

Design Guide: TIDA-010985

适用于 800V 直流系统，具有大型 Y 电容的电阻电桥绝缘监测
器件参考设计

说明

此参考设计采用电阻电桥绝缘监测器件 (IMD)。此设计可准确检测对称和非对称隔离电阻故障。此参考设计还可测量具有大型 Y 电容 (Y 电容) 的高压直流系统的电容。此设计满足 UL 标准规定的响应时间要求。

资源

TIDA-010985	设计文件夹
LP-MSPM0G3507	工具文件夹
TPSI2240-Q1	产品文件夹
RES60A-Q1、TLV9002-Q1	产品文件夹
ISOW1044、TPSM33620-Q1	产品文件夹
TPS7A20、TSM24CA	产品文件夹

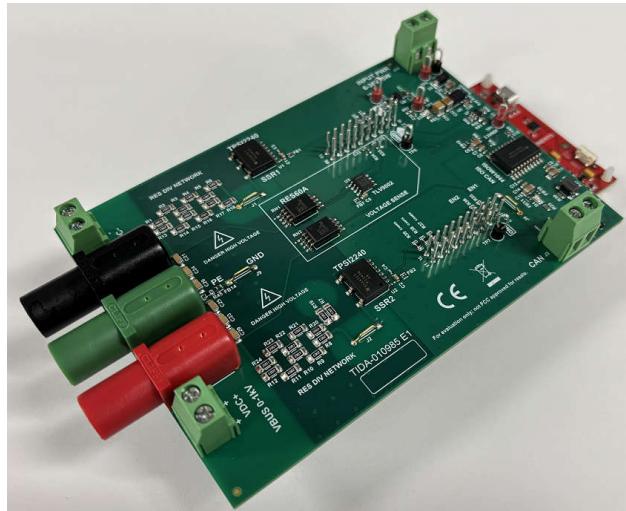
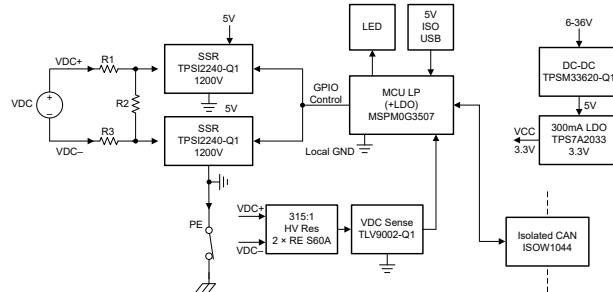
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 支持大型 Y 电容 (总计高达 $9 \mu F$)
- 通过低计算预测算法缩短响应时间
- Y 电容对保护地的电压变化较小 ($\pm 10\%$)
- 可提供对称和非对称故障检测
- 电阻测量误差为 $\pm 5\%$ ，电容测量误差为 $\pm 15\%$ ($\pm 3\sigma$)
- 支持 UL 2231-2 $\pm 15\%$ 的精度和 10s 响应时间
- 支持高达 1kV 的总线电压
- 用于通信的隔离式控制器局域网 (CAN) 2.0

应用

- 高压电池系统
- ESS - 电池管理系统 (BMS)
- 串式逆变器
- 直流快速充电电源模块



1 系统说明

高压 (HV) 直流系统展示了在多种终端设备应用 (包括储能系统、数据中心、光伏逆变器和直流快速充电器) 中的加速采用。这些应用的典型直流电压范围为 150V 至 1000V。大型储能系统可在高达 1500V 的电压下运行。

用户保护代表这些高压直流系统中的一项重要设计考虑因素。系统的所有高压器件都通过高阻路径 (通常在高 $M\Omega$ 范围内) 从 PE 接收电气隔离。这种绝缘限制了最大泄漏电流。国际标准 (例如有关电动汽车充电的 UL 2231-2、IEC 61851-23) 要求泄漏电流保持在 10mA (即 $100\Omega/V$) 限值内, 以避免因接触系统而造成人身伤害。IEC 61851-23 规定了泄漏电流测量值小于 2mA ($500\Omega/V$) 时的安全隔离额定值。表 1-1 展示了绝缘监测器件 (IMD) 的主要阈值。图 1-1 显示 IMD 会监测绝缘电阻, 并在绝缘电阻不足时向主控制器报告故障。主系统控制器在发生故障后启动安全关断序列。由于绝缘变化缓慢, 这些 IMD 在 1Hz 至 2Hz 的低频率下持续运行。

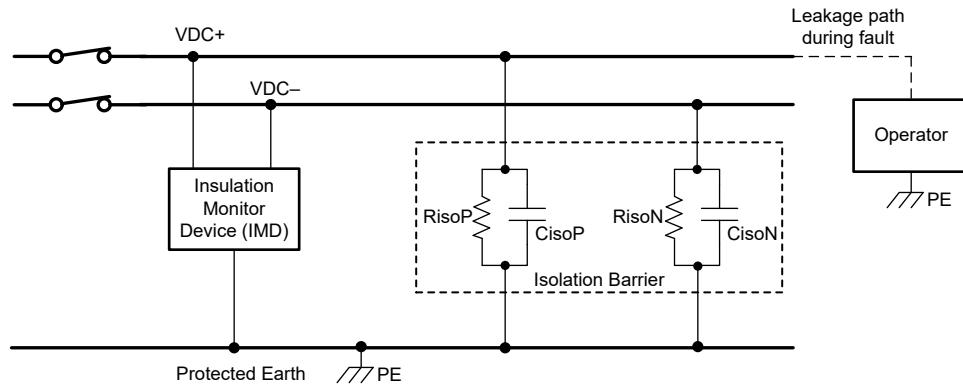


图 1-1. 未接地直流配电系统中的绝缘监测器件

表 1-1. IEC 和 UL 标准中的 IMD 关键阈值

状态	Ω/V	泄漏电流	800V VBus	1000V VBus
警告	500	2mA	400k Ω	500k Ω
故障	100	10mA	80k Ω	100k Ω

1.1 绝缘监测

有多种测量绝缘层的方法。但是, 较常用的两种方法是交流电流注入和电阻电桥。一般来说, 交流电流注入方法可在各种工作条件下灵活调整, 广泛用于直流充电, 但与电阻电桥方法相比, 其复杂性和成本更高。无论采用哪种方法, 该方法都必须满足精度、响应时间和工作电压限制等标准要求。与电阻电桥方法相关的关键挑战之一是处理较大的 RC 时间常数。某些系统 (如兆瓦充电器) 需要非常大的 Y 电容 (例如 $4\mu F$)。此参考设计 TIDA-010985 实现了电阻电桥方法, 专门设计用于通过采用全新的预测算法来处理较大的 Y 电容, 从而缩短测量时间, 同时无需进行大量计算 (如浮点运算)。此外, 这种新设计拓扑还限制了 Y 电容上的电压变化。表 1-2 展示了各种方法的比较概览。

表 1-2. 各种 IMD 方法的比较

方法	优点	缺点
交流电流注入 • 通常作为独立模块出售	<ul style="list-style-type: none"> 可以测量通电和未通电的线路 测量期间绝缘电阻不会降低 支持 UL 2231-2，包括大型 Y 电容 	<ul style="list-style-type: none"> 高硬件复杂性和成本 软件复杂性高（交流信号处理，浮点数学）
电阻电桥 • TIDA-01513, BQ79731 EVM • TIDA-010232 (MCU 处于隔离 GND 状态)	<ul style="list-style-type: none"> 易于实施 - 包括硬件和软件 低成本 低计算工作量 	<ul style="list-style-type: none"> 对于大型 Y 电容器 ($> 100\text{nF}$)，不支持 UL 2231-2 由于测量期间相对于 PE 的高电压摆幅，因此不支持 IEC 61851-23。将应用限制在 500Vbus 以下 仅能测量通电线路 可略微降低测量期间的绝缘电阻
平衡电阻电桥 + 预测算法 • TIDA-010985 (MCU 处于接地 GND 状态)	<ul style="list-style-type: none"> 易于实施 - 包括硬件和软件 低成本和较轻的计算能力 测量期间相对于 PE 的有限电压摆幅，支持 IEC 61851-23 支持 UL 2231-2，包括大型 Y 电容 	<ul style="list-style-type: none"> 仅能测量通电线路 可略微降低测量期间的绝缘电阻

1.2 主要系统规格

表 1-3. 关键 UL 2231-2, IEC 61851-23 规格

参数	UL 2231-2/IEC 61851-23 规格	TIDA-010985
跳闸精度 (对称和非对称故障)	15%	5%
响应时间	< 10 秒	< 2 秒 ($C_{iso} = 4\mu\text{F}$, $R_{iso} = 1\text{M}\Omega$)
线路与 PE 之间的电压变化占 VDC 的百分比	10%	10% (即 1kV 总线为 50V)

表 1-4. 主要电气规格

参数	规格	单位
Riso 测量范围 (测得的最大值)	2	MΩ
Riso 测量误差 (3σ)	±5	%
Ciso 测量范围 (测得的最大值)	9	μF
Ciso 测量误差 (3σ)	±15	%
隔离测量周期时间 (可配置)	2	s
高压总线电压 (最大值)	1000	V
ADC 满量程输入	3.3	V
分压器电阻	12.5 ±15%	MΩ
IMD 泄漏电流 (最大值 , 激活)	2	mA
IMD 泄漏电流 (最大值 , 未激活)	100	μA
电阻电桥功率耗散 (最大值)	0.85	W
电源	6-36 或隔离式 USB 转 LP	V
功耗 (最大值)	2	W
工作温度	-40 至 85	°C
接口	CAN 2.0	不适用

