

Design Guide: TIDA-011004

航天级 3U VPX 电源模块参考设计



说明

本参考设计是一款航天级电源模块，符合航天级 3U VPX 架构 VITA-62 行业标准。Space VPX 标准通过定义模块化、可扩展系统的框架，实现了标准化和互操作性，适用于多种不同的航天任务场景。本参考设计在保持紧凑外形的同时，实现了较高的整体性能。

资源

TIDA-011004	设计文件夹
TPS7H5020-SEP	产品文件夹
TPS7H6015-SEP	产品文件夹
TPS7H6025-SEP	产品文件夹
TPS7H5005-SEP	产品文件夹
TPS7H4011-SEP	产品文件夹
TPS7H4013-SEP	产品文件夹
TPS7H1121-SEP	产品文件夹
OPA4H199-SEP	产品文件夹
TMP9R01-SEP	产品文件夹
THVD9491-SEP	产品文件夹
MSP430FR5969-SP	产品文件夹
TL1431-SP	产品文件夹

特性

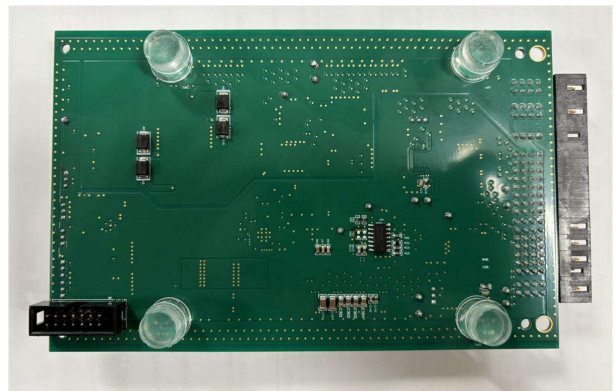
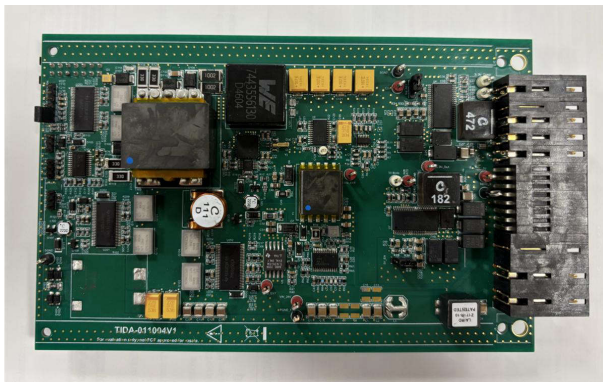
- 具有 28V 标称输入电压的 300W 电源模块
- 输出电压轨：18A 时为 12V，12A 时为 5V，3A 时为 3.3V
- 每条输出轨上的过流保护功能、温度检测功能和板载微控制器
- 遵循 VITA62 标准的机械要求，并包含板载 VPX 电源连接器
- 尺寸：3U 航天 VPX 外形尺寸 (100mm × 160mm)

应用

- 卫星电力系统 (EPS)
- 电源控制与分配单元 (PCDU)
- 航天级隔离式直流/直流模块
- 航天级负载点 (PoL) 直流/直流模块



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

TIDA-011004 由多个子系统组成，包括：

- EMI 滤波器
- 用于辅助电源的初级侧稳压反激式拓扑
- 全桥 ZVS 直流/直流转换器 (28V → 12V)
- 负载点降压稳压器 (12V 转 5V 和 12V 转 3.3V)
- 用于遥测的配电
- 遥测和保护

用于辅助电源的初级侧稳压反激式拓扑

本参考设计使用 TPS7H5020-SEP PWM 控制器来驱动 GaN FET，构成初级侧稳压反激式转换器。该级将标称 28V 输入转换为两路隔离的 12V 输出：

- 初级 12V 偏置 (以初级接地为基准) - 为全桥栅极驱动器供电
- 次级 12V 偏置 (以次级接地为基准) - 为次级侧栅极驱动器、控制电路和遥测系统供电

全桥 ZVS 直流/直流转换器 (28V → 12V)

主功率转换级采用全桥拓扑，具有以下特点：

- TPS7H5005-SEP PWM 控制器 (以次级侧为基准)
- 三个 TPS7H6005-SEP 半桥栅极驱动器：
 - 两个初级侧驱动器以 PWM 模式工作，以便在较高负载条件下实现零电压开关 (ZVS)
 - 一个次级侧驱动器控制次级整流器，进一步提高转换效率
- 全面采用 GaN FET，以改善开关性能

负载点降压稳压器

两个降压转换器从 12V 全桥输出产生 3.3V 和 5V 电压：

- TPS7H4011-SEP：12V → 5V 降压稳压器
- TPS7H4013-SEP：12V → 3.3V 降压稳压器
- 两者均以 500kHz 的开关频率工作，并位于隔离屏障的次级侧

用于遥测的配电

- LDO 稳压器：从次级 12V 偏置产生 3.3V 电压轨
- 3.3V LDO 电压轨：为微控制器、RS-485 收发器和温度传感器供电
- 次级 12V 偏置：为用于电流监测的四路运算放大器供电

遥测和保护

- 温度传感器，其远端二极管靠近次级整流器放置，用于通过 I²C 接口进行热监测
- 四路运算放大器 (三路通道启用) 监测所有三个电压轨 (12V、5V、3.3V) 上的输出电流
- 微控制器：
 - 三个 ADC 输入连接到运算放大器输出，用于电流测量
 - 三个 GPIO 输出连接到功率级的使能引脚，用于实现过流保护
 - I²C 接口用于温度监测
- RS-485 通信接口 (展示 3U VPX 外形尺寸的集成能力)

1.1 术语

EPS	电力系统
PCDU	电源控制和分配单元
PoL	负载点
ZVS	零电压开关
PWM	脉宽调制
EMI	电磁干扰
GaN	氮化镓
FET	场效应晶体管
LDO	低压降稳压器
ADC	模数转换器
GPIO	通用输入/输出

2 系统概述

表 2-1. 电压和电流要求

参数	规格
输入电压	22V 至 36V，标称值为 28V
输出电压和电流	18A 时为 12V (最大值)，12A 时为 5V (最大值)，3A 时为 3.3V (最大值)
开关频率	500kHz

