

Application Note

使用具有 Zigbee® 的 SimpleLink CC2340R5 MCU 进行有刷直流电机 (BDC) 控制



Ryan Brown

摘要

本应用手册介绍了在单个 MCU 设计中向有刷直流 (BDC) 电机设计添加 Zigbee® 无线协议的功能。BDC 电机常见于可从嵌入式无线电中获益的各类应用，包括窗帘、电动牙刷和门锁等。本文件中涵盖的内容将演示 CC2340R5 如何借助 DRV8251A 电机驱动器和 TMAG5213 霍尔效应锁存器来完成此任务。

本文件提供的设计使用可在 TI.com 上购买的硬件 EVM 和 SimpleLink 低功耗 F3 演示 GitHub 上免费提供的固件。文中详细描述了必需的硬件连接方式及固件的工作原理，因此开发人员在获取 BDC 电机后，完全能够搭建演示系统，并可进一步修改该工程以满足需求。此外，还提供了其他测试数据，以便读者可以完全了解工作条件和应用扩展选项。

内容

1 简介	2
1.1 CC2340R5	2
1.2 DRV8251A	3
1.3 BDC 电机	3
1.4 TMAG5213	4
2 BDC 应用	5
2.1 硬件设置	5
2.2 连接图	6
3 运行示例	8
3.1 依赖项	8
3.2 加载固件	8
3.3 Zigbee 组网	9
4 固件设计	10
4.1 代码流程描述	10
4.2 LaunchPad 按钮功能	12
4.3 非易失性内存	12
4.4 双向 PWM 电机控制	12
4.5 ADC 过流保护功能	12
4.6 具有可配置端点、基于霍尔效应的电机位置跟踪功能	12
4.7 日志记录功能	13
4.8 与第三方智能集线器设备的互操作性	13
5 测试和结果	14
5.1 PWM 和霍尔效应信号分析	14
5.2 使用 EnergyTrace™ 进行功耗分析	14
6 总结	16
7 参考资料	16

商标

SimpleLink™, Code Composer Studio™, and EnergyTrace™ are trademarks of Texas Instruments.

Zigbee® is a registered trademark of Connectivity Standards Alliance.

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

SimpleLink™ CC2340R5 是一款功能强大的低成本 MCU，具有 512kB 闪存和 36kB 或 64kB SRAM，并且配有 Arm® Cortex® M0+ 和 2.4GHz 无线电。此功能集能够在单芯片设计中实现适用于各种无线电协议的多种终端应用。本应用手册重点介绍了一个实例，证明该器件的用途较广。此外，已经证实 CC2340R5 还支持无刷直流 (BLDC) 电机和步进电机应用。

当与 [DRV8251A](#) 和 [TMAG5213](#) 组合使用时，CC2340R5 可以通过 Zigbee 无线通信控制 BDC 电机。本文档详细介绍了实现此应用所需的硬件和软件实施以及已启用的可选功能。通过阅读本文档，用户可以详细了解 BDC 电机控制和 CC2340R5 开发情况，并放心在设计中使用类似的概念。

1.1 CC2340R5

CC2340R 系列属于 SimpleLink™ MCU 平台。这一系列产品包括 Wi-Fi®、蓝牙低功耗、Thread、Zigbee、Sub-1GHz MCU 和主机 MCU，它们共用一个易于使用的通用软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集。这些器件针对楼宇自动化（无线传感器、照明控制、信标）、资产跟踪、医疗、零售 EPOS（电子销售终端）、ESL（电子货架标签）和个人电子产品（玩具、HID、触控笔）市场中的低功耗无线通信进行了优化。

[LP-EM-CC2340R5](#) 开发套件可借助支持低功耗蓝牙 5 (LE)、Zigbee 和 2.4GHz 专有协议的 CC2340R5 MCU 加快开发速度。软件支持由 [SimpleLink™ 低功耗 F3 软件开发套件 \(SDK\)](#) 提供，后者可使用 [Code Composer Studio™ 集成开发环境 \(IDE\)](#) 构建。具体功能包括通过 BoosterPack™ 插件模块连接器访问所有 I/O 信号以及使用 TI SimpleLink Connect 将 LaunchPad™ 开发套件连接到智能手机。需要单独购买用于软件开发和射频评估的调试器 [LP-XDS110ET](#) 或 LP-XDS110