2 系统概述

2.1 方框图

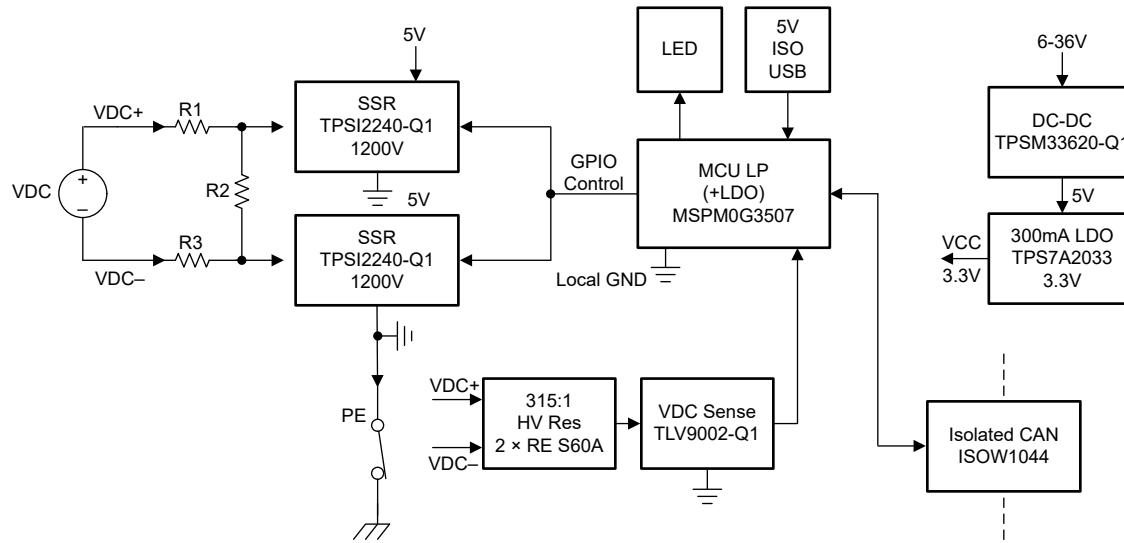


图 2-1. 系统方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 TIDA-010985 概述

图 2-2 展示了以下列表中所述的 TIDA-010985 模拟前端 (AFE) 关键系统元件：

1. 机械连接器，用于连接 DC+、DC- 和保护地 (PE)
2. 准平衡电阻网络，可提供多种测试电阻组合 (RsN, R1, RsP)。
3. TPSI2240 双向固态开关 (SW1, SW2)，用于替代电阻网络
4. 单电源反相放大器，用于检测 VDC- 相对于 PE 的电压。电压按比例缩小至 ADC 电平 (Vn)。需要计算 RisoN 和 RisoP。
5. 单电源电压缓冲器，用于检测 VDC+ 相对于 PE 的电压。电压按比例降低到 ADC 电平 (Vp)。需要计算 RisoN 和 RisoP。
6. 微控制器用于控制这些开关，(同时) 对模拟输出进行采样并计算绝缘电阻。

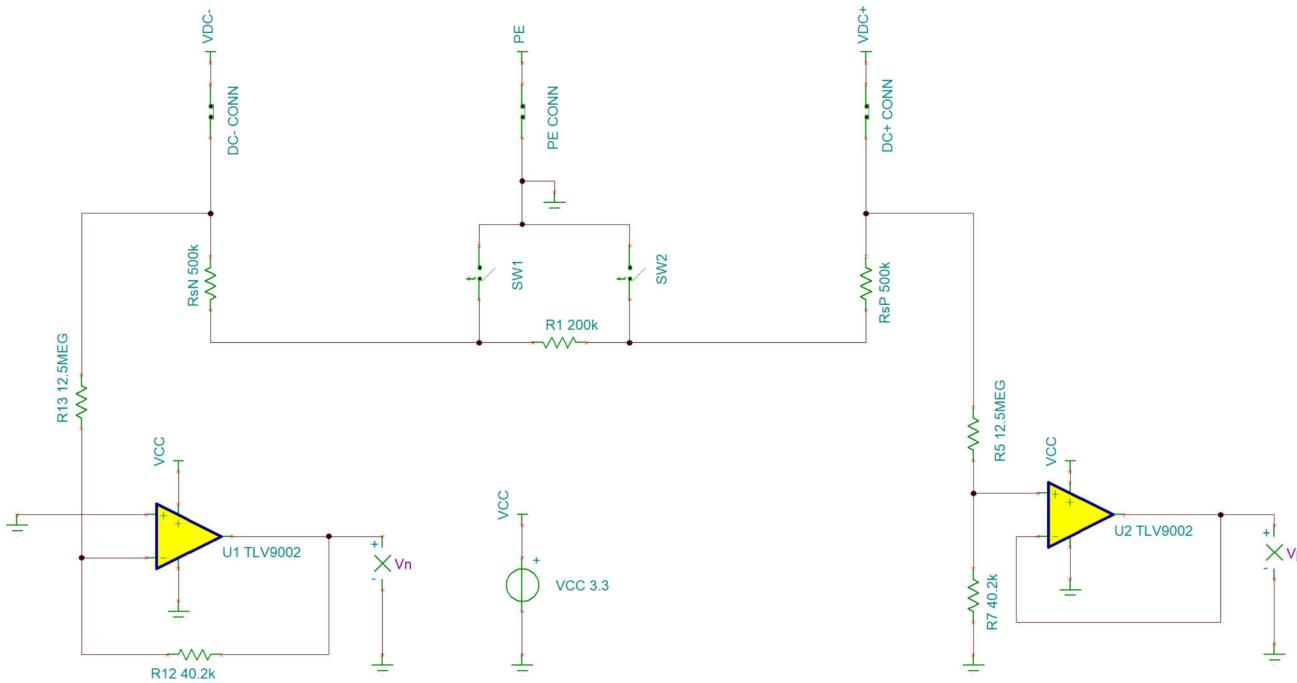


图 2-2. 未连接目标系统时的 TIDA-010985 简化原理图

图 2-3 展示了连接目标系统时的简化原理图。IMD 必须确定所有 R_{iso} 和 C_{iso} 被动值。

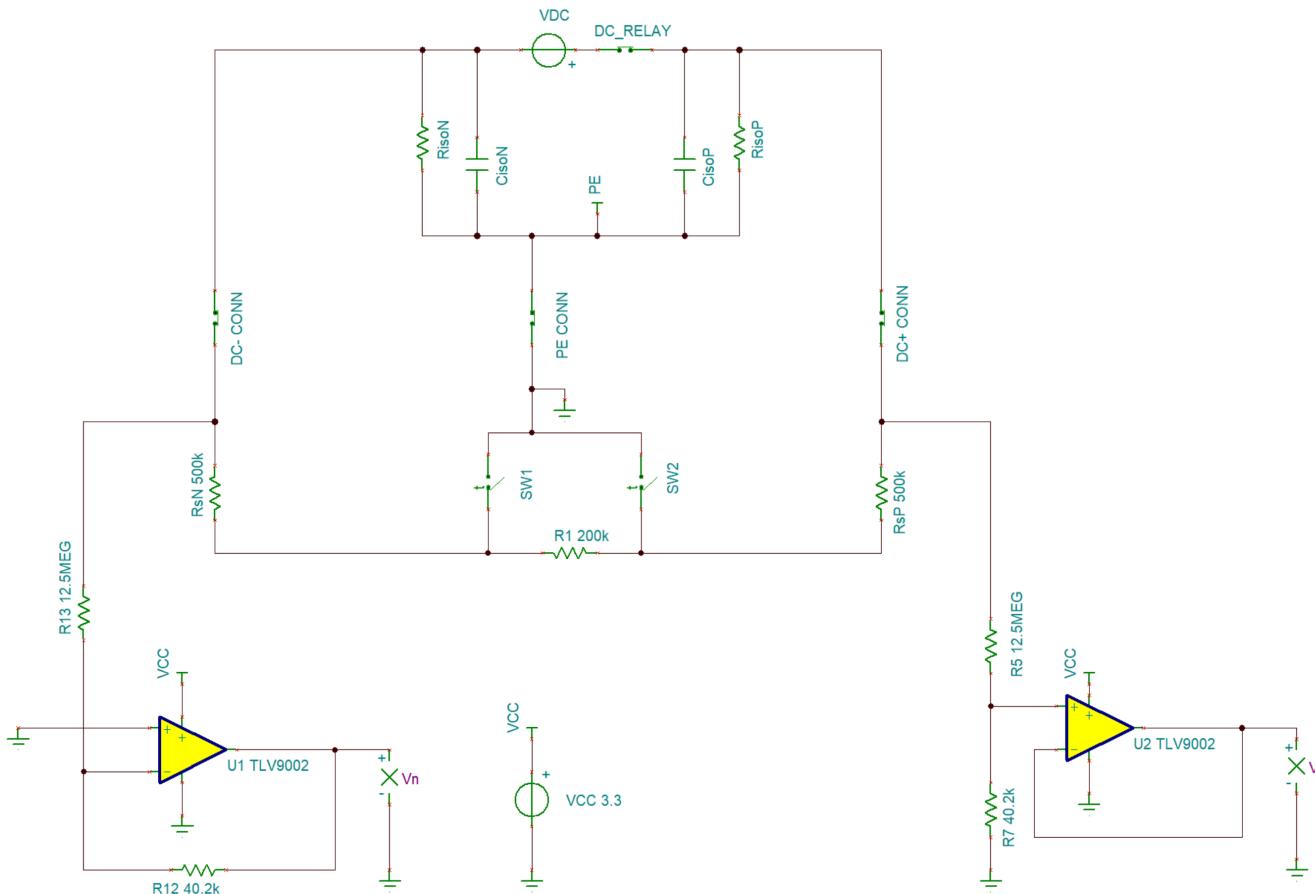


图 2-3. 连接目标系统时的简化设计原理图

2.2.2 求解未知隔离电阻

两个开关使用 RsP 、 RsN 和 $R1$ 实现多个电阻电桥测试比率。该配置可以检测任何给定的 $RisoP$ 与 $RisoN$ 之比。系统会检测非对称和对称故障。表 2-1 显示了 TIDA-010985 可能的开关状态和相应的公式。只需两种开关状态 (D 除外) 即可求解 $RisoP$ 和 $RisoN$ 。两个方程求解了两个未知数。

