
使用 8 位 PIC®单片机控制三轴步进电机

简介

作者：Maria Loida Canada, Microchip Technology Inc.

三轴控制应用（例如数控机床、机器人和点胶机）在工业中广泛使用。通常而言，每台电机都有专用的控制器，可帮助控制电机速度并设置电机运动限制。在控制系统开发过程中，使用多个控制器意味着需要更高的成本。

此项目设立的目的是开发一种可同时控制最多三台电机的解决方案。利用具有独立于内核的外设（Core Independent Peripheral, CIP）的 PIC® MCU，可以在不增加内核负载的情况下驱动电机。开发出的这项解决方案不仅经济高效，还能实现精确的线性电机运动。PIC 器件既可以单独使用（将位置数据嵌入到固件中），也可以作为从器件用于需要更精密控制的应用。

目录

简介.....	1
1. 概述.....	3
2. 步进电机控制.....	4
2.1. 控制概述.....	4
2.2. 驱动电路与控制过程.....	5
2.3. 用于控制信号的 16 位高分辨率 PWM.....	6
2.4. 数据传输.....	6
3. 步进电机控制特性.....	7
3.1. 转矩注意事项.....	7
3.2. 步进速率.....	7
4. 步进模式实现.....	8
4.1. 全步驱动.....	8
4.2. 半步驱动.....	11
4.3. 微步.....	14
5. 固件流程图.....	16
6. 三轴控制性能.....	18
7. 结论.....	20
8. 附录 A: 原理图.....	21
9. 附录 B: MPLAB [®] 代码配置器 (MCC) 外设初始化.....	23
10. 附录 C: 源代码列表.....	25
Microchip 网站.....	26
产品变更通知服务.....	26
客户支持.....	26
Microchip 器件代码保护功能.....	26
法律声明.....	26
商标.....	27
质量管理体系.....	27
全球销售及服务网点.....	28

1. 概述

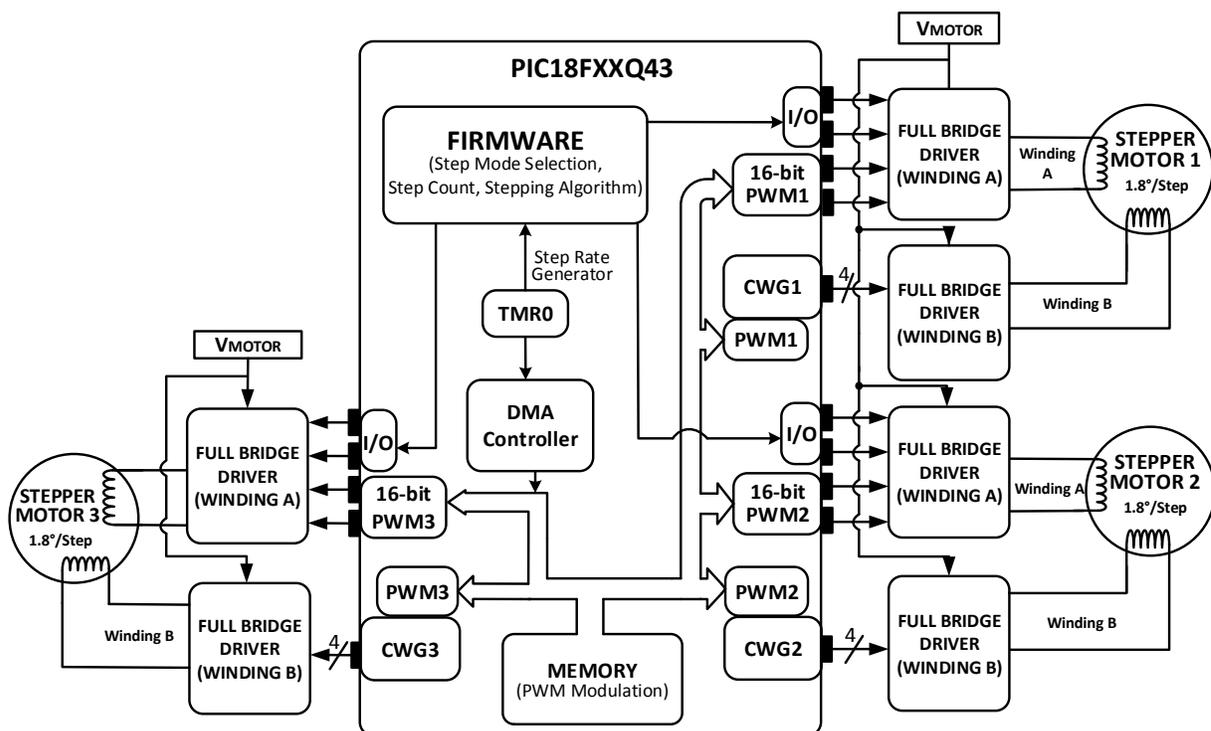
本应用笔记介绍了一种可独立控制三台电机的实用解决方案。此应用使用一个 PIC18F-Q43 器件来控制馈送到三轴步进电机驱动器的驱动信号。由于只使用单个 8 位单片机，因此可以显著降低实现成本。

该应用的关键特性如下：

- 全步、半步及微步（1/4 和 1/16）模式
- 可配置步/坐标分辨率
- 可控制每台电机的转速和方向
- 最多可同时控制三台电机
- 使用独立于内核的外设（CIP）实现电机控制

图 1-1 显示了用于控制电机驱动信号的外设的连接方式。此设计中使用的 CIP 包括新的 16 位高分辨率 PWM、互补波形发生器（Complementary Waveform Generator, CWG）和直接存储器访问（Direct Memory Access, DMA）模块。全桥驱动器用于控制双极步进电机。通过结合使用片上外设（如 TMR0 和常规 PWM）与固件，系统只需最低的软件开销就能可靠地执行三轴控制。

图 1-1. 三轴电机控制框图



注：该应用使用的是 Leadshine 42HS03 电机。

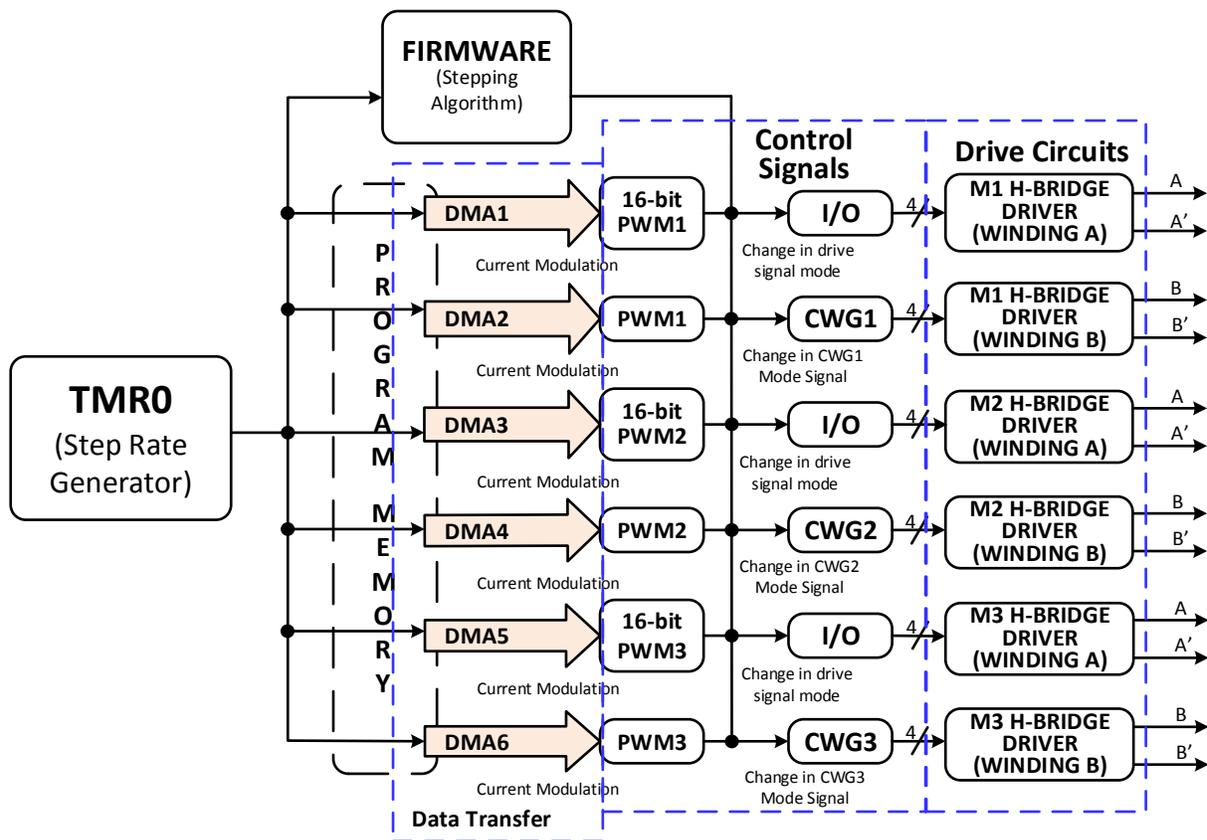
2. 步进电机控制

步进电机是一种按步旋转的电机。这种电机将一整转等分成若干个步并在其中移动，一次移动一步。它会将输入数字脉冲转换为机械轴旋转。此外，还可以驱动该电机旋转特定的步数，并在触发停止时精确停止。有关步进电机基本原理的深入探讨，请参见 [AN907: Stepping Motors Fundamentals](#)。

2.1 控制概述

图 2-1 给出了用于控制三个步进电机的通用系统的框图。TMR0 用作步进速率发生器，主要负责控制电机的转速。每次 TMR0 计满返回时，都会将固件中的步进序列加载到 CWG 和 GPIO 寄存器，同时通过 DMA 加载 PWM 值。 bipolar 电机控制电路由两个 H 桥驱动器组成，用于沿顺时针或逆时针方向驱动每台电机。每台电机的驱动信号是 CWG 和 GPIO 信号及 16 位 PWM 输出的组合。最后，固件根据指定位置限制运动范围。

