磁通彼此呈90度。它的值等于16384，根据整个电角度旋转（65536）计算得出。

后续各霍尔传感器状态之间测得的时间周期与电机的速度成反比；因此，需要比例常量。PHASE_INC_CALC是一个用于计算相对于平均周期的相位增量的常量。

AN4064

公式2: 相位增量计算

$$PHASE_INC_CALC = \left(\frac{FCY}{\text{预分频比} * PWM_Switching_Frequency} \right) \left(\frac{65536}{6} \right)$$

公式3: 相位增量

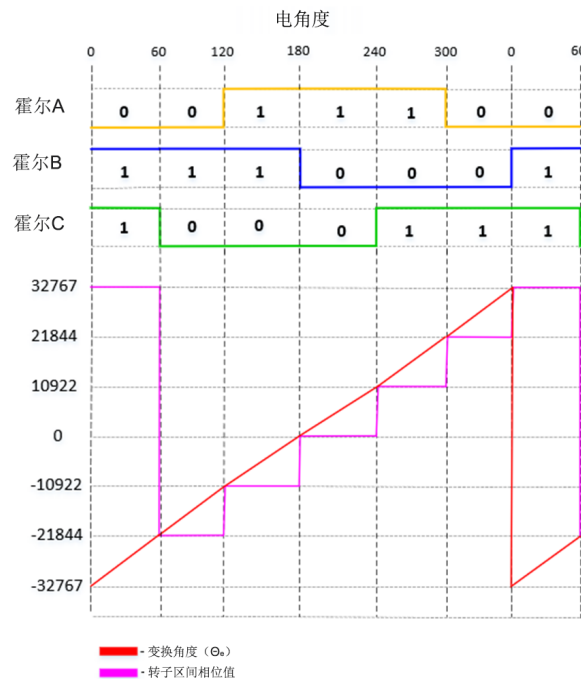
$$phaseInc = \left(\frac{PHASE_INC_CALC}{\text{平均周期}} \right)$$

公式4: 最终变换角度

$$thetaElectrical = thetaelectrical + phaseInc$$

根据以上公式可知，常量PHASE_INC_CALC的计算方法如下：将SCCP定时器时钟除以定时器预分频比和PWM开关频率，然后将得到的商乘以60电角度的等效相位值。*phaseInc*变量通过将PHASE_INC_CALC除以平均周期计算得出。*phaseInc*值用于在每个ADC_ISR()周期递增变换角度。计算的变换角度反映了确切时刻的电角度。该过程将一直持续，直到处理另一个电平变化通知中断事件，随即可获得新的参考值。有关区间编号、转子区间相位值和变换角度的更详细说明，请参见下图。

图14: 转子角位置



7.2 速度测量

由于电机机械构造以及霍尔效应传感器可能并未恰好彼此呈120度，因此霍尔状态变化的间隔时间会略有不同。出于这个原因，单周期捕捉不足以精确计算速度。要完成一次电旋转，需要六个电平变化通知中断。随后会对这些后续中断测量的周期求积分，并使用得到的结果计算速度。以下公式用于计算原始速度。

公式 5: 速度计算

$$\text{calculatedSpeed} = \left(\frac{\text{SPEED MULTI}}{\text{Period_summation}} \right)$$

$$\text{其中: } \text{SPEED MULTI} = \left(\frac{\text{FCY} * 60}{\text{Timer_prescaler}} \right)$$

Period_Summation 是移动平均总和，可确保始终在每六个电平变化通知中断后计算 *calculatedSpeed*。*calculatedSpeed* 使用移动平均滤波器进行滤波，以确保测量速度平滑，不存在随机噪声。