表 2-1. TIDA-010985 所有可能的开关状态

状态	SW1	SW2	RsP:RsN 比率	稳态方程
A	导通	关闭	7:5	$\frac{Vp}{Vn} = \frac{-RisoP \parallel (7R)}{RisoN \parallel (5R)}$
B	关闭	导通	5:7	$\frac{Vp}{Vn} = \frac{-RisoP \parallel (5R)}{RisoN \parallel (7R)}$
C	导通	导通	5:5	$\frac{Vp}{Vn} = \frac{-RisoP \parallel (5R)}{RisoN \parallel (5R)}$
D	关闭	关闭	不适用	不适用

理论上，设计人员可以选择 A、B 和 C 开关状态的任意两种组合。此参考设计使用开关状态 A 和 B 来求解隔离电阻。这种 AB 组合通过在开关状态之间生成最大电压差，同时限制 IEC 要求下的电压变化，来显著提高信噪比 (SNR)。选择该选项后，两个相关公式为：

$$\frac{Vp1}{Vn1} = \frac{-RisoP \parallel (7R)}{RisoN \parallel (5R)} \quad (1)$$

$$\frac{Vp2}{Vn2} = \frac{-RisoP \parallel (5R)}{RisoN \parallel (7R)} \quad (2)$$

其中

- $Vp1$ 是第一个 DC+ 测量电压 (开关状态 A)
- $Vn1$ 是第一个 DC- 测量电压 (开关状态 A)
- $Vp2$ 是第二个 DC+ 测量电压 (开关状态 B)
- $Vn2$ 是第二个 DC- 测量电压 (开关状态 B)

使用两个方程求解了两个未知数 ($RisoP$ 和 $RisoN$)。MATLAB® 可帮助求解方程。

```
% solve for two equations with two unknowns assuming settled voltages
clc
syms rp rn vp1 vp2 vn1 vn2 rs
% change the sign if we're using inverting op amp for the vn sense
eq1 = vp1/vn1 == (rp*7*rs/(rp+7*rs)) / (rn*5*rs/(rn+5*rs));
eq2 = vp2/vn2 == (rp*5*rs/(rp+5*rs)) / (rn*7*rs/(rn+7*rs));
eq3 = rs > 0 & vp1 > 0 & vn1 > 0;
eqns = [eq1, eq2, eq3];
%
[srna, srpa, parametersa, conditionsa] = solve(eqns,[rn, rp],ReturnConditions=true)
```

通过进行此计算可得出：

$$RisoN = \frac{-(35 \times Vn1 \times Vp2 - 35 \times Vn2 \times Vp1) \times RS}{(7 \times Vn1 \times Vp2 - 5 \times Vn2 \times Vp1 + 2 \times Vp1 \times Vp2)} \quad (3)$$

$$RisoP = \frac{-(35 \times Vn1 \times Vp2 - 35 \times Vn2 \times Vp1) \times RS}{(2 \times Vn1 \times Vn2 + 7 \times Vn1 \times Vp2 - 5 \times Vn2 \times Vp1)} \quad (4)$$

请注意，RS 常数定义为 $100k\Omega$ 。如果用户使用不同的比率，则可以修改 MATLAB 脚本以求解新选择的比率。

图 2-4 展示了采用 AB 组合时的电压波形示例。在本例中，每个开关状态持续一秒钟。由于需要测量这两种状态，因此一个 IMD 测量周期需要两秒钟。 $Vp1$ 和 $Vn1$ 在第一秒内同时测量， $Vp2$ 和 $Vn2$ 在接下来的第二秒内同

时测量。请注意， V_p 和 V_n 的同时 ADC 测量可抑制 HV 总线上的噪声干扰。Riso 答案取决于 V_p 与 V_n 之比的差异（而不是单个绝对 V_p 和 V_n ）。

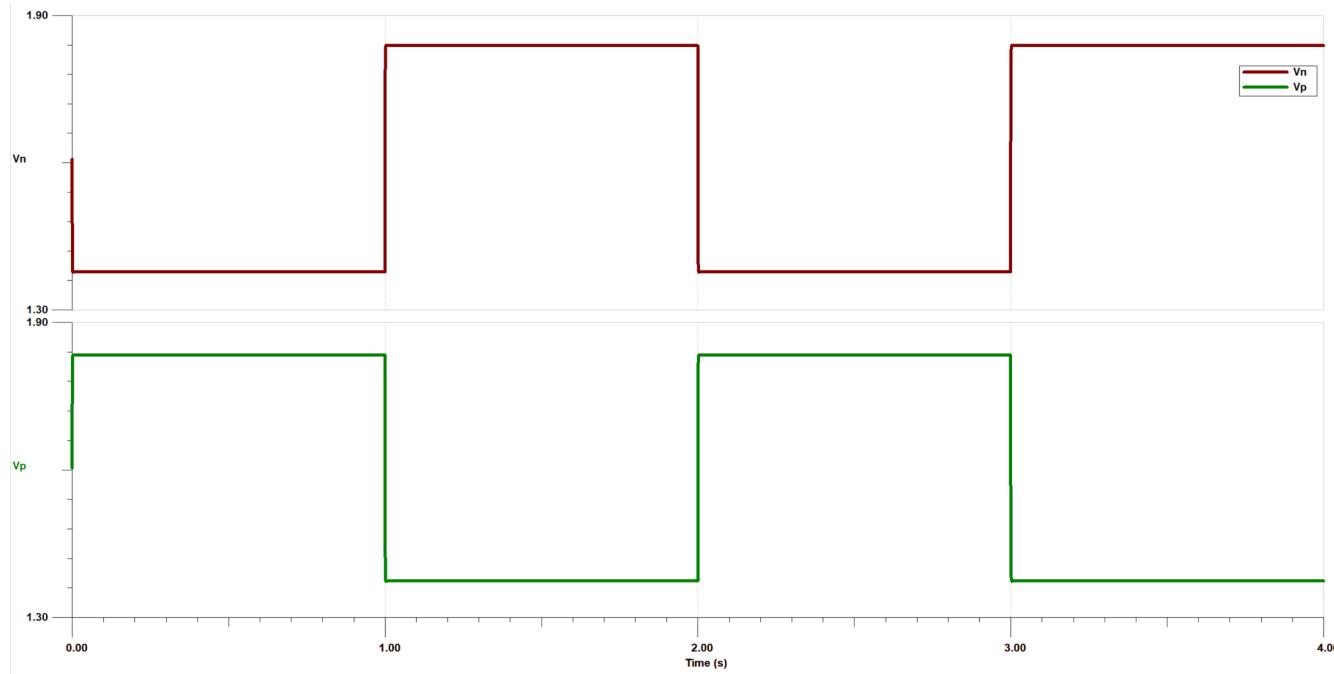


图 2-4. AB 开关切换模式波形示例

2.2.3 处理大时间常数情况

在上一个示例中，假设在 ADC 测量 V_p 和 V_n 之前没有明显的 RC 趋稳时间。在某些情况下（如图 2-5 中的示例），时间常数可以非常长。如果没有解决办法，系统可能需要等待很长的时间使电压稳定，从而无法满足标准响应时间要求（例如，UL 2231-2 为 10s）。

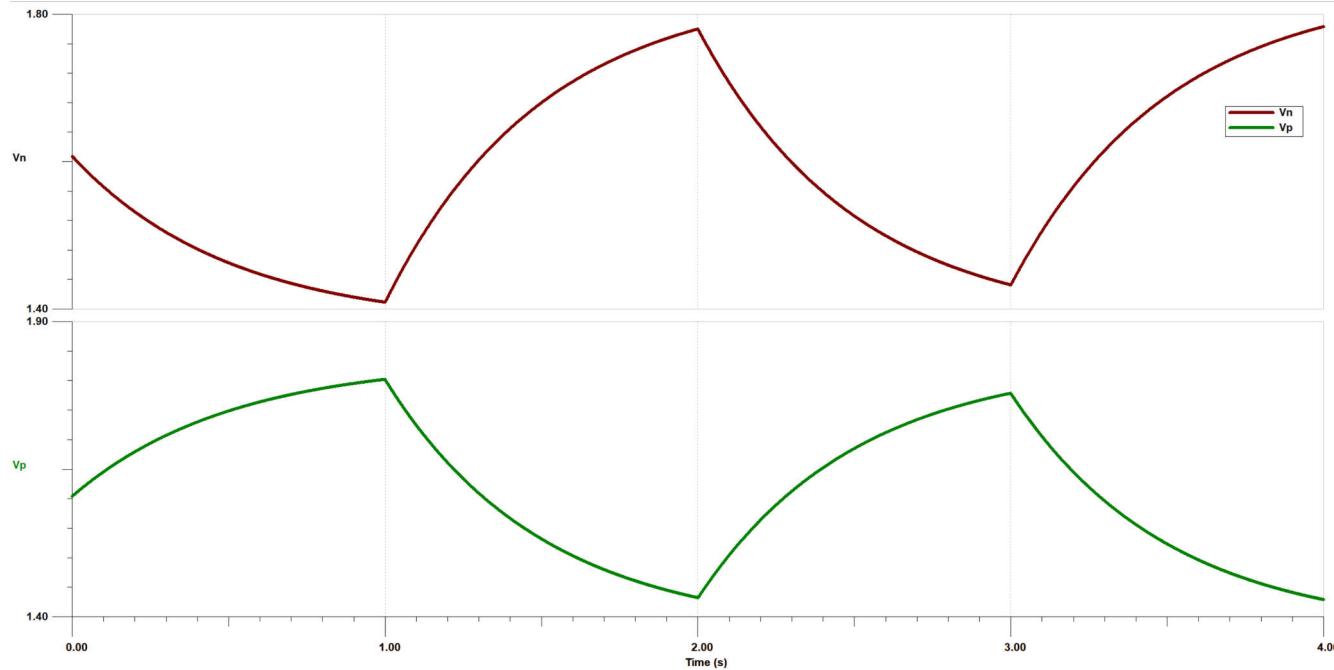


图 2-5. 具有大时间常数的波形示例

SW1 打开且 SW2 关闭时的时间常数 τ :

$$\tau = (RisoP || RisoN || RsP + R1 || RsN) \times (CisoP + CisoN) \quad (5)$$

有多种方法可以处理更大的时间常数情况 (即 μF 范围内的大型 Y 电容) :