图 2-1. 三轴电机控制图

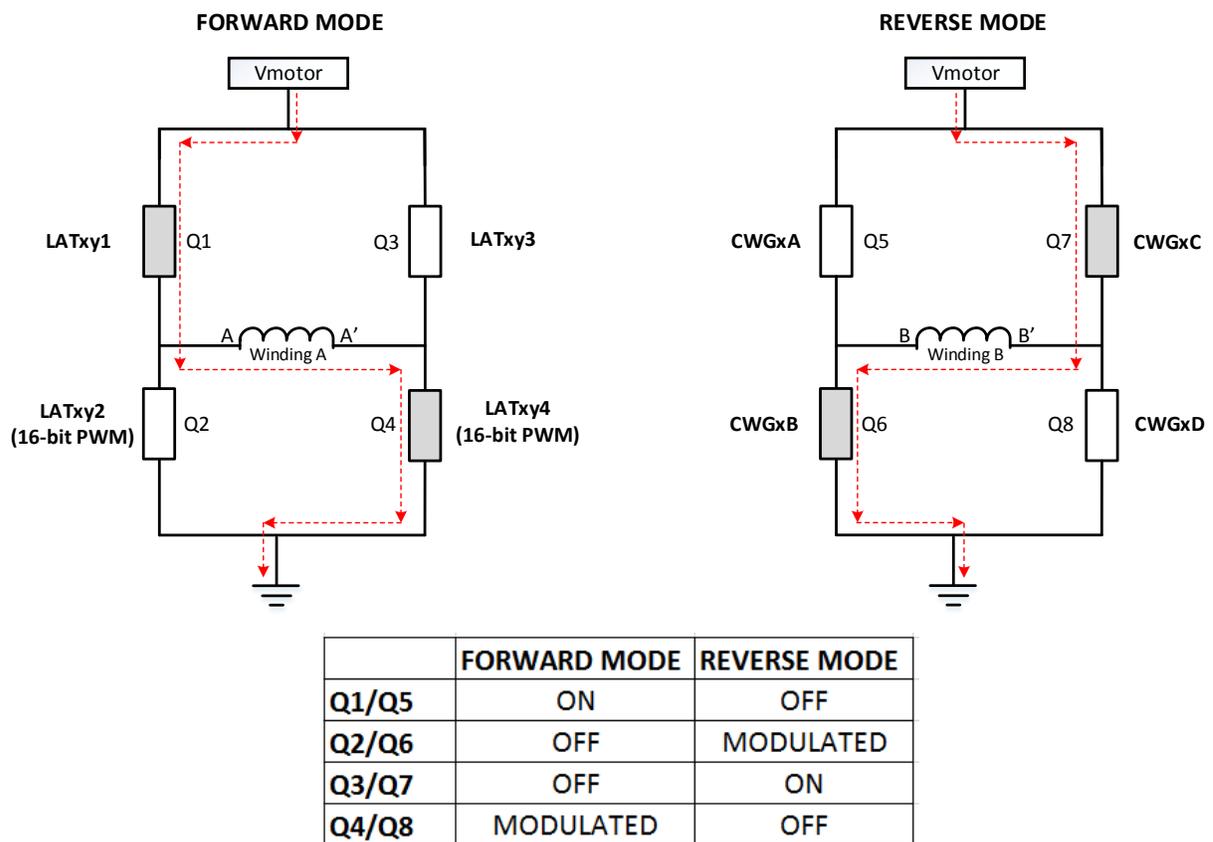


2.2 驱动电路与控制过程

定子上的旋转磁场和变化的磁极极性（北/南）使得转子旋转。通过对两个步进电机绕组（绕组 A 和绕组 B）加电，磁场和磁极性将发生变化。可以利用 H 桥电路通过 CWG 和 PWM 信号来控制通电操作。图 2-2 展示了正向和反向模式中电流在半桥电路中的流经路线。正向和反向模式采用 CWG 模式中的命名规则，并在整个文档中使用这些名称来指示绕组模式的状态。

当绕组 A 处于正向模式时，Q2 和 Q3 关断，电流向下流过 MOSFET Q1 和 Q4，一直到地。当该绕组以反向模式工作时，Q1 和 Q4 关断，电流会流过 Q2 和 Q3。该原理同样适用于绕组 B 中的 MOSFET Q5、Q6、Q7 和 Q8。绕组 B 中 MOSFET 的开关通过 CWG 正向和反向全桥模式来实现，而绕组 A 中的 MOSFET 由 GPIO 输出和 16 位 PWM 进行控制。因此，每台电机的驱动方法都是由固件和外设驱动器结合实现的，用于确保所有电机均处于类似的控制因素下。有关 CWG 外设的更多详细信息，请参见 TB3118: [Complementary Waveform Generator](#)。有关使用的驱动电路，请参见附录 A: [电路原理图](#)。

图 2-2. 驱动电路与控制信号



2.3 用于控制信号的 16 位高分辨率 PWM

16 位脉宽调制器可以在低频下产生高分辨率调制。在此应用中，驱动分辨率主要由步进模式实现来确定。开关频率必须足够高，才能使工作频率超出音频范围。配置方法是令 PWM 工作在 10 位模式下，并采用 62.5 kHz 的开关频率（处于典型驱动器开关的频率范围内）。

16 位 PWM 用于驱动所有电机的绕组 A 的下桥臂 MOSFET。它通过外设引脚选择（Peripheral Pin Select, PPS）连接到两个下桥臂 MOSFET，但不能同时导通这两个下桥臂。16 位 PWM 具有一个独立的 16 位周期定时器，在此应用中，该定时器被选为 HFINTOSC 或等于 64 MHz。PWMOUT 处于左对齐模式。为了使 PWM 正常工作，必须正确配置寄存器 PWMxPR 和 PWMxSaP1。通过设置 PWMxPR 寄存器，可以获得所需的频率。该寄存器的值等于 PWM 周期中的 PWM 时钟周期数，或者可以表示为公式 2-1。

PWMxSaP1 寄存器用于确定切片“a”参数 1 输出的有效周期。随后，可根据 PWMxSaP1 与 PWMxPR 值之比计算公式 2-2 中给出的占空比。

通过将相应的 DMAx 设置为 PWMxLDS 寄存器中的自动加载触发源，可以使能自动加载 PWMxSaP1 寄存器。有关 16 位 PWM 的更多信息，请参见器件数据手册。

公式 2-1. PWM 周期寄存器值

$$PWMxPR = \frac{PWM\ Clock(Hz)}{Requested\ Freq(Hz)}$$

公式 2-2. 占空比计算

$$Duty\ Cycle = \frac{PWMSaP1}{PWMxPR} \times 100\%$$

2.4 数据传输

调制值查找表最初存储在可编程闪存中。DMA 用于在无需 CPU 干预的情况下将调制值传输到 PWM 寄存器，从而释放内核来执行其他任务。如图 2-1 所示，DMA1 用于将值从程序存储器传输到由 PWM1S1P1L 和 PWM1S1P1H 寄存器定义的 16 位 PWM1 的片 1 输出，而 DMA2 用于将调制数据从程序存储器传输到常规 PWM1 寄存器 CCPR1L 和 CCPR1H。每个 DMA 通道都连接至其特定的 PWM 外设，以确保在接收到传输触发信号时同时进行传输。

所有 DMA 通道都配置为在触发 TMR0 中断时启动数据传输。TMR0 被选为触发信号，用于将数据传输到 DMA_nSIRQ（DMA 启动中断请求源选择）寄存器。但是，要使中断源生效，必须使能每个 DMA 的 SIRQEN（传输开始中断请求使能）寄存器。

该应用提供了 1/4 和 1/16 微步的驱动实现。需要注意的是，用于 1/4 和 1/16 微步的 PWM 调制值的数组大小是不同的，并且必须正确初始化相应的 DMA 源大小寄存器，这样才能传输完成全步所需的所有数据。由于 DMA 以 8 位模式工作，因此 DMA 源大小必须等于数组元素数量的两倍。对于 1/4 微步，步进分辨率为 16，这意味着 DMA 源大小寄存器必须等于 32 或 0x20；而对于 1/16 微步，步进分辨率为 64，DMA 源大小必须为 128 或 0x80。如需了解有关 DMA 的更多信息，请参见 TB3164: 8 位 PIC[®] 单片机上的直接存储器访问；有关正确的外设配置，请参见器件数据手册。

3. 步进电机控制特性

为了正常工作，必须仔细考虑步进电机的特性。要考虑的特性包括转矩、转速和步进速率。本章将介绍这些特性如何影响步进实现。

3.1 转矩注意事项

步进电机将转矩保持在相对较低的转速下。步进电机必须能够提供移动负载所需的转矩。步进电机制造商将在其电机对应的数据手册中指定几个转矩。转矩大小取决于驱动技术、步进速率和绕组电流。

3.2 步进速率

步进速率是指硬件-固件组合向步进电机驱动器发送步进脉冲的速度。它以 PPS（每秒脉冲）表示，可指示电机的转速。要了解有关如何使用 PIC 单片机实现此特性的更多信息，请参见 [AN2326: High-Torque/High Power Bipolar Stepper Motor using 8-bit PIC Microcontroller](#) 的“Stepping Rate”一章。

4. 步进模式实现

步进模式是一种用于使步进电机旋转的驱动技术。它表示在定子绕组每次导通时所执行的步进角大小。每种模式都有相应的步进分辨率和输出转矩。可使用 PIC18F-Q43 单片机以三轴控制形式实现的步进模式包括：

- 全步驱动
- 半步驱动
- 微步驱动（1/4 和 1/16）

本应用中采用的步进模式实现引用自 [AN2326: High-Torque/High Power Bipolar Stepper Motor using 8-bit PIC® Microcontroller](#)。由于所用的步进模式原理相同，此处只显示使用 PIC18FXXQ43 器件的实际实现。同样，该实现适用于全部三台三轴电机。

