



## 说明

此参考设计是一款 4kW 连续导通模式 (CCM) 图腾柱功率因数校正 (PFC) 模块，具有顶部冷却的氮化镓 (GaN) 子板和 TMS320F280025C 数字控制器。除了 LMG352x 和 C2000 的集成保护功能外，此设计还实现了全面保护。交流压降、浪涌和传导发射 (CE) 均经过全面验证，可提供采用 C2000 和 GaN 且具有成本效益、高效且稳健的图腾柱 PFC 设计。

## 资源

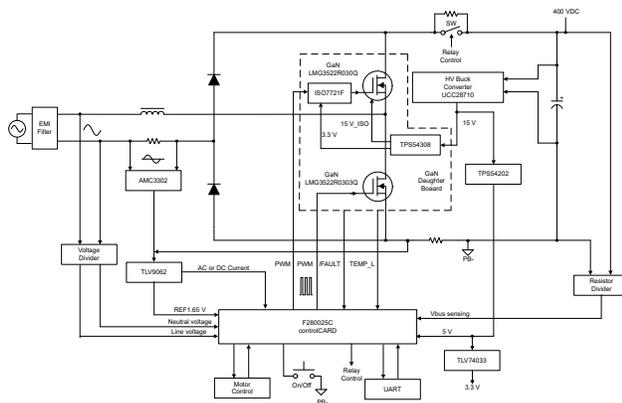
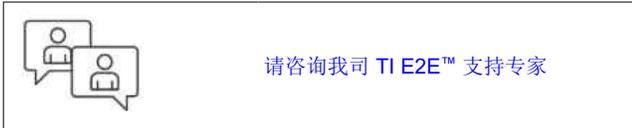
<a href="#">TIDA-010236</a>	设计文件夹
<a href="#">LMG3522R030-Q1</a>	产品文件夹
<a href="#">TMS320F280025C</a>	产品文件夹
<a href="#">AMC3302</a>	产品文件夹
<a href="#">UCC28710</a>	产品文件夹
<a href="#">ISO77xx</a>	产品文件夹

## 特性

- 最大功耗：200V 至 277V VAC 时为 4000W
- 峰值效率： $\geq 98.66\%$ ；功率因数：0.999
- 二极管桥作为低速开关
- 板载辅助高压降压电源
- 单主散热器设计
- 具有 OVP、UVP、OCP、OTP 保护功能和 UART 检测信号报告功能的数字 PFC
- 通过了传导发射测试 (EN55032 B 类)

## 应用

- 空调室外机
- HVAC 电机控制
- 单相在线式 UPS
- 大型家电
- 工业交流/直流电源



## 1 系统说明

典型的住宅空调系统在单相交流输入下运行，功率小于 4kW。需要一个 PFC 级来满足功率因数和总谐波电流 (iTHD) 要求。

该参考资料展示了采用 TI GaN 和 C2000 的 4kW、单相 CCM 图腾柱无桥 PFC，该产品具有非隔离电流检测、差分电压检测和隔离式通用异步接收器/发送器 (UART) 通信端口。

### 1.1 关键系统规格

表 1-1. 关键系统规格

参数	规格
输入电压   频率	200V 至 277V VAC   47Hz 至 63Hz
输入电流	20A <sub>RMS</sub> (最大值)
输出电压	400VDC
输出电流	10A (最大值)
额定功率	200V VAC 时为 4kW
电流 THD	230V VAC、4kW 时为 ≤2%
PFC 电感器	480 μH，直径 80mm，高度 30mm，420g
输出电容	1000 μF × 2
开关频率	高达 100 kHz
GaN R <sub>DS(on)</sub>	30mΩ 典型值

## 2 系统概述

该系统使用 TI C2000 TMDSCNCD280025C controlCARD 作为控制器，采用 LMG3522030 的独立 GaN 子卡可提供快速开关桥臂，而二极管桥用作慢速开关桥臂。由于系统参考点为直流总线负极，因此简化了电路设计。

该设计采用了 UCC28710 高压降压电源来提供 15V 辅助电压轨。此设计还使用单个主散热器，可轻松连接所有功率器件。

利用 TMS320F280025C 和 GaN 的特性，该设计实现了完整的硬件和软件保护，包括输入欠压保护 (UVP)、过压保护 (OVP)、过流保护 (OCP) (同时具有单稳态和逐周期) 以及 GaN 和散热器过热保护 (OTP)。这些保护功能可实现稳健的 PFC 设计。

