

Design Guide: TIDA-011026

现场变送器平台：三线制 4mA 至 20mA 接口参考设计

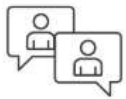


说明

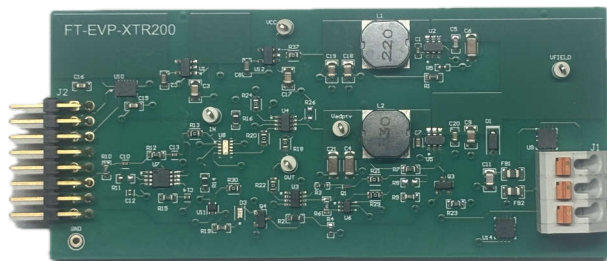
此参考设计提供了用于 3 线制电压和电流传感器 4mA 至 20mA 接口的实现示例。该设计支持将 XTR200 与电流环路保护器 TPS2661 一起进行评估。XTR200 集成了电压和电流现场变送器通信接口的输出驱动电路，支持 0mA 至 20mA、4mA 至 20mA 和 0V 至 10V 等标准工业信号电平。该参考设计可通过引脚接头访问用于驱动输出级的脉宽调制 (PWM) 接口。该引脚接头还提供 3.3V 电压，用于为连接的微控制器供电。

资源

TIDA-011026	设计文件夹
XTR200、TPS2661	产品文件夹
TLV9302、OPA2991	产品文件夹
TVS3301、ADS122S14	产品文件夹
SN74LV8T165	产品文件夹
MSPM0-SDK , SNSR-DUAL-ADC-EVM	工具文件夹



请咨询 TI E2E™ 支持专家

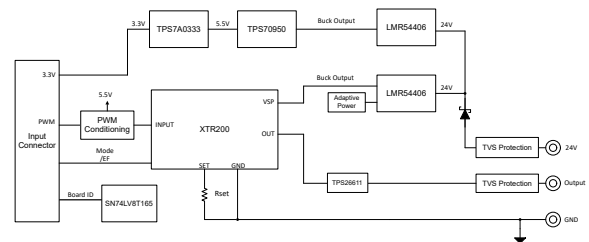


特性

- 适用于 3 线制传感器的 4mA 至 20mA 回路接口实现
- 通过 MCU PWM 驱动输出级的低通滤波器电路
- 集成电流环路保护和误接线保护功能
- 更大限度提升电源效率的自适应电源电路
- 提供电源输出 (3.3V) 和 SPI 的 MCU 接口

应用

- [流量变送器](#)
- [液位变送器](#)
- [压力变送器](#)
- [温度变送器](#)
- [模拟输出模块](#)



1 系统说明

此参考设计可实现 3 线制电压和电流工业接口输出。该设计在输入级整合一个 PWM 滤波器，并在 XTR200 内包含一个集成式输出级。系统能够在电压和电流输出模式之间切换，针对 0mA 至 20mA、4mA 至 20mA 和 0V 至 10V 输出范围设定增益。

现场电源由两个降压转换器进行调节。一个为输出级供电，另一个为本地低压降 (LDO) 稳压器提供较低的电压。为输出级供电的降压转换器实现自适应电源电路，其随着模块的电压输出的增加而升高 XTR200 的电源电压。该电路可保持足够的余量来根据 XTR200 要求驱动输出负载。另一个降压转换器输出可通过两个串联的 LDO 调节至 5V 和 3.3V。5V 电源信号在本地用于 PWM 滤波器。3.3V 电源信号用于通过引脚接头向带 MCU 的检测模块供电。使用具有低 I_Q 的 LDO (TPS7A0333 和 TPS70950) 来保持稳定、高效的电源输出，将系统的可用电力保持在高电平。

PWM 滤波器是一个四阶有源低通滤波器 (LPF)，用于将 PWM 信号转换为模拟输入信号以驱动 XTR200。这样便可评估设计，而无需在 MCU 上实现专用数模转换器 (DAC) 或内部 DAC。

1.1 主要系统规格

表 1-1. 规格

参数	规格
现场电源电压	8V 至 36V
输出电流范围	0mA 至 27mA
输出电压范围	0 至 12.375V
分辨率	8.057uA, 3.02mV
电流输出模式 RMS 噪声	385nA
电流输出模式峰峰值噪声	2.3uA
电压输出模式 RMS 噪声	129uV
电压输出模式峰峰值噪声	775uV
趋稳时间	202us
电源输出	3.3V
电源输出电流	2mA
用于连接 MCU 的接口	SPI

2 系统概述

2.1 方框图

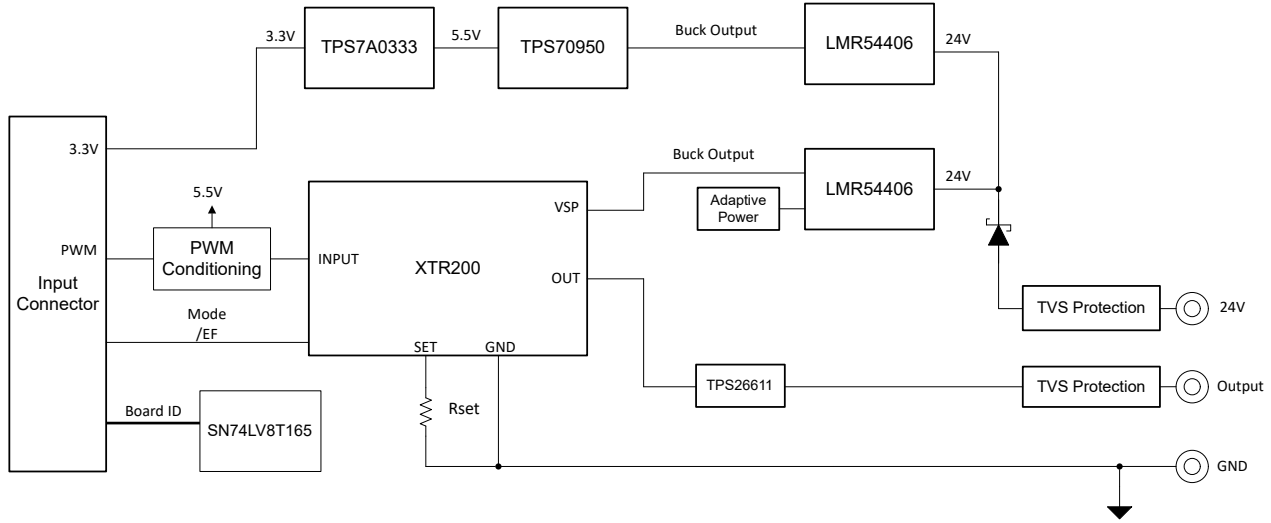


图 2-1. TIDA-011026 方框图

2.2 设计注意事项

本设计实现 0mA 至 20mA、4mA 至 20mA 和 0V 至 10V 输出级供现场变送器和传感器使用。XTR200 根据输出模式（电压或电流）集成了信号链增益，并集成了具有低漏电流 PMOS 输出晶体管的输出级驱动电路。

此模块设计为连接到传感器模块 [SNSR-DUAL-ADC-EVM](#)。传感器模块可通过现场电源连接由该电路板供电。该传感器模块还采用单一固件 (FW) 设计，用于识别和驱动此设计的电路。