4.1 全步驱动

在这种驱动模式中，两相同时通电。图 4-1 给出了驱动电路实现。CWGx 控制绕组 B，而绕组 A 则根据步进算法通过切换 GPIO 输出来控制。图 4-2 说明了用于使电机步进算法。图中显示了每个引脚的各个输出状态，这些状态可以将轴的位置正确移到其等效的全步角。

图 4-3 显示了用于控制信号的固件执行流程。每次触发 TMR0 中断时，stepCounter 变量都会递增。stepCounter 表示使用的特定模式为全步，并且该变量在达到 4 时将复位为 0。stepCounter2Mx 将与对应的 MxdesiredStep 进行比较。如果计数器超出所需的步数，则电机将停止，并且 axis_movementDone 将置 1。axis 可以定义为 x、y 或 z，具体取决于其类似于哪种特定电机运动。在所有 axis_movementDone 均置 1 后，将禁止 TMR0，以确保其不会计数，并避免误触发中断。所有 stepCounter2Mx 都将清零，以确保从零开始对后续的位置进行计数。主程序中使用 movementDone 变量来确定是否所有电机运动均已完成，并提供信号以使系统做好下一次运动的准备。

由 motorDir 变量决定的多分支语句用于确定电机旋转的方向。电机采用可同时驱动的设计，因此在发生每个中断事件时，motorDir 都将发出命令来决定要执行哪条 case 语句。每条语句都包含电机的方向，所有电机都按照驱动表来进行顺时针或逆时针驱动。对于每台电机，驱动表都需要一组特定的 IO 和 CWG。

图 4-1. 全步驱动

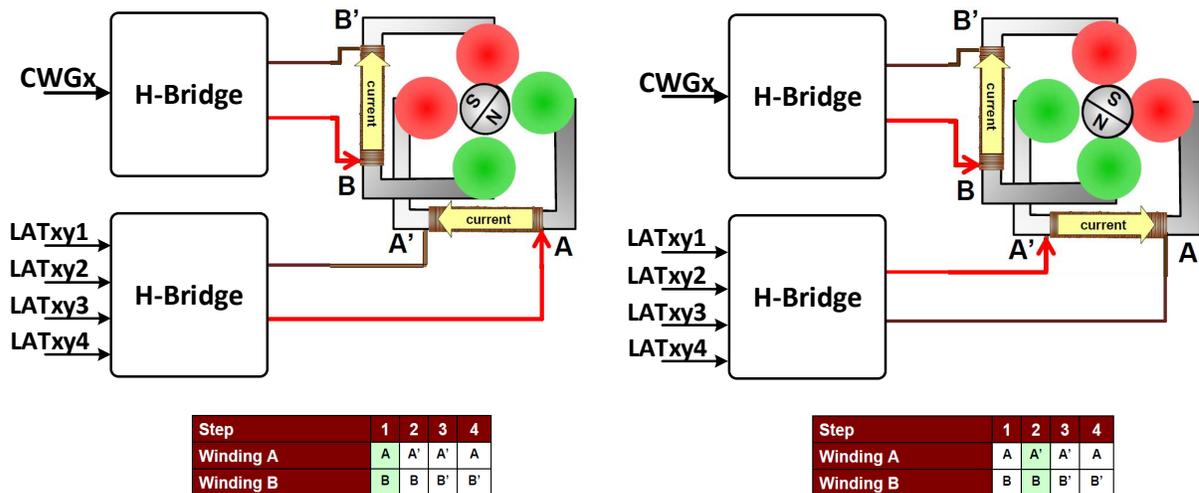


图 4-2. 顺时针方向的全步驱动步进算法

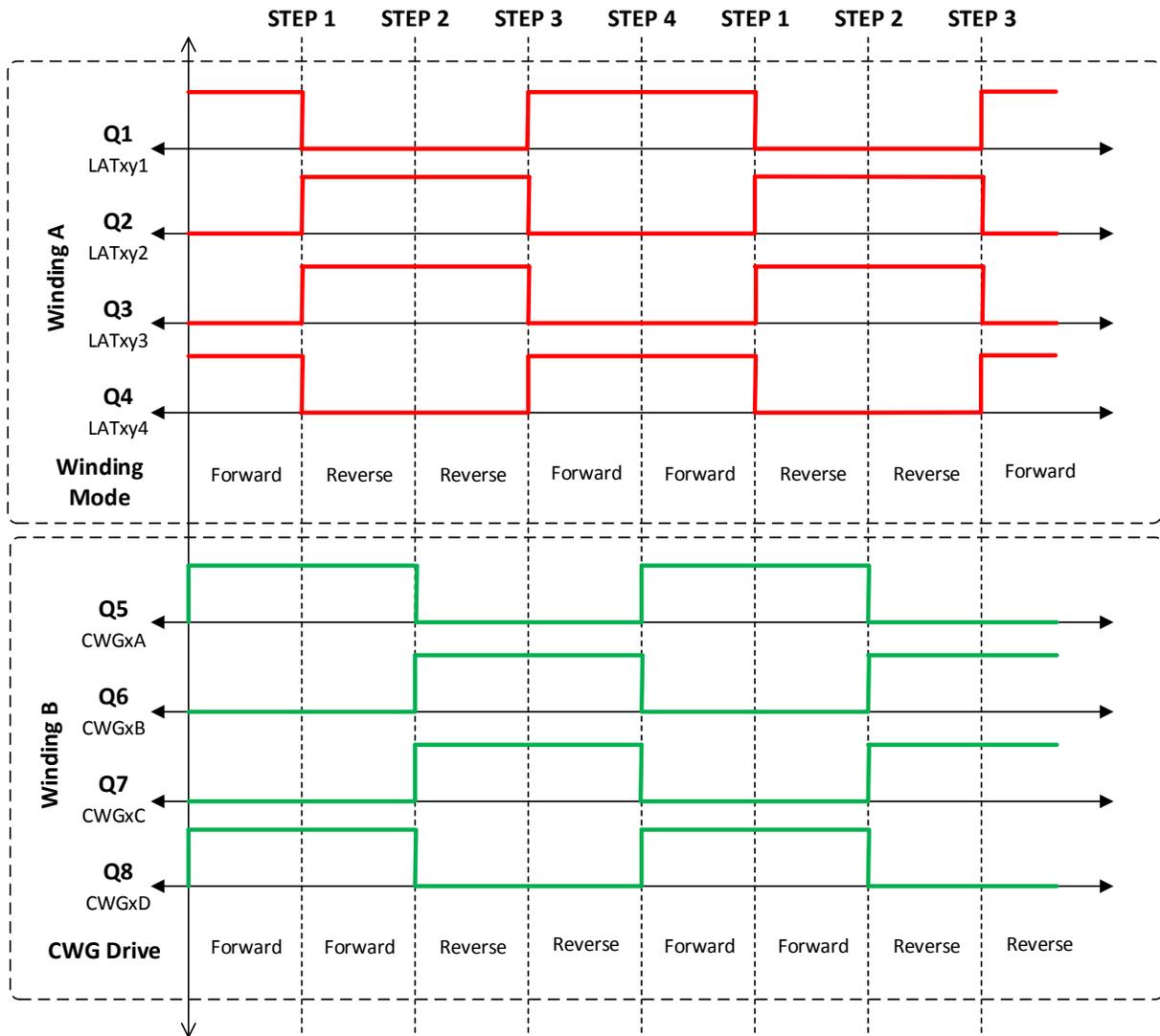
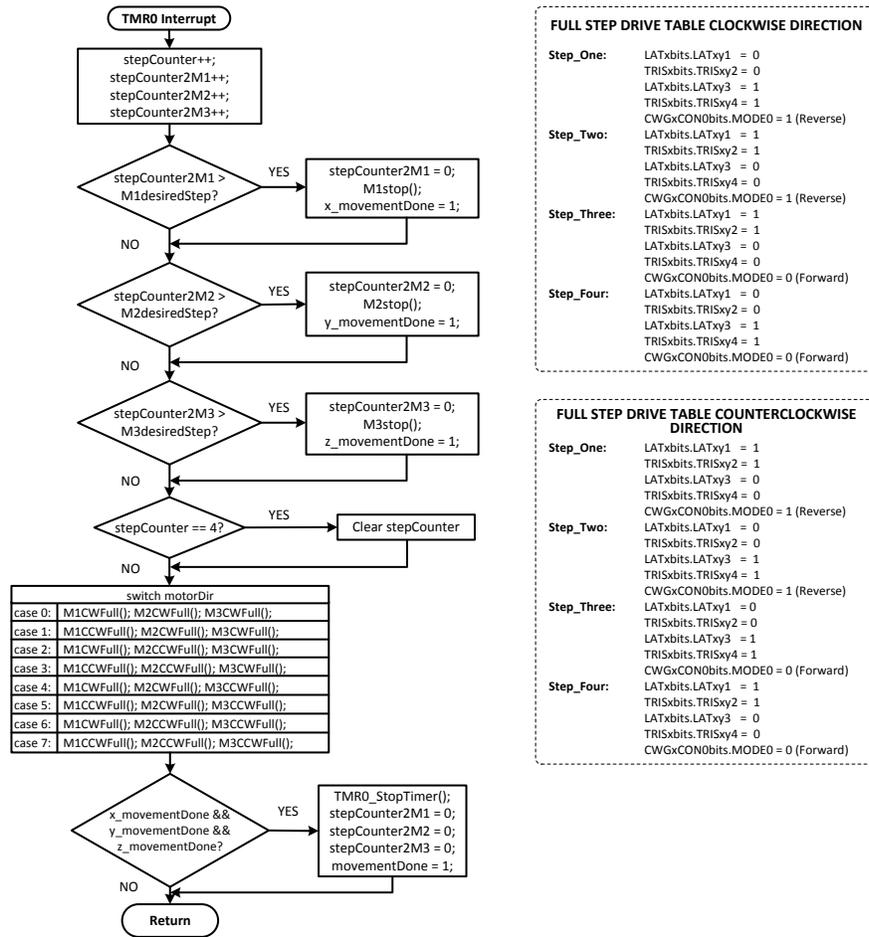


