

*Application Note***大型 Y 电容器电阻电桥直流绝缘监测器件的设计注意事项**

Kelvin Le, Tilden Chen

摘要

测量绝缘层的较常用的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 $4\mu\text{F}$ ）。此应用手册探讨了电阻电桥方法设计注意事项，该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）。

内容

1 简介	2
1.1 绝缘监测.....	3
2 详细说明	4
2.1 求解未知隔离电阻.....	7
2.2 处理大时间常数情况.....	9
2.3 预测算法.....	10
2.4 了解误差源.....	13
2.5 测试结果.....	14
3 总结	15
4 参考资料	15

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

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 HV 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。

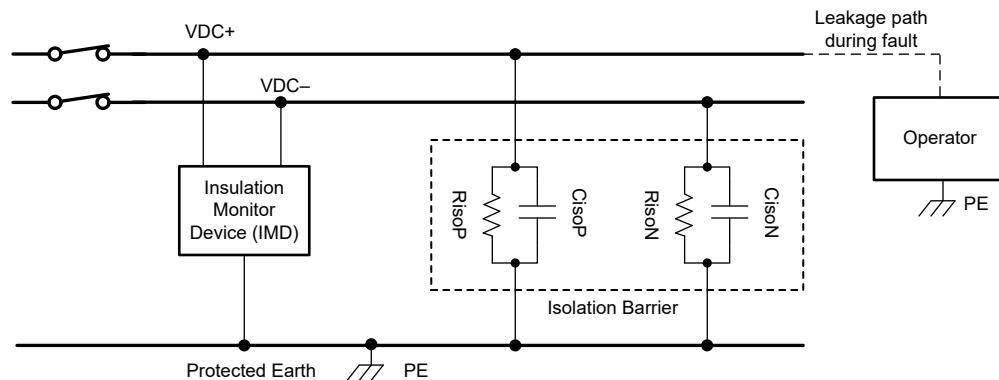


图 1-1. 未接地直流配电系统中的绝缘监测器件

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 $4\mu F$ ）。TIDA-010985 实现了电阻电桥方法，该参考设计专门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	<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	<ul style="list-style-type: none"> 实施简便 - 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 ($> 100nF$)，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	<ul style="list-style-type: none"> 实施简便 - 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

[表 1-3](#) 总结了与 UL 2231-2 和 IEC 61851-23 相比，TIDA-010985 的关键规范。

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 ($C_{iso} = 4\mu F$, $R_{iso} = 1M\Omega$)
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)

