

Application Note

使用具有蓝牙® 低功耗的 SimpleLink™ CC2340R5 微控制器进行 BLDC 电机控制



Ryan Brown and Tarek Darwiche

Connectivity LPCS

摘要

本应用手册介绍了在单个微控制器设计中向无刷直流 (BLDC) 电机设计添加蓝牙®低功耗 (LE) 无线电协议的功能。BLDC 电机通常用于受益于嵌入式无线电的应用，这些应用包括电动钻、遥控 (RC) 汽车和电动牙刷。本文档中介绍的物料展示了 CC2340R5 如何使用 DRV8329 完成此任务。

本文档提供的实施方式使用硬件评估模块 (EVM)，这些模块通过 TI.com 提供，固件在 SimpleLink 低功耗 F3 演示 GitHub 上免费提供。对所需的硬件连接和固件操作均进行了详细说明。这样，开发人员在获得 BLDC 电机后即可完整运行演示，并进一步修改项目以满足要求。此外，还提供了其他测试数据，以便用户可以完全了解工作条件和应用扩展选项。

内容

1 简介.....	3
1.1 CC2340R5.....	3
1.2 DRV8329A.....	3
1.3 BLDC 电机.....	4
2 BLDC 硬件.....	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 电机连接测试.....	9
3.4 具有蓝牙®低功耗且带霍尔传感器的 BLDC 电机陷阱运行.....	10
4 固件设计.....	13
4.1 代码流程描述.....	13
4.2 定制 TI 驱动器.....	14
4.3 应用事件.....	15
4.4 换向表.....	15
4.5 电机加速.....	15
4.6 ADC 运营.....	15
4.7 旋转检测功能.....	16
4.8 报告统计信息.....	16
4.9 蓝牙®低功耗栈.....	16
5 测试和结果.....	17
6 总结.....	19
7 参考资料.....	19

插图清单

图 1-1. LP-XDS110ET 和 LP-EM-CC2340R5 连接.....	3
图 1-2. DRV8329AEVM.....	4
图 1-3. 带有霍尔效应传感器的 BLDC 电机.....	4
图 2-1. DRV8329A 硬件设置.....	5

图 2-2. 物理硬件设置.....	7
图 3-1. CCS 属性.....	8
图 3-2. CCS 加载选项.....	8
图 3-3. PuTTY UART 选项.....	9
图 3-4. 预定义符号.....	10
图 3-5. BLDC 电机无霍尔测试.....	10
图 3-6. SimpleLink Connect 应用.....	11
图 4-1. BLDC 电机代码图.....	13
图 5-1. BLDC 电机示波器屏幕截图.....	17
图 5-2. BLDC 电机切换.....	18

表格清单

表 2-1. CC2340R5 和 DRV8329AEVM 之间的连接.....	6
表 2-2. BLDC 电机和 DRV8329AEVM 之间的连接.....	6
表 3-1. SimpleLink™ Connect 应用和 UART 接口操作.....	12
表 4-1. BLDC 电机应用定义.....	14
表 4-2. 应用例程和功能.....	15
表 4-3. 蓝牙® 低功耗栈配置.....	16
表 5-1. BLDC 电机应用性能.....	17

商标

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

蓝牙® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

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

Windows® is a registered trademark of Microsoft Corporation.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

CC2340R5 是一款功能强大的低成本微控制器单元 (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。

当与 **DRV8329** 配合使用时，可以通过蓝牙®低功耗无线电通信使用 **CC2340R5** 的霍尔效应传感器陷阱设计来控制 BLDC 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 BLDC 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开发环境，其中包含单核软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集。这些器件针对低功耗无线通信进行了优化，并支持无线下载 (OAD) 功能，适用于楼宇自动化 (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。

该 **LP-EM-CC2340R5** 开发套件可借助支持蓝牙低功耗 5 和 2.4GHz 专有协议的 SimpleLink 蓝牙低功耗 MCU 加快开发速度。**SIMPLELINK-LOWPOWER-F3-SDK** 能提供软件支持，可使用 **Code Composer Studio™** IDE 进行构建。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。**LP-XDS110ET** 或 **LP-XDS110** 调试器 (单独出售) 能用于编程、调试和评估射频。

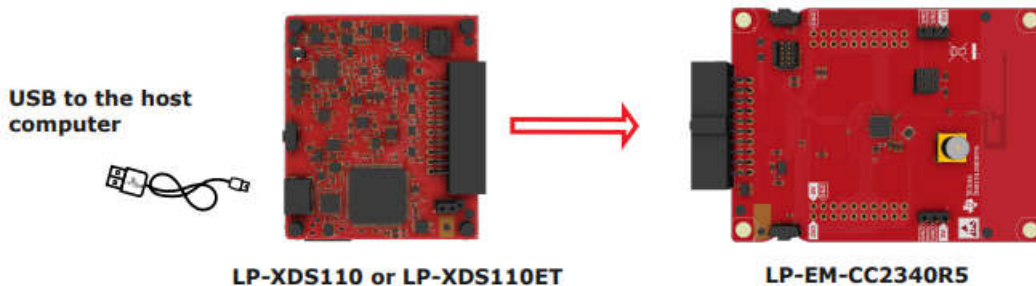


图 1-1. LP-XDS110ET 和 LP-EM-CC2340R5 连接

1.2 DRV8329A

DRV8329 系列器件是适用于三相应用的集成式栅极驱动器。这类器件具有三个半桥栅极驱动器，每个驱动器都能够驱动高侧和低侧 N 沟道功率 MOSFET。该器件使用内部电荷泵生成合适的栅极驱动电压，使用自举电路增强高侧 MOSFET。该器件具有涓流电荷泵，支持 100% 占空比。此栅极驱动架构支持高达 1A 的栅极驱动峰值拉电流和 2A 的栅极驱动峰值灌电流。**DRV8329** 由单一电源供电，支持 4.5V 至 60V (直流) 的宽输入电源电压范围。

DRV8329AEVM 是一款基于 **DRV8329A** 栅极驱动器 (适用于 BLDC 电机) 的 30A 三相无刷直流驱动级。**DRV8329** 包含三个二极管用于自举操作，因此无需使用外部二极管。该器件包含用于低侧电流测量的电流分流放大器、80mA 低压降稳压器 (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。**EVM** 包含用于评估这些设置的开关、电位计和电阻器，可面向 **DRV8329** 器件 A 型 (6x PWM) 和 B 型 (3x PWM) 进行配置。可向此 **EVM** 提供高达 60V 的电压，**DRV8329** 的集成 LDO 可为自举 GVDD 电源提供所需的栅极电压。状态 LED 以及针对所有电源的故障 LED 都已设置，用于向用户提供反馈。

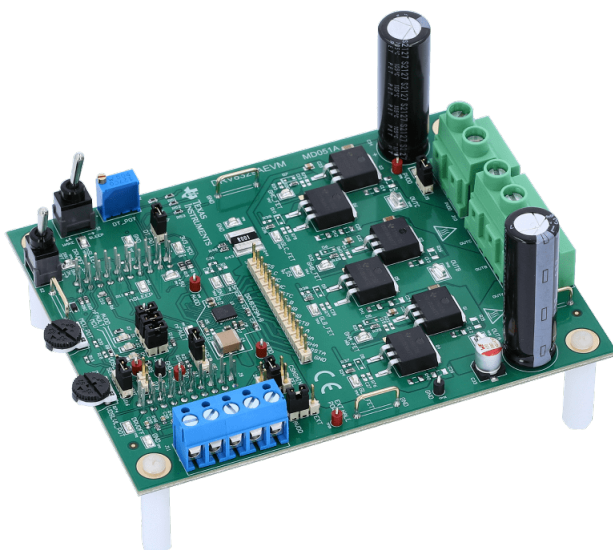


图 1-2. DRV8329AEVM

1.3 BLDC 电机

无刷直流 (BLDC) 电机是一种由直流 (DC) 电源驱动的同步电机。此类电机需要通过控制器切换直流电流，以驱动三个电机定子产生磁场，从而带动永磁体旋转。在本文档中，接口电路以单极驱动方式，通过六路 PWM 分别控制三个独立相的高、低端。本应用手册重点介绍如何使用霍尔效应传感器设计来测量转子位置以及沿换向表相应地进行切换。因此，若要按预期运行该项目，必须使用带有霍尔效应连接的电机。若使用不带霍尔效应传感器的基本 BLDC 电机，则需进行进一步的修改。