图 4-3. 全步驱动步进算法流程图



FULL STEP DRIVE TABLE CLOCKWISE DIRECTION

Step_One:	LATxbits.LATxy1 = 0 TRISxbits.TRISxy2 = 0 LATxbits.LATxy3 = 1 TRISxbits.TRISxy4 = 1 CWGxCON0bits.MODE0 = 1 (Reverse)
Step_Two:	LATxbits.LATxy1 = 1 TRISxbits.TRISxy2 = 1 LATxbits.LATxy3 = 0 TRISxbits.TRISxy4 = 0 CWGxCON0bits.MODE0 = 1 (Reverse)
Step_Three:	LATxbits.LATxy1 = 1 TRISxbits.TRISxy2 = 1 LATxbits.LATxy3 = 0 TRISxbits.TRISxy4 = 0 CWGxCON0bits.MODE0 = 0 (Forward)
Step_Four:	LATxbits.LATxy1 = 0 TRISxbits.TRISxy2 = 0 LATxbits.LATxy3 = 1 TRISxbits.TRISxy4 = 1 CWGxCON0bits.MODE0 = 0 (Forward)

FULL STEP DRIVE TABLE COUNTERCLOCKWISE DIRECTION

Step_One:	LATxbits.LATxy1 = 1 TRISxbits.TRISxy2 = 1 LATxbits.LATxy3 = 0 TRISxbits.TRISxy4 = 0 CWGxCON0bits.MODE0 = 1 (Reverse)
Step_Two:	LATxbits.LATxy1 = 0 TRISxbits.TRISxy2 = 0 LATxbits.LATxy3 = 1 TRISxbits.TRISxy4 = 1 CWGxCON0bits.MODE0 = 1 (Reverse)
Step_Three:	LATxbits.LATxy1 = 0 TRISxbits.TRISxy2 = 0 LATxbits.LATxy3 = 1 TRISxbits.TRISxy4 = 1 CWGxCON0bits.MODE0 = 0 (Forward)
Step_Four:	LATxbits.LATxy1 = 1 TRISxbits.TRISxy2 = 1 LATxbits.LATxy3 = 0 TRISxbits.TRISxy4 = 0 CWGxCON0bits.MODE0 = 0 (Forward)

4.2 半步驱动

半步驱动在两相通电和单相通电之间交替变化。在该模式下，通过将基本步进角减半可提高角度的分辨率，从而使旋转平稳度高于全步模式。图 4-4 显示了驱动电路实现，其中控制信号来自于 CWG 和 GPIO 输出。图 4-5 说明了这种驱动技术中使用的步进算法。

图 4-6 给出了固件执行流程，该流程与图 4-3 中的流程类似。stepCounter 的值翻倍，这清楚地表明所采用算法的长度为全步算法长度的两倍。此外，图中还显示了所有步的顺时针和逆时针方向驱动表。