2 详细说明

本应用手册的设计注意事项基于 TIDA-010985 参考设计硬件。为方便起见，TIDA-010985 系统方框图如图 2-1 所示。

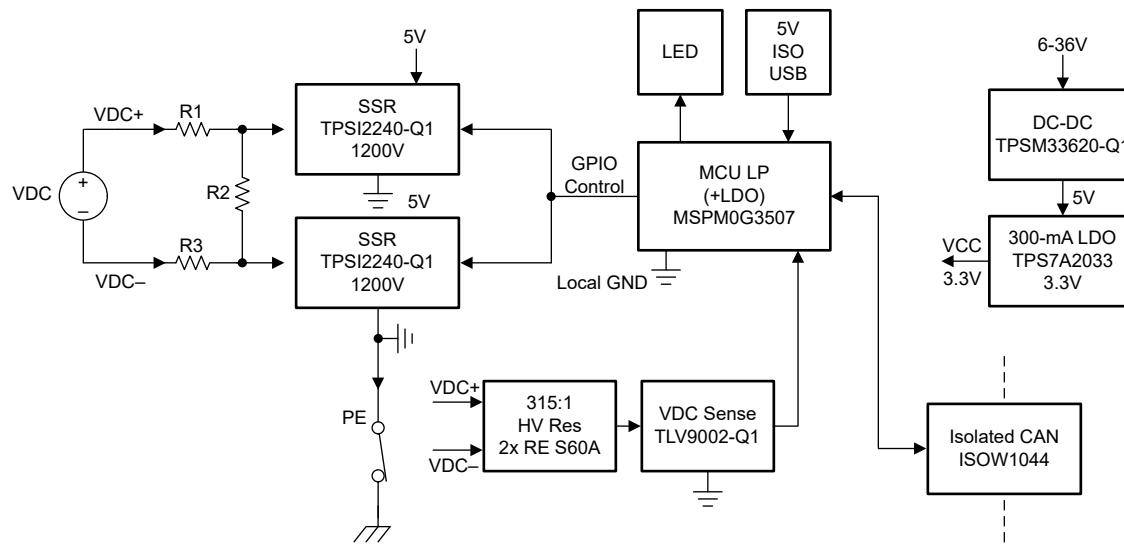


图 2-1. TIDA-010985 系统方框图

如图 2-2 所示，TIDA-010985 模拟前端 (AFE) 的关键系统元件包括：

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。

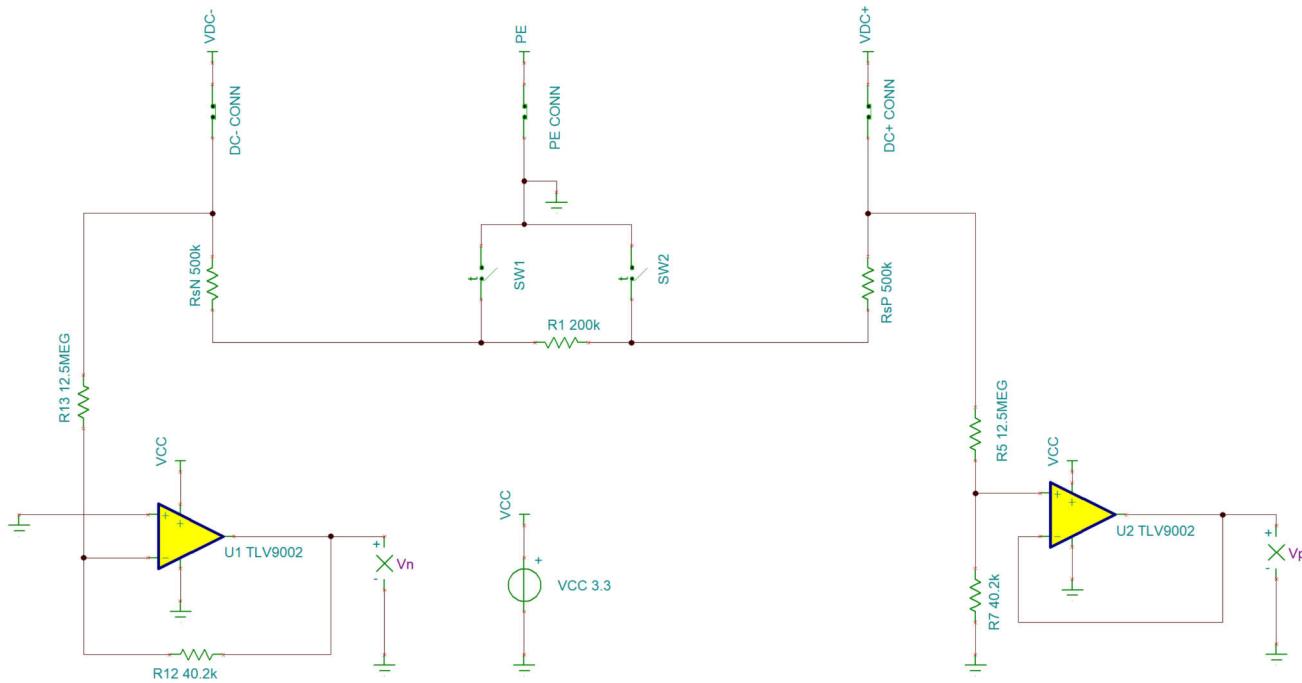


图 2-2. 未连接目标系统时的 TIDA-010985 简化原理图

图 2-3 展示了连接目标系统时的简化原理图。所有 Riso 和 Ciso 无源器件都是 IMD 需要解决的未知因素。

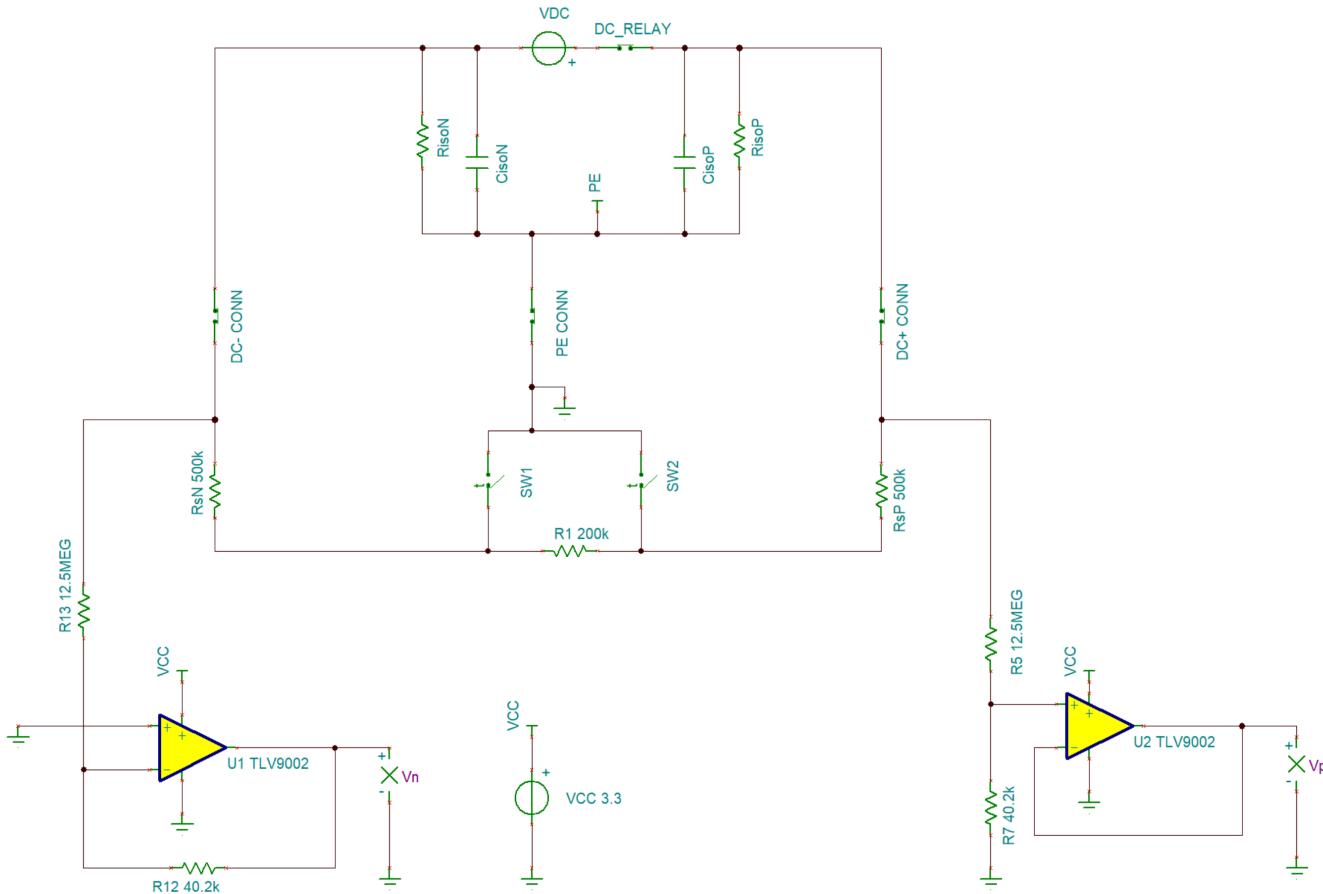


图 2-3. 连接目标系统时的简化设计原理图。

电阻网络由并联电阻和串联电阻的组合构成，如图 2-4 所示。这里主要考虑因素包括