XTR200 的输入由传感器板的 MCU 驱动，后者输出 PWM 信号。四阶有源 LPF 调制 PWM 信号，并将该信号馈送到 XTR200 输入。LPF 设计的截止频率为 1.95kHz，PWM 信号以 19.5kHz 的频率运行。LPF 架构可实现来自滤波器的干净输出信号，从而为 XTR200 提供干净的输入；无需专用 DAC。或者，出于调试目的，可以使用连接到测试点 TP4 的 DAC 或信号发生器来驱动 XTR200 输入，从而旁路 LPF。

在保护方面，TPS2661 包含输出的过流、过压和反极性保护功能。正向偏置二极管 (D1) 包含电源和接地的反极性保护。TVS3301 TVS 二极管提供瞬态电压保护，可防止因电源和输出线路上的瞬态事件而导致电压电平过高。通过在电源和输出线路上使用铁氧体磁珠可降低高频噪声。

为输出级供电的降压转换器包含自适应电源电路。自适应电源电路用作电流受电端，当模块输出电压升高时，从降压转换器的反馈引脚抽取电流。该电路的目的是通过将电源电压保持在所需的最小余量，更最大限度地提升电源效率并减少 XTR200 的热损耗。存在较高负载时，这在电流输出模式下尤其重要。余量要求由 XTR200 数据表规格决定。自适应电源电路的设计使得 XTR200 的余量始终比输出电压至少高 3V。

2.3 重点产品

2.3.1 TPS7A03

TPS7A03 是一款超小型超低静态电流、低压差线性稳压器 (LDO)，可输出 200mA 电流，具备优异的瞬态性能。

TPS7A03 具有 200nA 超低 I_Q ，专为将超低静态电流作为关键参数的应用而设计。此器件即使在压降模式下也能保持低 I_Q 消耗，从而进一步延长电池寿命。在关断或禁用模式下，该器件消耗 3nA 的超低 I_Q ，有助于延长电池保质期。

TPS7A03 的输出范围为 0.8V 至 5.0V，步长为 50mV，可支持更低的现代微控制器 (MCU) 内核电压。

TPS7A03 具有包含内部控制下拉电阻器的智能使能电路，该电阻器即使在 EN 引脚悬空时也能让 LDO 保持禁用状态，有助于更大程度地减少用于下拉 EN 引脚的外部元件。此电路还有助于在器件处于使能状态时，大幅减少通过外部下拉电路消耗的电流。

2.3.2 TPS709

TPS709 系列线性稳压器是针对功耗敏感型应用而设计的超低静态电流器件。高精度带隙与误差放大器可提供 2% 的过热精度。这些器件的静态电流仅为 1 μ A，因此对于由电池供电且要求极低空闲功率耗散的常开系统而言，是理想的解决方案。该系列器件还具有热关断、电流限制和反向电流保护功能，提升了器件安全性。

通过将 EN 引脚拉低启动关断模式。该模式的关断电流低至 150nA (典型值)。

2.3.3 TVS3301

TVS3301 器件可将高达 27A 的 IEC 61000-4-5 故障电流进行分流，以保护系统免受高功率瞬态冲击或雷击。该器件满足 1kV IEC 61000-4-5 开路电压 (通过 42 Ω 阻抗耦合) 的通用工业信号线 EMC 要求。TVS3301 采用反馈机制在故障期间提供精准的平缓钳位，使系统暴露电压低于传统 TVS 二极管。严格的电压调节使设计人员能自信地选用更低耐压的系统元件，降低系统成本与复杂度，而不会牺牲稳健性。TVS3301 具备 ± 33 V 工作电压范围，支持在需要防反接布线的系统中运行。

此外，TVS3301 采用小型 SON 封装，专为空间受限的应用而设计，与标准 SMA 和 SMB 封装相比，其尺寸显著减小。低器件泄露电流和电容更大限度地降低了对受保护线路的影响。为了在产品的整个寿命期间提供可靠保护，TI 在 125 $^{\circ}$ C 下对 TVS3301 进行了 5000 次重复浪涌冲击测试，但器件性能未发生任何变化。

2.3.4 XTR200

XTR200 是一款适用于 3 线制电流或电压系统的高电压、精密输出驱动器，专为标准工业信号电平 (例如 0mA 至 20mA、4mA 至 20mA 及 0V 至 10V) 而设计。MODE 引脚将器件配置为电流或电压输出，并且无需更改外部元件即可在模式之间切换。在电流输出模式下，输入电压和输出电流之比由单个电阻器 RSET 设定。在电压输出模式下，XTR200 具有 3.75V/V 的固定增益，该增益由集成式高精度薄膜电阻器设定。

该器件集成了低漏电流 PMOS 输出晶体管和短路电流保护功能，进一步降低了对外部元件的需求。XTR200 可与外部 PNP 或 PMOS 晶体管配合使用，以降低片上功率耗散。片上短路保护功能还可防止外部晶体管中出现破坏性的过流事件。

XTR200 错误标志引脚 (EF) 指示几种温度或输出故障条件。输出禁用引脚 (OD) 以极低的漏电流将输出引脚置于高阻抗状态。

2.3.5 TPS2661

TPS2661x 是一款紧凑、功能丰富且完全集成的电流环路保护器，适用于模拟输入、模拟输出、传感器变送器、HART 输入和 UART IO 保护。该器件提供 ± 20 mA、0mA 至 20mA、4mA 至 20mA 的通用输入保护。7.5 Ω 的低 R_{ON} 值可有效降低电流环路中的压降，从而扩展工作电压范围，即使在使用低压电源的情况下也可支持器件运行。该器件可以承受高达 ± 50 V 的负电源电压并保护负载免受这些电压的影响。MODE 引脚通过器件能够灵活地实现 2 倍电流限制，以使两个线控变送器能够顺利启动。器件能够由低至 ± 2.25 V 至 ± 20 V 的外部双极电源供电运行。该器件还可由低至 3V 至 30V 的单极电源供电。TPS26610 和 TPS26613 具有环路电源模式，以便于在没有 $\pm V_s$ 电源的无电状态下进行环路测试。

该器件还通过关闭电流路径来保护系统，防止模拟输出和传感器变送器的输出侧误接线。TPS2661x 内部强大的保护控制模块以及 50V 额定电压有助于防止信号线的浪涌 (IEC61000-4-5) 和 EFT (IEC61000-4-4) 瞬变。

2.3.6 OPAX991

OPAx991 系列 (OPA991、OPA2991 和 OPA4991) 是高压 (40V) 通用运算放大器系列。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、低失调电压 (典型值为 $\pm 125\mu\text{V}$)、低温漂 (典型值为 $\pm 0.3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)、低噪声 ($10.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.8\mu\text{VPP}$) 和 4.5MHz 带宽。

OPAx991 具有诸如电源轨差分与共模输入电压范围、高输出电流 ($\pm 75\text{mA}$)、高压摆率 ($21\text{V}/\mu\text{s}$)、高容性负载驱动 (1nF) 和关断等独特的功能，是一款稳定可靠的高性能运算放大器，适用于各种高电压工业应用。

2.3.7 TLV930X

TLV930x 系列 (TLV9301、TLV9302 和 TLV9304) 是 40V 成本优化型运算放大器系列。这些器件具有出色的通用直流和交流规格，包括轨到轨输出、低失调电压 (典型值为 $\pm 0.5\text{mV}$)、低温漂 (典型值为 $\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) 和 1MHz 带宽。

宽差分输入电压范围、高输出电流 ($\pm 60\text{mA}$) 以及高压摆率 ($3\text{V}/\mu\text{s}$) 等便利特性使 TLV930x 成为一款适用于高电压成本敏感型应用的强大运算放大器。