图 4-4. 半步驱动电路

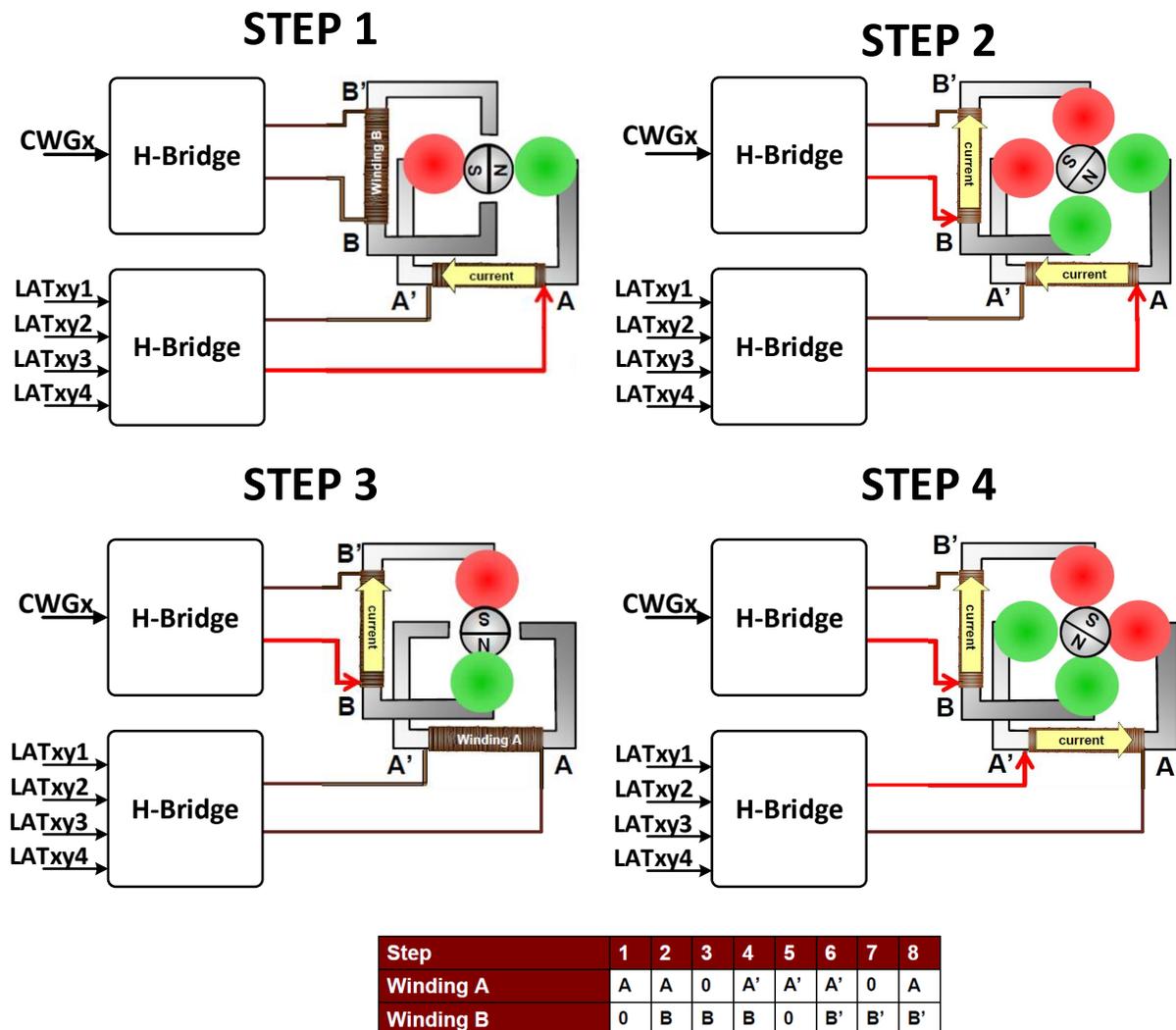


图 4-5. 半步驱动步进算法

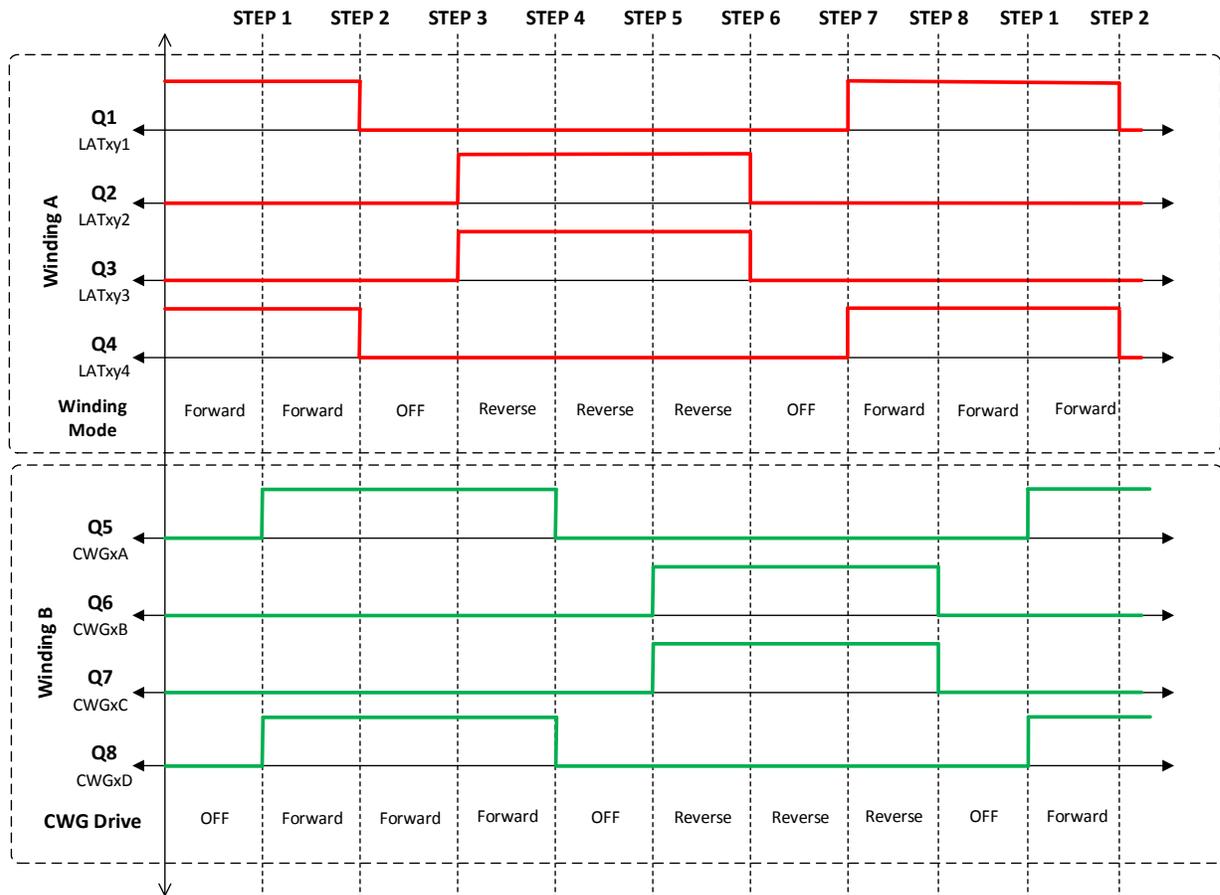
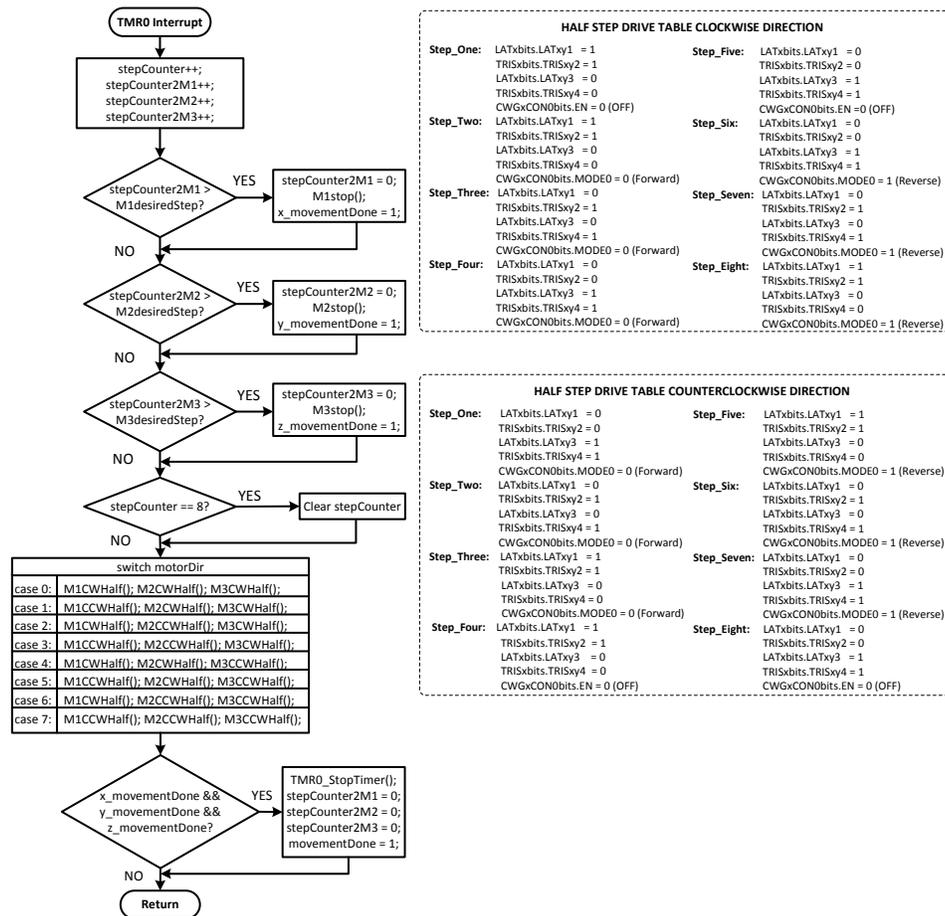


图 4-6. 半步驱动固件执行



4.3 微步

微步是一种平稳移动步进电机的定子磁通的方式。此应用中使用的微步类型是恒定转矩。通过同时改变步进电机的两个绕组中的电流即可实现恒定转矩微步。

此步进模式下使用的驱动电路与全步电路和半步电路相同。但是，此模式下将调制控制信号，而不是提供全开或全关信号。通过按照公式 4-1 和公式 4-2 更改 PWM 调制百分比，可以改变电流。

公式 4-1. 绕组 A 电流公式

$$I_A = I_{MAX} \times \sin\left(\frac{Step\ Number \times 360}{Step\ Resolution}\right)$$

公式 4-2. 绕组 B 电流公式

$$I_B = I_{MAX} \times \cos\left(\frac{Step\ Number \times 360}{Step\ Resolution}\right)$$

使用 1/16 微步时，假设 I_{MAX} 等于 1，则在第一步驱动。将 360° 乘以当前步编号并除以 64（1/16 微步分辨率），然后取正弦值，所得结果为 0.098。这表示绕组 A 中电流的调制只能为最大电流的 9.8%。图 4-7 中计算并绘制出了其余 63 步的绕组 A 和绕组 B 调制。步进分辨率为 64 时的转矩图类似于正弦曲线。图 4-8 显示了 1/16 微步中使用的步进算法。

图 4-7. 恒定转矩 1/16 微步的相图和转矩响应

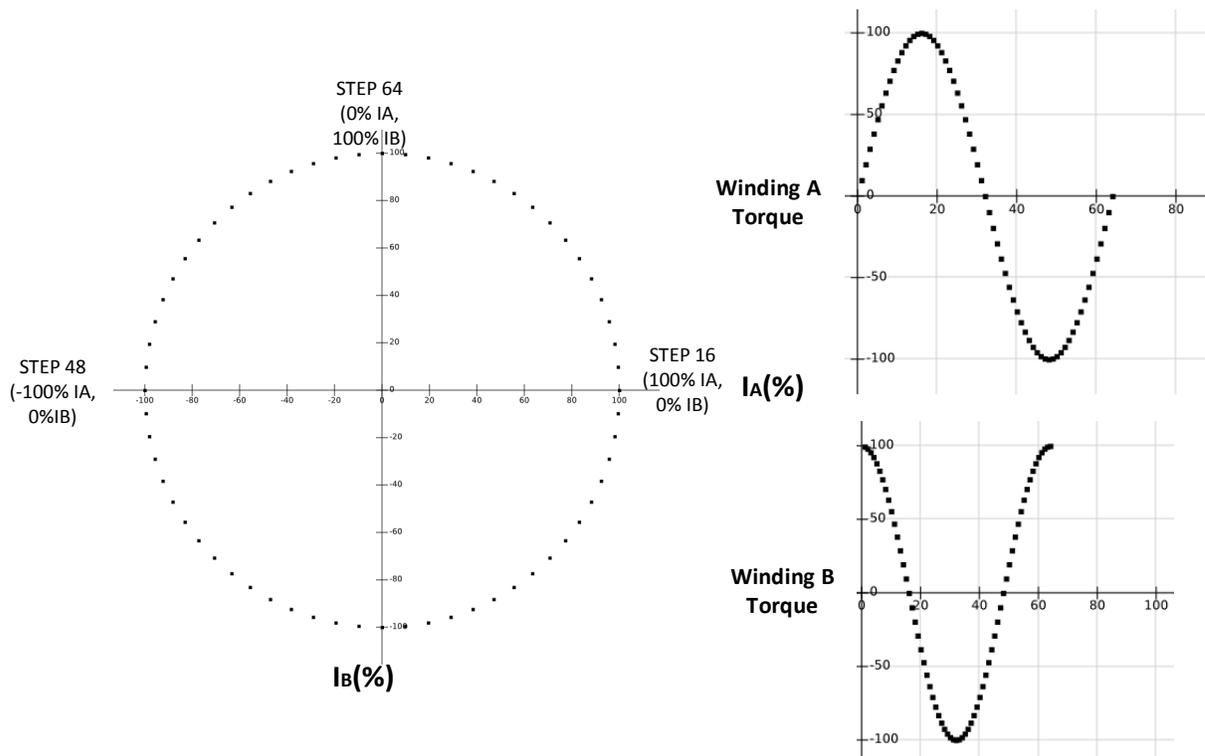
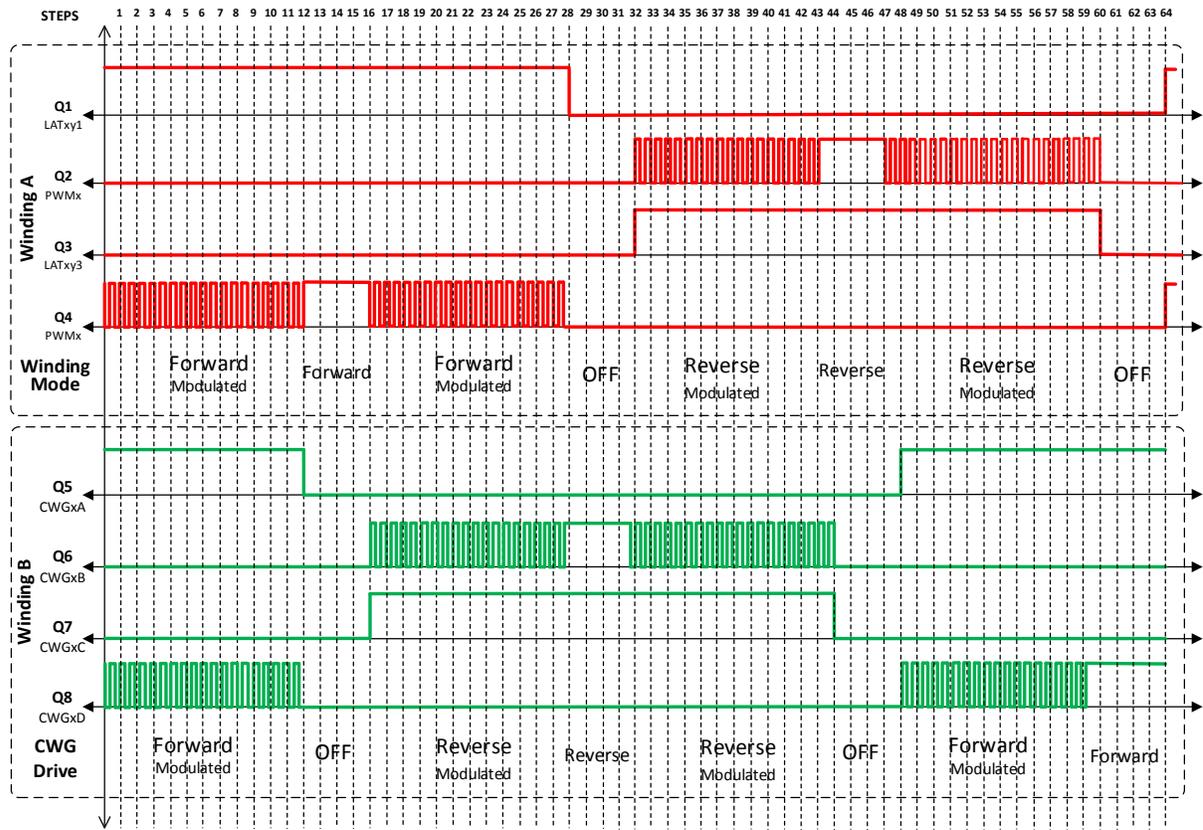