- 额定功率 — 必须考虑最坏情况，例如在非对称故障期间，将整个 Vbus 施加至一侧。对于每侧 $500\text{k}\Omega$ 为 1kV ，即每个阶梯阶跃（例如 R8 和 R20）需要支持 0.4W （最坏情况）。每个电阻器的额定功率为 0.25W ，实际上每个梯形阶跃为 0.5W 。在正常情况下，每个梯形步长耗散约 0.1W 。
- 元件精度容差 — 为了更大程度地减小电阻器容差产生的误差，选择了 0.1% 的电阻器容差。这样会产生大约 0.03% 的电压比测量误差。如果使用 0.5% 的电阻器，误差会上升到大约 0.167% 。如果使用 1% 的电阻器，误差会上升到大约 0.33% 。
- 影响测量时间的电阻值 — 由于电阻会影响时间常数，因此应适当调整该值的大小。绝缘正常时，趋稳时间最长 ($\text{M}\Omega$ 级)。当电阻电桥处于活动状态时，有效电阻降低。
- 对地泄漏电流 — 电阻电桥的电阻不能过低，从而导致漏电流过高。对于 1kV 总线，假设开关接通时每侧有 $500\text{k}\Omega$ ，如果有人站在大地上触摸其中一个 HV 电源轨，则泄漏电流为 2mA 。