- 可使用较低的 RsP 和 RsN 值, 但这会增加功率耗散和泄漏电流。这种方法通常并不实用, 因为更高的泄漏电流违反了标准要求。
- 可增加周期时间 (例如从 2s 增加到 3s) 以考虑额外的趋稳时间。由于存在 **UL** 响应时间限制, 这通常不实用。
- 使用多次测量和算法来预测最终的稳定电压。正确完成后, 这有助于在不增加功率和时间的情况下延长 **IMD** 工作范围。[节 2.2.4](#) 中介绍了此主题。

2.2.4 预测算法

当 **SW2** 接通时, 响应遵循指数衰减公式 :

$$V(t) = V_{inf} + V_o e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

其中

- V_{inf} 是最终稳定电压 ($t = \text{无穷大}$)
- V_o 是在时间零点时初始电压 $V(t_0)$ 和 V_{inf} 之间的差值。

请参阅 [图 2-6](#), 以便更好地了解这一概念。

需要特别关注稳定电压 V_{inf} 。这个公式中的三个未知数是 V_{inf} 、 τ 和 V_o 。如果 **ADC** 在三个不同的时间测量三个样本电压, 则会创建一个由三个公式组成的系统 :

$$V(t_0) = V_{inf} + V_o \quad (7)$$

$$V(t_1) = V_{inf} + V_o e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (8)$$

$$V(t_2) = V_{inf} + V_o e^{-\frac{t_2}{\tau}} \quad (9)$$

通过使用 $t_2 = 2 \times t_1$, V_{inf} 的计算得到了显著简化 :

$$V_{inf} = \frac{V(t_0) \times V(t_2) - V(t_1)^2}{V(t_0) - 2V(t_1) + V(t_2)} \quad (10)$$

- 请注意, 计算 V_{inf} 只需要四则运算。计算 V_{inf} 后, V_o 可以通过从 $V(t_0)$ 中减去 V_{inf} 来计算。
- 理论上, 只要 t_1 和 t_2 相对于彼此适当间隔, t_0 在衰减曲线上的位置就无关紧要。具体而言, 用户必须在三个样本之间保持相同的时间差。对于较长的时间常数, 电压稳定曲线在相同的周期时间内可能相对平坦。在有噪声的情况下, 增加三个样本之间的时间间隔会增加 **SNR**, 从而提高预测算法性能。

用于求解方程组的 **MATLAB** 脚本为 :

```
%> solution for exponential decay
clc
syms vt0 vt1 vt2 vinf v0 x
eq1 = vt0 == vinf+v0;
eq2 = vt1 == vinf+v0xx;
eq3 = vt2 == vinf+v0xxxx;
eq4 = vt0 ~= vt1;
eqns = [eq1, eq2, eq3, eq4];
[vinf, v0, x, para, conditions] = solve(eqns,[vinf, v0, x],ReturnConditions=true)
```

在 **TIDA-010985** 默认代码中, 三个样本之间的时间间隔为 330ms。这会将总 **IMD** 测量周期时间保持在 2s 以内, 同时使定点计算变得简单。要更改默认周期时间, 用户可以执行以下操作之一 :

系统概述

- 更改 `IMD.c` 中的 `E1 #define`。例如，将 `E1 #define` 从 990 更改为 600 (ms) 会将 IMD 周期时间从大约 2s 减小到大约 1.2s。确切的时间取决于数据采集周期后的几毫秒 (ms) 计算时间 (约 2ms)。如果用户由于某种原因想要增加周期时间，则除了 `E1 #define` 之外，还必须相应地更改数据缓冲区“`SamplesSize`”。在不更改默认 ADC 采样周期的情况下，由于可用的 `SRAM` (总计 32kB)，可以限制增加数据缓冲区：

```
#define SamplesSize 2000 // ADC buffer size
#define E1 990 // total time for Riso measurement is 2xE1 in ms
```

- 通过更改 `syscfg` 中的 `TIMER_0` 周期 (例如从 1ms 更改为 0.5ms)，可更改 ADC 采样间隔。这需要对其余代码进行一些更改，因为该代码假定采样周期默认为 1ms ADC。

使用以下公式可以计算时间常数：

$$\tau = \frac{-V_o}{V'(t_0)} \quad (11)$$

对于隔离电阻，只需要 V_{inf} 。对于总系统 Y 电容 ($C_{isoP} + C_{isoN}$)，在两个相邻的 ADC 测量值下，在 t_0 处的电压近似为 $V'(t)$ 。则 C_{iso} 为：

$$C_{iso} = \frac{\tau}{R_{isoP} || R_{isoN} || R_{sP} + R_1 || R_{sN}} \quad (12)$$

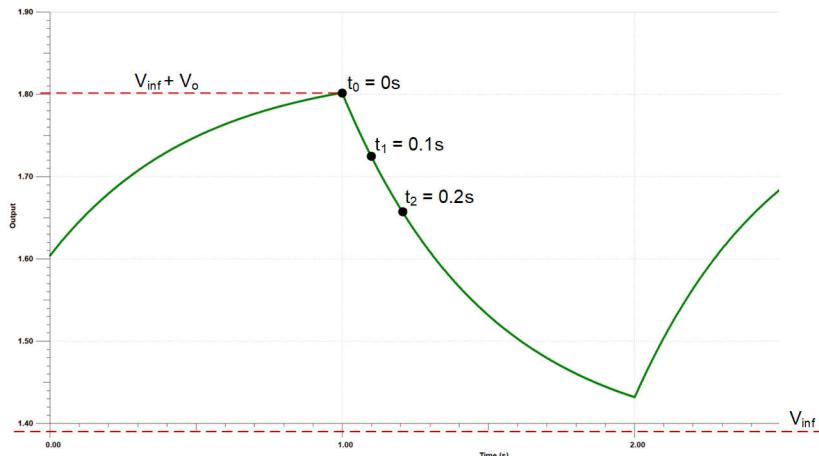


图 2-6. 采用用于预测算法的 ADC 样本的电压衰减曲线示例

可以对充电曲线进行类似的分析。最终稳态电压 V_{inf} 的计算公式为：

$$V_{inf} = V(t_0) + \frac{V(t_0)^2 - 2 \times V(t_0) \times V(t_1) + V(t_1)^2}{-V(t_0) + 2 \times V(t_1) - V(t_2)} \quad (13)$$

用于求解方程组的 MATLAB 脚本为：

```
%> charging solution
clc
syms vt0 vt1 vt2 vi v0 x
eq1 = vt0 == vi;
eq2 = vt1 == vi + v0x(1-x);
eq3 = vt2 == vi + v0x(1-x);
eq4 = vt0 ~ = vt1;
eqns = [eq1, eq2, eq3, eq4];
%
[svi, sv0, sx, para, conditions] = solve(eqns,[vi, v0, x],ReturnConditions=true)
```

一个重要的考虑因素是知道何时应用预测算法。如果电压快速稳定，应避免使用预测算法。在求解 `Riso` 或 `Ciso` 之前等待更长的时间更为实际。目前，该软件会根据电压时间导数 (由 `Vbus` 电压归一化) 执行一些基本检查，以

设置预测模式的阈值。此方法确实需要在已知负载的情况下进行一些调整，以提供可靠的运行。以下是代码中可能存在的模式：

- `#define SETTLED_MODE`
- `#define DECAY_MODE`
- `#define CHARGE_MODE`
- `#define OUT_OF_RANGE_MODE`

2.2.5 了解误差源

MSPM0G3507 仅支持定点数学运算，因此需要在一定程度上考虑数字溢出，以显著减少误差和精度损失。当前代码经过优化，可在最重要的情况下（接近故障和警告阈值）保持精度和准确度。用户可以切换到支持浮点数学的 MCU 来避免这一难题。

专门选择元件容差以满足设计目标精度。RES60A 电阻器等一些无源器件的最大绝对容差为 15%，当 R_{iso} 处于 $M\Omega$ 范围内时，会影响测量精度。但是，这并不重要，因为需要尽可能在 $100\Omega/V$ 的故障触发点附近实现最高精度。对于 1kV 总线，为 $100k\Omega$ 。在这个水平下，RES60A 容差对于 5% 精度目标并不显著。但是，必须补偿并联 RES60A 和其他电阻时的等效电阻读数。

到目前为止，IMD 假定在特殊条件下无噪音工作，这为开始了解基本概念提供了一个良好位置。实际上，TIDA-010985 的性能在很大程度上取决于噪声控制的好坏。以下步骤有助于降低此设计的噪声：