2.1 方框图

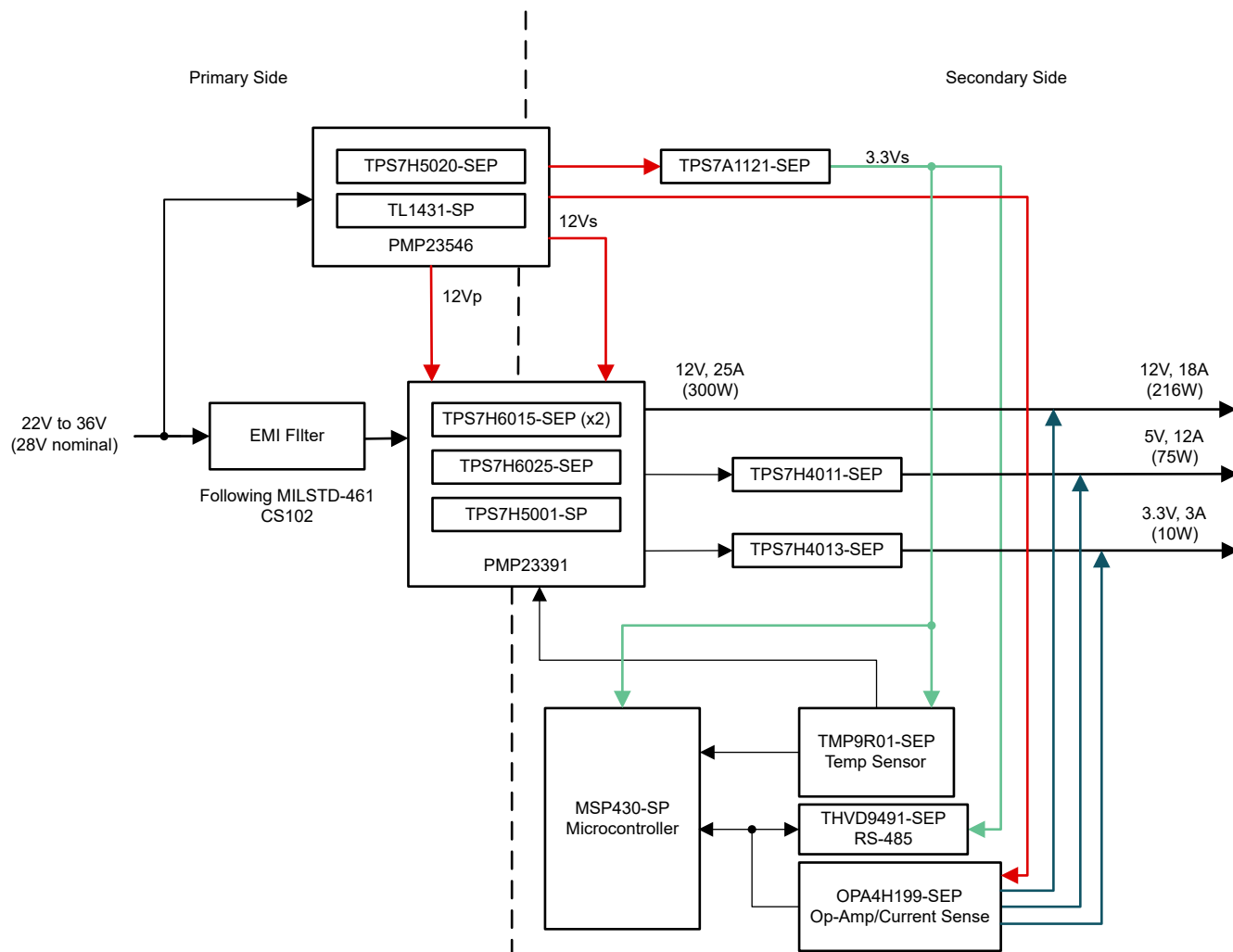


图 2-1. TIDA-011004 方框图

2.2 设计注意事项

以下各节介绍了本参考设计中基于终端应用的子系统的基本设计注意事项。

2.2.1 器件选型

元件选型的一个关键考虑因素是不同任务辐射条件下的可扩展性。所有选用的电源管理器件都具有引脚对引脚兼容的 QMLP 等效型号，这使得从较低辐射环境到较高辐射环境的无缝扩展成为可能，而无需重新设计电路板或修改布局。由于单块 PCB 设计可支持多种任务场景，此策略有助于降低开发成本。通过在抗辐射等级范围内保持电气兼容性，本设计可快速进行调整以满足不同的任务要求，同时保留基础架构以供参考。

此外，本设计按优先级排序依次为：尺寸、效率、成本。VPX 3U 外形尺寸带来了严格的尺寸限制，因此电路板面积是首要考虑因素。效率是第二优先级，以最大化可传送的输出功率。本设计充分利用所有可用输入功率，而不是将输入功率浪费在转换损耗上。仅在满足尺寸和效率要求之后才考虑成本。其结果是：在紧凑的外形尺寸内实现最大的功率传送能力。

2.2.2 EMI 滤波器

本设计遵循了 MIL-STD-461 标准中的 CS102 EMI 要求。本参考设计未进行 EMI 滤波器测试。我们开发了一个仿真模型来指导滤波器的器件选型。图 2-2 展示了在 SIMPLIS™ 中进行的 EMI 滤波器仿真的输出。图 2-3 展示了 EMI 滤波器如何满足该标准的要求。

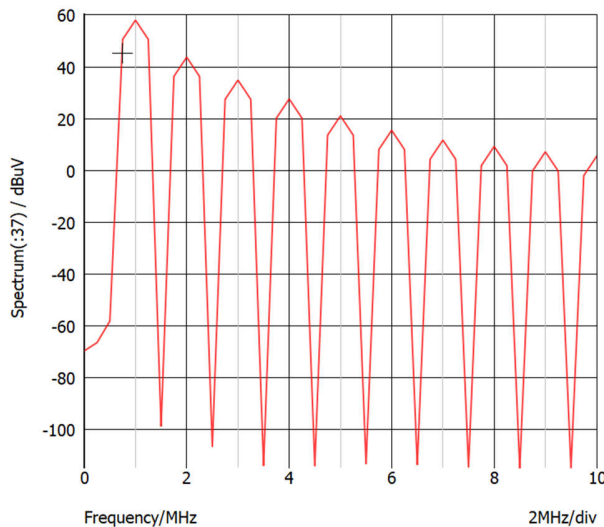


图 2-2. 来自 SIMPLIS 模型的 EMI 滤波器输出

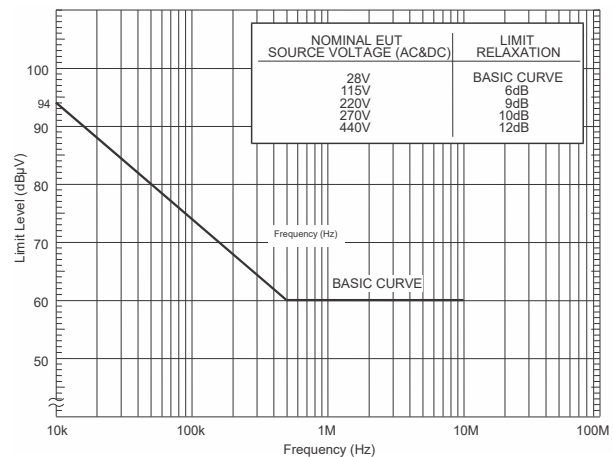


图 2-3. MIL-STD-461 CS102 标准中的 EMI 滤波器要求

2.2.3 全桥次级侧控制

在本设计的 ZVS 全桥部分，选择了次级侧控制，其优势在于瞬态响应速度快，能够对动态负载做出快速响应。此外，次级侧控制还可直接实现过流保护功能，旨在提升整套系统的运行稳定性。

本设计也可改为初级侧控制。在此配置中，ISOS510-SEP 可以将反馈信号从次级侧传输回控制器。

2.3 重点产品

以下各节介绍了本参考设计中用于辅助电源、全桥拓扑、开关稳压器输出和遥测功能的重点产品。

2.3.1 TPS7H5020-SEP/TPS7H5020-SP

TPS7H5020-SEP 和 TPS7H5020-SP 是一款耐辐射的电流模式单端 PWM 控制器，包含集成的栅极驱动器。TPS7H502x 可应用于基于硅以及氮化镓 (GaN) 功率半导体的转换器设计。该系列控制器集成了多个关键功能，例如软启动、使能和可调斜率补偿，同时保持较小的封装尺寸。该控制器还具有 $0.6V \pm 1\%$ 的电压基准容差，可支持高精度电源转换器设计。

2.3.2 TPS7H6015/25-SEP/TPS7H6015/25-SP

TPS7H60x5 系列耐辐射保障 (RHA) 氮化镓 (GaN) 场效应晶体管 (FET) 栅极驱动器专为高频、高效率和高电流应用而设计。该系列包括 TPS7H6005 (200V 等级)、TPS7H6015 (60V 等级) 和 TPS7H6025 (22V 等级)。这些器件全都采用 56 引脚 HTSSOP 塑料封装，并提供 QMLP 和增强型航天塑料 (SEP) 等级。这些驱动器具有可调节死区时间功能、30ns 低传播延迟，以及 5.5ns 的高侧和低侧匹配。这些器件还包括内部高侧和低侧 LDO，无论电源电压如何，都能产生 5V 的驱动电压。TPS7H60x5 驱动器都具有分离栅极输出，可独立灵活地调节输出的导通和关断强度。

2.3.3 TPS7H5005-SEP/TPS7H5001-SP

TPS7H500x-SEP 系列 (包括 TPS7H5005-SEP、TPS7H5006-SEP、TPS7H5007-SEP 和 TPS7H5008-SEP) 是采用增强型航天塑料制成的高速、抗辐射 PWM 控制器系列。这些控制器提供的许多功能有助于设计面向太空应用的直流/直流转换器拓扑。这些控制器具有精密的内部基准 (0.613V +0.7%/-1%)，可配置开关频率高达 2MHz。每个器件都提供可编程斜坡补偿和软启动功能。