2.3.8 LMR544XX

LMR544xx 是一款简单易用的宽 VIN 同步降压转换器，能够驱动高达 1A 和 0.6A 的负载电流。该器件具有 4V 至 36V 的宽输入范围，适用于从非稳压源进行电源调节的各种工业应用。LMR544xx 以 1.1MHz 的开关频率运行，支持使用相对较小的电感器，以实现经优化的设计尺寸。

此类器件具有可在轻负载时实现高效率的 PFM 版本和实现恒定频率的 FPWM 版本，并可在整个负载范围内实现低输出电压纹波。通过在内部实现软启动和补偿电路，可更大限度地减少器件所用的外部元件。

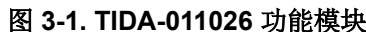
该器件内置保护功能，例如逐周期电流限制、断续模式短路保护以及功率耗散过大情况下的热关断功能。

2.3.9 SN74LV8T165

SN74LV8T165 器件是一个并联或串联输入、串联输出 8 位移位寄存器。该器件具有两种运行模式：加载数据和移位数据，这两种模式由 SH/LD 输入控制。输出电平以电源电压 (VCC) 为基准，并支持 1.8V、2.5V、3.3V 和 5V CMOS 电平。

该输入经设计，具有较低阈值电路，支持较低电压 CMOS 输入的升压转换 (例如 1.2V 输入转换为 1.8V 输出或 1.8V 输入转换为 3.3V 输出)。此外，5V 容限输入引脚可实现降压转换 (例如 3.3V 转 2.5V 输出)。

本节介绍此设计中不同功能块的相关信息。图 3-1 展示了这些功能块的位置。



PWM 滤波器是一个采用 OPA2991 设计的有源四阶 LPF，其支持轨到轨输出电压，从而使 XTR200 的输入尽可能接近 0V。在本设计中，OPA2991 能够驱动低至 10mV 的电压。

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

图 4-1 展示了用于实现正确功能和调试的 TIDA-011026 测试点、跳线和连接器。

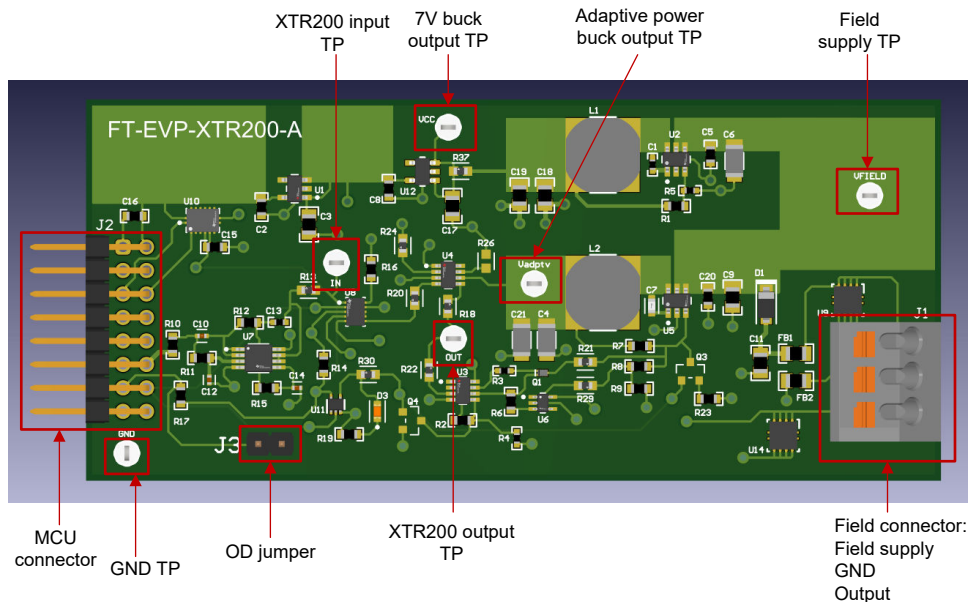


图 4-1. TIDA-011026 测试点、跳线和连接器

表 4-1. 测试点、跳线和连接器说明

标识符	丝印 ID	跳线、连接器	说明
J1	J1	现场连接器	用于现场电源和现场变送器输出的连接。
J2	J2	MCU 连接器	与微控制器电路板的连接。
J3	J3	OD 跳线	该跳线连接可在短路时启用 XTR200 输出。这样便可在不使用传感器板的情况下评估变送器板。
TP1	GND	GND 测试点	旨在用于调试的 GND 测试点。
TP2	OUT	OUT 测试点	旨在用于调试的现场变送器模块输出测试点。
TP3	VFIELD	Vfield 测试点	旨在用于调试的现场电压电源测试点。
TP4	IN	XTR_IN 测试点	旨在用于调试的 XTR200 输入测试点。这样便可在不使用传感器板的情况下评估和驱动变送器板。
TP5	VCC	LDO_IN 测试点	旨在用于调试的降压输出测试点。
TP6	Vadptv	Vbuck_out 测试点	旨在用于调试的自适应电源降压输出。

连接器 J1 连接到 MCU 板，表 4-2 展示了引脚排列。引脚 1 已在 PCB 上标出。

表 4-2. J1 连接器引脚排列

引脚	信号
1	GND
2	VDD-3V3
3	未使用
4	未使用
5	ID0
6	SCLK
7	未使用
8	未使用
9	未使用
10	SDO
11	未使用
12	PWM_Input
13	OD
14	模式
15	未使用
16	EF

4.2 测试设置

对于所有测试，该参考设计应与包含 MSPM0G1507 和两个 ADS122S14 ADC 的 SNSR-DUAL-ADC-EVM 结合使用。MSPM0G1507 驱动 XTR200 并控制 ADC。

用于评估的软件包含在 MSPM0-SDK 中，示例可从以下位置导入：

SDK_INSTALL_PATH\examples\nortos\LP_MSPM0G3507\demos\field_transmitter into Code Composer Studio

该软件实现了适用于简单传感器的典型信号链。系统会从 ADC 读取数据并调节这些值，例如进行线性化处理。该软件会将这些值缩放到 4mA 至 20mA 电流接口或 0V 至 10V 电压接口。该过程包括特定于接口的校准值，并且会控制输出级。为降低功率耗散，MCU 会处于低功耗模式，仅以定义的时钟速率唤醒并运行信号链。图 4-2 显示了软件流程及所有辅助函数。

