

## Design Guide: TIDA-010086

## 数字控制成本优化型 10A 电池化成与测试参考设计



## 说明

本参考设计为多通道电池化成与测试应用提供了一种具有成本效益的设计。该设计采用 C2000™ 实时微控制器 (MCU)，搭载 16 通道同步采样精密 ADC，并可扩展来支持 8 通道电芯测试。该设计采用 HRPWM 模块实现精确占空比控制，从而达到精密数模转换器的性能，同时节省超过 30% 的物料成本。该 MCU 集成了 2p2z 控制，可实现恒流 (CC) 和恒压 (CV) 控制运行。多通道 ADC 通过软件优化了电流与电压环路的灵活性。该设计持通过单一方式实现多级电流与电压输出。

## 资源

<a href="#">TIDA-010086</a>	设计文件夹
<a href="#">TMS320F28P65</a>	产品文件夹
<a href="#">ADS9324、INA630</a>	产品文件夹
<a href="#">UCC27284、REF50E</a>	产品文件夹

## 特性

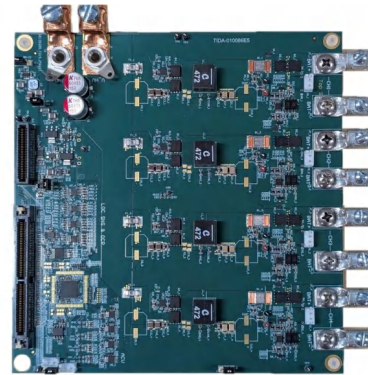
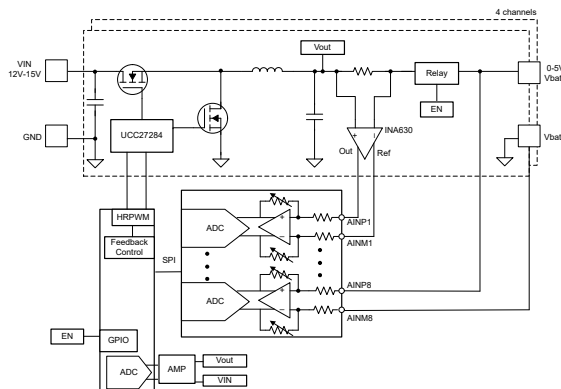
- 高达 10A 的双向电流控制，精度小于  $\pm 0.02\%$
- 支持  $\pm 5V$  真双极性输入且可直接连接到电池电芯的 16 通道 SAR ADC
- 充电和放电时均支持恒压模式，调节误差  $< \pm 1mV$
- 软件频率响应分析器 (SFRA) 可实现简单的闭环瞬态响应调优

## 应用

- [电池测试](#)
- [可编程直流电源](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



## 1 系统说明

### 1.1 锂离子电芯化成设备

电池测试仪设备包括各种用于测试单个电芯、电池模块和高压电池包的设备。需要执行各种测试来验证锂离子或其他类型电池电芯的性能、容量和安全性。电池化成是电芯制造中的关键步骤之一。这个过程需要对单个电芯进行精密的充电和放电，以形成固体电解质界面 (SEI) 层。电芯分级和电气测试可评估每个电芯的容量和内部电阻。这些测试需要准确的电流和电压充放电曲线和实时数据记录，以获取详细的性能数据。

典型的测试设备需要精密双向电源和数据采集系统，以实现电池电芯的高精度电流和电压充电或放电，精度通常优于满量程的  $\pm 0.05\%$ 。随着电池容量的提升以及集成化多功能测试系统的普及，多通道电源得以实现更大数量的电池电芯测试通道。

可采用两种方法管理充放电周期并提供精密测试条件。表 1-1 所示为这两种方法之间的差异：

**表 1-1. 模拟和数字控制**

方面	模拟控制	数字控制
控制逻辑	使用模拟元件的基于硬件的反馈环路	在 DSP 上运行的基于软件的算法
灵活性	配置固定；变更需修改硬件	可通过软件灵活配置；易于实现负载补偿并支持多种测试配置文件
复杂性	基本功能设计更简单，但高级功能的实现更加复杂	软件开发更复杂，但硬件结构更简洁，易于扩展
响应时间	得益于模拟反馈，具有快速、连续的响应	快速响应需要具有微秒级延迟、ADC 及 MCU 速度
精密	高精度且对元件容差和漂移敏感	在具备适当 ADC 分辨率和校准能力时可实现高精度；抗漂移能力更强
数据记录	有限；需要额外的电路进行数据采集	内置通过 MCU 记录数据的功能，支持详细分析和可追溯性
成本	简单系统成本较低；复杂的高精度设计成本较高	对于可扩展的多功能系统更具成本效益

TIDA-010086 参考设计采用数字控制方案，基于 TMS320F28P650DK MCU 与 16 通道集成 PGA、SAR ADC，构建多通道同步降压转换器，实现高精度、快速响应与高信号链密度设计。

### 1.2 主要系统规格

**表 1-2. 主要系统规格**

参数	规格
低压端口 - 电池端口	50mV 至 5V
高压端口 - 总线电压	12V 至 15V
开关频率	250kHz
每通道最大双向直流电流	10A
电流控制精度	$\pm 0.02\%$ FSR
电压控制精度	$\pm 0.02\%$ FSR
电流瞬变时间	$< 100 \mu s$
功率级和运行模式	同步降压转换器，CCM 模式

## 2 系统概览

### 2.1 方框图

图 2-1 显示了参考设计的方框图。TMS320F28P650DK MCU 为同步降压功率级生成高分辨率 PWM，并执行电流和电压控制功能。INA630 电流检测放大器检测电池电流，ADC 终端直接连接到电池以进行电压检测。电流和电压信号由外部 ADS9324 ADC 转换为数字数据。C2000™ 片上窗口比较器实现过流保护。

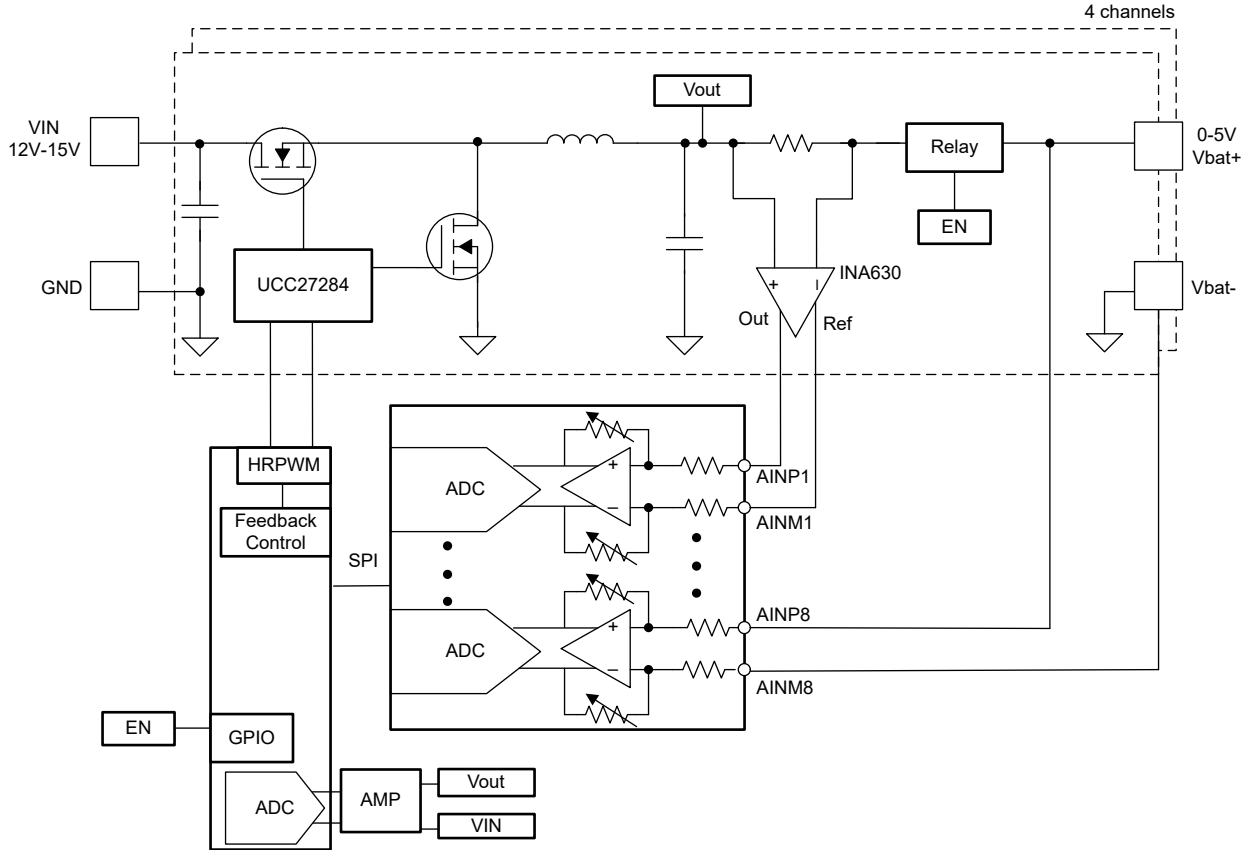


图 2-1. TIDA-010086 系统方框图

## 2.2 系统设计原理

### 2.2.1 反馈控制器

图 2-2 显示了电流和电压控制环路的软件实现。电压环路与电流级联，以便在充电和放电模式下实现恒流和恒压。当电池电压远离恒压设置 (VSET) 时，电压环路饱和并至恒流设置 (ISET)。当电池电压接近 VSET 时，电压环路闭合，并且 ISET 减少以确保电池电压不超过 VSET 限值。该控制器可在充电和放电模式下工作。在充电模式下，VSET 限制最大电池电压，从而停止充电。在放电模式下，VSET 限制旨在停止放电的最小电池电压。

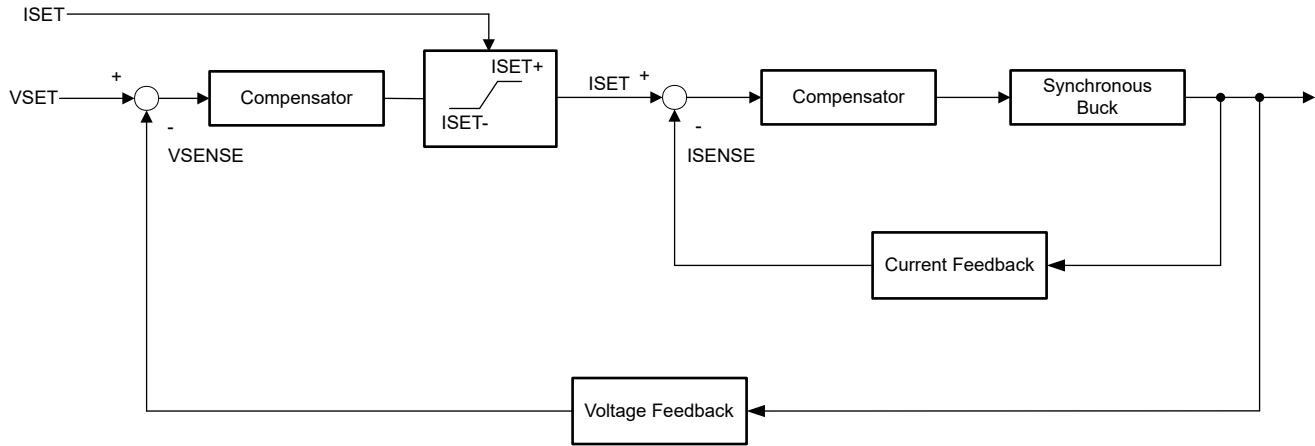


图 2-2. CCCV 反馈控制器

### 2.2.2 直流/直流转换器启动

双向功率级用于对电池进行充电和放电。在正常启动条件下，降压转换器输出从 0V 增加到目标电压。如果在降压转换器从 0V 斜升时连接电池负载，这会导致很大的电流过冲。可以通过两种方法来避免问题。第一种方法是在输出继电器断开的情况下启动降压转换器，并在降压转换器接近电池电压时将继电器设置到闭合位置，如图 2-3 所示。第二种方法是在 DCM 模式下启动降压转换器，其中低侧开关在充电期间断开，或高侧开关在放电期间断开，如图 2-4 所示。从非同步模式切换到同步模式需要一个计时器。

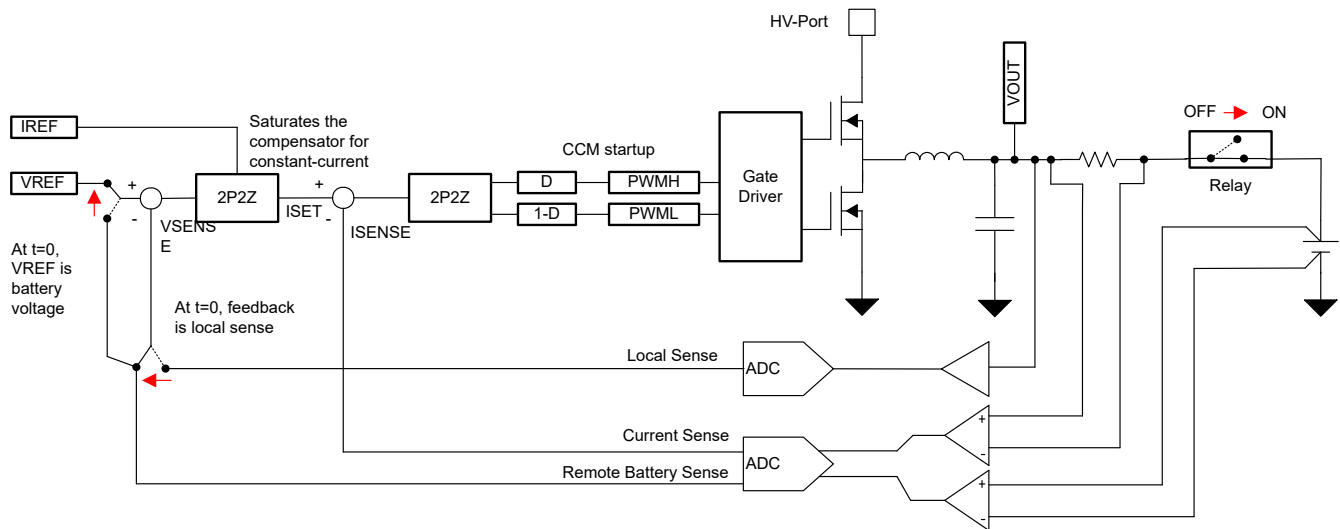


图 2-3. 同步启动

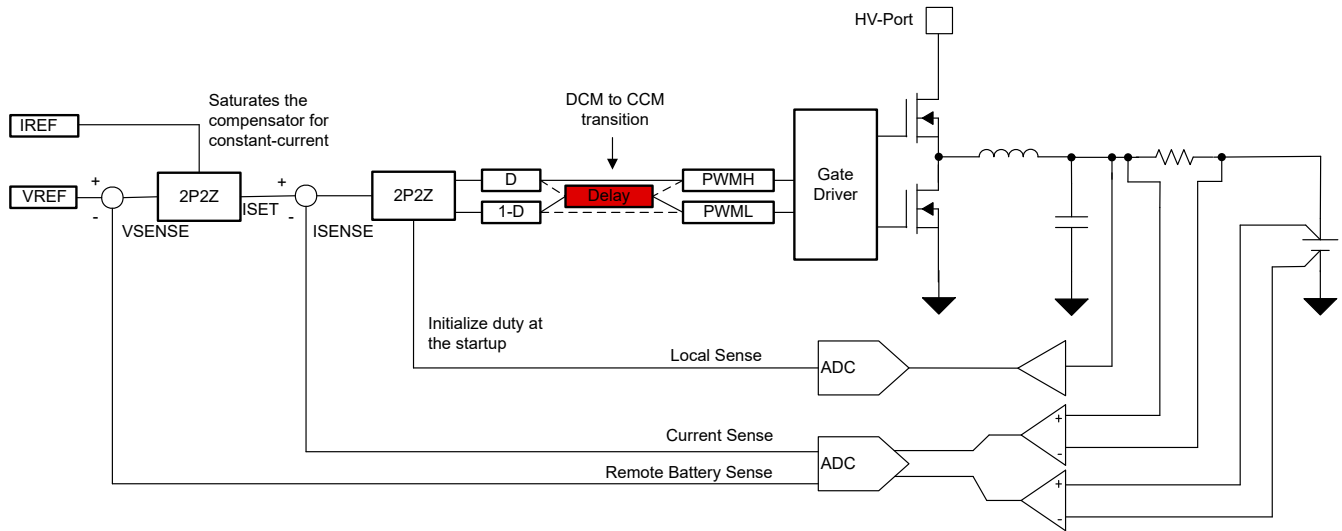


图 2-4. 非同步启动

### 2.2.3 高分辨率 PWM 生成

高分辨率 PWM 可实现高精度反馈控制。该高分辨率计数器提供了 150ps 的时间阶跃功能。对于 250kHz 的开关频率和 200MHz EPWMCLK，这种方法可提供大约 14.7 位的分辨率。表 2-1 显示不同开关频率下的 PWM 分辨率。

