



Jiemo Zhu, Junhua Yan

摘要

本应用手册根据现有的储能规定总结了高压 1500V 系统的设计要求、分析了当前主流电桥绝缘监测拓扑、比较了多个维度的精度、成本和监测时间并总结了三种设计情况。模拟这三种设计的采样时间并进行了实验验证，确保低成本设计的准确性。

内容

1 引言	2
2 ESS 中的绝缘监测拓扑	5
2.1 单一开关拓扑.....	5
2.2 双路开关悬空采样拓扑.....	7
2.3 高压侧拓扑中的双路开关采样.....	9
2.4 交流注入拓扑.....	10
3 设计比较	11
3.1 注入电阻对精度的影响.....	13
4 电容对采样时间的影响	14
4.1 如何选择 Y 电容器.....	14
4.2 采样时间.....	14
5 关键器件	16
5.1 BQ79731-Q1.....	16
5.2 UCC33421-Q1.....	16
5.3 AMC131M02.....	17
5.4 AMC3330.....	18
5.5 ISO773x.....	19
6 Topos 仿真结果和结论	20
7 总结	21
8 参考资料	21

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

储能电站是一个复杂的工业系统，涉及储能转换器、储能电池和管理系统等电气设备，可避免系统短路或泄漏电流对用户造成很大影响，为此，储能电站的绝缘检测系统对储能电站操作人员的安全至关重要。同时，绝缘监测还可以避免绝缘故障对终端设备造成损坏，从而延长设备的使用寿命。

如果您可以确保在触摸任何两点时绝缘良好，则可以提高安全性。在储能系统运行时，图 1-1 的正极侧表示高压电池包的正极侧、负极侧表示高压电池的负极侧，而 PE 表示外壳。RisoP 为高压负端与机箱之间的等效电阻。RisoN 为高压正端与机箱之间的等效电阻。V1 为 BMS 监测到的、高压负端与机箱之间的电压，V2 为 BMS 监测到的、高压正端与机箱之间的电压；如果 RisoP 或 RisoN 的任何一个电阻值设计大于国家标准规定的阈值，则即使人体误碰高压正端、高压负端和机箱的任意两个地方也是安全的。

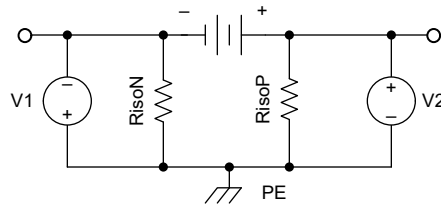


图 1-1. 储能系统中的绝缘系统

针对储能系统的系统性能，GB/T34131 给出了一些电压、电流、温度采样和绝缘电阻监测指标：

表 1-1. GB/T34131 对电压、电流、温度和绝缘电阻精度提出的要求

	范围	误差	周期
电池电芯电压	<5V	≤0.005V	≤100ms
	5 大约 15V	≤0.2%	
电池组电压	<500V	≤5V	≤100ms
	≥500V	≤1%	
电池组电流	<200A	≤2A	≤50ms
	≥200A	≤1%	
电芯温度	-20 大约 65	≤1°C	≤1s
	[-40,-20)U(65,125]	≤2°C	
绝缘电阻 (≥400V)	R≤75kΩ	≤±15kΩ	
	R>75kΩ	≤±20%	

在储能绝缘监测设计中，爬电距离和电气间隙也是需要重点关注点。在欧洲市场的储能领域，供应商主要参考 IEC62619，在北美市场，供应商主要参考的法规为 UL1973。在这两个地区的法规中有关电气间隙和爬电距离的部分都参考了 IEC60664。因此，本文总结了 IEC60664 中 1000V/1500V/2000V 系统的电气间隙和爬电距离。

表 1-2. 1000V 储能系统的爬电距离和间隙要求

电压	类型	污染等级	CTI	OVC	海拔/m	CLR/mm	CRP*/mm
1000V	基础型	II	I	OVC-II(6000)	<2000m	5.5	5.5
					4000m	7.1	7.1
				OVC-III(8000)	<2000m	8	8
					4000m	10.4	10.4
	增强			OVC-II(8000)	<2000m	8	8
					4000m	10.4	10.4
				OVC-III(12000)	<2000m	14	14
					4000m	18.1	18.1