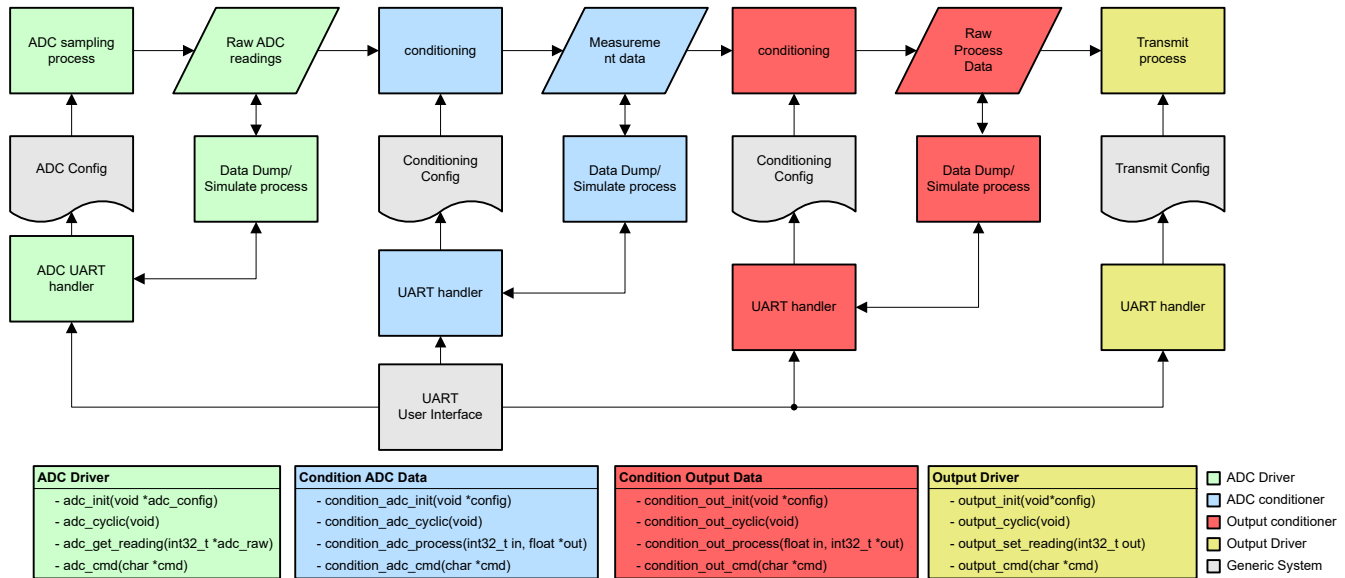


图 4-2. 软件流程

该软件使用函数指针来表示主要模块，以便在不同的 ADC、接口和缩放函数之间保持灵活性。启动时，软件会根据从连接卡读取的 ID，为这些指针填充正确的驱动程序。存在两个相关的结构。第一个结构定义了具有 ADC 函数和输入缩放函数的模拟输入侧。第二个结构涵盖输出侧，需要指定一个用于设置 CPU 时钟的函数。

```
struct id_func_input_map_struct {
    /** adc initialisation function */
    adc_init_func adc_init;
    /** This function gets called regularly by the main function, do not block here */
    adc_cyclic_func adc_cyclic;
    /** read adc reading and return it */
    adc_get_reading_func adc_get_reading;
    /** handle uart commands and execute them */
    adc_cmd_func adc_cmd;

    /** adc conditioning init function */
    condition_adc_init_func condition_adc_init;
    /** adc conditioning cyclic function */
    condition_adc_cyclic_func condition_adc_cyclic;
    /** adc conditioning processing function */
    condition_adc_process_func condition_adc_process;
    /** adc conditioning uart cmd handler */
    condition_adc_cmd_func condition_adc_cmd;
};

struct id_func_output_map_struct {
    /** output conditioning init */
    condition_out_init_func condition_out_init;
    /** output conditioning cyclic function */
    condition_out_cyclic_func condition_out_cyclic;
    /** output conditioning set the output value */
    condition_out_process_func condition_out_process;
    /** output conditioning uart cmd handler */
    condition_out_cmd_func condition_out_cmd;
};
```

```

condition_out_cmd_func condition_out_cmd;

/** output stage init */
output_init_func output_init;
/** output cyclic function */
output_cyclic_func output_cyclic;
/** output setter */
output_set_reading_func output_set_reading;
/** output uart handler */
output_cmd_func output_cmd;

/** init cpu clock */
cpu_clock_init_func cpu_clock_init;
};

```

表 4-3 中显示的每个驱动程序都需要包含四个常用函数。

表 4-3. 驱动程序函数

驱动程序名称	功能
init	初始化所有必要组件：配置内存、外设和变量
cyclic	主循环会在每个周期以固定频率调用此函数。该函数会生成时序或执行循环轮询。
get_reading, process, set_reading	这些函数会实际处理数据。这些函数用于从 ADC 读取数据，执行缩放并设置 DAC 的输出值。
cmd	该函数会处理命令行界面。当用户为此驱动程序输入命令时，系统会调用该函数。

各驱动程序均可包含仅供自身使用的静态函数，其他驱动程序不得调用。

该软件通过 USB UART 提供命令行界面来控制 ADC 和数据流。所有命令都有两个级别。第一级指定哪个驱动程序接收命令。第二级包含与特定驱动程序相关的实际命令。驱动程序的特定函数会处理所有其他部分。所有级别均提供帮助命令 (*help* , *adc help*)

表 4-4 介绍了一级命令。

表 4-4. 一级命令

名称	说明	文件 (具体文件取决于电路板 ID 和配置)
sys	系统相关命令，例如 reset、flash	system/system.c
adc	特定于 ADC 驱动程序的命令	adc/
out	特定于输出的命令	output/
cin	特定于 ADC 输入调节的命令	condition/
cout	特定于输出调节的命令	condition/

以 *adc get* 为例的命令可用于获取一次 ADC 采样，将最后一个 ADC 读数打印到 UART。要连续获得 ADC 读数，请使用 *adc stream* 进行进一步测试。

4.3 测试结果

4.3.1 线性度测试

对于此测试，该参考设计连接到微控制器以驱动 XTR200，而模拟输出分别连接到电源以及电流表或电压表 (用于电流输出模式或电压输出模式)。系统由现场电源供电，并通过隔离式 UART 连接到 PC。所有测试均在 24V 现场电源电压下进行。XTR200 由 MCU 的 PWM 驱动，其分辨率为在 3.3V 动态范围内有 4096 个步进。在此测试中，PWM 代码以 1 LSB 步进上升，每个步进采样 10 次。

