参考文献

Design Guide: TIDA-011001

TIDA-011001 四通道、6A、0V 至 5V 可编程电源参考设计

说明

此参考设计为老化和可靠性测试应用提供了一种高密度四通道数控可编程电源。此设计支持 $12V_{DC}$ 输入总线，并提供四个独立稳压输出通道，每个通道的可调节电压范围为 0V 至 5V，每通道的最大持续输出电流为 6A。

该控制架构以执行 2P2Z（双极，双零点）数字补偿器的 C2000™ 实时微控制器 (MCU) 为核心。16 位四通道 DAC 通过反馈引脚电流注入，动态地调制降压电源模块的输出。24 位 16 通道 SAR ADC 利用集成式低漂移 PGA 同时采集电流和电压遥测数据；该设计可以在整个负载范围内实现低于满标度 ±0.005% 的负载调整误差。

资源

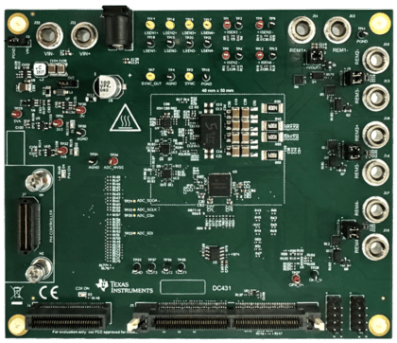
TIDA-011001	设计文件夹
TPSM8F7620	产品文件夹
ADS9308V8I	产品文件夹
DAC80508	产品文件夹
TMS320F28P650	产品文件夹
REF50、OPA4990	产品文件夹

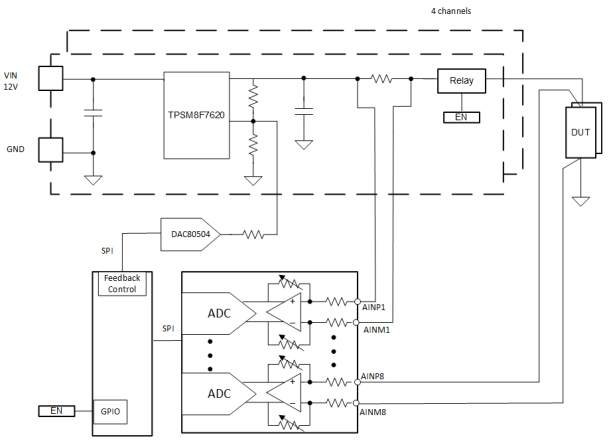
特性

- 可在 0V 至 $5V_{DC}$ 电压范围内对四个独立输出通道进行编程
- 电流钳位功能集成在数字控制环路中；无需外部模拟限制电路
- 高精确度负载调整：
  - 电压负载调整：< ±0.25mV（相当于 5V 满标度的 ±0.005%）
  - 电流负载调整：< ±0.3mA（相当于 6A 满标度的 ±0.005%）
- 16 位 DAC 分辨率，可实现亚毫伏级的输出电压设定点
- 采用多通道高精度 SAR ADC，实现同步 24 位遥测，可同时监测电流和电压，每通道速率高达 125kSPS。
- 无论是空载还是满负载条件，输出电压建立时间均少于 200µs

应用

- 可编程直流电源





English Document: TIDUFK0

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 系统说明

传统上，老化测试被视为一种用于消除早期失效的可靠性筛选流程。通过使受测器件 (DUT) 长时间承受高温和电应力，该流程促使*早期失效*故障（由制造不一致性引起的缺陷）在产品交付客户之前暴露出来。

对于 AI 加速器和 GPU 中使用的高带宽存储器 (HBM) 以及高性能 ASIC 等新兴应用领域，老化测试已不再只是一项排序或筛选操作，而是产品规范强制要求、不可或缺的流程。新的封装工艺要求器件在规定的最短持续时间（通常为数百至数千小时）内承受规定的电压和温度应力曲线，并将其作为产品鉴定或客户验收的条件。这些应用特定应力曲线日益复杂，涉及多个电源轨、严格的电流容差、动态电源时序以及逐引脚合规性监测，这对老化测试电源提出了传统模拟设计难以轻易满足的要求。

现代老化测试系统必须同时为数百至数千个 DUT 引脚提供稳定且可重复的电压和电流曲线。尽管 DUT 的电源状态切换导致负载发生大幅动态变化，电源仍必须保持严格稳压，同时提供准确的遥测数据，以检测器件的异常行为。随着测试区域的密度不断提高，如何在更小的占用空间内封装更多测试点也变得同样重要，因此通道密度和高效功率转换尤为关键。

此参考设计通过多通道数字闭环架构满足了上述要求。TPSM8F7620 四通道降压电源模块提供高密度功率级，将 MOSFET、栅极驱动器和电感器集成在尺寸为 12.0mm × 7.0mm × 2.4mm 的单个 BGA 封装中。TMS320F28P65x C2000 MCU 通过软件闭合稳压环路，可灵活地实现每通道补偿调优、可编程电流钳位和自定义电源时序控制；在传统设计中，实现这些功能需要复杂的分立模拟电路。ADS9308V8I 24 位 ADC 可在所有通道上提供高精度同步遥测，而 DAC80504 则提供实现亚毫伏级设定点精度所需的高分辨率电压驱动能力。

1.1 主要系统规格

表 1-1. 规格

参数	规格
输入电压	12V-15V
输出电压	100mV-5V (FPWM)
每通道直流电流	6A（最大值）
电流输出精度	±0.005%
电压输出精度	±0.005%
电压趋稳时间	从空载到满负载的趋稳时间小于 150 µs

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 显示了 TIDA-011001 的方框图。

12V 输入总线为 TPSM8F7620 降压电源模块的全部四个通道供电。每个通道均可独立将 12V 电源轨降至由其 FB 引脚位置设置的稳压输出电压。C2000 MCU 通过高速 SPI 总线向 DAC80504 发送 16 位数字代码；DAC 的输出驱动各降压通道 FB 引脚处的电阻器网络，注入偏置电流，从而改变稳压输出电压。在反馈路径中，ADS9308V8I 同时对每个通道的负载电压和高侧分流电流进行采样，并通过第二条 SPI 总线将测量结果传回 C2000 MCU。MCU 通过计算 2P2Z 校正值并写入更新后的 DAC 代码来闭合环路。