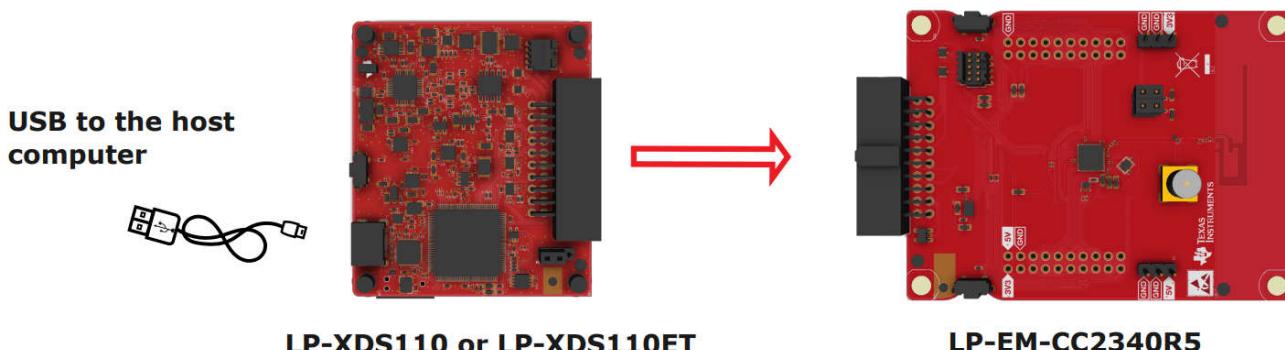


图 1-1. LP-XDS110ET 和 LP-EM-CC2340R5 连接

1.2 DRV8251A

DRV8251 系列器件是集成电机驱动器，具有 N 沟道 H 桥、电荷泵、电流调节和保护电路。DRV8251A 还具有电流检测反馈。电荷泵通过支持 N 沟道 MOSFET 半桥和 100% 占空比驱动来提升效率。外部电压基准引脚 VREF 可以确定启动过程和失速事件中电流调节的阈值，而无需微控制器交互。低功耗睡眠模式可通过关断大部分内部电路实现超低静态电流消耗。内部保护功能包括电源欠压锁定、输出过流和器件过热。H 桥驱动器架构支持高达 4.1A 的峰值电流。DRV8251A 可由单一电源供电，并支持 4.5V 至 48V 的宽输入电源电压范围。

DRV8251AEVM 是一款基于 DRV8251A H 桥驱动器（适用于 BDC 电机）的 3.7A 有刷直流驱动级。该器件包含用于低侧电流测量的电流分流放大器、150mA LDO、死区时间控制引脚、VDS 过流电平引脚和栅极驱动器关断引脚。该 EVM 配备了两个电位计，可用于调节控制信号占空比。如果需要，可断开板载 MCU，以便 DRV8251A 可由外部控制。可向 EVM 提供高达 48V 的电压，并且 DRV8251AEVM 的集成 LDO 可生成 3.3V 基准电压。还配备电源状态 LED，向用户提供反馈。

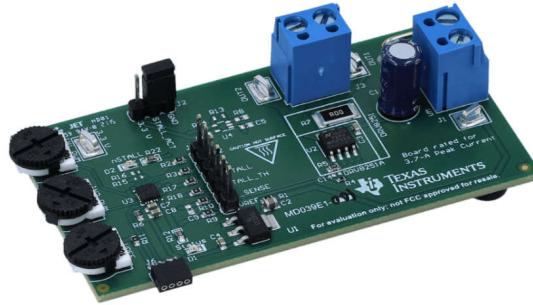


图 1-2. DRV8251AEVM

1.3 BDC 电机

使用直流 (DC) 电源的有刷直流 (BDC) 双极电机代表本应用手册中提供的通用电机设计。在本报告中，接口电路将 2 个 PWM 驱动到高侧和低侧，以控制电机转速和方向。虽然某些 BDC 电机包含集成霍尔效应传感器，但本报告中讨论的电机不包含该传感器。本报告中 BDC 电机的红线表示为 M+，黑线表示为 M-。



图 1-3. BDC 电机

1.4 TMAG5213

TMAG5213 是一款低成本、斩波稳定霍尔效应传感器，在整个温度范围内具有出色的灵敏度稳定性和集成保护特性。磁场通过数字双极锁存输出表示。这种双极性锁存磁响使器件输出能够通过封装的 Z 轴对正负磁通量敏感。TMAG5213 具有 2.5V 至 28V 的宽工作电压范围和 -40°C 至 +125°C 的工作温度范围，专为各种工业应用而设计。针对输出短路或过流情况提供内部保护功能，并且此器件配有一个灌电流能力达 30mA 的漏极开路输出级。可以选择是否采用 TMAG5213 器件，但如果使用具有集成霍尔效应锁存器的 BDC 电机，或者对于使用其他电机位置跟踪方法的工程，则可以省略该器件模块。

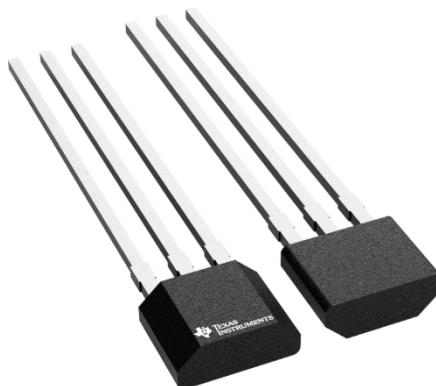


图 1-4. TMAG5213 霍尔效应锁存器

2 BDC 应用

2.1 硬件设置

以下各节将介绍必须采购的硬件、在 EVM 上更改的设置，以及在不对默认固件设计进行任何修改的情况下运行示例所需的必要连接。

2.1.1 DRV8251AEVM 设置

下面介绍了 DRV8251AEVM 电路板，其中跳线安装在正确位置。此外，还提供了一些关于电路板上的开关与滑块位置的注释，以避免在驱动 BDC 电机时出现操作问题。有关如何与该硬件连接的更多说明，请参阅 DRV8251AEVM 用户指南。

