

固态断路器参考设计用户指南

关于本文件

范围和目的

本用户指南介绍了 CoolMOS™ S7T 与 CoolSiC™ 功率 MOSFET 固态断路器 (SSCB) 参考设计的设置与评估：REF_SSCB_AC_DC_1PH_16A 和 REF_SSCB_AC_DC_1PH_SiC。本文档还简要概述了 SSCB 的参考设计概念、功能以及保护和诊断实施。

读者

本文档面向希望使用 SSCB 参考设计板开始软件开发、执行测量和检查性能的工程师。

参考板/套件

产品嵌在 PCB 上，主要针对特定应用和定义的使用场景，其中可能包括软件。根据目标应用的要求对 PCB 和辅助电路进行了优化。

Note: 电路板不一定符合安全、EMI 和质量标准 (如 UL 和 CE) 要求。

重要通知

重要通知

“评估板和参考板”是指为演示和/或评估目的而嵌入印刷电路板（PCB）的产品，包括但不限于演示板、参考板和评估板、套件和设计（统称为“参考板”）。

英飞凌科技提供的评估板和参考板在设计时已经考虑了环境条件。英飞凌科技仅按照本文档中的描述对评估板和参考板的设计进行了测试。该设计在安全要求、制造和整个工作温度范围内的运行或使用寿命方面并未做考量。

英飞凌科技提供的评估板和参考板仅在典型负载条件下进行功能测试。评估板和参考板在退料分析（RMA）、工艺变更通知（PCN）和产品停产（PD）方面的程序与常规产品不同。

评估板和参考板不是商业化产品，仅用于评估和测试目的。尤其不得用于可靠性测试或生产。因此，评估板和参考板可能不符合 CE 或类似标准（包括但不限于 EMC 指令 2004/EC/108 和 EMC 法），也可能不符合客户所在国家的其他要求。客户应确保所有评估板和参考板的处理方式符合其所在国家的相关要求和标准。

评估板和参考板以及本文件中提供的信息仅供合格和熟练的技术人员在实验室使用，并应根据本文件和随各评估板或参考板提供的其他相关文件中规定的条款和条件进行使用和管理。

客户的技术部门有责任评估评估板和参考板对预期应用的适用性，并评估本文件中提供的有关此类应用的信息的完整性和正确性。

客户有义务确保评估板和参考板的使用不会对人身或第三方财产造成任何伤害。

评估板和参考板以及本文档中的任何信息均“按原样”提供，英飞凌科技不提供任何明示或暗示的保证，包括但不限于不侵犯第三方权利的保证和适用于任何目的或适销性的暗示保证。

英飞凌科技对因使用评估板和参考板和/或本文件中提供的任何信息而造成的任何损失概不负责。客户有义务维护、赔偿英飞凌科技公司，使其免受因使用而引起或导致的任何索赔或损害。

英飞凌科技保留随时修改本文档和/或其中提供的任何信息的权利，恕不另行通知。

安全预防措施

Note: 请注意以下与开发系统相关的危险警告。

表 1. 安全预防措施

	<p>警告： 测试期间，评估板或基准板与电网输入相连。因此，使用示波器测量电压波形时必须使用高压差分探头。未按要求操作可能导致电路板损坏或人身伤害。</p>
	<p>警告： 参考板上有一个 16 A 的机械继电器作为安全继电器。超出制造商规定的范围使用该继电器会降低其触点性能。继电器触点失效短路或绕过其触点会导致自由空气隔离损失。要测试超出继电器规范的大电流，建议绕过继电器触点并使用外部合适的安全继电器。</p>
	<p>警告： 在断开或重新连接电线或进行维护工作之前，请从电路板上卸下或断开电网输入电源。否则可能导致人身伤害或死亡。图形用户界面或显示屏的测量结果可能并不表明电源处于安全电压水平，因为通信可能会在测试期间中断。</p>
	<p>注意： 只有熟悉电力电子和相关机械的人员才能规划、安装、调试和维护系统。未按规范操作可能导致人身伤害和/或设备损坏。</p>
	<p>注意： 评估板或参考板包含对静电放电 (ESD) 敏感的部件和组件。安装、测试、维护或修理组件时必须采取静电控制预防措施。如果不遵守 ESD 控制程序，可能会导致元件损坏。如果您不熟悉静电控制程序，请参阅适用的静电放电保护手册和指导方针。</p>
	<p>注意： 应用或安装不正确的负载和/或电路板会导致元件损坏或产品寿命缩短。接线或应用错误，如负载或电线尺寸不足、交流电源不正确或不足，或环境温度过高，都可能会导致系统故障。</p>
	<p>注意： 评估板或参考板在装运时附带有包装材料，需要在安装前拆除。未按规范操作则可能导致系统过热或异常运行条件。</p>

目录

目录

关于本文件	1
重要通知	2
安全预防措施	3
目录	4
1 SSCB 装置一览	5
1.1 主要特点	5
1.2 SSCB 参考设计版本的主要差异	6
1.3 SSCB 参考设计的主要参数	7
1.4 套装内容	8
1.5 SSCB 硬件概念	9
1.6 硬件概述	12
2 SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)	16
2.1 图形用户界面主窗口	16
2.2 GUI 配置 诊断窗口	18
2.2.1 SSCB 应用内校准	19
2.3 GUI 脱扣曲线窗口	21
2.3.1 SSCB 过载错误	22
2.4 实时图形窗口	25
3 SSCB Demo 前面板	26
4 开始	27
5 CAN 通信	28
5.1 通信接口	28
5.1.1 CAN 命令列表	29
6 SSCB Demo 性能测试	35
6.1 交流 SSCB 中的 ZVS 和 ZCS	35
6.2 过流检测 (OCD) 性能	36
6.3 热性能	37
术语表	41
修订历史	43
声明	44

SSCB 装置一览

1 SSCB 装置一览

如名称所示，固态断路器（SSCB）中没有用于大电流开关/换向的机械触点。由于固态断路器没有用于换向的运动部件、不会产生电弧、而且在使用寿命期间不易磨损，因此其可靠性更高。另外，固态开关可提供快速、精确和可靠的短路保护。随着数字化和半导体技术的发展，SSCB 可以与智能电网技术相结合，提供先进的监测和控制能力以及安全的通信。

英飞凌的 REF_SSCB_AC_DC_1PH_16A 和 REF_SSCB_AC_DC_1PH_SiC SSCB 参考设计适用于 16 A 额定电流的交流（110/230 V）或直流（350 V）电网供电。交流或直流模式可通过图形用户界面进行软件选择。这些参考设计分别采用了 CoolMOS™ S7T 和 CoolSiC™ 功率 MOSFET；详情请参阅表 2。这些设计可以与应用相关的保护、监测和诊断概念相结合，以实现功率器件进行应用级评估。

该套件采用双板设计，包括功率板和逻辑板。功率板包含功率级、气隙器件和反激式电源。逻辑板具有所有低功率功能，例如 XMC MCU 电源生成、模拟信号处理、隔离背板总线和外部用户总线基础设施。

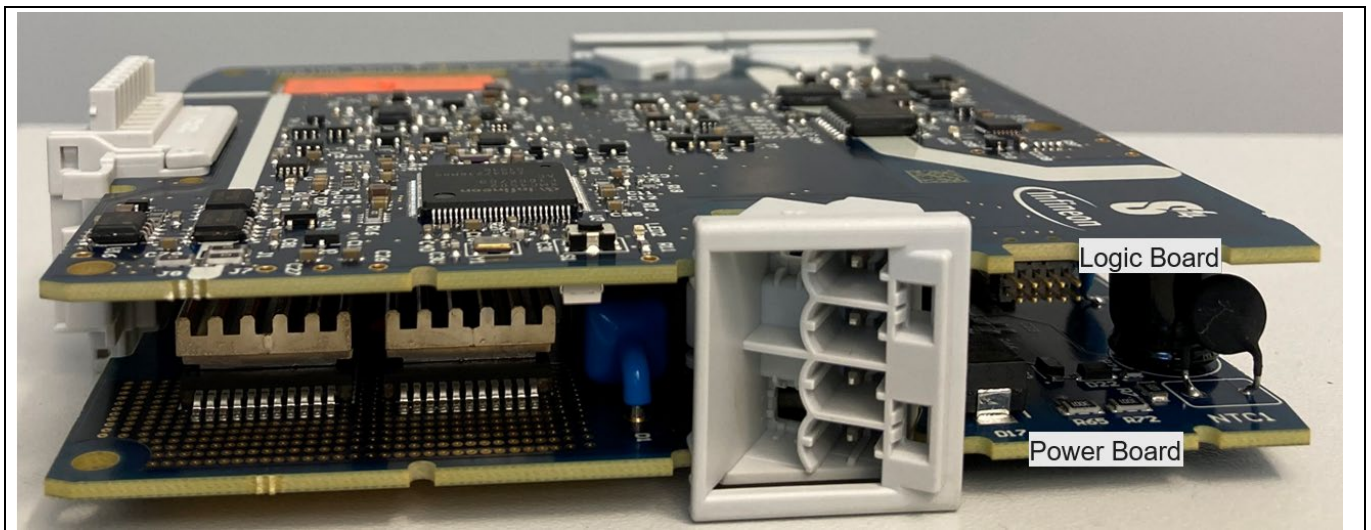


图 1 SSCB 参考设计板

1.1 主要特点

SSCB 参考设计的主要电气特性如下：

- 浮动开关：背对背（B2B）功率 MOSFET 配置，具有双向电流阻断能力
- 采用顶部冷却（TSC）概念的被动冷却：焊接在 MOSFET 上的铜散热片/散热器
- 安全超低电压（SELV）域的外部用户接口总线：高速 CAN 和数字抑制输入
- 功能性超低电压（FELV）域的隔离背板通信总线（用于多通道配置）——UART 和双向数字输入/输出信号

SSCB 装置一览

- 保护和监测功能
 - 基于分流电阻的通道电流测量
 - 基于分流电阻的过流检测 (OCD)
 - 隔离通道输入和输出电压测量
 - 单个 MOSFET 结温 (T_j) 的测量 (适用于 REF_SSCB_AC_DC_1PH_16A)
 - 通过位于源极引脚附近的 NTC 测量温度 (T_{ntc}) (适用于 REF_SSCB_AC_DC_1PH_SiC)
 - 过载 (OVL)、过热 (OVT)、欠压 (UVP) 和过压保护 (OVP)
- 利用 SSCB Demo 图形用户界面 (GUI) 进行编程和监测
 - 交流或直流模式选择
 - 正负 OCD 脱扣阈值
 - 过温关机和恢复阈值
 - UVP 和 OVP 阈值
 - 脱扣曲线参数：额定电流、静态过驱动系数、快速和慢速过电流系数、脱扣积分
 - 应用内编程，校准通道输入和输出电压和电流
 - 监测和输出模拟测量值，如 V_{in} 、 V_o 、 I 、 f 、 P 、功率因数、OCD 阈值参考值、 T_j 或 T_{ntc}
- TFT 显示屏可监测 V 、 I 、 P 、 f 、 T_j 或 T_{ntc} 、SSCB 状态和诊断信息
- 用于数据记录的 F-RAM
- 自供电：自带反激式电源，由电网取电即可，无需提供额外的电源

Note: 在以下说明中，对于 CoolMOS™S7T 版本， T_j 指的是 MOSFET 的结温；而在 CoolSiC™ 版本中， T_j 、 T_{ntc} 或 T_{NT} 指的是放置在 PCB 上靠近 MOSFET 源极引脚的 NTC 测量温度。

1.2 SSCB 参考设计版本的主要差异

表 2. 主要的设计差异

参数	REF_SSCB_AC_DC_1PH_16A	REF_SSCB_AC_DC_1PH_SiC
设计版本名	S7T 版本	SiC 版本
功率 MOSFET 技术	CoolMOS™ S7T 产品组合	CoolSiC™
功率 MOSFET	IPDQ60T010S7: QDPAK TSC 封装	IMDQ75R008M1H: QDPAK TSC 封装
MOSFET 漏极-源极击穿电压	600 V	750 V
MOSFET 漏极-源极导通电阻 $R_{DS(on)}$	若 $V_{GS}=12\text{ V}$ 、 $I_D=50.0\text{ A}$ 、 $T_j=25^\circ\text{C}$ ，值为 $0.010\ \Omega$	若 $V_{GS}=18\text{ V}$ 、 $I_D=90.3\text{ A}$ 、 $T_j=25^\circ\text{C}$ ，值为 $0.0106\ \Omega$
过温检测功能	通过功率 MOSFET 的嵌入式温度传感器检测单个 T_j	通过两个功率 MOSFET 的板载 NTC 测量源极引脚温度 (T_{ntc})

SSCB 装置一览

1.3 SSCB 参考设计的主要参数

该 SSCB 参考设计在交流和直流下都可工作。可通过 SSCB Demo 图形用户界面选择交流或直流模式。

表 3. 参数

参数	最小	类型	最大	单位
绝对最大通道供电范围	90	-	260	V AC
	120	-	375	V DC
工作通道供电范围	100	-	240	V AC
	330	-	370	V DC
Ta=25°C 时的额定电流值	-	16	-	A
Ta=25°C 时的静态过驱动因数	-	-	1.13	-
I2t 极限值	-	-	100k	A2s
Ta=25°C 时, 100 ms 的过电流有效值	-	-	80	A
频率模式	直流/50/60 Hz			
di/dt =10-15 A/μs 时, 正/负 OCD 的跳闸电流限制	-	-	145	A
OCD 保护允许的最大 di/dt	100 A/μs			
MOSFET 的最大关断电流	请参阅 IPDQ60T010S7 / IMDQ75R008M1H 参数数据表。			
污染程度	II			
过电压类别	II			
最高海拔	2000 m			
环境工作温度 (Ta)	-	25	40	°C

表 4. 外部用户界面参数

参数	最小	类型	最大	单位
电源绝对最大值	-40	-	40	V
电源工作范围	21	24	27	V
供电电流要求	0.1	-	-	A
INHIBIT 引脚绝对最大值	-40	-	40	V
INHIBIT 抑制高电平	8	-	27	V
INHIBIT 抑制低电平	0	-	1.5	V
INHIBIT 引脚输入阻抗	-	1.2k	-	Ω
INHIBIT 引脚内部下拉电阻	-	30k	-	Ω
高速 CAN 规格	V2.0 B 活动			
CAN 波特率	500			kbps

以开发为目的, 逻辑板或功率板可提供外部直流电源 (18-20 V)。

SSCB 装置一览

1.4 套装内容

本参考设计工具包包含以下内容：

- **SSCB 装置**：安装在外壳内的 SSCB 逻辑板和功率板，配有 TFT 显示屏和键盘
- **SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)**：[GUI 和 PCB 设计数据可在线获取](#)
- **USB 至 CAN 分析仪**：SEED STUDIO 114991193
- **24 V, 1 A 适配器**：XP Power VER24US240——YES 或类似产品