- 通过硬件滤波限制输入噪声
- 通过遵循 PCB 布局指南来优化 SNR
- ADC 硬件均值计算（默认设置为 128）
- 通过软件对多个 ADC 读数或预测求平均值，从而估算稳定电压。对于基于非预测的 IMD 计算，软件会对 50 个相邻 ADC 样本求平均值以估算稳定电压。
- 对于基于预测的 IMD 计算，软件计算 330 个预测值的平均值，以估算稳定电压（即 V_{p1} , V_{n1} , V_{p2} , V_{n2} ）。较长的时间常数会产生更平坦的电压稳定曲线并降低存在噪声情况下的预测精度。如前所述，增加三个样本之间的时间间隔有助于提高预测性能。

2.3 重点产品

2.3.1 LP-MSPM0G3507

LP-MSPM0G3507 LaunchPad™ 开发套件是基于 MSPM0G3507 的易用型评估模块 (EVM)，该器件包含在 MSPM0G3507 M0+ MCU 平台上开始开发所需要的全部资源，包括用于编程、调试和能量测量的板载调试探针。该板包含三个按钮、两个 LED（其中一个 RGB LED）以及模拟温度传感器和光传感器，还具有一个外部缓冲器，用于显示 4MSPS 时的高速 ADC 性能。

2.3.2 TPSI2240-Q1

TPSI2240-Q1 是一款隔离式固态继电器，专为高压汽车和工业应用而设计。TPSI2240-Q1 采用 TI 的高可靠性电容增强隔离技术，并与内部背对背 MOSFET 相结合，构成了无需次级侧电源的集成解决方案。

2.3.3 RES60A-Q1

RES60A-Q1 是一款匹配电阻分压器，采用薄膜 SiCr 技术和德州仪器 (TI) 的现代、高性能模拟晶圆工艺实现。高质量 SiO_2 绝缘层封装了电阻器，因此可在极高的电压下使用，持续运行时电压高达 1400VDC，HiPOT 测试 (60s) 时电压高达 4000VDC。该器件具有 $R_{HV} = 12.5M\Omega$ 的标称输入电阻，并提供多种标称比率以满足各种系统需求。

2.3.4 TLV9002-Q1

TLV900x-Q1 系列包括单通道 (TLV9001-Q1)、双通道 (TLV9002-Q1) 和四通道 (TLV9004-Q1) 低压 (1.8V 至 5.5V) 运算放大器，具有轨至轨输入和输出摆幅功能。这些运算放大器为空间受限、需要低压运行和高容性负载驱动的汽车应用（例如信息娱乐系统和照明）提供了一种具有成本效益的选项。TLV900x-Q1 系列的容性负载驱动器具有 500pF 的电容，而电阻式开环输出阻抗使其能够在更高的容性负载下更轻松地实现稳定。这些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 TLV600x-Q1 器件。

2.3.5 TPSM33620-Q1

TPSM336xx-Q1 是一款 0.6A、1A 或 2A，36V 输入同步直流/直流降压汽车电源模块，它在紧凑且易于使用的封装中整合了引线框上倒装芯片封装，集成功率 MOSFET，符合 AEC-Q100 标准的电感器和启动电容器。小型 HotRod QFN 封装技术可提高热性能，确保可在高环境温度下工作。展频有助于实现出色的 EMI 性能。该器件提供两种支持 3.3V 和 5V 的固定输出电压选项。这些器件可通过反馈分压器配置为 1V 至 7V 输出，并通过 MODE/ SYNC 引脚在自动或强制 PWM 模式下运行。该器件仅需四个外部元件即可实现 3.3V 和 5V 固定输出设计，这可简化 PCB 布局和设计。

2.3.6 TPS7A2033

TPS7A20 是一款超小型低压降 (LDO) 线性稳压器，可提供 300mA 的输出电流。TPS7A20 旨在提供符合射频和其他敏感模拟电路要求的低噪声、高 PSRR 和出色的负载及线路瞬态性能。TPS7A20 采用创新的设计技术，无需噪声旁路电容便可提供超低的噪声性能。TPS7A20 还具有低静态电流的优势，专为电池供电应用而设计。TPS7A20 具有 1.6V 至 6.0V 的输入电压范围和 0.8V 至 5.5V 的输出电压范围，可用于各种应用。该器件使用精密基准电路，可在不同负载、线路和温度变化之间提供 1.5% 的最大精度。

2.3.7 ISOW1044

ISOW1044 器件是一款电隔离式控制器局域网 (CAN) 收发器，内置隔离式直流/直流转换器，无需在空间受限的隔离式设计中使用单独的隔离式电源。低发射、隔离式直流/直流转换器符合 CISPR 32 辐射发射 B 类标准，在简单的两层 PCB 上仅使用两个铁氧体磁珠。额外的 20mA 输出电流可用于为板上的其他电路供电。该器件具有一个集成的 10Mbps GPIO 通道，有助于去除用于诊断、LED 指示或电源监控的额外数字隔离器或光耦合器。

2.3.8 TSM24CA

TSM24CA 是低电容 TVS 二极管，属于 TI 浪涌保护器件系列。TSM24CA 可将高达 30A 的 IEC 61000-4-5 (8 μs 至 20 μs) 故障电流进行可靠分流，以确保系统免受高功率瞬态冲击或雷击。该器件提供了一种满足常见工业信号线路 EMC 要求的解决方案，可承受通过 42 Ω 阻抗耦合的高达 1kV 的 IEC 61000-4-5 开路电压，将浪涌钳位至 40V (IPP = 24A)。TSM24CA 还具有 12pF 的极低线路电容，可保护常见汽车通信网络 (如 CAN) 免受电动汽车充电应用中的浪涌影响。

2.3.9 TLV431B

TLV431 器件是低压 3 端子可调电压基准，在适用的工业和商业级温度范围内具有指定的热稳定性。可以通过两个外部电阻器，将输出电压设置为介于 VREF (1.24V) 和 6V 之间的任何值。这些器件具有比广泛使用的 TL431 和 TL1431 并联稳压器基准电压更低的工作电压 (1.24V)。

备注

该电压基准在参考设计运行期间是可选的。默认情况下，ADC 使用 VDD 作为电压基准，这不是问题，因为结果取决于 Vp 与 Vn 的比率。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

用于评估此参考设计的硬件由以下各项组成：

- TIDA-010985
- LP-MSPM0G3507
- USB Type-C® 电缆
- USB 隔离器（用于为 LP 供电并保护笔记本电脑）。为整个系统供电的 USB 是评估参考设计的默认方法。
- 笔记本电脑
- 四通道示波器
- 两个额定电压高于 1kV 的高压差分探头
- 两个用于低压信号测量的单端探头 (TPP0500B)
- 用于调试数字信号的逻辑分析仪 (Saleae 逻辑 16) (可选)
- 高压直流电源 SL1250-1.2/UI+LXI
- 用于确保高压测试安全性的联锁安全箱
- 可选 12V 直流实验室电源 (5W)，如果需要外部电源而不是 LP 的 USB 电源来供电 (默认选项)

3.2 软件

评估参考设计需要 Code Composer Studio™ (CCS) 软件。代码示例位于 [TIDA-010985](#) 工具文件夹中。此设计使用了 CCS 版本 12.8.1.000005。首次安装 CCS 时，请确保在安装期间检查 MSP 软件包。

- 此设计使用 [MSPM0-SDK](#) 版本 2.7.0.05。如果未通过 CCS 安装步骤安装 SDK，请下载并安装 SDK。以下是一个安装路径示例：C:\ti\mspm0_sdk_2_07_00_05。确保工程的链接资源路径变量包含此 SDK 路径。在“项目”→“属性”→“资源”→“链接资源”下配置这些设置。