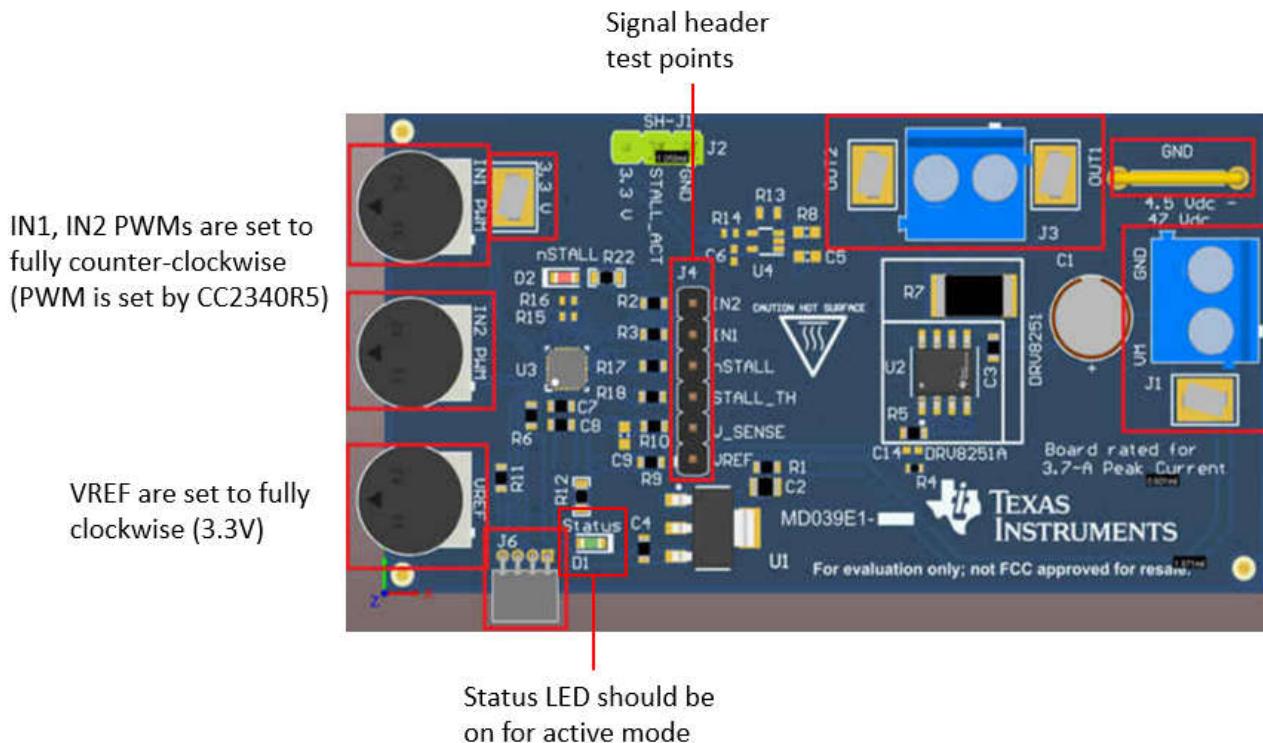


图 2-1. DRV8251AEVM 硬件设置

2.2 连接图

下表中包含 LP-EM-CC2340R5 和 DRV8251AEVM 之间的必要连接，用于演示 BDC 电机。

表 2-1. LP-EM-CC2340R5 和 DRV8251AEVM 之间的连接

连接	CC2340R5 功能	LP-EM-CC2340R5 引脚	DRV8251AEVM 引脚
正向电机控制	PWM 输出	DIO1	IN1
反向电机控制	PWM 输出	DIO5	IN2
电流检测	ADC 输入	DIO24	VSENSE
公共接地	公共接地	GND	GND

BDC 电机导线必须连接到指定的 DRV8251AEVM 引脚。下面列出了必要的电机导线和相应的引脚连接。对于特定电机，请确认执行这些功能的具体导线，并据此进行连接。

表 2-2. DRV8251AEVM BDC 电机连接

连接	BDC 电机导线	DRV8251AEVM 引脚
高侧	M+ (红色)	OUT1
低侧	M- (黑色)	OUT2

TMAG5213 导线必须连接到指定的 CC2340R5 引脚。下面列出了必要的霍尔效应锁存器导线和相应的引脚连接。使用 CC2340R5 数字输出为 TMAG5213 供电，使得 MCU 能够在未驱动 BDC 电机时禁用 TMAG5213 的电源，从而降低睡眠模式下的功耗。该工程使用了 TMAG5213ADQLPG 封装，具有以下资源中突出显示的引脚排列和位置。

表 2-3. LP-EM-CC2340R5 和 TMAG5213ADQLPG 之间的连接

连接	CC2340R5 功能	LP-EM-CC2340R5 引脚	TMAG5213ADQLPG 引脚	TMAG5213ADQLPG 引脚 编号
霍尔效应锁存器电源和开关	数字输出	DIO23	VCC	1
霍尔效应锁存器接地	公共接地	GND	GND	2
霍尔效应锁存器输出	数字中断输入	DIO0	OUT	3

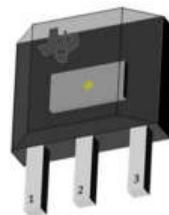


图 2-2. 突出显示了霍尔效应元件的 TMAG5213ADQLPG 引脚排列

下图突出显示了整个系统的硬件设置，将 LP-EM-CC2340R5、DRV8251AEVM 和 TMAG5213 组合起来并布置在 BDC 电机正上方。虽然这展示了具有外部霍尔效应锁存器的通用 BDC 电机设置，但后面几节中讨论的系统是针对窗控器件和控制器应用的特定用例开发的。提供的代码设计也是针对窗控器件和控制器应用定制的，但是可以轻松更改此设计以支持任何具体 BDC 电机应用。