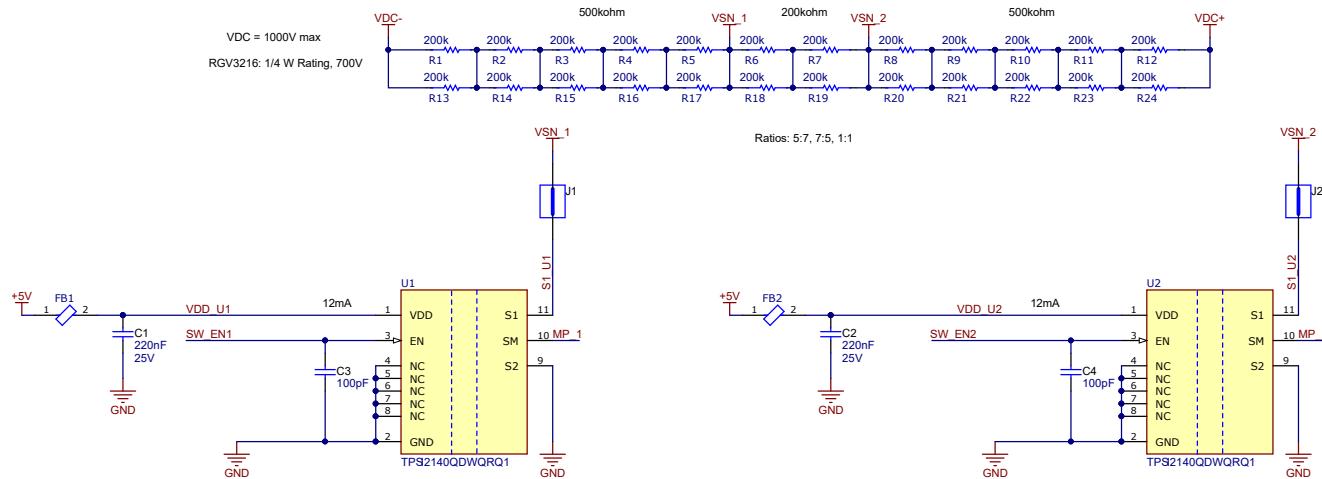


图 2-4. 展示了电阻式桥接网络及固态开关实现的 TIDA-010985 原理图

图 2-5 和图 2-6 中显示了确切的 TIDA-010985 电压检测电路实现。可以根据需要修改 RC 滤波器以符合系统要求。图 2-6 中显示的默认 RC 值 (R33 C19) 实际上是用于电荷桶功能。建议降低噪声，从而进一步限制 BW（例如 500Hz ）。另一种选择是在 U3A 的反馈环路（引脚 2 及引脚 1）和 U3B 的正输入端（引脚 5 和 GND）添加一个小型电容器。