3.3 测试设置

3.3.1 硬件测试设置

图 3-1 展示了基本测试设置。

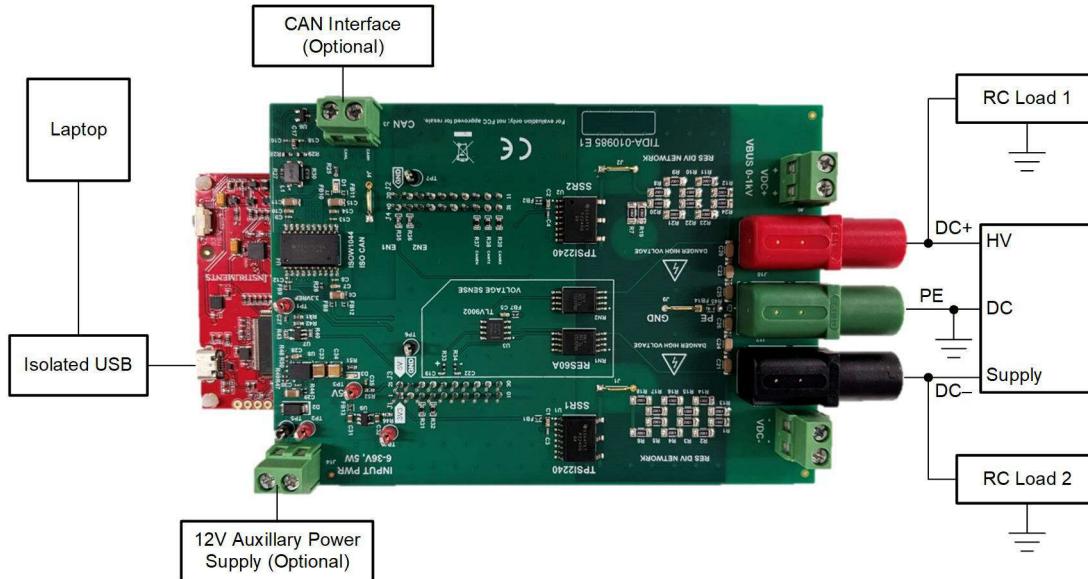


图 3-1. 硬件测试设置

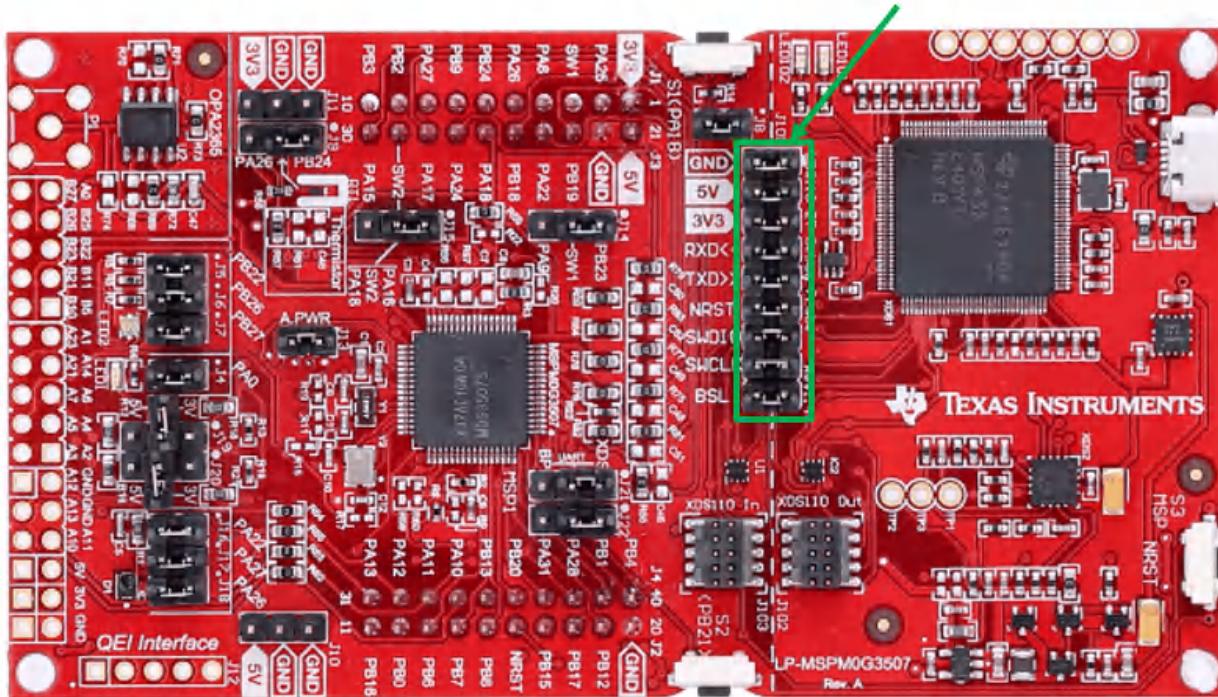


图 3-2. LaunchPad™ J101 默认跳线配置

1. 按图 3-1 中所示，进行所有必需的硬件连接。在所有连接正确固定并放置在安全箱内之前，请勿为高压电源通电。
2. 将目标测试 RC 负载连接到高压连接器。有几个方便的选项供用户使用：
 - a. 用于 VDC+ 连接的 J6 或 TP11
 - b. 用于 VDC- 连接的 J7 或 TP10
 - c. 用于保护地 (PE) 的 J9。请注意，系统接地连接到 PE。
3. 将示波器探头连接到所需的 SW_EN 引脚 (J13 引脚 39 和 40) 和 ADC 输入引脚 (J5 引脚 25 和 27) 以调试电路板
4. 如果需要，将高压差分探头连接到高压连接器以进行调试
5. 导入演示工程并启动 CCS 软件调试模式
6. 打开高压电源并观察波形以及计算得出的电阻和电容值

备注

要使用外部直流电源 (TIDA-010985 板的 J14 输入) 为参考设计供电，必须将 R52 和 R46 短接，并且必须移除 J101 上的跳线 LP 器件 (除 GND、SWDIO 和 SWCLK 之外的所有跳线，才能使调试器正常工作)。

3.3.2 软件测试设置

1. 演示工程示例位于 [TIDA-010985](#) 工具文件夹中。CCS 版本：此设计使用 12.8.1.00005。安装 CCS 和 MSPM0 SDK (如果尚未完成)。
2. 下载并导入演示工程
3. 启动 CCS 软件调试模式
4. 选中 CCS 监视窗口的持续刷新选项
5. 在监视窗口中添加变量以观察测量，例如 gRn、gRp、gRn 和 gRp 是基于两个与 RP 和 RN 并联的 $12.5\text{M}\Omega$ RES60A 电阻器的补偿值。对于有效的 RP 和 RN，请在观察窗口中添加 “rn” 和 “rp” 。

6. 如果需要更改 ADC 的默认设置 (例如计时和硬件均值计算) , 请修改工程中的 **syscfg** 文件。默认情况下 , 两个 ADC (ADC0 和 ADC1) 采样周期设置为 1ms , 硬件平均值的数量设置为 128 次转换 (图 3-3 至 图 3-5) 。请注意 , 硬件均值计算有助于降低噪声对测量的影响。有关如何正确更改 IMD 循环时间的更多信息 , 请参阅 [预测算法](#) 部分。