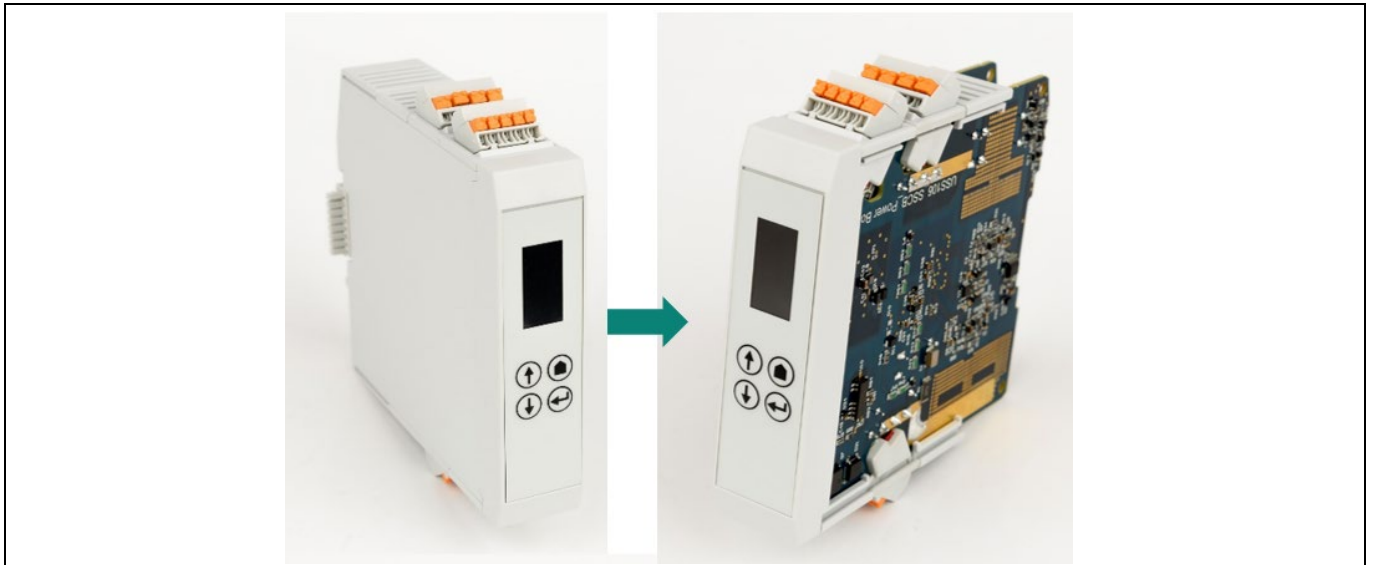


图 2 SSCB 装置

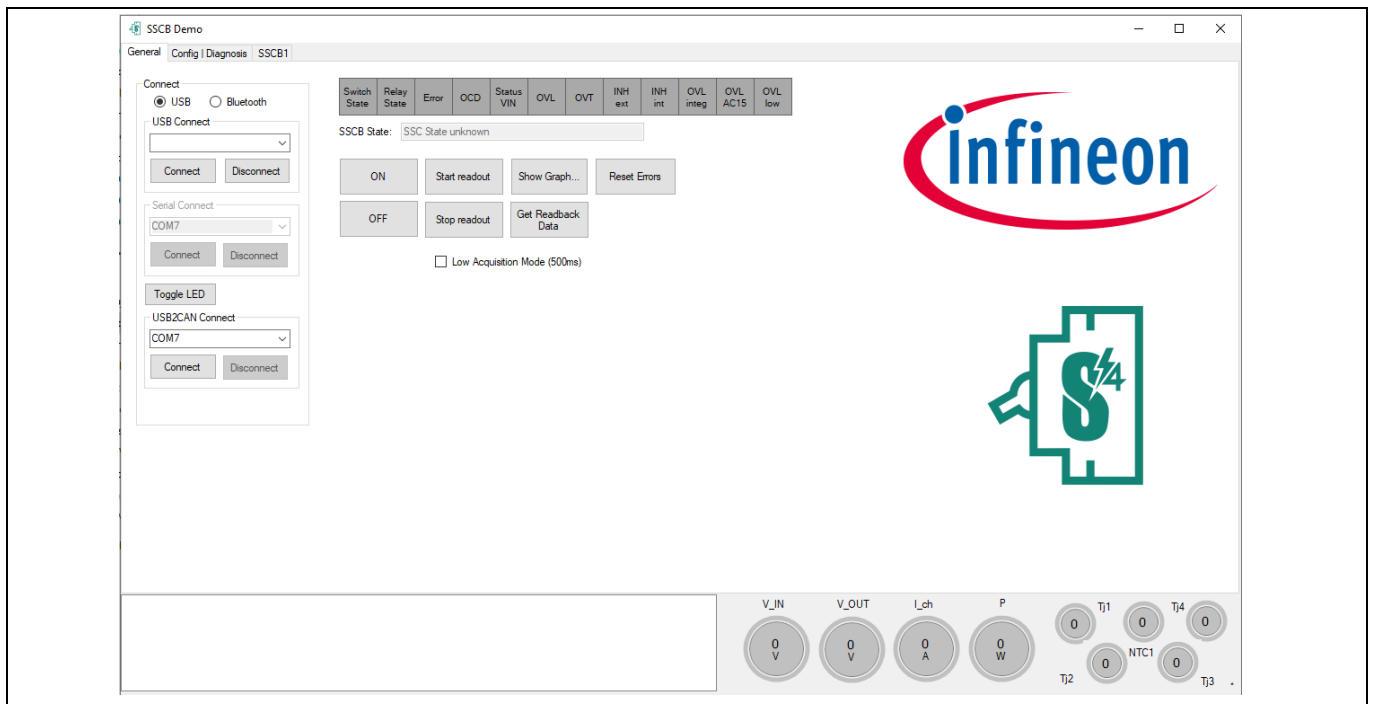


图 3 SSCB Demo 图形用户界面

SSCB 装置一览

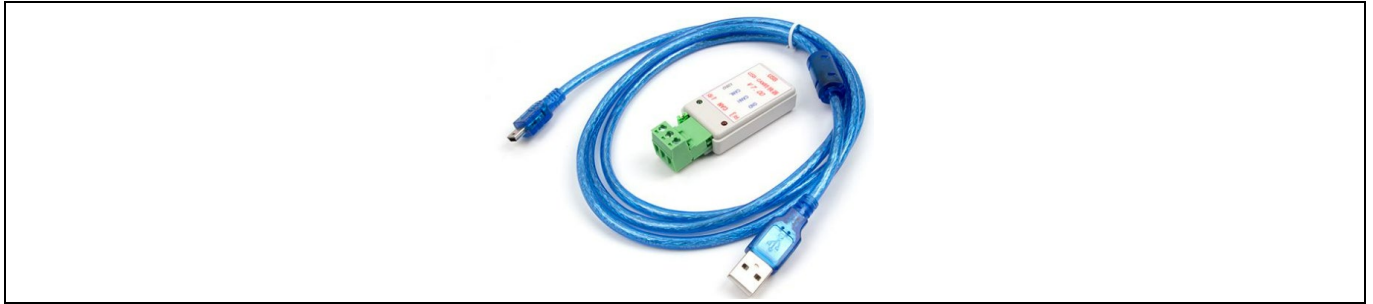


图 4 USB2CAN 分析仪



图 5 24 V、1 A 适配器

请注意：

1. 如需开发 XMC4x MCU 软件，请单独订购 XMC™ Link 编程器/调试器。请参阅 [KIT_XMC_LINK_SEGGER_V1](#)。
2. XMC4x 固件使用 DAVE™ 4 集成开发环境；SSCB 演示图形用户界面使用 Visual Studio C# 进行开发。

1.5 SSCB 硬件概念

如图 6 所示，为支持双向电流阻断能力，B2B MOSFET 被用作通道开关，其两端有 TVS 二极管，用于箝位感应能量。在 B2B 开关和输出端之间有配备安全继电器，以保证通道处于关闭状态时有安全的空气间隙。微控制器读取输入和输出电压以及通道电流和 MOSFET 的结温（CoolMOS™ S7T 的 T_j 或 CoolSiC™ 的 T_{ntc} ）。

提供两个通信接口：

- **连接图形用户界面的外部用户界面总线：**由外部 24 V 电源供电（24 V 1 A 适配器 图 5）。
- **内部背板总线，支持多通道配置：**其 5 V 电源由主单元提供给多通道配置中的从单元。

SSCB 装置一览

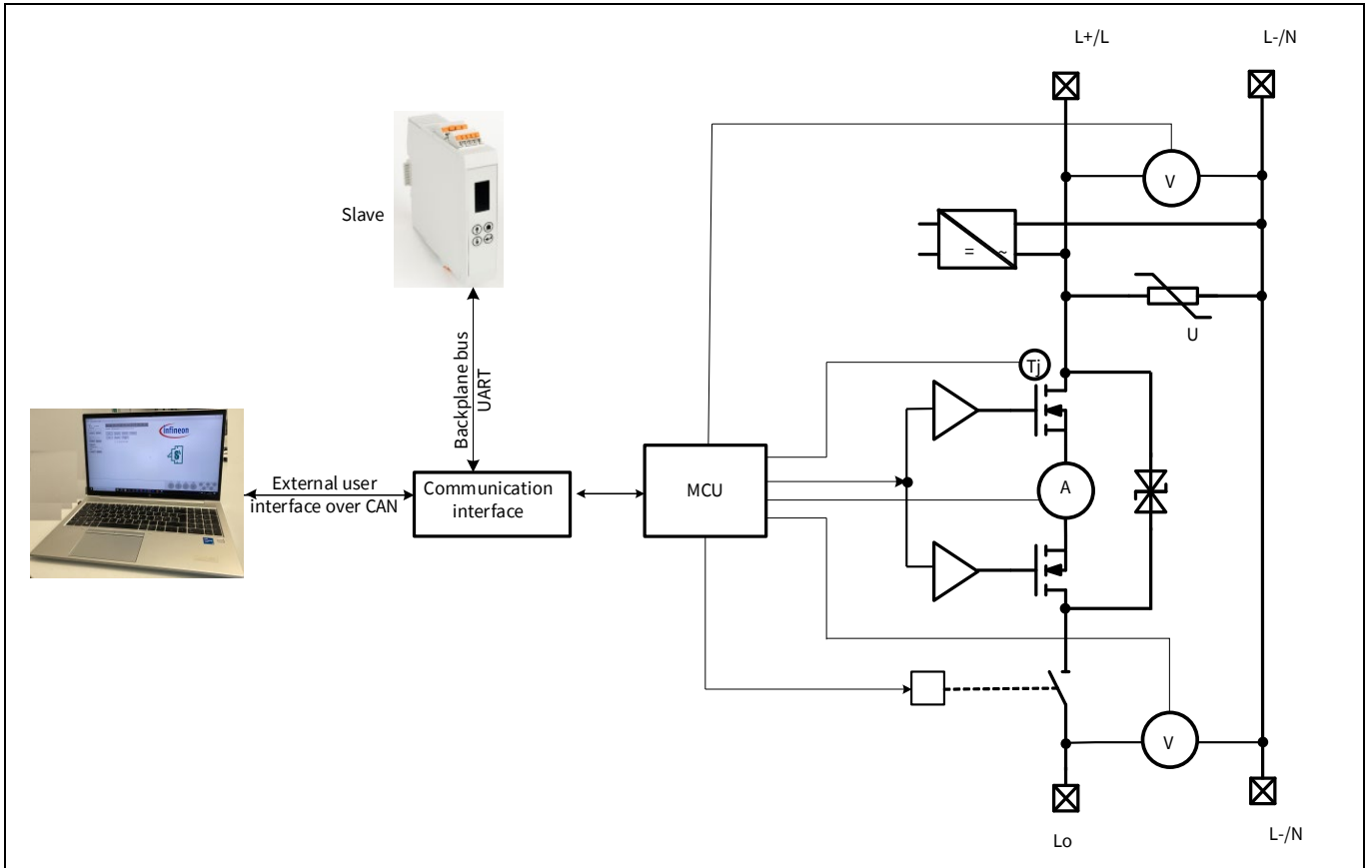


图 6 SSCB Demo 概要框图

如图 7 所示，该设计有两个隔离域：FELV 和 SELV 隔离。

在 FELV 领域电源中，反激式变换器用于从电网产生隔离的 19 V 电源。19 V 电源的产生参考了 B2B MOSFET 开关的公共源极 (GND_HV) 连接。反激式变换器为交流和直流 SSCB 提供了灵活的通用硬件设计。主 MCU (XMC4502x)、模拟部分和内部背板均置于参考 GND_HV 的 FELV 域。

SELV 域由符合 SELV 标准的 24 V 外部电源供电。SELV 域提供一个与主 MCU (XMC4502x) 直接连接的隔离 CAN 接口，用于连接 SSCB Demo 图形用户界面。XMC1302x 通过数字隔离器及 UART 与 XMC4502x 通信，并在 TFT 屏上显示测量结果。