表 2-1. PWM 和 HRPWM 的 C2000™ MCU 分辨率

PWM 频率 (kHz)	常规分辨率 (PWM)		高分辨率 PWM	
	100MHz EPWMCLK			
	位	%	位	%
20	12.3	0.02	18.1	0
50	11	0.05	16.8	0.001
100	10	0.1	15.8	0.002
150	9.5	0.15	15.2	0.003
200	9	0.2	14.8	0.004
250	8.6	0.25	14.4	0.005

### 2.2.4 输出电感器和电容器选型

输出电容器的值和电容器的 ESR 决定了输出电压纹波和负载瞬态性能。该电容器旨在实现出色的输出电压纹波和负载瞬态性能。

方程式 1 计算降压电流的占空比。

$$D = \frac{V_{OUT(max)}}{V_{IN(min)}} \times \text{Efficiency} = \frac{6V}{12V} \times 90\% = 55.5\% \quad (1)$$

电感器纹波电流通常定义在输出电流的 0.2 至 0.3 倍之间。由于控制环路需要快速响应，可以按较小的值来选择电感器。因此选择 0.2 作为纹波电流系数。在计算一些裕度时使用了 12A 的满量程，因此电感器纹波电流估计为 2.4A。

当  $T_{off}$  达到方程式 2 中所示的最大值时，降压转换器中连续导通模式 (CCM) 的最坏情况就会发生。

$$\Delta I_L = \frac{(V_{OUT(max)}) \times (1 - D)}{f_S \times L} \quad (2)$$

求解该公式，电感值需要高于  $4.45 \mu\text{H}$ 。电感器的电感值越小，具有的饱和电流越大。该设计选择了  $4.7 \mu\text{H}$  电感器。方程式 3 计算实际电感器电流。

$$\Delta I_L = \frac{6\text{V} \times (1 - 0.555)}{250\text{kHz} \times 4.7\mu\text{H}} \cong 2.27\text{A} \quad (3)$$

方程式 4 计算在不考虑 ESR 的情况下的输出电容。

$$C_{\text{out}} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_{\text{sw}} \times \Delta V_{\text{Out\_Ripple}}} \quad (4)$$

输出电压纹波目标为最大输出电压的 0.1%，即  $6\text{mV}$ 。插入方程式 4，然后计算得出输出电容为  $192 \mu\text{F}$ 。在该设计中，并联放置了四个  $47 \mu\text{F}$  和两个  $1 \mu\text{F}$  陶瓷电容器以匹配该电容。

输出电容器的 ESR 要求对于确定总输出电压纹波也至关重要。ESR 越高，会导致整体输出电压纹波越高。要计算 ESR 要求，请使用以下公式计算仅由电容器和仅由 ESR 引起的电压纹波：

$$V_{\text{o\_pp}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_L}{8 \times C_{\text{out}} \times f_{\text{sw}}}\right)^2 + (\Delta I_L \times R_{\text{ESR}})^2} \quad (5)$$

$$6\text{mV} = \sqrt{\left(\frac{2.4\text{A}}{8 \times 190\mu\text{F} \times 250\text{kHz}}\right)^2 + (2.4\text{A} \times R_{\text{esr}})^2} \quad (6)$$

求解得出  $R_{\text{esr}} \cong 0.5\text{m}\Omega$ 。该值可通过并联陶瓷电容器实现；每个电容器在  $250\text{kHz}$  开关频率下具有约  $1.5\text{m}\Omega$  的 ESR。并联电容器可以将总 ESR 降低到  $1\text{m}\Omega$  以下。

### 2.2.5 电流和电压反馈

该设计的目标是在  $\pm 5^\circ\text{C}$  温度变化范围内实现  $\pm 0.02\%$  的 FS 电流和电压控制以及测量精度。电流检测通过仪表放大器实现，测量分流器两端的电压并调节至 ADC 输入电压。

偏移电压和增益误差不是大问题，因为它们可以在设备中进行校准。但是，增益和温漂是实现精度  $\pm 0.02\%$  或  $\pm 200\text{ppm}$  的关键参数。当大电流通过输出级时，较小的分流电阻器有助于降低热耗散和总温漂。参考设计在  $10\text{A}$  满量程电流范围内采用  $2\text{m}\Omega$ 、 $25\text{ppm}/^\circ\text{C}$  分流器。使用 INA630 执行电流检测，该仪表放大器的间接电流反馈 (ICFB) 拓扑使其成为一种具有成本效益的检测方法，因为它不需要对内部精密修整电阻器进行激光修整，并通过分立式外部电阻器设置增益。

INA630 具有  $0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  的输入温漂和  $3\text{ppm}/^\circ\text{C}$  的典型增益漂移，对于  $2\text{m}\Omega$  感应电阻器和  $10\text{A}$  满量程电流额定值，信号链漂移为  $25.18\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。由于增益取决于外部电阻分压器的匹配情况，因此更好的温度系数也可以降低增益漂移。为了获得最佳性能，使用匹配电阻器对可以将增益漂移误差降到最低。

总 ADC 漂移源于电压基准，以 REF50E 为例，其温漂为  $2.5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。电流路径的总未调整误差为  $\pm 5^\circ\text{C} \times \sqrt{(25^2 \times (2.5)^2)} \text{ ppm}/^\circ\text{C} = \pm 126.5\text{ppm}$  这符合设计要求。

电压检测路径在温度变化下具有更优的误差裕量。ADS9324 具有  $1\text{M}\Omega$  输入阻抗，可通过集成式可编程增益放大器支持  $\pm 5\text{V}$  的输入范围。对于正负模拟输入，它可以直接连接到  $5\text{V}$  电池，因此无需外部差分放大器并降低了 BOM 成本。它还具有最小  $100\text{dB}$  的 CMRR，可以支持高精度电压检测。对于  $5\text{V}$  电芯中摆幅为  $\pm 1\text{V}$  的情况，CMRR 导致的误差为  $\pm 5 \mu\text{V}$  或满量程电压范围的  $\pm 10\text{ppm}$ 。温漂为  $0.5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ，因此总误差可以更轻松地降到  $50\text{ppm}$  裕度以下。

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 TMS320F28P650DK

TMS320F28P650DK C2000 器件用于控制同步降压功率级。该器件具有 36 个 HRPWM 通道，足以控制 18 个降压转换器。有关更多信息，请参阅 [TMS320F28P65x 实时微控制器](#) 数据表。

### 2.3.2 ADS9324

ADS9324 是一款 16 通道、同步采样、16 位同步采样 (SAR) 模数转换器 (ADC)。该器件支持每通道高达 750ksps 的最大采样率，并具有 15kHz 和 30kHz 的集成 LPF 以降低噪声。真正的双极性输入范围可以接受  $\pm 5V$  和  $\pm 6.25V$  作为 ADC 满量程，因此该器件可以省去精密电压检测放大器。当连接到电池电芯时，ADS9324 足以实现  $\pm 0.01\%$  的精度和 1.5kHz 环路带宽。有关更多信息，请参阅 [ADS9324](#)。

### 2.3.3 INA630

INA630 是一个精密、成本优化型间接电流反馈仪表放大器，在增益为 100 时具有低输入偏移电压 ( $0.7 \mu V/C$ ) 和典型增益漂移 ( $2.5ppm/C$ )，这可在  $\pm 5^\circ C$  温度变化范围内实现  $\pm 0.02\%$  的电流控制精度。另请参阅 [INA630 精密、126dB CMRR、间接电流反馈仪表放大器](#) 数据表。

### 2.3.4 UCC27284

UCC27284 是一款功能强大的 N 沟道 MOSFET 驱动器，最大开关节点 (HS) 额定电压为 100V。借助此器件，可在基于半桥或同步降压配置的拓扑中控制两个 N 沟道 MOSFET。该器件具有 3A 拉电流和灌电流能力，典型传播延迟为 16ns，可更大限度地降低死区时间要求并进一步提高效率。

### 2.3.5 REF50E

REF50xxE 是一款噪声低、漂移低、精度电压基准极高的产品系列。它采用专有的设计技术实现了出色的温漂 ( $2.5ppm/^\circ C$ ) 和高精度 ( $0.025\%$ )。再结合非常低的闪烁噪声 ( $0.5 \mu VPP/V$ )，使 REF50xxE 系列非常适合用于高精度数据采集系统。



### 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

#### 3.1 硬件要求

图 3-1 展示了 TIDA-010086 硬件的各个部分。该电路板需要 F28P65 控制卡评估模块来测试硬件和软件性能。

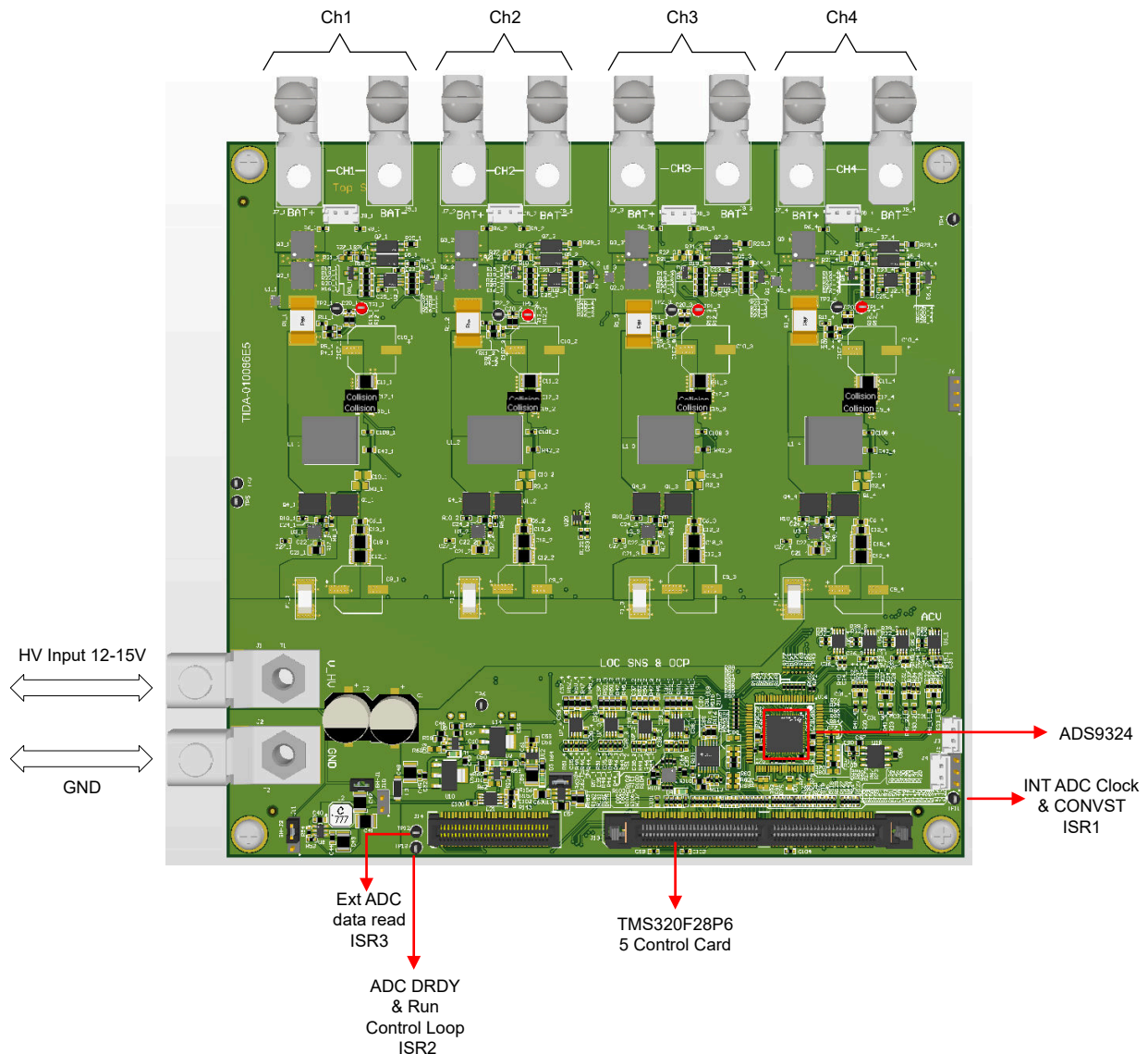


图 3-1. TIDA-010086 硬件

使用了以下设备来评估参考设计：

- 直流输入电源：HP 6675A
- 实验电源：Agilent E3634A
- 直流负载：Chroma 63102A
- 6.5 位分辨率万用表：Agilent 34401A
- 示波器：Tektronix MDO34



## 3.2 软件

该软件使用 [Code Composer Studio \(CCS\) 集成开发环境 \(IDE\)](#)，可在 [C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK](#) 库中找到。

### 3.2.1 在 Code Composer Studio™ 中打开工程

使用以下步骤在 Code Composer Studio (CCS) 中启动工程：

1. 从 [Code Composer Studio \(CCS\) 集成开发环境 \(IDE\)](#) 工具文件夹安装 Code Composer Studio。建议使用版本 12.4 或更高版本。
2. 通过以下两种方式之一安装 [C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK](#)：
  - a. 转至 CCS 并点击 *View* → *Resource Explorer*。在 TI Resource Explorer 下，转至 C2000WARE-DIGITAL-POWER-SDK，然后点击安装按钮。
  - b. 通过 C2000Ware Digital Power SDK 工具文件夹
3. 安装完成后，关闭 CCS，然后打开一个新的工作区。CCS 自动检测 powerSUITE。有时必须重新启动 CCS 才能使更改生效。

---

#### 备注

默认情况下，powerSUITE 随 SDK 一起安装。

---

现在，可以使用以下方法之一导入固件工程：

- 使用 *Resource Explorer*
  1. 在 *Resource Explorer* 中的 C2000WARE-DIGITAL-POWER-SDK 下，点击 *powerSUITE* → *Solution Adapter Tool*。
  2. 从直流/直流部分下提供的设计列表中选择 TIDA-010086。
  3. 将显示开发套件页面。用于运行工程的图标显示在顶部栏中。点击 *Run Project*。
  4. 此操作将工程导入到工作区环境中，并显示具有与图 3-2 类似的 GUI 的配置页面。
  5. 如果不显示该 GUI 页面，请参阅 C2000WAREDIGITAL-POWER-SDK 资源浏览器中 powerSUITE 下的“常见问题解答”部分。
- 直接从 solution 文件夹导入：
  1. 用户还可以执行以下操作来直接导入工程：进入 CCS 内，点击 *Project* → *Import CCS Projects*，并导航到位于 `/solutions/tida_010086/f28p65x/ccs` 中的 solution 文件夹。
  2. 出现两个工程规范：一个工程规范带有 powerSUITE，另一个工程规范不带 powerSUITE。点击任一规范都会创建该工程的一个自包含文件夹，其中包含所有依赖项。
  3. 以下所有步骤介绍了如何修改 `settings.h` 和 `user_settings.h` 文件中的相关 `#defines`，本设计指南进行了相关说明。