图 4-3 至图 4-7 展示了完整的设置。

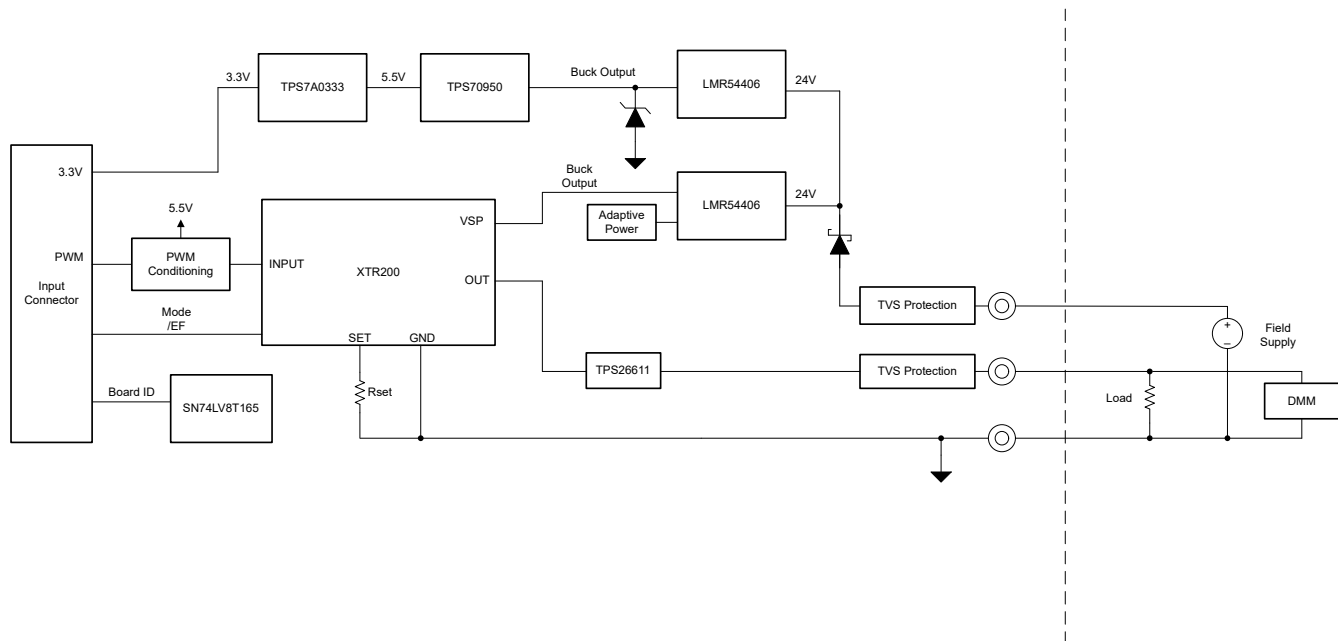


图 4-3. 线性度测试的测试设置

图 4-4 通过图 4-7 显示线性度测试图，其中包括表示理想电流或电压的线性趋势线，该趋势线还用于计算线性误差。电流输出模式和电压输出模式如图所示。图示不同的趋势线公式可供参考。

图 4-4 :

$$y = (7.962E - 3) x - 1.486E - 2$$

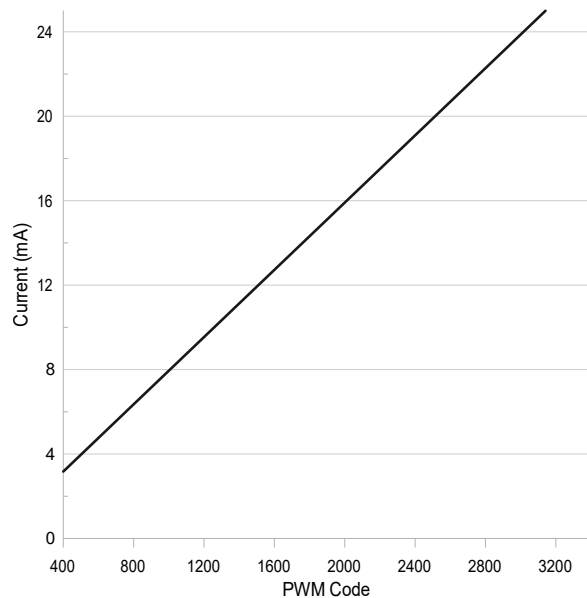


图 4-4. 电流输出模式

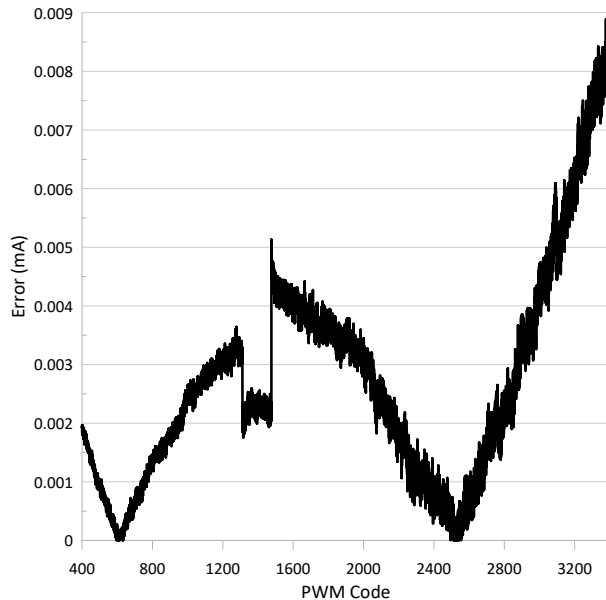


图 4-5. 电流输出误差

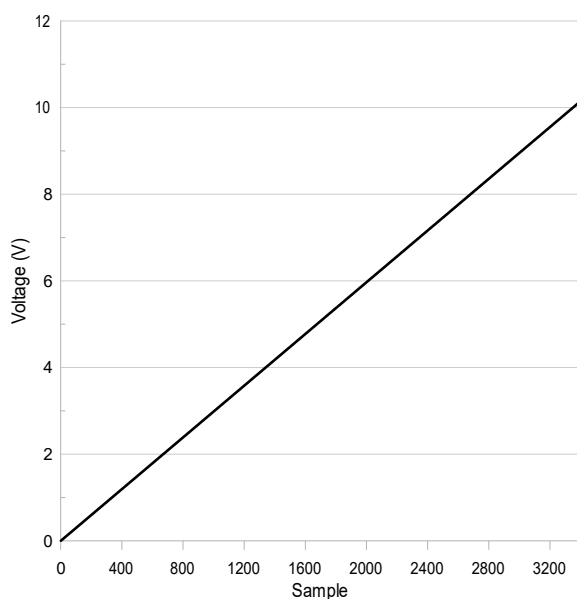


图 4-6. 电压输出模式 (V)

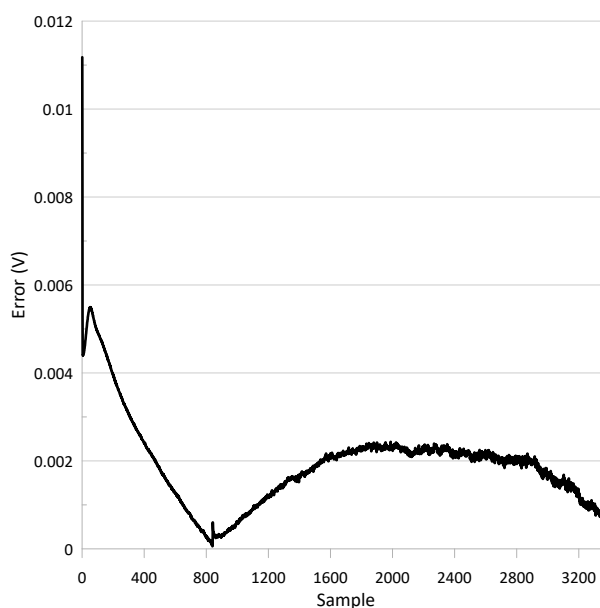


图 4-7. 电压输出误差

4.3.1.1 线性度测试总结

对于所有配置，所有结果都完全在规格范围内，没有配置显示出不稳定迹象或其他非线性效应。

4.3.2 噪声测试和电流柱状图

对于此测试，测试设置与 节 4.3.1 类似。为了测量噪声性能，XTR200 设置为三种不同的输出电流和电压（零 [最小值]、中点、最大值），对产生的电流或电压进行 10000 次测量。