SSCB 装置一览

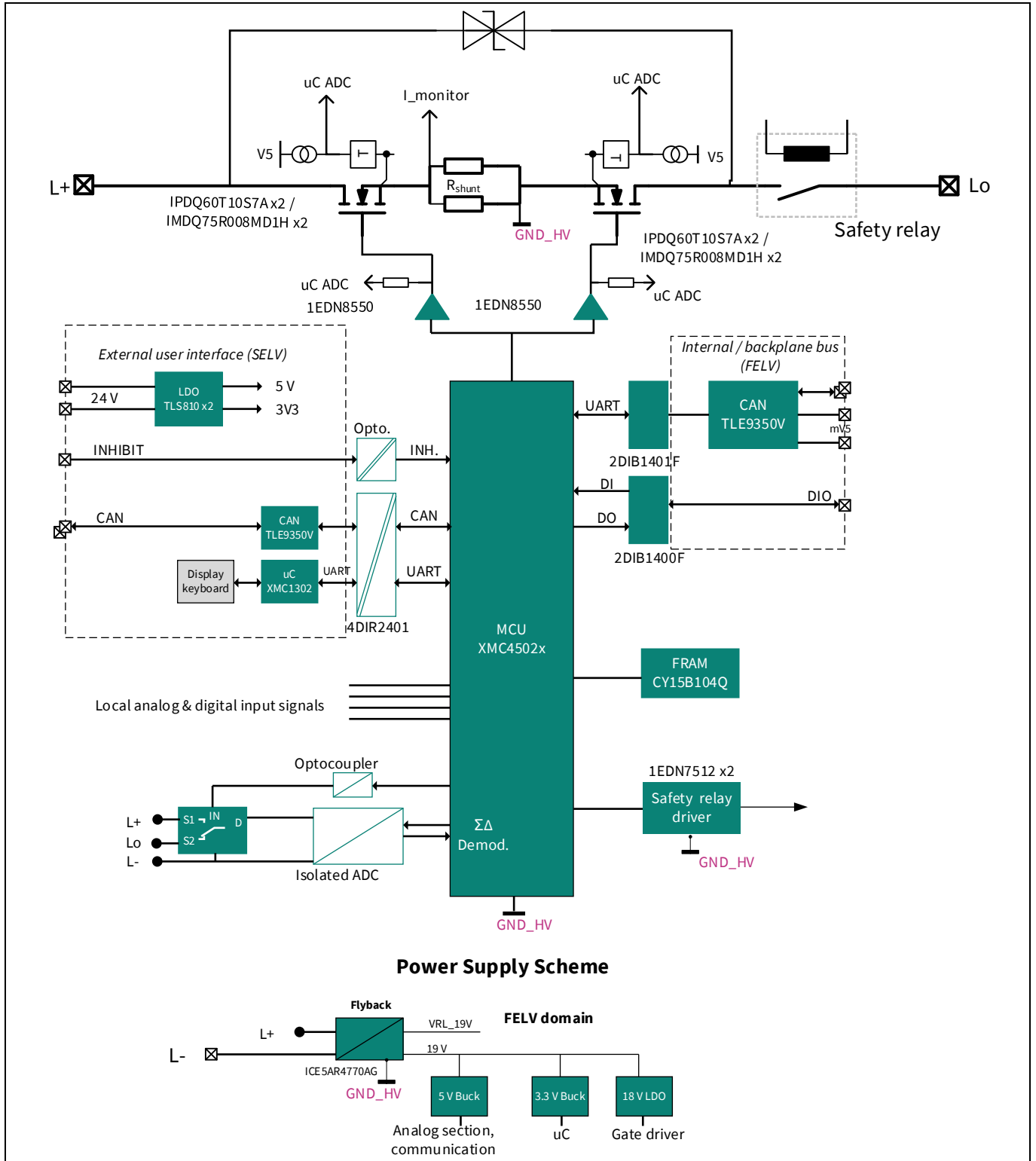


图 7 SSCB Demo 详细框图

SSCB 装置一览

1.6 硬件概述

本节介绍硬件的技术细节和使用方法。该硬件如图 8 和图 9 所示。图 10 是连接器的引脚分配。图 11 是如何拆卸外壳前面板的示例。

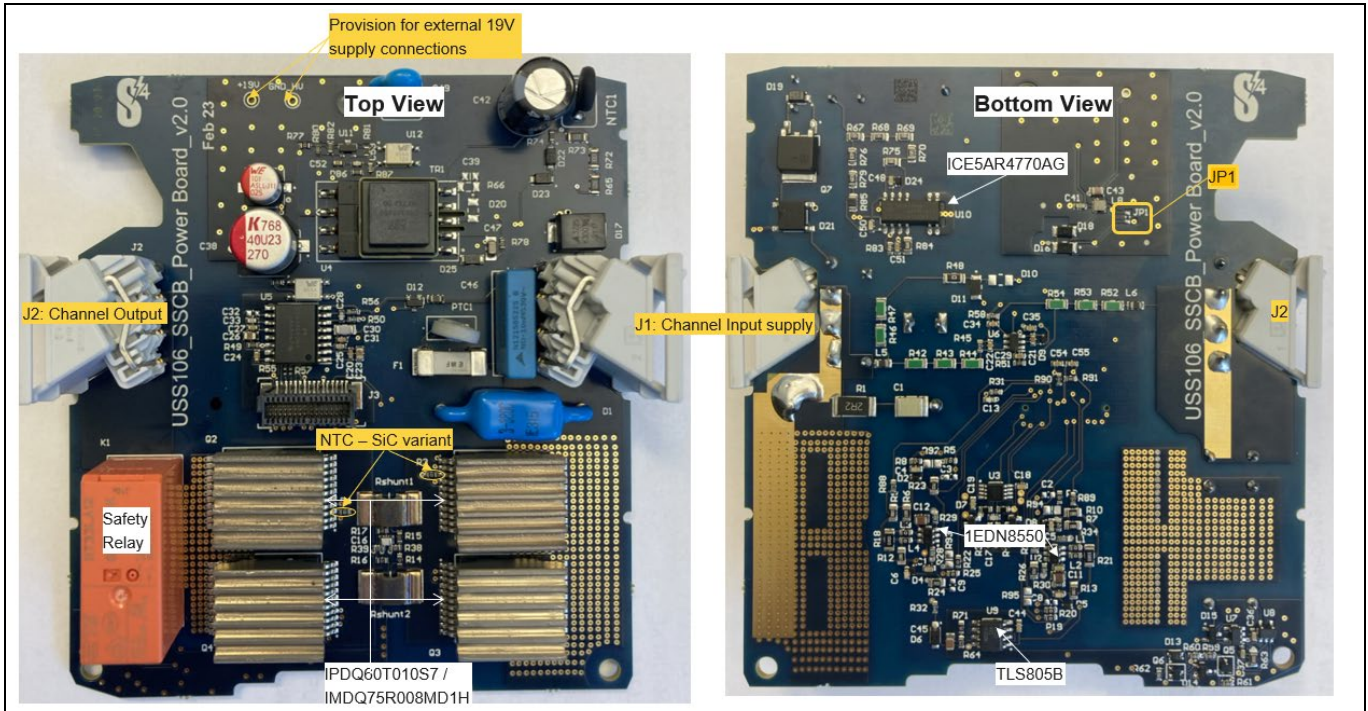


图 8 功率板

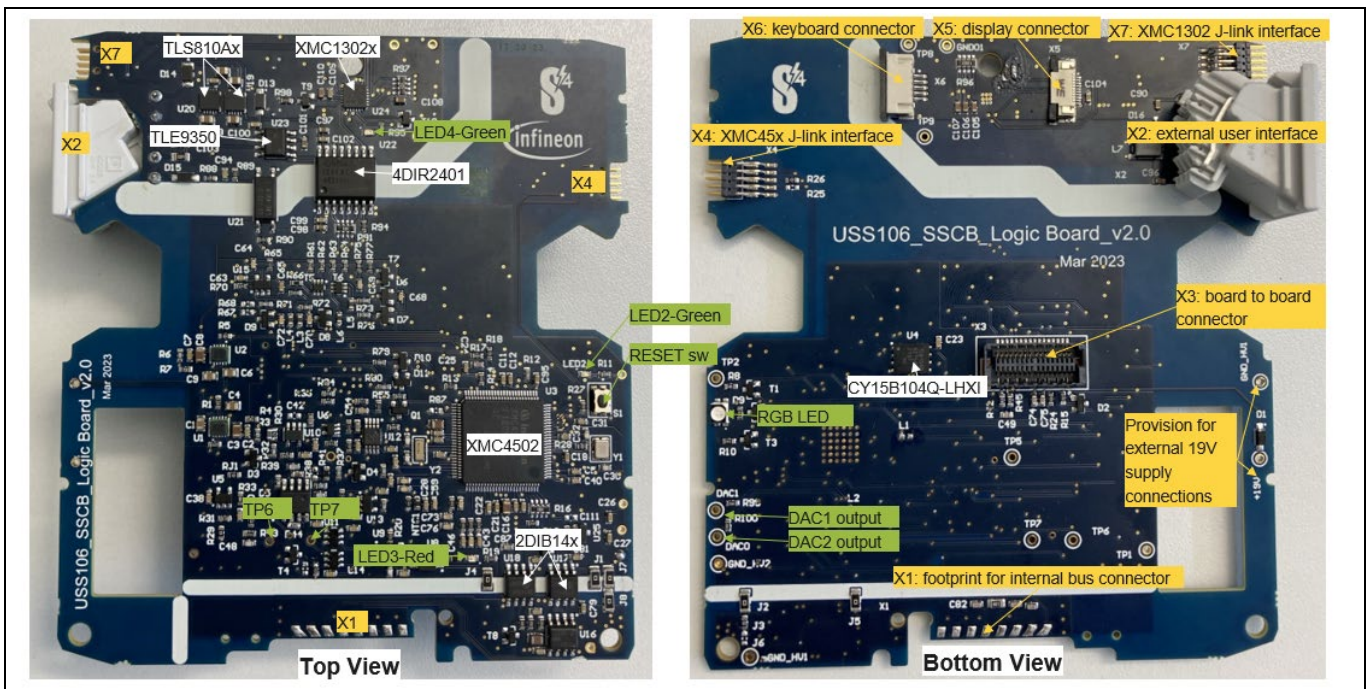


图 9 逻辑板

该逻辑板通过跳线选择进行设计，以确保其与 CoolMOS™ S7T 和 CoolSiC™ 电路板的兼容性（见表 6）。

SSCB 装置一览

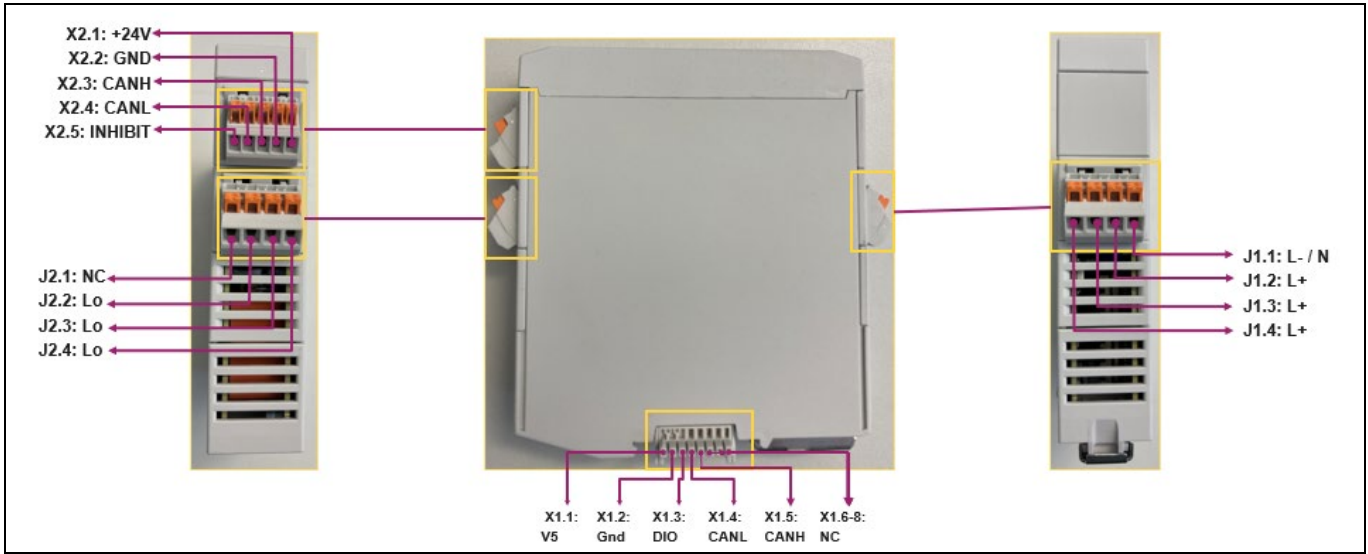


图 10 外部连接器端子图

表 5. 连接器详情

代号	说明	制造商	配套部件
J1	来自电网的通道输入电源	Phoenix Contact	1084034
J2	用于连接负载的通道输出	Phoenix Contact	1084034
X1	内部背板总线连接器	Phoenix Contact	2202891
X2	外部用户接口总线	Phoenix Contact	1102108
X4	用于 XMC4502x 的 SWD 调试连接器	Segger	10 针 J-Link 调试电缆
X5	TFT 显示屏连接器	Phoenix Contact	1215686
X6	键盘接口	Phoenix Contact	1215683
X7	用于 XMC1302x 的 SWD 调试连接器	Segger	10 针 J-Link 调试电缆

所有 Phoenix Contact 配套零件 (表 5) 均随 Demo 套件提供。

拆卸塑料外壳时, 请小心打开前面板, 以免损坏键盘和显示器连接电缆。

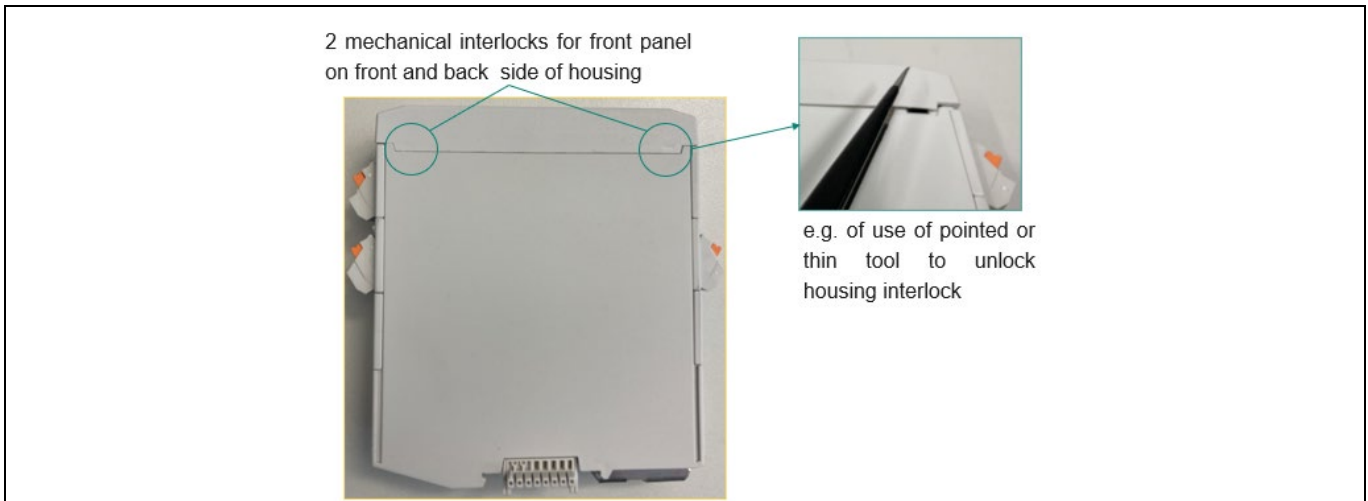


图 11 拆卸外壳前面板示例

SSCB 装置一览

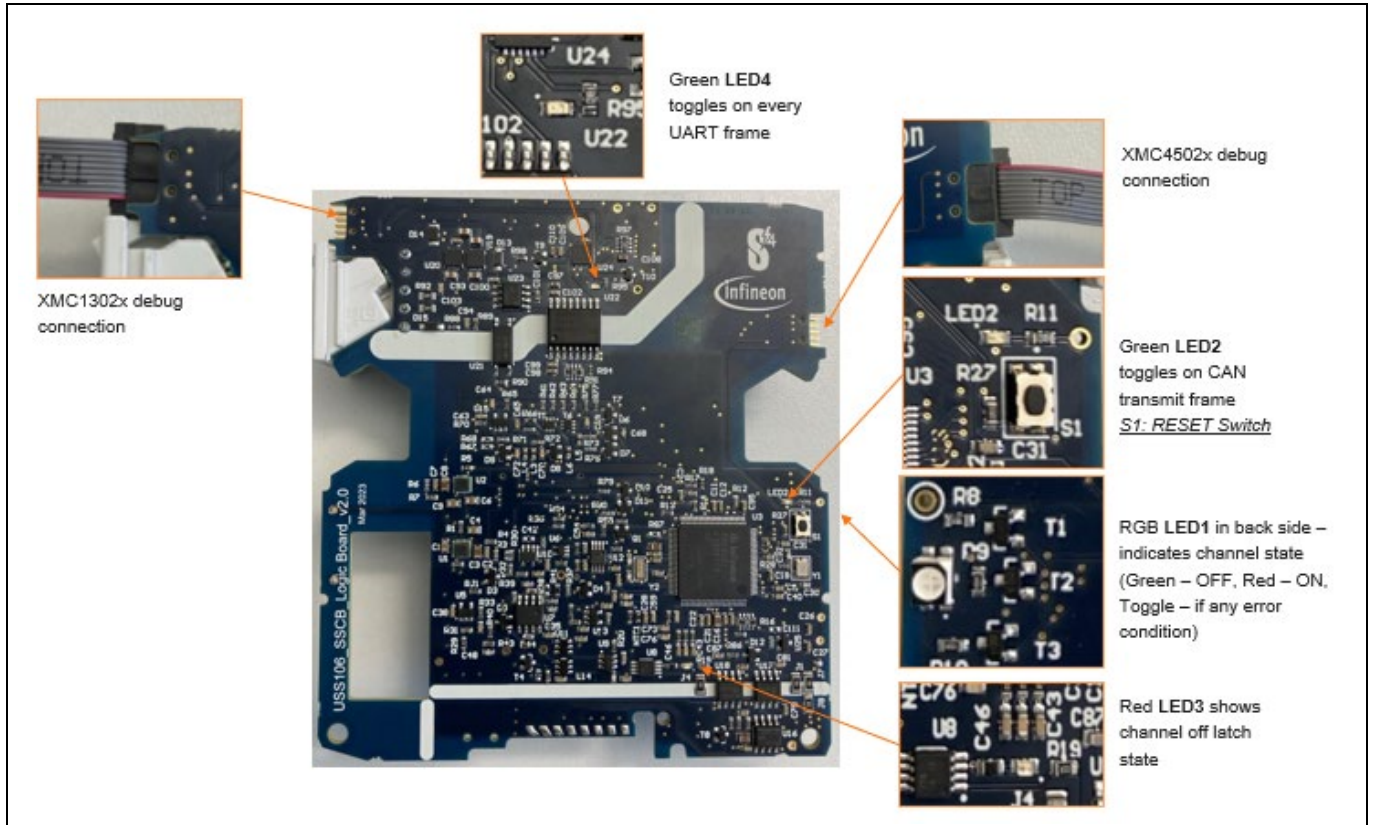


图 12 板载连接和指示

表 6. 硬件配置

选择	选择	电路板上的元件	支持 Demo Rev1 软件
1P 配置	主器件	逻辑板：R12、R58 置位；R56 不置位	是
多通道配置	主器件	逻辑板：R12、R56、JP1-8 置位；JP6、R58 不置位	否
	从器件	逻辑板：R12、R58、JP1-8 不置位；R56、JP6 置位	否
带嵌入式温度传感器的功率 MOSFET，用于测量结温 T_j	与 S7T 功率板兼容	逻辑板：R104、R105、R111、R112 置位；R67、R68、R108、R109 不置位	是
不带嵌入式温度传感器的功率 MOSFET	与 SiC 功率板兼容	逻辑板：R104、R105、R111、R112 不置位；R67、R68、R108、R109 置位	是

Note:

- 1P 配置为默认的发货配置。
- 默认情况下，逻辑板与功率板的兼容性可根据参考板订单代码进行确定。

SSCB 装置一览

表 7. 板载测试点配置

代号	说明
TP1	GND_HV
TP2	LED2 驱动输出
TP5	低增益差分运算放大器 U6 输出
TP6	OCD: 快速比较器输出
TP7	CH1_ON
DAC0	DAC0 输出
DAC1	DAC1 输出

图 13 是应用连接图。本参考设计旨在支持电阻性和电感性负载。要使用多通道配置，两个 SSCB 装置可通过背板总线进行通信和同步。

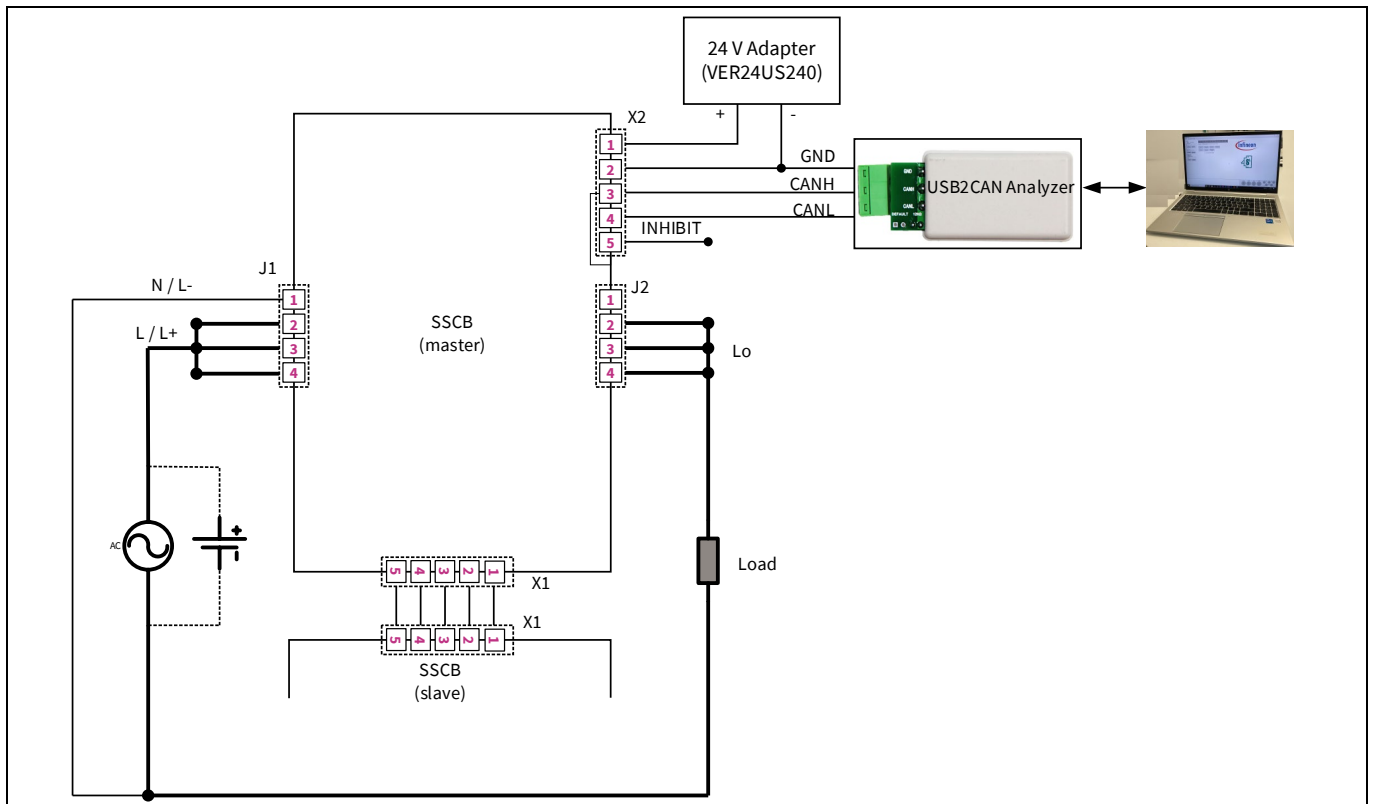


图 13 应用连接图

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

2 SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

SSCB Demo 图形用户界面可通过 CAN 通信与 Demo 板进行通信。它提供不同的监测和可编程选项。

该 GUI 应用程序适用于 REF_SSCB_AC_DC_1PH_16A 和 REF_SSCB_AC_DC_1PH_SiC。若使用 REF_SSCB_AC_DC_1PH_SiC, MCU 通过板载 NTC 热敏电阻读取 MOSFET 引脚温度 (T_{ntc} 或 TNT)。