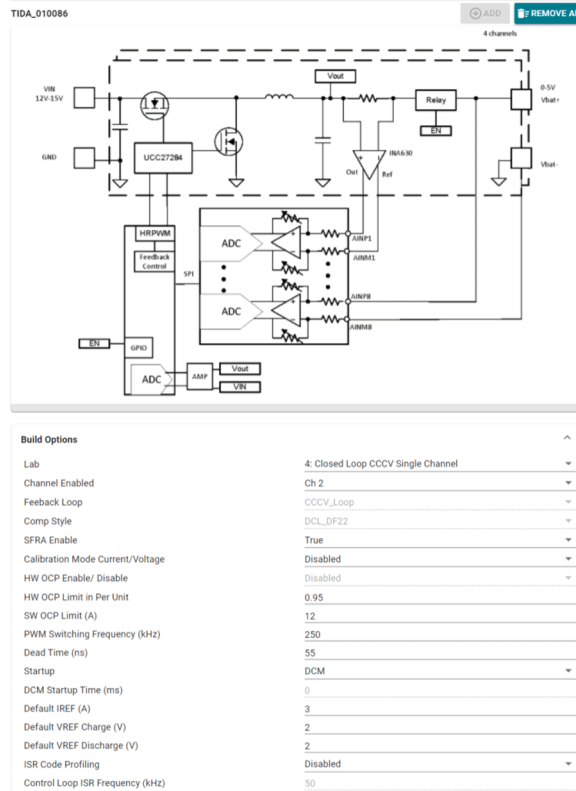


图 3-2. 该设计的 powerSUITE GUI 页面

### 3.2.2 工程结构

图 3-3 显示了项目的总体结构。导入工程后，CCS 内将显示 Project Explorer，如图 3-4 所示。

备注

图 3-4 展示了 F28p65x 的工程；不过，如果从页面中选择不同的器件，则结构是类似的。

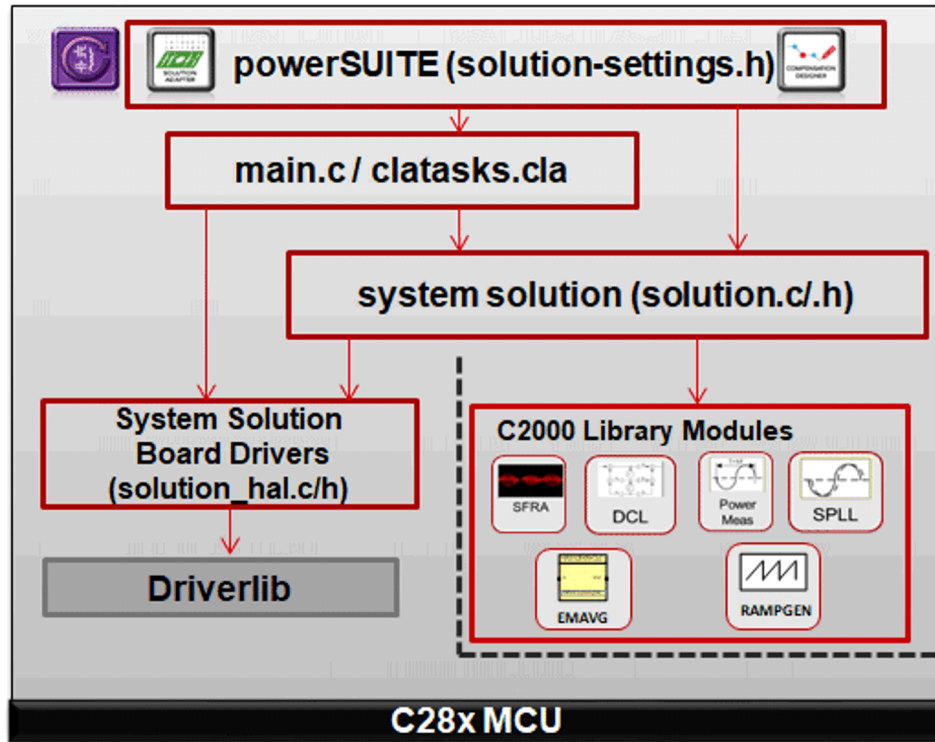


图 3-3. 工程结构概览

含有核心算法代码的特定于解决方案并且独立于器件的文件位于 `.c/h` 中。

特定于电路板和特定于器件的文件位于 `_hal.c/h` 中。该文件包含用于运行解决方案的特定于器件的驱动程序。如果用户想要使用不同的调制方案或不同的器件，除了更改工程中的器件支持文件，用户只需要对这些文件进行更改。

`-main.c` 文件包含工程的主要框架。该文件包含对电路板和解决方案文件的调用（有助于构建系统框架）以及中断服务例程 (ISR) 和慢速后台任务。

对于该设计，解决方案为 `bt4ch`。

可通过点击 Project Explorer 下列出的 `main.syscfg` 文件来打开 powerSUITE 页面。该页面生成 `_settings.h` 文件。该文件是由 powerSUITE 页面生成的用于工程编译的唯一 C 语言文件。用户不得手动修改该文件，因为每次保存工程时，powerSUITE 都会覆盖更改。`_settings.h` 文件包含工作模式选择功能以及电流和电压控制环路补偿设置。`_user_settings.h` 包含在 `_settings.h` 中，可用于保留 powerSUITE 工具无法配置的任何设置，例如 ADC 映射、GPIO 等的 `#defines`。

`_cal.h` 文件包含用于电流和电压测量的增益和偏移值。

`_ccxml` 设置用于参考设计的调试器。在该设计中，连接了 XDS110 USB 调试探针，目标器件为 TMS320F28P65DK9。

`Kit.json` 和 `solution.js` 文件由 powerSUITE 在内部使用，不允许用户进行修改。对这些文件进行的任何更改都会导致工程无法正常运行。

解决方案名称也用作解决方案中使用的所有变量和定义的模块名称。因此，所有变量和函数调用都以 **BT4CH** 作为前缀（例如，**BT4CH\_userParam\_chX**）。这种命名规则让用户能够组合不同的解决方案，同时避免命名冲突。

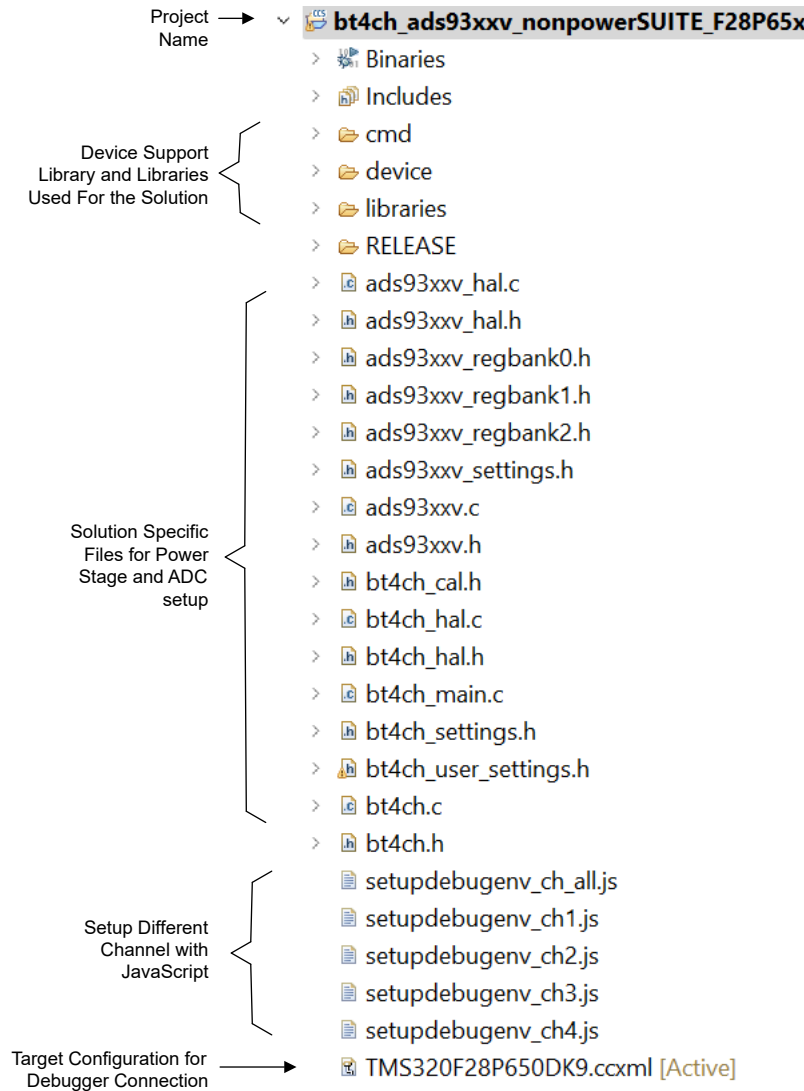


图 3-4. BT4PH 工程的 Project Explorer 视图

bt4ch 工程由三个 ISR (ISR1、ISR2 和 ISR3) 组成。

- *ISR1* 用于检测降压转换器的输入电源电压和输出电容器电压。*ISR1* 在 ADCC 转换完成时触发，并以与外部 ADC CONVST 相同的频率运行。ADCC 检测转换器的输入电压和输出电压，输出用于实现 DC/DC 转换器的软启动。
- *ISR2* 由 ADS9324 的 BUSY 信号触发。外部 ADC 编程为 400kSPS 采样率 (CONVST)，过采样率 (OSR) 设置为 8，这会将 ISR 频率设置为 50kHz。
- *ISR3* 由 SPI 接收 FIFO 中断来触发。ISR 用于从 FIFO 寄存器中读取外部 ADC 数据以及运行控制环路功能。

图 3-6 显示了当全部四个通道都开启时 *ISR1*、*ISR2* 和 *ISR3* 所用的时间。三个 ISR 所用的总时间小于  $6 \mu s$ ，这小于 50kSPS 控制环路采样率下 CPU 使用率的 30%。图 3-5 和图 3-7 显示了只有一个通道开启而其他所有通道关闭时的 ISR 时间。