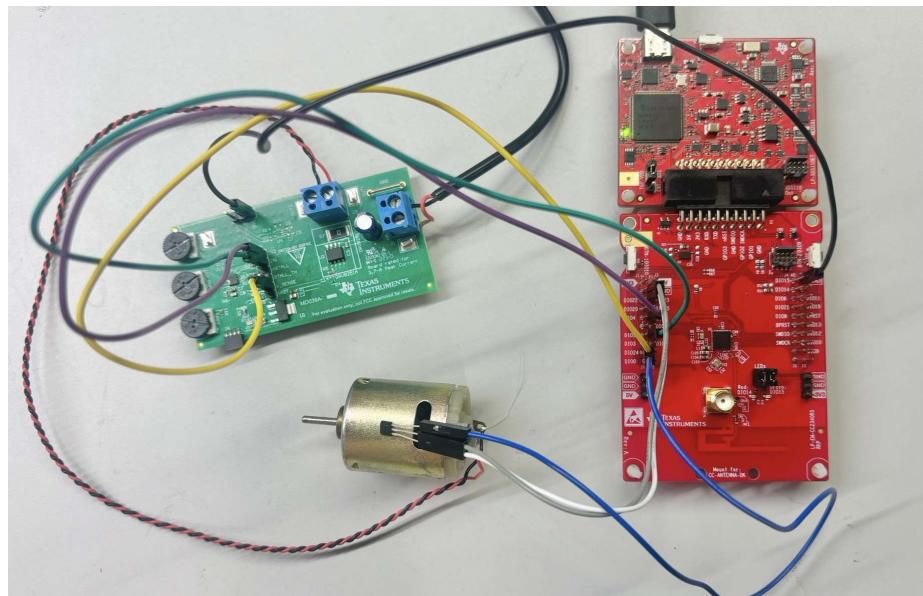


图 2-3. 物理硬件设置

3 运行示例

接下来的几节将讨论固件详细信息，以及每个元件如何工作以驱动 BDC 电机并收集数据。对于本演示中支持的窗控器件和控制器用例，代码分为两个单独的 CCS 工程，window_covering_LP_EM_CC2340R5_freertos_ticlang 用作休眠 Zigbee 终端设备 (ZED)，window_controller_LP_EM_CC2340R5_freertos_ticlang 用作 Zigbee 协调器 (ZC)。窗控器件工程必须刷写到连接到 DRV8251A、TMAG5213 和 BDC 电机的 CC2340R5 LaunchPad 上。窗口控制器工程必须刷写到单独的独立 CC2340R5 LaunchPad 上。有关这些 CCS 工程和相应运行模式的更多信息，请参阅 [Zigbee 组网](#)。

3.1 依赖项

SimpleLink 低功耗 F3 演示 GitHub 上提供的代码工程具有以下依赖项：

- SimpleLink F3 SDK v9.10.0.83
- SysConfig v1.23.1
- TI CLANG v4.0.2 编译器

在尝试将工程导入到 [Code Composer Studio™ \(CCS\)](#) v20 或更高版本之前，请确保计算机上已安装所有这些依赖项。有关设置环境的更多示例，请参阅[面向 CC23xx 的 SimpleLink Academy](#)。请注意，用户有责任迁移和支持上面未列出的任何依赖项版本。请参阅 window_covering_LP_EM_CC2340R5_freertos_ticlang 的工程属性，该属性必须与 window_controller_LP_EM_CC2340R5_freertos_ticlang 的依赖项相同。

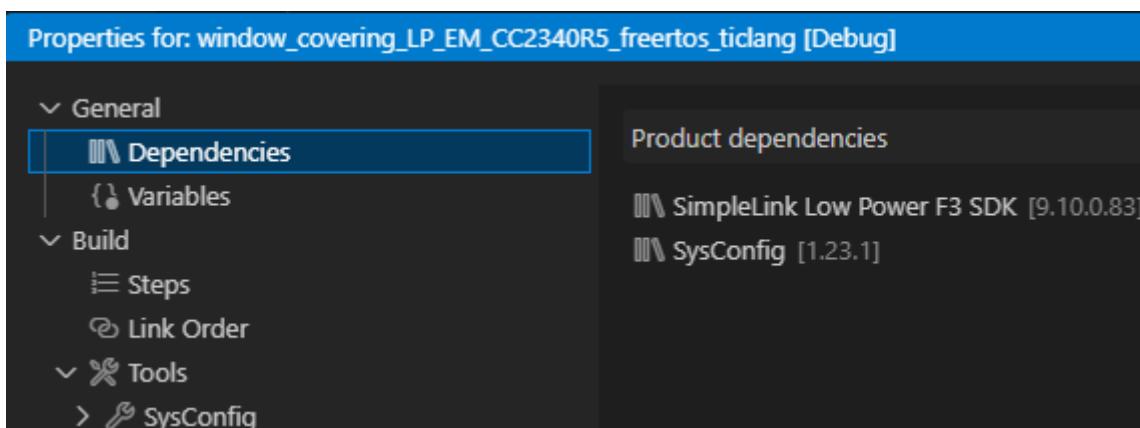


图 3-1. CCS 属性

3.2 加载固件

通过选择 Run -> Flash Project (Ctrl + F5) 或 Debug Project (F5)，可以直接在该 IDE 中加载在 CCS 内构建的项目。TI 建议在没有主动调试项目时退出调试模式，让其自由运行。考虑使用 [UNIFLASH](#) 软件工具来加载二进制映像。