2.1 图形用户界面主窗口

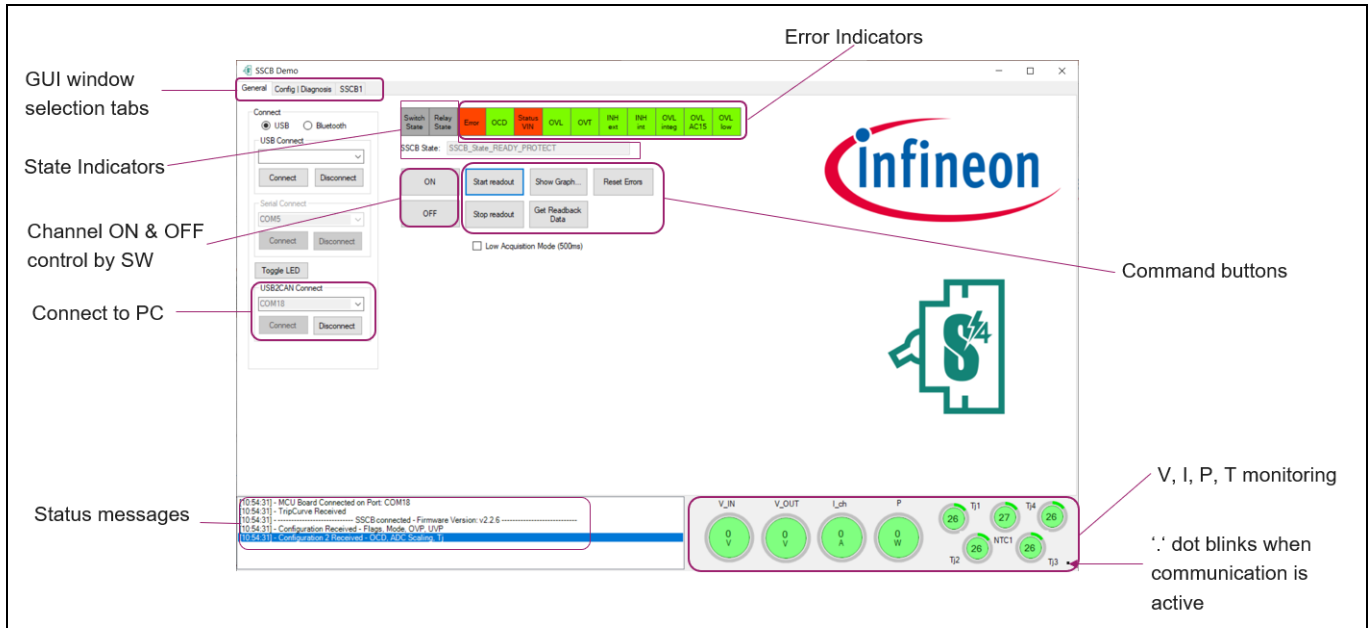


图 14 SSCB 图形用户界面主窗口

表 8. 主窗口功能概览

功能/按钮	说明
Connect/Disconnect	启动/停止 SSCB 装置与图形用户界面之间的通信
ON/OFF	通过图形用户界面开通和关断通道
Start/Stop readout	启动和停止周期性的状态、错误和模拟读数
Show Graph	显示模拟测量的实时图表。将打开新窗口
Low Acquisition mode	选择时, 测量更新率为 2 Hz; 不选择时, 默认为 ~200 Hz
Reset Errors	尽可能重置锁存器故障标志, 并将 SSCB 状态返回至 “SSCB_State_OFF”
Get Readback Data	一次性状态、错误和模拟读数
Error/state Indicators	状态标志的表征 (具体说明参见表 9)
V, I, P, T monitoring	显示通道输入和输出电压、电流、输入功率、MOSFET 结温以及基于 NTC 的逻辑板温度

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

表 9. 故障/状态指示器的功能说明

故障/状态指示器	说明
Switch State	当前 MOSFET 开关状态。绿色：ON；灰色：关闭
Relay State	当前安全继电器触点状态。绿色：闭合；灰色：打开
SSCB State	当前的 SSCB 状态。若要开通通道，其应处于“SSCB_State_OFF”状态且不存在故障（参见表 18）
Error	表示出现了故障/错误情况。红色：故障；绿色：正常运行
OCD	锁定过流状态。红色：OCD；绿色：正常运行
Status VIN	通道输入电源欠压或过压状态。红色：UVP/OVP；绿色：正常运行
OVL	通道过载状态。绿色：无过载；红色：过载（参见图 15）
OVT	任何 MOSFET 过温 (OT) 保护状态。绿色：正常状态；红色： $T_j > T_{j_shutdown}$ ，当 ($T_j < T_{j_recovery}$) 时自动复位（见图 17）
INH ext	外部 INHIBIT 输入状态。红色：存在高电平有效抑制信号；绿色：无抑制信号
INH int	内部总线 DIO 状态。红色：存在低电平有效 DIO 信号；绿色：无 DIO 信号
OVL integ	由脱扣曲线定义的不同锁存过载错误标志（参见图 15）
OVL AC15	红色：满足相应的过载条件
OVL low	绿色：正常工作

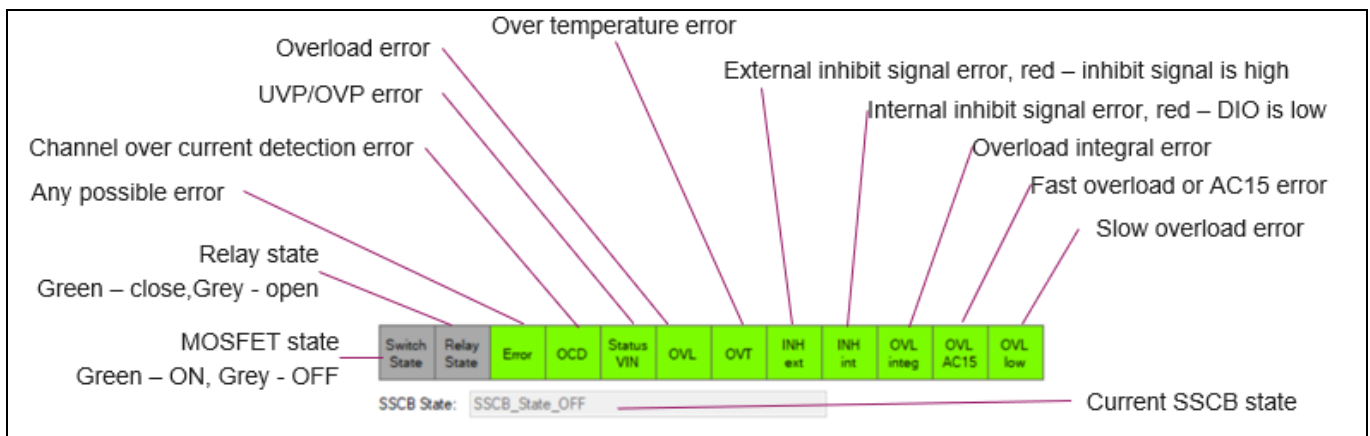


图 15 GUI 故障/状态指示器

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

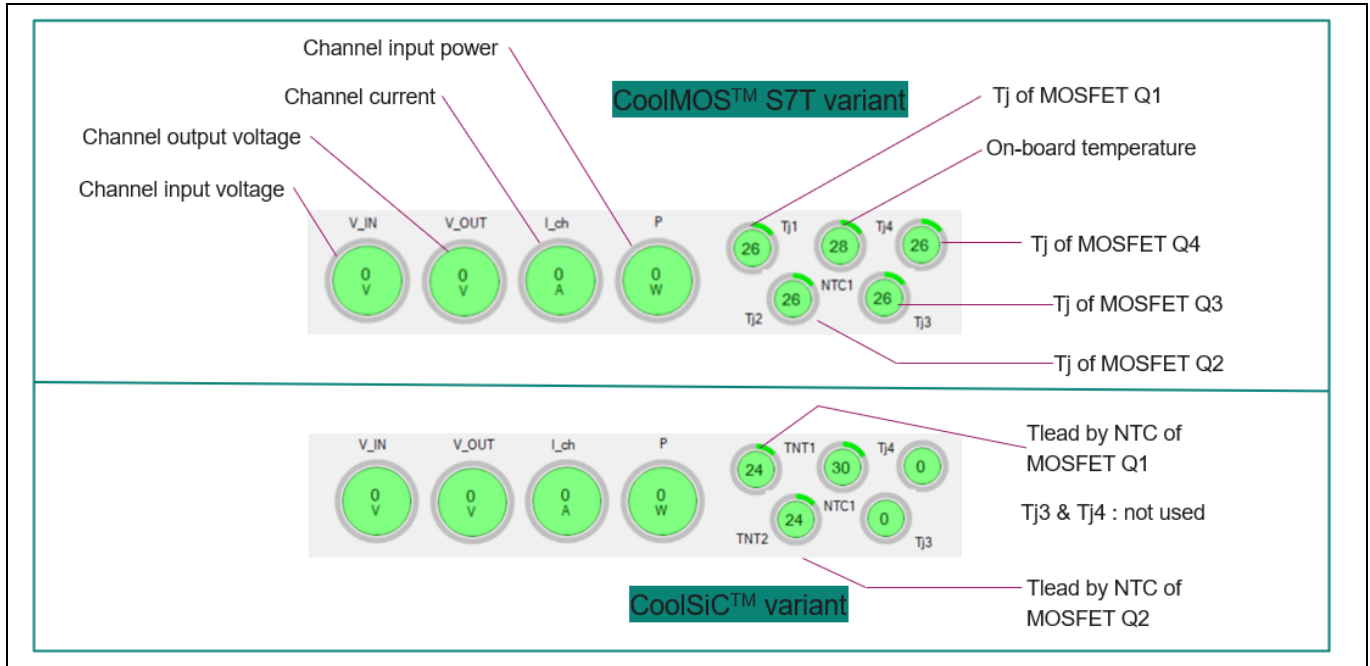


图 16 GUI 温度、电流和电压指示器

2.2 GUI 配置 | 诊断窗口



图 17 GUI 配置|诊断窗口

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

表 10. 配置|诊断窗口参数

功能/按钮	说明
Save Offset, Config and Tripchart to EEPROM	在 POR 之后，将 SSCB 配置、+/- OCD、UVP/OVP、温度保护阈值、ADC 校准比例因子和脱扣曲线参数等作为默认值存储在 EEPROM 中
Get config	读回 MCU RAM 中加载的 OCD 阈值和 SSCB 配置设置
Positive threshold	OCD 正阈值限值
Negative threshold	OCD 负阈值限值
SSCB configuration	可选择不同的选项，和交流/直流通道工作模式 <i>注：在直流模式下禁用 ZVS/ZCS。</i>
Mode selection	选择直流或交流 (50/60 Hz) 通道工作模式
Vin protection	设置 UVP 和 OVP 门限。UVP 门限有固定的 2 V 过滞后，OVP 门限有固定的 2 V 欠滞后。
Overtemperature protection	根据 T_j 或 T_{ntc} 设置关断和恢复阈值
Analog measurements	定期读出模拟测量值 (表 11)
In-application V & I calibration	可在应用中校准通道的输入/输出电压和电流值。平均测量值显示的 V 和 I，是基于 100 个样本的平均化。

2.2.1 SSCB 应用内校准

为提高通道输入、输出电压和电流的测量精度，可在 SSCB 标称的额定值下使用图形用户界面进行应用内校准。如图 18 所示，在通道接通状态下使用测量仪器（如 DMM）测量通道输入和输出电压及电流。

在图形用户界面中计算新的比例因子并替换旧的比例因子。将所有三个新比例因子保存到 EEPROM 中。

$$Scale_{x_{new}} = Scale_{x_{GUI}} * \frac{x_{DMM}}{x_{avgGUI}}$$

公式 1

- VIN 新比例系数计算举例：

$$Scale_{VIN_{new}} = Scale_{VIN_{old}} * \frac{VIN_{DMM}}{VIN_{avgGUI}}$$

公式 2

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

在直流测量过程中将新的比例因子保存到 EEPROM 之前，建议先执行通道 0 V 校准。按照以下步骤校准通道 0 V：

1. 将通道输入和输出保持在 0 V。
2. 用外部 19 V 电源为电路板供电（如需了解 19 V 连接规定，请参阅图 8 和图 9）。
3. 以交流模式开始测量。
4. 发出命令保存到 EEPROM 中。

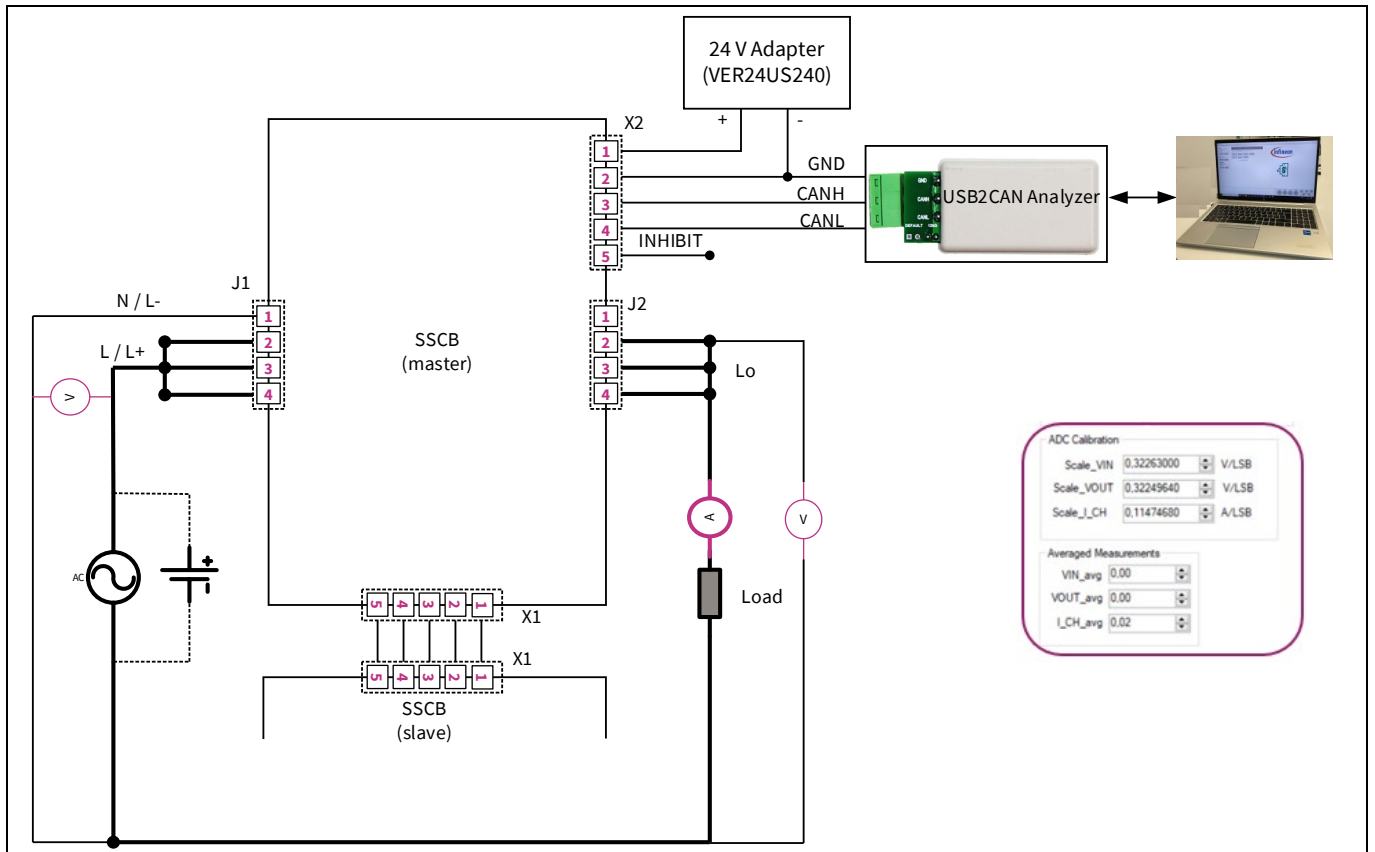


图 18 应用内校准设置

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

表 11. 模拟量测量

参数	说明	单位
AMEAS_V_FUSE_IN	通道输入电压有效值读数	V
AMEAS_V_FUSE_OUT	通道输出电压有效值读数	V
AMEAS_V_CURRENT	通道电流有效值读数 (I _{ch})	A
AMEAS_V_OCD_thrp_read	OCD 正参考电压读数	V
AMEAS_V_OCD_thrm_read	OCD 负参考电压读数	V
AMEAS_V_NTC1	逻辑板 NTC 温度读数	°C
AMEAS_Vtemp1	MOSFET Q1 结温 / NTC 读数	°C
AMEAS_Vtemp2	MOSFET Q2 结温 / NTC 读数	°C
AMEAS_Vtemp3	MOSFET Q3 结温读数 (不适用于 SiC)	°C
AMEAS_Vtemp4	MOSFET Q4 结温读数 (不适用于 SiC)	°C
AMEAS_EnergyCount	能量测量 (未使用)	kWh
AMEAS_CosPhi	交流电网使用中的功率因数	
AMEAS_THD	总谐波失真 (未使用)	
AMEAS_Frequency	交流电网使用中的频率测量	Hz
AMEAS_PWR_Peak	交流电网 1 个周期或直流电网 20 ms 内的功率有效值	W
IRMS_utilization	过载状态下至通道关闭所需的时间	%

2.3 GUI 脱扣曲线窗口

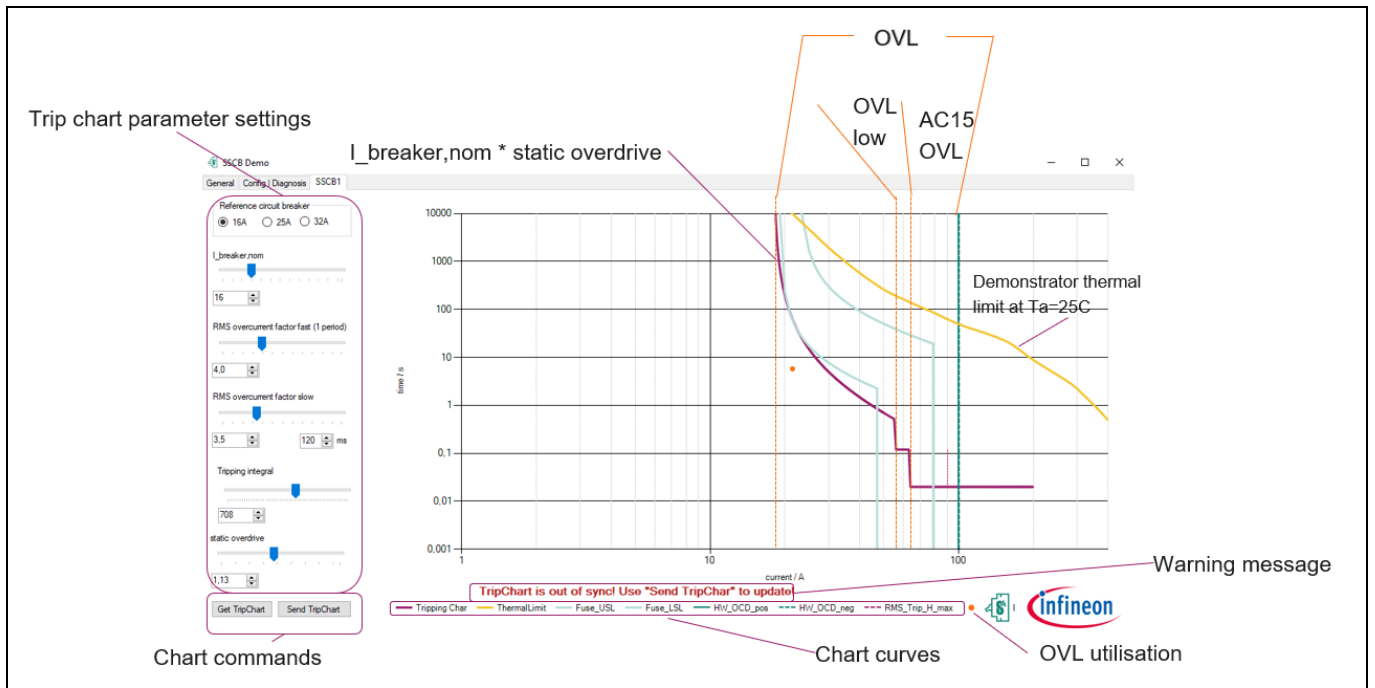


图 19 GUI SSCB1 窗口

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

表 12. 配置/诊断窗口功能概览

功能/按钮	说明
Trip chart parameter settings	SSCB 脱扣曲线参数设置 (参见表 13)
Get TripChart	获取存储在 MCU RAM 内存中的当前脱扣曲线参数
Send TripChart	从图形用户界面向 SSCB 发送所有脱扣曲线参数
Warning message	当有脱扣曲线参数更改时显示; 单击 Send TripChart 按钮后消失。
Chart Curves	代表时间与电流对数图中的不同曲线详情 (参见表 13)