2.3.4 TPS7H4011-SEP/TPS7H4011-SP

TPS7H4011 是一款适用于航天环境的 14V、12A 同步降压转换器。峰值电流模式转换器可实现高效率和良好的瞬态性能并减少元件数量。TPS7H4011 具有宽电压范围，因而能够用作负载点稳压器，以直接从 12V 或 5V 电压轨进行转换。输出电压启动斜坡由 SS_TR 引脚控制。通过 EN 和 PWRGD 引脚还可实现电源时序控制。在无需外部时钟的情况下，该器件最多可配置四个并联器件，从而提高电流能力。此外，该器件还包含多种特性，例如差分远程感测、可选电流限制、灵活的故障输入引脚和可配置的补偿。

2.3.5 TPS7H4013-SEP/TPS7H4013-SP

TPS7H401x 器件是适用于航天环境的 14V 同步降压转换器。TPS7H4012 是 6A 器件，TPS7H4013 是 3A 器件。峰值电流模式转换器可实现高效率和良好的瞬态性能并减少元件数量。TPS7H401x 具有宽电压范围，因而能够用作负载点稳压器，以直接从 12V 或 5V 电压轨进行转换。输出电压启动斜坡由 SS_TR 引脚控制。通过 EN 和 PWRGD 引脚还可实现电源时序控制。此外，该器件还包括各种功能，例如每个器件的优化电流限制、灵活的开关频率和可配置的补偿。

2.3.6 TPS7H1121-SEP/TPS7H1121-SP

TPS7H1121 是一款耐辐射低压降 (LDO) 线性稳压器，可在宽输入电压范围内工作，并针对航天环境中的器件供电进行了优化。该器件可在 2.25V 至 14V 的输入电压范围内提供高达 2A 的输出电流。此器件提供出色的稳定性，并具有可在宽范围内调节的可编程电流限制。为了满足 FPGA、DSP 和微控制器的复杂电源要求，TPS7H1121 提供了启用开/关功能、可编程软启动和一个电源正常开漏输出。

2.3.7 OPA4H199-SEP/OPA4H199-SP

OPA4H199-SEP 是一款适用于航天应用的高电压 (40V) 通用运算放大器。该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 ($10.8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.8\mu\text{VPP}$) 和 4.5MHz 带宽。OPA4H199-SEP 具有多种独特功能，例如电源轨的差分与共模输入电压范围、高输出电流 ($\pm 75\text{mA}$)、高压摆率 ($21\text{V}/\mu\text{s}$) 和高容性负载驱动 (1nF)，是一款稳定可靠的高性能运算放大器，适用于高电压航天应用。

2.3.8 TMP9R01-SEP

TMP9R01-SEP 器件是一款抗辐射、高精度、低功率的远程和本地温度传感器，集成了 12 位 ADC、偏置电流和用于温度感应的片上校准电路。该器件还可采用 10 引脚 VSSOP 塑料封装。通过外部 BJT 晶体管或 FPGA、ADC 或 ASIC 中集成的二极管和结强制提供偏置电流，该器件会对生成的 ΔV_{BE} 进行数字化，并直接以 0.0625°C 的温度分辨率进行报告。第二个片上传感器可测量本地温度，从而实现板载温度传感。

TMP9R01-SEP 器件具有多种校准和保护功能，包括串联电阻消除、可编程非理想因子 (η 因子)、偏移校正和可编程数字滤波器。用户可以设置温度上限和下限，从而驱使 ALERT 输出实现过热和欠热保护。I2C 和 SMBus 串行接口在同一 I2C 总线上支持多达九个不同的引脚可编程地址。TMP9R01-SEP 器件还提供 QMLV (TMP461-SP) 和 QMLP (TMP9R01-SP，预发布) 版本，具有更高的辐射规格。

2.3.9 THVD9491-SEP

THVD9491-SEP 是一款空间增强型 $\pm 40\text{V}$ 故障保护全双工 RS-422/RS-485 收发器，采用 1.65V 至 5.5V 逻辑电源提供数据和使能逻辑信号，并采用 3V 至 5.5V 总线侧电源。该器件具有压摆率选择功能，因此可在两种最大速度 (根据 SLR 引脚设置) 下使用。该器件具有集成式 IEC ESD 保护，无需外部系统级保护元件。在更长的电缆敷设长度或存在大接地环路电压的情况下， $\pm 12\text{V}$ 输入共模范围可实现可靠的数据通信。增强型 250mV 接收器迟滞可提供高噪声抑制。此外，当输入同时开路或短路时，接收器失效防护功能可确保输出逻辑高电平

2.3.10 MSP430FR5969-SP

MSP430™ 超低功耗 (ULP) FRAM 平台将独特的嵌入式 FRAM 和整体超低功耗系统架构相结合，支持创新人员以较低能源预算提升性能。FRAM 技术完美融合了静态随机存取存储器 (SRAM) 的速度、灵活性和耐用性与闪存的速度、稳定性和可靠性，功耗极低。MSP430FR5969-SP 的超低功耗架构可提供七种低功耗模式，这七种模式均经过优化，能够在低功耗的情况下对系统进行分布式遥测和辅助控制。MSP430FR5969-SP 具有集成的混合信号特性，非常适合下一代航天器中的分布式遥测应用。对单粒子闩锁和电离辐射总剂量的强大抗干扰性使得该器件能够应用于多种空间和辐射环境中。

2.3.11 TL1431-SP

TL1431 是精密可编程基准，在汽车级、商用级和军事级温度范围内均可满足规定的热稳定性要求。可以通过两个外部电阻器将输出电压设置为介于 $V_{I(\text{ref})}$ (约为 2.5V) 和 36V 之间的任意值。该器件的输出阻抗典型值为 0.2Ω 。有源输出电路提供一个非常明显的接通特性，这使得此器件成为诸如板载稳压、可调电源和开关电源等应用中齐纳二极管和其它类型基准的出色替代方案。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

- 电源：额定处理 30V 和 15A
- 三个电子负载
- 数字万用表
- 示波器
- 风扇

3.2 软件

- CCStudio™ 软件
- MSP-FET

3.3 测试设置

本设计使用背板连接器进行测试，该连接器与本参考设计上的 VPX 连接器匹配。任何包含 2309390-1 连接器的背板均可与板载连接器配合使用，可简化本参考设计的测试流程。请按照具体的背板布线方式正确设置电路板。

为测试本参考设计，德州仪器 (TI) 购买了 Pixus Technologies 的 PIBV62 接口板。该接口板插入本参考设计上的连接器。本参考设计中的对准键 1 (输入电压) 采用 0° 键位，对应标称输入电压范围为 18VDC 至 36VDC。输出用于最终功率输出，对准键 2 (输出电压) 采用 0° 键位，对应 PO1 = 12VDC、PO2 = 3.3VDC、PO3 = 5VDC。

图 3-1 展示了 Pixus 提供的原理图。在该原理图中，进行了以下配置：

- PE1 = 28V 电源
- PE2 = 28V 电源地
- PE4 = 12V 电子负载
- PE5 = 3.3V 电子负载
- PE6 = 5V 电子负载
- PE7 = 次级地