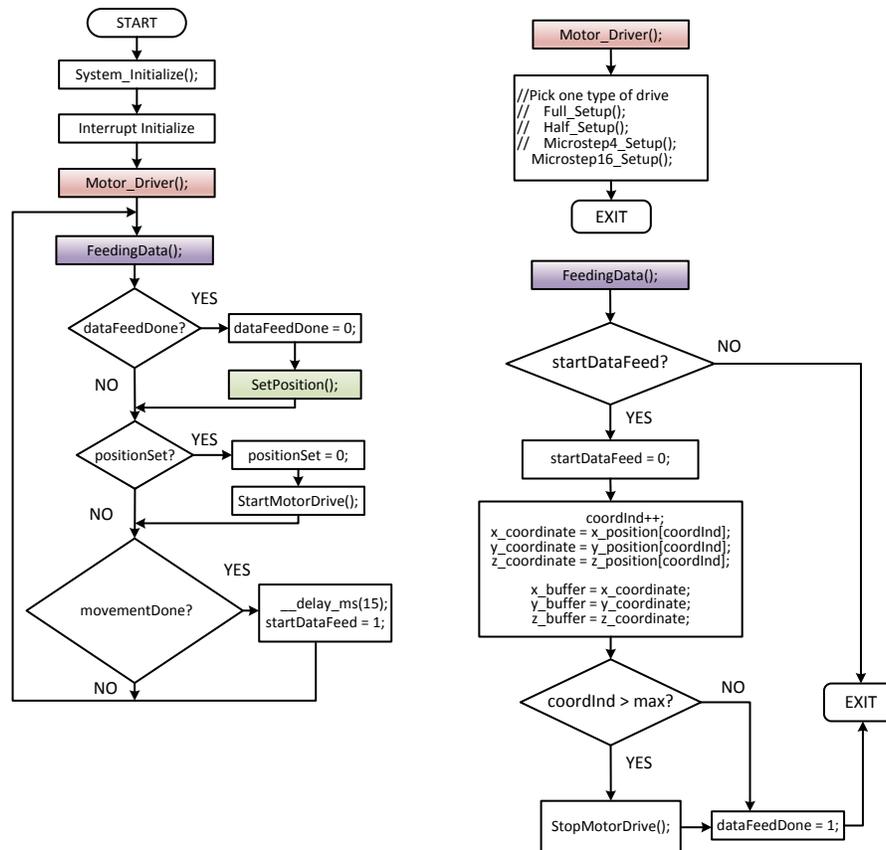
图 4-8. 恒定转矩微步驱动信号



5. 固件流程图

本章介绍了为成功驱动三台三轴电机而实现的固件设计。

图 5-1. 固件流程图



固件流程从 `SYSTEM_Initialize()` 程序开始。该程序用于初始化引脚配置、振荡器和应用中使用的所有外设。随后，允许中断以寻址需要中断的函数。`Motor_Driver()` 函数包含不同的驱动实现。通过取消注释所选驱动的函数来选取一种驱动。所选驱动将分配 `stepping_mode_constant` 的值，该值用于计算在不同位置旋转所需的步数。请注意，驱动类型将仅在程序开始时设置一次，并且要使用的驱动类型将取决于应用需求和用户的决定。

完成所有初始化后，程序将经过一个连续循环，以执行将电机成功移到预定义位置所需的函数。`FeedingData()` 函数中的命令用于获取和处理所需的位置。程序开始时初始化的位置被放在 `axis_coordinate` 参数中，以供后续处理。在后续的条件语句中，将测试 `coordInd` 和 `max` 变量，以确认是否达到最终位置，并指示电机在满足条件后停止。。如果未满足条件，则会将 `dataFeedDone` 变量设置为下一条指令的测试变量。

当满足 `dataFeedDone` 测试变量的要求时，将执行 `SetPosition()` 函数。该函数在三轴运动控制过程中起到重要作用。通过测试 `axis_movementDone` 变量，该函数可检查各个电机运动是否已完成。如果先前的运动已完成，则将测试当前轴坐标与先前的轴坐标是否相等。如果当前坐标与前一个坐标不相等，则将测试两个条件语句。第一个条件测试当前坐标是否小于前一个坐标；如果是，则得到的当前坐标将为前一个坐标减去当前坐标，如公式 5-1 所示。此时，`Mxdirection` 将设置为逆时针方向，并且初始化 `DMA` 以传输沿逆时针方向移动时所需的调制数据。但是，如果当前坐标大于前一个坐标，则得到的当前坐标将为当前坐标减去前一个坐标，如公式 5-2 所示。此外，`Mxdirection` 将设置为顺时针方向，并且初始化 `DMA` 源以传输顺时针方向的调制数据。

得到的当前坐标将用于计算电机所需的步数，如公式 5-3 所示。常量变量 `STEPS_PER_COORDINATE` 可以为任何值，具体取决于将旋转运动转换为直线运动所用的工具。引入了此变量的目的是提高应用的灵活性。`axis_coordinate`

中 *axis* 的含义可以是 *x*、*y* 或 *z*，具体取决于坐标，*MxDesiredStep* 中的 *x* 可以是 1、2 或 3，具体取决于电机编号。在此控制方案中创建了如下对：*x_coordinate* 与 M1 对、*y_coordinate* 与 M2 对以及 *z_coordinate* 与 M3 对。

公式 5-1. *axis_coordinate* < *axis_prevCoordinate*

$$axis_coordinate = axis_prevCoordinate - axis_coordinate$$

公式 5-2. *axis_coordinate* > *axis_prevCoordinate*

$$axis_coordinate = axis_coordinate - axis_prevCoordinate$$

公式 5-3. 电机所需的步数

$$MxDesiredStep = axis_coordinate \times STEPS_PER_COORDINATE \times stepping_mode_constant$$

这样就能使当前坐标等于前一个坐标，并将它作为后续位置的参考。之后通过清除 CWG 的自动关断特性并将驱动引脚设置为输出来使能电机驱动。*positionSet* 变量置 1，这主要表明位置的设置已完成。

最后，将执行函数 *StartMotorDrive()*，从而依次启动三台电机的驱动。测试 *movementDone* 变量意味着，必须先将所有电机移到其目标位置，然后才能提供下一组数据以进行后续移动。此循环将一直运行并执行上述任务，直至坐标移动完成。有关完整的源代码，请参见附录 C：源代码列表。