另外设计了一个独立的滤波器板，因此可以使用不同的滤波器来评估电磁干扰 (EMI) 和电磁兼容性 (EMC) 性能。

该设计采用了隔离式 UART 通信，定期向主机报告电路板工作状态摘要 (如检测信号)，从而提供易于理解的电路板状态。

### 2.1 方框图

图 2-1 展示了主板方框图。

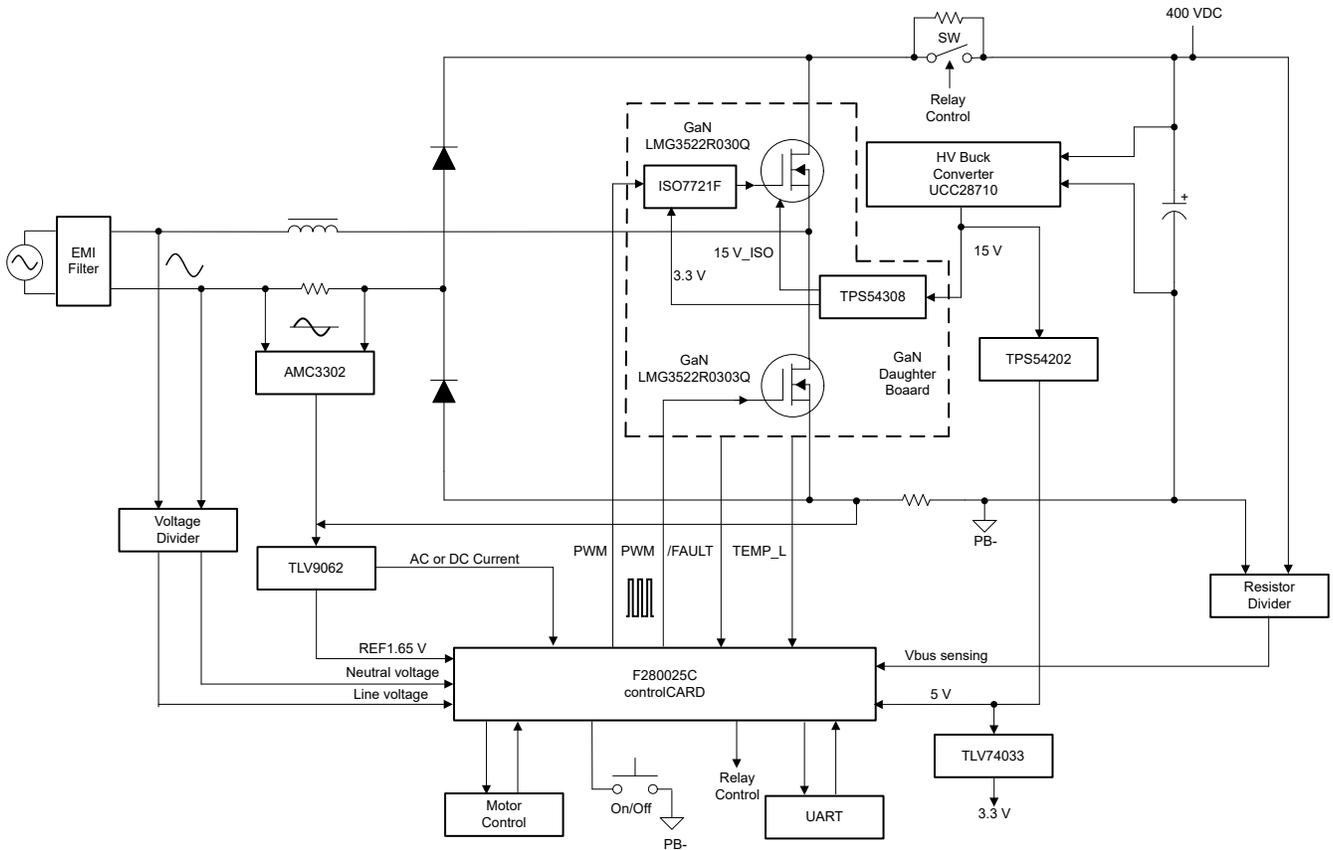


图 2-1. 主板方框图

图 2-2 展示了 GaN 子板方框图。

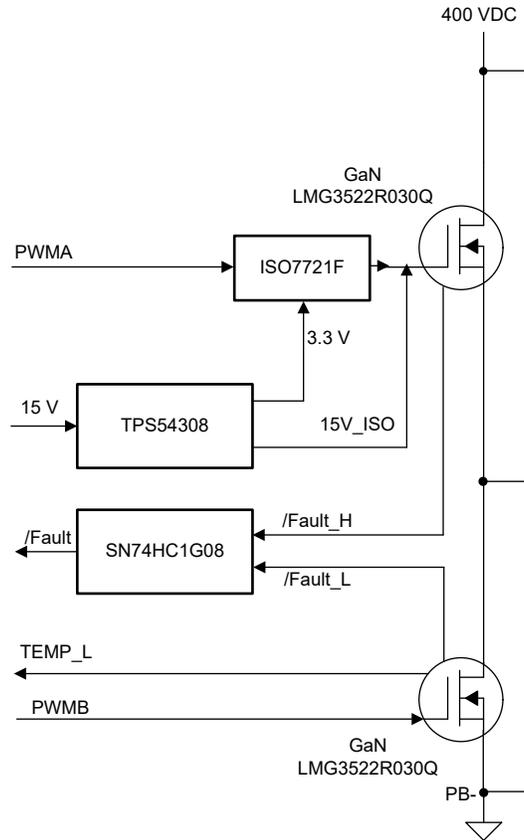


图 2-2. GaN 子板方框图

图 2-3 展示了滤波器板方框图。

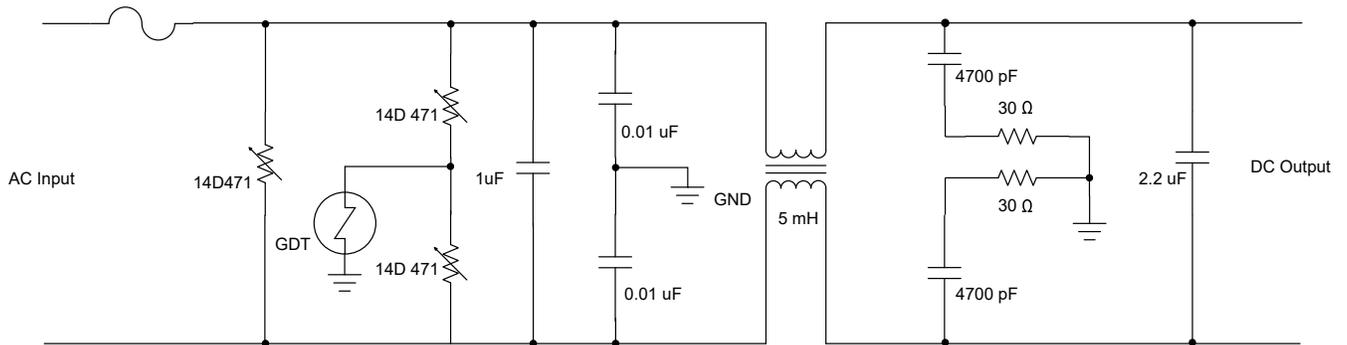


图 2-3. 滤波器板方框图

## 2.2 设计注意事项

数字电源设计包括功率级和控制级。此设计中的功率级设计与所有其他升压 PFC 设计类似。图 2-4 展示了功率级设计参数。

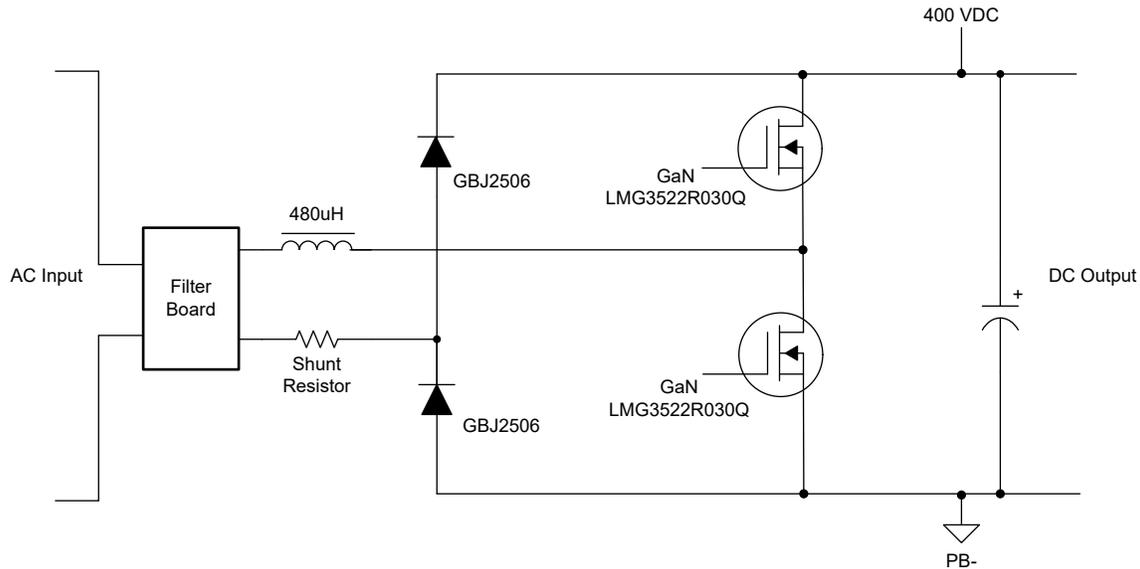


图 2-4. 功率级设计参数

### 2.2.1 6W 辅助电源

此设计采用了配备 UCC28710 的高压降压电源来提供 15V 电压轨，无需外部辅助电源。交流输入可以是 70V 至 277V VAC，输出高达 400mA。

### 2.2.2 交流输入电流检测

对于电器应用，直流负极通常是整个系统的参考点，因为压缩机和风扇电机逆变器的智能电源模块 (IPM) 保持在同一参考点。但是，此设计中有一个高共模电压用于 PFC 的交流电流检测，因此采用了隔离式放大器 AMC3302。AMC3302 具有 41 的固定增益，输入电压范围为  $\pm 50\text{mV}$ 。典型的共模输出电压为 1.44V；然而，由于 ADC 基准电压为 3.3V，替代信号必须移到以 1.65V 为中心，因此实现了一个额外的放大器 TLV9062 来提供此偏置。使用的分流电阻器为两个并联的  $0.002\Omega$  2512 电阻器。AMC3302 的增益为 41，TLV9062 的增益为 0.72723，因此总增益为 29.818。最终输入电流检测比为  $0.029818\text{V/A}$ ，输入电流检测范围为  $-55.34\text{A}$  至  $+55.34\text{A}$ 。

### 2.2.3 直流母线电压感测

由于直流负极是系统参考点，因此直流总线电压检测非常简单，只需使用电阻器将高直流电压衰减至 3.3V 范围即可。在此设计中，直流总线电压检测比为 0.005125，电压检测范围为 0V 至 644V。

### 2.2.4 交流输入电压检测

要控制系统成本，请使用电阻器网络进行交流输入电压检测。相线及中性线都由电阻器衰减并以直流负极为基准，而两个衰减信号相减便是交流输入电压。

## 2.2.5 GaN 驱动

此设计具有一个独立的半桥 GaN 子板作为开关桥臂，这使得该设计易于安装到主散热器上。底部 GaN 直接连接到 DSP，而顶部 GaN 需要隔离器 ISO7721F，因为参考点与 DSP 不同。该隔离器还向 MCU 提供 GaN FAULT 隔离信号，以便提供一次性触发保护。

为了给顶部 GaN 供电，此设计采用了带有 TPS43208 器件的反激式辅助电源，以便为顶部 GaN 提供隔离式 15V 电源轨。该电源还为 ISO7721F 和 SN74AHC1G108 的与门生成一个非隔离式 3.3V 电源轨，其中 SN74AHC1G108 从顶部和底部 GaN 收集故障信号，然后将信息报告给 DSP。

底部 GaN 的温度信号也会路由到数字信号处理器 (DSP)，该处理器提供结温测量值。

## 2.2.6 上电时的浪涌电流保护

直流总线上的两个大容量电容器会导致上电时产生巨大的浪涌电流。在此设计中，50  $\Omega$  PTC 和继电器协同工作以限制此浪涌电流。软件会在上电后的指定延迟内接合继电器。