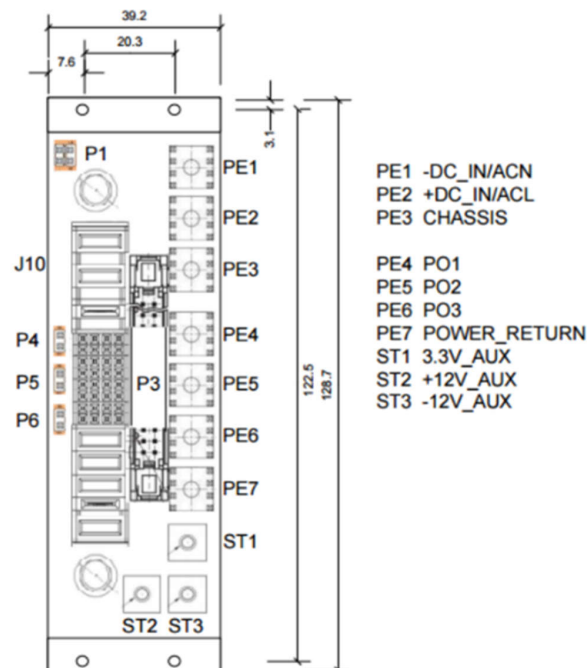


图 3-1. Pixus Technologies 的背板连接器测试原理图

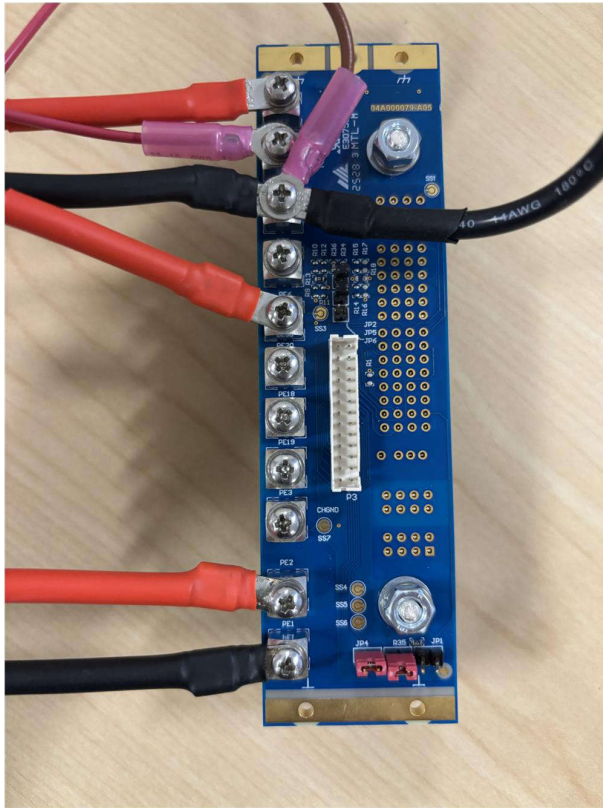


图 3-2. 背板背面

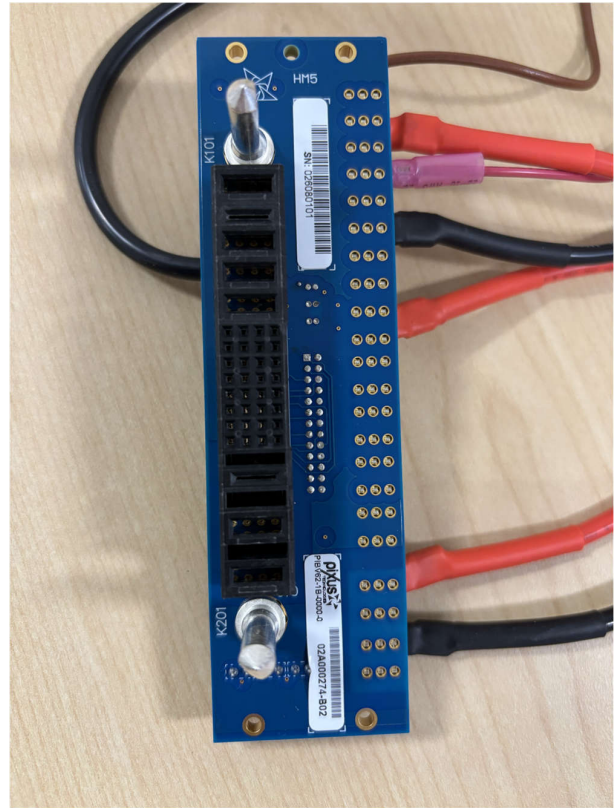


图 3-3. 背板正面

在测试本参考设计的满载条件时，建议提供气流。

3.4 测试结果

以下为 TIDA-011004 的测试结果汇总。除非另有说明，测量均在相应电压轨满载条件下进行。输入电压在 EMI 滤波器之后测得。此外，使用风扇来提供气流。

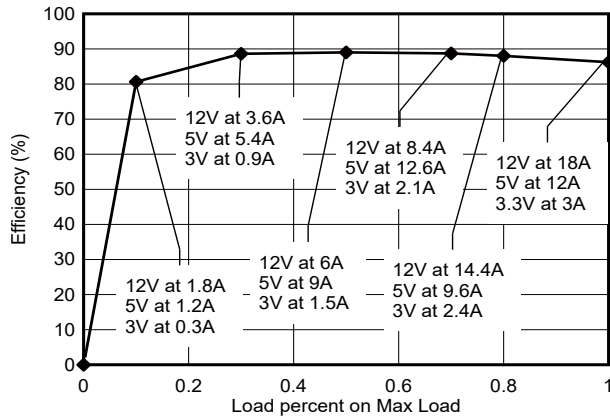


图 3-4. 28V 标称输入下整个 PSU 的效率

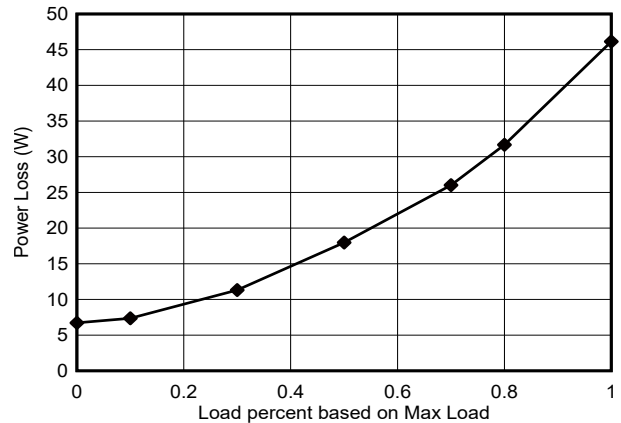


图 3-5. 28V 标称输入下整个 PSU 的功率损耗

表 3-1. 输入为 28V 时的效率和功率损耗数据

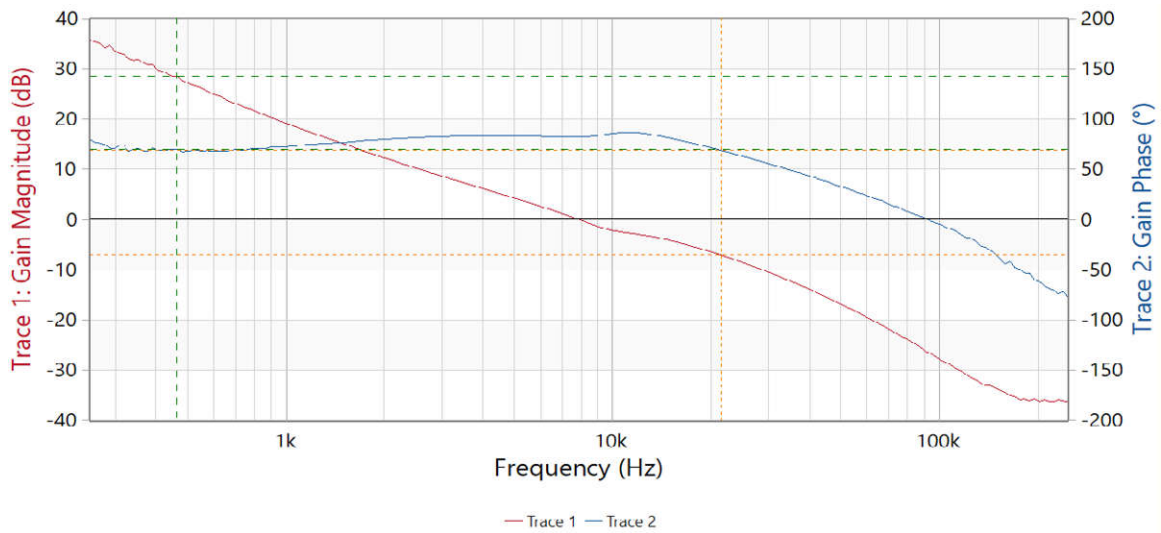
输入		输出						总计		
电压 (V)	电流 (A)	5V 电压轨电压 (V)	3.3V 电压轨电压 (V)	12V 电压轨电压 (V)	5V 电压轨电流 (A)	3.3V 电压轨电流 (A)	12V 电压轨电流 (A)	基于最大负载的负载百分比	效率 (%)	功率损耗 (W)
27.99	0.240	5.013	3.322	12.09	0	0	0	0%	0	6.718

表 3-1. 输入为 28V 时的效率和功率损耗数据 (续)