表 1-3. 1500V 储能系统的爬电距离和间隙要求

电压	类型	污染等级	CTI	OVC	海拔/m	CLR/mm	CRP*/mm
1500V	基础型	II	I	OVC-II (8000)	<2000m	8	8
					4000m	10.4	10.4
				OVC-III(10000)	<2000m	11	11
					4000m	14.2	15.1
	增强			OVC-II (12000)	<2000m	14	15.1
					4000m	18.1	18.1
OVC-III(16000)	<2000m	19.4	19.4				
	4000m	25.1	25.1				

GB/T 34131 也需要绝缘电压测试和介电强度测试。以 1500V BMS 为例，绝缘电压测试是指以下四个位置(①②③④) 应能连续一分钟承受 1500V 的直流电压，绝缘电阻值不应小于 10MΩ。

- 连接电池的采集端和接地端之间。
- 通信端和接地端之间。
- 采集端和通信端之间。
- 电源端和通信端之间。

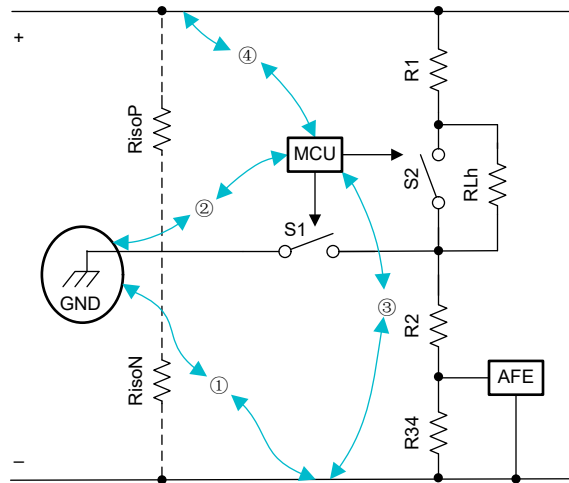


图 1-2. 绝缘电压测试

介电强度测试是指以下五个位置 (①②③④⑤) 应能连续 1 分钟承受 4380V 的直流电压，而不出现绝缘击穿和飞弧现象且泄漏电流须小于 10mA。

- 连接电池的采样端和接地端之间。
- 通信端和接地端之间。
- 采样端和电源端之间。
- 采样端和通信端之间。
- 电源端和通信端之间。

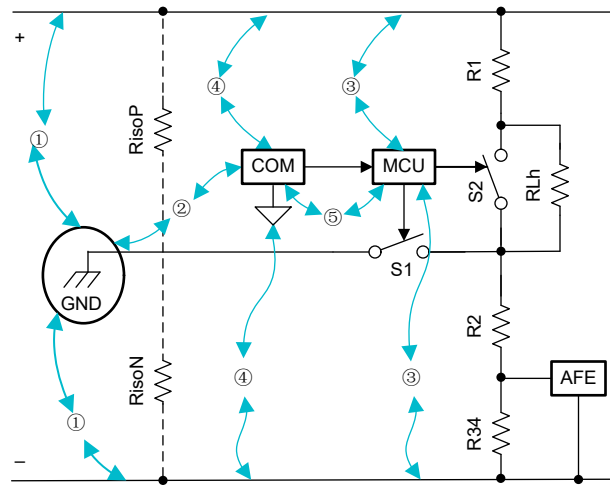


图 1-3. 介电强度测试

测试提示：

1. 非电气化、断开 PE、高压和通信；
2. 在进行 ① 测试时，在高压 (BAT+/BAT-) 和 PE 之间，因电池簇电压包含在其中，电路需要能承受 5880V (4380V +1500V)。

2 ESS 中的绝缘监测拓扑

目前储能领域所采用的绝缘监测方法主要是外部电阻法和交流注入法。

在采用交流电流注入法时会生成一个方波信号，然后通过 RC 滤波器或变压器将该信号注入高线路和保护性接地 (PE) 之间的 RC 电路。阻抗是根据电容器的充电量和放电量来计算的。交流注入的主要缺点是信号容易受到干扰，在设计时难以达到可靠和准确并且需要使用大型变压器将注入电路与高压电路隔离。交流电流法的优点是不受隔离电容的影响。