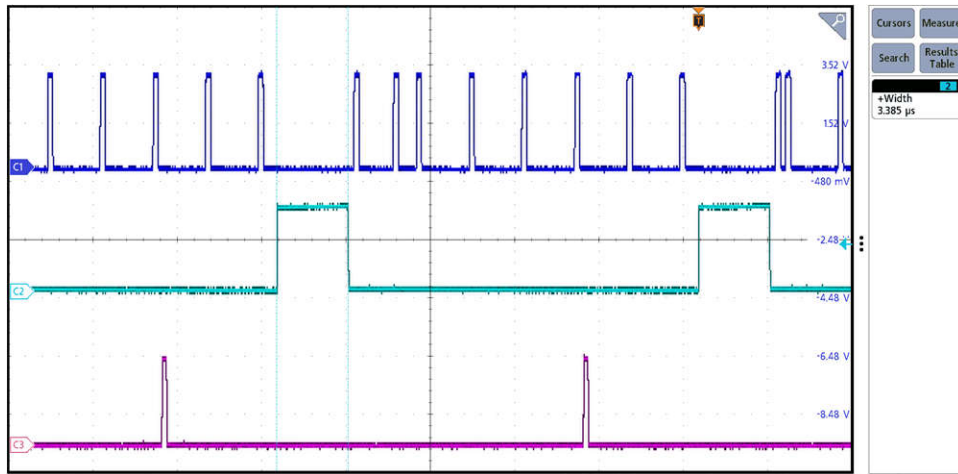


图 3-5. 一个通道的 ISR 执行时间

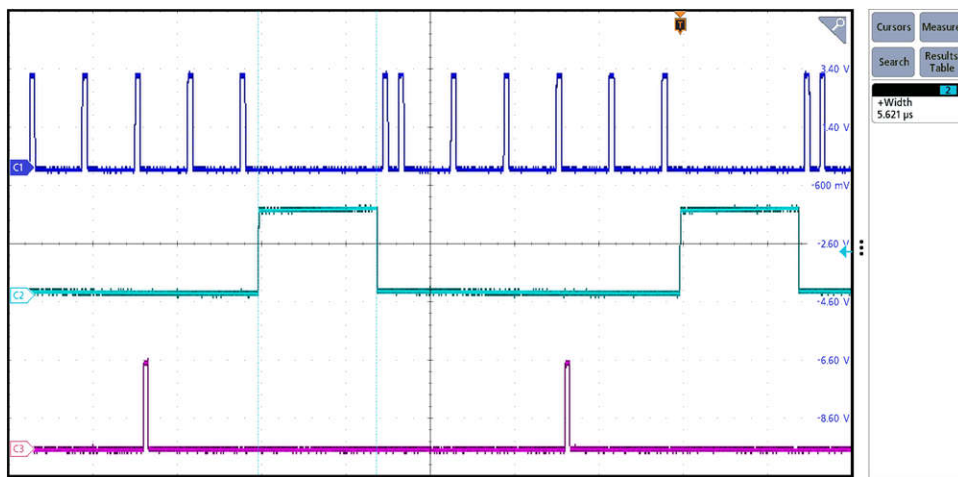


图 3-6. 四个通道的 ISR 执行时间

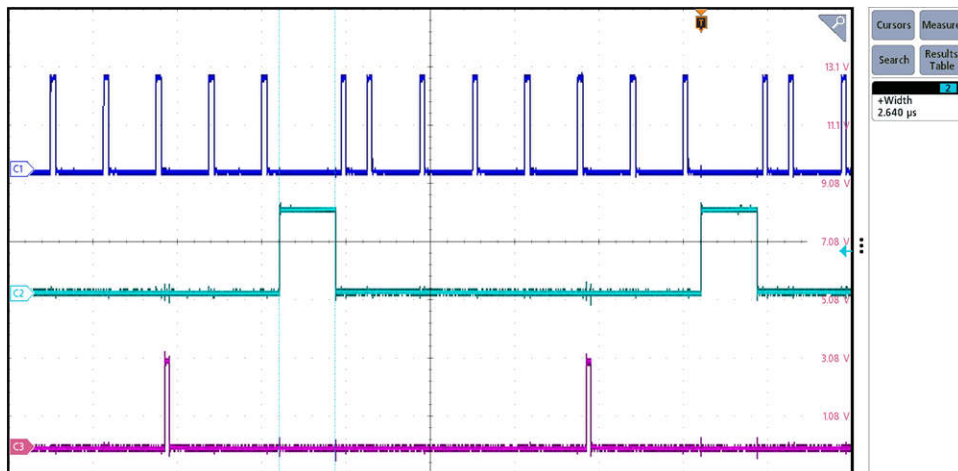


图 3-7. 所有通道都关闭时的 ISR 执行时间

### 3.2.3 软件流程图

图 3-8 展示了软件流程图。

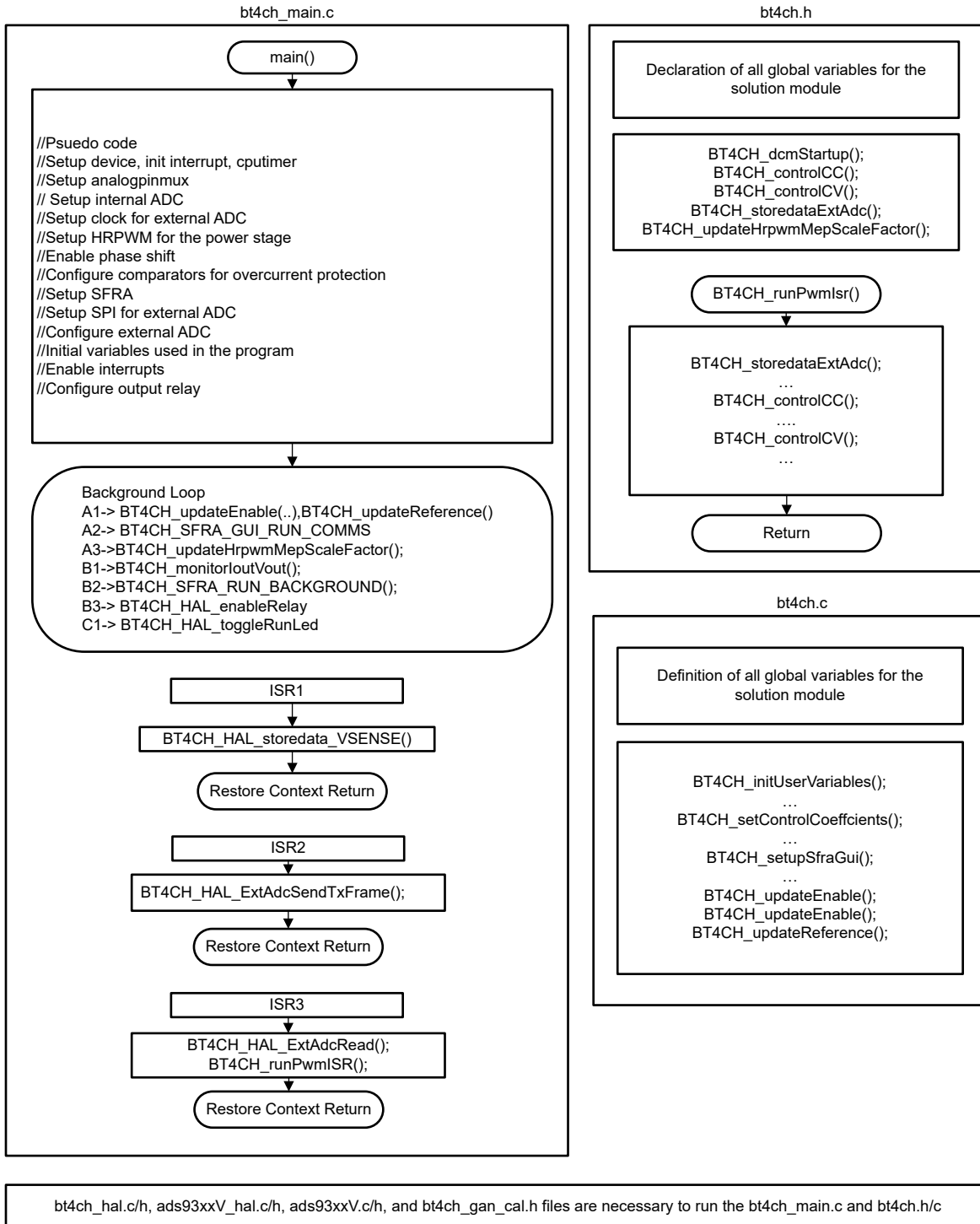


图 3-8. 软件流程图



### 3.3 测试设置

#### 3.3.1 用于测试双向功率流的硬件设置

图 3-9 展示了双向电源的测试设置。输入直流电源的工作电压为 12V 至 15V，作为输入总线电压。当输入电源无法支持双向电流时，电子负载 (e-load) 可提供放电模式。在电池侧，系统连接到实验室电源和电子负载，以模拟电池电芯的充电或放电。

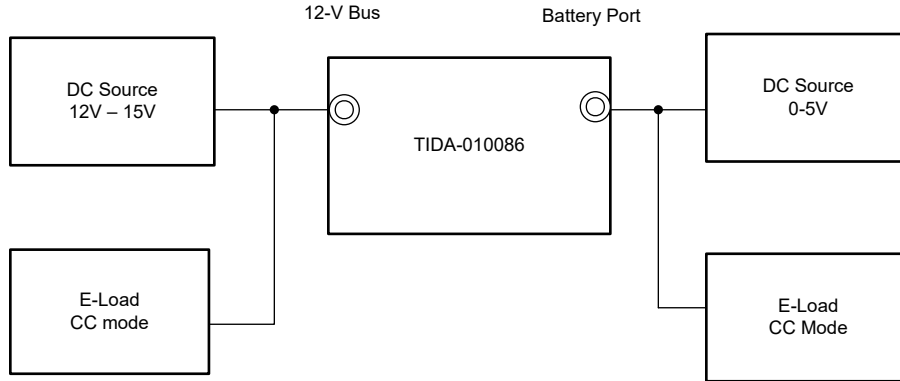


图 3-9. 用于测试双向功率流的硬件设置

#### 3.3.2 用于对电流和电压环路进行调优的硬件设置

控制环路仅在单通道运行期间需要调优。工程师使用此方法来调优电流和电压环路。电池负载表现为小阻抗电缆，范围为几毫欧至数百毫欧。在没有外部仪表的情况下，与实际的电池电芯相比，阻抗匹配电缆提供了一种调优控制环路的简单方法。

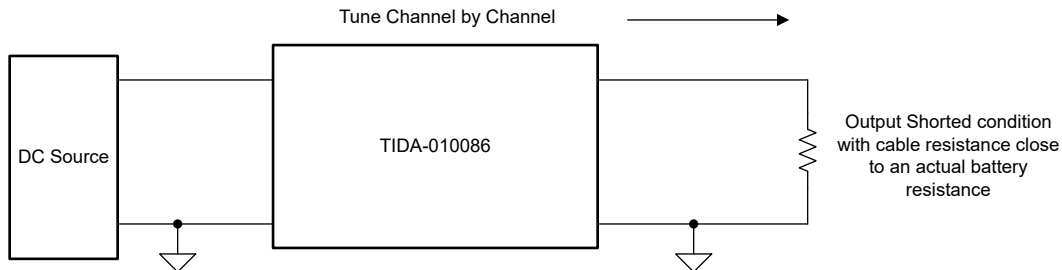
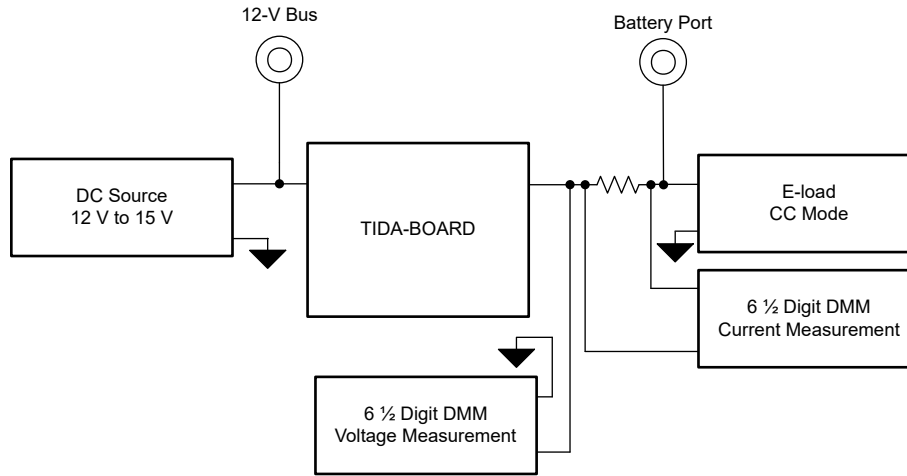


图 3-10. 用于对电流和电压环路进行调优的硬件设置

#### 3.3.3 用于电流和电压校准的硬件设置

为了校准电流和电压，使用 6.5 位万用表测量输出终端电压和分流器两端的压降。电流校准使用电子负载恒流模式或短路条件。电压校准使用开路条件。


**图 3-11. 用于电流和电压校准的硬件设置**

### 3.3.4 实验变量定义

BT4CH\_userParam\_ch1,2,3,4 变量用于在不同的实验中控制功率级。有关参数定义，请参阅表 3-1。

**表 3-1. BT4CH\_userParam\_chX 定义**

BT4CH_userParam_chX	数据类型	注释
Iref_A	float	设置充电和放电模式的电流 [0, 10]
VrefCharge_V	float	设置充电模式下的电压 [0, 5]
VrefDischarge_V	float	设置放电模式下的电压 [0, 5]
Dir_bool	unsigned int	对于充电模式，将此参数设置为 1 对于放电模式，将此参数设置为 0
Relay_ON	unsigned int	将此参数设置为 1 可启用继电器 将此参数设置为 0 以禁用继电器
En_bool	unsigned int	将此参数设置为 1 以启用该通道 将此参数设置为 0 以禁用该通道
remote_sense	unsigned int	将此参数设置为 1 可使用遥感进行闭环控制 将此参数设置为 0 可使用本地检测进行闭环控制
DutyRef_pu	float	开环模式的基准占空比。范围 = 0 至 1.0
IbatCal_pu	float	在校准模式下使用此参数设置输出电流。范围 = 0 至 1.0
VbatCal_pu	float	在校准模式下使用此参数设置输出电压。范围 = 0 至 1.0
IoutGain_pu	float	该变量存储电流增益校准数据
IoutOffset_pu	float	该变量存储电池电流偏移校准数据
IoutGain_A	float	该变量存储电池电流增益校准数据
IoutOffset_A	float	该变量存储电池电流偏移校准数据
VoutGain_pu	float	该变量存储电池降压转换器输出电压增益校准数据
VoutOffset_pu	float	该变量存储降压转换器输出电压偏移校准数据
VoutGain_V	float	该变量存储降压转换器输出电压偏移校准数据
VoutOffset_V	float	该变量存储降压转换器输出电压偏移校准数据
VbatGain_pu	float	该变量存储电池电压校准数据
VbatOffset_pu	float	该变量存储电池电压偏移校准数据
VbatGain_V	float	该变量存储电池电压增益校准数据
VbatOffset_V	float	该变量存储电池电压偏移校准数据