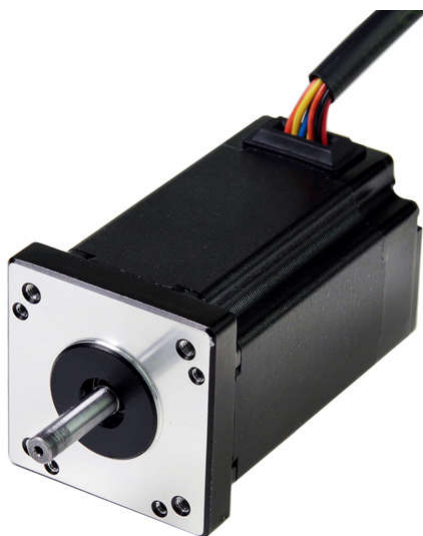


图 1-3. 带有霍尔效应传感器的 BLDC 电机

2 BLDC 硬件

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 DRV8329AEVM 设置

图 2-1 展示了 DRV8329AEVM 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 BLDC 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 DRV8329AEVM 用户指南。

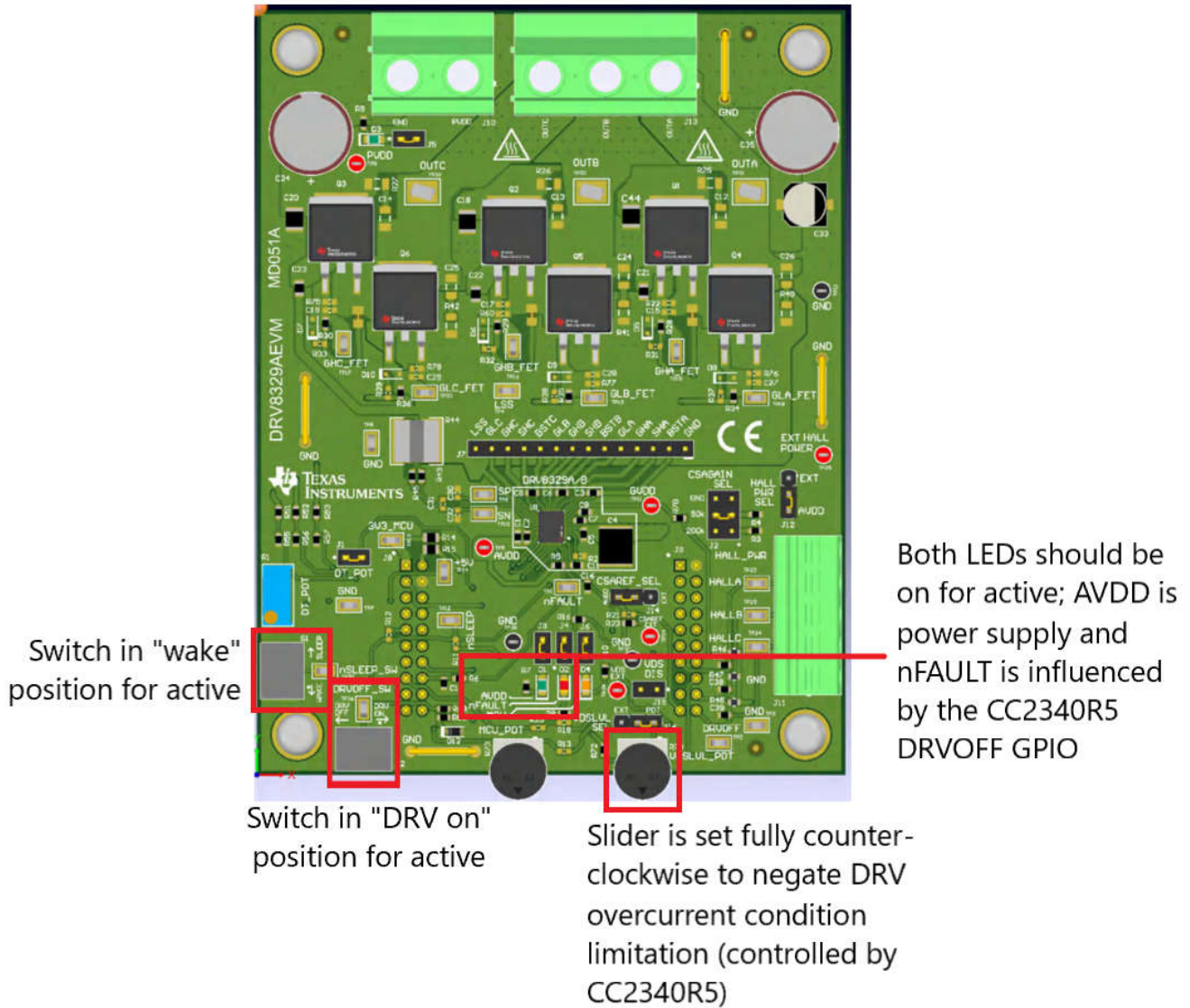


图 2-1. DRV8329A 硬件设置

2.2 连接图

表 2-1 是 DRV8329AEVM 和 CC2340R52 之间的连接，能演示 BLDC 电机。

表 2-1. CC2340R5 和 DRV8329AEVM 之间的连接

连接	CC2340R5 功能	CC2340R5 引脚	DRV8329AEVM
A 相 HS	PWM 输出	DIO24	INHA
A 相 LS	PMW 输出	DIO8	INLA
B 相 HS	PWM 输出	DIO12	INHB
B 相 HL	PWM 输出	DIO21	INLB
C 相 HS	PWM 输出	DIO6	INHC
C 相 LS	PWM 输出	DIO11	INLC
霍尔 A	数字中断输入	DIO23	HALLA
霍尔 B	数字中断输入	DIO18	HALLB
霍尔 C	数字中断输入	DIO13	HALLC
总线电压	ADC 输入	DIO7	VSENPVDD
A 相电压	ADC 输入	DIO1	VSENA
B 相电压	ADC 输入	DIO2	VSENB
C 相电压	ADC 输入	DIO5	VSENC
分流电流	ADC 输入	DIO0	ISENA
DRV 故障	数字中断输入	DIO14	nFAULT_49C
UART TX	UART 传输输出	DIO20	不适用
UART RX	UART 接收输入	DIO22	不适用
通用接地	GND 连接	GND	GND

BLDC 电机导线必须连接到指定的 DRV8329AEVM 引脚。表 2-2 中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. BLDC 电机和 DRV8329AEVM 之间的连接

电机导线	DRV8329AEVM 连接器	电机图像示例颜色
VCC	HALL_PWR	红色
HU/PH1	HALLA	橙色
HV/PH2	HALLB	黄色
HW/PH3	HALLC	蓝色
GND	GND	黑色
U	OUTA	橙色
V	OUTB	黄色
W	OUTC	蓝色

最终结果类似于图 2-2。请注意，LED 接头跳线已从 LP-EM-CC2340R5 上移除，因为这些 GPIO 用于其他目的。通过 DRV8329AEVM 上的 J10 为有效电源供电后，两个切换开关 S1 和 S2 必须分别定向到 **wake** 和 **on** 位置，以使绿色 AVDD (D1) 和红色 nFAULT (D2) LED 亮起。