输入		输出						总计		
电压 (V)	电流 (A)	5V 电压轨电压 (V)	3.3V 电压轨电压 (V)	12V 电压轨电压 (V)	5V 电压轨电流 (A)	3.3V 电压轨电流 (A)	12V 电压轨电流 (A)	基于最大负载的负载百分比	效率 (%)	功率损耗 (W)
27.97	1.359	5.012	3.322	12.09	1.600	0.299	1.790	10%	80.643	7.358
27.92	3.562	5.011	3.323	12.08	4.000	0.898	5.390	30%	88.626	11.312
27.87	5.871	5.012	3.323	12.08	6.400	1.498	8.990	50%	89.017	17.971
27.82	8.286	5.013	3.324	12.08	8.800	2.099	12.700	70%	88.717	26.009
27.80	9.5253	5.015	3.324	12.07	10.000	2.398	14.500	80%	88.041	31.667
27.74	12.054	5.018	3.325	12.07	12.400	2.998	17.999	100%	86.203	46.133

3.4.1 12V 输出电压轨测试结果 (全桥)

以下结果为本参考设计中移相全桥部分的测试数据。
波特图在满负载、标称输入电压 (28V) 条件下测得。



28V 输入, 12V 输出

带宽 = 100Hz

相位裕度 = 75.6°

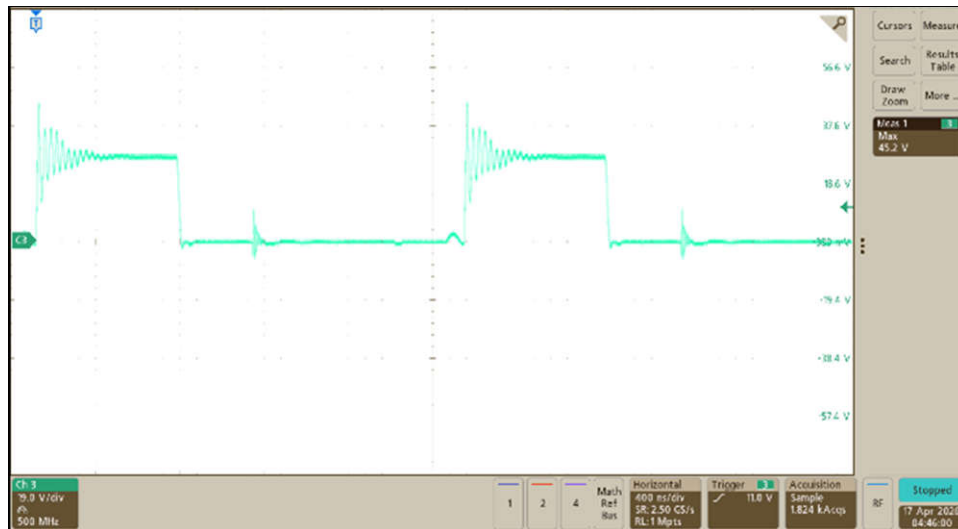


图 3-6. 初级开关节点, 28V 输入

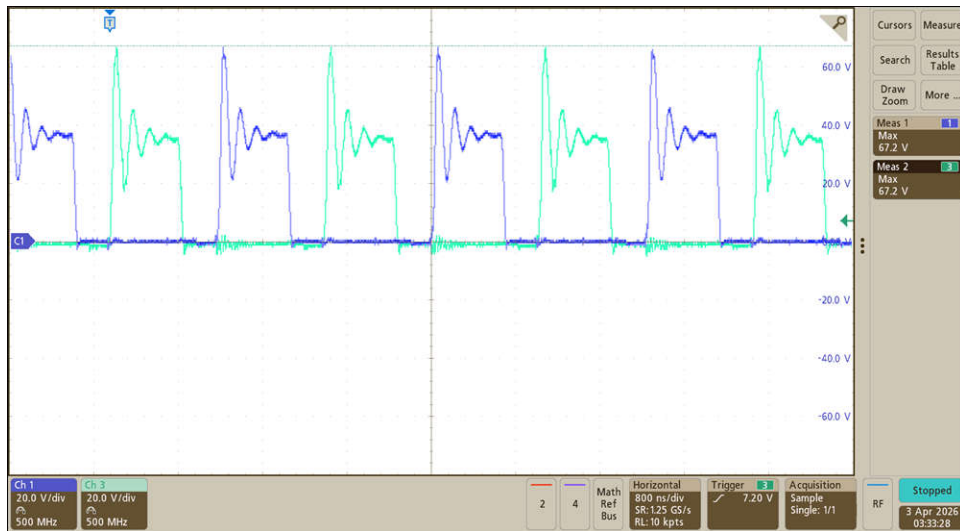


图 3-7. 次级开关节点

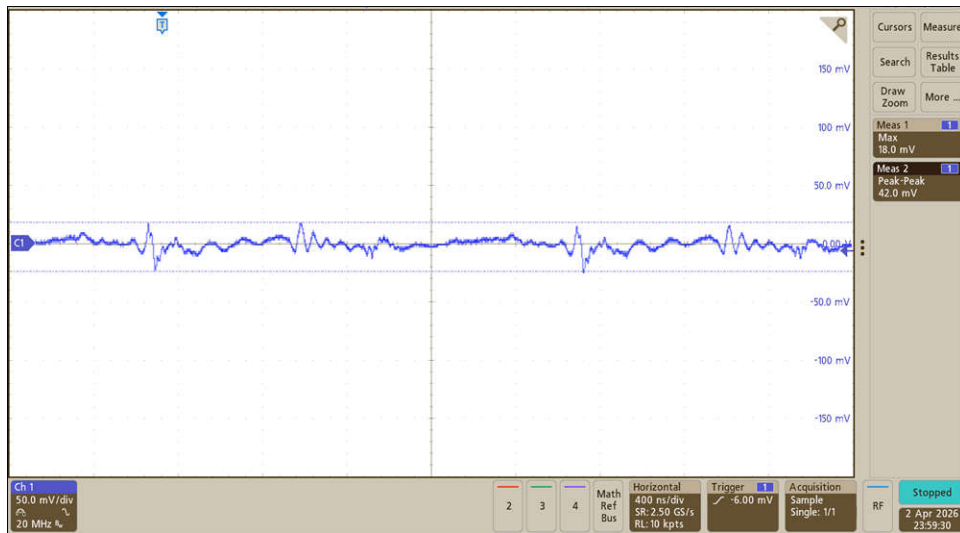


图 3-8. 输出电压纹波；峰峰值为 42.0mV

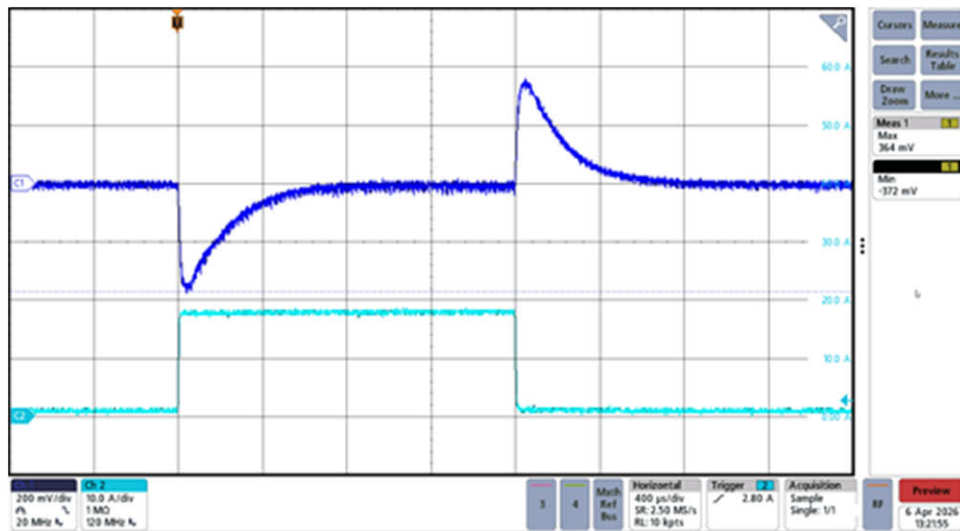


图 3-9. 所示为 1A 至 18A 阶跃变化时的负载瞬态响应

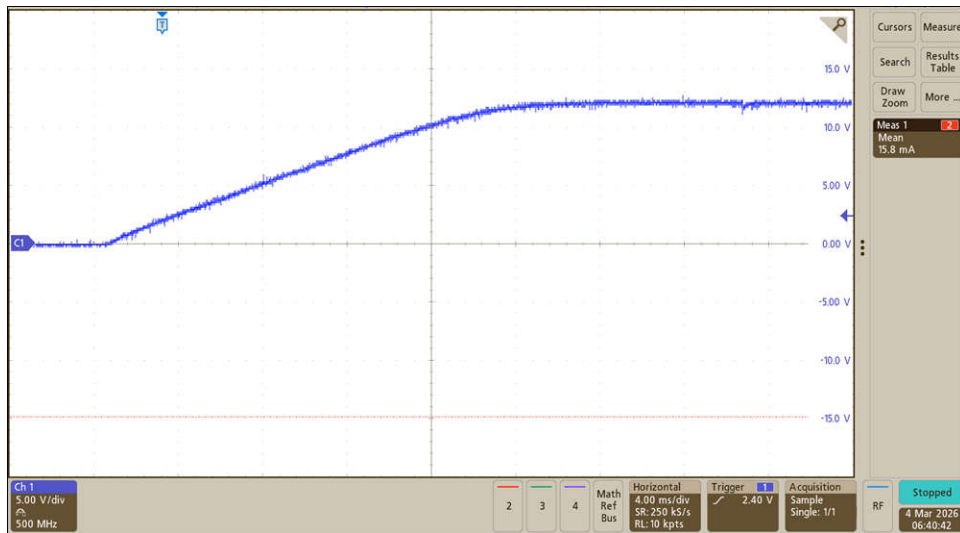


图 3-10. 启动时序

28V 输入

在 18A 电流下输出电压为 12V

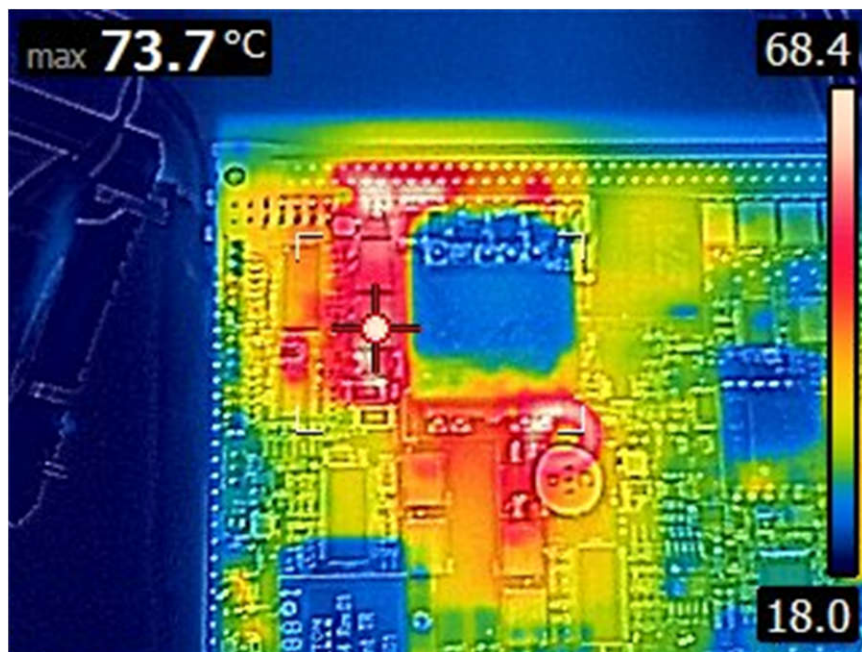
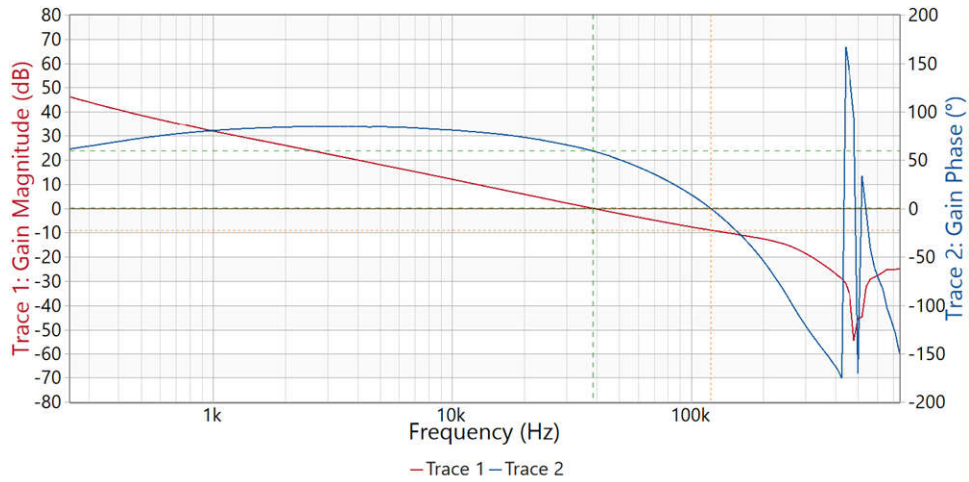


图 3-11. 全桥电路次级侧顶视图

3.4.2 5V 输出电压轨测试结果 (TPS7H4011-SP)

以下结果为 12V 转 5V 降压稳压器的测试数据。



28V 输入, 12V 输出

带宽 = 100Hz

相位裕度 = 59.1° (在 38.7kHz 下)

增益裕度 = -9.01dB (在 121.5kHz 下)