6. 三轴控制性能

为了展示单片机可以同时提供多个驱动信号，我们使用逻辑分析器来捕捉以不同步进模式工作时的驱动信号。

图 6-1. 使用逻辑分析器捕捉 MCU 为三台电机提供的驱动信号

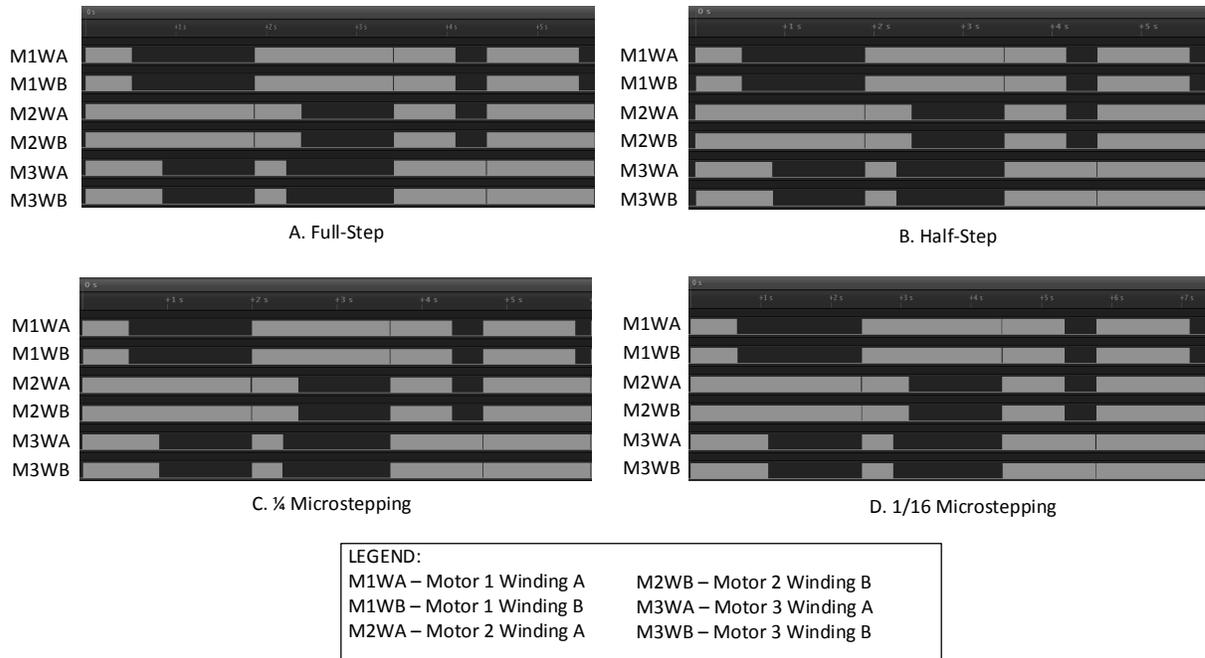


图 6-2. 驱动信号步进模式比较

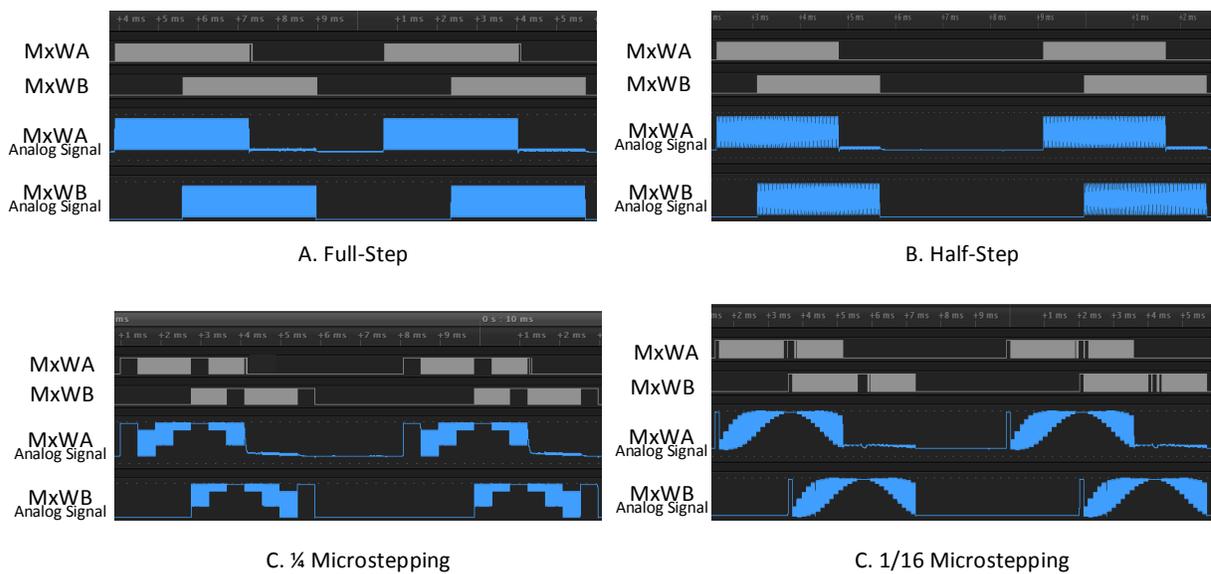


图 6-3. 馈送到电机的数据坐标

```
x_position [] = {0, 3, 12, 8, 2, 10, 2, 12, 9, 5, 12, 3, 9, 3, 12, 11, 2, 10, 2, 5, 11, 0};
y_position [] = {0, 11, 8, 12, 5, 9, 12, 8, 1, 4, 9, 4, 2, 11, 8, 12, 5, 9, 12, 8, 1, 0};
z_position [] = {0, 5, 3, 9, 2, 11, 8, 3, 8, 10, 6, 3, 7, 4, 11, 9, 6, 11, 8, 3, 8, 0};
```

图 6-1 以全步、半步和微步（1/4 和 1/16）模式下驱动的步数来表示三轴电机在 180 RPM 转速下的运动情况。从图中可以看出，所有步进模式实现所用的时间都是一致的，因为这些实现均在 180 RPM 转速下工作。但是，根据图 6-2，为了保持 180 RPM 的转速，每个驱动所需的 PPS（每秒脉冲）是不同的。所示的驱动信号来自双极驱动电路的下桥臂 MOSFET 的控制信号。

在图 6-3 给出的示例中，位置定义为坐标数组。举例来说，固件将根据前一个坐标使用公式 5-1 或公式 5-2 来处理在所有轴上使用相同元素顺序的位置，然后再将位置结果传递给公式 5-3。表 6-1 中给出的数据表明了当 STEPS_PER_COORDINATE 为 100 时，如何根据图 6-3 中给定的坐标为所有电机计算所需的步数。

表 6-1. 在全步模式下计算三个电机的步数

n	X _n	X _{n+1} - X _n	M1desiredStep	Y _n	Y _{n+1} - Y _n	M2desiredStep	Z _n	Z _{n+1} - Z _n	M3desiredStep
0	0			0			0		
1	3	3(CW)	300	11	11(CW)	1100	5	5(CW)	500
2	12	9(CW)	900	8	3(CCW)	300	3	2(CCW)	200
3	8	4(CCW)	400	12	4(CW)	400	9	6(CW)	600
4	2	6(CCW)	600	5	7(CCW)	700	2	7(CCW)	700

7. 结论

PIC18F-Q43 器件能够为三轴步进电机控制提供控制信号。除了提供控制信号外，它还可以设置运动限制，以将电机精确地移动到定义的位置。可以实现全步、半步、1/4 和 1/16 微步等不同的步进驱动模式，以达到所需的分辨率。CIP（例如 CWG、16 位 PWM 和 DMA）显著减轻了内核负载，从而使 CPU 能够处理用于控制电机运动的数据。

8. 附录 A: 原理图

图 8-1. 电路原理图

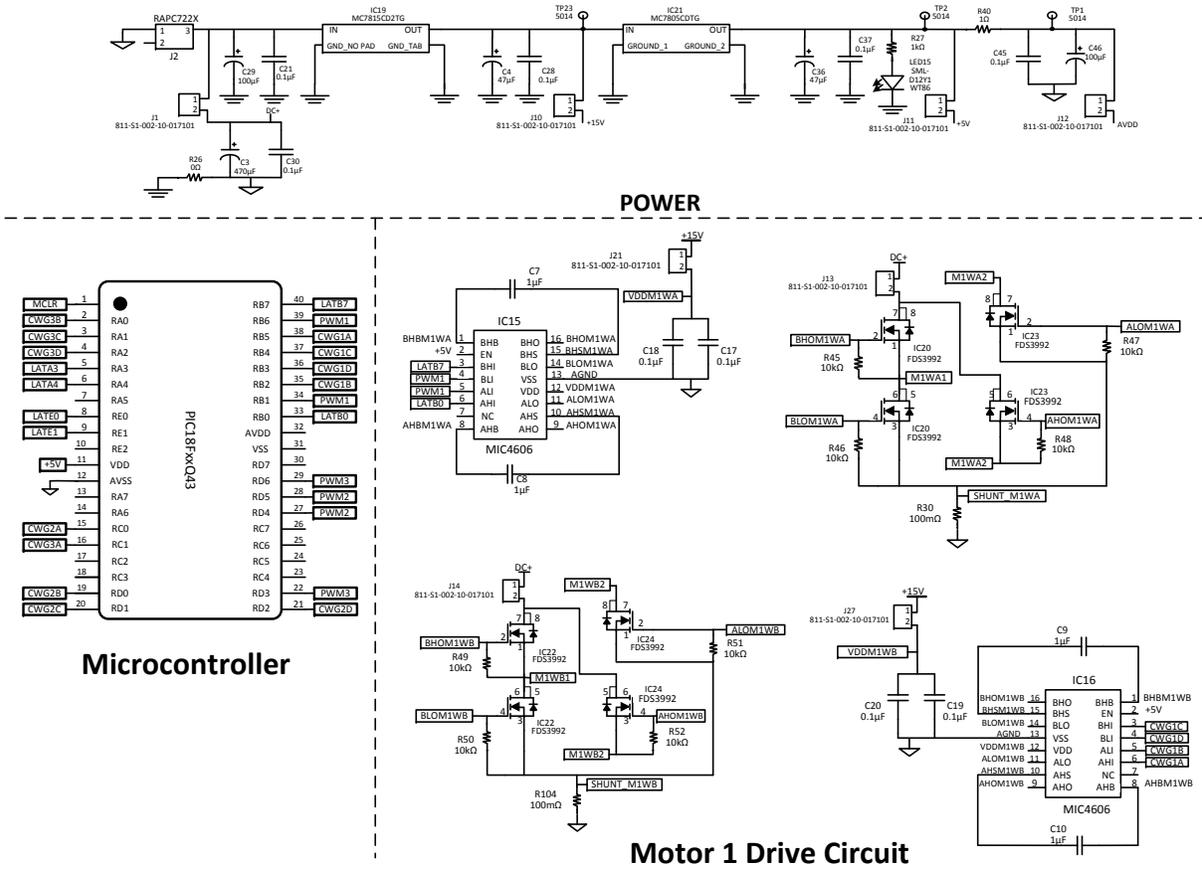
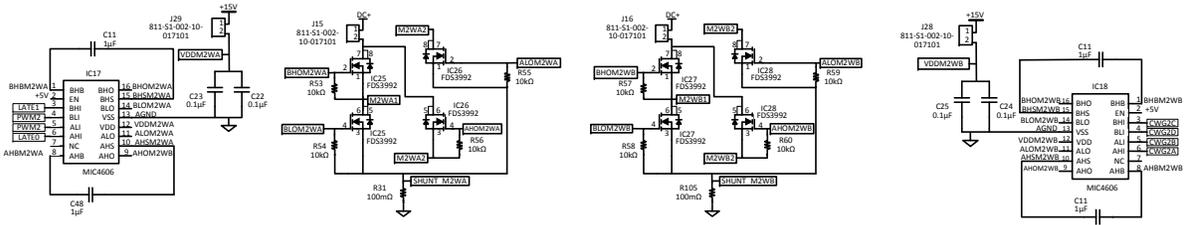
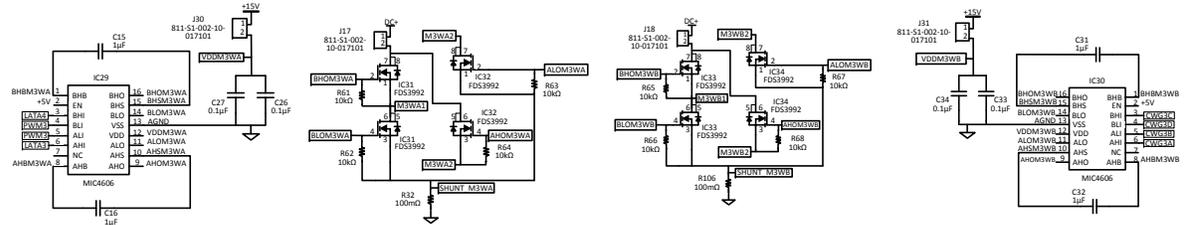