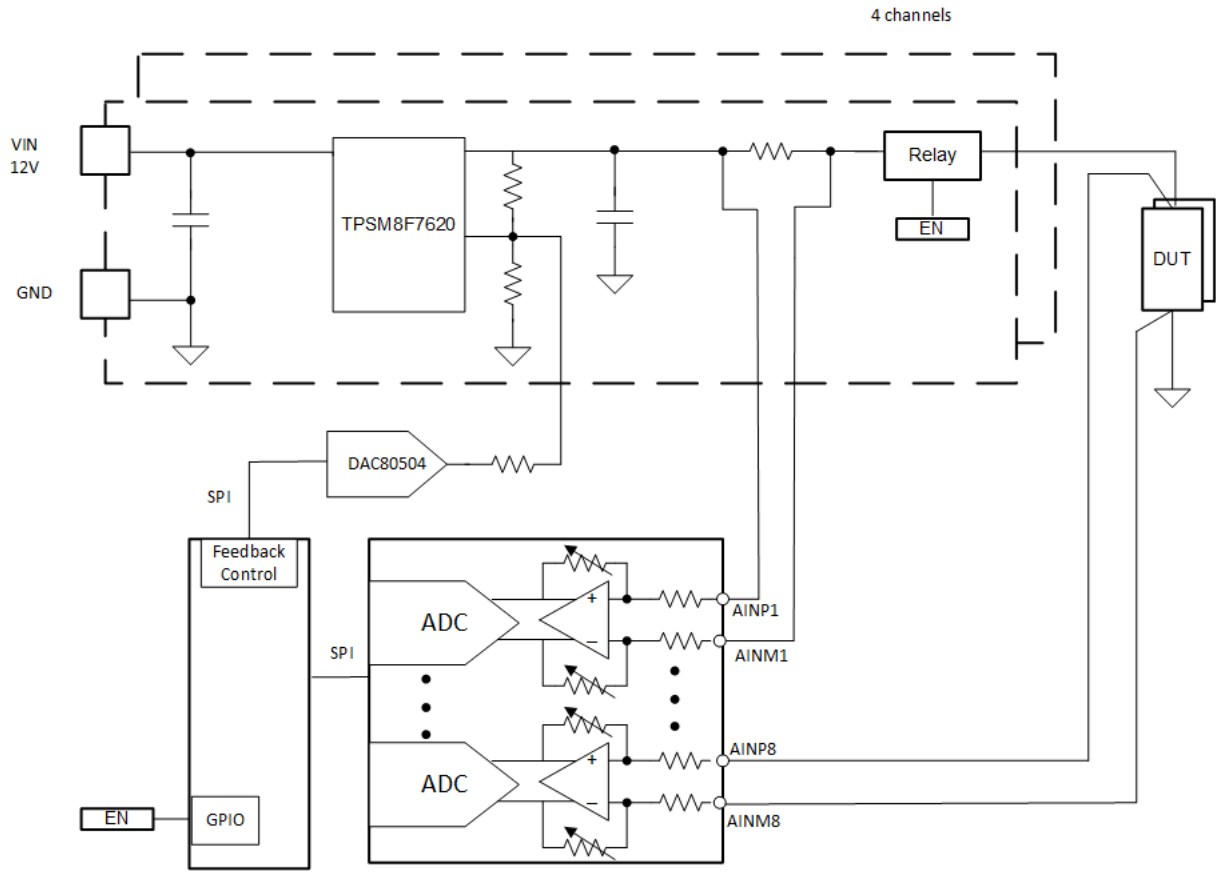


图 2-1. 系统方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 降压转换器子系统

TPSM8F7620 配置为四个相互独立的同步降压稳压器，共用一条 12V 输入电源轨。每个通道均采用固定频率峰值电流模式控制，并利用内部误差放大器将外部 FB 节点调节至 0.6V 基准电压。由于 MOSFET 驱动器、自举电路和屏蔽电感器均集成在模块封装内部，因此外部开关回路面积得以最大限度地缩小，从而降低 EMI，并简化 PCB 布局。开关频率可在 400kHz 至 2.2MHz 之间配置；可以调整不同的开关频率，以在 12V 至 0.1V-5V 的转换比下平衡开关损耗与输出纹波。

2.2.2 数模转换控制设置路径

为了动态编程各个通道的限制，C2000 DSP 通过高速 SPI 总线向 DAC80504 传输数字代码。本设计使用了 C2000 数字控制环路库中的 2P2Z 数字补偿滤波器。如需更多信息，请参阅 *C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK*。

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

DAC80504 用于提供极其纯净的 0V 至 5V 连续模拟参考电压。当 V_{OUT} 接近 0V 时，V_DAC 必须接近其最大值 5V。为了最大限度地提高控制环路带宽，ADC 和 DAC 都需要具备较短的趋稳时间。DAC8050x 稳定至 1 LSB 所需的时间通常小于 10µs（16 位分辨率、5V 跨度对应约 76µV）。

2.2.3 高精度测量前端（反馈路径）

为了将稳压目标维持在 0.005%，需要跟踪负载状况，并采用能够避免热漂移影响的遥测技术。系统将负载点电压检测和高侧电流分流压降直接传输至 ADS9308V8I 24 位 ADC。

- *电压检测：*低漂移差分差动放大器对直接来自 DUT 插座引脚的电源轨电压进行衰减和缓冲。
- *电流检测：*集成式零漂移可编程增益放大器 (PGA) 可放大精密分流器上的正向压降，同时不会引入偏移误差。

由于 ADC 以 125kSPS 的速率同时对全部 16 个通道进行采样，因此 C2000 MCU 能够接收实时且相位对齐的测量数据。MCU 通过数字比例积分 (PI) 算法处理这些数据向量，计算直接发送到电源转换元件的调节命令，以立即抵消任何负载或线路波动，从而确保在故障事件期间能从恒压 (CV) 模式快速转换到恒流 (CC) 正向电流限制模式。

2.3 重点产品

2.3.1 TPSM8F7x20

TPSM8F7x20 是一款高功率密度的四通道降压电源模块，设计用于为高达 11V 的宽输出电压范围提供高效、可靠的电源转换。该模块集成了 MOSFET、电感器和选择电容器，以缩小布板空间并降低布局复杂性。该模块支持相位交错的 2 相、3 相和 4 相可堆叠性，可配置为多相和多路输出电源轨。它采用外形小巧的超模压 BGA 电源模块封装，尺寸为 12.0mm × 7.0mm × 2.4mm。该模块采用具有内部和外部补偿的电流模式控制。

功能包括：

- 模拟电源电压为 5V 和 1.8V，数字 I/O 电源电压范围为 1.8V-3.3V
- 连续可调节开关频率范围：400kHz 至 2.2MHz
- 输出放电功能
- 与一个外部时钟同步

2.3.2 ADS9308V8I

ADS9308V8I 是一款 16 通道、24 位 SAR ADC，具有集成模拟前端，可同时进行电流和电压检测。该器件集成了 8 个用于电流检测的零漂移可编程增益放大器和 8 个用于电压检测的低漂移可编程增益差分放大器。该器件采用 1.8V 和 5V 正电源导轨供电。ADS9308V8I 的每通道采样率高达 125kSPS，在 ±5V 范围内的 SNR 为 95.5dB。

功能包括：

- 可编程电流传感，输入范围为 ±25mV、±50mV、±100mV、±150mV 和 ±200mV
- 可编程电压传感，输入范围为 ±50V、±25V、±12.5V、±10V、±6.25V、±5V 和 ±2.5V
- 模拟电源电压为 5V 和 1.8V，数字 I/O 电源电压范围为 1.8V-3.3V
- 8.0mm × 8.0mm VQFN 封装

2.3.3 TMDSCNCD28P65X

TMDSCNCD28P65X 是一款适用于 TI C2000™ MCU 系列 F28P65x 器件的低成本评估和开发板。TMDSCNCD28P65X 配备 HSEC180（180 引脚高速边缘连接器），并且作为 controlCARD，非常适合用于初始评估和原型设计。进行 TMDSCNCD28P65X 评估时，需要一个 180 引脚扩展坞 TMDSHSECDOCK，后者可单独购买或捆绑在套件中。在此设计中，该控制卡用于数字控制环路设置。

该 MCU 的特性包括：

- 最多包含三个 CPU：两个 32 位 C28x DSP CPU 和一个 CLA CPU，均在 200MHz 下运行
- 带有 5 个闪存组的 1.28MB CPU 可映射闪存（受 ECC 保护）
- 具有 248KB RAM（采用增强型奇偶校验保护）
- 具有 36 个脉宽调制器 (PWM) 通道，均支持 150ps 高分辨率脉宽调制 (HRPWM)
- 提供多种数字电源库，可简化软件实现

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2.3.4 DAC80504

DAC80504 是一款 16 位、4 通道器件，具有 ±1 LSB INL 的高线性度和 ±0.1% FSR 的超低总未调整误差 (TUE)。

该器件集成了低漂移的 2.5V 内部基准，在大多数应用中无需使用外部精密基准。用户可选增益配置提供 1.25V（增益 = ½）、2.5V（增益 = 1）或 5V（增益 = 2）满标度输出电压。该器件由 2.7V 至 5.5V 单电源供电运行，并采用小型 3mm × 3mm QFN 封装。

2.3.5 REF50

REF50 为 ADC 和 DAC 提供低噪声、低漂移且高精度的电压基准，以确保两者的漂移保持一致。该器件的噪声低至 3 µ VPP/V，且在前 1000 小时之后，长期漂移为 50ppm。REF50 系列提供增强等级 (REF50xxEI)、高等级 (REF50xxI) 和标准等级 (REF50xxAI)。

其特性如下：

- 温度漂移（最大值）
  - 增强级（新）：2.5ppm/°C
  - 高级：3ppm/°C
  - 标准级：8ppm/°C
- 高精度（最大值）：
  - 增强级：0.025%
  - 高级：0.05%
  - 标准级：0.1%

2.3.6 OPAx990

OPAx990 高压 (40V) 通用运算放大器用于降压转换器的通用钳位。这些器件具有出色的直流精度和交流性能，包括轨到轨输入/输出、低偏移电压（典型值为 ±300µV）和低温漂（典型值为 ±0.6µV/°C）