位置和速度模块的最终输出为馈入 PI 控制模块的测量速度和电角度。

8.0 故障检测和保护

应用固件配有针对直通、过流、过热和欠压的故障检测和保护功能。这些意外事件可能损坏电机和电机驱动器，因此建议加以预防。

8.1 直通

当电压源逆变器中的两个互补开关同时导通，从而导致电源短路时，便会发生这种故障事件。

PWM外设具有死区发生器，可在PWM信号的上升沿和下降沿应用死区发生器来防止直通。死区持续1 μs，以确保放电或关断延时不会错误地将互补开关同时导通。

8.2 过流保护

过流描述了一种电流在短时间内迅速升高的情况。它可能由不当换相、过大负载、线对地故障或线间故障引起。在这种情况下，电流值远大于标称线电流，可能导致电路过热。

电流通过电机A相连接的电流检测电路来监视。电阻R_{SHUNT}串联在逆变器的下桥臂。R_{SHUNT}两端的电压反映了流过逆变器的电流。DSC内部运放用于测量和调理电压信号。内部运放的输出馈入带DAC的比较器的同相输入。DAC连接到比较器的反相输入，用于设置参考值。DAC具有12位分辨率，可提供AVDD的5%至95%。测量的电压信号与DAC设置的参考电压持续进行比较。如果电压信号高于DAC设置的电压的时间达到100 μs，将禁止PWM驱动器并停止电机。

8.3 过热保护

dsPIC33CK64MP105的工作环境温度范围为-40°C至+85°C。单片机的过热检测通过dsPIC器件AN19引脚连接的温度传感器完成。温度传感器中的二极管具有负温度系数。ADC用于通过通道AN19来监视管芯温度。温度限制根据正常工作时测量的电压设置，并基于环境温度范围进行调整。25°C时测量的ADC值为240。ADC值的计算公式如下。

公式6: 检测温度的等效数字值

$$ADC \text{ 结果} = \left(\frac{V_{temp}}{V_{DD}} \right) (2^n - 1)$$

重新排列上面的公式可得到以下公式。

公式7: 室温下测量的电压

$$V_{temp} = \frac{ADC \text{ 结果} * V_{DD}}{2^n - 1}$$
$$V_{temp} = \frac{240 * 3.3}{2^{10} - 1} = 0.77419$$

该V_{temp}（25°C时）用作参考电压，根据温度是上升还是下降，会在其中加上或减去温度系数为-1.5 mV/°C的二极管两端的电压变化。新的V_{temp}使用以下公式计算。

公式8: 任意温度下测量的电压

$$V_{temp} = 0.77419 + (Temp_{new} - 25)(-1.5)$$

故障保护设计用于在温度升至57°C（即ADC值225的等效温度）时关闭系统，因为建议电动滑板车电池的工作温度不应超过60°C，即ADC值224的等效温度。

8.4 欠压保护

欠压定义为电压降至额定电压的90%以下持续至少1分钟的情况。

V_{BUS} 的欠压由控制器使用 $V_{BUS}/16$ 信号直接监视，该信号直接连接到dsPIC器件的AN15通道输入。用于监视母线电压的程序位于用于驱动电机的中断服务程序中。每20 μs 检查一次母线电压。为避免错误触发欠压，可使用一个计数器来计数欠压持续的时间。如果计数器计数超过1分钟，将激活欠压故障，进而导致系统被禁止。