每当 CC2340R5 通过将 DRVOFF 引脚设置为高电平来启用 DRV 电机驱动器时，nFAULT LED 都会清除。nSLEEP 和 DRVOFF 线路是 DRV8329A 的输入，该器件由 EVM 切换开关硬件控制，但可选择通过进一步的固件开发由 CC2340R5 进行控制。

CC2340R5 DIO6 引脚用作 PWM 来控制 BLDC 电机，但 LP-EM-CC2340R5 还会将此引脚连接到板载外部闪存器件的 nCS。除非移除 LaunchPad 上的 R24 和 R25，否则这会导致额外的功耗。

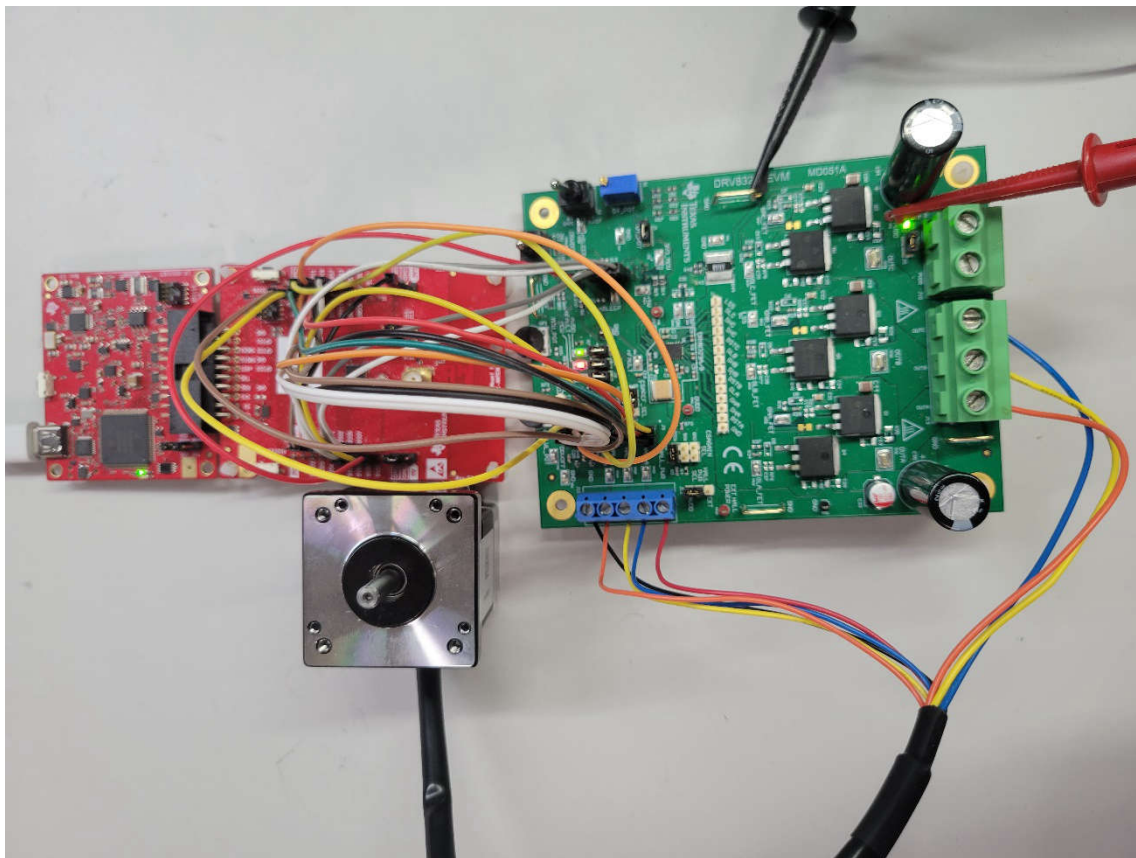


图 2-2. 物理硬件设置

3 运行示例

接下来的几节将介绍固件详细信息，以及每个元件如何工作以驱动 BLDC 电机并收集数据。

3.1 依赖项

低功耗 [SimpleLink F3 演示 GitHub](#) 上提供的代码工程使用 SimpleLink F3 SDK v8.40.0.61、[SYSCONFIG](#) 和 TI CLANG v4.0.0 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。

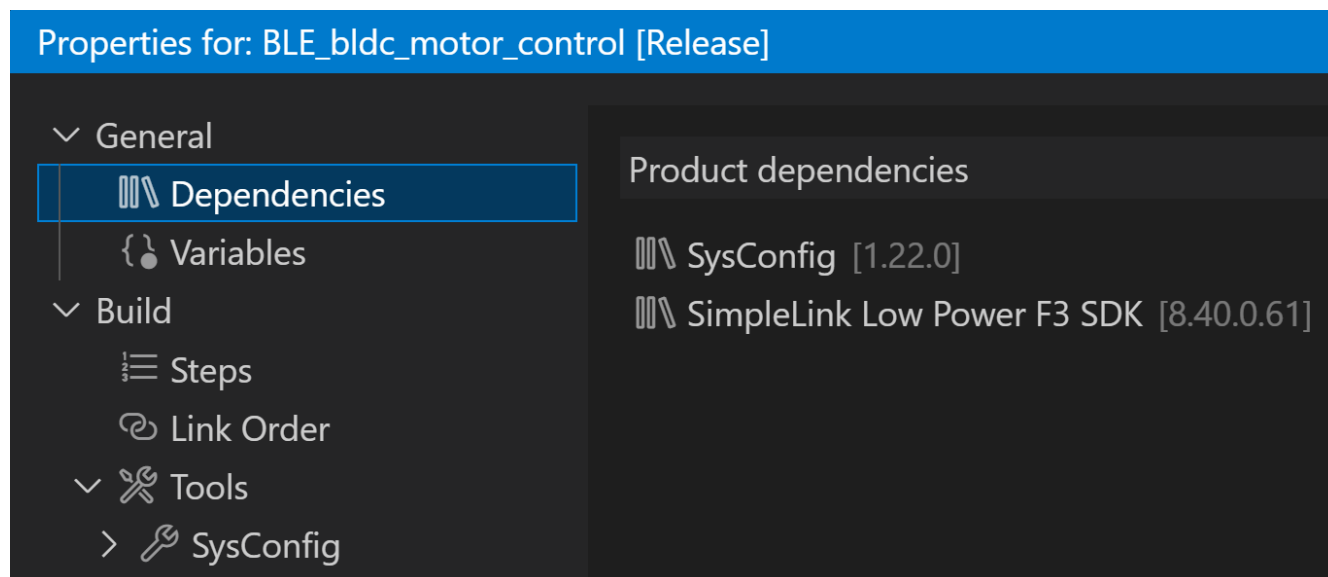


图 3-1. CCS 属性

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。

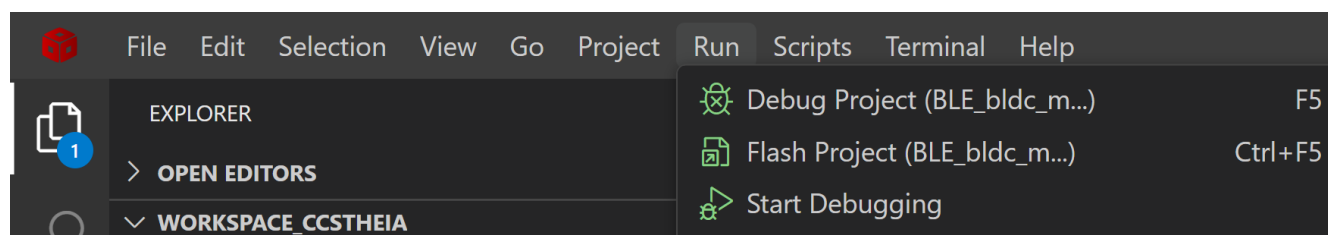


图 3-2. CCS 加载选项

3.3 电机连接测试

随项目提供了测试固件设置，用于测试 DRV8329AEVM 上电机相位连接 (OUTA、OUTB、OUTC) 的方向，并监控霍尔效应传感器中断 (HALLA、HALLB、HALLC)，以确定连接方向是否正确。该过程通过 UART 终端输出相位表和霍尔传感器位置，并使用以下设置：921600 波特、8 个数据位、1 个停止位、无奇偶校验、无流控制。COM 端口与计算机系统中显示的应用程序 UART 相同。在以下示例中，PuTTY 软件用于 Windows® 操作系统，但只要使用正确的设置，任何 UART 终端或操作系统都是可接受的。