### 备注

在上电时不要对直流总线施加重负载，因为此时 PTC 承载了所有负载电流。高直流负载 (< 800  $\Omega$ ) 会触发 PTC 保护。如果触发 PTC 保护，请等待触发器在冷却后释放。

## 2.2.7 过流保护

此设计中存在三种类型的电流保护。

逐周期电流保护：TMS320F280025C 具有比较器子系统 (CMPSS) (即窗口比较器)，它们可以在正半周期和负半周期内提供过流保护。在此设计中，软件设置为 40A 电流时触发 CMPSS。CMPSS 配置为逐周期保护。

GaN 过流保护：GaN 会在过流时拉低 FAULT 信号。顶部和底部 FAULT 信号进行与运算并报告给 TMS320F280025C，以便创建一个跳闸区域 (TZ) 信号来停止 PWM，这是一种单稳态触发保护。LMG3522R030 的漏极过流典型值为 70A。

过载电流保护：软件会监测交流输入电流，并在负载电流过高时停止 PFC。在此设计中，过载电流在软件中设置为 26A<sub>RMS</sub>。

## 2.2.8 交流输入欠压保护

如果输入电压过低，软件不会启动 PFC。在此设计中，软件会设置为 170V VAC。

## 2.2.9 直流总线过压保护

CMPSS 模块设置为提供直流总线过压保护。触发电压为 440V VDC。

## 2.2.10 GaN 温度监测和保护

LMG3522R030 在脉宽调制 (PWM) 模式下报告 TEMP 引脚处的温度。TMS320F280025C 中的增强型捕捉 (eCAP) 模块配置为检测此 PWM 信号。软件会捕捉此比率，并确定 GaN 过热保护。在此设计中，PFC 会在 125°C 时因 GaN 过热而停止工作。

## 2.2.11 散热器温度监测和保护

将负温度系数 (NTC) 热敏电阻连接到散热器，来监测散热器温度。在此设计中，PFC 会在散热器温度超过 80°C 时停止工作。

## 2.2.12 UART 检测信号报告

隔离式 UART 每秒报告一次电路板工作状态。报告中包含以下信息：

- GaN 温度占空比
- 温度
- 散热器温度
- 输入电压
- 输入电流
- 输入功率
- 输出电压
- 错误
- 总工作时间
- 固件版本

UART 波特率为 115200bps 并采用 ASCII 模式。

## 2.2.13 电机控制接口

TMS320F280025C 能够同时控制 PFC 和电机逆变器。在此设计中，电机信号保留在 J10 和 J11 这两个连接器上。

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 LMG352xR030

LMG352xR030 GaN FET 具有集成式驱动器和保护功能，可让设计人员在电力电子系统中实现更高水平的功率密度和效率。

LMG352xR030 集成了一个硅驱动器，可实现高达 150V/ns 的开关速度。与分立式硅栅极驱动器相比，TI 的集成式精密栅极偏置可实现更高的开关安全工作区 (SOA)。这种集成与我们的低电感封装相结合，可在硬开关电源拓扑中提供干净的开关和超小的振铃。其他特性 (包括用于 EMI 控制的可调栅极驱动强度、过热保护、稳健过流保护和故障指示) 可提供优化的 BOM 成本、布板尺寸和外形尺寸。

高级电源管理功能包括数字温度报告和 TI 的理想二极管模式。GaN FET 的温度通过可变占空比 PWM 输出进行报告，这使系统能够管理负载。理想二极管模式通过启用自适应死区时间控制功能来降低第三象限损耗，从而更大幅度地提高效率。

### 2.3.2 TMS320F28002x

TMS320F28002x (F28002x) 是 C2000™ 实时微控制器系列中的一款器件，该系列为可扩展、超低延迟器件，旨在提高电力电子设备的效率，包括但不限于：高功率密度、高开关频率，并支持使用 GaN 和 SiC 技术。

实时控制子系统基于 TI 的 32 位 C28x DSP 内核，可针对从片上闪存或 SRAM 运行的浮点或定点代码提供 100MHz 的信号处理性能。三角函数加速器 (TMU) 和 VCRC (循环冗余校验) 扩展指令集进一步增强了 C28x CPU 的性能，从而加快了实时控制系统关键常用算法的速度。