建议不要使电池电压降至低于70%，因此控制器的欠压保护阈值为 $0.7V_{BAT}$ 。使用以下公式计算电压限值。

公式9: 电压限值

$$\text{电压限值} = \frac{V_{BUS}(2^n - 1)}{16V_{DD}}$$

其中: $V_{BUS} = 0.7V_{BAT}$

9.0 有传感器FOC在电动滑板车中的应用

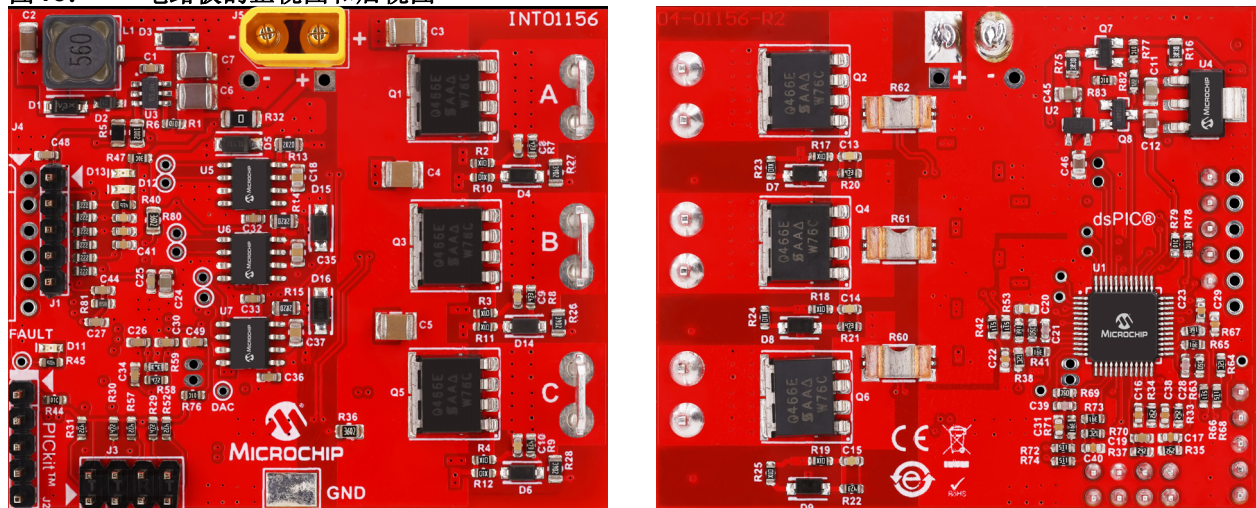
近年来，越来越多的人将电动滑板车等电动两轮车作为个人交通工具。电动滑板车由电池、电池充电器、电机、电机驱动器、直流/直流转换器、智能控制器和其他配件组成。

电机固定在车轮的轮毂中。有传感器BLDC电机的构造与用作轮毂电机的永磁同步电机的构造十分相似。选择BLDC的原因在于其外形小巧、维护成本低且运行时无噪声。电机的构造中已包含霍尔效应传感器。轮毂电机的典型电压为36V-42V，速度范围为150 RPM至650 RPM或5 kph至25 kph。

有传感器FOC技术非常适合驱动电动滑板车，因为它提供了一种高效的方式来控制可调速度驱动应用中的BLDC电机。FOC技术可改善转矩响应和动态速度精度。由于解决方案中采用了传感器，因此非常适合电动滑板车轮毂电机的高精度驱动需求。

随着对电动滑板车的需求不断增加，我们开发了一款电路板来满足电动滑板车的智能控制需求。电动滑板车电路板配有直流/直流转换器、智能控制器和带全面保护功率级的电机驱动器，只需要油门信号、电池和电池充电器即可完全控制电动滑板车。已使用这款电路板测试本应用笔记中介绍的解决方案，其参考设计已在单独的文档中发布。下图给出了电动滑板车电路板的正视图和后视图。