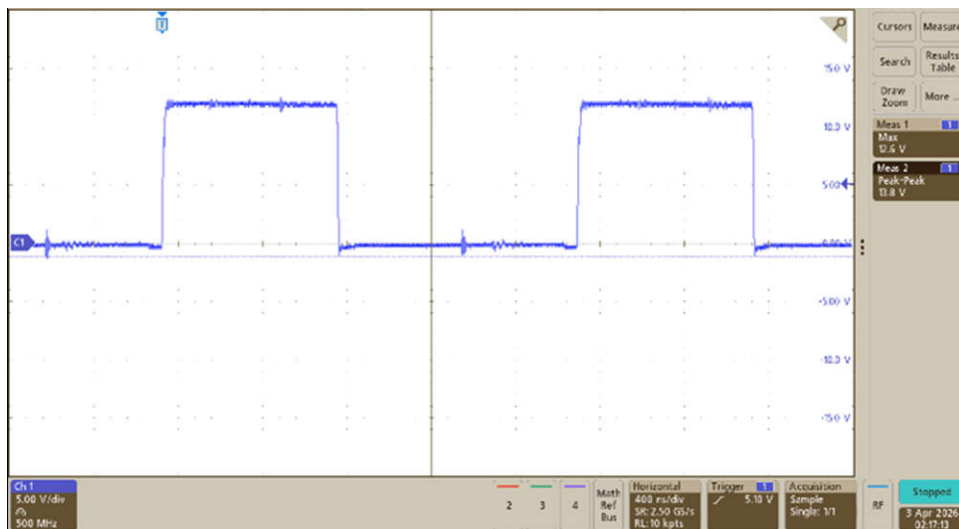


图 3-12. 开关节点, 12V 输入

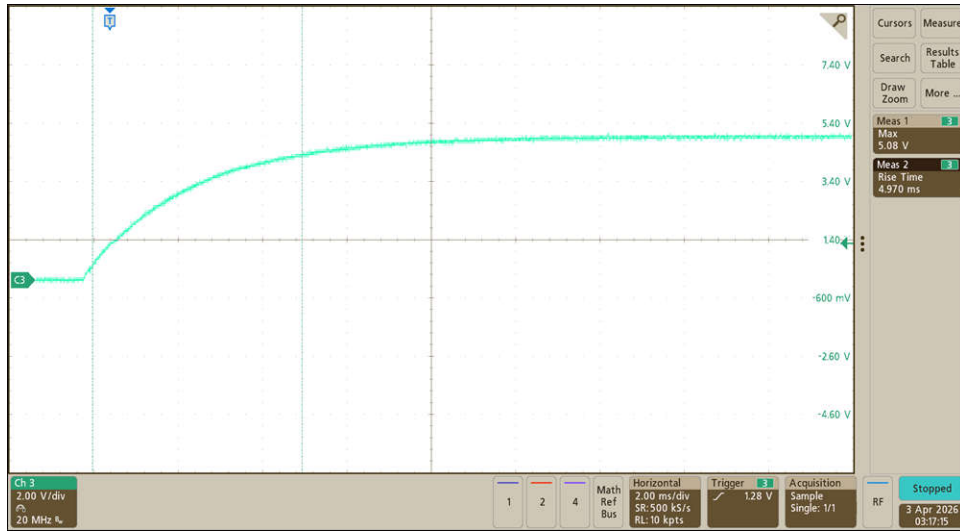


图 3-13. 启动时序

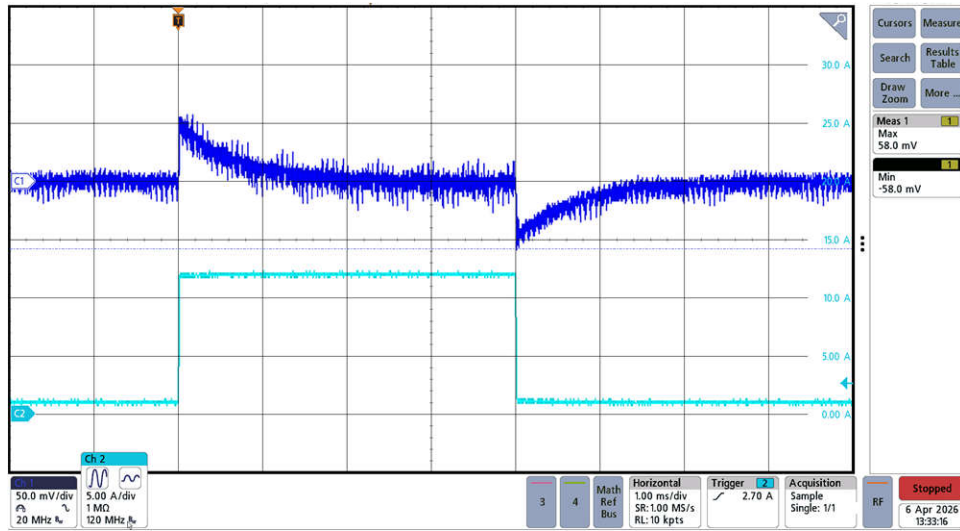


图 3-14. 所示为 1A 至 12A 阶跃变化时的负载瞬态响应

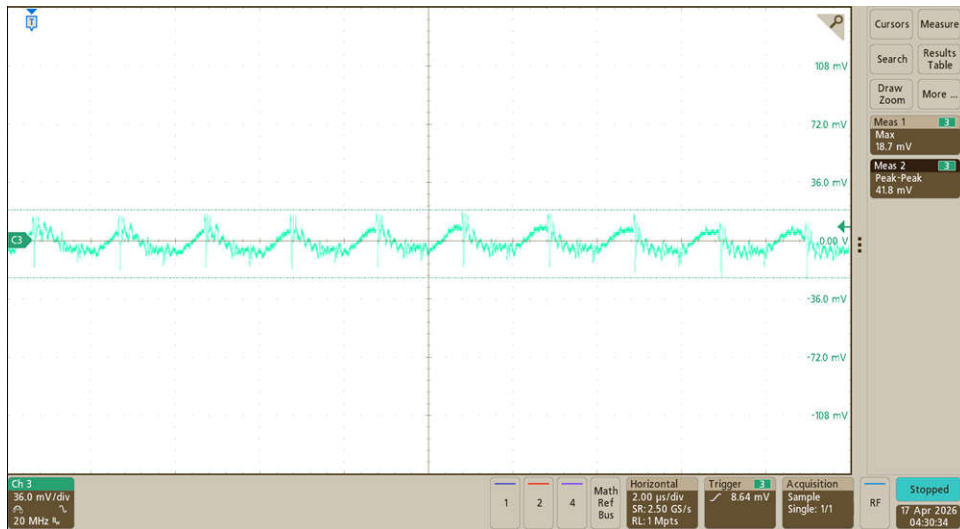


图 3-15. 输出电压纹波



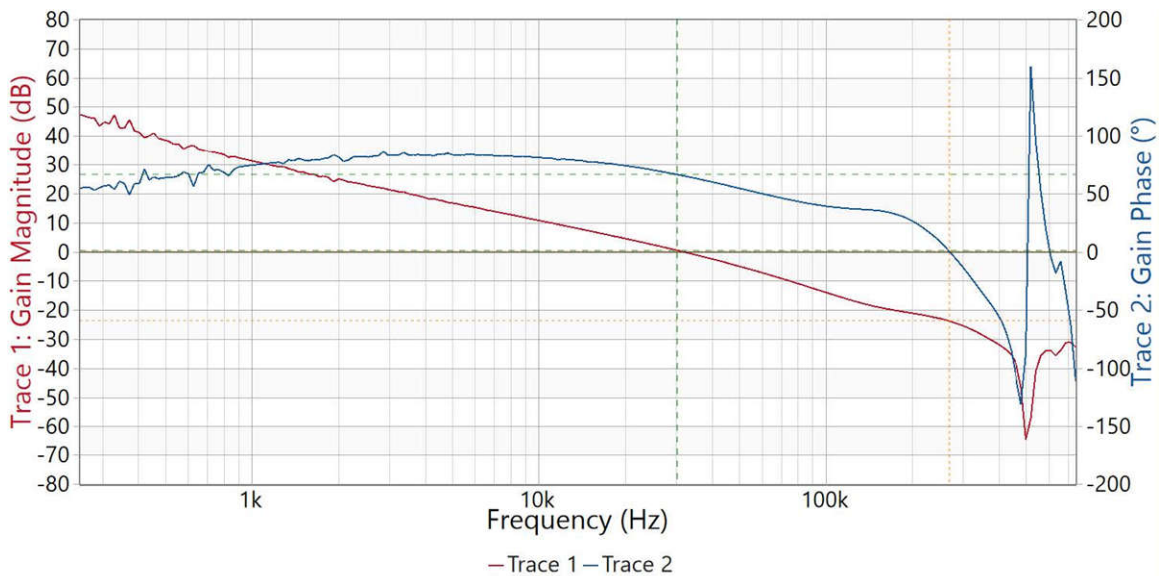
12V 输入

在 12A 电流下输出电压为 5V

图 3-16. 12V 转 5V 降压稳压器顶视图；12V 输入，在 12A 电流下输出电压为 5V

3.4.3 3.3V 输出电压轨测试结果 (TPS7H4013-SP)

以下结果为 12V 转 3.3V 降压稳压器的测试数据。



12V 输入，5V 输出

带宽 = 100Hz

相位裕度 = 66.3° (在 30.4kHz 下)

增益裕度 = -23.8dB (在 269.7kHz 下)