高性能模拟模块集成在 F28002x 实时微控制器 (MCU) 上，并与处理单元和 PWM 单元紧密耦合，从而提供实时信号链性能。14 个 PWM 通道均支持与频率无关的分辨率模式，可控制从三相逆变器到高级多级电源拓扑的各种功率级。

### 2.3.3 UCC2871x

UCC2871x 系列反激式电源控制器在不使用光耦合器的情况下提供隔离式输出恒压 (CV) 和恒流 (CC) 输出调节。此器件可处理来自主要电源开关和辅助反激式绕组的信息，以对输出电压和电流进行精确控制。

输出驱动接至一个 MOSFET 电源开关。带有谷值开关的断续传导模式 (DCM) 减少了开关损耗。开关频率的调制和初级电流峰值振幅 (FM 和 AM) 在整个负载和线路范围内保持较高的转换效率。控制器具有 100kHz 的最大开关频率并且一直保持对变压器内初级峰值电流的控制。保护特性有助于抑制初级和次级应力分量。

### 2.3.4 TLV906x

TLV906x 具有轨到轨输入和输出摆幅功能的运算放大器。这些器件是非常具有成本效益的设计，适用于需要低电压运行、小型封装尺寸和高容性负载驱动能力的应用。虽然 TLV906x 的容性负载驱动能力为 100pF，但电阻式开环输出阻抗便于在更高的容性负载下更轻松地实现稳定。此类运算放大器专为低工作电压 ( 1.8V 至 5.5V ) 而设计，性能规格类似于 OPAx316 和 TLVx316 器件。

### 2.3.5 TPS54308

TPS54308 是一款输入电压范围为 4.5V 至 28V 的 3A 同步降压转换器。该器件包含两个集成式开关 FET 并且具备内部回路补偿和 5ms 内部软启动功能，可减少元件数量。通过集成 MOSFET 并采用 SOT-23 封装，TPS54308 可实现高功率密度，并且在 PCB 上的占用空间非常小。

在轻负载条件下，TPS54308 以强制连续导通模式 (FCCM) 运行。开关频率在整个负载范围内维持在一个几乎恒定的水平。这使得该器件非常适用于 Flybuck 拓扑，该设计中便是使用该拓扑。两个高侧 MOSFET 内的逐周期电流限制可在过载情况下保护转换器，并通过低侧 MOSFET 续流电流限制防止电流失控，增强限制效果。当过流持续时间超出预设时间时，将触发断续模式保护功能。

### 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

本部分将详细介绍硬件，并说明电路板上的不同区域，以及如何为本设计指南所述的实验设置这些区域。

#### 3.1 硬件要求和组装

此设计包含 4 个部分：散热器、GaN 子板、主板和滤波器板。图 3-1 展示了该套件的侧视图，图 3-2 展示了散热器、GaN 子板和主板的相对位置。GaN 子板的底部采用了两个顶部冷却的 GaN LMG3522R030 器件，因此可以通过散热器和二极管桥对这些器件进行冷却。该套件通常在出厂时已完全组装好；但是，以下列表中提供了组装步骤。

1. 将 5 个 M3×10mm 螺柱（3mm 公端带外螺纹，母端带内螺纹）安装到散热器角落位置上。
2. 在 GaN 子板下方的散热器上粘贴热界面材料（TIM）（厚度为 0.5mm，本设计中采用 Fujipoly GR80A-0H-050GY），确保 TIM 足够大，并比 GaN 子板的任何底部引脚和走线至少长 3mm。但是，4 个机械孔需要直径为 7mm 的 TIM 禁止区域。
3. 将 GaN 子板放在散热器上，4 个底侧螺柱与散热器上的四个机械安装孔对齐。使用 4 个 M3×6mm 螺钉将 GaN 子板固定到散热器上。
4. 在二极管桥的底部涂抹导热油脂。
5. 使用 M3×4mm 螺钉将散热器温度探针固定到散热器上。
6. 将 GaN 子板的 J2 与主板的 J4 对齐，J2 可以从 J4 的底部孔滑入 J4。
7. 将主板边角孔与散热器上的 5 个螺柱对齐，并使用 M3×8mm 螺钉固定。
8. 将二极管桥上的孔与散热器上的相应孔对齐，然后使用 M3×8mm 螺钉将二极管桥固定到散热器上。
9. 使用 3 个 M3×6mm 螺钉从主板上的孔（HV、SW 和 GND）拧紧到 GaN 子板上的 MP1、MP4 和 MP7 螺柱。这 3 个螺钉还用作 GaN 子板和主板之间的大电流路径。
10. 使用线束将主板（J1、J2 和 J3）连接到滤波器板（J2、J4 和 J10）。
11. 将直流输出电缆连接到主板上的 J5 和 J7 处。
12. 将交流输入电缆连接到滤波器板上的 J1、J3 和 J5 处。

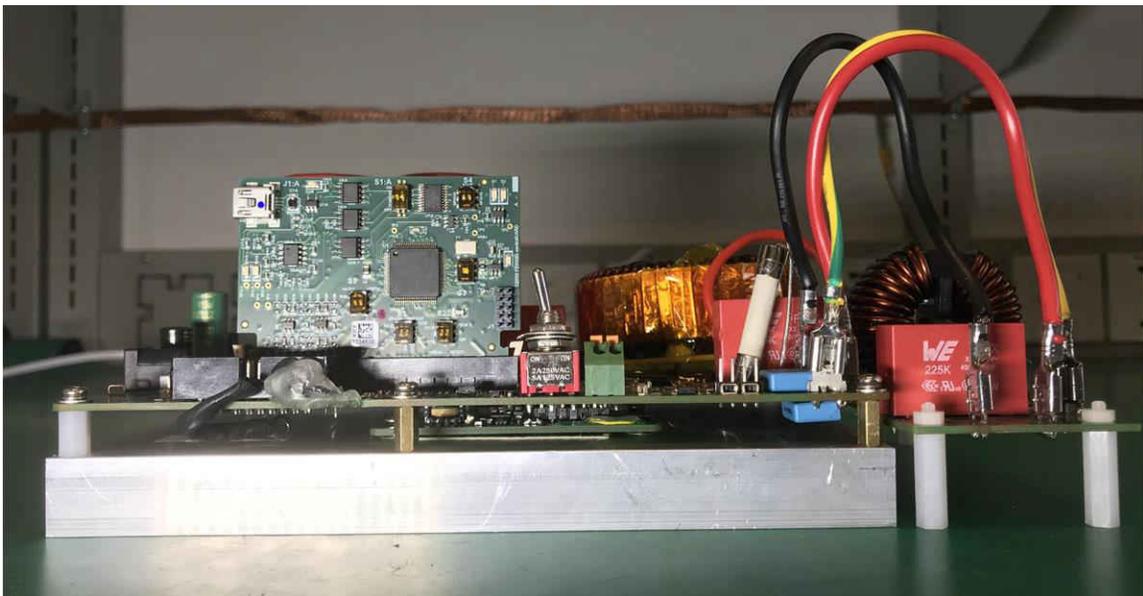


图 3-1. TIDA-010236 参考设计侧视图

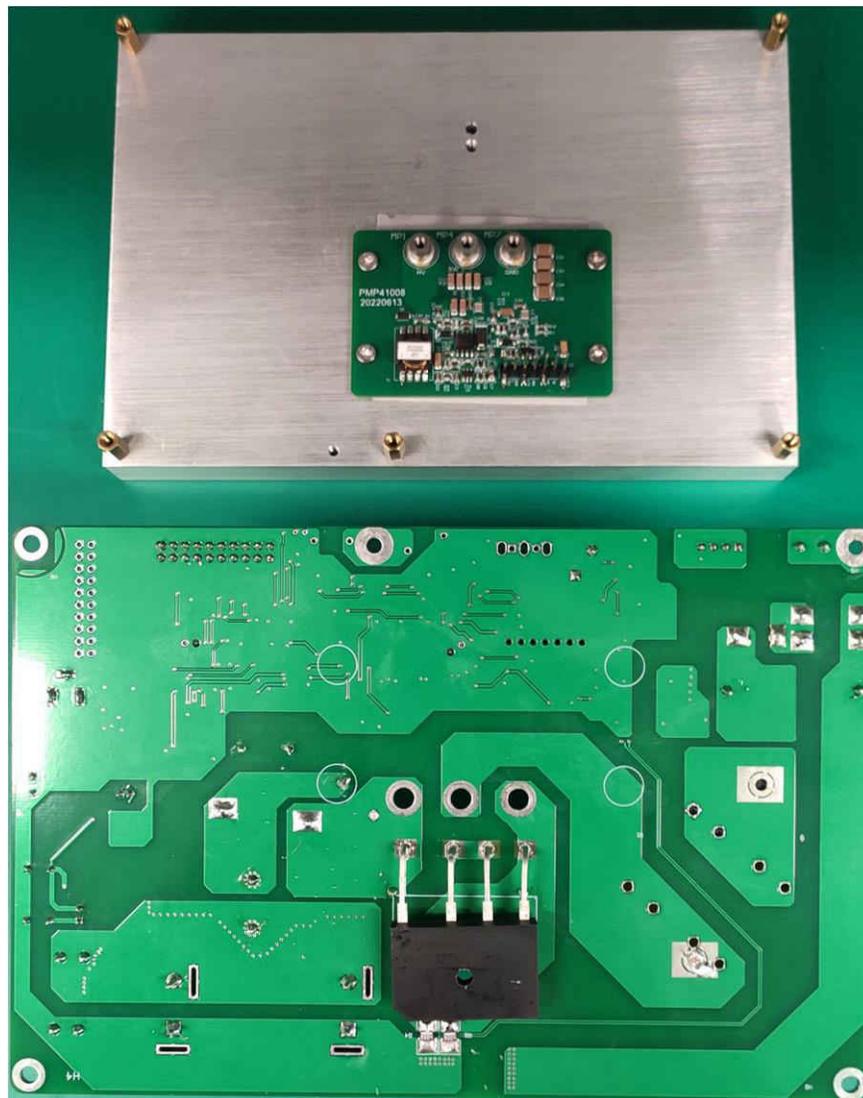


图 3-2. 散热器、GaN 子板和主板

### 3.1.1 测试设备要求

1. 可编程交流电源 ( $\geq 4\text{kVAC}$ )
2. 隔离式高压电气直流负载 ( $\geq 400\text{VDC}$ 、 $4\text{kW}$ )
3. 空气冷却风扇
4. 具有 USB 端口的主机 PC 或笔记本电脑