图 15: 电路板的正视图和后视图



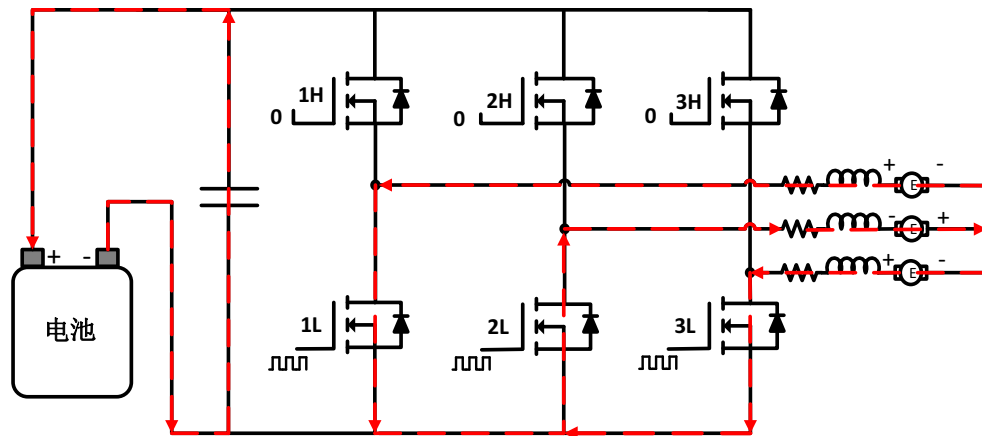
电机的停止是控制电动滑板车的一个重要考量因素。再生制动是一种附加功能，主要用于加快减速以及延长电池寿命。

9.1 再生制动

再生制动是将运动中的电机用作发电机，最终使电机速度减慢的过程。在此过程中，回收的电能将储存回电池中。只有在BLDC电机产生的反电动势大于电池电压时，才能储存电能。在实际应用中，再生制动首选在电机高速运行时进行。

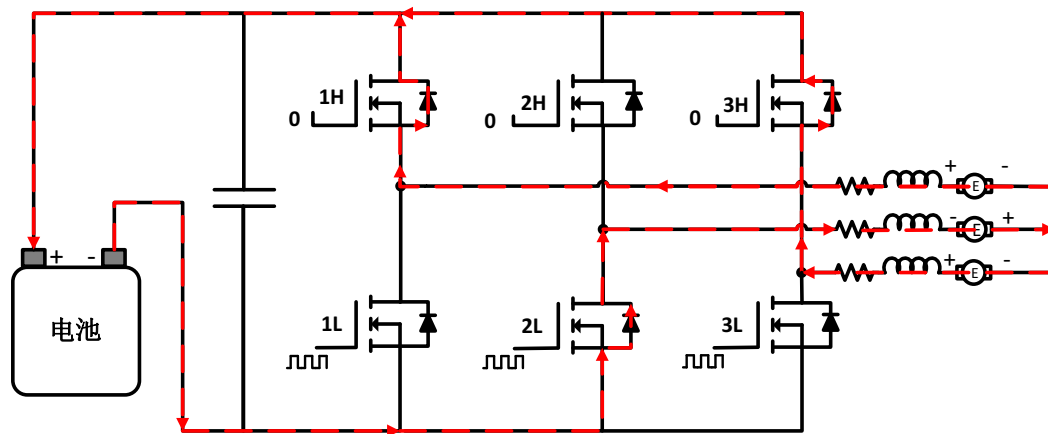
本应用中使用了三开关再生制动方法。这种方法使用一个额外的引脚作为输入来处理制动杆发出的信号。制动程序包含在用于驱动电机的中断服务程序中。检测到制动信号时，将PWM信号施加到逆变器的下桥臂开关，同时上桥臂开关关断，如下图所示。

图 16: 对下桥臂开关进行调制



这种开关配置可将由旋转电机转化的电能的电压提升到高于直流母线电压。此过程的第二步是关断下桥臂开关，以便使电流通过MOSFET内部二极管流回电源，如下图所示。升压电压随后储存回电池。

图 17: 下桥臂开关关断



10.0 在电动滑板车电路板上测试

本章将介绍空载条件下在电动滑板车上测试有传感器FOC驱动的结果。具体说明了转子角位置、SVM线对地电压和SVM线间电压。下面各图使用X2CScope捕捉，X2CScope是一款支持运行时调试和数据可视化的虚拟示波器工具。