表 13. 脱扣参数/曲线详情

参数/曲线名称	说明
I_breaker,nom	SSCB 额定电流
RMS overcurrent factor fast (1 period)	AC15 OVL 阈值, 检测时间为一个交流循环周期
RMS overcurrent factor slow	过流检测阈值, 检测时间可设置
Tripping integral	定义过载条件下的 I ² t 限值
Static overdrive	额定电流下的轻过载系数
Tripping Char	根据用户在图形用户界面中设置的参数确定 SSCB 脱扣边界
ThermalLimit	Ta=25°C 时 SSCB Demo 的热极限
Fuse_USL	B 级脱扣特性设定上限
Fuse_LSL	B 级脱扣特性设定下限
HW_OCD_pos	OCD 正阈值
HW_OCD_neg	OCD 负阈值
RMS_Trip_H_max	设定的过流检测阈值所对应的最大峰值电流限制, 1.43 倍

2.3.1 SSCB 过载错误

SSCB 有四种过载错误: OVL、OVL integ、OVL low 以及 AC15 OVL。

- OVL: 只要 I_{ch} 超过 (I_{breaker,nom} * Static overdrive), 错误就会一直处于激活状态。
- OVL integ: 当脱扣积分值达到设置的 Tripping integral 过载条件时, 错误标志就会锁存。OVL integ 被触发后, 关闭通道的延时时间计算如下

$$Time = \frac{Tripping\ integral}{(I_{ch} - I_{breaker,nom} * Static\ overdrive)^2} \text{秒}$$

公式 3

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

您可以使用演示工具的“Show Graph window”或示波器监测 I_{ch} 和时间；见图 20 的测试结果。

- OVL low: 当 I_{ch} 超过设定时间内的 RMS overcurrent factor slow 时，错误标志就会锁存。在交流系统中，关闭通道的周期数可计算为 (set_time * 频率 + 0.5 或 1)，请参考图 21 的测试结果。
- AC15 OVL: 当 I_{ch} 超过 RMS overcurrent factor fast 设置的阈值 1.5 或 2 个周期（交流系统）或 30-40 毫秒（直流系统）时，错误标志会被所存；见图 22 的测试结果。

在交流系统中，如果触发任何锁存过载错误，通道将以 ZCS 方式关闭。

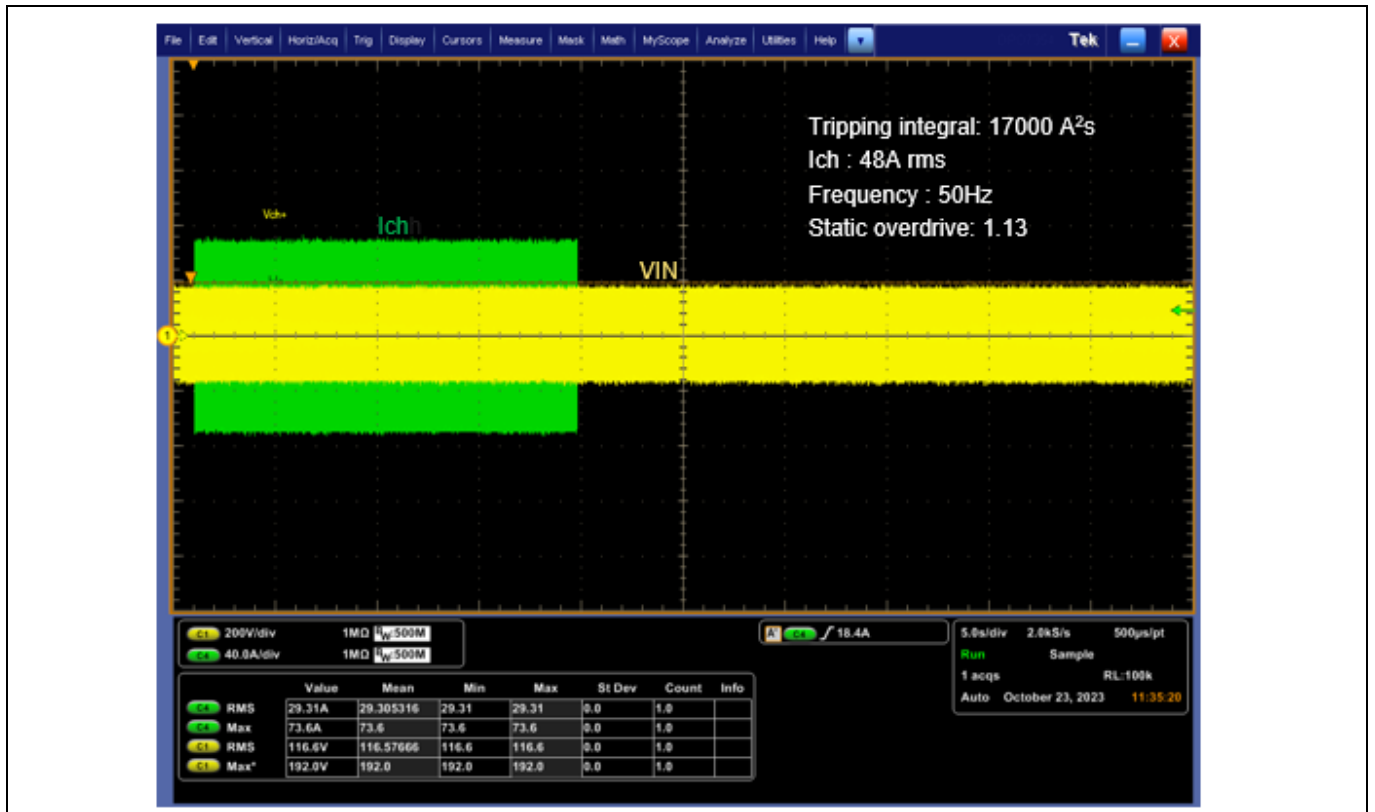


图 20 OVL integ 测试

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

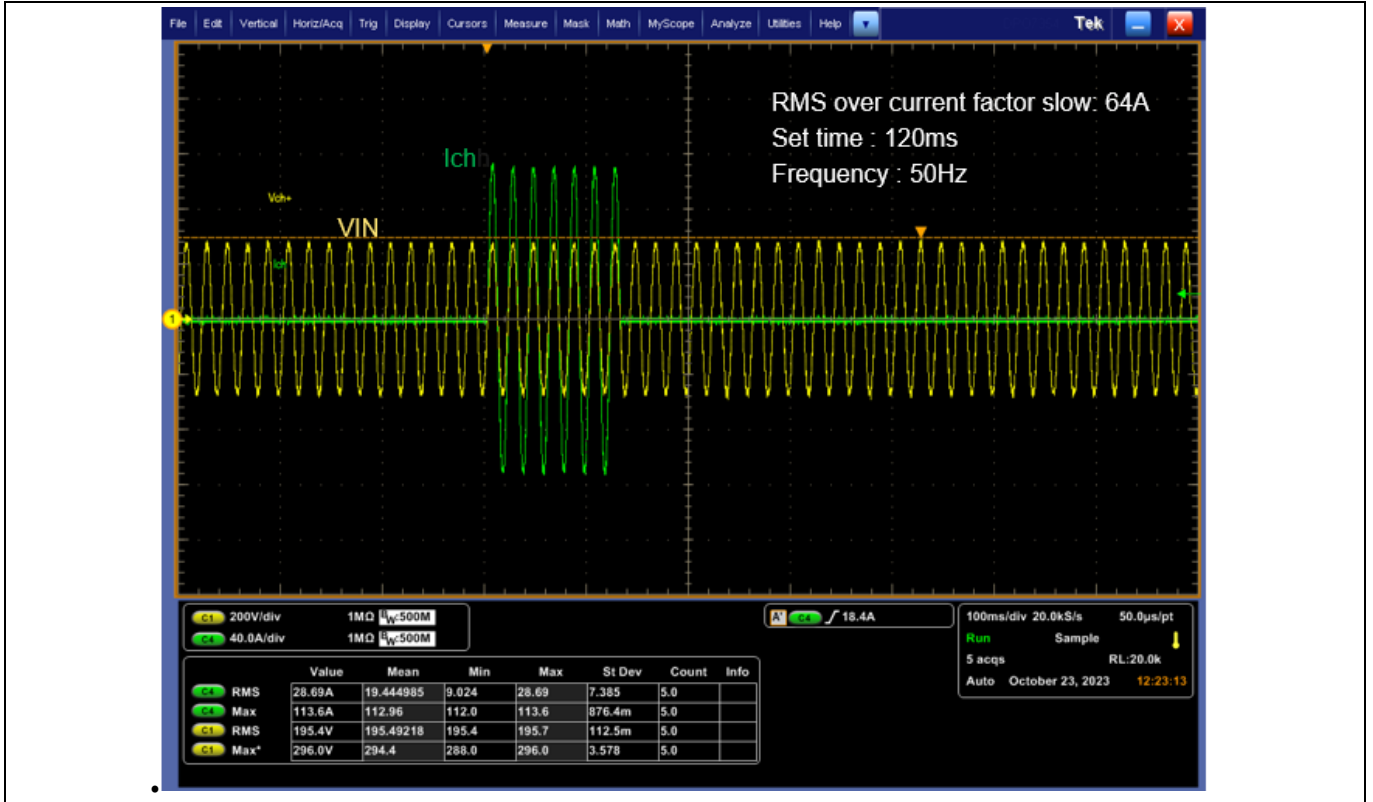


图 21 OVL low 测试

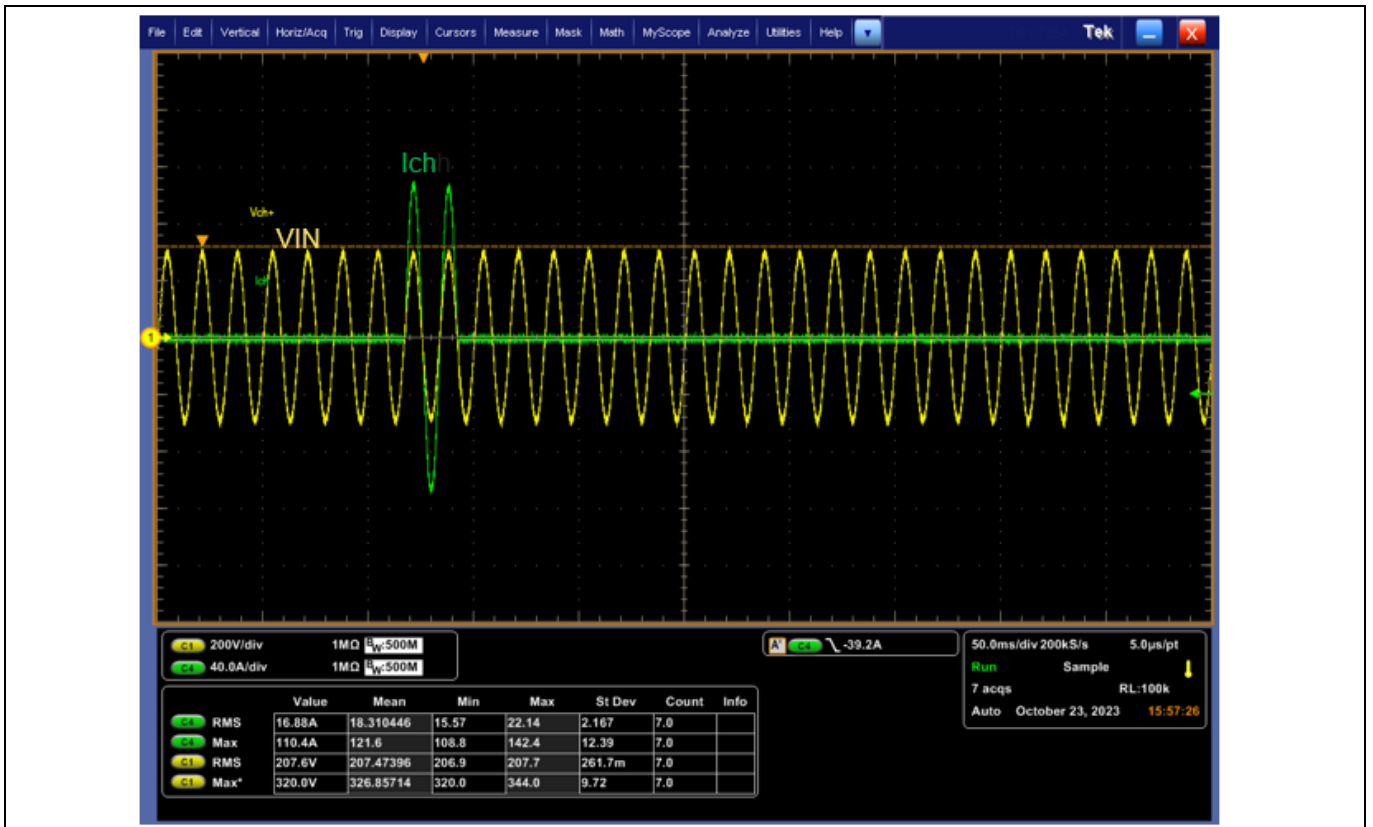


图 22 AC15 OVL 测试

SSCB Demo 图形用户界面 (GUI)

2.4 实时图形窗口

在主窗口中启动周期性读数后，所有模拟测量值都会显示在实时图形窗口中，更新率为 ~200 Hz 或 2 Hz（取决于主窗口中的选择）。无论通道是否激活，所有数据都会保存，如需清除数据，请点击 **Clear Chart** 按钮。图 23 是实时图形窗口。

除模拟信号外，还可显示所有状态标志。默认情况下，将显示所有以前的数据，但也可以选择启用 roll-mode 滚动模式（显示并保存最近 10 秒的数据）或 AutoClear 自动清除模式（仅显示最近 1000 个数据点）。

将数据导出到 *.csv 文件时，只会导出选定的通道。对于长时间数据记录，可以使用 continuous*.csv 下载选项。进行长时间数据记录时，最好选择慢速采集模式下，以降低 PC 负载。

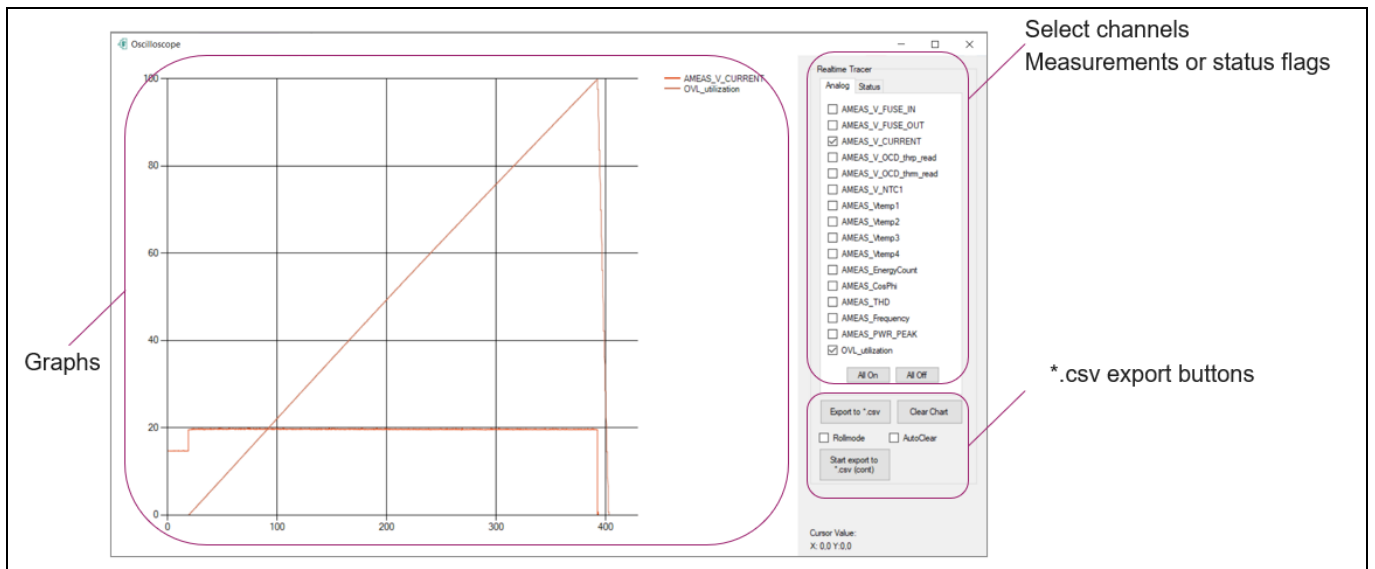


图 23 实时图形窗口

SSCB Demo 前面板

3 SSCB Demo 前面板

SSCB 前面板配有 TFT 显示屏和键盘。显示屏有五个屏幕，可通过键盘选择。

- 第 1 页：功率、输入电压、通道电流和频率测量
- 第 2 页：所有四个 MOSFET T_j 或两个 MOSFET T_{ntc} 和板载 NTC 测量值（摄氏度）
- 第 3 和第 4 页：MOSFET 和继电器状态以及错误标志
- 第 5 页：硬件和软件版本详细信息