该器件具有以下特性：

- 宽带宽：1.1MHz GBW
- 支持多路复用器/比较器输入
- 高共模抑制：115dB
- 低偏置电流：±10pA
- 高压摆率：4.5V/µs

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 系统设计原理

3.1 转换器降压范围

TPSM8F7620 误差放大器通过调整占空比，将 FB 引脚精确维持在 0.6V。当 DAC 将 V_DAC 驱动至明显高于 0.6V 时，该器件会向 FB 节点注入额外电流。为了维持 0.6V 的平衡状态，误差放大器会降低占空比，直至 V_OUT 下降。从数学角度来看，将 V_DAC 推向满标度值即可使 V_OUT 接近 0V。

TPSM8F7620 配置为强制 PWM (FPWM) 模式，从而能够实现较低的输出电压。在正常 DCM 模式下，当负载电流非常小且 V_OUT 浮高时，转换器会停止开关。FPWM 会强制进行连续开关，并允许反向电感器电流（低侧 FET 在电感器电流过零后导通，主动将电流从输出端拉回到接地端）。这样可以实现低至 mV 的稳定调节。

$$\frac{V_{OUT}-0.6}{R_{FBT}}+\frac{V_{DAC}-0.6}{R_{DAC}}=\frac{0.6}{R_{FBB}} \quad (1)$$

3.2 故障钳位保护

配置为有源缓冲器的低泄漏运算放大器与低泄漏肖特基二极管相结合，可在 FB 节点上产生精密的 0.4V 钳位。

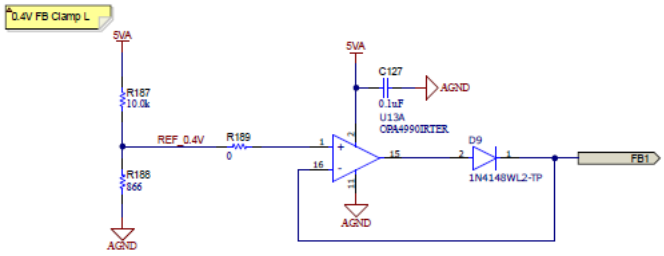


图 3-1. 故障钳位保护

正常运行时，FB 节点电压保持在 0.6V，钳位二极管反向偏置且未激活。如果软件发生故障或 DAC 代码出错，导致 FB 节点电压降至 0.4V 以下（这会使电源模块要求采用最大占空比，并导致 V_OUT 不受控地升至最高值），钳位电路会立即将 FB 节点电压钳制在 0.4V，从而无论软件处于何种状态，都能限制输出过电压偏移。

3.3 电流钳位行为

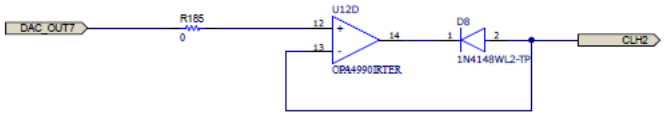


图 3-2. 降压模块模拟/数字环路调节

该电路可以协调降压模块模拟补偿器和数字控制环路信号之间的控制环路优先级，以实现所需的钳位行为。CLH 节点连接到 TPSM8F7620 的硬件补偿器。

TPSM8F7620 的 COMP 引脚是峰值电流模式误差放大器的内部节点，可与器件的特殊功能（例如 OVP 限制、控制环路优先级等）交互。该设计将 COMP 引脚引出至外部（CLH 节点），并通过一个单向快速二极管将其连接到 DAC 的电流钳位输出端。在正常的 CV（恒压）运行模式下，COMP 节点电压低于 DAC 钳位电平，因此二极管保持反向偏置，数字补偿环路正常运行且不受干扰。

在发生短路或突发电流浪涌时，电源模块会尝试增大占空比以维持输出电压，导致 COMP 电压迅速上升。当 COMP 电压超过 DAC 钳位阈值时，二极管导通，通过 1200pF 电容器和 10.5kΩ 电阻器构成的网络向 COMP 节点注入电流。该 RC 网络会限制 COMP 斜坡的转换率，立即阻止占空比继续增大，并在单个开关周期内为电感器峰值电流设置上限，远早于数字控制环路作出响应。当硬件将故障抑制在可控的线性范围内后，数字 PI 环路便接管控制，使通道平稳地从 CV 模式切换至 CC（恒流）模式，同时保持编程的电流钳位限值。

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

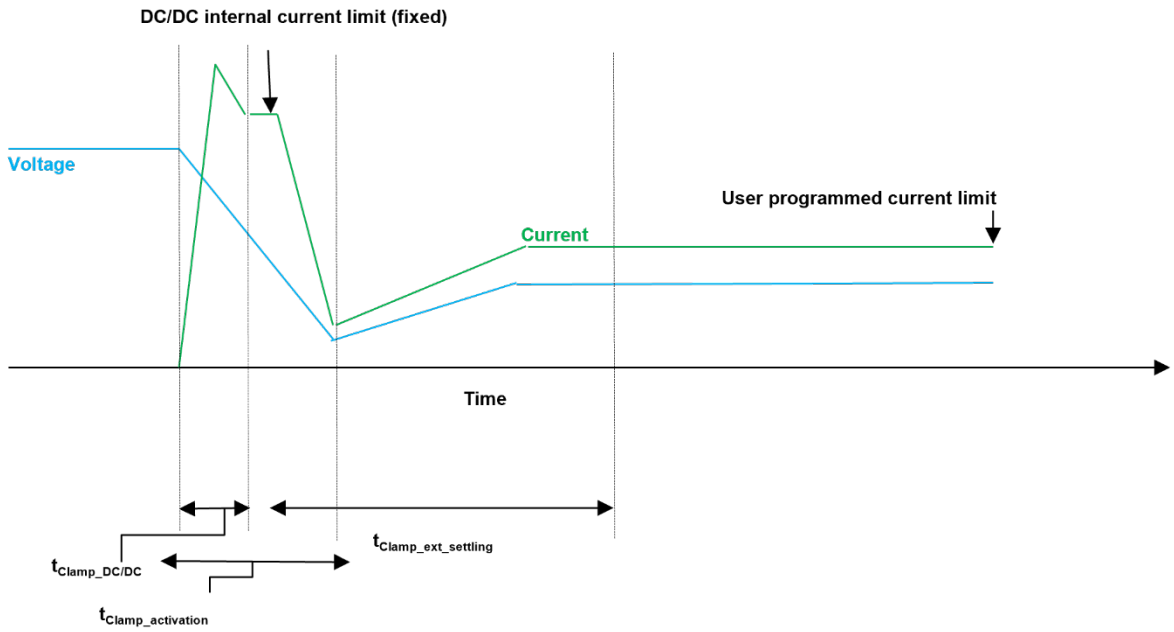


图 3-3. 电流钳位行为

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

可使用以下设备搭建此参考设计：

- 输出功率为 120W 的 12V 电源
- 配备电流探头和电压探头的示波器
- 用于电压和电流校准的 6.5 位数字万用表
- 用于实时系统控制和测量的计算机

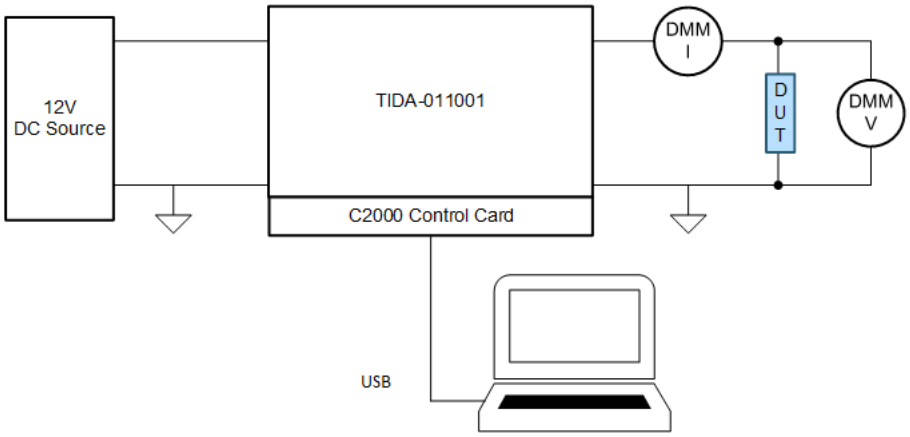


图 4-1. 硬件要求

4.2 软件

此设计使用图形用户界面 (GUI)，以简化电流、电压、补偿调优和检测的设置。

1. 要设置测试环境，请下载并安装 *UNIFLASH* 软件。
2. 通过 USB 将 TMDSCNCD28P65X controlCARD 连接到主机 PC。在 UniFlash 中，选择 F28P65x 器件，然后单击 *Connect*。
3. 选择为该设计提供的 *.out* 文件，选中 *Run Target After Program Load Flash Operation* 选项，然后加载软件映像。
4. 加载映像后，可以执行 P3S.exe 以运行 GUI。
5. 单击“File - Serial Port”，以将串行端口配置为 UART 通信；选择计算机上带有 UART 的 COM 端口，然后单击“Connect”。