图 4-8 展示了完整的设置。

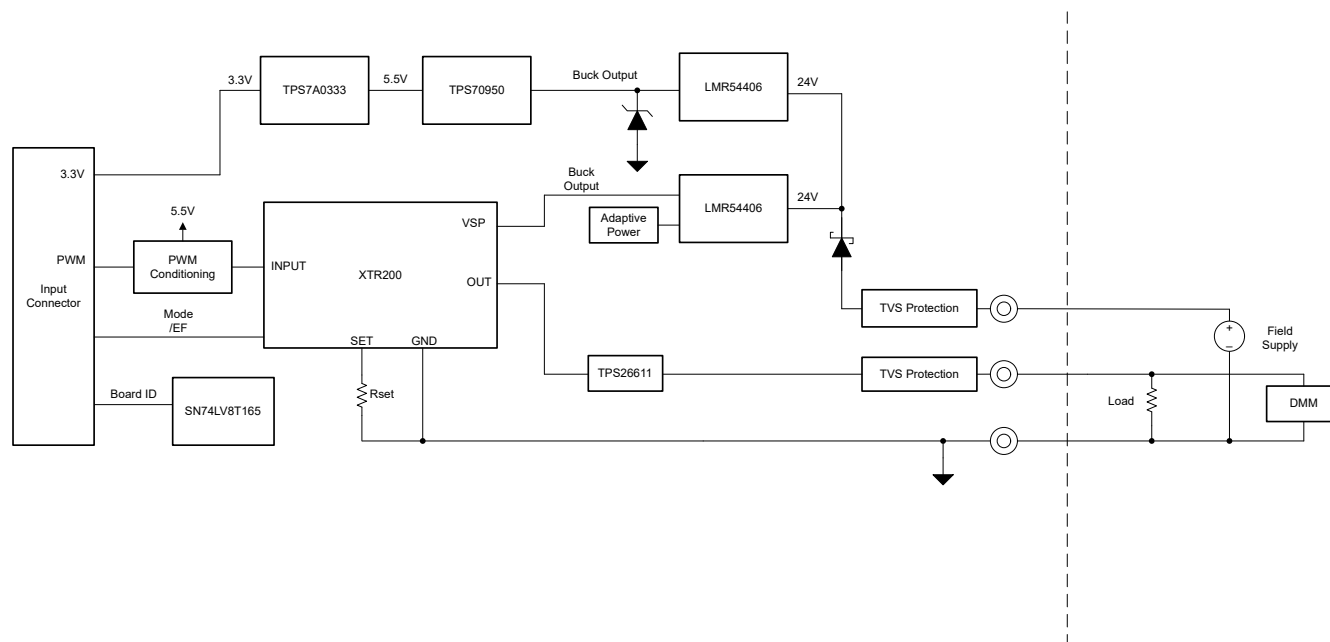


图 4-8. 噪声测试设置

图 4-9 至 图 4-14 展示了测得电流的柱状图。

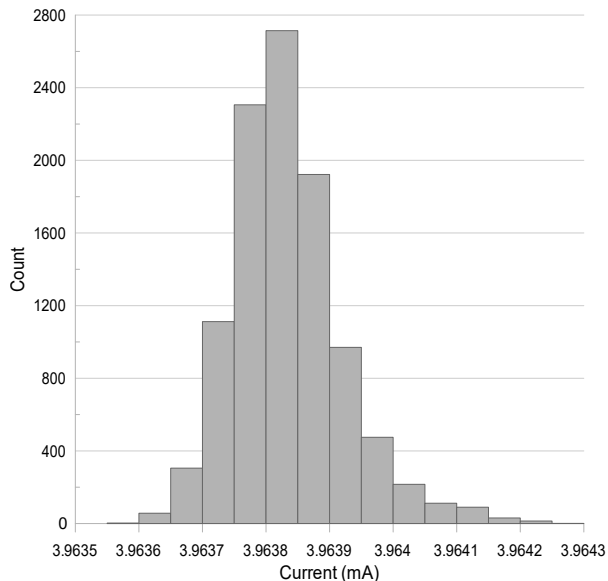


图 4-9. 直方图电流输出模式，最小值设置

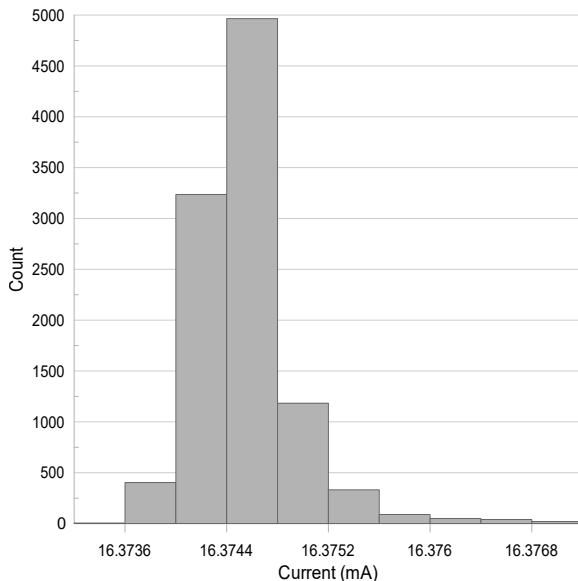


图 4-10. 直方图电流输出模式，中点设置

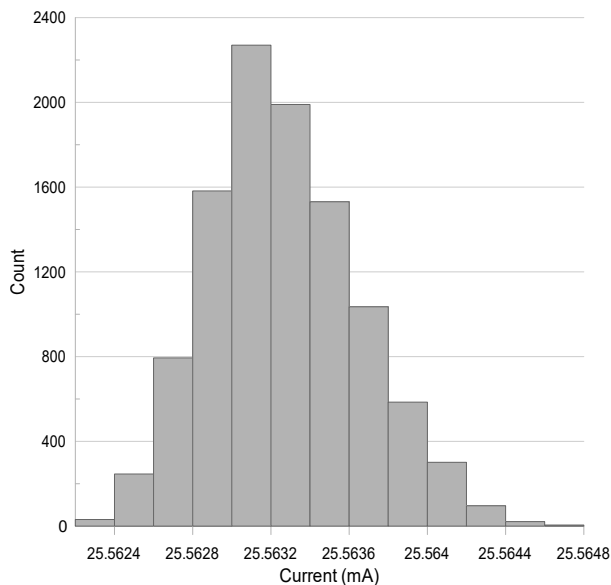


图 4-11. 直方图电流输出模式，最大值设置

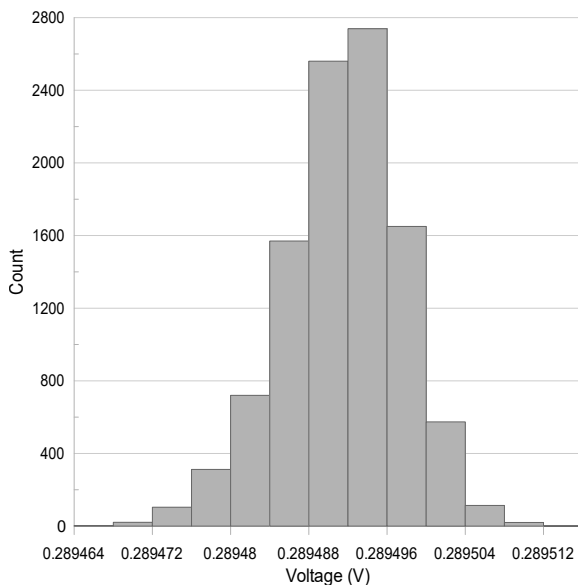


图 4-12. 直方图电压输出模式，最小值设置

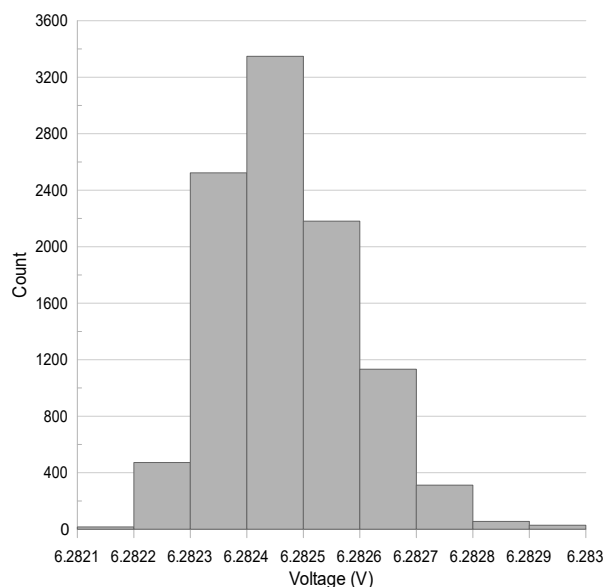


图 4-13. 直方图电压输出模式，中点设置

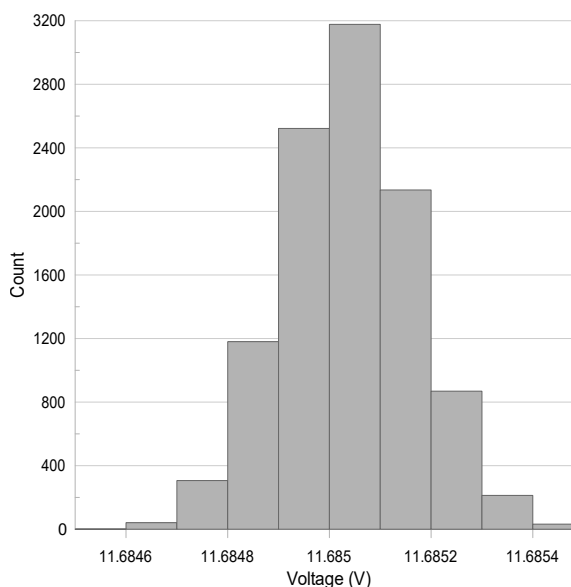


图 4-14. 直方图电压输出模式，最大值设置

4.3.2.1 噪声测试和电流柱状图总结

表 4-5 展示了根据图 4-9 中的原始数据计算出的结果。

表 4-5. 噪声总结

输出模式	PWM 设置	最小输出	平均输出	最大值输出	峰峰值噪声	RMS 噪声
电流	0	3.9636mA	3.9638mA	3.9643mA	0.522μA	87.0nA
电流	2047	16.3735mA	16.3745mA	16.3771mA	2.31μA	385nA