### 3.3.5 测试程序

#### 3.3.5.1 实验 1.开环电流控制 - 单相

##### 3.3.5.1.1 设置实验 1 的软件选项

- 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 2，否则跳至步骤 3。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
  - 对于“Lab”，选择 *Lab 1: Open Loop CC Single Channel*
  - 选择四个通道中的任一个
  - 启用 SFRA
  - 保存该页面
- 当使用非 powerSUITE 版本的工程时，直接在 `solution_settings.h` 文件中修改上述设置。

```
#define LAB_NUMBER (1)
#define CHANNEL_NUMBER (1)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

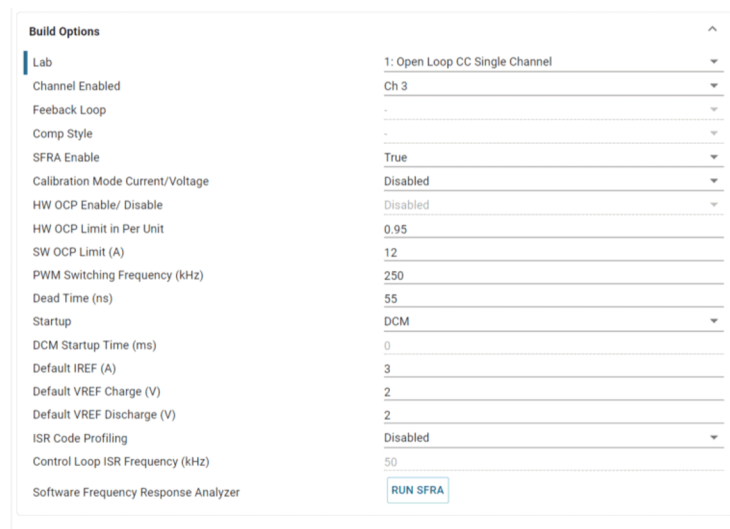



图 3-12. 实验 1 的构建选项


##### 3.3.5.1.2 生成和加载工程以及设置调试环境

使用以下步骤来构建和加载工程并设置调试环境。

- 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project**。
- 这将成功生成工程。
- 在 *Project Explorer* 中，确保在 *targetConfigs* 项下将正确的目标配置文件设置为“Active”。
- 点击 **Run** → **Debug** 以启动调试会话。
- 然后工程加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
- 要在监视/表达式窗口中添加变量，请点击 **View** → **Scripting Console** 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open**，然后浏览到位于工程文件夹内的 `setupdebugenv_chX.js` 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
- 点击监视窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以启用控制器中值的持续更新。

### 3.3.5.1.3 运行代码

使用以下步骤运行实验 1 的代码：

1. 使用节 3.3.2 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 *Expression Window* 中 BT4H\_InputVoltageSense\_V 是否处于 12V 至 15V 范围内。
4. 如果频率为 50kHz，则使用示波器检查外部 ADC 的 DRDY 信号。图 3-13 显示了 MCU 运行时 ADS9324 DRDY 和 CONVST 信号。
5. 从 *Expression Window* 中设置以下参数：
  - BT4CH\_userParam\_chX->dutyRef\_pu = 0.02
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 1
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 1 以启用输出继电器
  - 有关 *Expression Window* 设置，请参阅图 3-14
6. BT4CH\_measure\_V\_I\_chX 变量显示 DC/DC 转换器的输出电流和电压。调整 BT4CH\_userParam\_chX->DutyRef\_pu 以确保电流大概为 4.5A。
7. 图 3-15 显示了用于提取开环电流控制的受控体模型的 SFRA 设置。点击 SysConfig 页面中的 *Run SFRA* 图标。此时将弹出 SFRA GUI。
8. 在 SFRA GUI 上选择器件对应的选项；例如，对于 F28P65x，请选择 *Floating Point*。点击 *Setup Connection* 按钮。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击 OK 按钮。返回到 SFRA GUI，然后点击 *Connect* 按钮。
9. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击 *Start Sweep* 启动 SFRA 扫描。完整的 SFRA 扫描需要几分钟才能完成。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-16 所示。
10. 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。
11. 完成实验后，在 *Expression Window* 中设置以下参数以停止代码：
  - BT4CH\_userParam\_chX->dutyRef\_pu = 0
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 0
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 0 以禁用输出继电器
  - 终止程序

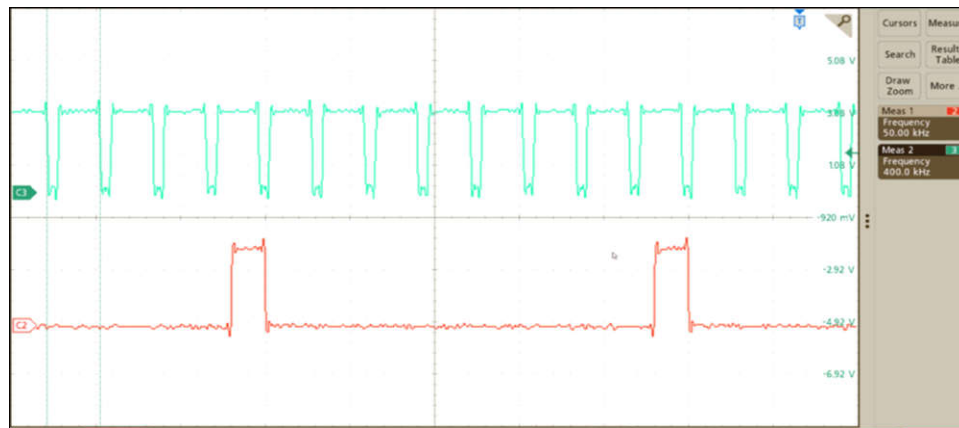


图 3-13. ADS9324 CONVST 和 DRDY 信号

Expression	Type	Value
BT4CH_lab	enum <unname...	Lab1_singleChannelOpenLoopCC
BT4CH_sfraStatus	enum <unname...	SFRA_Disabled
BT4CH_calibrationStatus	enum <unname...	Calibration_Disabled
BT4CH_calibrationMode	enum <unname...	Calibration_CC
BT4CH_startupMode	enum <unname...	DCM_Startup
BT4CH_HAL_InputVoltageSense_V	float	13.3130159
BT4CH_ISR2_Loading	float	0.126220882
BT4CH_ISR2_LoadingMax	float	0.12963891
BT4CH_userParam_ch3	struct <unname...	{Iref_A=5.0,VrefCharge_V=3.0,VrefDi...
Iref_A	float	5.0
VrefCharge_V	float	3.0
VrefDischarge_V	float	3.0
dir_bool	unsigned int	1
Relay_ON	unsigned int	1
Start_bool	unsigned int	1
remote_sense	unsigned int	0
DutyRef_pu	float	0.0199999996
IbatCal_pu	float	0.200000003
VbatCal_pu	float	0.400000006
IoutGain_pu	float	0.0805866644
IoutOffset_pu	float	0.000886499882
IoutGain_A	float	12.4090014
IoutOffset_A	float	-0.0110005783
VoutGain_pu	float	0.24248305
VoutOffset_pu	float	-0.000581979752
VoutGain_V	float	4.1239996
VoutOffset_V	float	0.00240008417
VbatGain_pu	float	0.200000018
VbatOffset_pu	float	-0.000600039959
VbatGain_V	float	4.99999952
VbatOffset_V	float	0.00300019956
BT4CH_measureVI_ch3	struct <unname...	{Ibat_A=4.24398136,Vout_V=0.0790...
Ibat_A	float	4.24188375

图 3-14. 实验 1 表达式窗口，开环

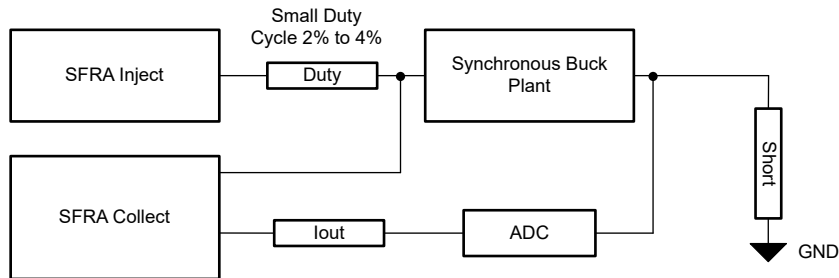


图 3-15. 用于开环电流控制的 SFRA 设置

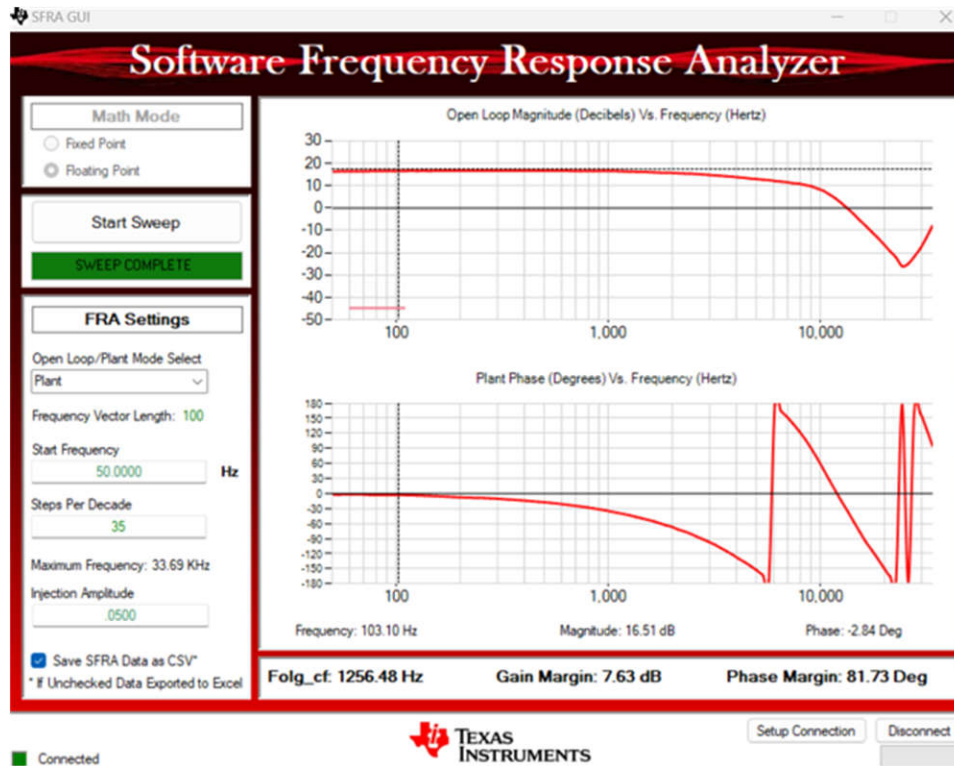



图 3-16. 电流控制开环频率响应

### 3.3.5.2 实验 2. 闭环电流控制单通道

#### 3.3.5.2.1 设置实验 2 的软件选项

- 要运行该实验，请确保按前面部分（即节 3.3.2）所述设置硬件。
- 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 3，否则跳至步骤 4。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
  - 对于“Lab”，选择 *Lab 2: Closed Loop CC Single Channel*
  - 选择通道
  - 启用 SFRA
  - 通过点击 *Run Compensation Design* 按钮打开补偿设计器 。
  - 然后，补偿设计器启动并提示用户选择有效的 SFRA 数据文件。将实验 1 中运行的 SFRA 数据导入补偿设计器来设计双极点、双零点补偿器。在此迭代设计过程中保持更大的裕度，以确保环路闭合时，系统是稳定的。
- 该设计使用 2p2z 控制模式，该模式也可以建模为带 OTA 的 II 型补偿器。为了调优控制环路，该设计采用了以下步骤：
  - 首先，选择所需的交叉频率  $f_c$  和相位裕度  $p_0$ 。记下交叉频率响应分析器中的开环受控体增益  $G_{f_c}$  和受控体相位  $p_1$ 。
  - 相位提升作为实现  $p_0$  的补偿量，所需的交叉频率  $f_c$  可以通过方程式 7 计算。
  - 要计算补偿极点频率  $f_p$ ，可使用方程式 8。
  - 当相位在极点和零点之间的几何平均值处达到峰值时，使用方程式 9 计算零点  $f_z$  的补偿。
  - 对于带 OTA 的 II 型补偿器，交叉频率的传递函数可以表示为无法自动生成链接文本。
  - 应用方程式 8 和  $f_z$  中的极点和零点，可以根据方程式 11 计算 Kdc。
  - 第二个零点位置可以放置在远高于第一个零点的位置。
  - 通过将方程式 8、 $f_z$  和 Kdc 的极点和零点应用到补偿设计器中，可以在 powerSUITE GUI 中计算 2p2z 补偿。
  - 图 3-18 显示了电流环路的补偿参数。
  - 点击 *Save Comp* 按钮以保存补偿。关闭补偿设计器工具。



- 保存 SYSCONFIG 页面。
5. 当使用非 powerSUITE 版本的工程时，直接在 solution\_settings.h 文件中修改 **Build Settings**。 **Compensation Designer** 位于 C2000Ware\_DigitalPower\_Install\_Location\powerSUITE\source\utils。

```
#define LAB_NUMBER (2)
#define CHANNEL_NUMBER (3)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

前一个列表中引用了以下公式：

$$\text{boost} = - (p_1 - p_0 + 90) \tag{7}$$

$$f_p = \left( \tan\left(\text{boost} \times \frac{\pi}{180}\right) + \sqrt{\tan\left(\text{boost} \times \frac{\pi}{180}\right)^2 + 1} \right) \times f_c \tag{8}$$

$$f_z = \frac{f_c^2}{f_p} \tag{9}$$

$$|G(f_c)| = Kdc \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_z}{f_c}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f_p}\right)^2}} \tag{10}$$

$$Kdc = 2\pi f_c \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f_p}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_z}{f_c}\right)^2}} \tag{11}$$

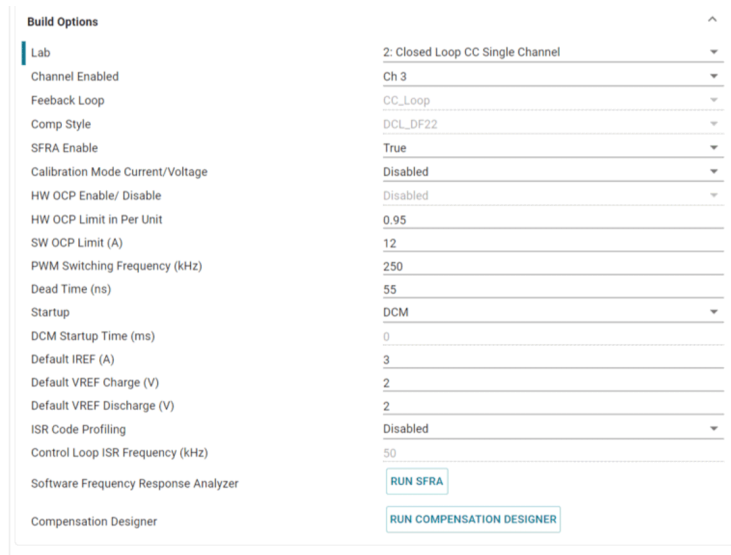



图 3-17. 实验 2 的构建选项




图 3-18. 使用补偿设计器对电流环路进行调优

### 3.3.5.2.2 生成和加载工程以及设置调试环境

1. 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project**。
2. 这将成功生成工程。
3. 在 Project Explorer 中，确保在 targetConfigs 项下将正确的目标配置文件设置为“Active”。
4. 点击 **Run** → **Debug** 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
6. 要在监视/表达式窗口中添加变量，请点击 **View** → **Scripting Console** 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open**，然后浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv\_chX.js** 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
7. 点击监视窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以启用控制器中值的持续更新。

### 3.3.5.2.3 运行代码

使用以下步骤运行实验 2 的代码：

1. 要运行该实验，请确保按节 3.3.1 所述设置硬件。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 **Expression Window** 中 **BT4CH\_InputVoltageSense\_V** 是否处于 12V 至 15V 范围内。
4. 从 **Expression Window** 中设置以下参数：
  - 将 **BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON** 设置为 1 以启用输出继电器
  - **BT4CH\_userParam\_chX->iref\_A = 7.0**
  - 设置 **BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 1**
  - 有关 **Expression Window** 设置，请参阅图 3-19
5. **BT4CH\_measureVI\_chX** 变量显示 DC/DC 转换器的输出电流和电压。**Isense1\_A** 显示值接近 **iref\_A** 设置，误差为  $\pm 1\text{mA}$ 。

6. 图 3-20 显示了用于测试环路稳定性的 SFRA 设置。点击 SysConfig 页面中的 *Run SFRA* 图标。此时将弹出 SFRA GUI。
7. 在 SFRA GUI 上选择器件对应的选项；例如，对于 F28P65x，请选择 *Floating Point*。点击 *Setup Connection* 按钮。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击 OK 按钮。返回到 SFRA GUI，然后点击 *Connect* 按钮。
8. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击 *Start Sweep* 启动 SFRA 扫描。完整的 SFRA 扫描需要几分钟才能完成。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-21 所示。
9. 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。
10. 完成实验后，在 *Expression Window* 中设置以下参数以停止代码：
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 0
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 0 以禁用输出继电器
  - 终止程序

Expression	Type	Value
BT4CH_lab	enum <unname...	Lab2_singleChannelClosedLoopCC
BT4CH_sfraStatus	enum <unname...	SFRA_Enabled
BT4CH_calibrationStatus	enum <unname...	Calibration_Disabled
BT4CH_calibrationMode	enum <unname...	Disabled
BT4CH_startupMode	enum <unname...	DCM_Startup
BT4CH_HAL_InputVoltageSense_V	float	12.4000731
BT4CH_ISR2_Loading	float	0.149474204
BT4CH_ISR2_LoadingMax	float	0.17483741
BT4CH_userParam_ch3	struct <unname...	{Iref_A=7.0,VrefCharge_V=3.0,VrefDi...
Iref_A	float	7.0
VrefCharge_V	float	3.0
VrefDischarge_V	float	3.0
dir_bool	unsigned int	1
Relay_ON	unsigned int	1
Start_bool	unsigned int	1
remote_sense	unsigned int	0
DutyRef_pu	float	0.0
IbatCal_pu	float	0.200000003
VbatCal_pu	float	0.400000006
IoutGain_pu	float	0.0730994046
IoutOffset_pu	float	0.00584799051
IoutGain_A	float	13.6800022
IoutOffset_A	float	-0.0800005198
VoutGain_pu	float	0.24248305
VoutOffset_pu	float	-0.000581979752
VoutGain_V	float	4.1239996
VoutOffset_V	float	0.00240008417
VbatGain_pu	float	0.200000018
VbatOffset_pu	float	-0.000600039959
VbatGain_V	float	4.99999952
VbatOffset_V	float	0.00300019956
BT4CH_measureV1_ch3	struct <unname...	{Ibat_A=6.99993467,Vout_V=0.2138...
Ibat_A	float	6.99981737
Vout_V	float	0.2136783
Vbat_V	float	0.196476862