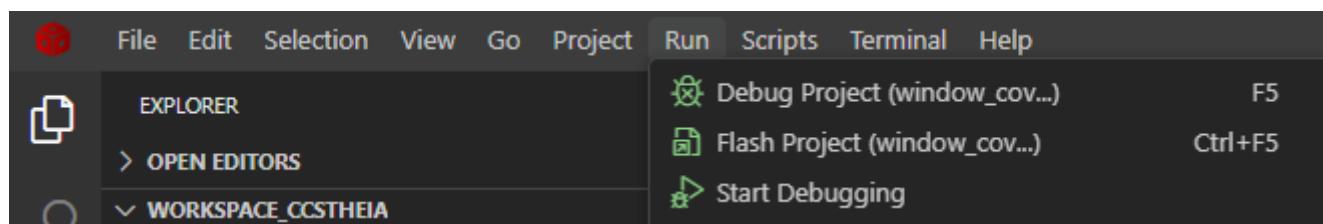


图 3-2. CCS 加载选项

3.3 Zigbee 组网

CC2340R 平台支持 [Zigbee 协议](#) 中使用的 2.4GHz IEEE 802.15.4-2011 物理层 (PHY)。有关特定于协议的问题，请参阅 [Zigbee 用户指南](#)。相关 Zigbee 网络参数在 [SysConfig](#) 工具中配置，包括器件类型和通道选择。这些设置必须在各器件之间保持一致，以验证网络是否正常运行。组网遵循 Zigbee 设备基本行为 (BDB) 规范。要启动网络，首先按下窗口控制器 (ZC) 设备上的复位按钮，这样会使用配置的参数创建网络并打开网络以待加入。然后按下窗控器件 (ZED) 设备上的复位按钮，这样会使 ZED 扫描开放的网络并加入，从而与 ZC 建立通信路径。这一简单的重置按钮操作序列可实现整个调试过程的自动化。加入网络后，设备可以使用受支持的 Zigbee 集群进行通信，无需执行额外的配置步骤即可立即实现功能。使用窗口控制器 LaunchPad 上的 BTN-1，可在发送到窗控器件设备的窗孔器件上升和下降命令之间切换。开发人员要注意，在评估 Zigbee 无线窗口命令之前，应全面测试并了解以下第 4.2 节中介绍的本地窗口操作。

此工程使用 [Zigbee 集群库 \(ZCL\)](#) 中适用于家庭自动化 (HA) 的窗控器件/控制器集群。为了获得更好的结果，请先重置 ZC 并等待一到两秒钟，然后再重置 ZED。有关 Zigbee 组网的更多文档，请参阅 [Zigbee 照明和开关 Project Zero SimpleLink Academy Lab](#) 和 [ZBOSS 用户指南](#)。

4 固件设计

以下各节进一步分析了运行 BDC 电机工程的 `window_covering` 工程的固件。

4.1 代码流程描述

图 4-1 展示了 CC2340R5 代码内部所用过程的代码方框图。Zigbee 功能可从 `window_covering.c` 获取，而电机运行在 `bdc_motor.c` 文件中实现。

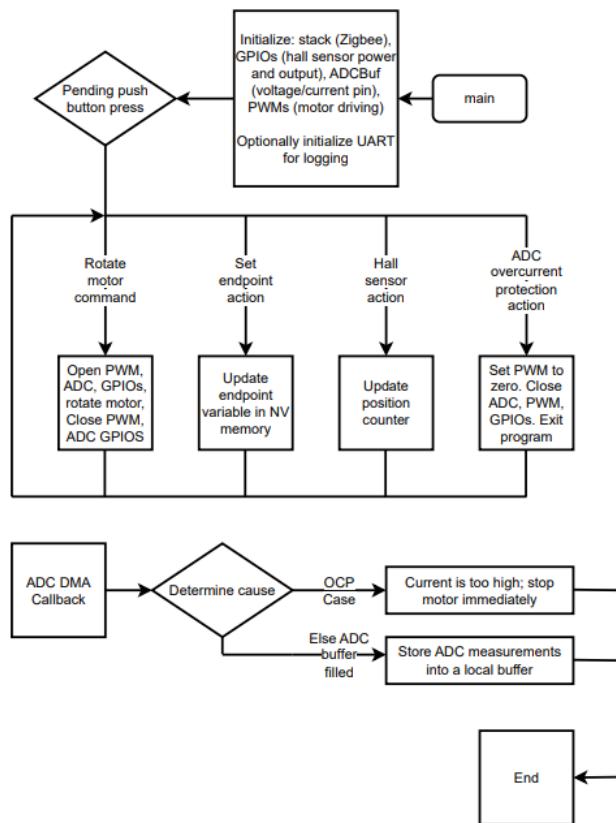


图 4-1. BDC 电机代码图

主函数初始化 BDC 电机示例运行所需的所有 TI 驱动器和计时器。进入主 while 环路后，这会对由硬件回调设置的事件执行进一步的操作。对于提供的应用，通过按下 LaunchPad 上的按钮来触发这些硬件回调。通过子例程维护相应的操作后，会重置事件并且会自动重复该过程。

除一些例外情况外，所有硬件回调都只是发布一个事件以供主应用处理。一种例外情况是 ADCBuf 回调，它会立即处理状态并且不会从主应用程序环路调用任何进一步的操作。

实现了若干定义，用于定义电机的行为，这些定义在以下各节中会被引用。这些可配置的定义在 `bdc_motor.c` 中提供。

表 4-1. 已定义的 BDC 电机应用

定义	默认值	单位	功能
PWM_PERIOD	100	μs	一个 PWM 周期的持续时间
PWM_DUTY_INC	100	μs	在加速期间递增 PWM 占空比或在减速期间递减 PWM 占空比的持续时间
PWM_START_POINT	0	μs	加速起始/减速结束的 PWM 占空比值。通常设置为零
PWM_END_POINT	100	μs	加速结束/减速起始的 PWM 占空比值。在这种情况下，设置为与 100% 占空比下 PWM_PERIOD 相同的值
ADCBUF_SAMPLE_SIZE	100	整数	DMA 传输的 ADC 缓冲区大小
ADCBUF_SAMPLING_FREQ	1000	Hz	ADC 的采样频率。请注意，已完成的 ADC 缓冲区频率等于 ADCBUF_SAMPLING_FREQ / ADCBUF_SAMPLE_SIZE
USE_HALL	已定义	不适用	确定在功能期间是否使用霍尔效应传感器
STALL_TIMEOUT	1000000	μs	定义 USE_HALL 后，令电机停止运行的超时时间，即霍尔效应传感器检测到电机未运行的这段时间
MOVEMENT_TIME	3000000	μs	未定义 USE_HALL 时，令电机停止运行的超时时间，如果电机转动时间超过此持续时间则电机停止运行
OCP_THRESHOLD	800000	μV	触发过流情况的平均 ADC 缓冲区的最小值