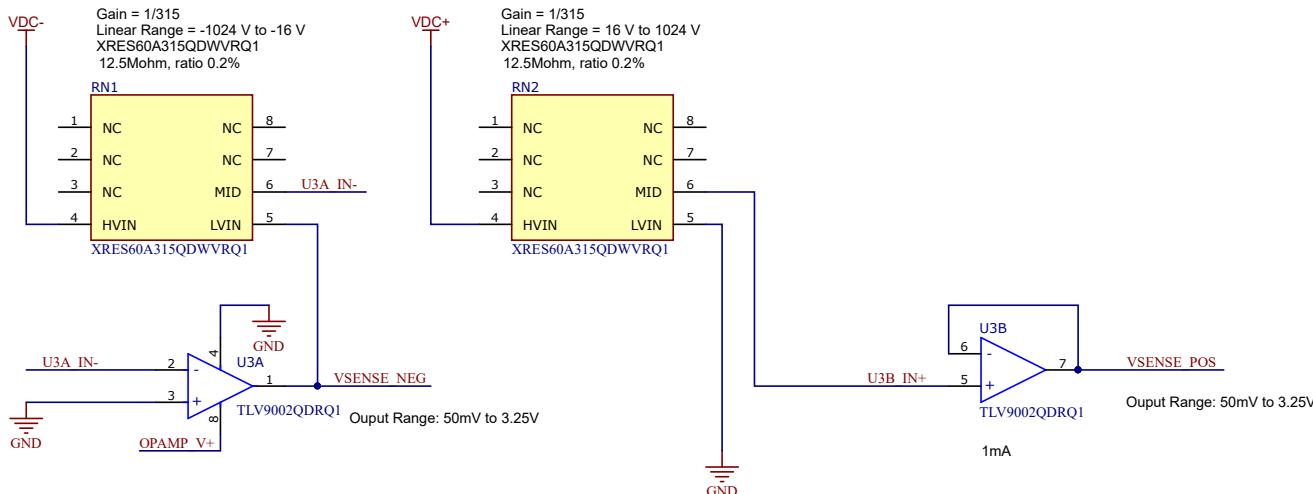


图 2-5. 示出电压检测电路实现的 TIDA-010985 原理图

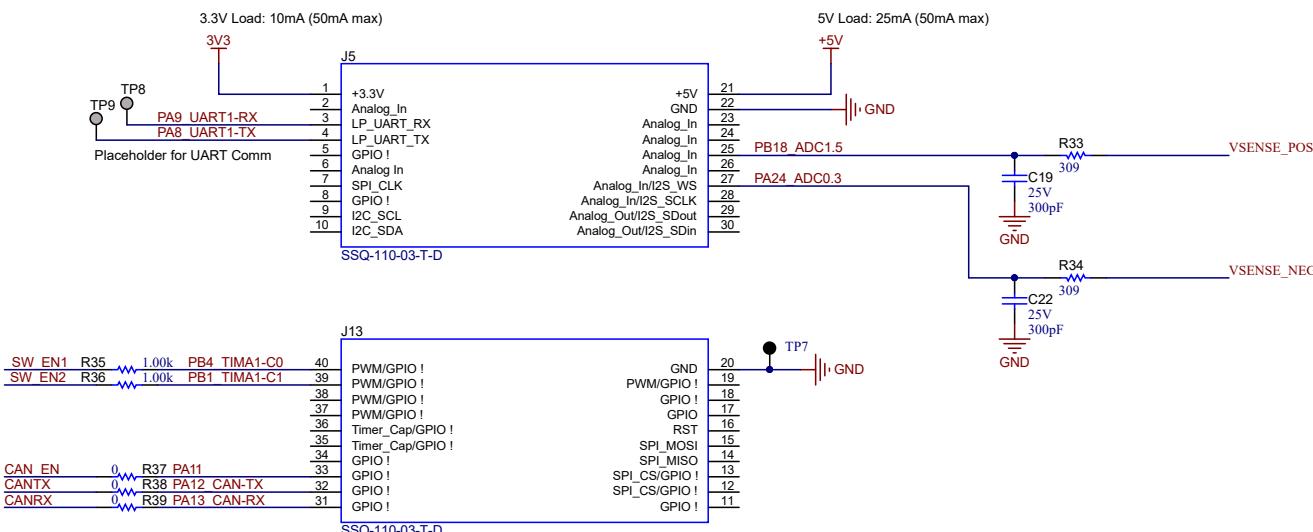


图 2-6. 示出 RC 滤波器实现的 TIDA-010985 原理图

2.1 求解未知隔离电阻

两个开关使用 R_{sP} 、 R_{sN} 和 R_1 实现多个电阻电桥测试比率。该配置可以检测任何给定的 R_{isoP} 与 R_{isoN} 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 R_{isoP} 和 R_{isoN} 。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	$R_{sP}:R_{sN}$ 比率	稳态方程
A	导通	关闭	7:5	$\frac{V_p}{V_n} = \frac{-R_{isoP} (7R)}{R_{isoN} (5R)}$
B	关闭	导通	5:7	$\frac{V_p}{V_n} = \frac{-R_{isoP} (5R)}{R_{isoN} (7R)}$
C	导通	导通	5:5	$\frac{V_p}{V_n} = \frac{-R_{isoP} (5R)}{R_{isoN} (5R)}$
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：

$$\frac{V_{p1}}{V_{n1}} = \frac{-RisoP || (7R)}{RisoN || (5R)} \quad (1)$$

$$\frac{V_{p2}}{V_{n2}} = \frac{-RisoP || (5R)}{RisoN || (7R)} \quad (2)$$

其中

- V_{p1} 是第一个 DC+ 测量电压 (开关状态 A)
- V_{n1} 是第一个 DC- 测量电压 (开关状态 A)
- V_{p2} 是第二个 DC+ 测量电压 (开关状态 B)
- V_{n2} 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 unkowns 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：

$$RisoN = \frac{-(35*V_{n1}*V_{p2} - 35*V_{n2}*V_{p1})*RS}{(7*V_{n1}*V_{p2} - 5*V_{n2}*V_{p1} + 2*V_{p1}*V_{p2})} \quad (3)$$

$$RisoP = \frac{-(35*V_{n1}*V_{p2} - 35*V_{n2}*V_{p1})*RS}{(2*V_{n1}*V_{n2} + 7*V_{n1}*V_{p2} - 5*V_{n2}*V_{p1})} \quad (4)$$

请注意，RS 常数定义为 100kΩ。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 2-7 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。 V_{p1} 和 V_{n1} 在第一秒内同时测量， V_{p2} 和 V_{n2} 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 ）。