请注意，必须在应用中完全禁用 UART，以在电机未旋转时实现待机功耗，否则需要开启工作模式才能持续监控 RX 引脚。通过在 `app_bldc_motor_control.c` 文件中取消定义 `USE_UART`，可以从应用代码中删除 UART。

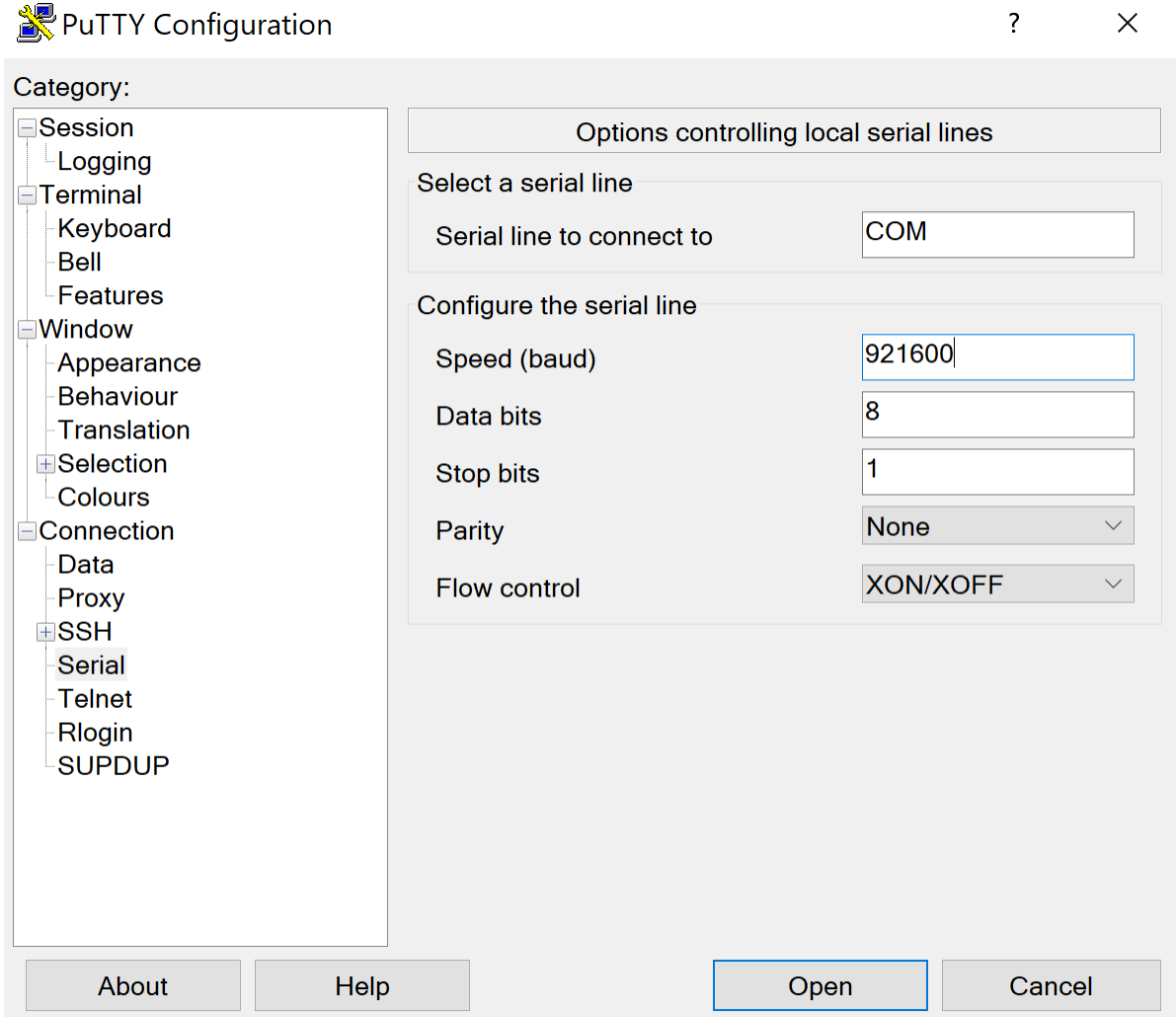


图 3-3. PuTTY UART 选项

要启用该选项，请在“Project Properties -> Build -> Tools -> Arm Compiler -> Predefined Symbols”中添加 `TEST_NO_HALL`。然后，重新构建并加载项目。

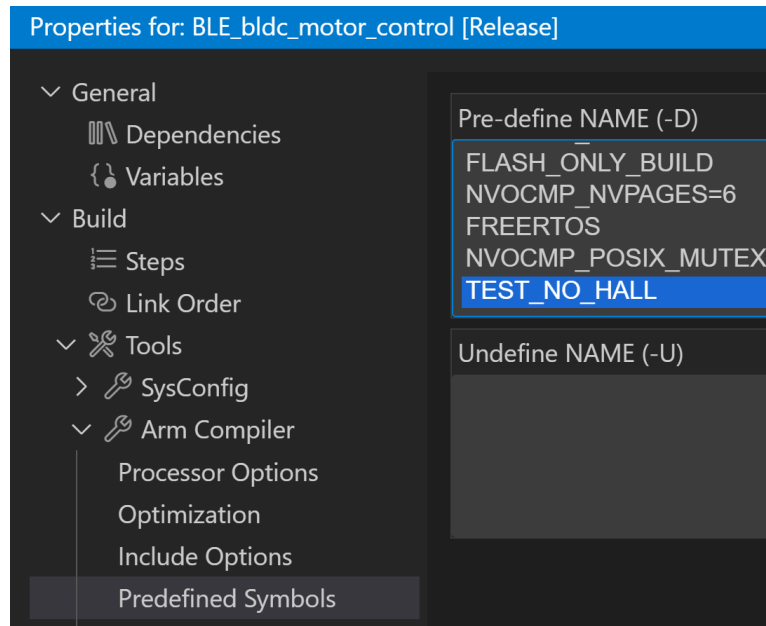


图 3-4. 预定义符号

显示 BLDC 电机主菜单后，按键盘上的 **s**（确保已主动选择 UART 终端窗口），即可以正向 10% 的占空比启动电机（从转子轴正面观察时，正方向定义为逆时针方向）。如果电机方向与预期相反，则考虑交换两个 OUT 电机相位。否则，再次按 **s** 即可停止电机（或复位 LaunchPad），然后依次调整 DRV8329AEVM 上的 HALL 输入，直到 UART 输出与所示的序列完全一致为止。这样可以确保在启用霍尔传感器后，BLDC 电机能按预期正常运行。

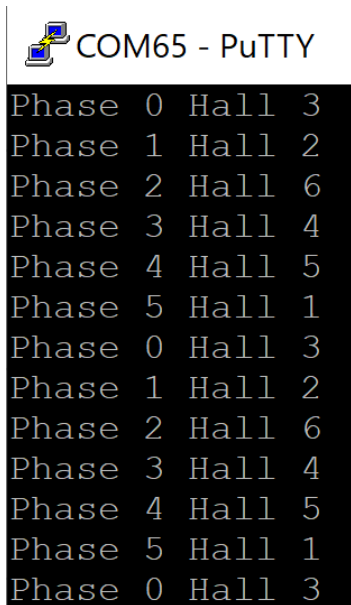


图 3-5. BLDC 电机无霍尔测试

3.4 具有蓝牙® 低功耗且带霍尔传感器的 BLDC 电机陷阱运行

确认所有电机连接均正确后，用户可运行默认示例。在重建和加载项目之前，请确保已移除 TEST_NO_HALL 预定义。

3.4.1 SimpleLink™ Connect 手机应用

此演示使用开箱即用的 SimpleLink Connect 手机应用 (可通过 [SimpleLink™ Apple Store](#) 或 [SimpleLink™ Play Store](#) 下载) 与 BLDC 电机固件进行交互。CC2340R5 器件运行后, 用户可以使用 **扫描仪** 功能进行定位, 并连接到 **蓝牙低功耗/BLDC 电机** 器件。然后, 选择 **TI Simple Peripheral Service**, 即可开启相关特性的访问权限。