4.2 LaunchPad 按钮功能

为了与窗控器件的 BDC 电机进行本地交互，已针对多个事件实现按钮操作，允许用户配置电机端点并顺时针或逆时针旋转电机。下表总结了这些事件。

表 4-2. 用于 BDC 电机的 LaunchPad 按钮操作用

按钮操作	BTN-1 功能	BTN-2 功能
双击	为当前位置设置高端点	为当前位置设置低端点
单击	运动直到达到高端点位置 (USE_HALL 已定义) 或直到运动超时 (USE_HALL 未定义)	运动直到达到低端点位置 (USE_HALL 已定义) 或直到运动超时 (USE_HALL 未定义)
已按下	连续向上运动直至按钮松开	连续向下运动直至按钮松开

定义 USE_HALL 后，TI 建议用户在使用 Zigbee 或按钮单击命令控制电机位置之前，手动旋转电机（即按下按钮）并设置端点（即双击按钮）。未定义 USE_HALL 时，单击按钮电机仅会在所需方向运动 MOVEMENT_TIME。

4.3 非易失性内存

采用非易失性 (NV) 闪存存储器，在记录新值时保存高端点和低端点以及当前电机旋转位置。因此，当器件下电或复位时，这些变量将恢复为之前的值。每次器件擦除闪存存储器时（例如在编程操作期间），必须通过按钮操作重新建立高端点和低端点。NV 存储器仅在定义了 USE_HALL 后使用，并且无法处理 CC2340R5 器件未运行时发生的任何物理电机旋转位置变化。

4.4 双向 PWM 电机控制

该 BDC 电机应用采用 PWM 驱动器来实现正向和反向变速电机控制。这需要使用两个单独的 PWM 计时器以来实现双向控制。实现了电机加速和减速功能，以平稳斜升和斜降占空比，从而突然从零降低到 PWM_DUTY_VALUE。

4.5 ADC 过流保护功能

在这种 BDC 电机应用中，过流保护 (OCP) 的原理是通过对 DRV8251A 的 VSENSE 引脚进行 ADC 采样来持续监测电流。VSENSE 引脚输出与电机电流消耗成正比的电压信号，提供有关电机电气负载的实时反馈。在电机运行期间，CC2340R5 的 ADC 以 1 毫秒的间隔定期对该电压进行采样，并将模拟 VSENSE 读数转换为表示实际电机电流的数字值。当此测量的电流超过预定义的 ocpThreshold 值时，保护机制立即禁用两个 PWM 通道，在发生损坏之前停止电机。过流情况的可能原因包括电机失速、机械障碍或电气故障。该实现利用 DRV8251A 的集成电流检测功能，无需外部电流检测电阻器，同时提供精确、响应迅速的保护功能，在任一方向运行期间均可保护电机和机械系统。该实现方案具有专用的回调函数，可处理 ADC 样本并在必要时触发 OCP 功能，同时还记录故障条件并递增故障计数器以用于诊断目的。

4.6 具有可配置端点、基于霍尔效应的电机位置跟踪功能

此 BDC 电机设计实现了一个外部霍尔效应锁存器，以便能够精确跟踪 BDC 电机的旋转位置。TMAG5213 相对于 BDC 电机的正确定位对于精确监测电机旋转至关重要。如下图中突出显示的那样，BDC 电机内的磁体必须旋转，使磁极围绕一个中心翻转或者在定义的 Z 轴上方旋转。在 CCS 工程中，设置了 GPIO 输入中断，以便每次霍尔效应锁存器设置为高电平时递增计数器。此外，霍尔效应锁存器由 GPIO 输出供电，允许在电机未主动旋转时将其禁用，从而最大程度降低功耗。与基于时间的设计相比，这种基于霍尔效应的电机位置跟踪功能可实现更精确的电机位置跟踪。通过在编译时设置代码中的变量或通过实时按下按钮，可以使用可配置端点来启动和停止电机运行。通过删除 USE_HALL 定义，可以将窗控器件工程配置为使用其他电机位置跟踪方法运行。