连接成功后，界面右下角会显示一个绿色圆圈。

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

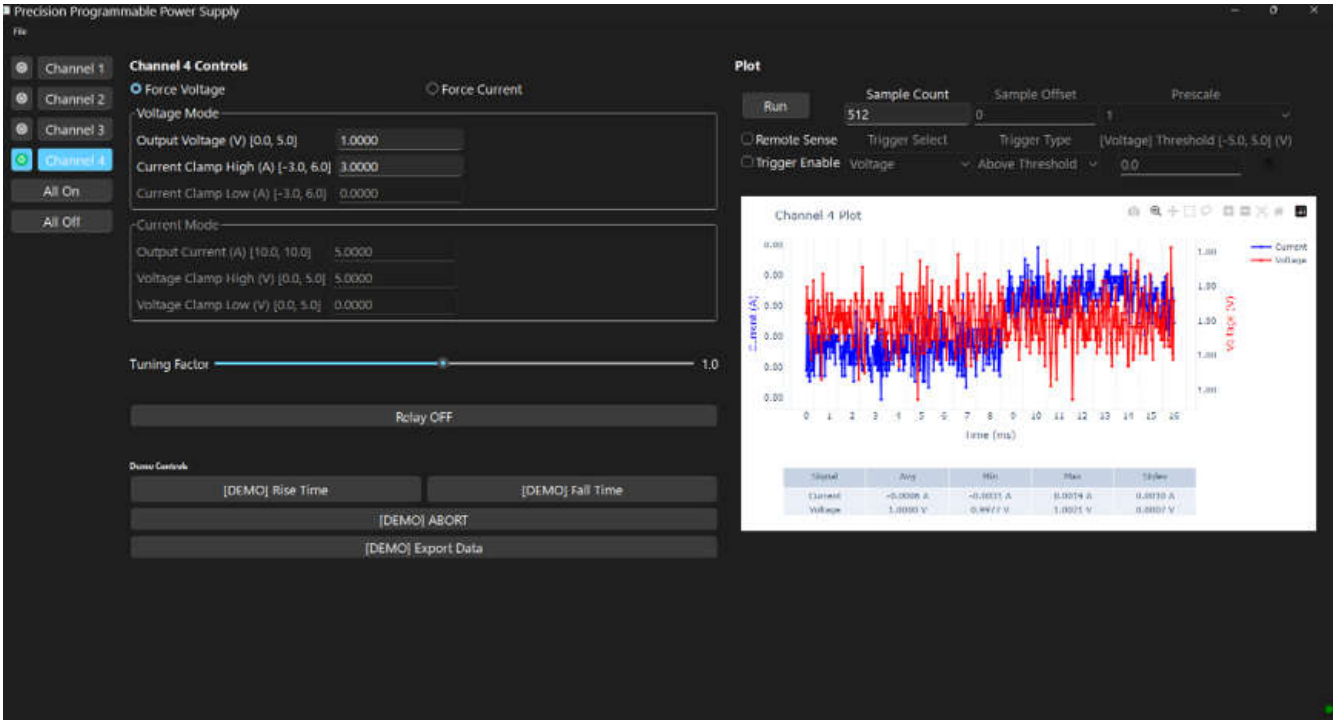


图 4-2. 用于评估的 GUI

4.3 测试设置

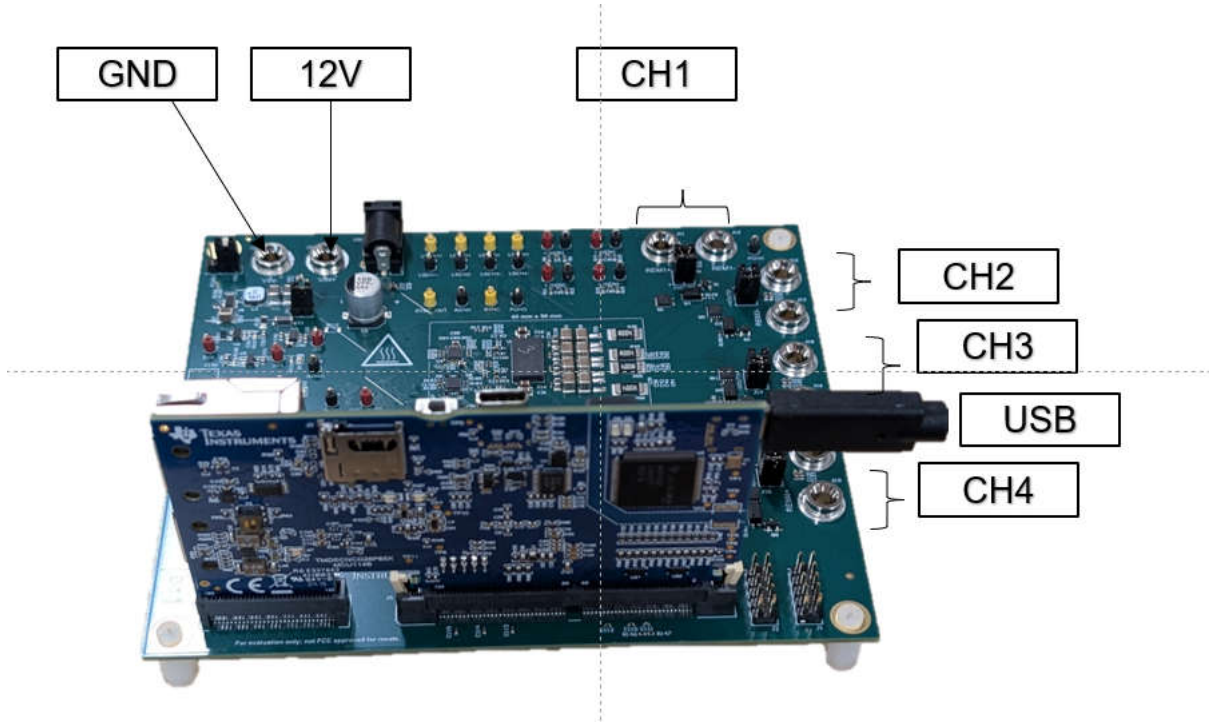


图 4-3. 用于测试的电路板设置

图 4-3 显示了参考设计的设置。此设计使用 TMDSCNCD28P65X 控制卡来配置数字控制环路。将 $12V_{DC}$ 电源的正极端子连接到 J21，将负极端子连接到 J22，以启用电路板。要测试电压精度，请将数字万用表探针连接至 J8、J9、J14 和 J15，以测量通道 1 至 4 的输出。要测试电流精度，请将数字万用表探针跨接在电路板顶部的 ISEN1-ISNS4 测量点上，并使用方程式 2 计算电流值。

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$$I = \frac{V}{R_{Shunt}} \quad (2)$$