在使用外部电阻法时，正极和负极之间连接一系列电阻器，通过打开和关闭电路中的设置开关，并且列出电路状态方程，来获得两种状态下电阻的电压值。这两个公式可用于确定接地的正负电池电阻值及电池正负绝缘。

外电阻绝缘监测方法的拓扑结构主要区别在于开关的个数和是否使用隔离装置，开关的个数分为单开关和双开关。具体取决于控制高侧还是低侧

2.1 单一开关拓扑

使用 topo1-一个开关检测绝缘。在高压侧采样，S1 可使用能承受高电压的干簧继电器和信号继电器等。S2 可以选择固态继电器或 Photo MOS，并由 UIR 控制。

根据 ESS 法规，介电强度测试根据器件的耐受电压或隔离要求进行了细分，具体如下所示：

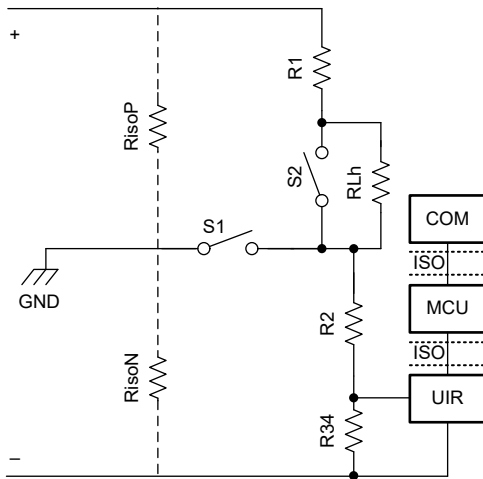


图 2-1. 单开关拓扑 (topo1)