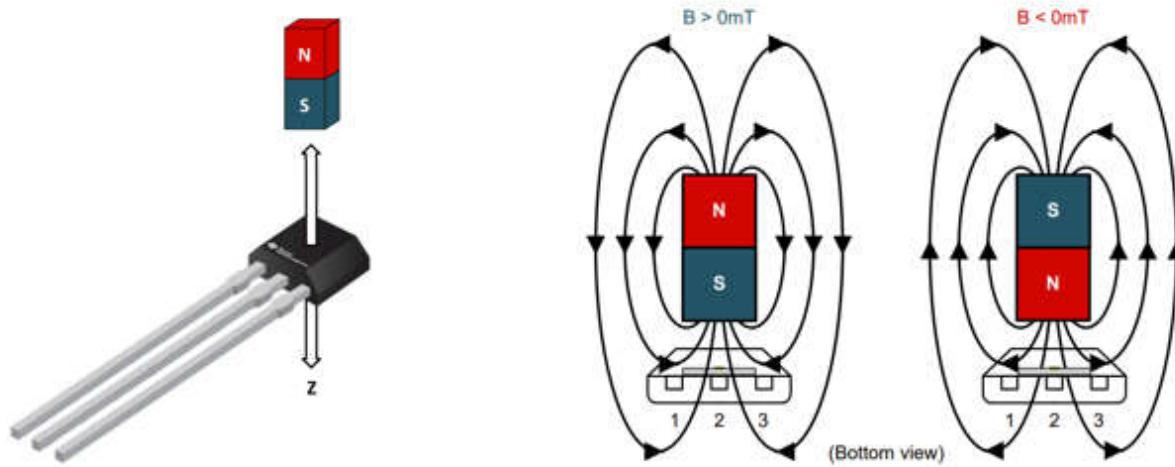


图 4-2. 霍尔效应锁存器磁感应方向

4.7 日志记录功能

可选日志记录功能是此 BDC 电机应用中一个有用的调试工具，可让用户通过 UART 日志接收器实时查看系统运行。该实现采用有着不同严重度级别 (DEBUG、VERBOSE、INFO、WARNING、ERROR) 的结构化日志记录系统，以便根据重要性对消息进行分类。在电机运行期间，记录关键事件并带有时间戳，例如电机启动/停止操作、电流测量、位置更新和故障条件 (例如过流检测)。已经证明，该日志记录功能在开发和故障排除过程中非常重要，因为它可以让用户深入了解运行时序、电机控制期间的事件序列以及可以触发保护机制的特定条件。可以在编译时通过配置设置启用或禁用日志接收器，使开发人员能够在开发过程中包含全面的调试信息，同时削减生产版本的日志记录开销，从而优化性能并减小代码大小。有关更多信息，请参阅[使用 SimpleLink F3 SDK 进行日志记录](#)。

4.8 与第三方智能集线器设备的互操作性

基于 CC2340R5 的 Zigbee 实现通过标准化的 Zigbee 3.0 通信协议，提供与 Amazon Echo、Apple Homepod 和 Google Nest 等热门智能家居生态系统的无缝互操作性。此 BDC 电机应用已通过 Amazon Echo 进行测试。这些智能集线器设备充当 ZC。在调试过程中，CC2340R5 器件 (ZED) 通过标准网络转向程序加入 Amazon Echo 集线器的 Zigbee 网络，之后 Alexa 会根据简单描述符和支持的集群自动识别器件类型。它支持自然语音命令，例如，Alexa，开灯或 Alexa，将风扇设置为 50%。使用第三方智能集线器设备设置 BDC 电机应用需要使用第三方的应用程序以进行 ZC 端配置。

5 测试和结果

本节介绍基于 CC2340R5 的 BDC 电机控制设计的综合性能分析，重点讲解了 PWM 特性、电机位置跟踪、功耗指标和系统可靠性。

5.1 PWM 和霍尔效应信号分析

使用逻辑分析仪，可以在电机运行期间监测两个 PWM 通道和霍尔效应锁存器的 OUT 引脚。捕获过程中，PWM 在进行从 0% 占空比到 100% 占空比的线性加速。由于以加速占空比驱动电机，霍尔效应锁存器监测到电机开始转动。在此期间，霍尔效应锁存器频率增加，直到锁存器频率达到稳态值。电机控制完成后，在电机减速期间可以观察到类似的行为。

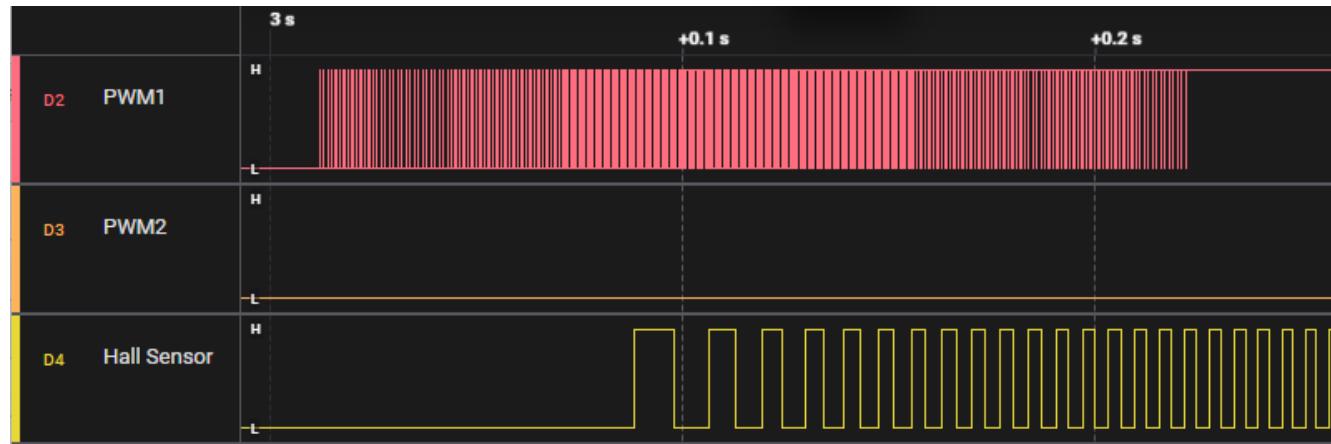


图 5-1. PWM 和霍尔效应锁存器逻辑分析仪捕获结果

5.2 使用 EnergyTrace™ 进行功耗分析

EnergyTrace™ 技术可为基于 CC2340R5 的 BDC 电机控制设计的电源特性提供宝贵见解。EnergyTrace 技术通过 LP-XDS110ET 提供。通过捕获不同运行状态的实时功耗，用户可以评估系统的能效并找到优化机会。