图 3-19. 实验 2 表达式窗口，闭环

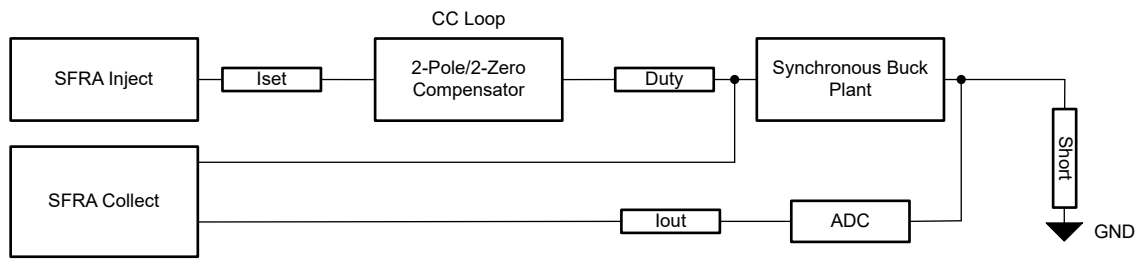


图 3-20. 用于闭环电流控制的 SFRA 设置

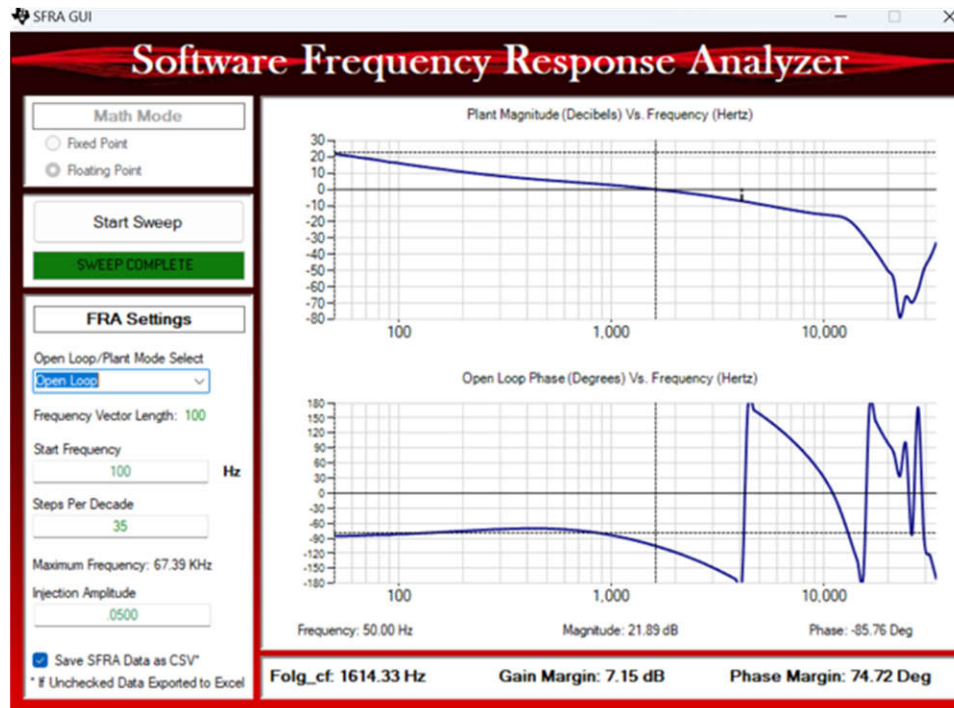


图 3-21. 电流控制闭环频率响应

### 3.3.5.3 实验 3.开环电压控制 - 单通道

#### 3.3.5.3.1 设置实验 3 的软件选项

- 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至第 2 步，否则跳至 3
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下执行以下步骤：
  - 对于“Lab”，选择 *Lab 3: Single Channel Open-Loop CV Control* 实验
  - 选择四个通道中的任一个
  - 启用 SFRA
  - 保存该页面
- 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 `solution_settings.h` 文件中修改上述设置。

```
#define LAB_NUMBER (3)
#define CHANNEL_NUMBER (3)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

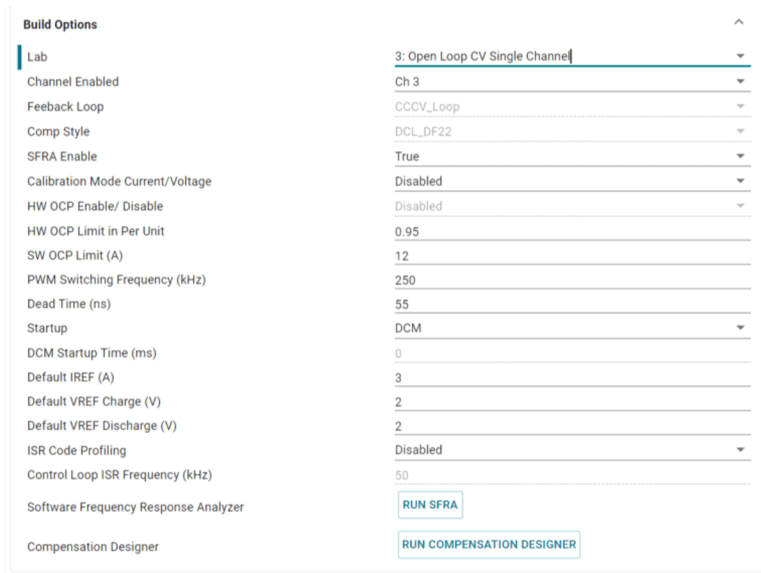



图 3-22. 实验 3 的构建选项


### 3.3.5.3.2 生成和加载工程以及设置调试环境

使用以下步骤来构建和加载工程并设置调试环境。

1. 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project**。
2. 这将成功生成工程。
3. 在 Project Explorer 中，确保在 targetConfigs 项下将正确的目标配置文件设置为“Active”。
4. 点击 **Run** → **Debug** 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
6. 要在监视/表达式窗口中添加变量，请点击 **View** → **Scripting Console** 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open**，然后浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv\_chX.js** 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
7. 点击监视窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以启用控制器中值的持续更新。

### 3.3.5.3.3 运行代码

使用以下步骤运行实验 3 的代码：

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 **Expression Window** 中 **BT4CH\_InputVoltageSense\_V** 是否处于 12V 至 15V 范围内。
4. 从 **Expression Window** 中设置以下参数：
  - 将 **BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON** 设置为 1 以启用输出继电器
  - **BT4CH\_userParam\_V\_I\_chm->iref\_A** = 15.0
  - 设置 **BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool** = 1
  - 有关 **Expression Window** 设置，请参阅图 3-23
5. **BT4CH\_measureVI\_chX** 变量显示 DC/DC 转换器的输出电流和电压。**lbatsense\_A** 显示值接近 **iref\_A**，误差为 ±1mA。
6. 图 3-24 显示了用于测量开环电压控制频率响应的 SFRA 设置。
7. 点击 **SysConfig** 页面中的 **Run SFRA** 图标。此时将弹出 SFRA GUI。
8. 在 SFRA GUI 上选择器件对应的选项；例如，对于 F28P65x，请选择 **Floating Point**。点击 **Setup Connection** 按钮。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击 **OK** 按钮。返回到 SFRA GUI，然后点击 **Connect** 按钮。



9. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击 **Start Sweep** 按钮启动 SFRA 扫描。完整的 SFRA 扫描需要几分钟才能完成。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-25 所示。
10. 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。
11. 完成实验后，在 **Expression Window** 中设置以下参数以停止代码：
  - BT4CH\_userParam\_V\_I\_chm->iref\_A = 0
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 0
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 0 以禁用输出继电器
  - 终止程序

BT4CH_calibrationMode	enum <unname...	Disabled
BT4CH_startupMode	enum <unname...	DCM_Startup
BT4CH_HAL_InputVoltageSense_V	float	12.4089355
BT4CH_ISR2_Loading	float	0.149675161
BT4CH_ISR2_LoadingMax	float	0.174261391
BT4CH_userParam_ch3	struct <unname...	(Iref_A=7.0,VrefCharge_V=1.0,VrefDi...
Iref_A	float	7.0
VrefCharge_V	float	1.0
VrefDischarge_V	float	3.0
dir_bool	unsigned int	1
Relay_ON	unsigned int	1
Start_bool	unsigned int	1
remote_sense	unsigned int	0
DutyRef_pu	float	0.0
IbatCal_pu	float	0.200000003
VbatCal_pu	float	0.400000006
IoutGain_pu	float	0.0730994046
IoutOffset_pu	float	0.00584799051
IoutGain_A	float	13.6800022
IoutOffset_A	float	-0.0800005198
VoutGain_pu	float	0.24248305
VoutOffset_pu	float	-0.000581979752
VoutGain_V	float	4.1239996
VoutOffset_V	float	0.00240008417
VbatGain_pu	float	0.200000018
VbatOffset_pu	float	-0.000600039959
VbatGain_V	float	4.99999952
VbatOffset_V	float	0.00300019956
BT4CH_measureV1_ch3	struct <unname...	(Ibat_A=7.00024748,Vout_V=0.1169...
Ibat_A	float	7.00016308
Vout_V	float	0.116786078
Vbat_V	float	0.0993618295

图 3-23. 实验 3 表达式窗口，闭环

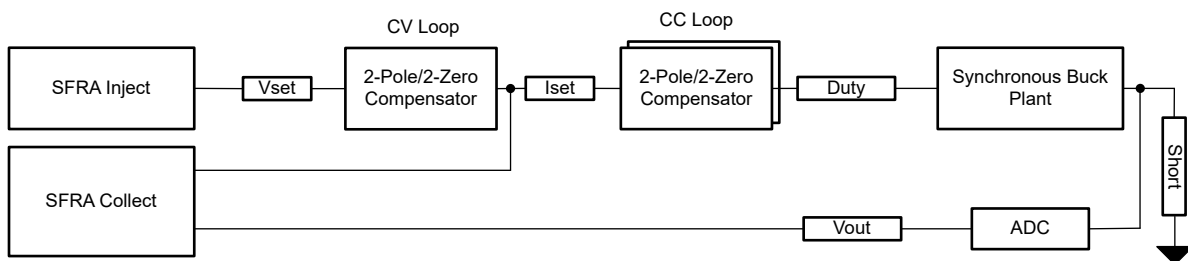


图 3-24. 用于开环电压控制的 SFRA 设置



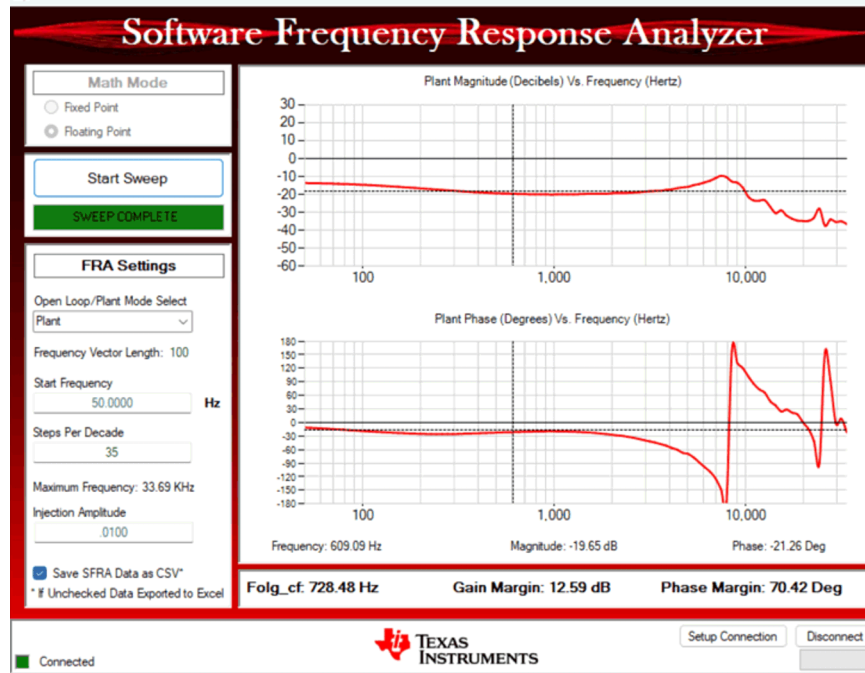


图 3-25. 电压控制开环频率响应

### 3.3.5.4 实验 4. 闭环电流和电压控制 - 单通道

#### 3.3.5.4.1 设置实验 4 的软件选项

- 要运行该实验，请确保按前面部分（即节 3.3.2）所述设置硬件。
- 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 3，否则跳至步骤 4。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
  - 对于“Lab”，选择 *Lab 4: Closed Loop CCCV Single Channel*
  - 选择通道
  - 启用 SFRA
  - 关闭补偿设计器
- 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 `solution_settings.h` 文件中修改 *Build Settings*。补偿设计器位于 `C2000Ware_DigitalPower_Install_Location\powerSUITE\source\utils`。

```
#define LAB_NUMBER (4)
#define CHANNEL_NUMBER (3)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

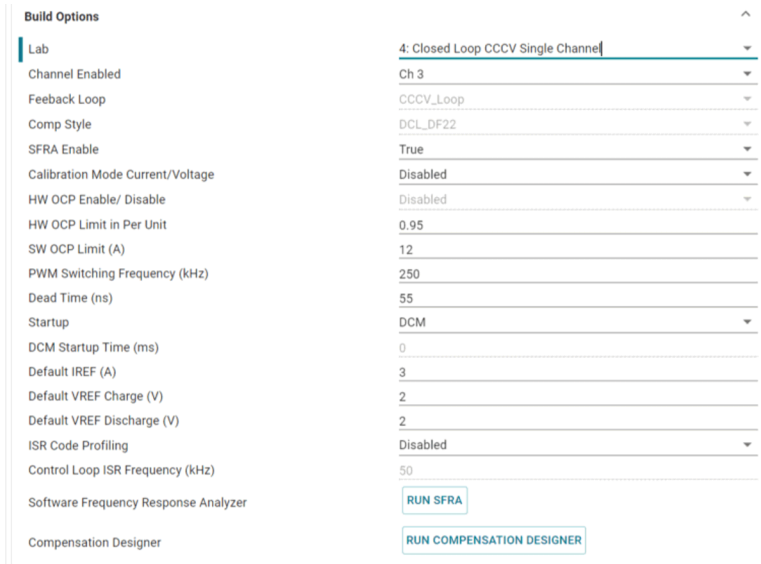


图 3-26. 实验 4 的构建选项



图 3-27. 调优电压环路


### 3.3.5.4.2 生成和加载工程以及设置调试环境

1. 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project**。
2. 这将成功生成工程。
3. 在 Project Explorer 中，确保在 targetConfigs 项下将正确的目标配置文件设置为 **Active**。
4. 然后，点击 **Run → Debug** 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。

6. 要在监视/表达式窗口中添加变量，请点击 **View** → **Scripting Console** 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **open**，然后浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv\_chX.js** 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
7. 点击监视窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以启用控制器中值的持续更新。

### 3.3.5.4.3 运行代码

使用以下步骤运行实验 4 的代码：

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 **Expression Window** 中 **BT4CH\_InputVoltageSense\_V** 是否处于 12V 至 15V 范围内。
4. 从 **Expression Window** 中设置以下参数：
  - 将 **BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON** 设置为 1 以启用输出继电器
  - **BT4CH\_userParam\_chX->iref\_A** = 8.5
  - **BT4CH\_userParam\_chX->vrefCharge\_V** = 0.075
  - 设置 **BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool** = 1
  - 有关 **Expression Window** 设置，请参阅图 3-28
5. **BT4CH\_measureVI\_chX** 变量显示 DC/DC 转换器的输出电流和电压。**Vbatsense\_V** 显示值接近 **vrefCharge\_V**，误差为  $\pm 0.5\text{mV}$ 。
6. 图 3-29 显示了用于测量闭环电压控制频率响应的 **SFRA** 设置。
7. 点击 **SysConfig** 页面中的 **Run SFRA** 图标。此时将弹出 **SFRA GUI**
8. 在 **SFRA GUI** 上选择器件对应的选项；例如，对于 **F28P65x**，请选择 **Floating Point**。点击 **Setup Connection** 按钮。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击 **OK** 按钮。返回到 **SFRA GUI**，然后选择 **Connect** 按钮。
9. **SFRA GUI** 将连接到器件。现在可以通过点击 **Start Sweep** 按钮启动 **SFRA** 扫描。完整的 **SFRA** 扫描需要几分钟才能完成。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-30 所示。
10. 频率响应数据保存在工程文件夹的 **SFRA** 数据文件夹下，并使用 **SFRA** 运行的时间添加时间戳。
11. 完成实验后，在 **Expression Window** 中设置以下参数以停止代码：
  - **BT4CH\_userParam\_chX->iref\_A** = 0
  - **BT4CH\_userParam\_chX->vrefCharge\_V** = 0
  - 设置 **BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool** = 0
  - 将 **BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON** 设置为 0 以禁用输出继电器
  - 终止程序

Expression	Type	Value
BT4CH_calibrationMode	enum <unname...	Disabled
BT4CH_startupMode	enum <unname...	DCM_Startup
BT4CH_HAL_InputVoltageSense_V	float	12.4133673
BT4CH_ISR2_Loading	float	0.165582791
BT4CH_ISR2_LoadingMax	float	0.179018527
BT4CH_userParam_ch3	struct <unname...	{Iref_A=8.5,VrefCharge_V=0.075000...
Iref_A	float	8.5
VrefCharge_V	float	0.075000003
VrefDischarge_V	float	3.0
dir_bool	unsigned int	1
Relay_ON	unsigned int	1
Start_bool	unsigned int	1
remote_sense	unsigned int	1
DutyRef_pu	float	0.0
IbatCal_pu	float	0.200000003
VbatCal_pu	float	0.400000006
IoutGain_pu	float	0.0730994046
IoutOffset_pu	float	0.00584799051
IoutGain_A	float	13.6800022
IoutOffset_A	float	-0.0800005198
VoutGain_pu	float	0.24248305
VoutOffset_pu	float	-0.000581979752
VoutGain_V	float	4.1239996
VoutOffset_V	float	0.00240008417
VbatGain_pu	float	0.200000018
VbatOffset_pu	float	-0.000600039959
VbatGain_V	float	4.99999952
VbatOffset_V	float	0.00300019956
BT4CH_measureVI_ch3	struct <unname...	{Ibat_A=5.27749491,Vout_V=0.0879...
Ibat_A	float	5.27365923
Vout_V	float	0.0880440623
Vbat_V	float	0.0750049874