### 3.2 软件要求

此参考设计具有以下软件要求：

1. 具有固件 TIDA-010236\_FW\_V1.01 的闪存 TMS320F280025C controlCARD
2. 主机 PC 上的 UART 终端软件

### 3.3 测试设置

按照以下步骤来设置测试：

1. 确保 TMS320F280025C controlCARD 板已正确插入并锁定在主板上的 J9
2. 使用 USB 线缆将 TMS320F280025C controlCARD 连接到主机 PC
3. 在 PC 上运行任何 UART 终端软件，并将正确的 UART 端口设置为 115200bps 并以 ASCII 模式运行

4. 将交流电源电缆连接到主板上的输入端子 J1 和 J3, 但不要加电
5. 将直流负载连接到输出端子 J5 和 J7 ( J5 为直流正极, J7 为直流负极, 负载必须与电网和 PE 线路隔离 )
6. 使用强制通风冷却风扇来冷却散热器
7. 如果需要, 连接电流表和电压表或功率分析仪

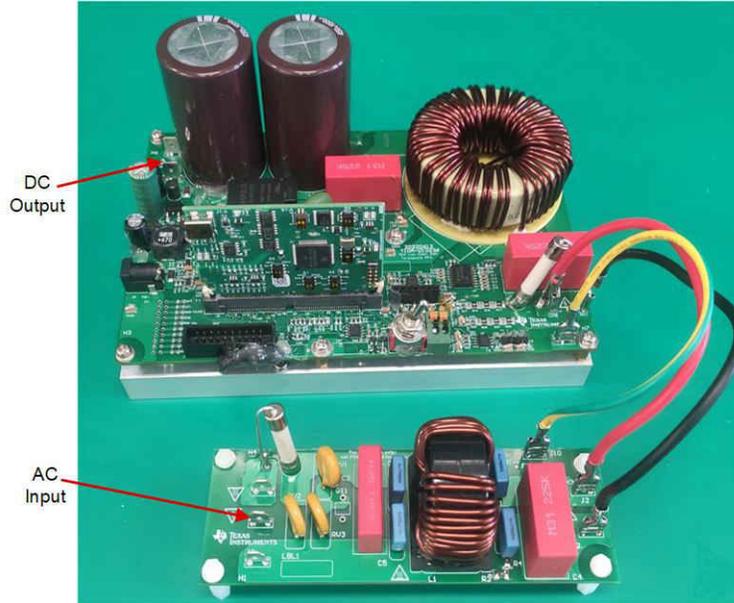


图 3-3. 测试设置

### 3.4 测试结果

#### 3.4.1 测试过程

图 3-4 展示了受试设备 (EUT) 设置。

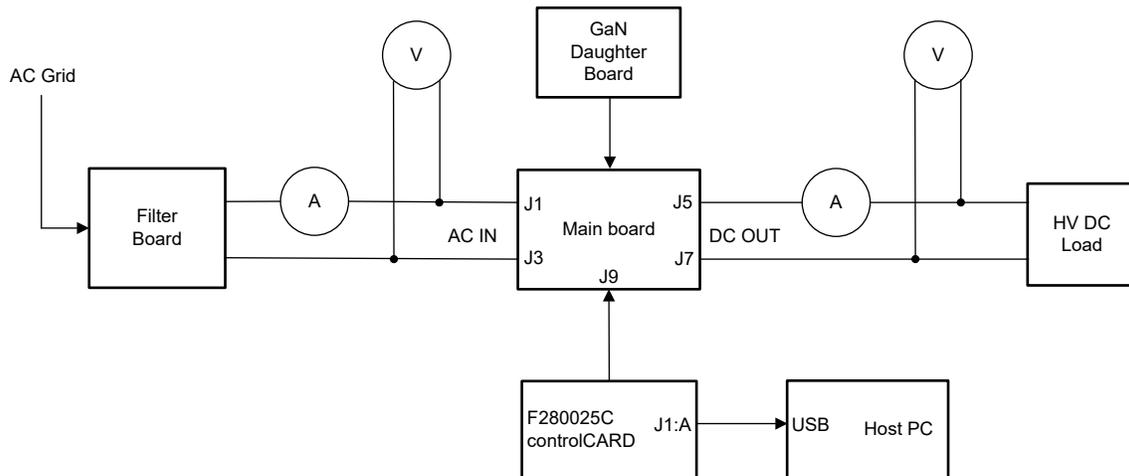


图 3-4. EUT 设置

##### 3.4.1.1 90V VAC 下的测试过程

按照以下步骤来在 90V VAC 条件下设置测试：

1. 为直流输出添加以下负载：具有大于  $800\ \Omega$  的功率电阻器或小于 0.5A 的负载电流
2. 将交流电源设置为 90V VAC、50Hz 或 60Hz, 然后接通电源。
3. 检查主机 PC 上的 UART 终端软件。需要对检测信号报告进行检测。电路板状态需要为欠压保护 (UVP)。
4. 关闭交流电源

### 3.4.1.2 220V VAC 下的测试过程

按照以下步骤来在 220V VAC 条件下设置测试：

1. 为直流输出添加以下负载：具有大于  $800\ \Omega$  的功率电阻器或小于 0.5A 的负载电流
2. 将交流电源设置为 220V VAC、50Hz 或 60Hz，然后接通电源。PFC 启动，直流输出电压为 400V VDC。
3. 检查 UART 终端软件、UART 信息和波形
4. 逐步增加负载，直到达到 4kW
5. 关闭交流电源

### 3.5 性能数据：效率、iTHD 和功率因数

图 3-5 展示了相关 230V VAC 效率曲线。

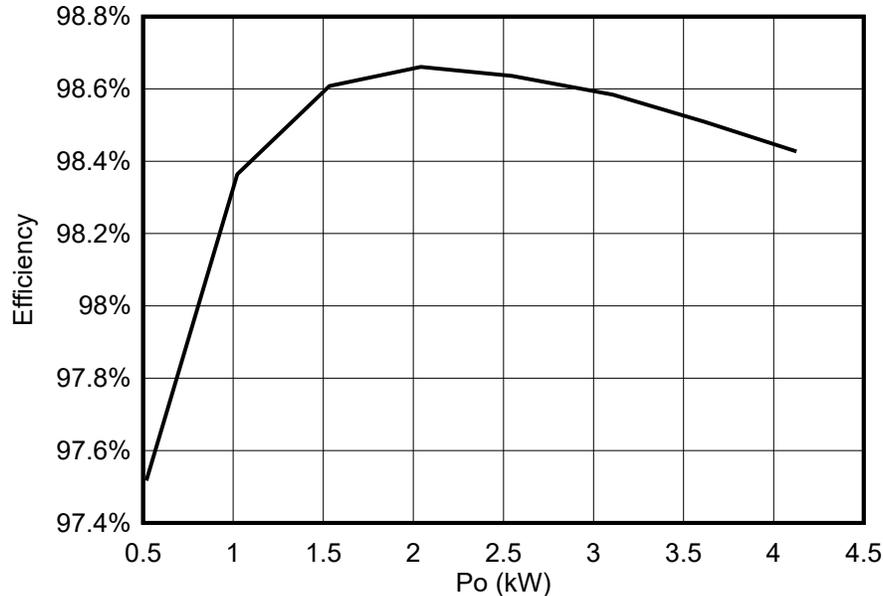


图 3-5. 效率曲线，230V VAC

表 3-1 展示了 230V VAC 输入时的效率、iTHD 和功率因数数据，不包括控制和驱动功率损耗。

表 3-1. 输入为 230V VAC 时的效率、iTHD 和功率因数数据

V <sub>IN</sub> /V	I <sub>IN</sub> /A	P <sub>IN</sub> /kW	V <sub>OUT</sub> /A	输出电流/A	输出功率/kW	效率	iTHD	PF
229.71	2.3875	0.5179	399.37	1.2643	0.5050	97.517%	18.383%	0.9443
229.45	4.5206	1.0230	399.44	2.5190	1.0063	98.364%	9.420%	0.9863
229.18	6.7310	1.5339	399.41	3.7863	1.5125	98.608%	6.125%	0.9943
228.91	8.9450	2.0415	399.44	5.0417	2.0142	98.661%	4.379%	0.9970
228.64	11.1670	2.5486	399.43	6.2920	2.5138	98.636%	3.375%	0.9982
228.34	13.6240	3.1073	399.45	7.6670	3.0663	98.584%	2.739%	0.9988
228.06	15.8710	3.6163	399.47	8.9160	3.5624	98.509%	2.353%	0.9991
227.78	18.1300	4.1267	399.47	10.1650	4.0618	98.427%	2.000%	0.9993

图 3-6 展示了 200V VAC 和 277V VAC 效率曲线。

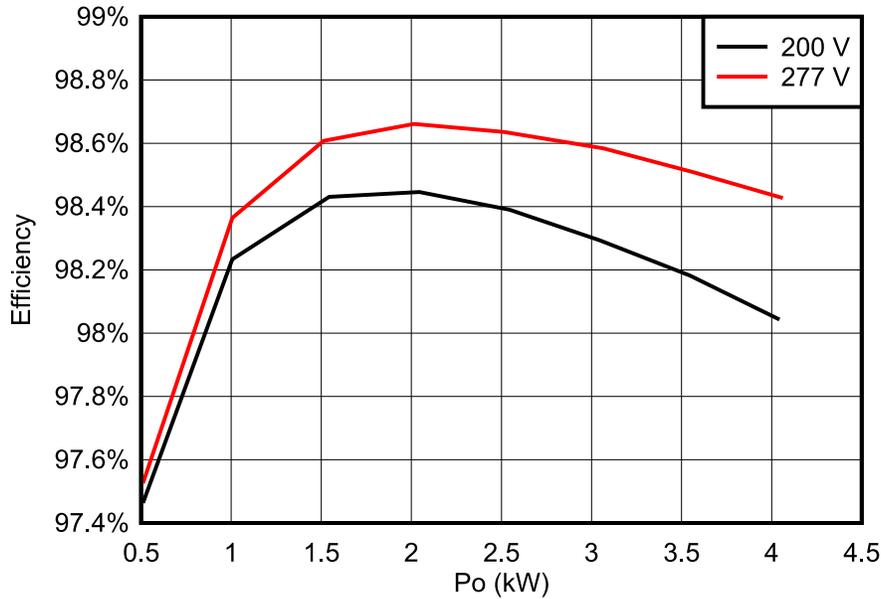


图 3-6. 效率曲线，200V VAC 和 277V VAC

表 3-2 和表 3-3 分别展示了输入为 200V 和 277V 时的效率，不包括控制和驱动功率。

表 3-2. 输入为 200V VAC 时的效率

P <sub>IN</sub> /kW	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/kW	效率
0.5165	399.48	1.2598	0.5033	97.452%
1.0240	399.48	2.5177	1.0059	98.233%
1.5679	399.47	3.8630	1.5433	98.431%
2.0767	399.49	5.1170	2.0433	98.446%
2.5858	399.49	6.3680	2.5442	98.390%
3.0998	399.49	7.6250	3.0469	98.293%
3.6121	399.50	8.8750	3.5464	98.182%
4.1243	399.50	10.1190	4.0436	98.043%