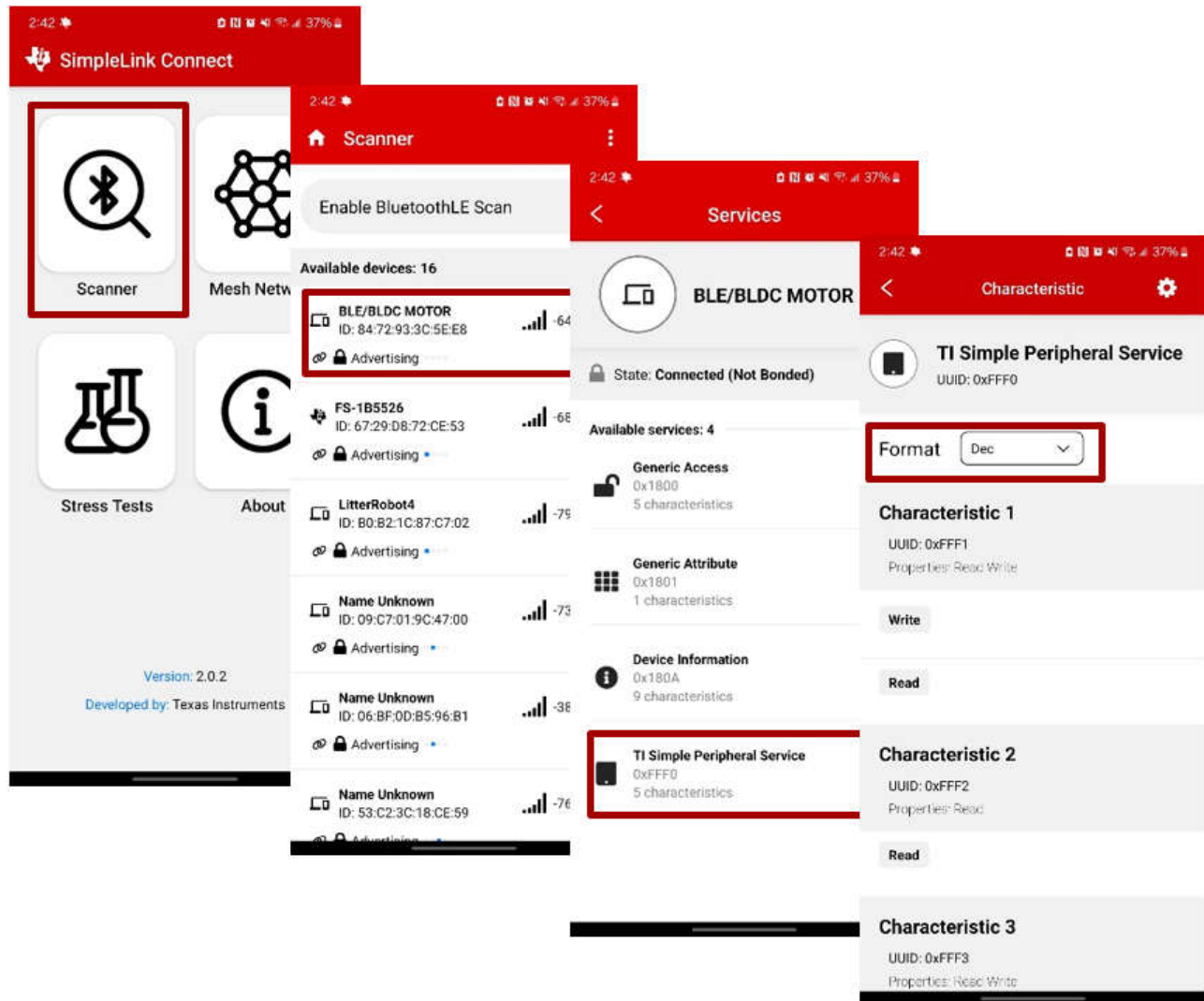


图 3-6. SimpleLink Connect 应用

为此项目创建了自定义蓝牙低功耗配置文件。该配置文件基于 SDK 中基本蓝牙低功耗示例 (*simple_gat.c*) 中的简单 GATT 配置文件, 同时对每个特性的属性进行重大修改, 以实现此项目所需的功能。在 SimpleLink™ Connectivity 手机应用中, 此选项显示为 **TI Simple Peripheral Service**。表 3-1 反映了与电机交互的所有可用蓝牙低功耗选项, 包括前面的电机连接测试部分中所述的低功耗蓝牙特性和 UART 接口。

表 3-1. SimpleLink™ Connect 应用和 UART 接口操作

操作	SimpleLink Connect 接口	UART 键盘条目
启动电机	将 1 写入特性 1	s (如果电机停止)
停止电机	将 0 写入特性 1	s (如果电机正在运行)
查看 RPM	读取特性 2 (十六进制格式)	l (字母)
正向	将 1 写入特性 3	f
反向	将 0 写入特性 4	r
占空比百分比	写入特性 5 (十进制格式)	不适用
增加占空比	不适用 (请参阅特性 5)	u
降低占空比	不适用 (请参阅特性 5)	d