每页底部均显示 SSCB 状态。

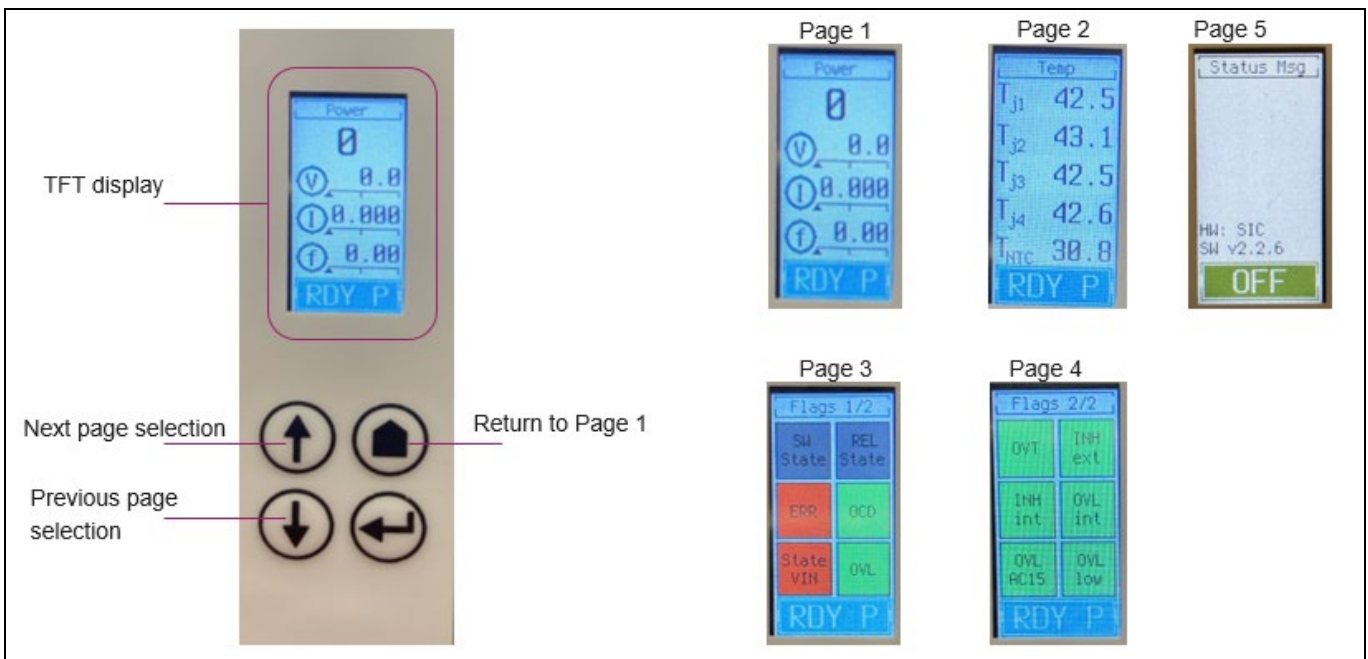


图 24 SSCB Demo 前面板细节

开始

4 开始

启动 SSCB Demo 的基本设置所示如图 13 所示。单极 (1P) 配置无需连接从器件。

执行以下操作以运行演示程序：

1. 安装 GUI zip 文件夹中 USB2CAN 分析仪的 USB 驱动程序 (CH341SER.exe) (仅首次安装时需要)。
2. 接通 SSCB 通道电源和 24 V 适配器电源。

显示屏开始显示通道供电测量值。RGB LED1 变绿 (连接器 J1 附近可见照明)。板载绿色 LED4 开始闪烁, 红色 LED3 点亮 (LED 位置见图 12)。

3. 打开 SSCB 演示 GUI 应用程序, 选择分配的 COM 端口进行连接。

如图 25 所示, 与图形用户界面的成功连接会显示状态信息。

使用周期性启动读出命令后, 板载绿色 LED2 和图形用户界面主窗口右下角的 ‘.’ 开始闪烁 (参见图 14)。图形用户界面开始显示周期性读数。

SSCB Demo 已可供使用。

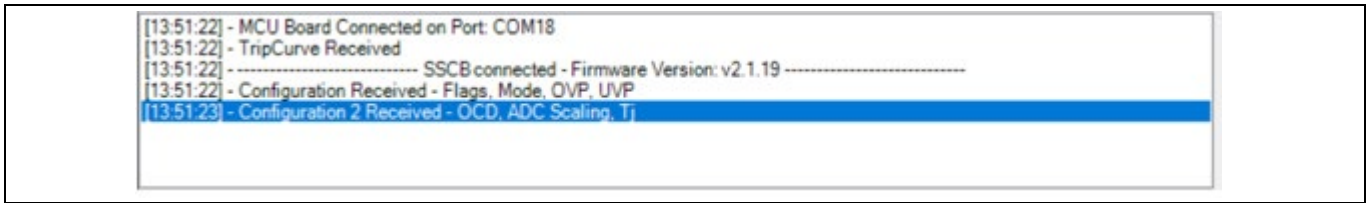


图 25 连接成功时的图形用户界面状态信息

为了在开发阶段获得灵活性, 可以在逻辑板或功率板上使用外部 19 V (+/-1 V) 直流电源, 以较低的通道电压测试 Demo。在这样使用时, 请将 JP1 放在电源板上, 并在图形用户界面中禁用 UVP/OVP 保护。

Note: 安全继电器的设计电流仅为 16 A RMS。应用程序设置允许超出此电流能力; 如果选择了这种设置, 则必须在功率 PCB 上的继电器触点之间通过建立外部低阻抗通路, 来旁路继电器。

CAN 通信

5 CAN 通信

5.1 通信接口

SSCB 演示程序使用 CAN 接口，通过电气隔离 CAN 接口在计算机图形用户界面和 Demo 板之间进行通信。CAN 接口的规范如表 14 和图 26 所示。

表 14. 主板的 CAN 配置

设置	数值
CAN 版本	V2.0B 活动
标识符	标准 11 位
RX 标识符地址	0x321
TX 识别器地址	0x321
数据长度 (RX 和 TX)	8 个字节
波特率	500 kbps

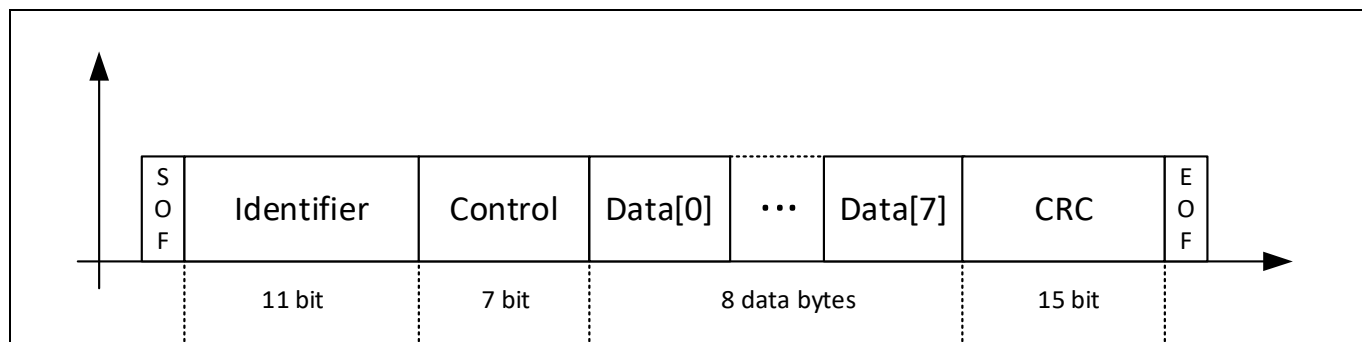


图 26 CAN 通信帧结构

CAN 通信

5.1.1 CAN 命令列表

每条命令的返回数据都与以下 CAN 命令一起返回。每个 CAN 帧宽为 8 字节。

表 15. CAN Rx - 接收数据

命令	字节数	数据	说明
SWITCH_ON	0	0x01	开通 SSCB 开关
SWITCH_OFF	0	0x02	关断 SSCB 开关
SWITCH_IDLE	0	0x0B	将 SSCB 开关转到空闲位置
START_READOUT	0	0x06	SSCB 的初始状态反馈 (所有状态帧)
EEPROM_WRITE	0	0x0C	将配置和当前偏移值写入 EEPROM
SWITCH_RESET	0	0x0D	SSCB 错误复位
SET_OCD_LVL	0	0x0E	设置 OCD 阈值
	1	<var>	OCD 负阈值输出 PWM 占空比 HIGH 字节
	2	<var>	OCD 负阈值输出 PWM 占空比 LOW 字节
	3	<var>	OCD 正阈值输出 PWM 占空比 HIGH 字节
	4	<var>	OCD 正阈值输出 PWM 占空比 LOW 字节
SET_TRIP_CURVE	0	0x0F	设置 SSCB 脱扣曲线
	1	<var>	SSCB 额定电流
	2	<var>	RMS_trip_factor_low
	3	<var>	T_overdrive
	4	<var>	RMS_trip_factor_high
	5	<var>	OVL_integ HIGH 字节
	6	<var>	OVL_integ LOW 字节
	7	<var>	Static overdrive factor
SET_CONFIG	0	0x10	设置 SSCB 配置 1
	1	<var>	SSCB 配置标志 (见表 17)
SET_CONFIG2	0	0x11	设置 SSCB 配置 2
	1	<var>	SCALE_VIN - 字节 0 (浮点数)
	2	<var>	SCALE_VIN - 字节 1 (浮点数)
	3	<var>	SCALE_VIN - 字节 2 (浮点数)
	4	<var>	SCALE_VIN - 字节 3 (浮点数)
	5	<var>	TJ_SHUTDOWN
	6	<var>	TJ_RECOVERY
	7	<var>	SCALE_VOUT - 字节 0 (浮点数)
SET_CONFIG3	0	0x12	设置 SSCB 配置 3
	1	<var>	SCALE_CURR - 字节 0 (浮点数)
	2	<var>	SCALE_CURR - 字节 1 (浮点数)
	3	<var>	SCALE_CURR - 字节 2 (浮点数)
	4	<var>	SCALE_CURR - 字节 3 (浮点数)
	5	<var>	SCALE_VOUT - 字节 1 (浮点数)

CAN 通信

命令	字节数	数据	说明
	6	<var>	SCALE_VOUT - 字节 2 (浮点数)
	7	<var>	SCALE_VOUT - 字节 3 (浮点数)
SET_CONFIG4	0	0x19	设置 SSCB 配置 4
	1	<var>	欠压保护限值 HIGH 字节
	2	<var>	欠压保护限值 LOW 字节
	3	<var>	过压保护限值 HIGH 字节
	4	<var>	过压保护限值 LOW 字节
GET_TRIP_CURVE	0	0x13	从 SSCB 开始读取脱扣曲线
GET_CONFIG	0	0x14	从 SSCB 启动配置读出 (版本帧 + 所有配置帧)
BLD_INIT	0	0x1A	在引导加载程序模式下重置 MCU，以便通过 CAN 进行固件更新

表 16. CAN TX 发送数据

命令	字节数	数据	说明
ADC_DATA	0	0x04	状态反馈帧
	1	0x04	帧编号
	2-3	<var>	状态字节 0 - 1 (见表 18)
	4-5	<var>	V_FUSE_IN
	6-7	<var>	V_FUSE_OUT
ADC_DATA	0	0x04	状态反馈帧
	1	0x05	帧编号
	2-3	<var>	V_CURRENT
	4-5	<var>	V_OCD_thrp
	6-7	<var>	V_OCD_thrm
ADC_DATA	0	0x13	状态反馈帧
	1	<var>	帧编号
	2-3	<var>	V_NTC
	4-5	<var>	Vtemp1
	6-7	<var>	Vtemp3
ADC_DATA	0	<var>	状态反馈帧
	1	<var>	帧编号
	2-3	0x14	EnergyCount
	4-5	<var>	CosPhi
	6-7	<var>	THD
ADC_DATA	0	<var>	状态反馈帧
	1	<var>	帧编号
	2-3	<var>	频率
	4-5	0x15	PWR_PEAK

CAN 通信

命令	字节数	数据	说明
	6-7	<var>	状态字节 2-3 (见表 18)
ADC_DATA	0	<var>	状态反馈帧
	1	<var>	帧编号
	2-3	<var>	Vtemp3
	4-5	<var>	Vtemp4
	6-7	<var>	OVL_utilization
GET_TRIP_CURVE	0	<var>	脱扣曲线帧
	1	0x16	额定电流
	2	<var>	RMS_trip_factor_low
	3	<var>	T_overdrive
	4	<var>	RMS_trip_factor_high
	5-6	<var>	OVL_integ
	7	<var>	Static overdrive factor
GET_CONFIG	0	<var>	获取 SSCB 配置 1
	1	<var>	SSCB 配置标志 (见表 17)
	2	0x18	欠压保护限值 LOW 字节
	3	<var>	欠压保护限值 HIGH 字节
	4	<var>	过压保护限值 LOW 字节
	5	<var>	过压保护限值 HIGH 字节
GET_CONFIG2	0	<var>	获取 SSCB 配置 2
	1	0x17	SCALE_VIN - 字节 0 (浮点数)
	2	<var>	SCALE_VIN - 字节 1 (浮点数)
	3	<var>	SCALE_VIN - 字节 2 (浮点数)
	4	<var>	SCALE_VIN - 字节 3 (浮点数)
	5	<var>	TJ_SHUTDOWN
	6	0x04	TJ_RECOVERY
	7	0x04	SCALE_VOUT - 字节 0 (浮点数)
GET_CONFIG3	0	<var>	获取 SSCB 配置 3
	1	<var>	SCALE_CURR - 字节 0 (浮点数)
	2	<var>	SCALE_CURR - 字节 1 (浮点数)
	3	0x04	SCALE_CURR - 字节 2 (浮点数)
	4	0x05	SCALE_CURR - 字节 3 (浮点数)
	5	<var>	SCALE_VOUT - 字节 1 (浮点数)
	6	<var>	SCALE_VOUT - 字节 2 (浮点数)
	7	<var>	SCALE_VOUT - 字节 3 (浮点数)
GET_CONFIG4	0	0x13	获取 SSCB 配置 4
	1	<var>	负 OCD 电平 LOW 字节
	2	<var>	负 OCD 电平 HIGH 字节
	3	<var>	正 OCD 电平 LOW 字节

CAN 通信

命令	字节数	数据	说明
	4	<var>	正 OCD 电平 HIGH 字节
GET_VERSION	0	<var>	获取 SSCB 版本
	1	<var>	SW 版本
	2	0x14	SW MAINVERSION
	3	<var>	SW SUBVERSION
	4	<var>	HW_REVISION

表 17. SSCB 配置标志说明

位数	名称	说明
0	ZVS_en	启用零电压开通
1	ZCD_en	启用零电流关断
2	OCD_en	启用硬件 OCD
3	OVT_en	启用过温保护
4	DC_mode	启用直流模式下的 SSCB
5	AC_60Hz	启用 60 Hz AC 模式
6	OVP_UVP_en	启用过压/欠压保护

CAN 通信

表 18. SSCB 状态反馈标志说明

位数	名称	说明
0 - 4	SSCB State	SSCB 运行状态： 0 ...DOWN 1 ...BIST 2 ...STARTUP 3 ...FAILURE 4 ...OFF 5 ...IDLE 6 ...SYNC 7 ...ON 8 ...ZCD 9 ...ZCD_PROTECT 10 ...IDLE_PROTECT 11 ...OFF_PROTECT 12 ...READY_PROTECT 13 ...FAILURE_SOFT 14 ...FAILURE_CRITICAL 15 ...ZCD_FAILURE 16 ...IDLE_FAILURE
5	SwitchState	MOSFET 开关状态
6	MSwitchState	继电器状态
7	Error	错误指示
8	OCD	OCD 错误标志
9	StatusVIN	VIN 错误标志
10	OVL	过载错误标志
11	OVT	过温错误标记
12	INH_ext	外部 INH 线路状态
13	INH_int	内部（背板）INH 线路状态
14	OVL_integ	Integral 过载检测标志
15	OVL_AC15	AC15 过载检测标志
16	OVL_low	Slow 过载检测标志
17	OVL_Cool	过载指示标志后的冷却时间

CAN 通信

表 19. 模拟值转换系数

参数 ADC 值	系数
General	$V_{ADC} = ADC_{value} * \frac{3.25}{4096}$
IRMS_utilization 或 OVL_utilization	$IRMS_{utilization} = I^2t * \frac{100}{set_I^2t}$
T _j measurement	$T_j = -190.07m * calc + 398.56m$ $calc (V) = ADC_{value} * \frac{3.25}{4096}$
NTC measurement	参照 NTC 查找表
OCD duty cycle values	$DC[\%] = \frac{DC_val}{100}$
RMS_trip_factor_low, RMS_trip_factor_high	$TripVal[A] = \frac{Reg_val}{10}$
Static overdrive factor	$OverdriverFac = \frac{Reg_val}{100}$
T _{overdrive}	50 Hz 模式: $T_{overdrive} = Reg_{val} * 20 ms$ 60 Hz 模式: $T_{overdrive} = Reg_{val} * 16.666 ms$ DC 模式: $T_{overdrive} = Reg_{val} * 20 ms$
Under-/overvoltage Protection limit	$Limit[V] = \frac{Reg_val}{100}$
AMEAS_V_FUSE_IN	$V_{in}[V] = \frac{AMEAS_V_FUSE_IN}{100}$
AMEAS_V_FUSE_OUT	$V_{out}[V] = \frac{AMEAS_V_FUSE_OUT}{100}$
AMEAS_V_CURRENT	$I_{out}[A] = \frac{AMEAS_V_CURRENT}{100}$
AMEAS_V_OCD_thr	$V_{OCD,thr}[V] = AMEAS_V_OCD_thr * \frac{3.3 V}{4096}$
AMEAS_CosPhi	$\cos \varphi = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{8000}{AMEAS_cosphi}}$
AMEAS_Frequency	$f[Hz] = \frac{1\ 000\ 000}{AMEAS_Frequency}$