表 3-3. 输入为 277V VAC 时的效率

P <sub>IN</sub> /kW	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/kW	效率
0.5167	399.44	1.2630	0.5046	97.657%
1.0217	399.35	2.5206	1.0068	98.538%
1.5302	399.36	3.7850	1.5116	98.787%
2.0353	399.30	5.0390	2.0125	98.877%
2.5401	399.30	6.2900	2.5121	98.898%
3.0892	399.24	7.6490	3.0545	98.876%
3.5941	399.18	8.8970	3.5524	98.839%
4.0985	399.17	10.1410	4.0490	98.794%

### 3.6 函数波形

#### 3.6.1 在 90V VAC、800 Ω 负载下进行测试

图 3-7 展示了 90V VAC、800 Ω 负载条件下的直流输出波形。通道 2 是交流输入电压，通道 3 是直流输出电压，通道 4 是交流输入电流（除非另有说明，否则相同的示波器通道配置如下）。由于输入电压低于 170V，PFC 不会启动。

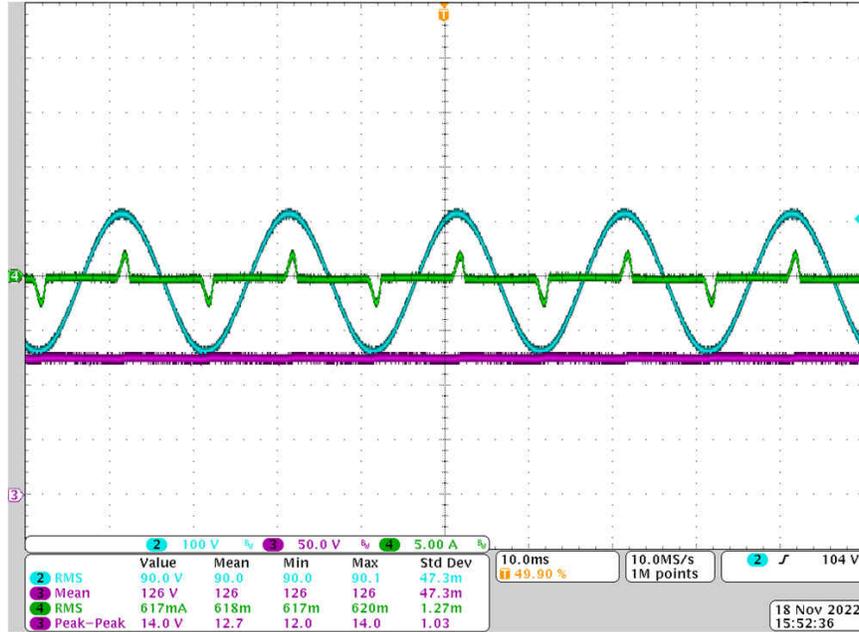


图 3-7. 90V VAC、800 Ω 负载条件下的波形

#### 3.6.2 220V VAC 下的上电序列测试

图 3-8 展示了 220V VAC 下的上电序列。上电从 PTC 浪涌电流限制步骤开始，然后继电器接合。PFC 在最后一步柔和地启动。

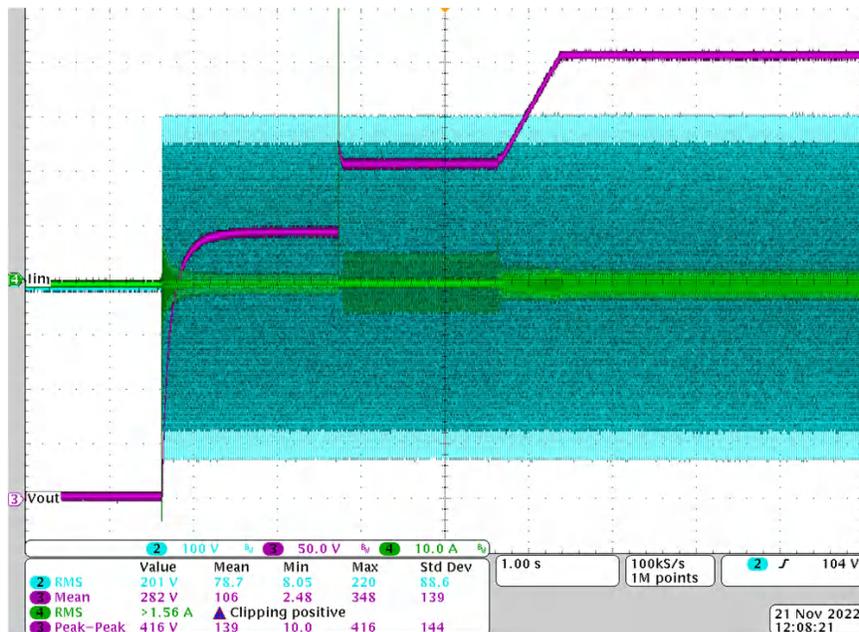


图 3-8. 220V VAC 输入下的上电序列

### 3.6.3 重负载条件下的波形

图 3-9 展示了 220V VAC 输入、2kW 负载条件下的波形。

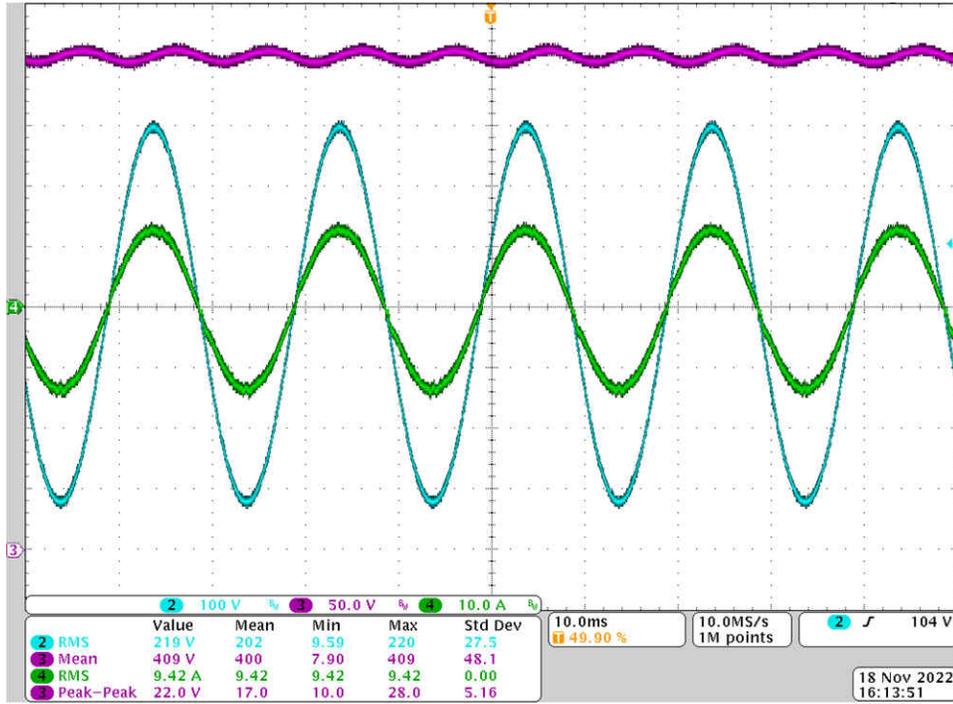


图 3-9. 220V VAC、2kW 下的波形

图 3-10 展示了 220V VAC 输入、4kW 负载条件下的波形。

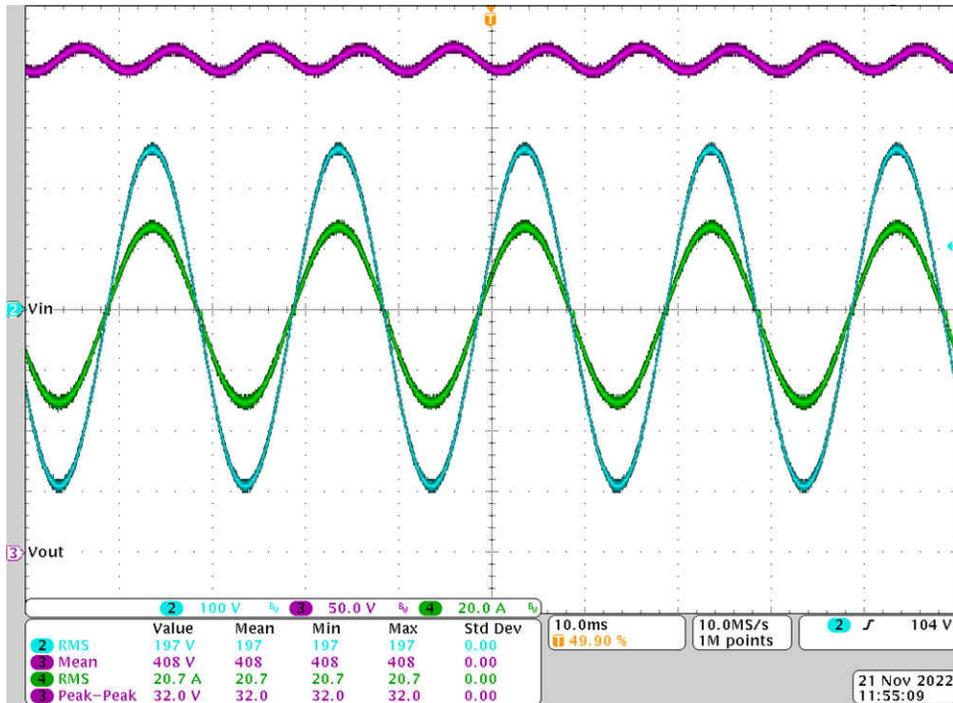


图 3-10. 220V VAC、4kW 下的波形

### 3.6.4 降压辅助电源测试

图 3-11 展示了降压电源波形。通道 1 是 15V 电压轨，通道 3 是 UCC28710 引脚 4 处的开关节点。

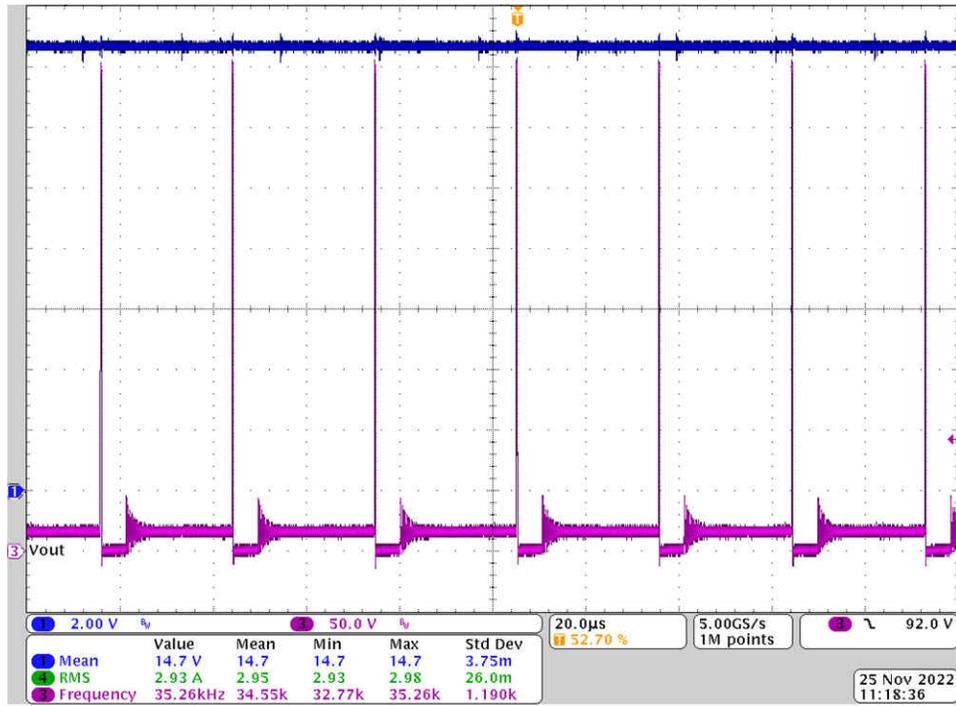


图 3-11. 降压电源波形

图 3-12 展示了 15V、400mA 时的降压电感器温升。



图 3-12. 降压电感器 L8 的温升

### 3.6.5 交流压降测试

图 3-13 展示了交流电压恢复后持续时间为 10ms 的 90° 交流压降。PLL 仍需要时间才能与交流输入处于同一相位，因此直流总线电压大幅下降且 PLL 异相会导致出现浪涌电流，然后逐周期电流保护此时开始工作，以便保护 GaN 免受过流 ( 本设计中为 40A ) 影响。