4.4 测试结果

4.4.1 电压线性测试

电压线性测试在开路负载条件下进行。

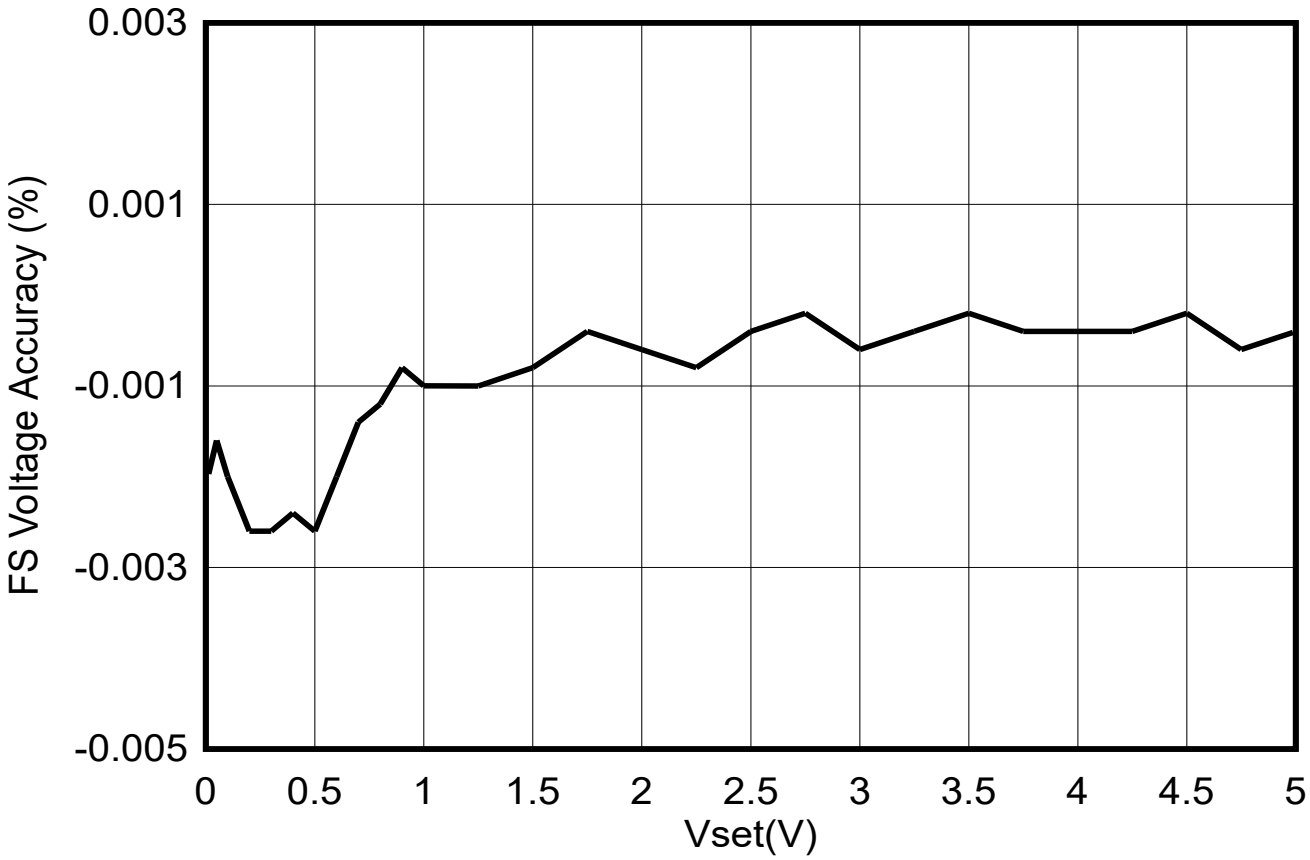


图 4-4. 电压线性测试

4.4.2 电压调节测试

如表 4-1 所示，输出电压在 0V 至 5V 的整个范围内与 DAC 设定值呈线性跟踪关系，最大偏差小于 0.2mV。

表 4-1. 电压负载调整率

Vset(V)	0.5	1	2	4
I_load (A)	V_{Actual} (V)			
0	0.500034	1.000000	1.9999	3.99982
1	0.500004	1.000022	1.99991	3.99988
2	0.500027	1.000048	1.99992	3.99982
3	0.500039	1.000019	1.99994	3.99988
4	0.500066	1.000009	1.99992	3.99987
5		1.000013	1.99993	3.99985
6		1.000036	1.99996	3.99983
误差 (mV)	0.066	0.13	0.1	0.18
误差 (%FS)	0.00132	0.0026	0.002	0.0036