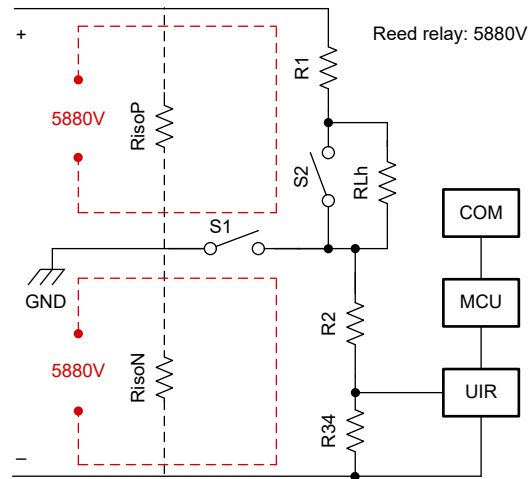


图 2-2. Topo1-高压 (BAT+/BAT-) 和 PE①5880V

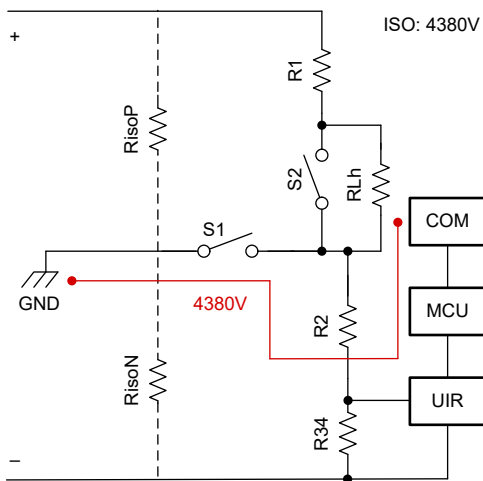


图 2-3. Topo1-通信和 PE②4380V

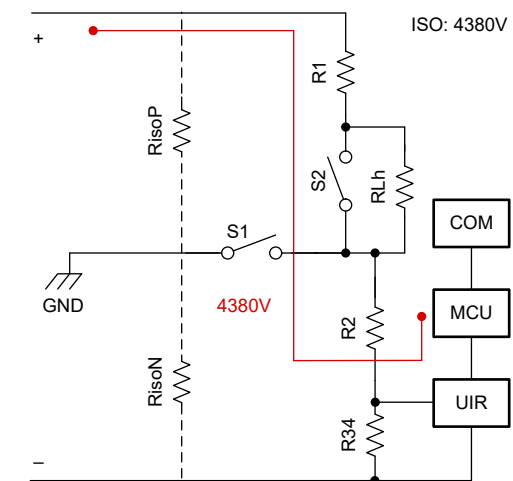


图 2-4. Topo1-高压和低压 (MCU)③4380V

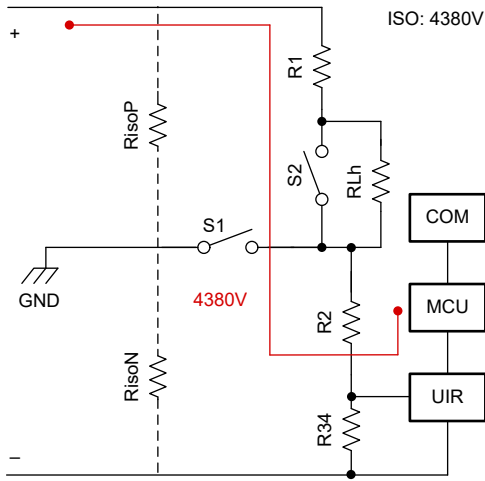


图 2-5. Topo1-高压和通信④4380V

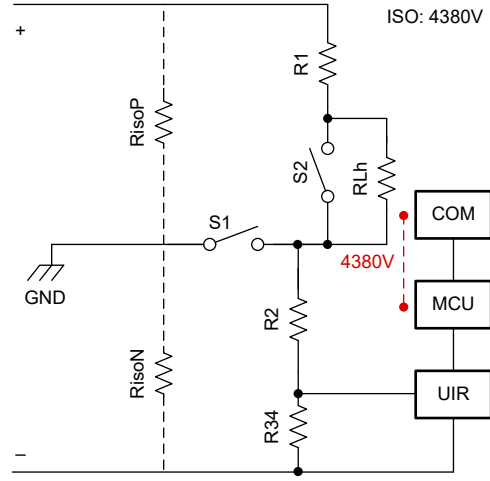


图 2-6. Topo1-低压和通信⑤4380V

表 2-1. 最大器件规格

器件规格	耐受电压(V)
干簧继电器	5880V
隔离器	4380V

2.1.1 测试步骤

1. 关闭 S1、S2 并等待 ADC 上的电压稳定(500us)、获得 V_{N1} 、 $V_{DC}=2V_{N1}$ 。
2. 打开 SW1 并关闭 SW2、SW3 (400us 延迟)、等待 ADC 的电压稳定(500us)、获得 V_{Noff} 。
3. 关闭 SW1、等待 ADC 上的电压稳定(500us)，获得 V_{Non} 。
4. 计算 $RisoP$ 和 $RisoN$ (使用以下公式)。

$$RisoP = \frac{VDC(V_{Non} - V_{Noff})}{(VDC - V_{Non}) \times \frac{V_{Noff}}{R1} - (VDC - V_{Noff}) \times \frac{V_{Non}}{R1 + RL}} \quad (1)$$

$$RisoN = \frac{V_{Non}}{(VDC - V_{Non}) \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{RisoP} \right) - V_{Non} \left(\frac{1}{R34 + R2} \right)} \quad (2)$$