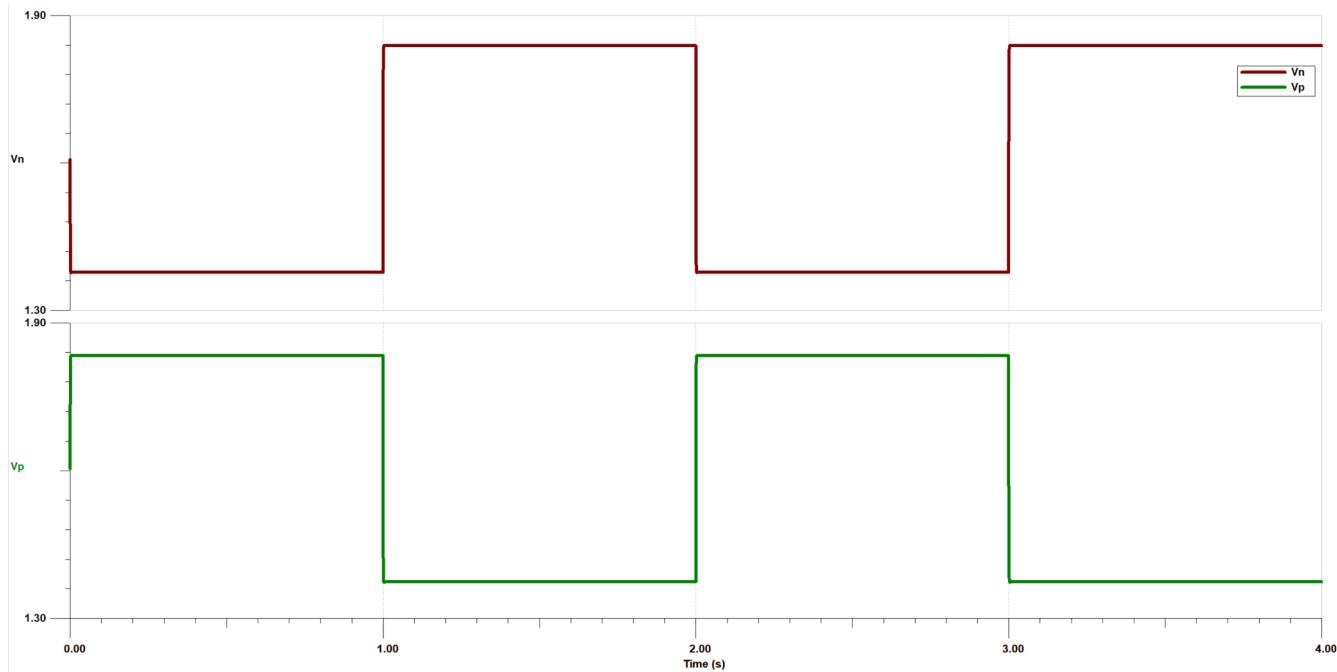


图 2-7. AB 开关切换模式波形示例

2.2 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 2-8 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）。