4 固件设计

现在默认 BLDC 电机项目按预期运行，并进一步分析了固件。

4.1 代码流程描述

图 4-1 展示了 CC2340R5 代码内部所用过程的简单代码方框图。该功能在 `app_bldc_motor_control.c` 文件中实现。

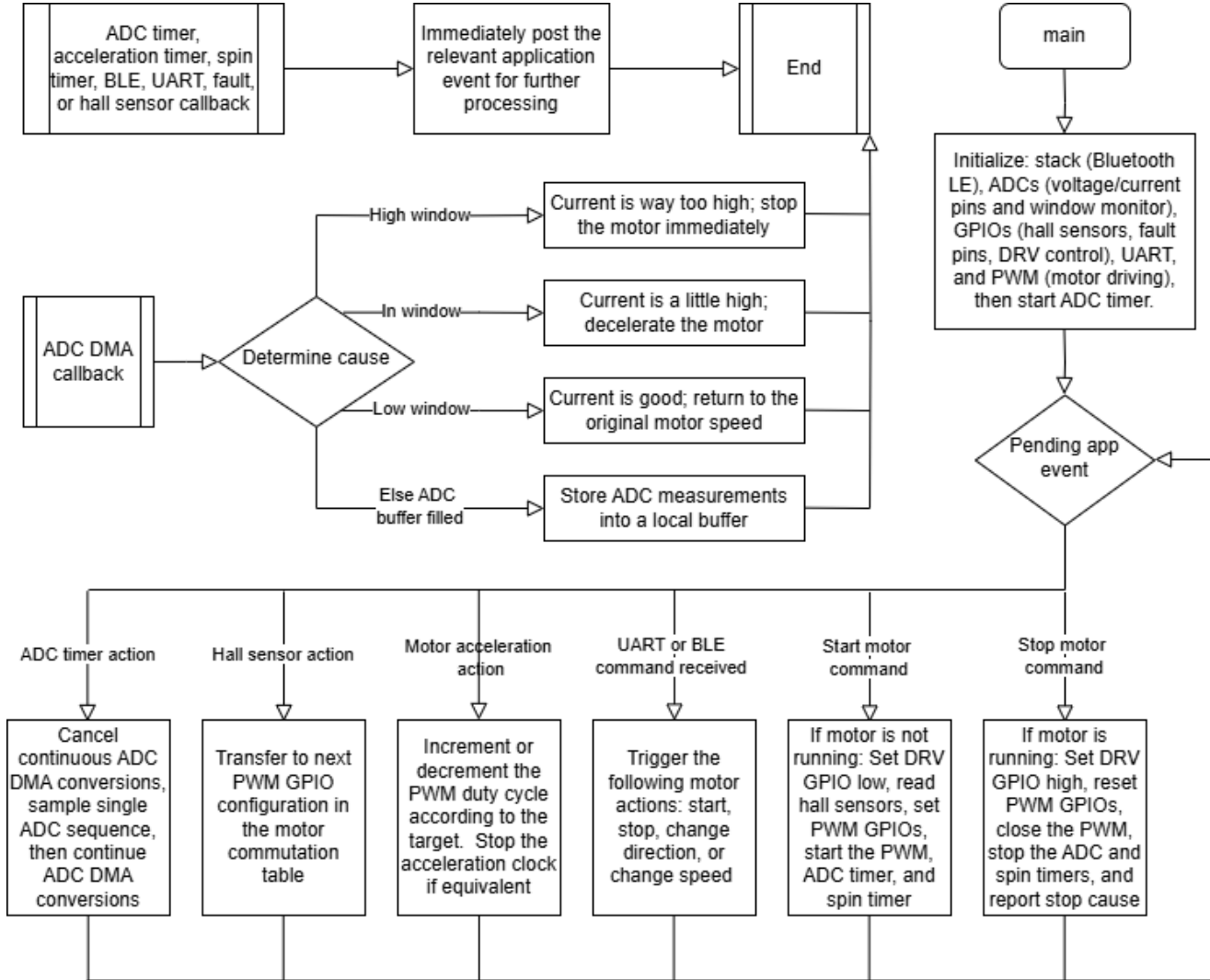


图 4-1. BLDC 电机代码图

主函数初始化 BLDC 电机示例运行所需的所有 TI 驱动器 and 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。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，除非超过了窗口比较器阈值，否则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。表 4-1 显示了位于 `app_bldc_motor_control.h` 中的可配置定义。

表 4-1. BLDC 电机应用定义

定义	默认值	单位	功能
PWM_PERIOD	40000	Hz	PWM 周期除以 2 (适用于上升或下降模式) , 因此为 20kHz
DUTY_MAX	80	%	允许的最大 PWM 占空比
DUTY_MIN	10	%	允许的最大 PWM 占空比
DUTY_INC	5	%	UART 命令的 PWM 占空比增量
MAX_STRING	20	整数	单个 UART 字符串中的最大字符数
SPIN_TIMEOUT	1000000	μs	如果电机在此时间段内未完成一次旋转, 则电机驱动器将停止
RPM_INTERVAL	500000	μs	报告 RPM、CPU 负载和 ADC 测量计数的时间间隔
ACCEL_INTERVAL	10000	μs	增加或减少 PWM 占空比之前的延时时间
CHANGE_DELAY	1000000	μs	改变方向之前停止电机后的延迟
ADC_COUNT	5	整数	启用的 ADC 通道的数量
ADC_INTERVAL	100000	μs	对单个 ADC 序列进行采样的时间间隔 (需要先停止然后重新启动 ADC DMA 缓冲器)
VSEN_THRESHOLD	2000	整数	触发电机停止所需的原始电源 ADC 值
WINDOW_LOW	1500	整数	低窗口监控器的原始电流 ADC 值
WINDOW_HIGH	3000	整数	高窗口监控器的原始电流 ADC 值
ADCSAMPLESIZE	128	整数	DMA 传输的 ADC 缓冲区大小

4.2 定制 TI 驱动器

有一些 TI 驱动器已经过定制, 可以满足 BLDC 电机运行的特定需求。经过修改的驱动器应用文件已包含在项目目录中, 用于替代 SDK 版本中打包的原始驱动文件。

4.2.1 PWM

PWM TI 驱动器最初设计用于在上升模式下仅从计时器驱动一个通道输出。对于 BLDC 电机, 对 *PWMTimerLPF3.c* 进行了修改, 以便通过单个计时器驱动所有三个通道输出 (表示三个电机相位)。驱动器还采用上升或下降模式, 这对于在占空比的中途触发电机电流测量非常重要。PWM_PERIOD (上升或下降模式除以 2 后为 20kHz) 是驱动 BLDC 电机时的典型 PWM 频率, 除非特别熟悉电机设计, 否则 TI 不建议更改此值。

4.2.2 ADCBuf

默认 ADCBuf 在单个通道上以重复单模式运行。由于本应用需要连续采样两路通道 (电流 ISEN 和电压 VSENPVDD) , 因此重复序列模式更为合适。因此, *ADCBufLPF3.c* 也配置为通过 ADC 外设的 FIFO 而不是单个存储寄存器传输数据。

原始 TI 驱动程序还能选择自动开始后续 ADC 转换。这并不适合电机设计, 因为需要在 PWM 占空比中途测量电流。因此, ADC 设置为在 PWM TI 驱动器的 LGPT 达到目标值 (上升或下降模式) 时, 触发对第一个 ADC 通道 (ISEN) 的转换。随后立即测量下一个 ADC 通道 (VSENPVDD), 该过程一直持续到缓冲区填满为止。

ADCBuf 回调操作还包括窗口监测器高电平、中电平、低电平中断的状态处理, 该中断在 *app_bldc_motor_control.c* 文件中进行初始化。通过这种方式, 应用可以通过 DMA 接收到窗口监控器变化或 ADC 缓冲区完成的通知。

4.2.3 电源

在 `app_bldc_motor_control.c` 中添加了一个自定义策略函数，用于计算 CPU 不执行任何操作时的空转时间。然后将其作为应用总 CPU 使用量的测量值报告给用户。`bldc_motor.syscfg` SysConfig 文件电源模块直接引用该自定义策略函数，以便使用该函数。请仅将该功能用于测试和评估。

4.3 应用事件

当用户操作或硬件回调设置事件时，将处理以下例程。

表 4-2. 应用例程和功能

例程	功能
ACTION_UART	处理通过用户输入接收的蓝牙低功耗或 UART 功能（如前文所述）。开发人员可以修改此部分以确定具体功能和用户界面。
ACTION_CONTINUE	通过将 DRV 引脚驱动至低电平、设置最小占空比、初始化正确的电机 GPIO 状态、启动应用计时器以及打开 PWM TI 驱动器来启动电机。如果 PWM TI 驱动器已打开，则不会执行此例程。
ACTION_STOP	通过将 DRV 引脚驱动为高电平、复位电机 GPIO 引脚、停止相关的应用时钟以及停止 PWM TI 驱动器来停止电机。同时通过 UART 报告停止的原因。
ACTION_HALL	在霍尔传感器引脚回调之后，读取所有霍尔传感器状态并相应地继续执行电机换向表。
ACTION_PWM	每当加速时钟到期时执行，用于递增或递减占空比值，直到达到目标值；达到目标后停止加速时钟。

4.4 换向表

每当霍尔传感器 GPIO 从高电平切换为低电平，或从低电平切换为高电平时，系统都会使用电机换向表选择下一个电机相位状态。因此，`reversePhaseTable` 或 `forwardPhaseTable` 数组取全部三个霍尔传感器的总位掩码值，并确定要由 `forwardDirection` 或 `reverseDirection` 函数提供服务的下一种情况。这些函数会通过直接的硬件寄存器命令，相应为每个电机相位设置正确的预期配置。