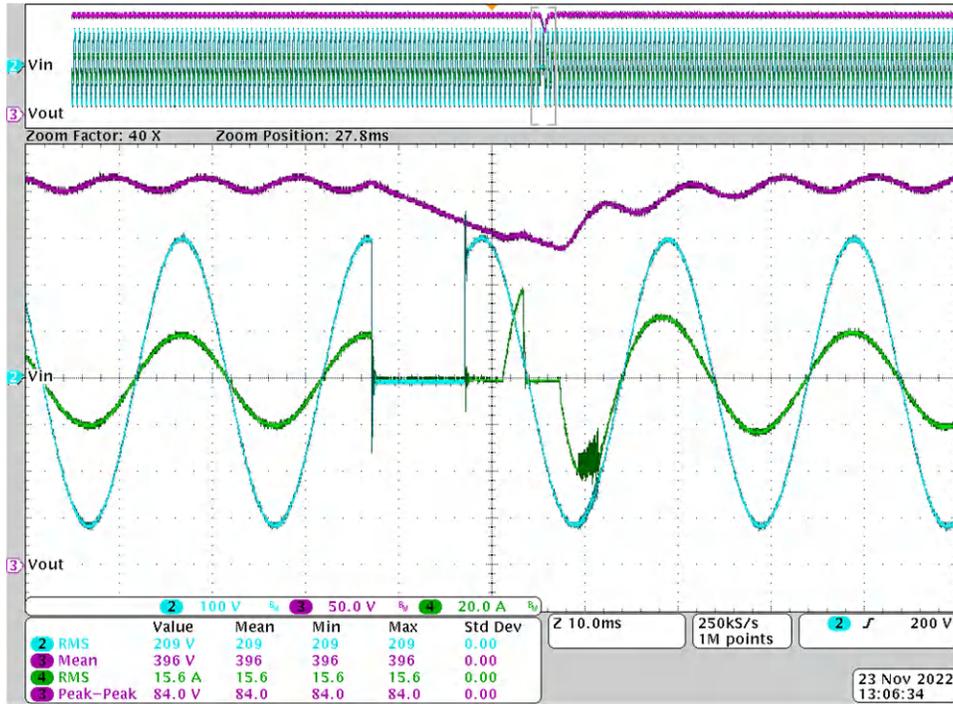


图 3-13. 持续时间为 10ms 的 90° 交流压降

图 3-14 展示了持续时间为 10ms 的 45° 交流压降。逐周期电流保护也会工作。

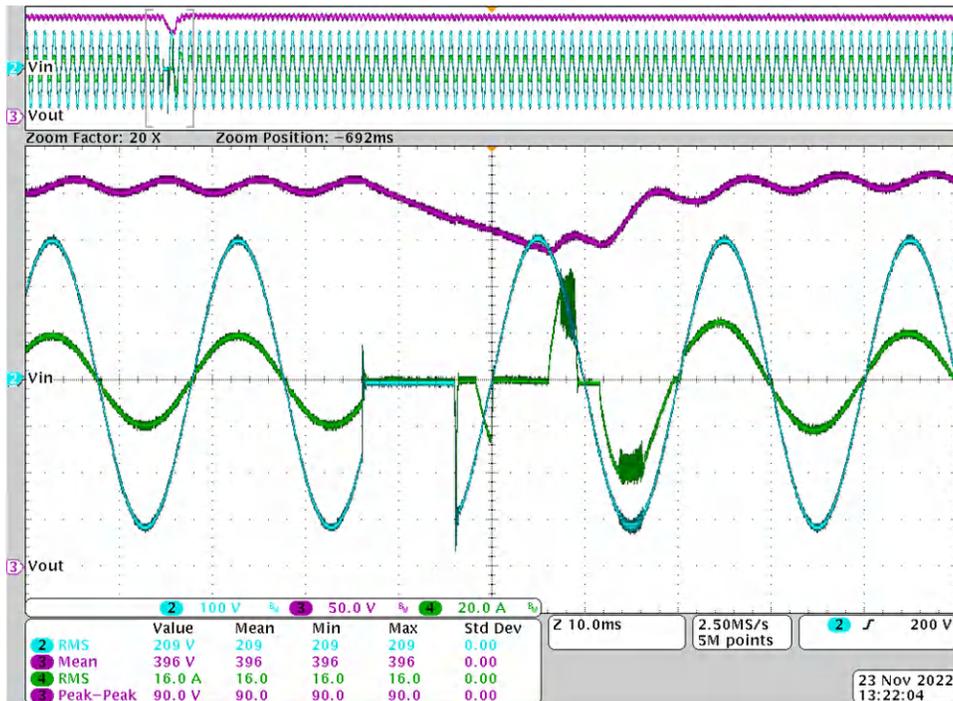


图 3-14. 持续时间为 10ms 的 45° 交流压降

### 3.6.6 GaN 开关性能

图 3-15 展示了 400V VDC、2.5kW 负载条件下的 GaN 上升沿。

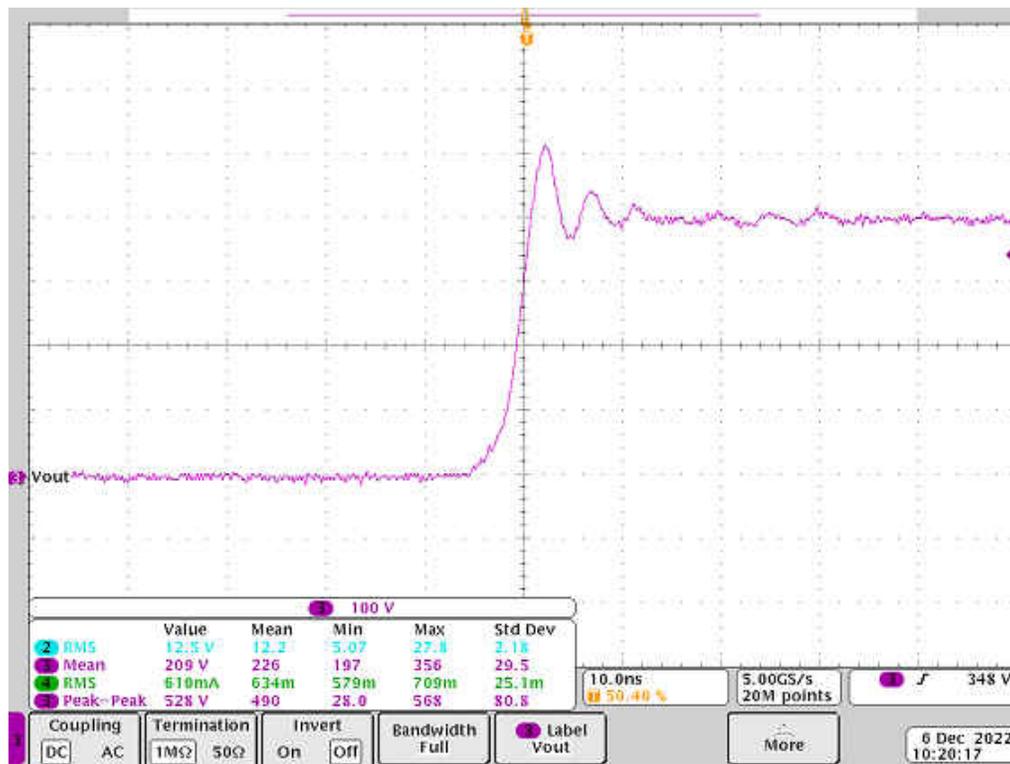


图 3-15. 2.5kW 负载条件下的 VDS、GaN 上升沿

图 3-16 展示了 400V VDC、2.5kW 负载条件下的 GaN 下降沿。

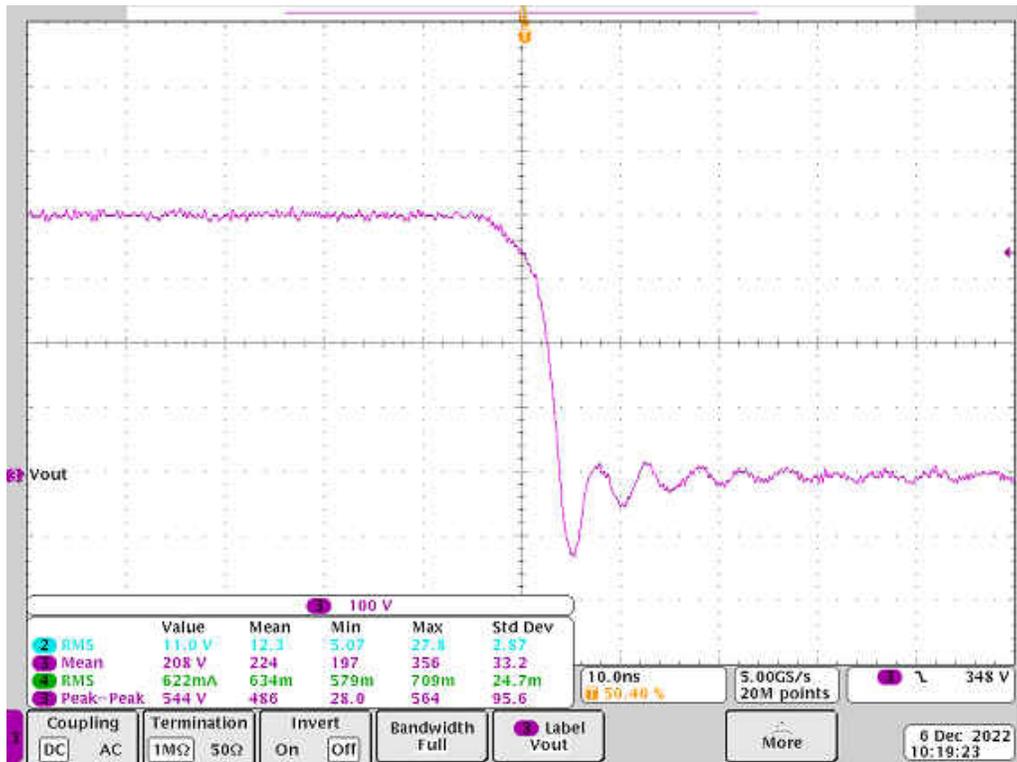


图 3-16. VDS、2.5kW 负载条件下的 GaN 下降沿

### 3.6.7 热力测试

在此设计中验证了热性能。测试条件如以下列表中所示：

- 200VAC，负载为 4kW
- 冷却风扇：27CFM，24V，2.64W
- 15 分钟后热均衡
- 环境温度为 25°C

图 3-17 展示了温升测试的测试设置。

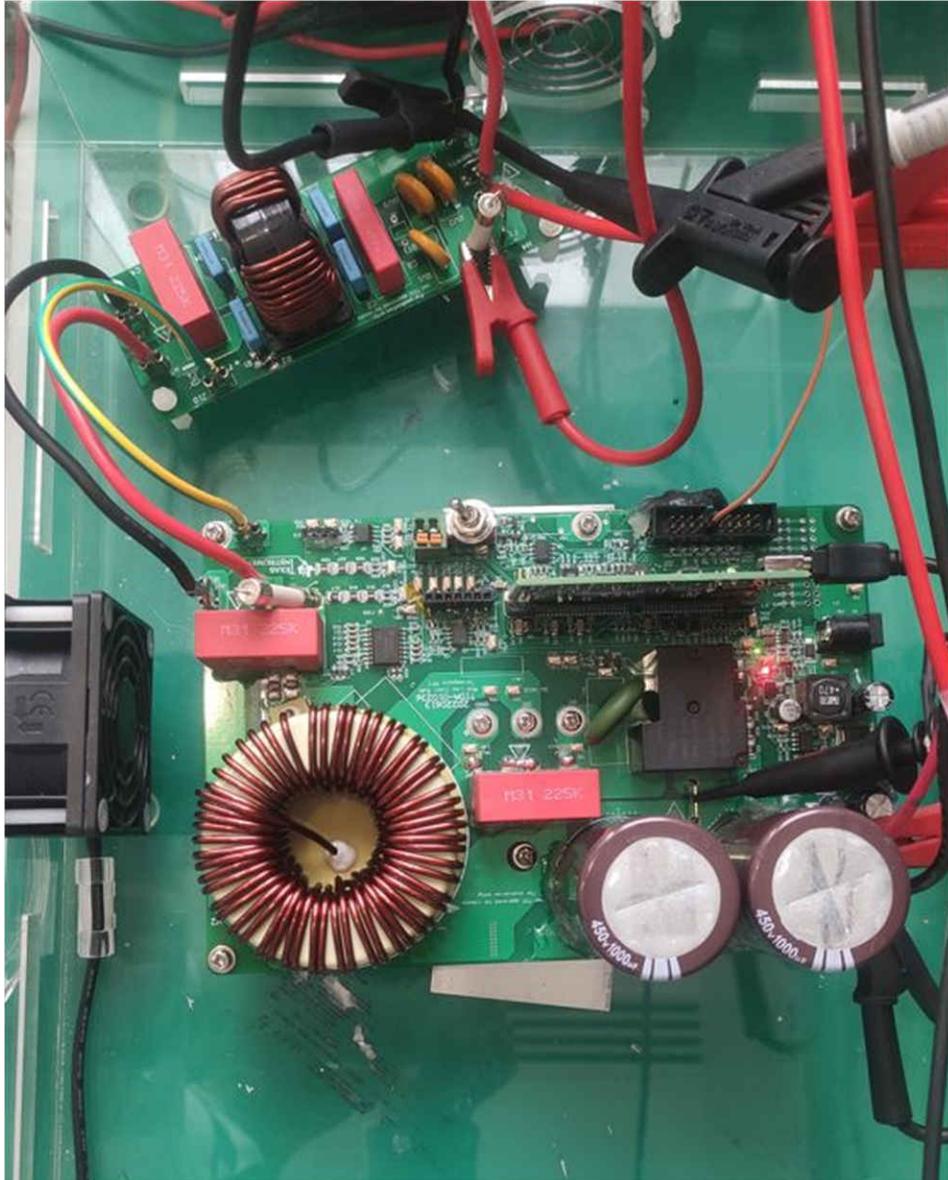


图 3-17. 热力测试设置

图 3-18 展示了 200V VAC、4kW 时的升压电感器温度，其中温升为  $69.6^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 44.6^{\circ}\text{C}$ 。



图 3-18. 升压电感器温度

由于 GaN 子板位于主板下方，因此很难使用热成像仪测量 GaN 温升。不过，GaN 会在 PWM 模式下报告 TEMP 引脚上的温度，而 PWM 占空比代表温度。固件会监测 PWM 占空比，计算温度，并通过 UART 端口将此信息报告给主机 PC。图 3-19 是 UART 终端上的检测信号报告。可以在该报告中读取 GaN 的温度。

对于一些交流输入电压更低的应用，输入电流更高，因此 GaN、二极管桥和升压电感器的温升甚至更高。用户必须全面评估这些器件的温升情况，来确保器件具有足够的温升裕度。