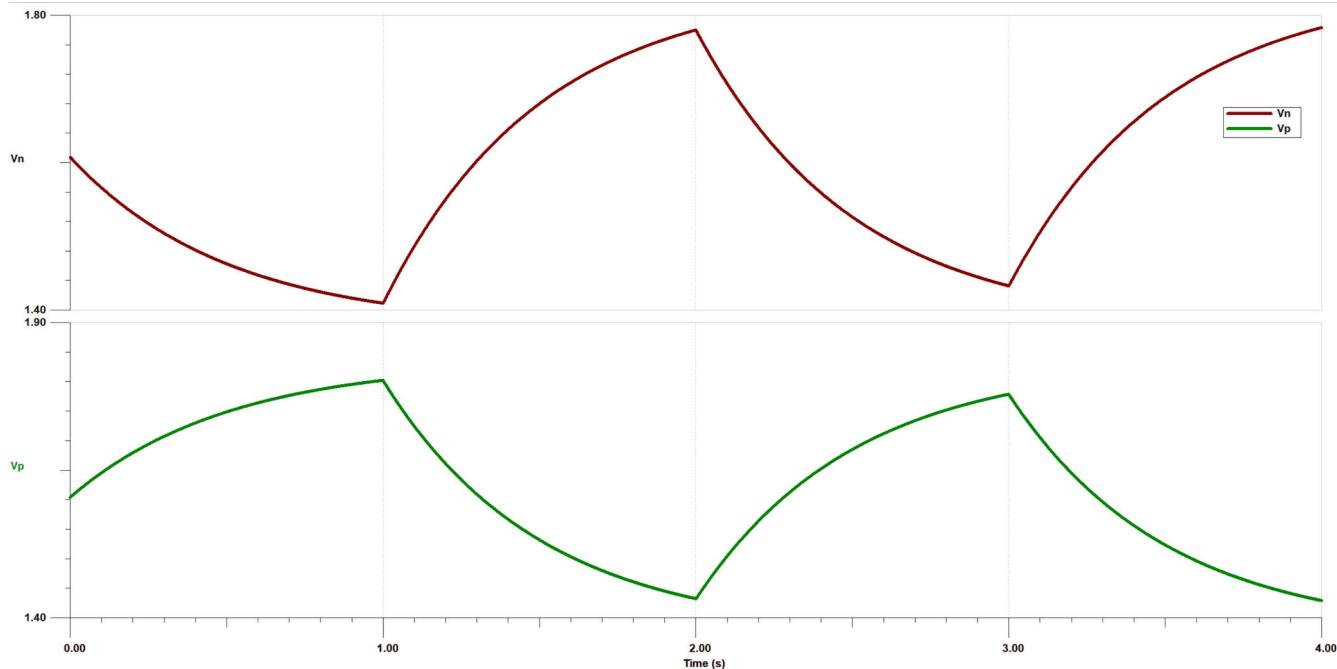


图 2-8. 具有大时间常数的波形示例

时间常数 τ 当 SW1 导通、SW2 关断时：

$$\tau = (R_{isoP} + R_{isoN}) \cdot (R_{sP} + R_1) \cdot C_{isoP} \quad (5)$$

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。这通常是不切实际的，因为这会导致更高的漏电流，这违反了标准要求。
- 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。下一节讨论了该主题。

2.3 预测算法

当 SW2 接通时，响应遵循指数衰减公式：

$$V(t) = V_{\text{inf}} + V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

其中 V_{inf} 是最终稳定电压（ $t = \infty$ ）， V_0 是时间零点处初始电压 $V(t_0)$ 和 V_{inf} 之差。请参阅图 2-9 以帮助理解该概念。

需要特别关注稳定电压 V_{inf} 。这个公式中的三个未知项是 V_{inf} 、 τ 和 V_0 。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：

$$V(t_0) = V_{\text{inf}} + V_0 \quad (7)$$

$$V(t_1) = V_{\text{inf}} + V_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (8)$$

$$V(t_2) = V_{\text{inf}} + V_0 e^{-\frac{t_2}{\tau}} \quad (9)$$

通过使用 $t_2 = 2*t_1$ ，方程变为：

$$V(t_0) = V_{\text{inf}} + V_0 \quad (10)$$

$$V(t_1) = V_{\text{inf}} + V_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (11)$$

$$V(t_2) = V_{\text{inf}} + V_0 e^{-\frac{2t_1}{\tau}} \quad (12)$$

现在，让 $x = e^{-\frac{t_1}{\tau}}$ 公式变为：

$$V(t_0) = V_{\text{inf}} + V_0 \quad (13)$$

$$V(t_1) = V_{\text{inf}} + V_0 x \quad (14)$$

$$V(t_2) = V_{\text{inf}} + V_0 x^2 \quad (15)$$

V_{inf} 的计算得到了显著简化：

$$V_{\text{inf}} = \frac{V(t_0)*V(t_2) - V(t_1)^2}{V(t_0) - 2V(t_1) + V(t_2)} \quad (16)$$

- 请注意，计算 V_{inf} 只需要四则运算。计算 V_{inf} 后， V_0 可以通过从以下项中减去 V_{inf} 来计算 $V(t_0)$ 。
- 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+v0*x;
>> eq3 = vt2 == vinf+v0*x*x;
>> 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。这会确保总 IMD 测量周期时间在 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：

- 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：

$$\tau = \frac{-V_0}{V'(t_0)} \quad (17)$$

对于隔离电阻，只需要 V_{inf} 。对于整个系统 Y 电容 ($C_{isoP} + C_{isoN}$)，近似于 $V(t)$ 于 t_0 处，具有两个相邻的 ADC 测量值。则 C_{iso} 为：

$$C_{iso} = \frac{\tau}{R_{isoP} || R_{isoN} || R_{sP} + R_1 || R_{sN}} \quad (18)$$

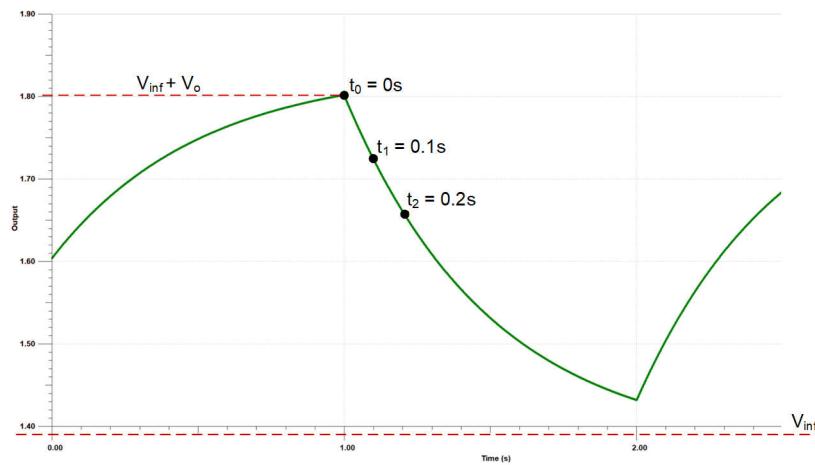


图 2-9. 采用用于预测算法的 ADC 样本的电压衰减曲线示例

可以对充电曲线进行类似的分析。如果 ADC 在三个不同的时间测量三个样本电压，则会为充电曲线创建一个由三个公式组成的系统：

$$V(t_0) = V_i \quad (19)$$

$$V(t_1) = V_i + V_o \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \quad (20)$$

$$V(t_2) = V_i + V_o \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right) \quad (21)$$