4.5 电机加速

由于电机无法实现显著的瞬时占空比变化，例如从 20% 到 80%，因此会使用加速时钟每隔 `ACCEL_INTERVAL` μ s 将占空比递增或递减 1%。占空比输出与预期目标匹配后，此时钟就会停止。应用实施了预防措施，以确保占空比保持在 `DUTY_MIN` 和 `DUTY_MAX` 范围内。减小 `ACCEL_INTERVAL` 会加快电机切换占空比，但会提高电流峰值。

4.6 ADC 运营

使用单个 CC2340R5 的 ADC 外设时，由于需要测量的 ADC 输入数量（`ADC_COUNT` 为五个）多于可用的寄存器数量（四个），并且还必须在每个 PWM 占空比输出周期（即以 `PWM_PERIOD/2` 的速率）采样 `ISEN` 引脚（电机电流），因此对所有相关 ADC 通道进行测量存在一定难度。所采用的实现方式是使用经过修改的 `ADCBuf` TI 驱动器，它利用 ADC 和 DMA 在不中断 CPU 的情况下快速高效地填充大小为 `ADCSAMPLESIZE` 的 ADC 缓冲区，持续测量 `ISEN` 和 `VSEN`（系统电压），并在此过程中定期中断此过程，同时以 `ADC_INTERVAL` 的速率测量其余 `VSENA`、`VSENB` 和 `VSENC` ADC 引脚。因此，由于每次 `ADC_INTERVAL` 计时器到期时触发的单次 ADC 测量所需的时间和频率，通过 `ADCBuf` 获取的每个通道的 ADC 测量次数略低于 `PWM_PERIOD/2`。由于 `ADCBuf` 驱动器已配置为通过 PWM LGPT 活动触发 ADC，因此在电机停止时，驱动器不会进行测量。相比之下，每当 `ADC_INTERVAL` 发生时，单次 ADC 测量都是有效的，与电机是否运转无关。

在 ADC 外设上还启用了窗口监控器，以便在最新的 `ISEN` 测量值进入或超过窗口限制时，能够立即采取相应措施，并在 `adcBufCallback` 中进行进一步处理。当测量值超过 `WINDOW_LOW` 时，ADC 回调状态 `ADC_INT_INIFG` 会减少 PWM 占空比，直到占空比低于窗口值为止。此时，`ADC_INT_LOWIFG` 状态会使占空比回到原始值。如果超过 `WINDOW_HIGH`，则 `ADC_INT_HIGHIFG` 状态会立即停止电机。任意 ADC 存储寄存器都可以触发窗口监控器，但低窗口阈值和高窗口阈值各只能设置一个值。目前仅 `ISEN` 配置为使用存储寄存器 2 并启用了窗口监控器，因此只有 `ISEN` 可以触发窗口监控器。由于 `ISEN` 在两个 ADC 存储寄存器（0 和 2）之间切换，窗口监控器对 `ISEN` 的评估速率约为 10kHz。

每当 ADC 回调被触发且不是由窗口监控器状态引起时，表示 ADC 缓冲区已填充。应用会使用 ADC 转换的结果填充 `outputBuffer` 数组，并评估接收到的 `VSEN`（系统电压）ADC 转换超过 `VSEN_THRESHOLD` 时是否需要停止电

机。所有转换均为 12 位分辨率 (最大值为 4096)，并以原始格式保留。尽管 TI 驱动器中还提供了额外的处理 API，可用于进一步调整这些值并将其转换为 μV 格式。必须小心操作，确保这些处理不会干扰电机驱动功能。

4.7 旋转检测功能

每次电机启动时都会启动应用计时器，如果电机未在每 SPIN_TIMEOUT μs 内完成一次完整旋转，则应用计时器就会到期。这样可以防止在电机未运转时，PWM TI 驱动器仍对电机各相输出信号。计时器会在每次换向表完整迭代时重启；当电机通过其他应用方法被命令停止时，计时器也会停止。

4.8 报告统计信息

在每个 RPM_INTERVAL (μs) 内，系统都会根据各自子进程的计数对统计信息进行更新。当前启用的统计信息包括 CPU 负载 (以百分比形式表示) 和 RPM (以每分钟转数为单位) (rpmValue)。另一个选项是每秒进行的总 ADCBuf 测量值 (adcTotal)。这些信息由 UART 或蓝牙低功耗接口向用户报告，同时也可以在活动调试会话的表达式窗口中查看。需要注意的是，当电机转速超过约 25k RPM 时，统计信息的报告方式可能干扰电机换相，从而引发故障 (故障表现为 DRV8329A 停止电机运转，并将 nFAULT 引脚拉低，反馈给 CC2340R5)。因此，TI 建议在应用中通过蓝牙低功耗报告的信息尽可能简短和精炼。

4.9 蓝牙® 低功耗栈

此示例基于 SimpleLink 低功耗 F3 SDK v8.40 中的开箱即用[基本蓝牙® 低功耗项目](#)和[数据流](#)蓝牙低功耗示例。但是，为实现本应用手册中所述项目的目标，蓝牙低功耗配置文件经过了大量修改。所有与蓝牙低功耗栈无关的项目功能都在蓝牙低功耗任务上下文之外处理，因为这不会导致任务无法运行或面临影响蓝牙低功耗连接的风险。器件用作蓝牙低功耗外设，并使用以下参数进行广播，但这些参数是高度可配置的。有关蓝牙低功耗扫描和广播的更多信息，请参阅 SimpleLink Academy Scanning and Advertising 实验课程。

表 4-3. 蓝牙® 低功耗栈配置

蓝牙® 低功耗元件	值
广播类型	连接蓝牙低功耗并扫描蓝牙低功耗非定向广播
主 PHY 间隔最小值和最大值	100ms、100ms
主要 PHY	1M PHY

当在 app_connection.c 文件中接收到连接建立事件时，CC2340R5 会向蓝牙低功耗中央设备发送一个 MTU 交换请求，以增大在与蓝牙低功耗配置文件特征值交互时可传输的数据的大小上限。要执行此操作，在 SYSCFG 文件中蓝牙低功耗栈的常规配置中，PDU 的最大大小已增加到 255。这一设置在[节 5](#)提到的吞吐量测试中得到了广泛应用。

5 测试和结果

对于各种占空比输出，系统记录了有源蓝牙低功耗连接的 CPU 负载和 RPM 测量值，并在表 5-1 中提供。请记住，占空比对应的 RPM 在很大程度上取决于所用 BLDC 电机的物理属性和特性。