电流	4095	25.5622mA	25.5633mA	25.5647mA	2.30μA	383nA
电压	0	0.2895V	0.2895V	0.2895V	36.6μV	6.09μV
电压	2047	6.2821V	6.2825V	6.2830V	717μV	120μV
电压	4095	11.6846V	11.6850V	11.6855V	775μV	129μV

总体而言，柱状图显示了这类信号的预期高斯分布，没有任何振荡或其他干扰信号。这也证明了 MCU 唤醒时消耗的峰值电流未在环路上显现，得到了正确调节。由于电流输出分辨率为 6.2μA，电压输出分辨率为 3.021mV，因此电流和电压输出模式的峰峰值噪声计算结果均远小于 1 LSB。

4.3.3 阶跃响应

为了测试电路的阶跃响应，将电路再次连接到 24V 电源。使用示波器捕获电流瞬态响应，通过传感器板手动将 PWM 从 0 设置为 4095 以获得阶跃上升响应。然后重复此过程，通过手动将 PWM 从 4095 设置为 0 以捕获阶跃下降响应。

图 4-15 展示了完整的设置。

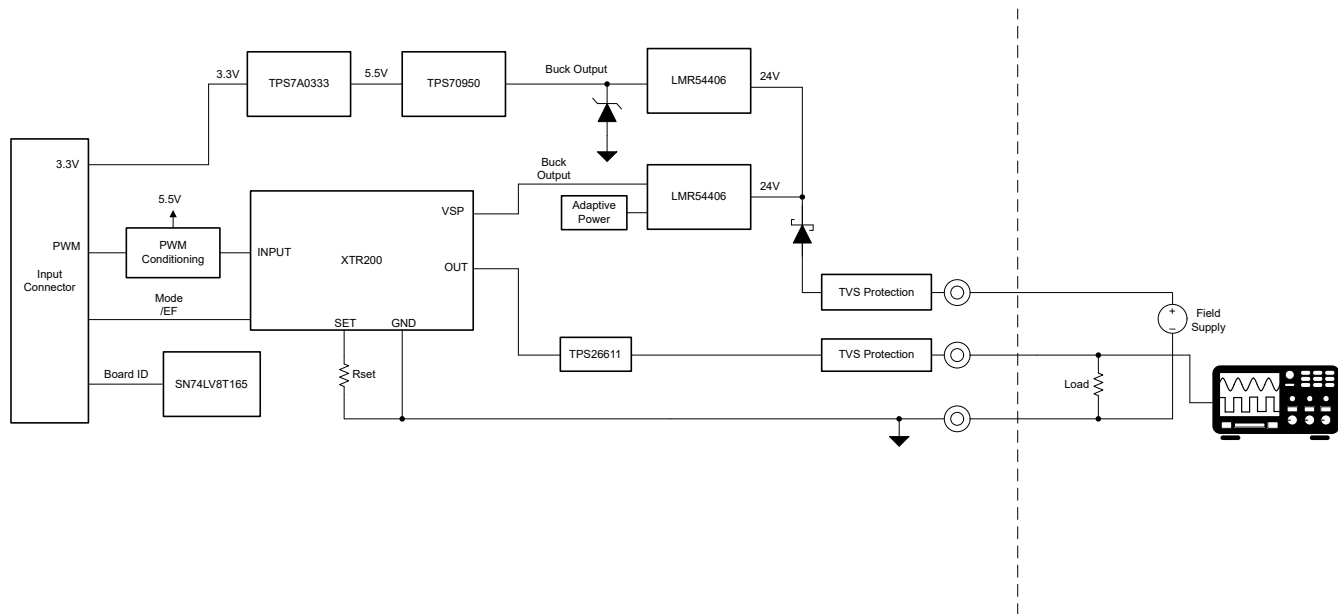


图 4-16 至图 4-19 显示了电流的阶跃响应。

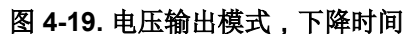
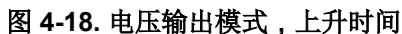
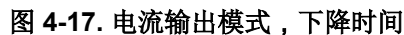
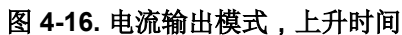
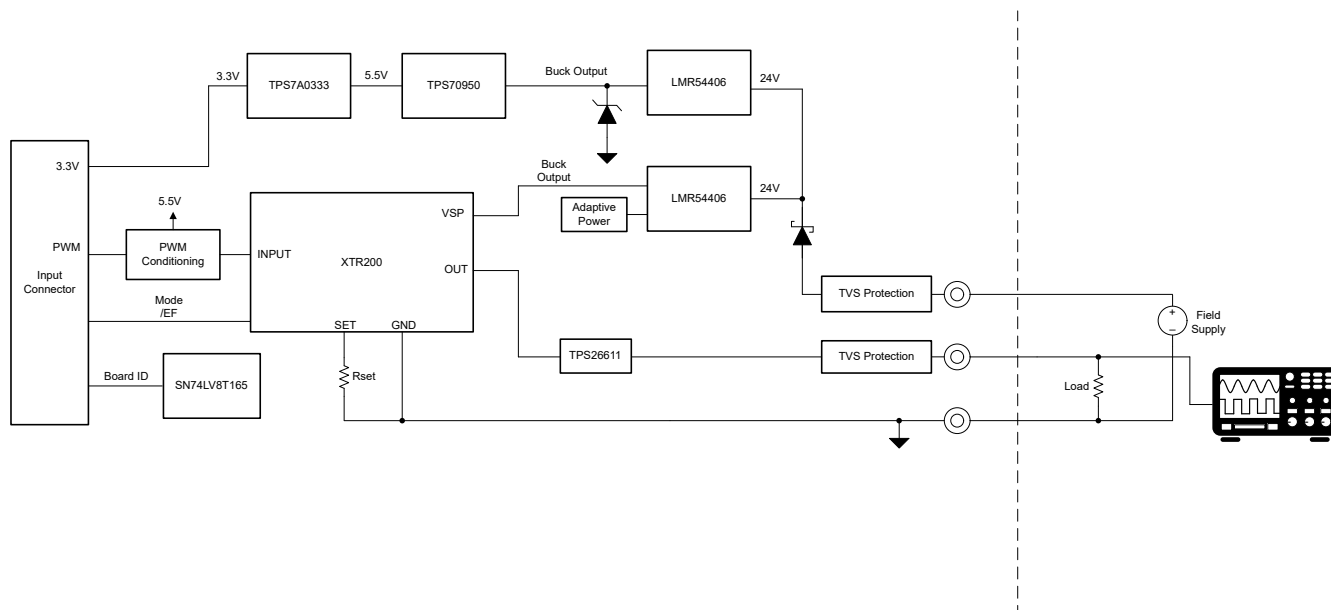