图 18: 转子角位置和区间相位值

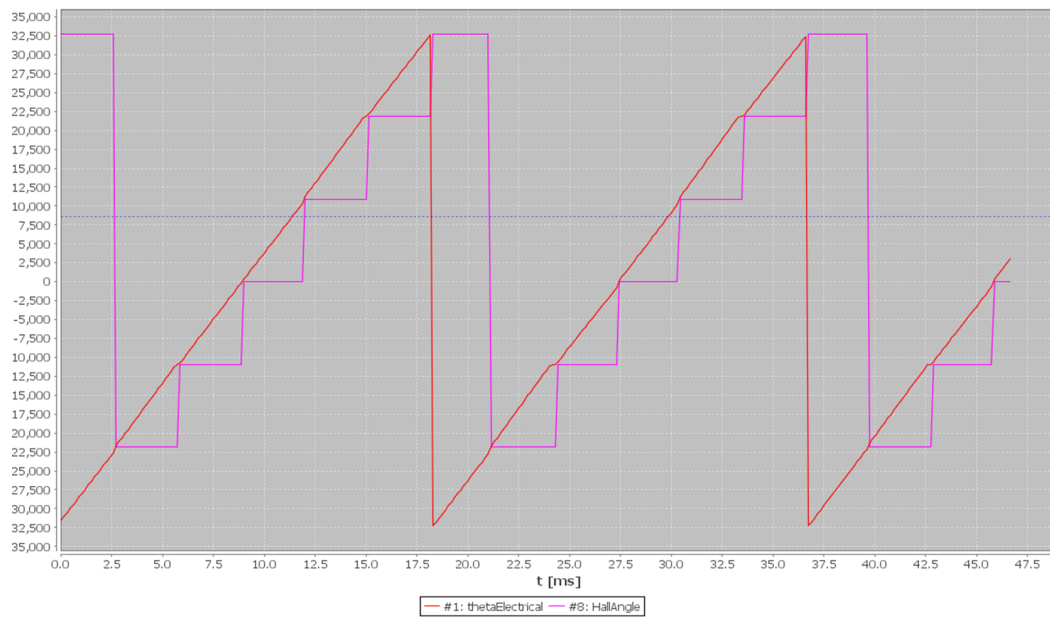


图 19: SVM线对地电压

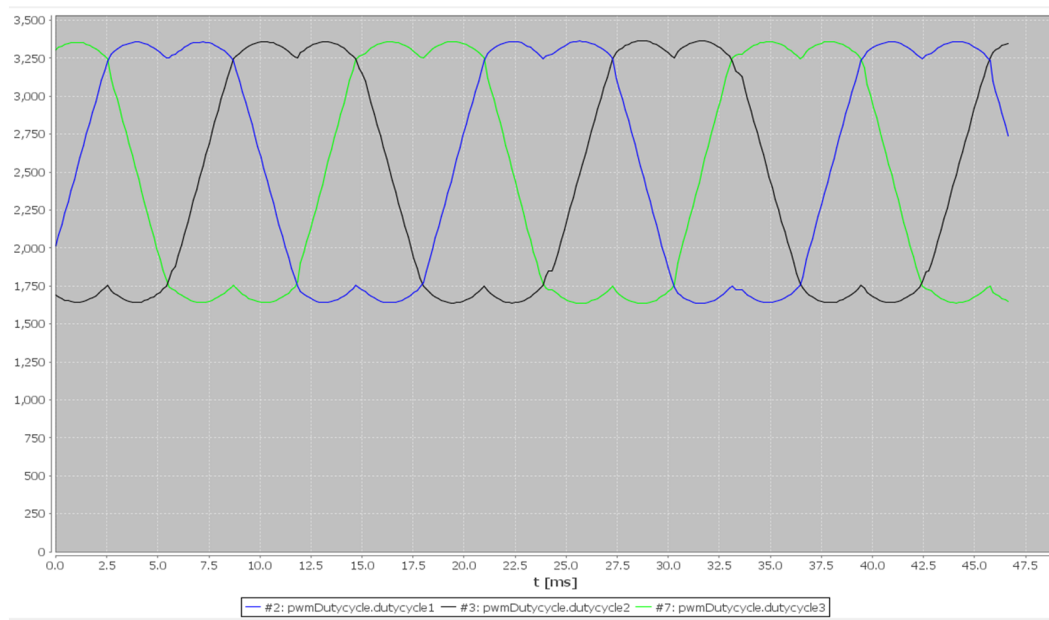
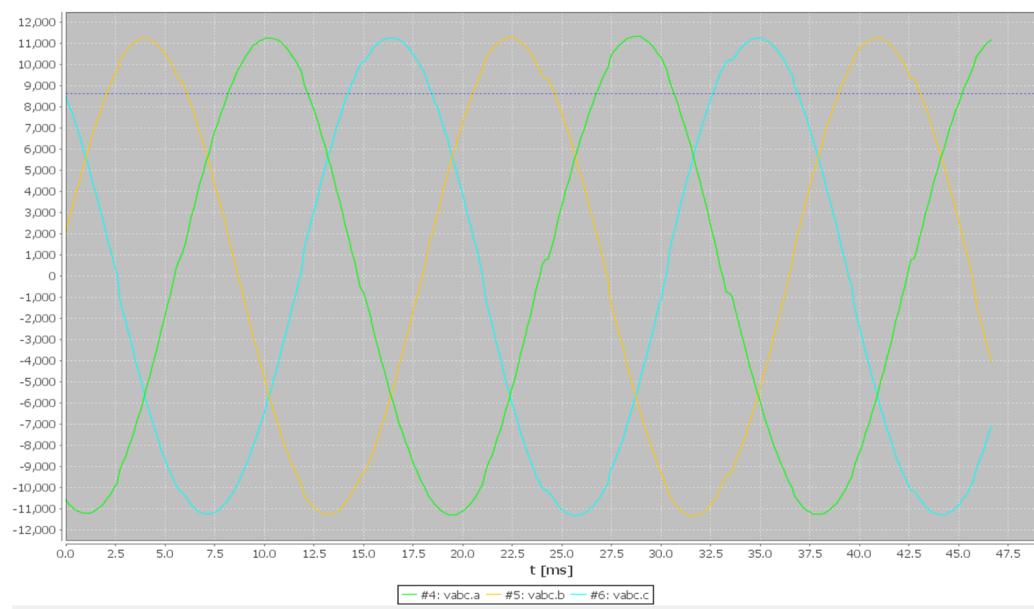


图 20: SVM 线间电压



11.0 结论

通过根据霍尔效应传感器状态开发高分辨率算法，基于霍尔效应传感器的有传感器FOC可实现三相BLDC电机的高精度速度和位置控制。Microchip的16位器件dsPIC33CK DSC高效利用其DSP执行FOC算法并使用其片上外设实现了经济高效的解决方案。本应用笔记中介绍的解决方案可高效驱动电动滑板车的三相BLDC轮毂电机。此外，系统中还增加了故障保护功能来确保轻松检测到可能导致系统故障的意外事件并在发生此类意外事件时停止系统运行。

附录 A: 源代码列表

最新软件版本可从 Microchip 网站 (www.microchip.com) 下载, 其中包含本应用笔记电子版随附的源代码。

AN4064

附录 B: 版本历史

| 版本 | 日期 | 章节 | 说明 |
|----|---------|----|------|
| A | 2021年7月 | 文档 | 初始版本 |

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

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

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

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 <https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservices>。

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

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

有关 Microchip 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。

商标

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

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

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

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

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

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

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2022, Microchip Technology Incorporated 及其子公司版权所有。
ISBN: 978-1-5224-9571-0

全球销售及及服务网点

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://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

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: 45-4485-5910
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: 49-7131-72400

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: 47-7288-4388

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 - Gothenberg
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