表 5-1. BLDC 电机应用性能

占空比 (%)	RPM	CPU 负载 (%)
10	1080	3
30	5040	5
50	10800	8
70	15120	11
90	23520	15

使用逻辑分析仪可以更直观地观察到 BLDC 电机的驱动过程，包括三相高、低端的导通情况，以及霍尔传感器信号电平之间的切换过程

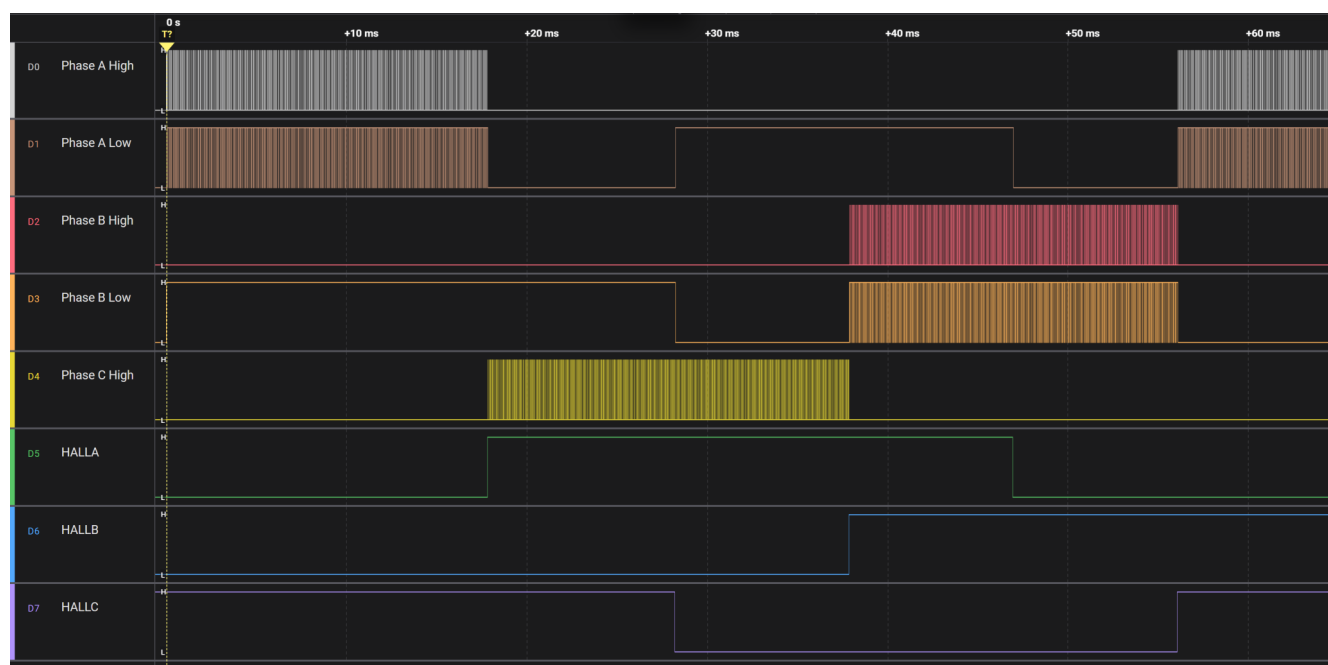


图 5-1. BLDC 电机示波器屏幕截图

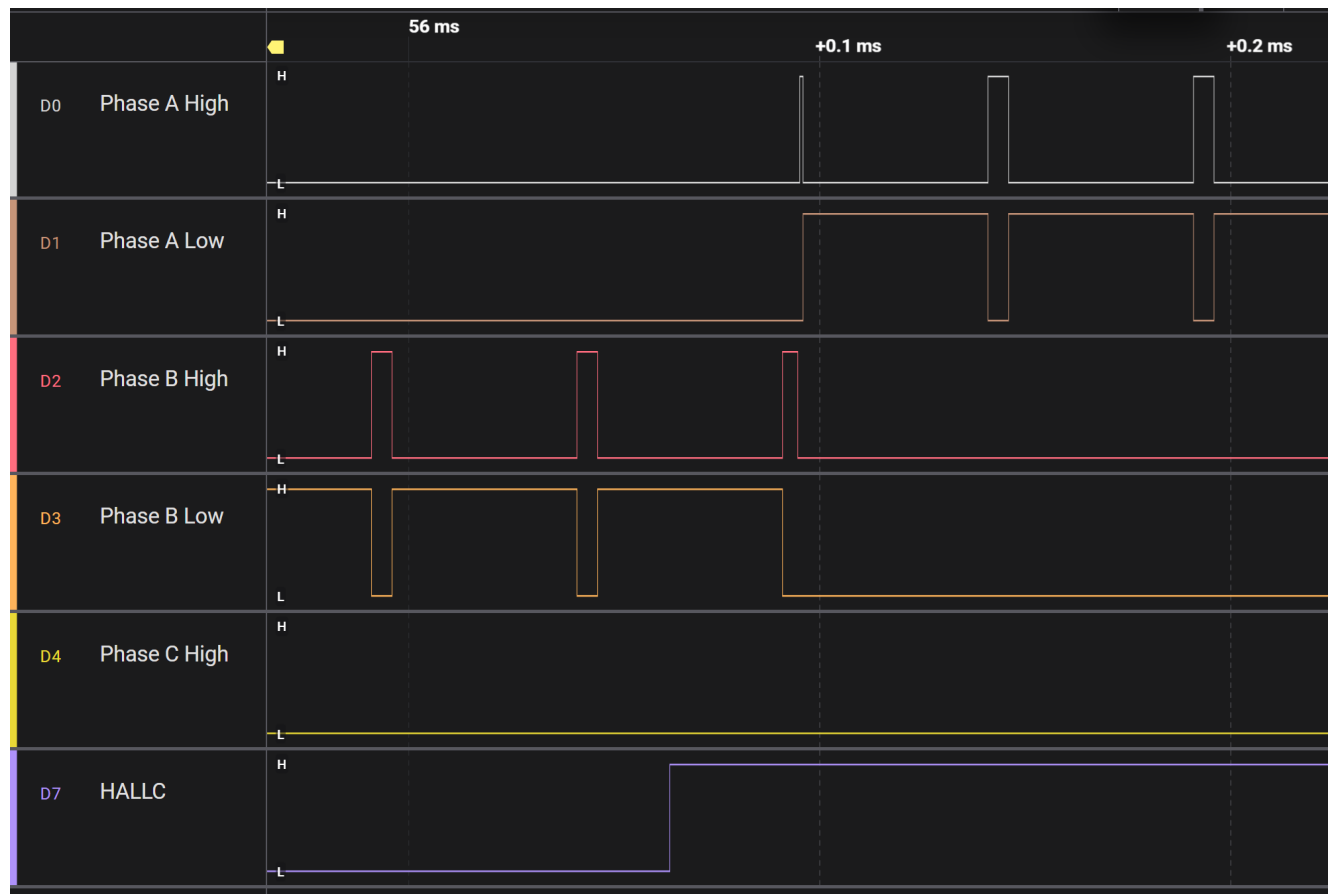


图 5-2. BLDC 电机切换

当禁用 UART 外设，未启用蓝牙低功耗行为且未主动旋转 BLDC 电机时，CC2340R5 LaunchPad 的功耗低于 $1\mu\text{A}$ 。

通过 CCS 内部的“Memory Allocation”视图确定，默认工程需要 184kB 的闪存（不包括为非易失性内存保留的 16kB）和 32kB 的 SRAM。禁用 UART 可节省 3kB 的闪存，而在不使用蓝牙低功耗栈的情况下构建的项目总共仅消耗 22kB 的闪存和 15kB 的 SRAM。

添加了一个吞吐量测试，用于粗略估算通过蓝牙低功耗配置文件的特性 5 所能发送的最大数据量。为了执行此测试，初始化了一个时钟实例，用于通过通知发送 247 字节的数据。该器件已连接到中心，其连接间隔为 45ms。在此连接下，在保持 80% 占空比的同时，实现了 380Kbps 的吞吐量。吞吐量测试取决于多种因素，例如连接间隔和 CPU 开销（在本例中为电机占空比），因此这些数字只是一个粗略估计值，可以通过适当的修改进行改进。应力测试默认情况下处于禁用状态，但可通过将 `app_peripheral.c` 中 `ClockP` 实例的启动标志设置为 `True` 来轻松添加应力测试。

6 总结

本应用手册全面定义了使用 SimpleLink CC2340R5 和 DRV8329A 的 BLDC 电机霍尔效应传感器陷阱实施。文中介绍了必要的硬件连接和 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，确认实施的稳定性和稳健性。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。我们鼓励读者针对德州仪器 (TI) 在 E2E 论坛上发帖，询问任何其他问题或与所提供资源相关的支持需求。

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)，[了解 CC2340R5 LaunchPad 开发套件](#)，快速入门指南
3. 德州仪器 (TI)，[DRV8329 4.5V 至 60V 三相 BLDC 栅极驱动器](#)，数据表
4. 德州仪器 (TI)，[DRV8329AEVM 用户指南](#)
5. 德州仪器 (TI)，[BLE5-Stack 用户指南](#)
6. 德州仪器 (TI)，[面向 CC23xx 的 SimpleLink Academy](#)
7. 德州仪器 (TI)，[测量 CC13xx 和 CC26xx 电流消耗](#)，应用手册
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