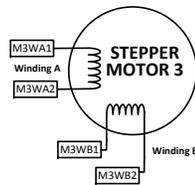
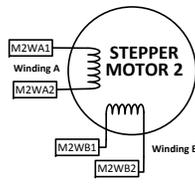
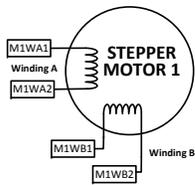
图 8-2. 电机 2 和电机 3 的驱动电路原理图



Motor 2 Drive Circuit



Motor 3 Drive Circuit



9. 附录 B: MPLAB®代码配置器 (MCC) 外设初始化

MPLAB 代码配置器 (MPLAB Code Configurator, MCC) 是一款适合 MPLAB X IDE 的简单易用型插件工具, 可根据在图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 中的设置来生成 Microchip 单片机外设的控制代码。可使用 MCC 来轻松配置此电机控制应用中使用的外设。有关如何在 MPLAB X IDE 中安装和设置 MCC 的信息, 请参见《MPLAB®代码配置器用户指南》(DS40001725_CN)。

下面分步说明了如何在此应用中使用 MCC。

1. 在系统模块中, 将时钟设置为 HFINTOSC, 最高可用频率为 64 MHz。
2. Timer2 用作 CCP1/2/3 的时钟源。为了使 CCP 产生 PWM, 必须将 Timer2 时钟源设置为 $F_{osc}/4$ 。使能定时器。
3. 在 16 位定时器模式下, 使用 MFINTOSC 时钟源配置 Timer0, 该时钟源的请求周期为 1.5 ms。允许定时器中断, 并将 Timer0 初始状态设为禁止。
4. 对于电机 1 驱动, 配置 PWM1、CCP1、CWG1、DMA 通道 1 和 DMA 通道 2。
 - 4.1. 使用 HFINTOSC 时钟源设置 PWM1, 该时钟源的请求频率为 62.5 kHz, 占空比为 50%。使能 PWM 模块。
 - 4.2. CCP1 模块必须处于 PWM 模式, 并且将 Timer2 作为选定的定时器, 该定时器的占空比为 50%。
 - 4.3. 必须使用 CCP1_OUT 作为输入源来配置 CWG1, 并将输出模式设置为正向全桥模式, 同时将 HFINTOSC 作为选定的时钟源。使能 CWG1。
5. 对于电机 2 驱动, 配置 PWM2、CCP2、CWG2、DMA 通道 3 和 DMA 通道 4。
 - 5.1. 使用 HFINTOSC 时钟源设置 PWM2, 该时钟源的请求频率为 62.5 kHz, 占空比为 50%。使能 PWM 模块。
 - 5.2. CCP2 模块必须处于 PWM 模式, 并且将 Timer2 作为选定的定时器, 该定时器的占空比为 50%。
 - 5.3. 必须使用 CCP2_OUT 作为输入源来配置 CWG2, 并将输出模式设置为正向全桥模式, 同时将 HFINTOSC 作为选定的时钟源。使能 CWG2。
6. 对于电机 3 驱动, 配置 PWM3、CCP3、CWG3、DMA 通道 5 和 DMA 通道 6。
 - 6.1. 使用 HFINTOSC 时钟源设置 PWM3, 该时钟源的请求频率为 62.5 kHz, 占空比为 50%。使能 PWM 模块。
 - 6.2. CCP3 模块必须处于 PWM 模式, 并且将 Timer2 作为选定的定时器, 该定时器的占空比为 50%。
 - 6.3. 必须使用 CCP3_OUT 作为输入源来配置 CWG3, 并将输出模式设置为正向全桥模式, 同时将 HFINTOSC 作为选定的时钟源。使能 CWG3。
7. 按照以下步骤来配置 DMA 通道:
 - 7.1. 在 DMAxCON0 寄存器中, 使能 DMA 通道 1 的 SIRQEN 位, 并将 EN 位清零 (禁止)。
 - 7.2. 将 DMAxDSZL 大小定义为 0x02, 这意味着目标为 2 个字节宽。
 - 7.3. 将 DMAxSIRQ 配置为 TMR0。根据微步分辨率, DMAxSSZL 在采用 1/16 微步模式时为 0x80, 而在采用 1/4 微步模式时为 0x20。源地址和目标地址在固件中定义, 具体取决于电机的方向和电机编号。按原样保留此处未提及的其他寄存器的配置。
8. 在引脚管理器配置中, 设置所有外设的输入/输出引脚, 如图 B-1 所示。
9. 配置完所有外设后, 单击左上角 Project Resources (项目资源) 选项卡名称旁的 “Generate Code” (生成代码) 按钮。这将在项目中自动生成一个 main.c 文件, 而且还会对模块进行初始化并留下一个空的 while(1) 循环, 以便用户输入自定义代码。

10. 附录 C：源代码列表

最新软件版本可从 Microchip 网站 (www.microchip.com) 下载。用户将会找到本应用笔记电子版随附的源代码。最新版本为 v1.0。

Microchip 网站

Microchip 网站 (www.microchip.com/) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 www.microchip.com/support 获得网上技术支持。

Microchip 器件代码保护功能

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规范。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- 目前，仍存在着用恶意、甚至是非法的方法来试图破坏代码保护功能的行为。我们确信，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。这种试图破坏代码保护功能的行为极可能侵犯 Microchip 的知识产权。
- 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。

法律声明

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。

本出版物中提供的信息仅仅是为方便您使用 Microchip 产品或使用这些产品来进行设计。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 “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、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PackeTime、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、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、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SMART-I.S.、storClad、SQI、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 和 Symmcom 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。

© 2021, Microchip Technology Incorporated 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-7172-1

质量管理体系

有关 Microchip 的质量管理体系的信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务中心

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话: 480-792-7200 传真: 480-792-7277 技术支持: www.microchip.com/support 网址: www.microchip.com	澳大利亚 - 悉尼 电话: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 电话: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 电话: 86-28-8665-5511 中国 - 重庆 电话: 86-23-8980-9588 中国 - 东莞 电话: 86-769-8702-9880 中国 - 广州 电话: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 电话: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特别行政区 电话: 852-2943-5100 中国 - 南京 电话: 86-25-8473-2460 中国 - 青岛 电话: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 电话: 86-21-3326-8000 中国 - 沈阳 电话: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 电话: 86-755-8864-2200 中国 - 苏州 电话: 86-186-6233-1526 中国 - 武汉 电话: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 电话: 86-29-8833-7252 中国 - 厦门 电话: 86-592-2388138 中国 - 珠海 电话: 86-756-3210040	印度 - 班加罗尔 电话: 91-80-3090-4444 印度 - 新德里 电话: 91-11-4160-8631 印度 - 浦那 电话: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 电话: 81-6-6152-7160 日本 - 东京 电话: 81-3-6880-3770 韩国 - 大邱 电话: 82-53-744-4301 韩国 - 首尔 电话: 82-2-554-7200 马来西亚 - 吉隆坡 电话: 60-3-7651-7906 马来西亚 - 槟榔屿 电话: 60-4-227-8870 菲律宾 - 马尼拉 电话: 63-2-634-9065 新加坡 电话: 65-6334-8870 台湾地区 - 新竹 电话: 886-3-577-8366 台湾地区 - 高雄 电话: 886-7-213-7830 台湾地区 - 台北 电话: 886-2-2508-8600 泰国 - 曼谷 电话: 66-2-694-1351 越南 - 胡志明市 电话: 84-28-5448-2100	奥地利 - 韦尔斯 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 丹麦 - 哥本哈根 电话: 45-4485-5910 传真: 45-4485-2829 芬兰 - 埃斯波 电话: 358-9-4520-820 法国 - 巴黎 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 德国 - 加兴 电话: 49-8931-9700 德国 - 哈恩 电话: 49-2129-3766400 德国 - 海尔布隆 电话: 49-7131-72400 德国 - 卡尔斯鲁厄 电话: 49-721-625370 德国 - 慕尼黑 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 德国 - 罗森海姆 电话: 49-8031-354-560 以色列 - 若那那市 电话: 972-9-744-7705 意大利 - 米兰 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 意大利 - 帕多瓦 电话: 39-049-7625286 荷兰 - 德卢内市 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 挪威 - 特隆赫姆 电话: 47-72884388 波兰 - 华沙 电话: 48-22-3325737 罗马尼亚 - 布加勒斯特 电话: 40-21-407-87-50 西班牙 - 马德里 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 瑞典 - 哥德堡 电话: 46-31-704-60-40 瑞典 - 斯德哥尔摩 电话: 46-8-5090-4654 英国 - 沃金厄姆 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820
亚特兰大 德卢斯, 佐治亚州 电话: 678-957-9614 传真: 678-957-1455 奥斯汀, 德克萨斯州 电话: 512-257-3370 波士顿 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 774-760-0087 传真: 774-760-0088 芝加哥 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 630-285-0071 传真: 630-285-0075 达拉斯 阿迪森, 德克萨斯州 电话: 972-818-7423 传真: 972-818-2924 底特律 诺维, 密歇根州 电话: 248-848-4000 休斯顿, 德克萨斯州 电话: 281-894-5983 印第安纳波利斯 诺布尔斯特维尔, 印第安纳州 电话: 317-773-8323 传真: 317-773-5453 电话: 317-536-2380 洛杉矶 米慎维荷, 加利福尼亚州 电话: 949-462-9523 传真: 949-462-9608 电话: 951-273-7800 罗利, 北卡罗来纳州 电话: 919-844-7510 纽约, 纽约州 电话: 631-435-6000 圣何塞, 加利福尼亚州 电话: 408-735-9110 电话: 408-436-4270 加拿大 - 多伦多 电话: 905-695-1980 传真: 905-695-2078			