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4.4.3 电流线性测试

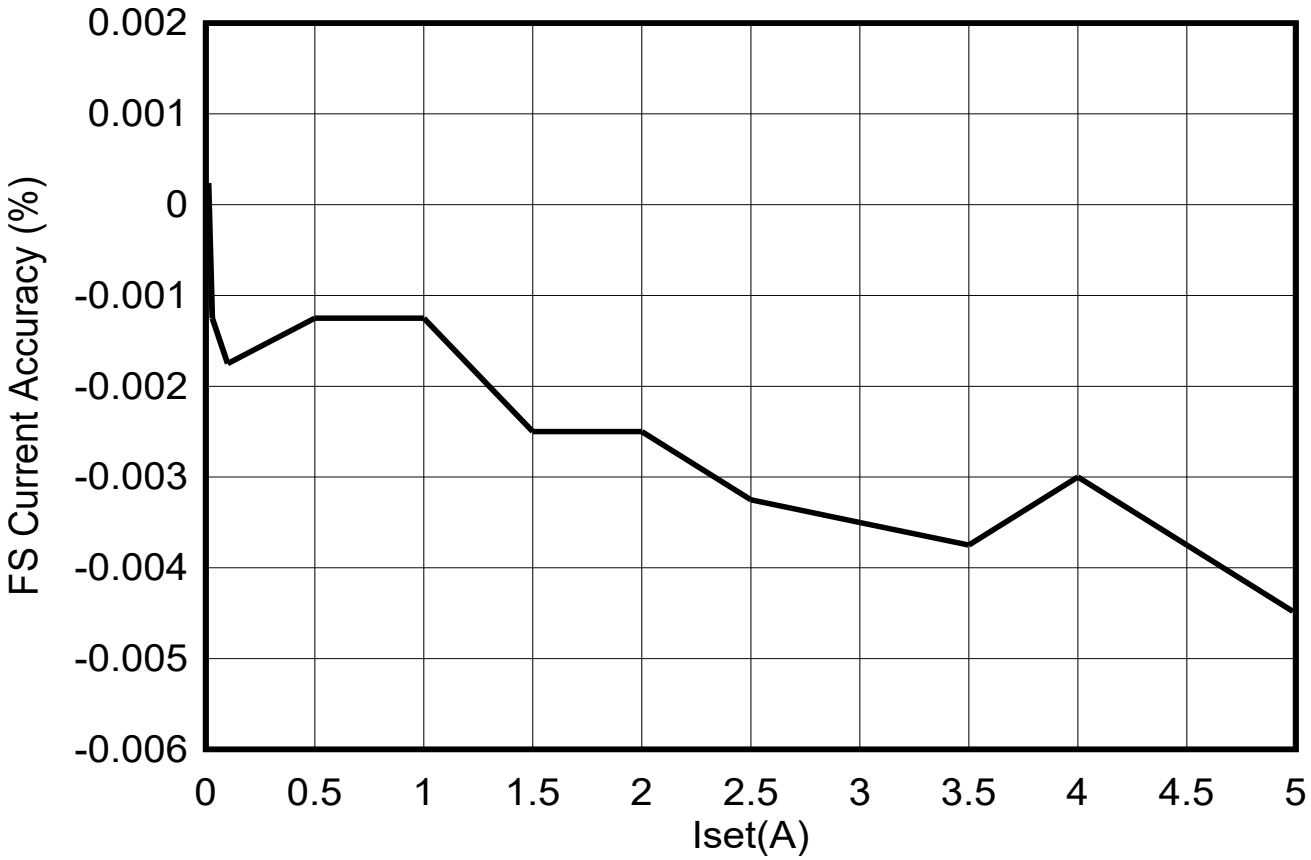


图 4-5. 电流线性测试

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4.4.4 输出电压纹波

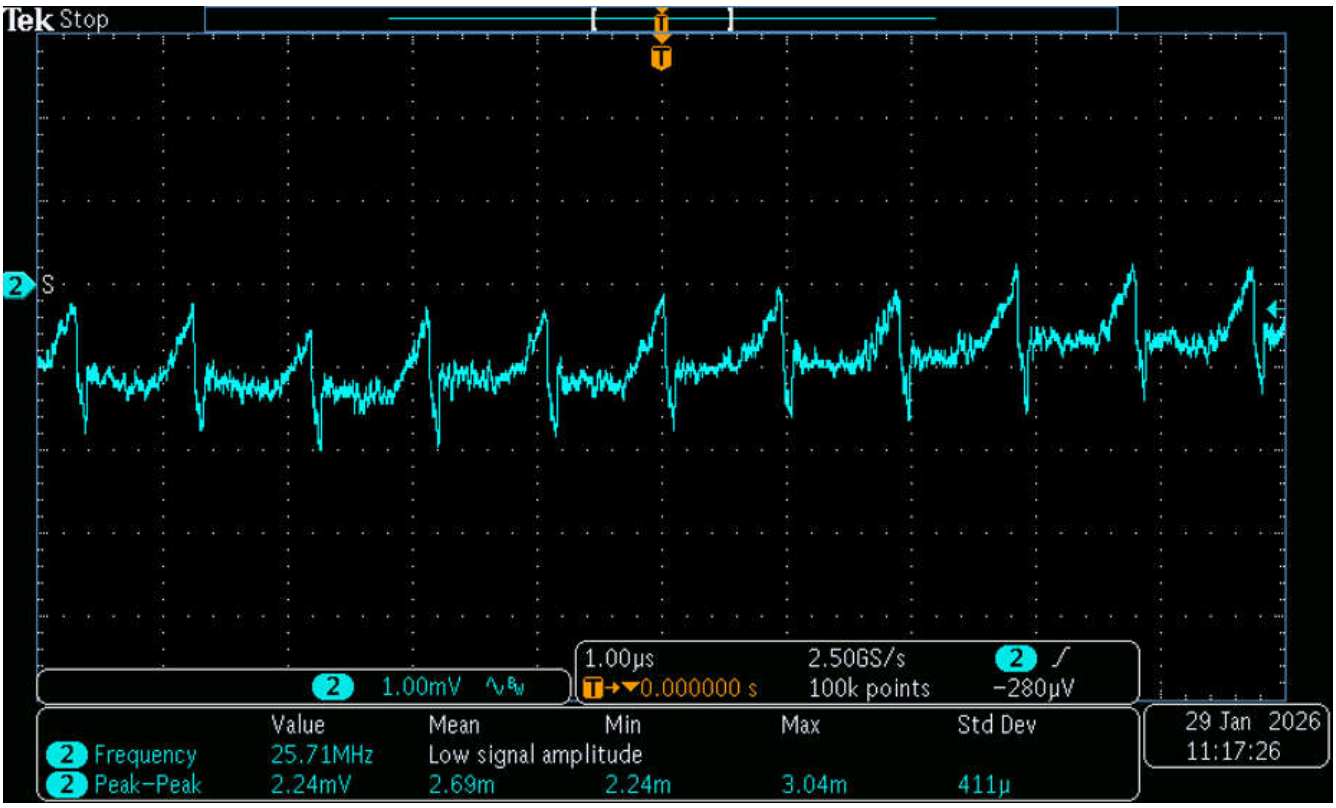


图 4-6. 1V、空载条件下的输出电压纹波

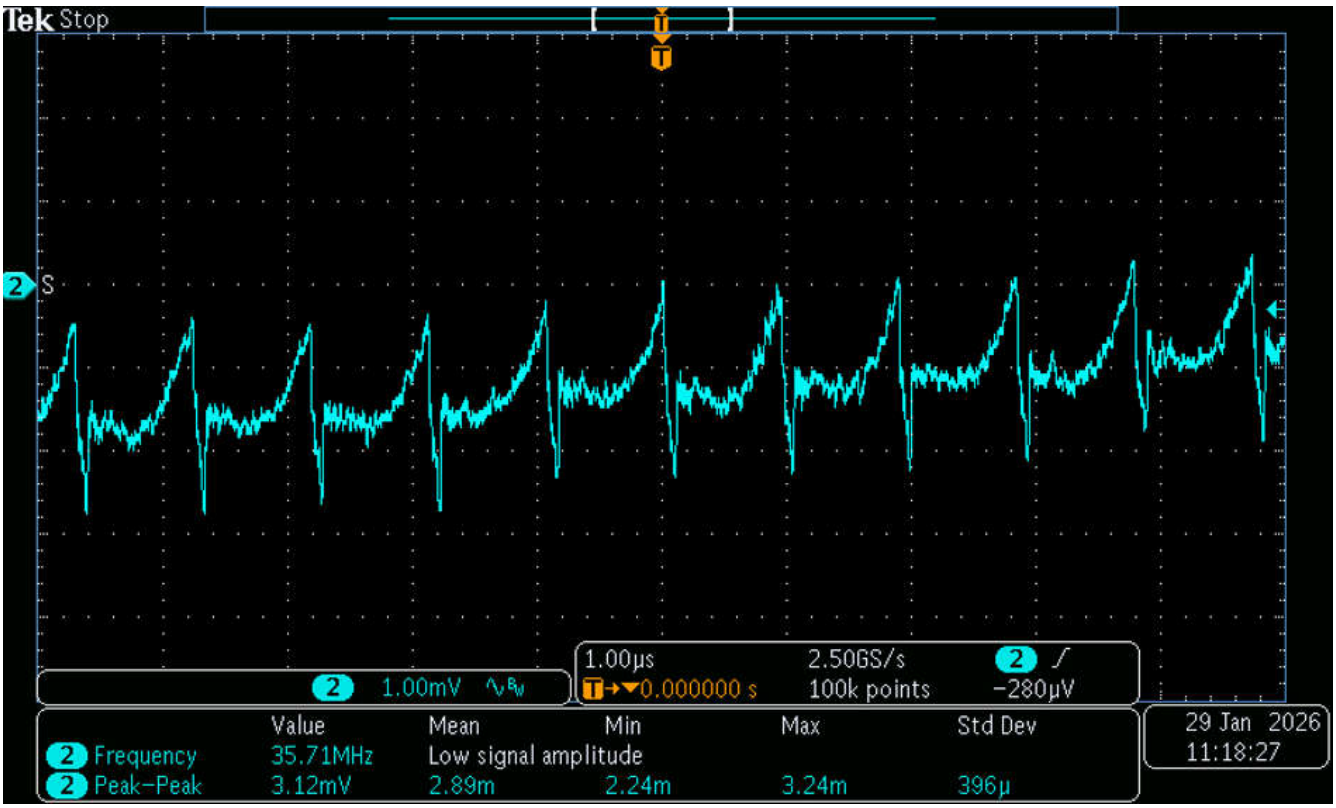


图 4-7. 1V、满负载条件下的输出电压纹波

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

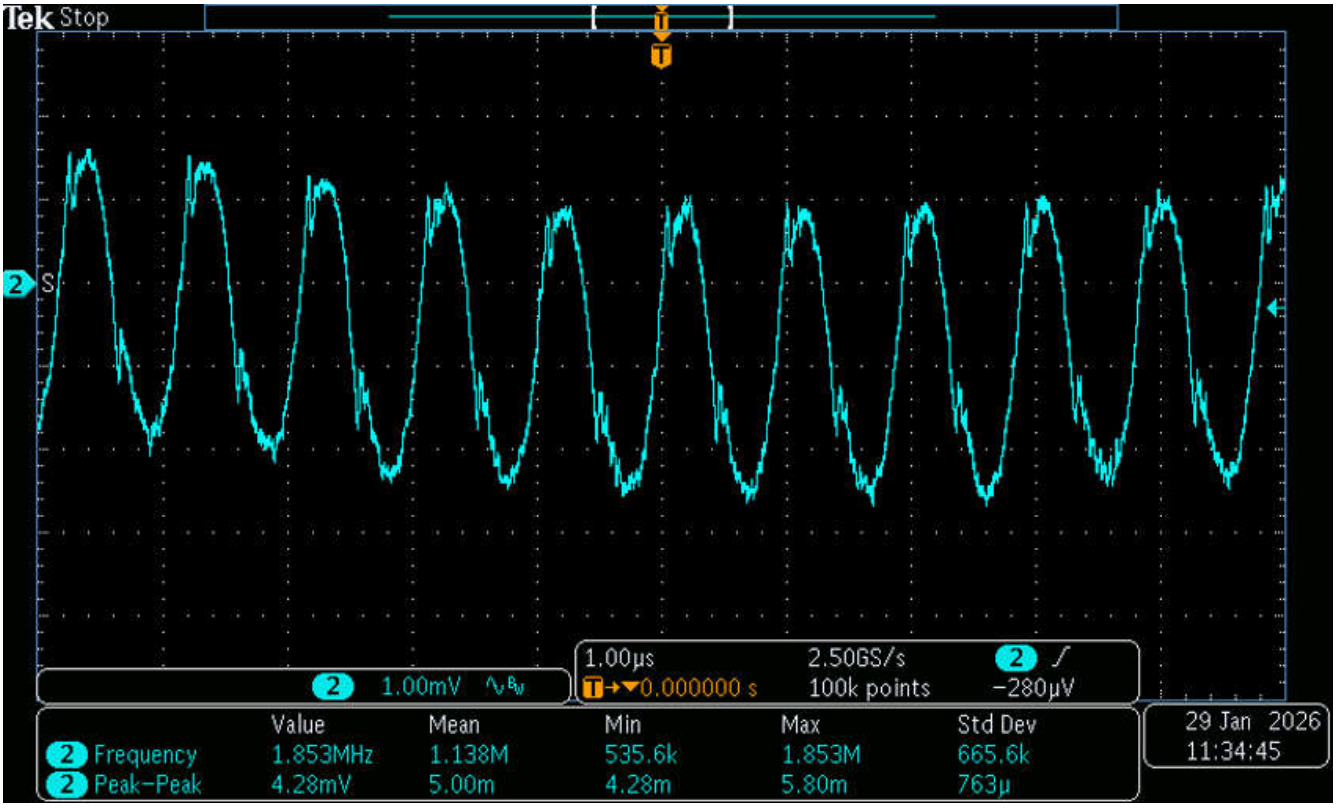


图 4-8. 5V、空载条件下的输出电压纹波

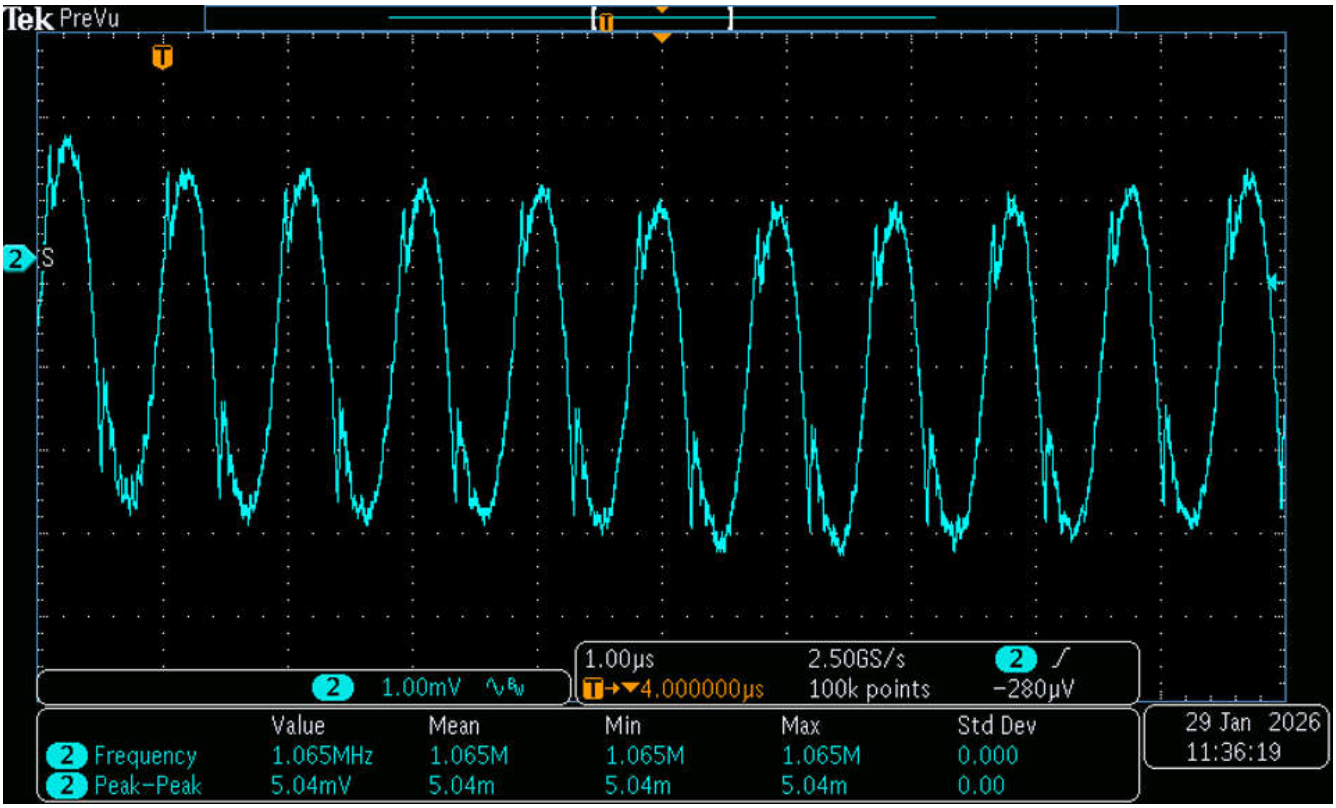


图 4-9. 5V、满负载条件下的输出电压纹波

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