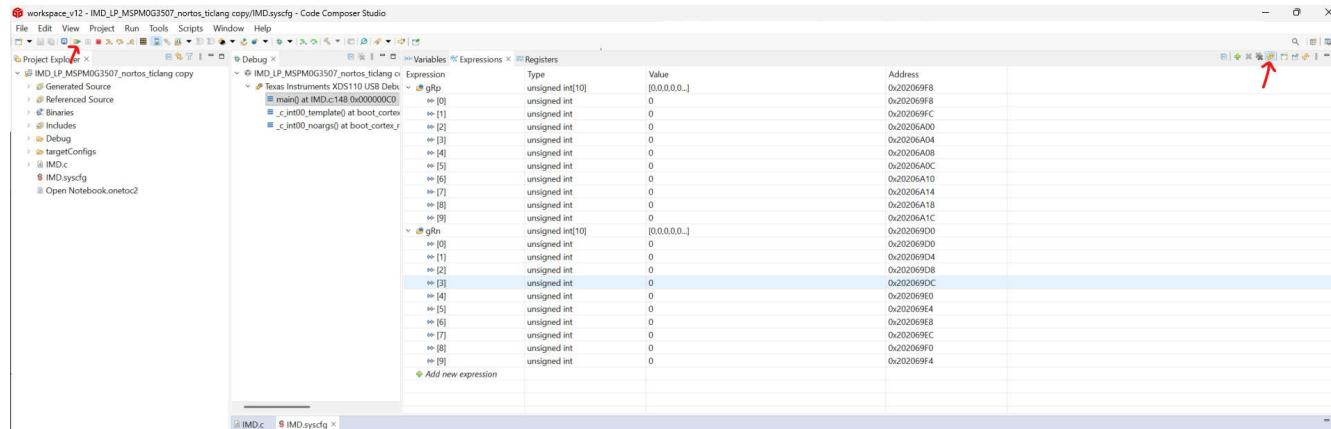


图 3-3. 在调试会话期间 , CCS Expression Watch 窗口在持续刷新模式下运行

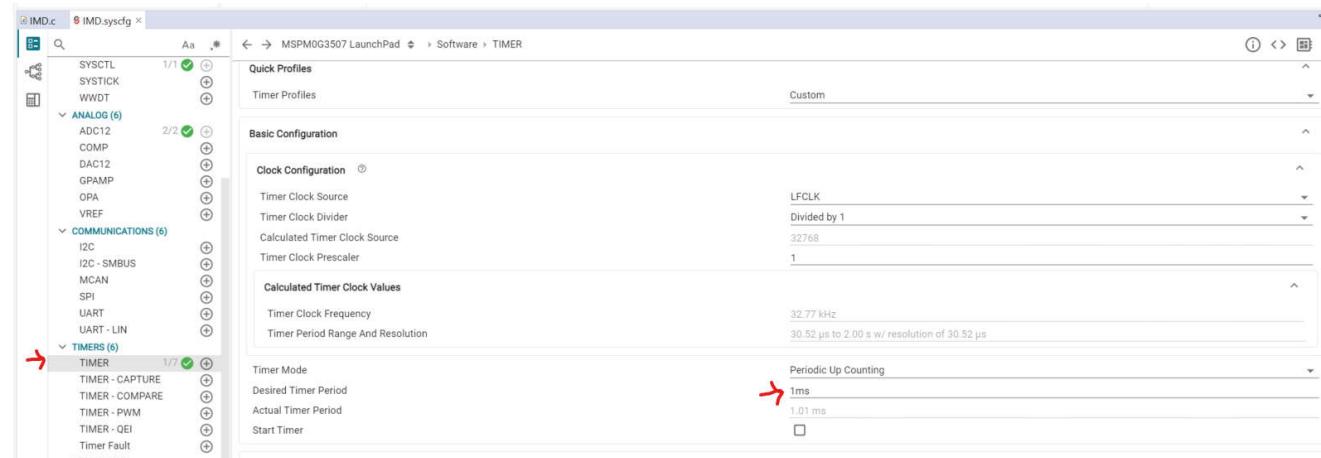


图 3-4. syscfg 计时器周期设置

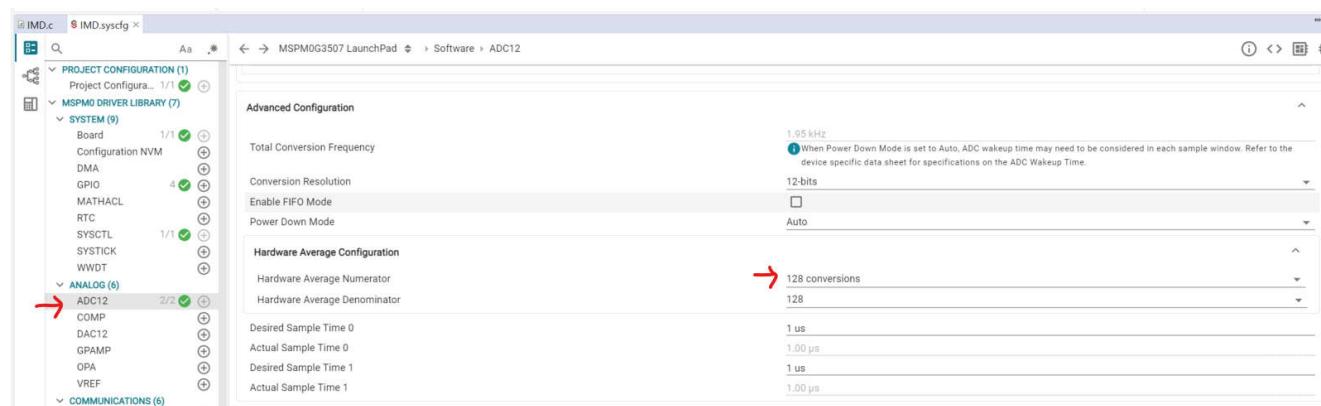


图 3-5. syscfg ADC 硬件均值计算设置

3.4 测试结果

每个测试条件均包括十个用于统计分析的 IMD 测量值（均值和标准差）。在某些情况下，定点数学误差很大。总体而言，测量误差和响应时间远低于 UL 2231-2 要求（ $\pm 15\%$ ，10 秒）。

在 图 3-6 中，对于非对称故障，显示的误差是故障条件下的 Riso。由于时间常数非常大，“ $1M\Omega$ - $1M\Omega$ ”案例需要 3s 测量周期才能解决故障。