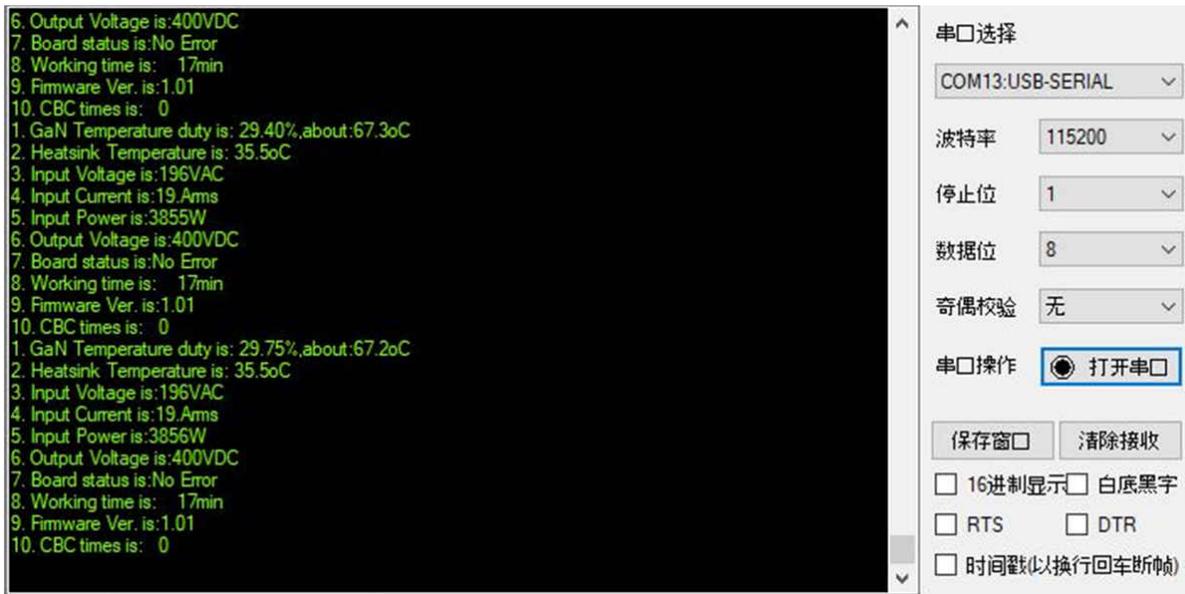


图 3-19. 检测信号报告上的 GaN 温升

### 3.6.8 断电序列

图 3-20 展示了 200V VAC、4kW 时的断电波形。

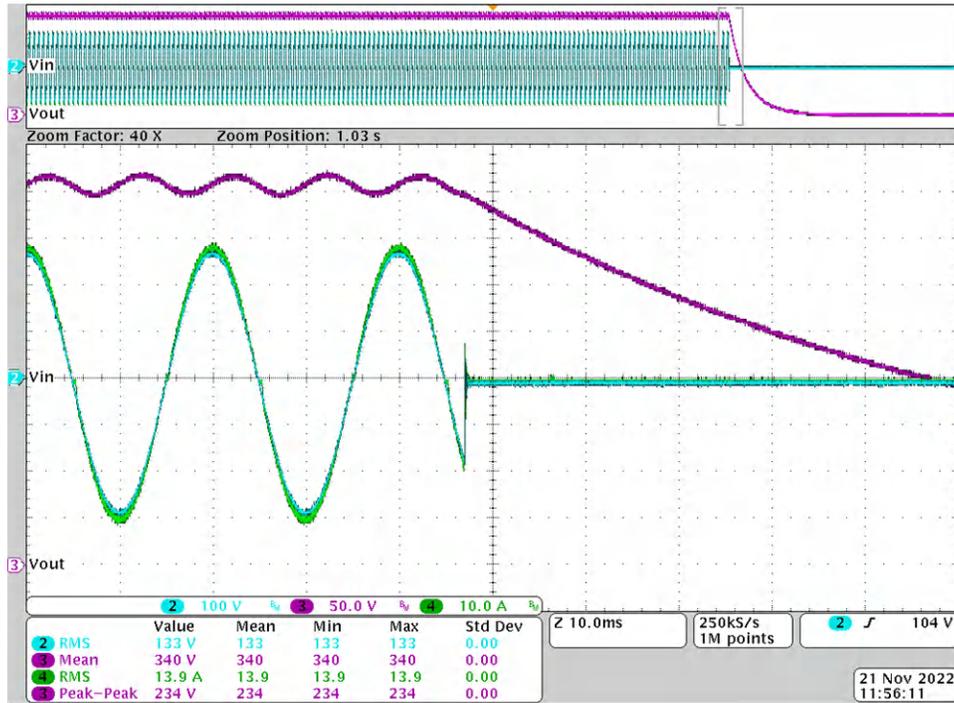


图 3-20. 断电波形

### 3.6.9 浪涌测试

评估了相线和中性线之间的雷击浪涌测试。该设计可以承受 4kV 浪涌测试。浪涌会导致单稳态触发中断，如果固件会在 OST 中断时停止 PFC，则浪涌测试结果为 C 级，因为 PFC 会停止且不会自动启动。如果固件不会在 OST 中断时停止 PFC，PFC 会继续工作，则浪涌测试结果为 A 级。图 3-21 展示了 4kV 相线到中性线的浪涌电压波形。

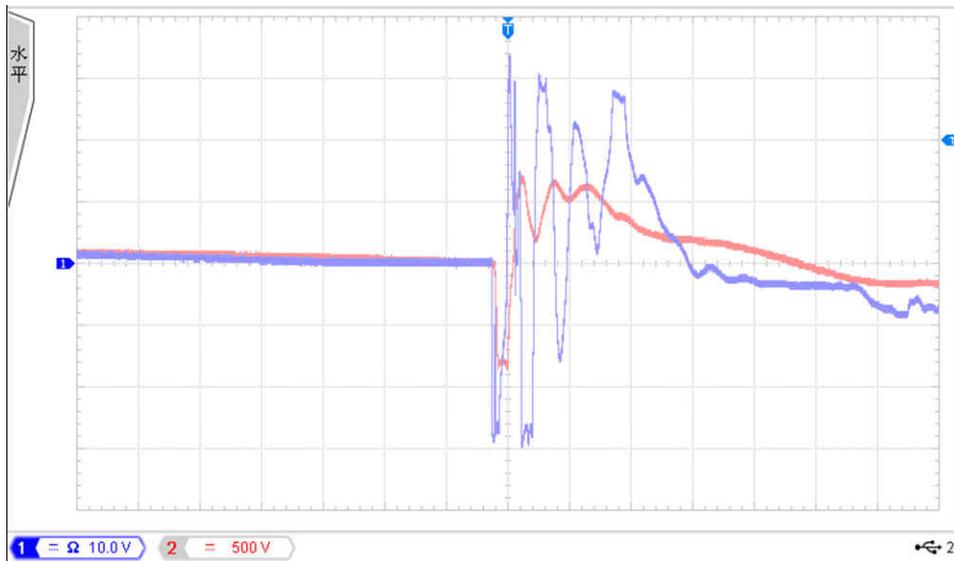
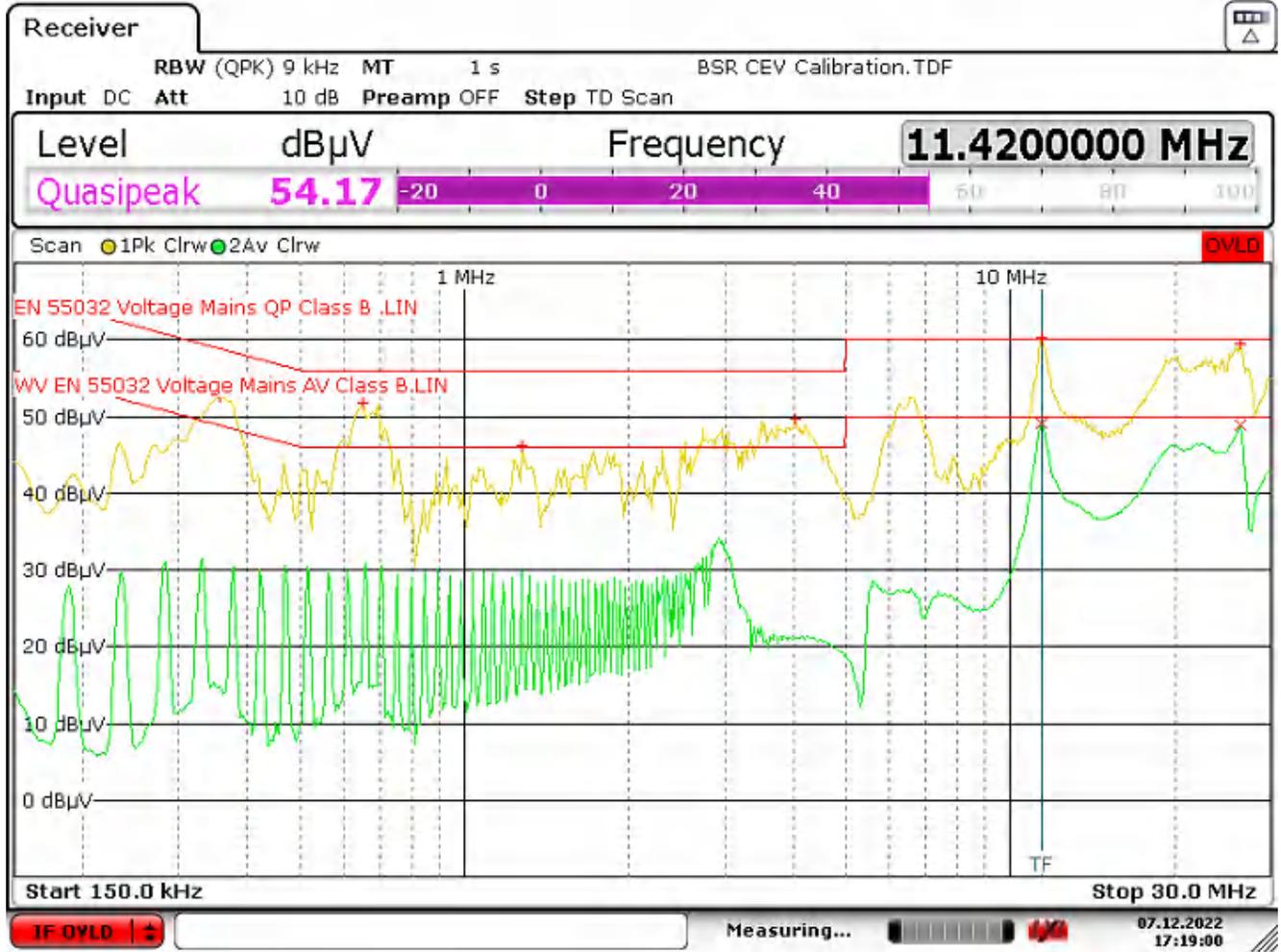


图 3-21. 4kV 下的浪涌测试

### 3.6.10 传导发射测试

图 3-22 展示了 1.6kW 负载条件下的传导发射测试结果。在测试时，该电路板在直流输出端使用了额外的 CM 扼流圈（以克服较长的负载电缆和较大的电阻负载），并为升压电感器使用了屏蔽层。结果表明该电路板可以通过 EN55032 的 B 类限制。11.42MHz 处的噪声水平为 59.17dB  $\mu$ V（54.17dB  $\mu$ V+5dB  $\mu$ V 校准），裕度有点小，通常需要 6dB；不过，外壳（空调外机通常具有金属外壳）和短负载电缆进一步降低了线路阻抗稳定网络 (LISN) 的噪声，并提供了更多裕度。



Date: 7.DEC.2022 17:18:59

图 3-22. 传导发射测试，EN55032 B 类

## 4 设计和文档支持

### 4.1 设计文件

#### 4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010236](#) 中的设计文件。

#### 4.1.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010236](#) 中的设计文件。

### 4.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [LMG352xR030-Q1 具有集成驱动器、保护和温度报告功能的 650V 30mΩ GaN FET](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI), [TMS320F28002x 实时微控制器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI), [AMC3302 具有集成式直流/直流转换器的高精度、±50mV 输入、增强型隔离放大器](#) 数据表
4. 德州仪器 (TI), [UCC2871x 具有初级侧调节功能的恒压、恒流控制器](#) 数据表
5. 德州仪器 (TI), [UCC2871x 具有初级侧调节功能的恒压、恒流控制器](#) 数据表
6. 德州仪器 (TI), [ISO772x EMC 性能优异的高速、增强型和基础型双通道数字隔离器](#) 数据表

### 4.3 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](#)。

### 4.4 商标

TI E2E™ and C2000™ 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

**HELY ZHANG** 是德州仪器 (TI) 的系统应用工程师，负责开发与家用电器相关的电力输送器件和电机逆变器。Hely 于 2002 年获得了安徽理工大学电力电子专业硕士学位，在加入 TI 之前他曾就职于 SolarEdge 和通用电气。

## 重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

版权所有 © 2022, 德州仪器 (TI) 公司

## 重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司