SSCB Demo 性能测试

6 SSCB Demo 性能测试

6.1 交流 SSCB 中的 ZVS 和 ZCS

如图 27 和图 28 所示，在交流模式下，通道在零电压时开通，在零电流时关断。

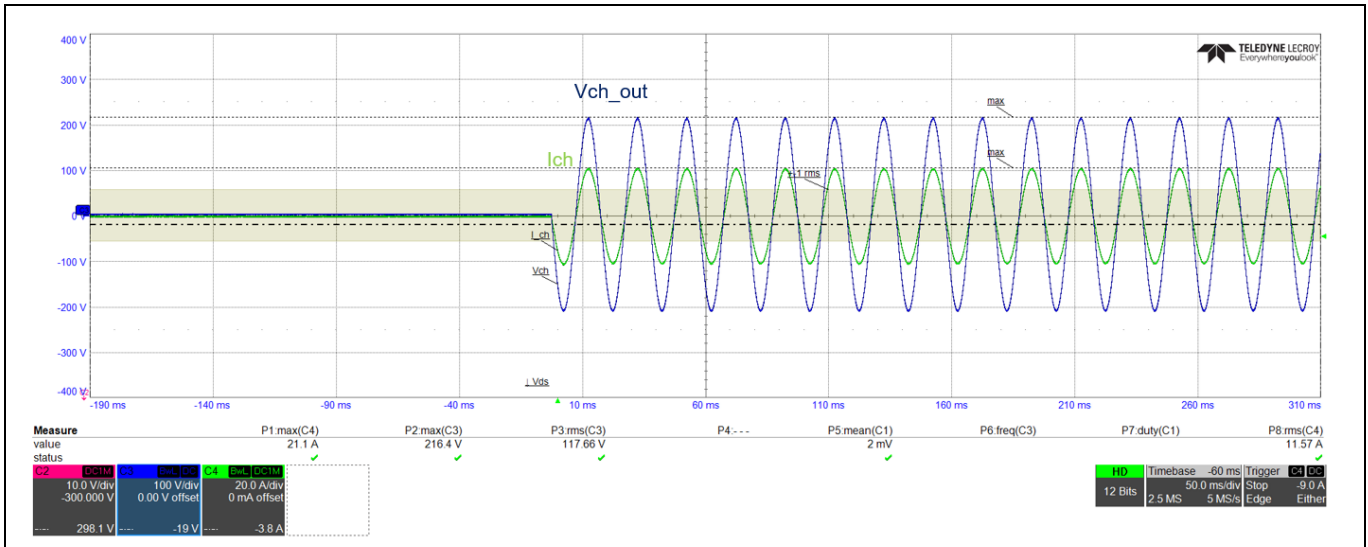


图 27 ZVS 事件

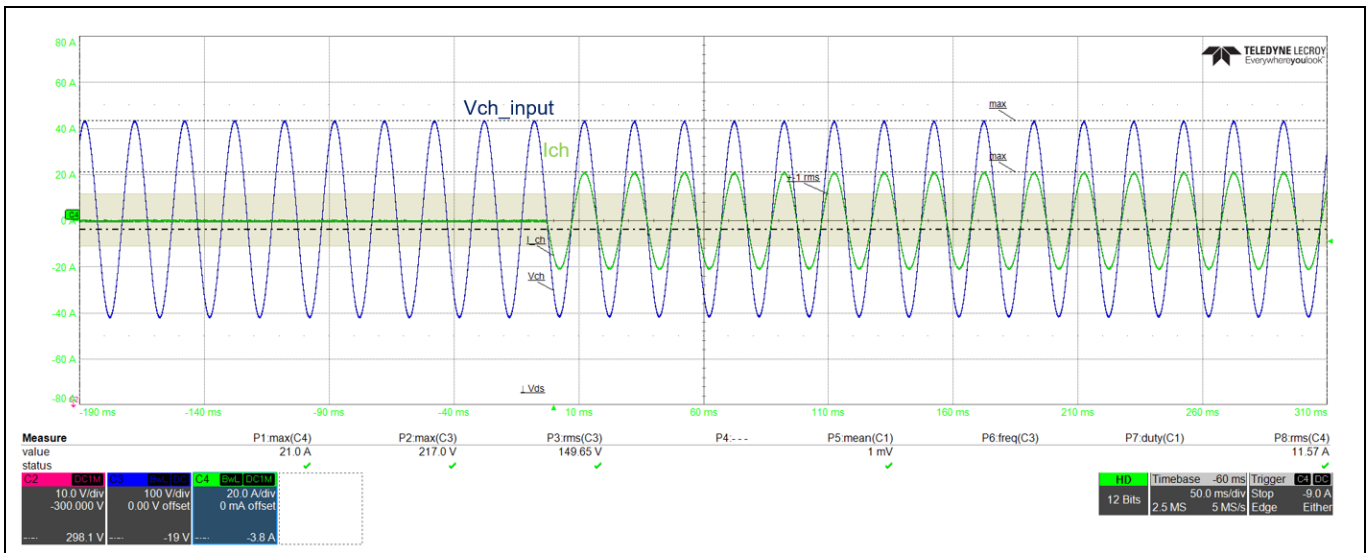


图 28 ZCS 事件

SSCB Demo 性能测试

6.2 过流检测 (OCD) 性能

图 29 展示了正负沟道直流电流的过流检测 (OCD) 特性。di/dt 受线束阻抗的限制，外部的短路开关用作安全开关，在通道接通状态下产生 200 μs 的短路脉冲，以避免电容器在任何失效情况下完全放电。直流电源电压幅值由低到高调节（最高可达 375 V DC），以实现不同的 di/dt。如图 31 所示，di/dt 测试结果最大可以超过 100 A/μs。I_{trip} 是实际检测阈值，I_{off} 是由于 MOSFET 关断传输延时造成的实际关断电流值。

据观察，CoolMOS™ 的总传播延迟 (T_{off_delay}) 约为 880 ns，CoolSiC™ 约为 420 ns。

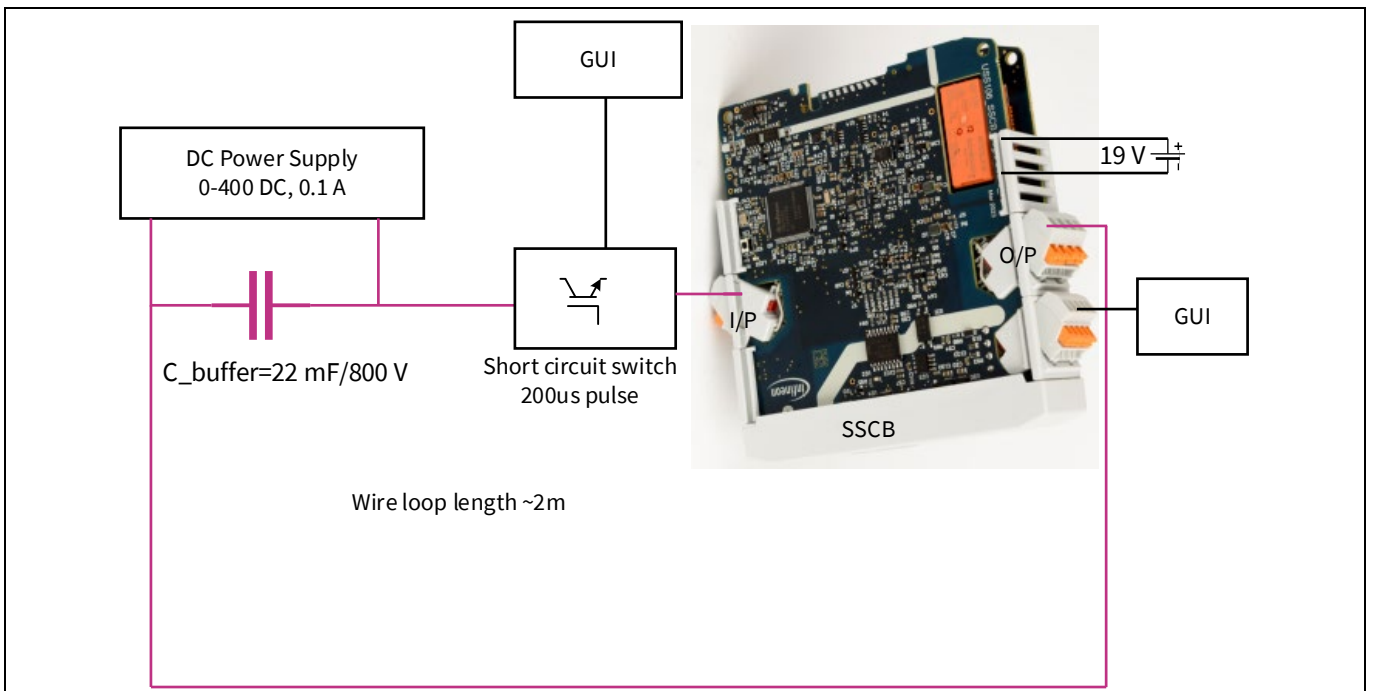


图 29 OCD 与 di/dt 测试装置

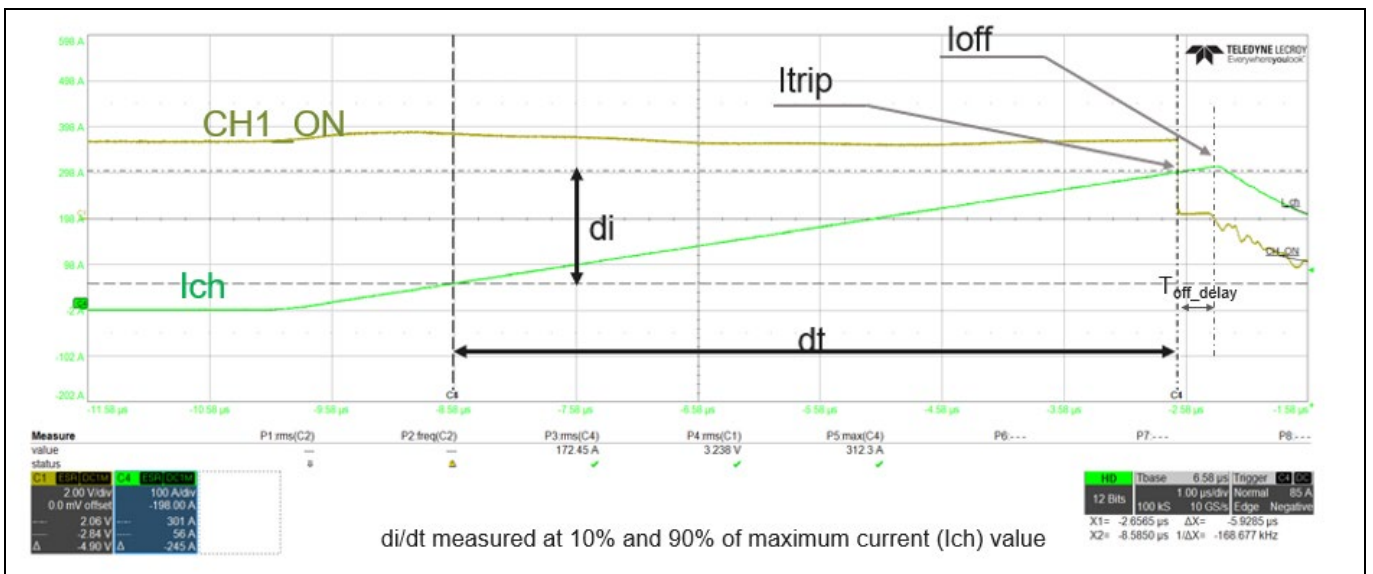


图 30 di/dt 定义

SSCB Demo 性能测试

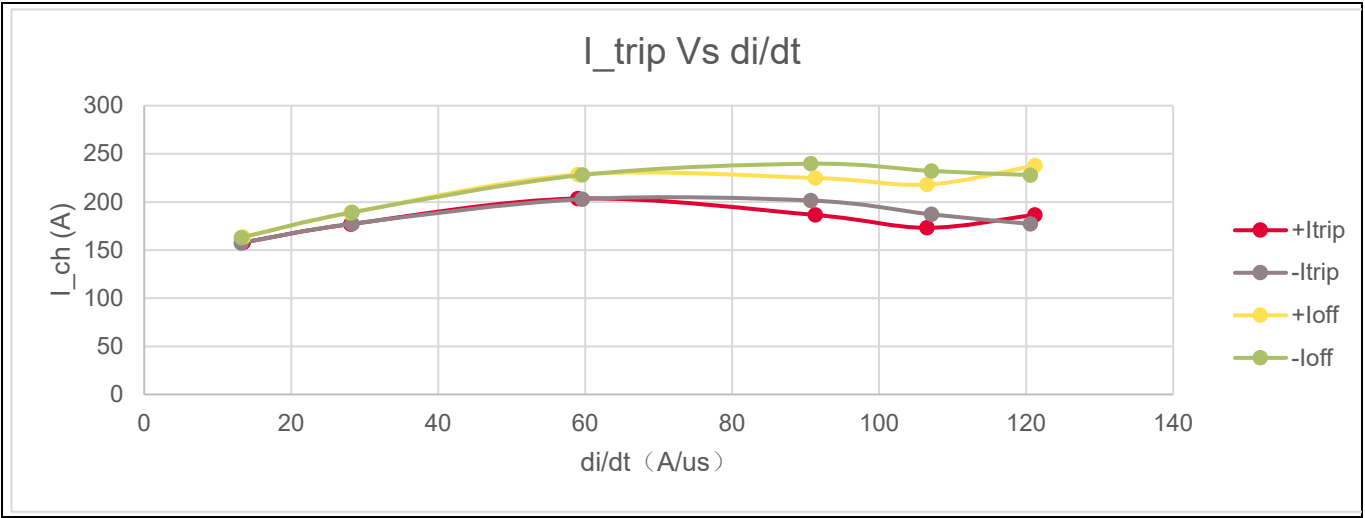


图 31 OCD 与 di/dt 的关系

6.3 热性能

SSCB Demo 采用被动冷却，在 QDPAK (PG-HDSOP-22) MOSFET 顶部焊接了一个铜散热片/散热器。将 SSCB PCB 板插入塑料外壳中并水平放置在桌面上，在室温下对不同的直流电流值进行了热测量。在较低电压下，以恒定电流模式在通道输入和输出端子之间连接直流电源。T_j、T_{ntc}、以及 TNT 读数通过 SSCB GUI 采集。

在测试观察期间，CoolMOS™ S7T 的过温保护点保持在 T_j=150°C，以保护 MOSFET。由于 SiC 版本没有直接针对 T_j 的测量机制，因此热电偶置于 MOSFET Q2 散热器上方，以检测散热器的温度。在测试期间，若散热器的温度超过 140°C，沟道会断开，以保护 MOSFET。热跳闸特性限制基于以上观察结果确定。

如图 35 所示，2500 秒后，观测到热电偶温度比 NTC 读数高出约 5°C。若脉冲电流的值较高，受 MOSFET 与 NTC 之间的热电容的影响，以及 NTC 响应时间的限制，T_{ntc} 或 TNT 的准确性相较于热电偶而言较低。

Note: 安全继电器的设计电流仅为 16 A RMS。应用程序设置允许超出此电流能力；如果选择了这种设置，则必须在功率 PCB 上的继电器触点之间通过建立外部低阻抗通路，来旁路继电器。在热测量期间，继电器触点应始终保持被短路，因为其额定电流不够。