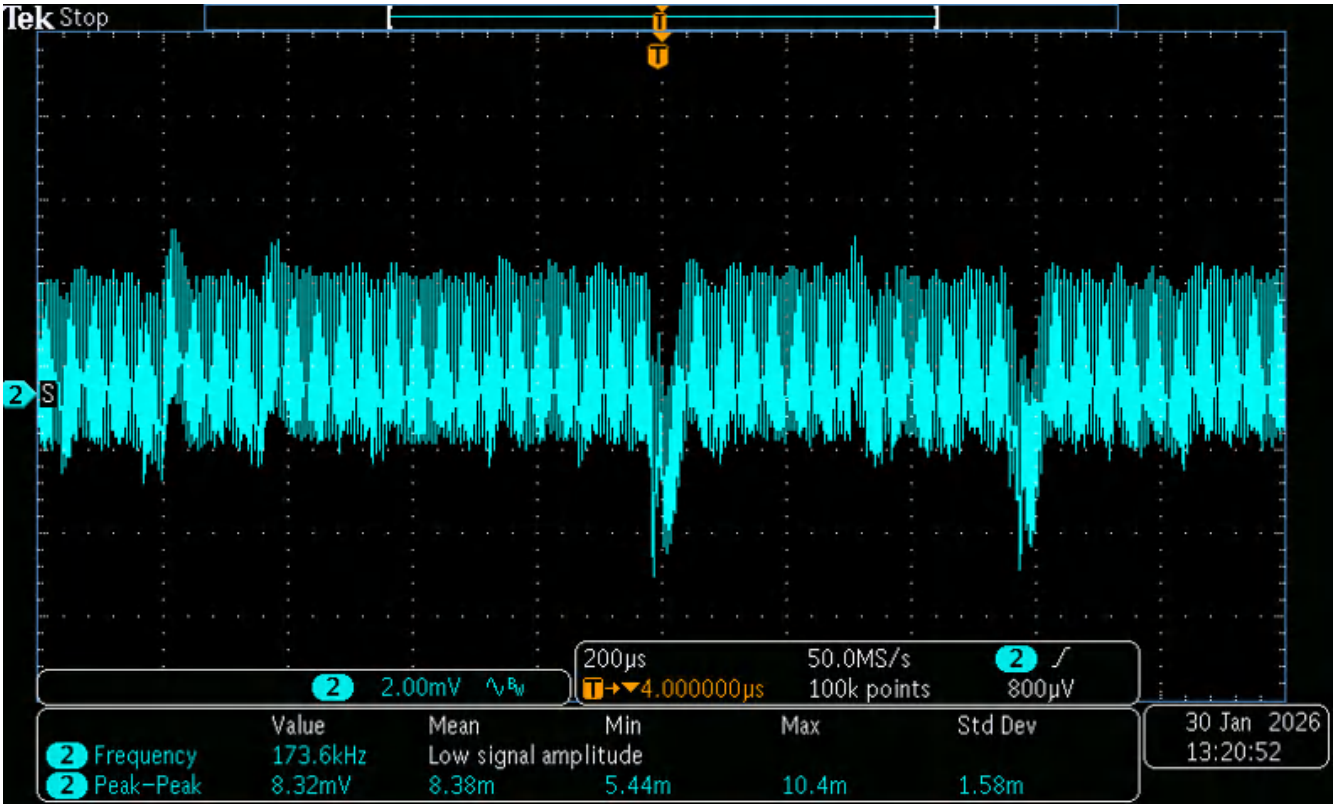


图 4-10. 100mV 时的输出电压

4.4.5 满负载瞬态响应

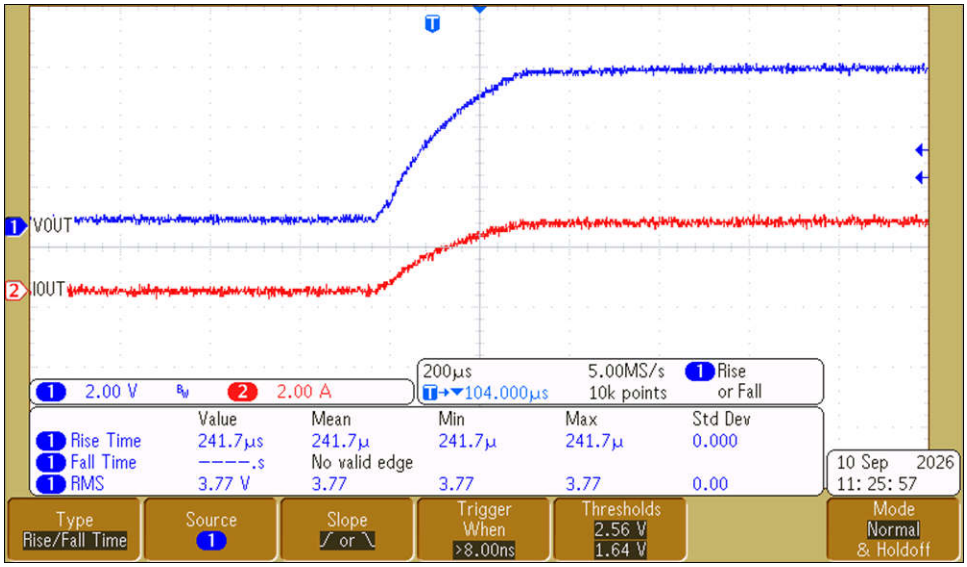


图 4-11. 2Ω 负载、0V 至 5V 条件下的瞬态响应

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4.4.6 具有电流钳位响应的突发负载接入

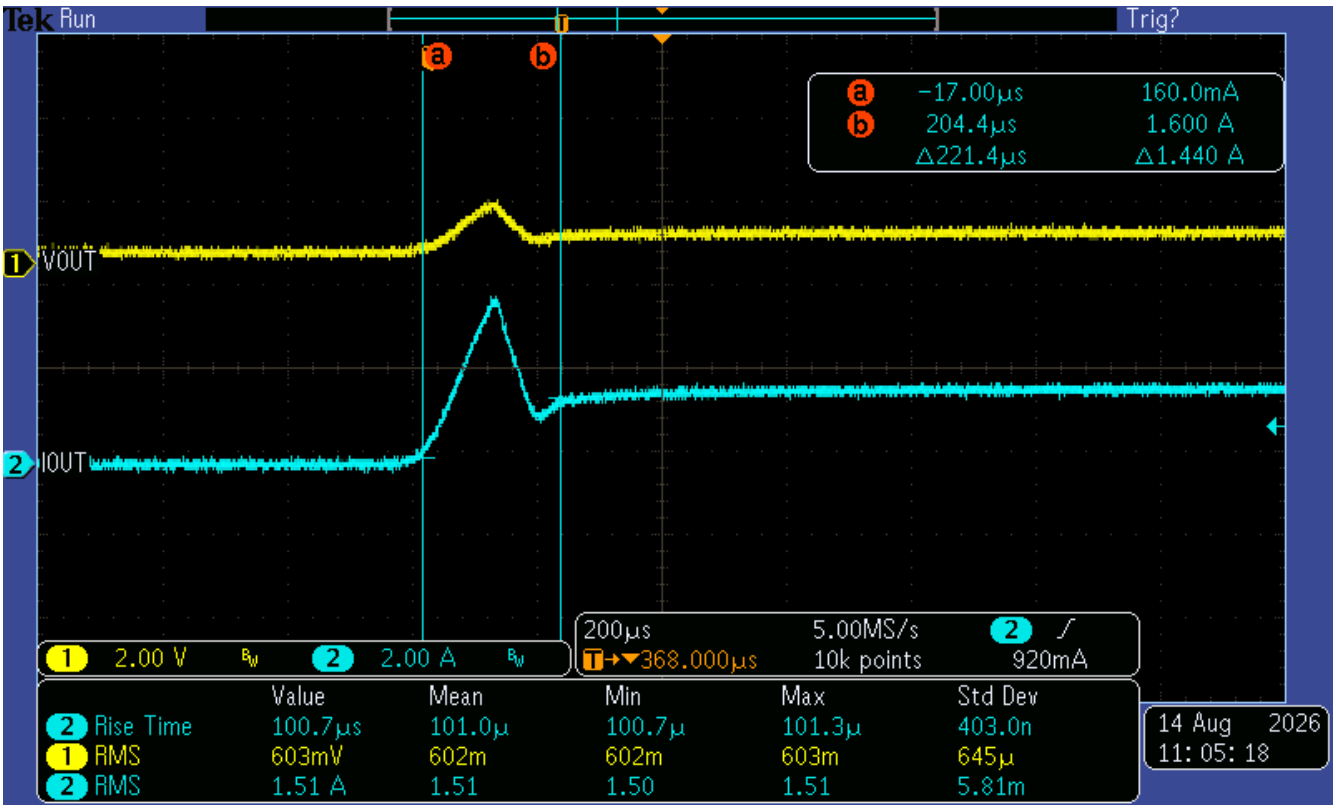


图 4-12. 200mΩ 负载下，CC 电流钳位值为 2A 时的短路测试

4.4.7 满负载电压趋稳时间

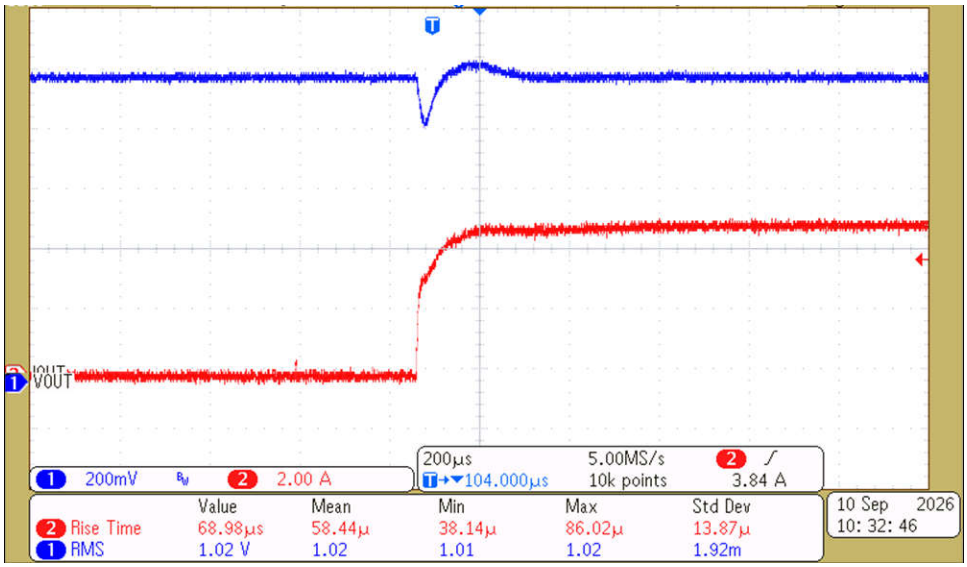


图 4-13. 100mΩ 负载下，负载从空载切换至满负载

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 设计和文档支持

5.1 工具与软件

5.1.1 工具

- TMS320F28P65X controlCARD 评估模块

5.1.2 软件

- CCSTUDIO 集成开发环境 (IDE)
- UNIFLASH 编程工具

5.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，ADS9308V8I 用于电压和电流检测的 24 位、16 通道同步采样精密 ADC 数据表
2. 德州仪器 (TI)，TMS320F28P65x 实时微控制器数据表
3. 德州仪器 (TI)，TPSM8F7x20 4V 至 17V、4/6A 四路降压电源模块数据表

5.3 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。搜索现有解答或自行提出问题，以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。

商标
C2000™ is a trademark of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 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 取得了得州农工大学的电气工程学士学位。

作者感谢 **ANAND SHAURY** 对本参考设计提供的大力支持。

English Document: TIDUFK0
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月