图 3-28. 实验 4 表达式窗口，闭环

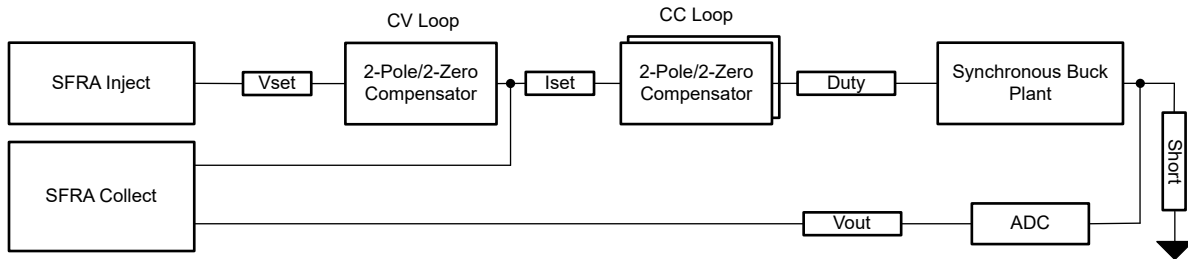


图 3-29. 用于闭环电压控制的 SFRA 设置

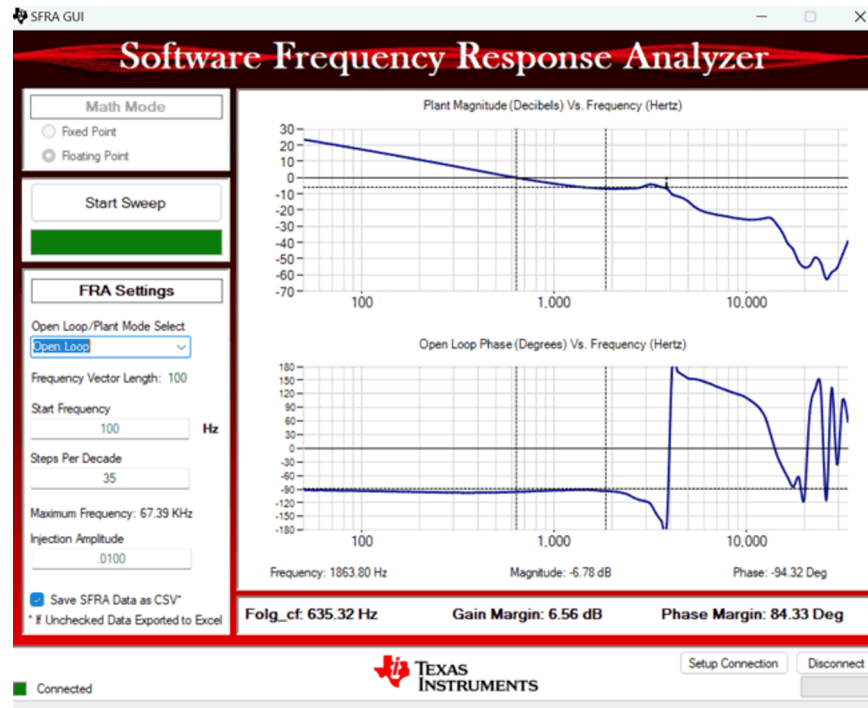


图 3-30. 电压控制闭环频率响应

### 3.3.5.5 实验 5. 闭环电流和电压控制 - 四通道

#### 3.3.5.5.1 设置实验 5 的软件选项

1. 要运行该实验，请确保按前面部分（即节 3.3.2）所述设置硬件。
2. 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 3，否则跳至步骤 4。
3. 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
  - 对于“Lab”，选择 *Lab 5: Closed-Loop CCCV All Channels 实验*
  - 选择所有通道
  - 禁用 SFRA 选项
  - 关闭补偿设计器
4. 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 *solution\_settings.h* 文件中修改 *Build Settings*。

```
#define LAB_NUMBER (5)
#define CHANNEL_NUMBER (5)
#define SFRA_ENABLED (false)
```

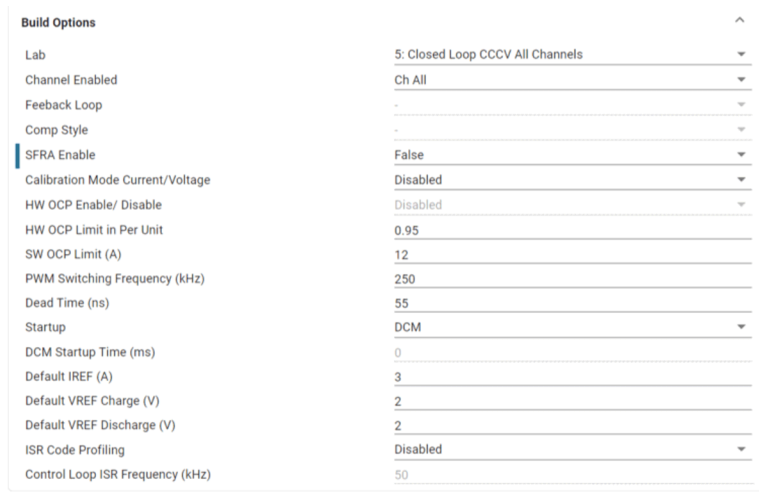



图 3-31. 实验 5 的构建选项


### 3.3.5.5.2 生成和加载工程以及设置调试环境

使用以下步骤来构建和加载工程并设置调试环境。

1. 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project**。
2. 这将成功生成工程。
3. 在 Project Explorer 中，确保在 targetConfigs 项下将正确的目标配置文件设置为“Active”。
4. 点击 **Run → Debug** 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
6. 要在监视/表达式窗口中添加变量，请点击 **View → Scripting Console** 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open**，然后浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv\_chX.js** 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
7. 点击监视窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以启用控制器中值的持续更新。

### 3.3.5.5.3 运行代码

使用以下步骤运行实验 5 的代码：

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 **Expression Window** 中 BT4CH\_InputVoltageSense\_V 是否处于 12V 至 15V 范围内。
4. 从 **Expression Window** 中设置以下参数：
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 1 以启用输出继电器
  - BT4CH\_userParam\_chX->iref\_A = 5.0
  - BT4CH\_userParam\_chX->vrefCharge\_V = 3
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 1
  - 有关 **Expression Window** 设置，请参阅图 3-32
5. BT4CH\_measureVl\_chX 变量显示 DC/DC 转换器的输出电流和电压。
6. 更改 Iref 和 Vref 以查看恒流模式和恒压模式之间的转换。
7. 要更改电流方向，请切换 BT4CH\_userParam\_chX->Dir\_bool。
8. 完成实验后，在 **Expression Window** 中设置以下参数以停止代码：
  - BT4CH\_userParam\_chX->iref\_A = 0
  - BT4CH\_userParam\_chX->vrefCharge\_V = 0
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 0
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 0 以禁用输出继电器
  - 终止程序



- 在所有通道上重复此操作，直到每个通道都关闭

Expression	Type	Value
BT4CH_lab	enum <unname...	Lab5_AllChannelClosedLoopCV
BT4CH_sfraStatus	enum <unname...	SFRA_Disabled
BT4CH_calibrationStatus	enum <unname...	Calibration_Disabled
BT4CH_calibrationMode	enum <unname...	Disabled
BT4CH_startupMode	enum <unname...	DCM_Startup
BT4CH_HAL_InputVoltageSense_V	float	13.2465382
BT4CH_ISR2_Loading	float	0.280758649
BT4CH_ISR2_LoadingMax	float	0.292939395
BT4CH_userParam_ch1	struct <unname...	(Iref_A=5.0,VrefCharge_V=2.0,VrefDi...
Iref_A	float	5.0
VrefCharge_V	float	2.0
VrefDischarge_V	float	3.0
dir_bool	unsigned int	1
Relay_ON	unsigned int	1
Start_bool	unsigned int	1
remote_sense	unsigned int	0
DutyRef_pu	float	0.0
IbatCal_pu	float	0.200000003
VbatCal_pu	float	0.400000006
IoutGain_pu	float	0.0789889395
IoutOffset_pu	float	0.00829383731
IoutGain_A	float	12.6600008
IoutOffset_A	float	-0.104999982
VoutGain_pu	float	0.24248305
VoutOffset_pu	float	-0.000581979752
VoutGain_V	float	4.1239996
VoutOffset_V	float	0.00240008417
VbatGain_pu	float	0.200000018
VbatOffset_pu	float	-0.000600039959
VbatGain_V	float	4.99999952
VbatOffset_V	float	0.00300019956
BT4CH_measureVI_ch1	struct <unname...	(Ibat_A=-0.0642971396,Vout_V=1.6...
Ibat_A	float	-0.0635485798

图 3-32. 实验 5 Expression Window

### 3.3.5.6 校准

1. 要运行该实验，请确保按节 3.3.3 所示设置硬件。两点校准方法用于校准增益和偏移误差。
2. 有三种电流测量方式：
  - a. 在电压模式下使用外部精密电阻器和 6.5 位 DMM 测量电阻器两端的压降，然后即可计算电流。
  - b. 测量 TIDA-010086 板上的感应电阻器两端的电压
  - c. 用探针接触电路板上的 Tp1 和 Tp2 以测量分流器两端的压降
  - d. 使用电子负载读数，但这种方法需要高精度的电子负载或源测量单元 (SMU) 设备。
3. 要测量电压，请在降压转换器输出电压两端使用 DMM 并使用遥感终端 J8
4. 打开 SYSCONFIG 页面，选择“Lab 5”，并将 Calibration Mode 设置为 Current Calibration。图 3-33 显示了用于电流校准的 SYSCONFIG 页面设置。
  - 保存 SYSCONFIG 页面，并运行代码。
  - 打开 Expression Window。
  - 使用 BT4PH\_userParam\_V\_I\_chX->IbatCal\_pu 参数更新输出电流。
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON 设置为 1 以启用输出继电器。
  - 设置 BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 1。
  - 将 BT4CH\_userParam\_chX->IbatCal\_pu 设置为“0.3”和“0.5”，并记下输出电流读数。
  - 在 bt4ch\_gan\_cal.h 文件中更新实际输出电流读数。

```
#define BT4CH_IBAT_ACTUAL_CH1_P1_A ((float32_t)3.59)
#define BT4CH_IBAT_ACTUAL_CH1_P2_A ((float32_t)6.02)
```

- 对通道 2、3 和 4 重复这些步骤。
- 打开 **SYSCONFIG** 页面，选择“Lab 5”，并将 **Calibration Mode** 设置为 **Voltage Calibration**。图 3-34 显示了用于电压校准的 **SYSCONFIG** 页面设置。
    - 保存 **SYSCONFIG** 页面，并运行代码。
    - 打开 **Expression Window**。
    - 使用 **BT4PH\_userParam\_V\_I\_chX->vbatCal\_pu** 参数更新输出电流。
    - 将 **BT4CH\_userParam\_chX->Relay\_ON** 设置为 1 以启用输出继电器。
    - 设置 **BT4CH\_userParam\_chX->en\_bool = 1**。
    - 将 **BT4CH\_userParam\_chX->vbatCal\_pu** 设置为“0.2”和“0.6”，并记下输出电流读数。在 **bt4ch\_cal.h** 文件中更新实际输出电流读数。

```
#define BT4CH_VBAT_ACTUAL_CH1_P1_V ((float32_t)0.9976)
#define BT4CH_VBAT_ACTUAL_CH1_P2_V ((float32_t)2.998)
```

- 对通道 2、3 和 4 重复这些步骤。
- 校准完成后，停止工程并打开 **SYSCONFIG** 页面，禁用校准模式。
  - 当使用非 **powerSuite** 版本的工程时，对于该设计，解决方案为直接在 **solution\_settings.h** 文件中修改 **Build Settings**。将 **CALIBRATION\_MODE** 设置为 (1) 以进行电流校准，设置为 (2) 以进行电压校准。

```
#define LAB_NUMBER (5)
#define CHANNEL_NUMBER (5)
#define CALIBRATION_ENABLED (true)
#define CALIBRATION_MODE (1)
```

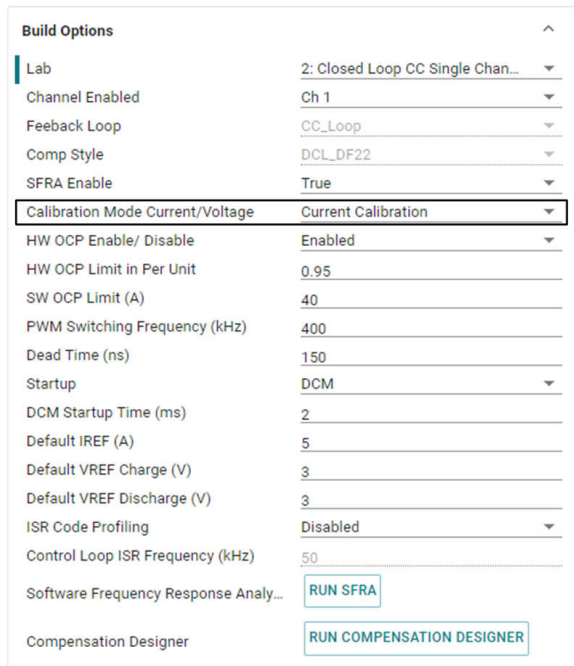


图 3-33. 电流校准的构建选项

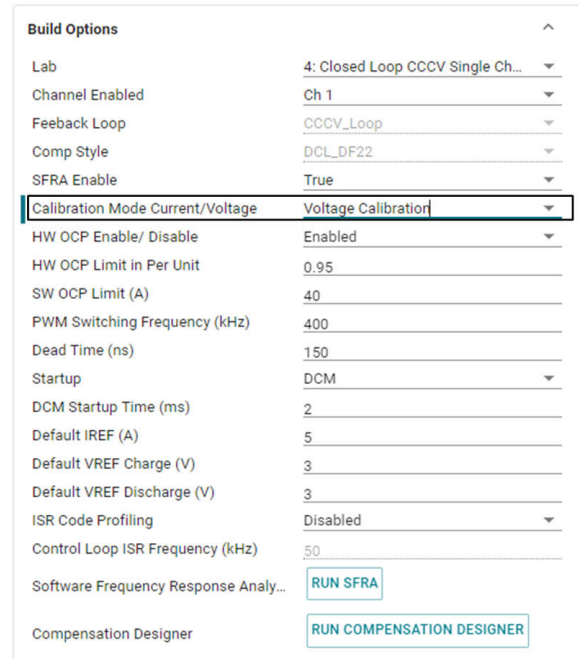


图 3-34. 电压校准的生成选项

### 3.4 测试结果

#### 3.4.1 电流负载调整率

使用节 3.3.3 中的设置测试电流负载调整率。

表 3-2. 电流负载调整率

FSR (A)	10							
输出模式	充电				放电			
ISET (A)	0.1	1	5	10	0.1	1	5	10
电子负载 CV 模式	终端电压读数							
VSET(V)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)	I <sub>actual</sub> (A)
1	0.0996	0.9998	4.99993	10.0005	-0.1005	-1.0001	-5.001	-10.001
2	0.0995	0.9996	4.99995	10.0008	-0.1002	-1.00025	-5.0011	-10.001
3	0.09985	0.9995	4.99995	10.0008	-0.1005	-1.0002	-5.001	-10.0008
4	0.09925	0.9995	4.99995	10.0008	-0.1005	-1.0002	-5.001	-10.0011
误差 (mA)	0.7500	0.5	0.05	-0.8	-0.5	-0.25	-1.1	-1.1
误差 (%FSR)	0.0075	0.0050	0.0005	0.0080	0.0050	0.0025	0.0110	0.0110