注意 V_i 是 t_0 处的初始电压。通过使用 $t_2 = 2*t_1$ ，方程变为：

$$V(t_0) = V_i \quad (22)$$

$$V(t_1) = V_i + V_o \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \quad (23)$$

$$V(t_2) = V_i + V_o \left(1 - e^{-\frac{2t_1}{\tau}} \right) \quad (24)$$

现在，让 $x = e^{-\frac{t_1}{\tau}}$ 公式变为：

$$V(t_0) = V_i \quad (25)$$

$$V(t_1) = V_i + V_o(1 - x) \quad (26)$$

$$V(t_2) = V_i + V_o(1 - x^2) \quad (27)$$

注意，稳态电压 V_{inf} 为：

$$V(t = \infty) = V_{inf} = V_i + V_o \quad (28)$$

方程组的计算非常简单（假设 $t_2 = 2*t_1$ ），因此 V_{inf} 为：

$$V_{inf} = V(t_0) + \frac{V(t_0)^2 - 2*V(t_0)*V(t_1) + V(t_1)^2}{-V(t_0) + 2*V(t_1) - V(t_2)} \quad (29)$$

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+ v0*(1-x);
>>> eq3 = vt2 == vi+ v0*(1-x*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。如果电压具有较短趋稳时间，则不需要预测算法。更实际的做法是在求解 Riso 或 Ciso 之前，再等一会儿。目前，该 SW 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，以确保可靠的运行。以下是代码中可能的存在模式：

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

2.4 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/或精度损失。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 Riso 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 HW 滤波限制输入噪声
- 通过遵循 PCB 布局指南来优化 SNR
- ADC HW 均值计算（默认设置为 128）
- 通过 SW 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，SW 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，SW 计算 330 个预测值的平均值，以估算稳定电压（即 Vp1, Vn1, Vp2, Vn2）。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。

2.5 测试结果

TIDA-010985 的关键测试结果如图 2-10 和图 2-11 所示。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 2-10 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。

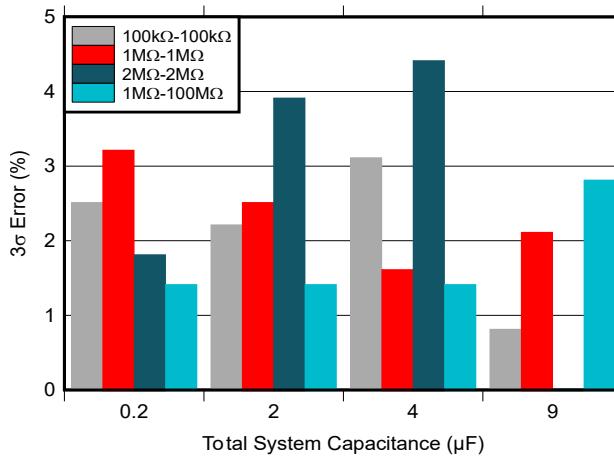


图 2-10. IMD Riso 测量误差，1000VDC，2s 周期

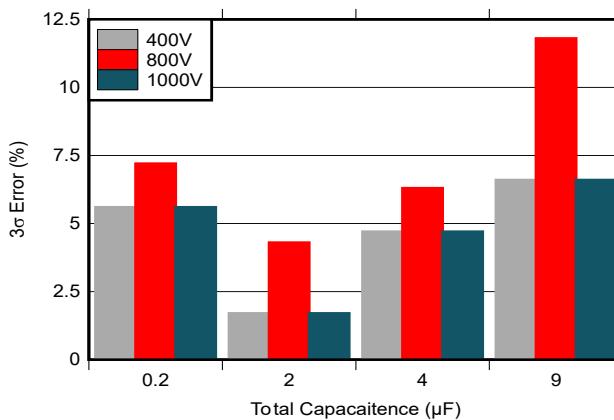


图 2-11. IMD Ciso 误差， $1M\Omega$ 至 $100k\Omega$ ，2s 周期

3 总结

本应用手册讨论了基于 TIDA-010985 的电阻式电桥绝缘监测器的主要设计注意事项。这里讨论的关键设计挑战在于如何在考虑权衡因素的同时解决大型 Y 电容应用问题。在一款新型预测算法软件的帮助下，当前设计能够支持高达 $9\mu\text{F}$ 的性能。更多有关 TIDA-010985 IMD 参考设计和设计资源的信息，请访问 ti.com。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[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](#)，设计指南。
2. 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](#)，设计指南。

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