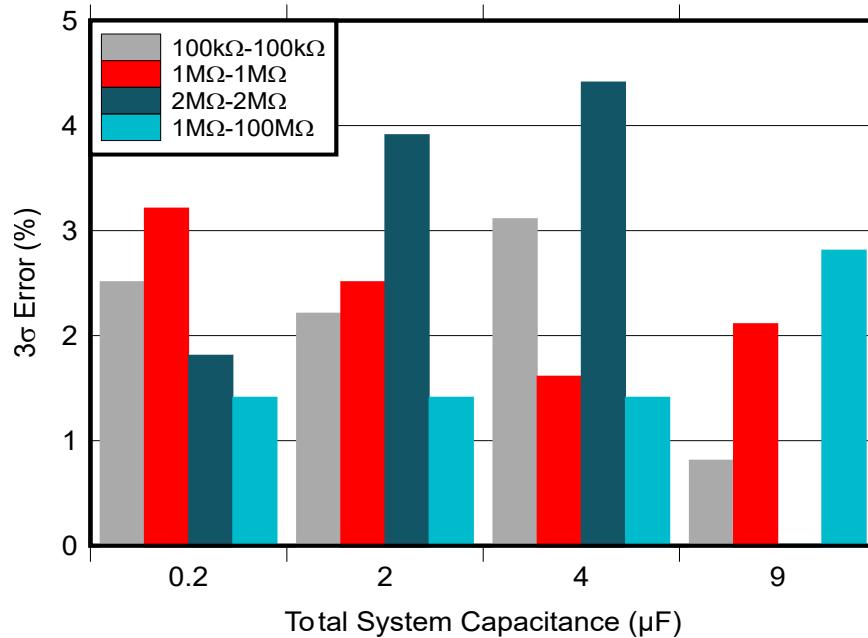


图 3-6. IMD Riso 测量误差，1000VDC，2s 周期

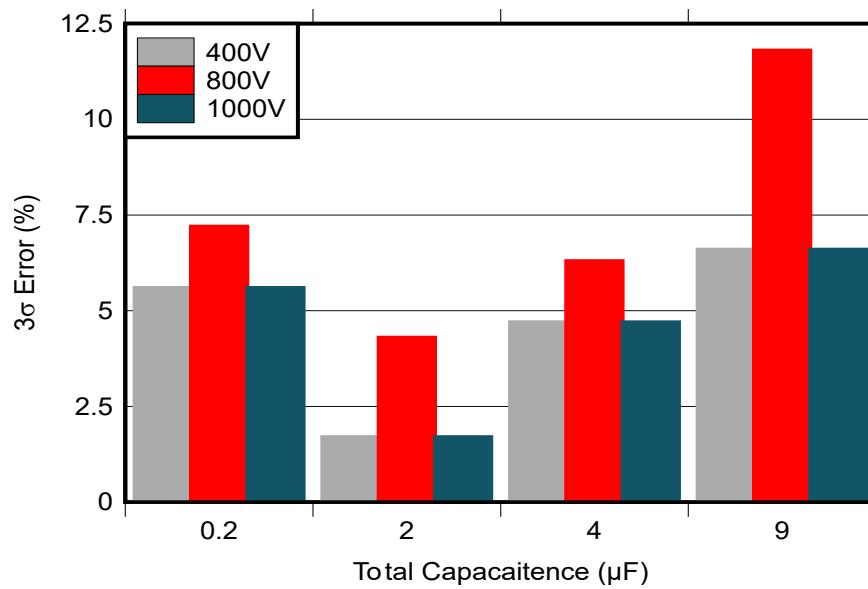


图 3-7. IMD Ciso 误差， $1M\Omega$ 至 $100k\Omega$ ，2s 周期

在图 3-8 中，相对较短的时间常数意味着无需预测最终的稳态电压。

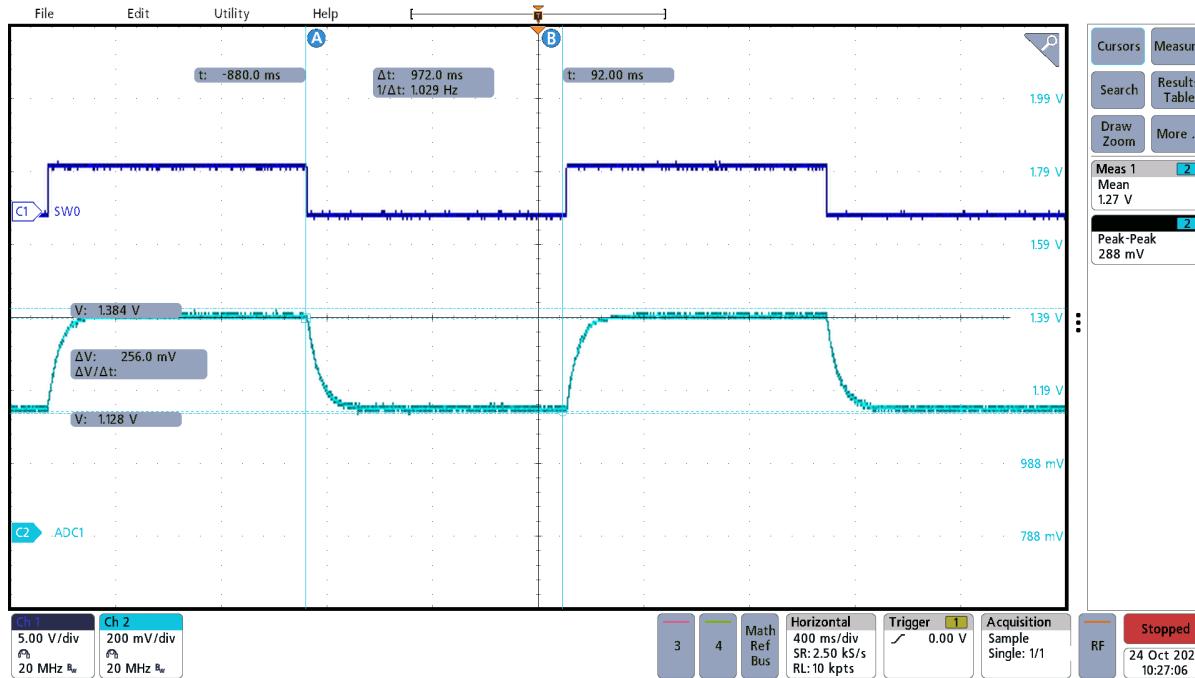


图 3-8. 800VDC、 $0.1\mu\text{F}$ 、 $1\text{M}\Omega$ 对称条件下的开关波形捕获

在图 3-9 中，相对较长的时间常数意味着必须预测最终的稳态电压。

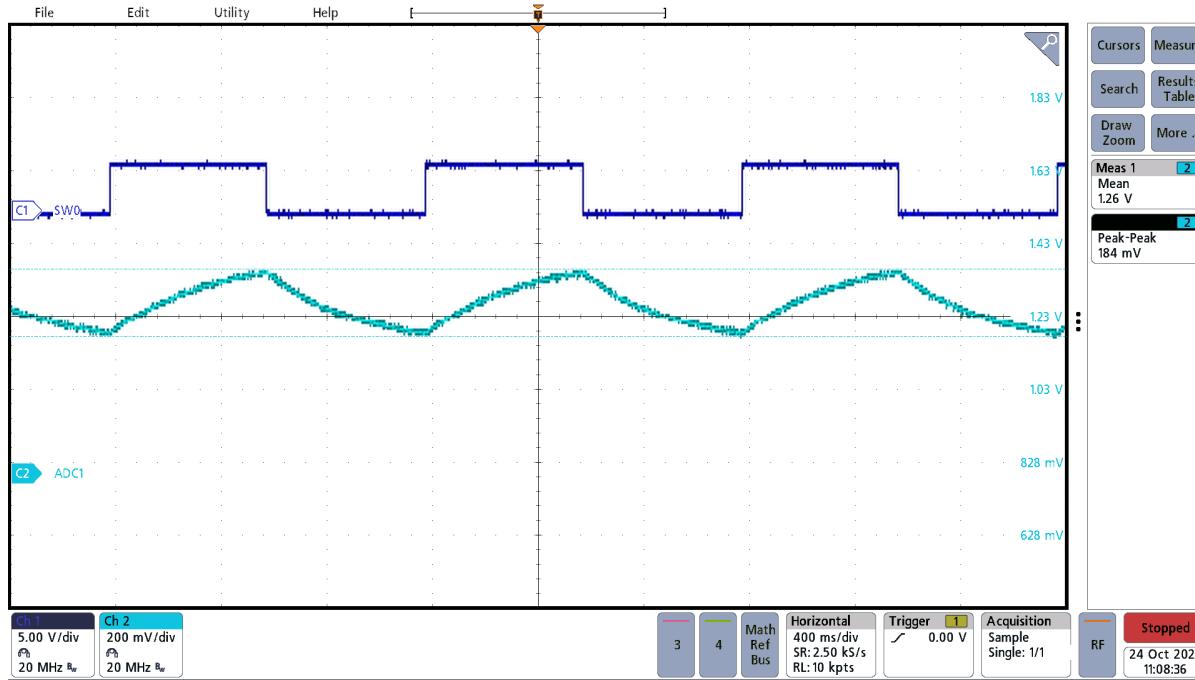


图 3-9. 800VDC、 $1\mu\text{F}$ 、 $1\text{M}\Omega$ 对称条件下的开关波形捕获

图 3-10 展示了开关时序图。请注意，每个开关状态保持打开约 980ms。ADC 采样周期约为 1ms。ADC 采集周期之后的计算时间约为 1.98ms。

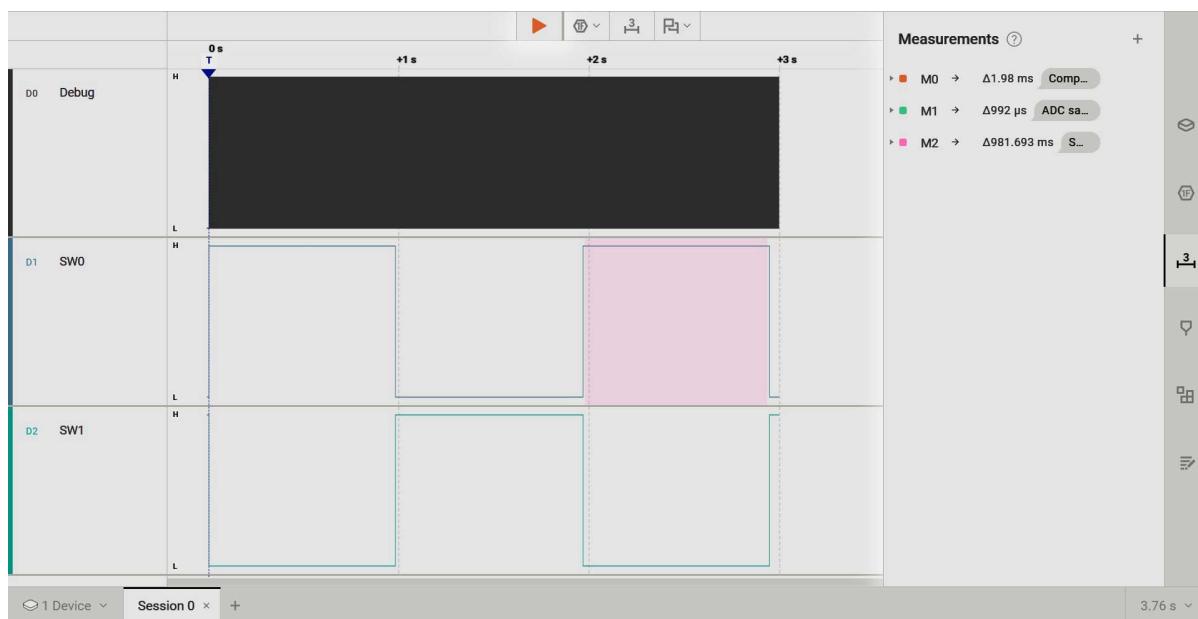


图 3-10. 开关时序图

图 3-11 展示了大约 2ms 的计算时间，其中包括所有数学计算，例如预测和求解未知数。

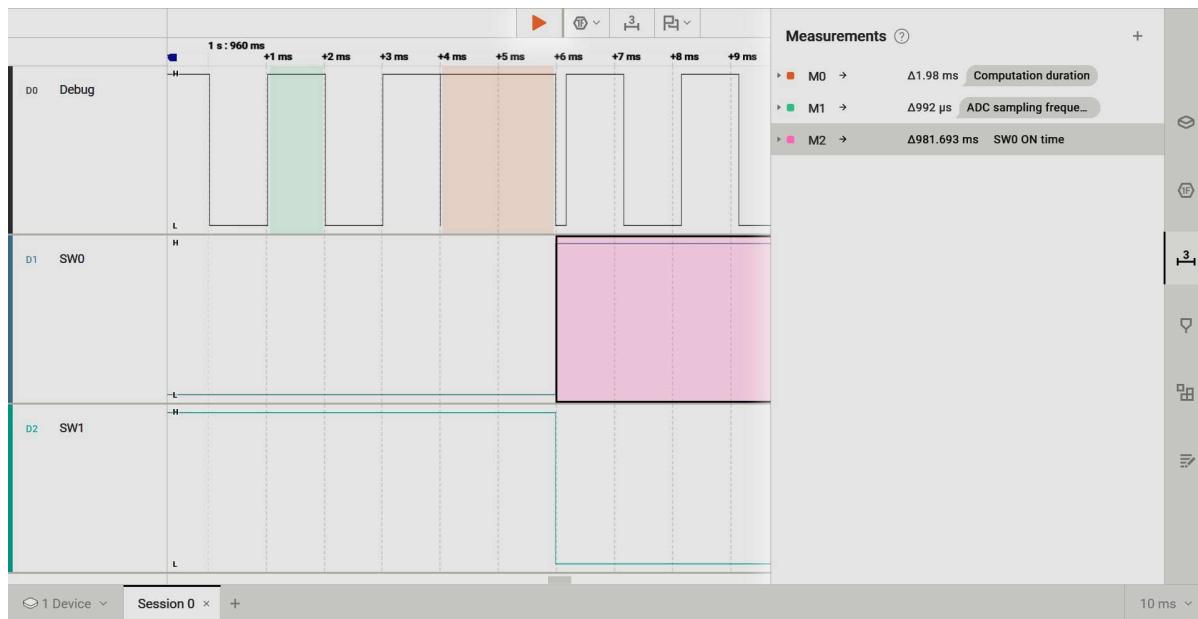


图 3-11. 放大时序图

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-010985](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010985](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

PCB 布局可能会因具体的设计要求而异，例如隔离等级和为设计选择的元件。

- 通常，可参考数据表中的各个器件指南以获取特定于器件的布局建议。
- 对于高压系统设计，间隙和爬电规则是 PCB 布局时的一个重要因素。污染等级、工作电压、材料特性和其他环境因素（例如，海拔高度和湿度）可能会影响特定设计的爬电距离和间隙要求。通常在 IEC-61851-1 和 UL-2202 等标准中规定了这些要求。
- 为了显著减少噪声耦合，应避免将数字和模拟信号布线在一起。具有适当的接地平面、屏蔽，显著减小信号环路面积和滤波器有助于控制噪声。
- TIDA-010985 是一个 AFE 参考设计示例，可基于模块化需求与 TI LaunchPad 配合使用。在理想情况下，将 MCU ADC 与 AFE 放置在同一 PCB 上，可显著缩短布线长度，从而提高系统性能。

4.1.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010985](#) 中的设计文件。

4.2 工具和软件 {必填主题}

工具

CCSTUDIO	Code Composer Studio™ 集成式开发环境 (IDE)
MSPM0-SDK	MSPM0 软件开发套件 (SDK)

软件 {如果适用}

软件	描述性文本

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[高压电动汽车充电和太阳能中的绝缘监测 AFE 参考设计指南](#)
- 德州仪器 (TI)，[具有雪崩保护功能的 TPSI2240-Q1 1200V、50mA 汽车级增强型固态继电器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[RES60A-Q1 汽车级 1400V_{DC} 精密电阻分压器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[MSPM0G3507 LaunchPad 开发套件 \(LP-MSPM0G3507\) 用户指南](#)

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](#)。

4.5 商标

TI E2E™, LaunchPad™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments. MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc. USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum. 所有商标均为其各自所有者的财产。

5 关于作者

KELVIN LE 在德州仪器 (TI) 担任系统工程师。Kelvin 致力于为能源领域开发系统设计，重点关注电动汽车充电。Kelvin 自 2015 年以来一直在 TI 工作。Kelvin 在中央俄克拉荷马大学获得生物医学工程理学学士学位。他还获得了德克萨斯大学奥斯汀分校的电气和计算机工程硕士学位。

ANDREAS LECHNER 是德州仪器 (TI) 能源基础设施和可再生能源系统团队的系统工程师。Andreas 获得了德国兰茨胡特应用技术大学的电气工程硕士学位。

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (December 2025) to Revision A (January 2026)	Page
• 更新了方框图以支持 TPSI2240-Q1 器件。	1
• 更新了 未接地直流配电系统中的绝缘监测器件 。	2
• 更新了 方框图 以支持 TPSI2240-Q1 器件。	5

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