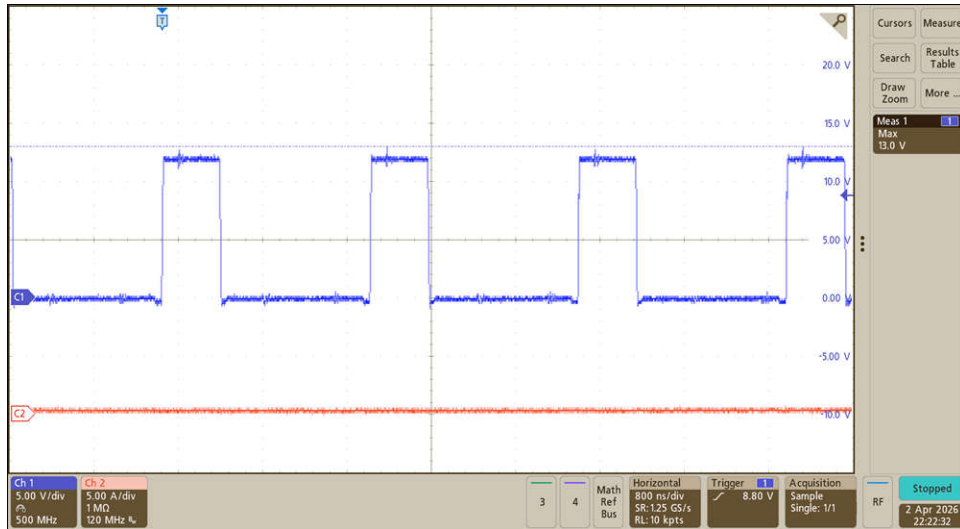


图 3-17. 开关节点, 12V 输入

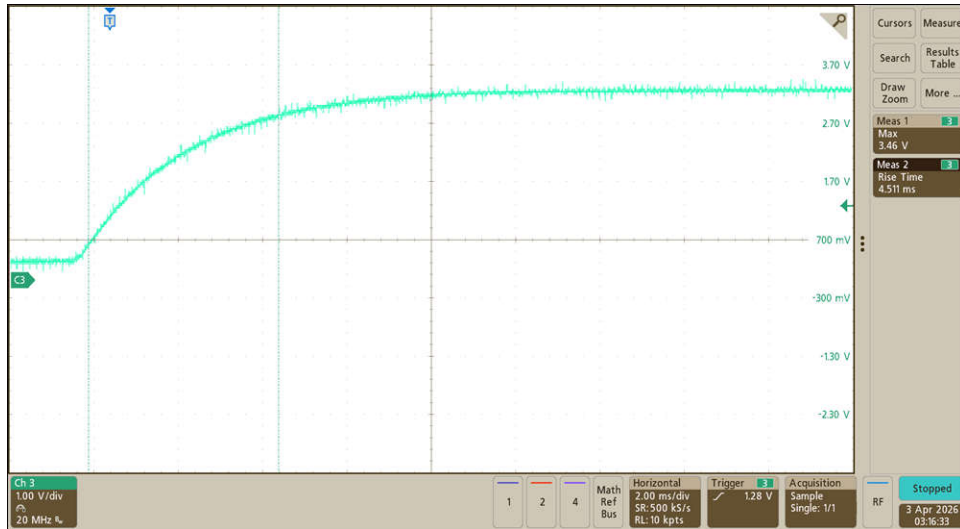


图 3-18. 启动时序

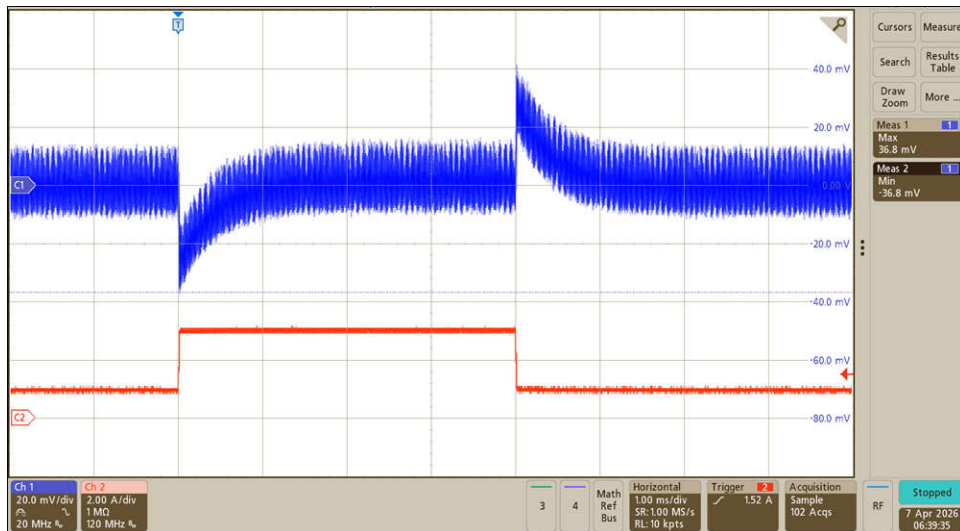


图 3-19. 所示为 1A 至 3A 阶跃变化时的负载瞬态响应

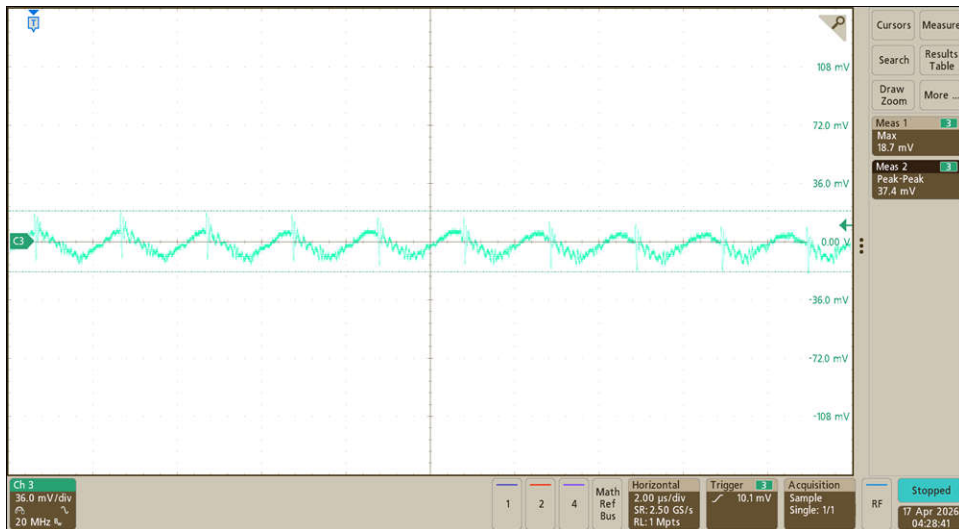
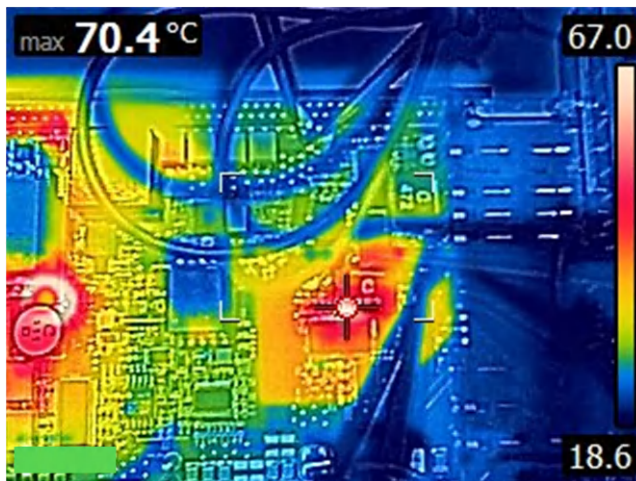


图 3-20. 输出电压纹波



12V 输入

在 3A 电流下输出电压为 3.3V

图 3-21. 12V 转 3.3V 降压稳压器顶视图

4 设计和文档支持

以下信息包含与 TIDA-011004 相关的支持文档和文件

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 [TIDA-011004](#) 中的设计文件。

4.1.2 4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-011004](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

4.2.1 工具

[POWERSTAGE-DESIGNER Power Stage Designer™](#)：主流开关式电源专用软件工具。

[MSP430 调试程序](#)：用于固件编程的调试器

[TPS7H4011-CALC](#) — TPS7H4011 元件计算器

4.2.2 软件

[CCSTUDIO IDE、配置、编译器或调试器 | TI.com](#)

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[采用增强型航天塑料的 TPS7H500x-SEP 抗辐射 2MHz 电流模式 PWM 控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7H60x5-SP 和 TPS7H60x5-SEP 耐辐射保障半桥 GaN FET 栅极驱动器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7H502x-SP/SEP 和 TPS7H503x-SP/SEP 带集成栅极驱动器的耐辐射电流模式 PWM 控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7H4011-SP 和 TPS7H4011-SEP 4.5V 至 14V 输入 12A 耐辐射同步降压转换器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7H401x-SP 和 TPS7H401x-SEP 4.5V 至 14V 输入、3A 和 6A 耐辐射同步降压转换器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7H1121-SP 和 TPS7H1121-SEP 2.25V 至 14V 输入 2A 耐辐射低压降 \(LDO\) 线性稳压器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[OPA4H199-SEP 采用增强型航天塑料的 40V、耐辐射、轨到轨输入/输出、低失调电压、低噪声运算放大器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TMP9R01-SEP 抗辐射 I2C 数字温度传感器 \(具有远程和本地 \(片上\) 温度传感功能\) 数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[THVD9491-SEP 具有灵活的 I/O 电源和 IEC ESD 保护功能的抗辐射 3V 至 5.5V RS-485 收发器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[MSP430FR5969-SP 耐辐射混合信号微控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TL1431-SP V 类精密可编程基准源数据表](#)

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](#)。

商标

TI E2E™, MSP430™, and CCStudio™ are trademarks of Texas Instruments.

SIMPLIS™ is a trademark of SIMPLIS Technologies, Inc..

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

BHAVIKA KAGATHI 是德州仪器 (TI) 航空航天与国防部门的系统工程师，负责开发太空应用的参考设计。她在伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校获得生物工程理学学士学位和工程硕士学位。**Bhavika** 感谢 **John Dorosa** 为本设计提供相关协助。

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