表 4-6 总结了上升和下降时间。如示波器截图所示，两种输出模式的阶跃上升响应都存在轻微过冲。这是由于 PWM 滤波器电路采用四阶巴特沃斯 LPF。在这种情况下，假设这种过冲不会导致系统出现问题。如果需要，可以更改架构以使其具有更慢的阶跃响应，方法是改为设计贝塞耳滤波器架构。

输出模式	PWM 设置	上升时间 (μs)	下降时间 (μs)
电流	0 至 4095 (上升时间) 4095 至 0 (下降时间)	160	158
电压	0 至 4095 (上升时间) 4095 至 0 (下降时间)	192	196

此外，还测试了系统的启动行为，以验证上电序列是否正确，确保在接通现场电源时不会出现不稳定或其他问题。测试方法如下：以现场电源的示波器截图（上电期间）为基准，对为 XTR200 供电的降压转换器、由第二个降压转换器供电的 3.3V LDO 输出以及模块的输出抓取示波器波形。



使用图 4-20 中的配置进行测量会得到图 4-21 和图 4-20 中所示的示波器截图。

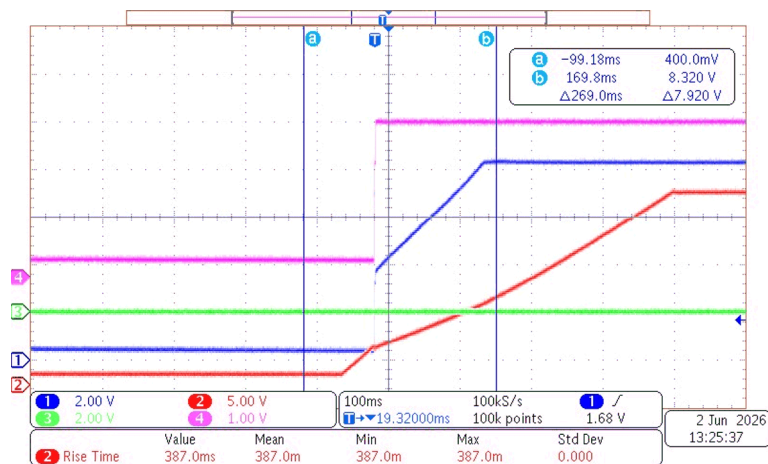


图 4-21. 电流输出模式启动

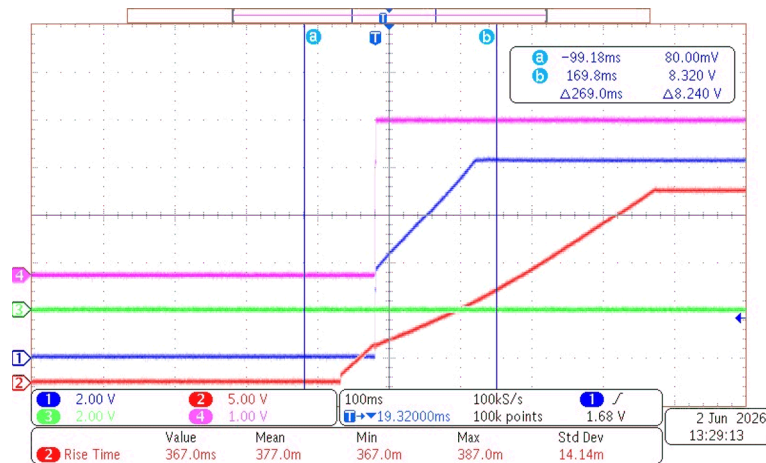


图 4-22. 电压输出模式启动

如这些示波器截图所示，一旦电压足够高可为器件供电且电压可进行调节，降压转换器和 LDO 均会稳定斜升。此外，该模块的输出在任一模式下均不受模块启动的影响，这样可以确保该模块或连接到现场变送器的负载不会损坏。

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-011026](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-011026](#) 中的设计文件。

5.1.3 PCB 布局建议

5.1.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-011026](#) 中的设计文件。

5.2 工具与软件

工具

[XTR200EVM](#) 适用于 3 线制电流或电压系统的高电压精密输出驱动器 XTR200 评估模块。

[LP-MSPM0G3507](#) 适用于 80MHz Arm® Cortex®-M0+ MCU 的 MSPM0G3507 LaunchPad™ 开发套件

软件

[MSPM0-SDK](#) MSPM0 软件开发套件

5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[XTR200 精密 3 线制电流和电压变送器数据表](#)
2. 德州仪器 (TI)，[TPS7A03 具有快速瞬态响应的毫微功耗 I_Q、200nA、200mA 低压降稳压器数据表](#)
3. 德州仪器 (TI)，[TPS709 具有使能功能的 150mA、30V、1μA I_Q 稳压器数据表](#)
4. 德州仪器 (TI)，[TVS3301 33V 双向平缓钳位浪涌保护器件数据表](#)
5. 德州仪器 (TI)，[SN74LV8T165 并联负载 8 位移位寄存器数据表](#)
6. 德州仪器 (TI)，[TPS2661x：具有输入和输出误接线保护功能的 50V 通用 4mA 至 20mA、±20mA 电流环路保护器数据表](#)
7. 德州仪器 (TI)，[OPAx991 40V 轨到轨输入/输出、低失调电压、低噪声运算放大器数据表](#)
8. 德州仪器 (TI)，[TLV930x 适用于成本敏感型系统的 40V、1MHz、RRO 运算放大器数据表](#)
9. 德州仪器 (TI)，[LMR544xx 采用 SOT-23 封装的 SIMPLE SWITCHER 电源转换器 4V 至 45V、0.6A/1A 降压转换器数据表](#)

5.4 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](#)。

5.5 商标

E2E™, LaunchPad™, and TI E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

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

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

Simon Rojas Avila 是德州仪器 (TI) 的一名系统工程师，负责开发工业领域中的参考设计。**Simon** 在模拟信号链设计、基于半导体的检测和功能安全方面经验丰富。他毕业于德克萨斯州拉伯克市的德克萨斯理工大学，获得电气与电子工程专业的学士学位。

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