EnergyTrace 捕获过程中，在一次占空比为 100% 的电机运行事件期间，对窗控器件电流进行监测。由于窗控器件作为休眠 ZED 工作且轮询周期为 3 秒，因此当无线电似乎从 ZC 接收任何潜在传输时会出现一个小尖峰。在出现这些尖峰的情况下，平均电流消耗 < 10µA，这是预期的电流消耗值。通过采用更长的轮询周期，可以进一步降低该值。请注意，禁用无线电的情况下，CC2340R5 的待机电流 < 1µA。

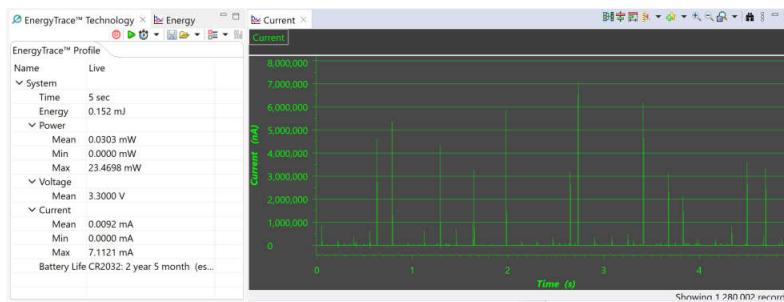


图 5-2. 无线电待机期间 EnergyTrace 捕获窗控器件

在电机运行期间，器件进入工作模式，产生几毫安的电流消耗。这样，就可以将 LGPT 等计时器用于 PWM。在这种情况下，使用 12V BDC 电机时，消耗的电流在电机运行期间为 27。该值取决于使用的具体电机以及电阻特性。电机运行期间的电流消耗还取决于占空比，因为 CC2340R5 必须驱动 DRV8251EVM 上的 IN1 和 IN2 输入。电机运行结束后，器件驱动器关闭，以允许 CC2340R5 重新进入低电流待机模式，等待进一步的电机控制指令。

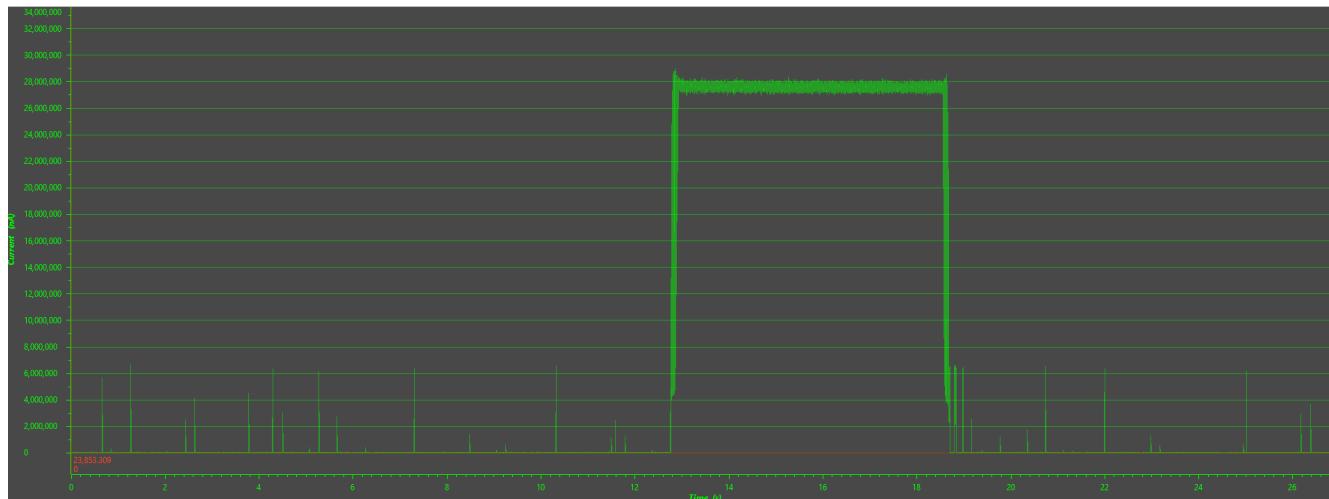


图 5-3. EnergyTrace 捕获窗控器件电机运行

6 总结

本应用手册全面定义了采用 CC2340R5 和 DRV8251AEVM 以及 TMAG5213 的 BDC 电机设计。文中介绍了必需的硬件连接和 MCU 编程说明，从而可让用户进行开箱即用演示。提供测试结果，确认设计的稳定性和稳健性。可自由访问源代码，并且已详细说明代码流，因此开发人员熟悉项目的工作原理，并能够进一步修改项目以满足独特的应用要求。我们鼓励读者在 E2E 论坛发帖，询问与这些提供的资源有关的任何其他问题或支持需求。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI) , [CC2340R SimpleLink™ 2.4GHz 无线 MCU 系列](#) , 数据表。
2. 德州仪器 (TI) , [CC2340R5 LaunchPad 开发套件](#) , 快速入门指南。
3. 德州仪器 (TI) , 带集成电流检测和调节功能的 [DRV8251A 4.1A 有刷直流电机驱动器](#) , 数据表。
4. 德州仪器 (TI) , [DRV8251/AEVM 用户指南](#) , 用户指南
5. 德州仪器 (TI) , 适用于成本优化型设计的 [TMAG5213 霍尔效应锁存器](#) , 数据表。
6. 德州仪器 (TI) , [Zigbee 快速入门指南](#) , 速入门指南。
7. 德州仪器 (TI) , [SimpleLink Academy Labs](#) , 培训。
8. GitHub , [SimpleLink 低功耗 F3 演示](#) , 示例代码。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#))、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025 , 德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期 : 2025 年 10 月