SSCB Demo 性能测试

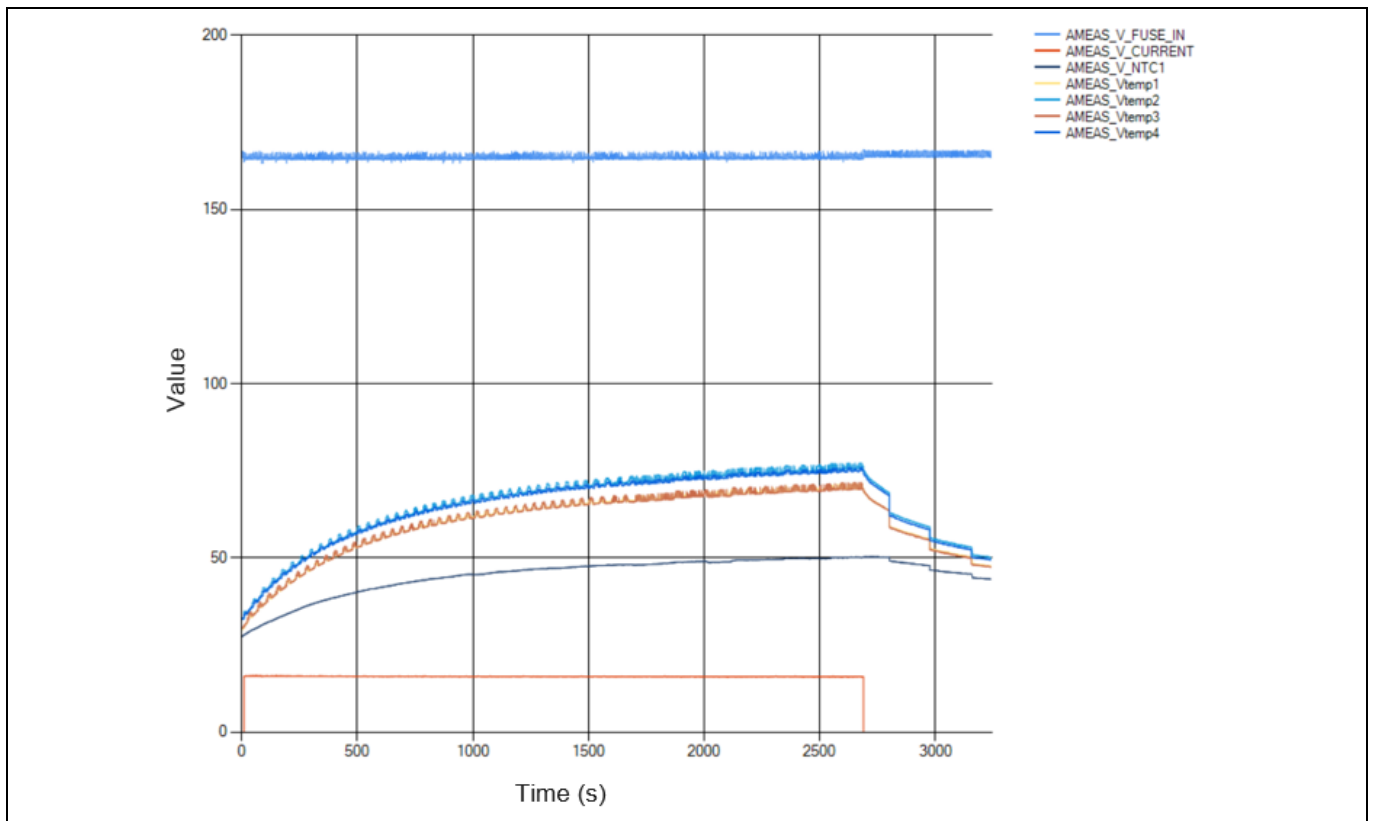


图 32 针对 S7T 的 16 A 交流持续电流测试

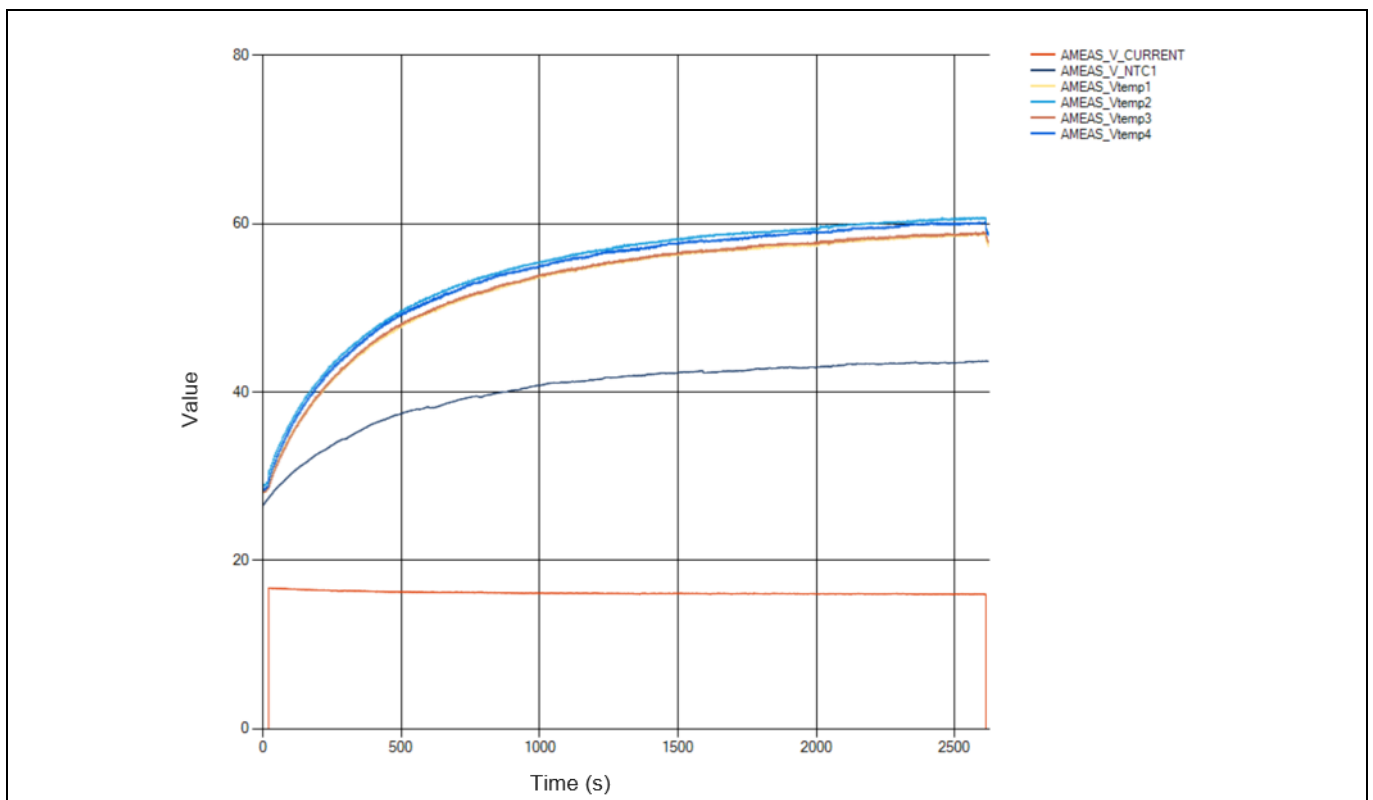


图 33 针对 S7T 的 16 A 直流持续电流测试

SSCB Demo 性能测试

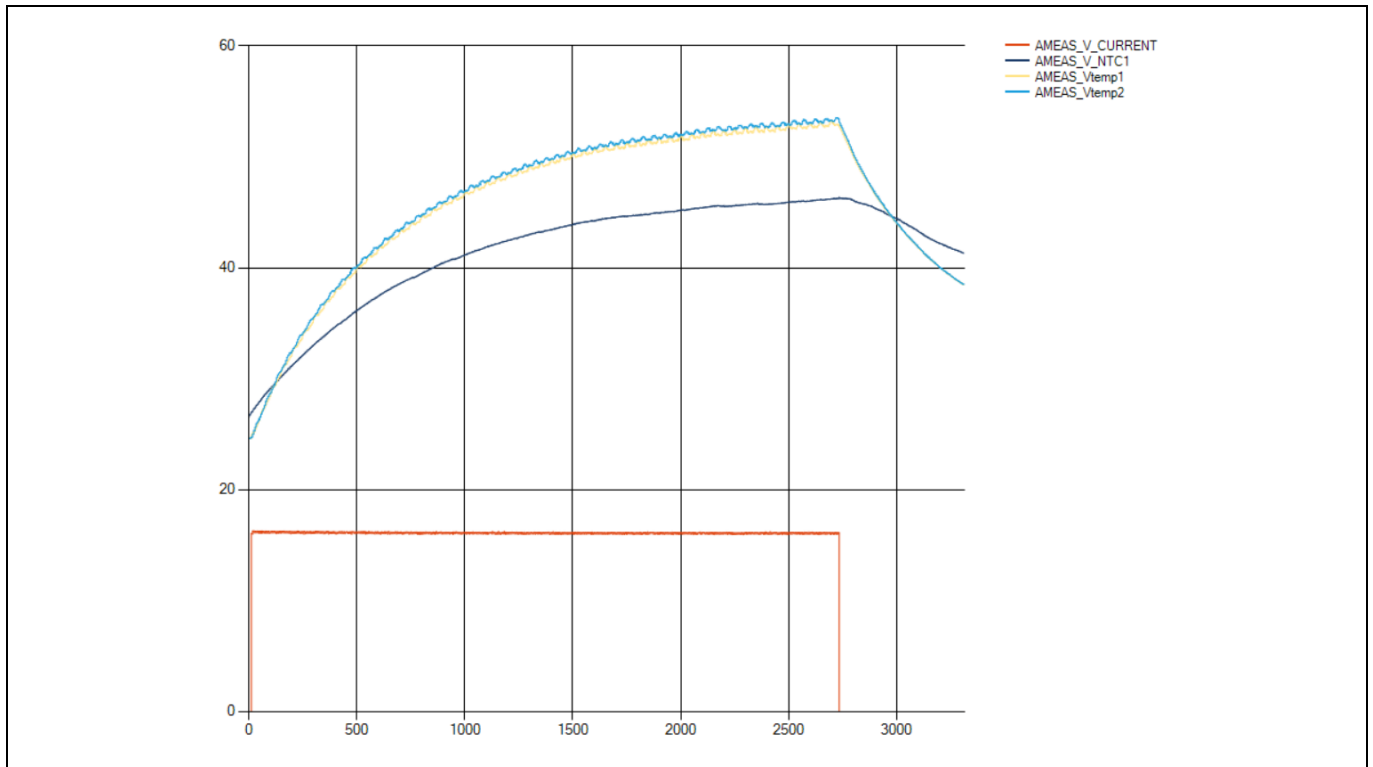


图 34 针对 SiC 的 16 A 交流持续电流测试

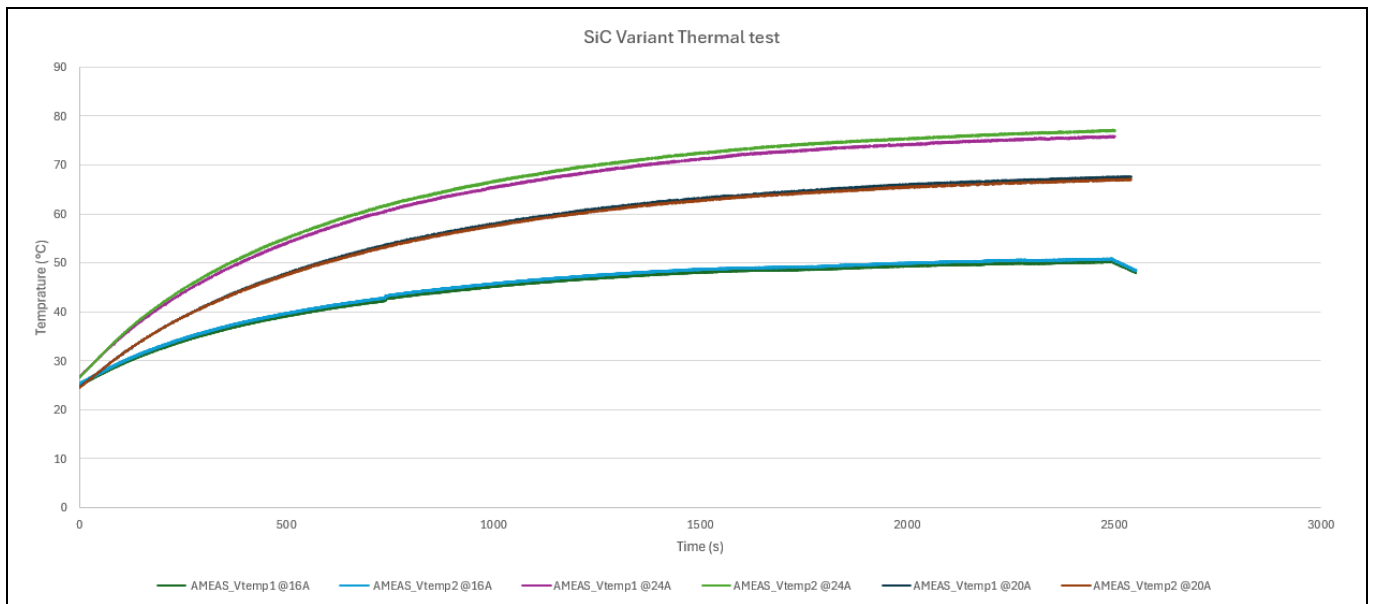


图 35 针对 SiC 的直流持续电流测试

SSCB Demo 性能测试

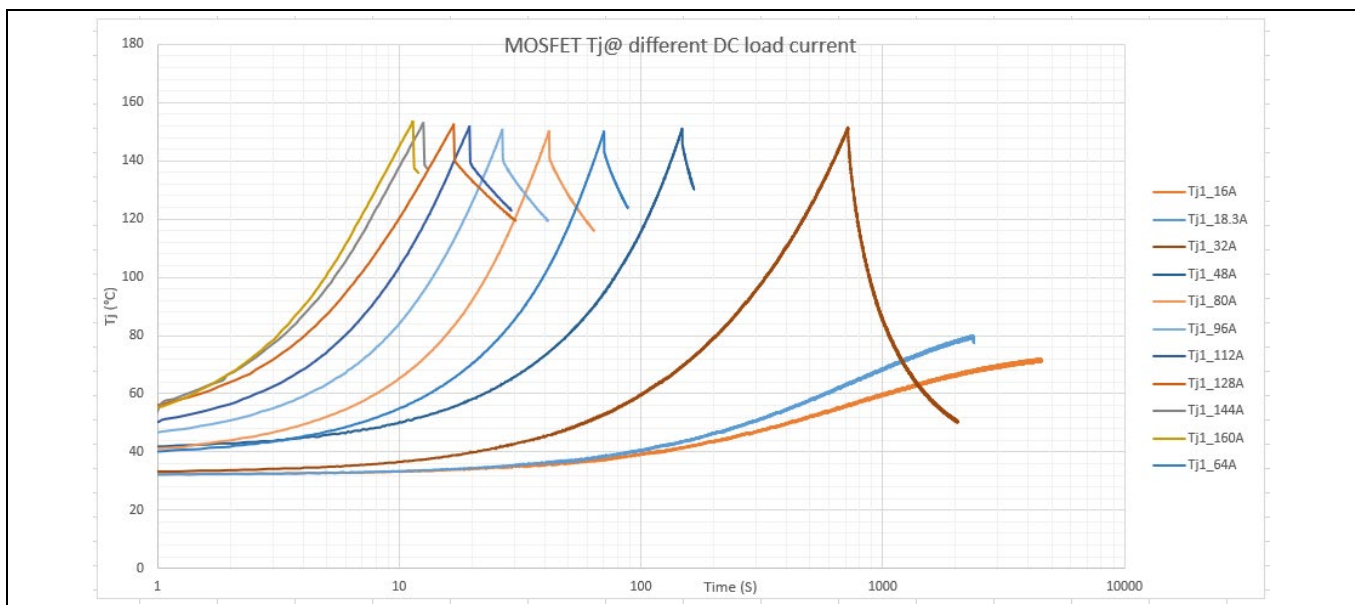


图 36 不同直流负载电流下，S7T 的 T_j 与时间的关系

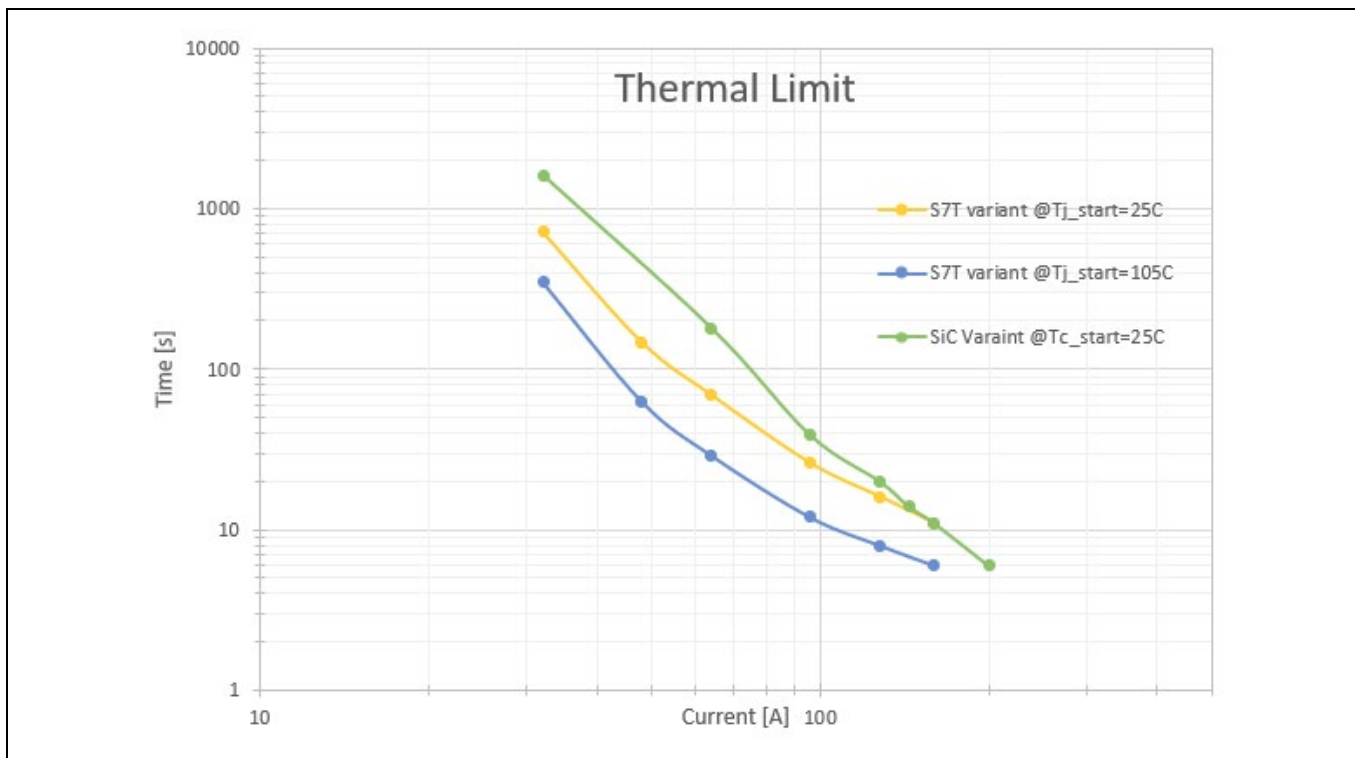


图 37 热跳闸特性限制

SSCB Demo 性能测试

术语表

ADC

模数转换器

MCU

微控制器

MOSFET

金属氧化物半导体场效应晶体管

NTC

负温度系数

OCD

过流检测

OVT

过温警告

PCB

印刷电路板

$R_{DS(on)}$

MOSFET 在实际结温下的导通电阻

SELV

安全超低电压

FELV

功能性超低电压

SSCB

固态断路器

T_a

环境温度

T_j

结温

SSCB Demo 性能测试

TSC

顶部冷却

TVS

瞬态电压抑制器

USL

规格上限

V_{DS}

漏极和源极电压

S7T

英飞凌 CoolMOS™ S7T，带嵌入式温度传感器

修订历史

修订历史

文档修订	日期	变动说明
版本 1.0	2024-01-09	首次发布
版本 2.0	2024-08-26	新增 SiC 版本的信息

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2024-11-19

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

© 2024 Infineon Technologies AG.

All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference

UG121012_ZH

警告事项

由于技术所需产品可能含有危险物质。如需了解该等物质的类型，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽。

除非由经英飞凌科技授权代表签署的书面文件中做出另行明确批准的情况外，英飞凌科技的产品不应当被用于任何一项一旦产品失效或者产品使用的后果可被合理地预料到可能导致人身伤害的任何应用领域。