#### 3.4.2 电压负载调整率

表 3-3. 电压负载调整率

FSR (V)	5					
VSET(V)	0.2	1	2	3	4	5
电子负载 CC 模式	电流读数					
ISET(A)	V <sub>actual</sub> (V)	V <sub>actual</sub> (V)	V <sub>actual</sub> (V)	V <sub>actual</sub> (V)	V <sub>actual</sub> (V)	V <sub>actual</sub> (V)
无负载	0.20003	1.00001	2.00001	2.99997	3.99994	4.99991
1	0.20002	0.99998	1.99998	2.99998	3.99994	5.0001
4	0.20002	1.0002	2.00004	3.00006	3.99997	5.00006
8	0.20002	1.00005	2.00002	3.00002	3.99993	5.00002
10	0.20002	1.00004	2.00002	3.00004	3.99994	5.00002
误差 (mV)	0.0300	0.0500	0.0400	0.0600	-0.0700	-0.0900
误差 (%FSR)	0.0003	0.0005	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009

### 3.4.3 电流线性测试

电流控制精度取决于电流检测放大器的电流感应电阻器、增益、偏移电压和漂移。该测试在充电模式下应用两点校准。校准后总电流误差保持在  $\pm 0.02\%$  以下。图 3-35 显示了结果。

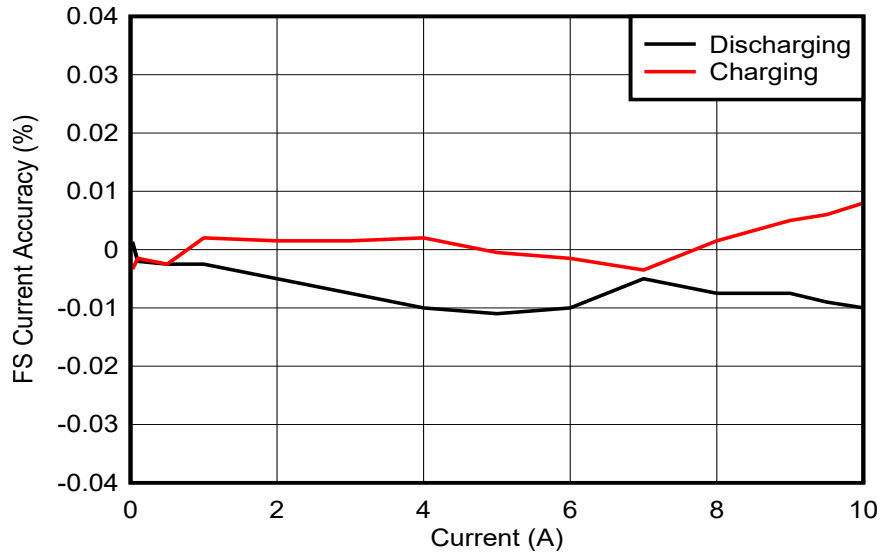


图 3-35. 电流控制精度测试

### 3.4.4 电压环路线性测试

电压环路校准在空载条件下进行。图 3-36 中的黑色曲线显示了空载条件下的电压控制线性，红色曲线显示了 10A 负载条件下的电压精度。测试证明，在不同输出负载条件下，电压环路调节误差保持在  $\pm 0.01\%$  以下。

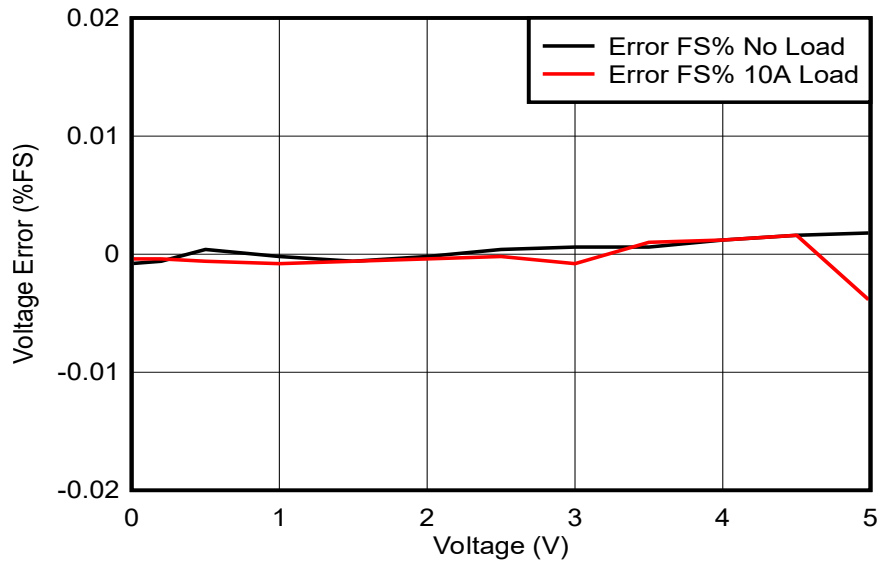


图 3-36. 电压控制线性测试

### 3.4.5 双向电流开关时间

对于充电和放电切换（请参阅图 3-37 和图 3-38），电流响应时间保持快速平滑。通过适当的调优，开关电流运行的瞬态响应时间可以达到  $400\ \mu\text{s}$  以内。

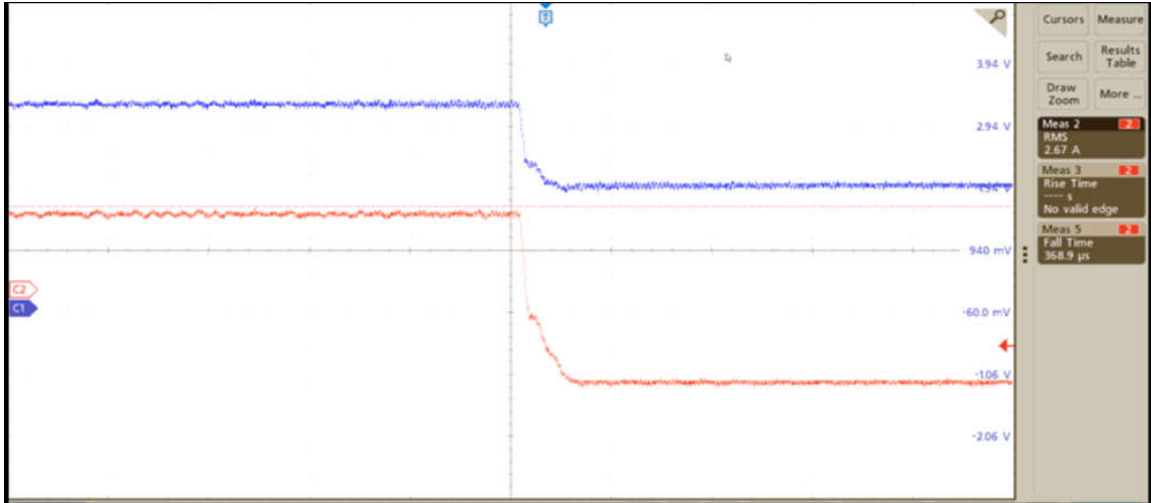


图 3-37. 电流切换，充电至放电

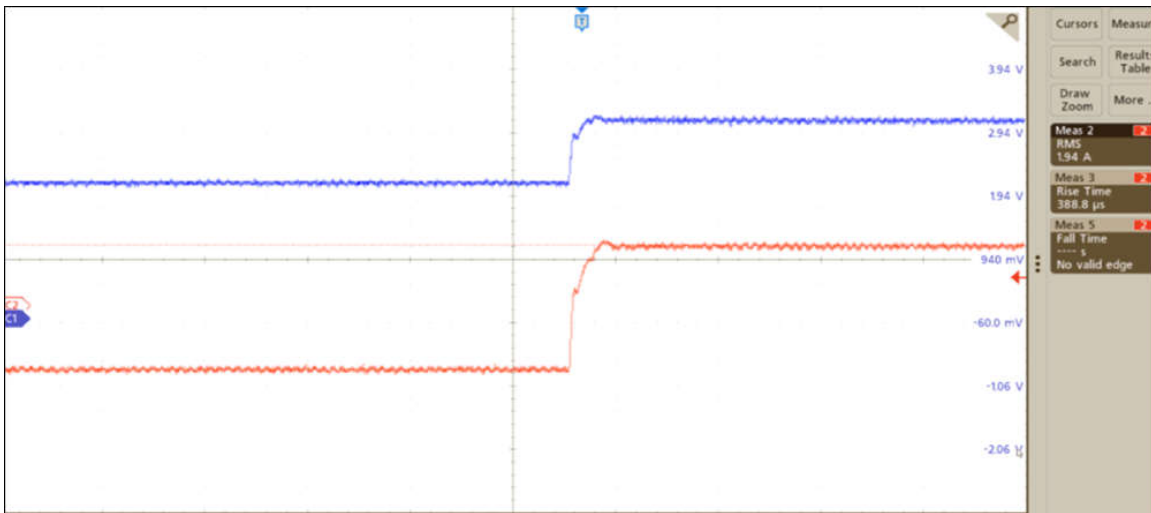


图 3-38. 电流切换，充电至放电

### 3.4.6 电流阶跃响应

控制环路优化发生在  $15\text{m}\Omega$  输出负载处，在  $100\ \mu\text{s}$  上升时间和下降时间内实现。不同的电池负载可产生不同的结果。根据电池负载优化环路，对于实现所需的结果仍然很重要。有关电流阶跃波形，请参阅图 3-39 和图 3-40。

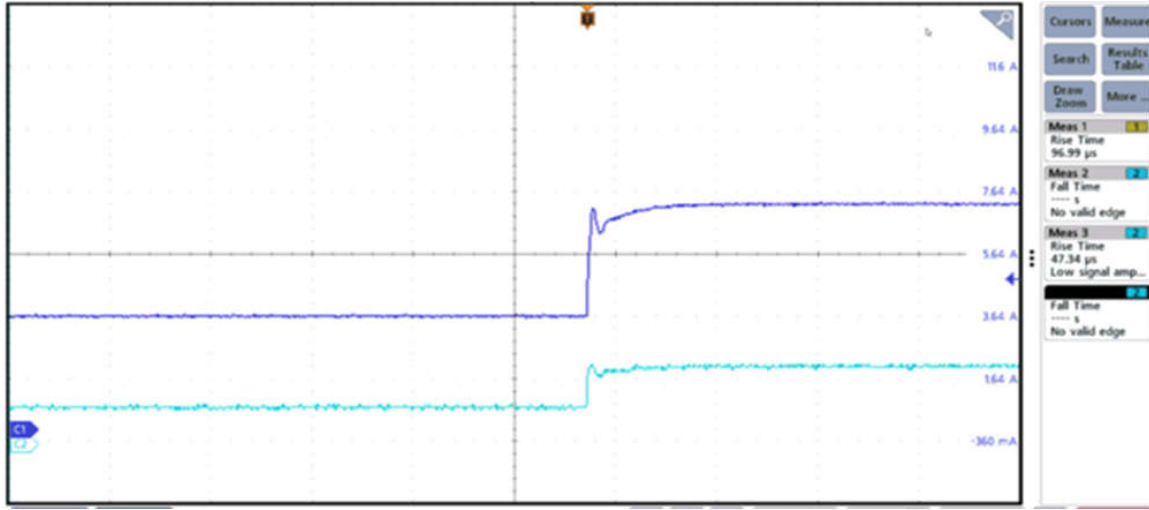


图 3-39. 电流阶跃上升时间

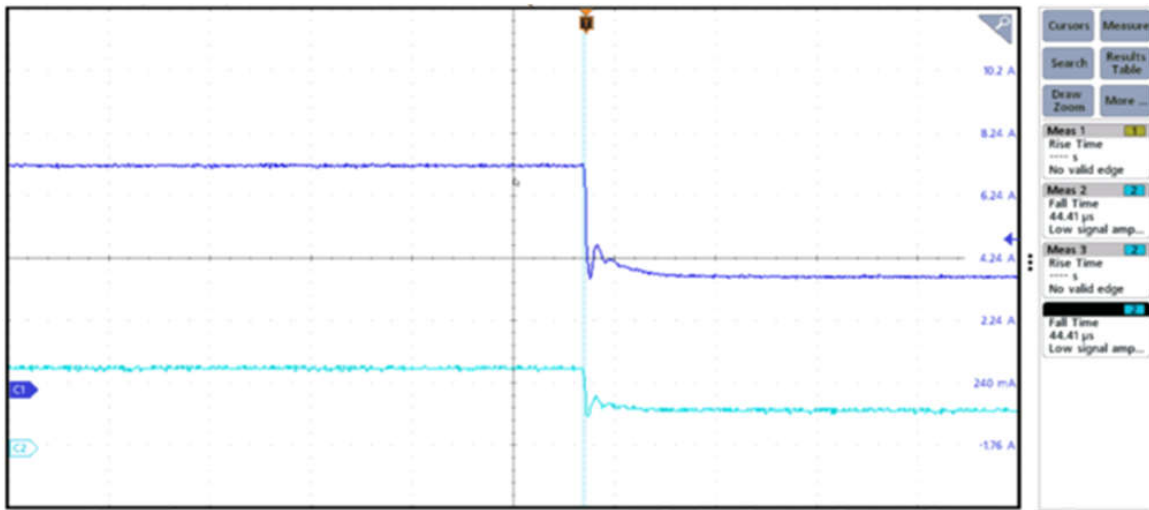


图 3-40. 电流阶跃下降时间



## 4 设计和文档支持

### 4.1 设计文件

#### 4.1.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 [TIDA-010086](#) 的设计文件。

#### 4.1.2 BOM

若要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010086](#) 的设计文件。

### 4.2 工具与软件

#### 工具

[TMDSCNCD28P65X](#)

F28P65 controlCARD 评估模块

#### 软件

[CCSTUDIO](#)

Code Composer Studio (CCS) 集成开发环境 (IDE)

[C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK](#)

适用于 C2000™ MCU 的 DigitalPower 软件开发套件 (SDK)。

### 4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[TMS320F28P65x 实时微控制器数据表](#)
2. 德州仪器 (TI)，[ADS9324 具有集成模拟前端的 16 通道 16 位 1MSPS 同步采样 SAR ADC 数据表](#)
3. 德州仪器 (TI)，[INA630 精密、126dB CMRR、间接电流反馈仪表放大器数据表](#)

### 4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

### 4.5 商标

TI E2E™, and C2000™ Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 5 作者简介

**ETHAN YU** 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向测试和测量应用的参考设计。Ethan 取得了德州农工大学的电子工程理学学士学位。

作者感谢 SHAURY ANAND、MEGHANA MANAVAZHI 和 TIM PRICE 对本参考设计的支持。

## 6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (November 2020) to Revision A (December 2025)	Page
• 将锂离子电池化成部分替换为 <a href="#">锂离子电芯化成设备</a> 。.....	2
• 更新了 <a href="#">主要系统规格表</a> 。.....	2
• 更新了 <a href="#">图 2-1</a> 。.....	3
• 更新了 <a href="#">节 2.2</a> 。.....	4
• 添加了 <a href="#">输出电感器和电容器选型</a> 部分。.....	5
• 更新了 <a href="#">重点产品</a> ，添加了新器件。.....	7
• 更新了 <a href="#">TIDA-010086 硬件</a> 图像。.....	8
• 更新了 <a href="#">软件</a> 部分。.....	9
• 添加了 <a href="#">测试程序</a> 部分。.....	17
• 更新了 <a href="#">测试结果</a> 部分.....	35

## 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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月