在计算公式中将注入电阻误差、采样电阻误差和高电压检测误差考虑在内，得到最差的精度：

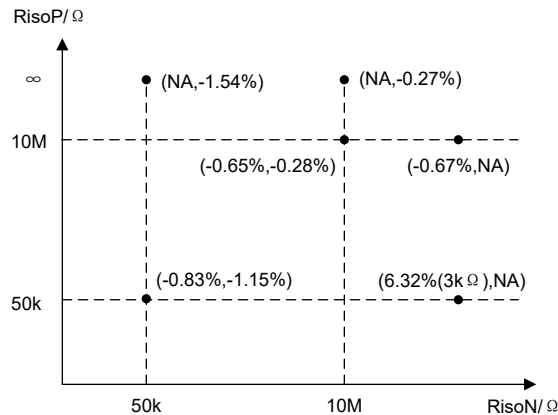


图 2-7. Topo 1 的最坏情况

2.2 双路开关悬空采样拓扑

使用 **topo2**-双路开关、位于低压侧的采样 ADC 以及隔离式运算放大器来进行高压采样和绝缘监测。承受电压或器件的隔离要求如下：

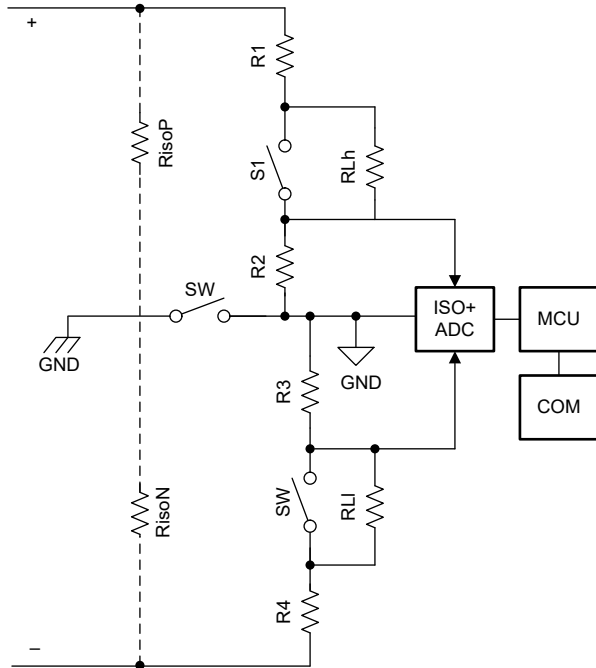


图 2-8. 双路开关拓扑、采样 GND 悬空 (topo2)

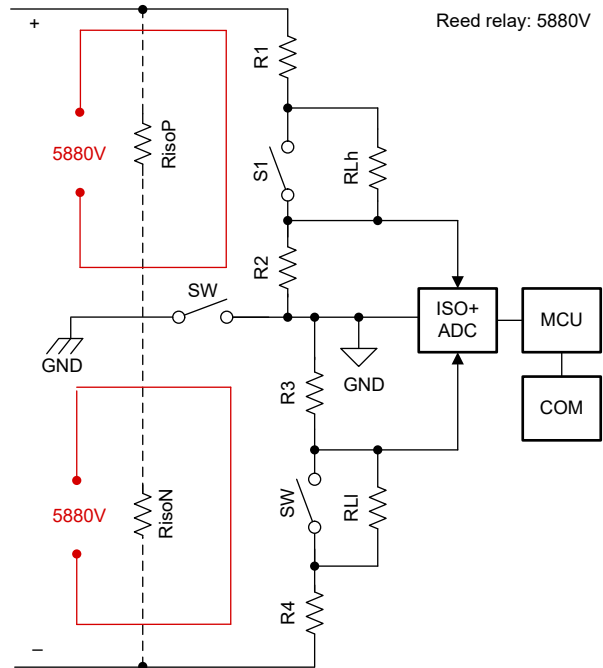


图 2-9. Topo2-HV(BAT+/BAT-) 和 PE①5880V

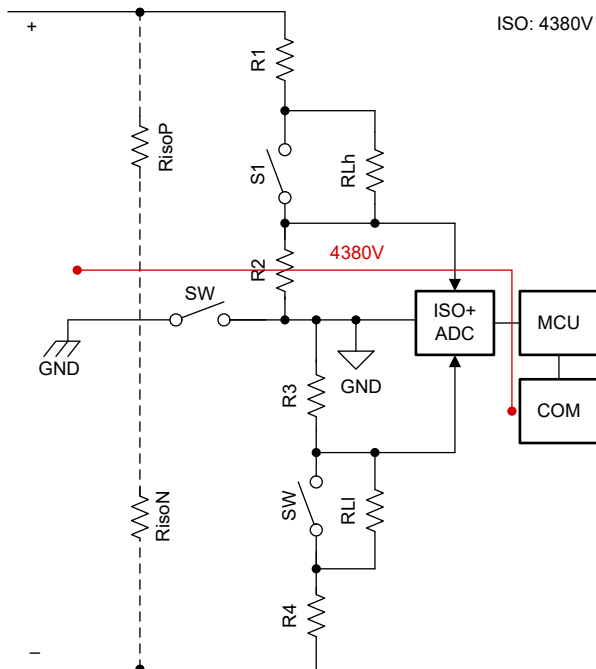


图 2-10. Topo2-通信和 PE②4380V

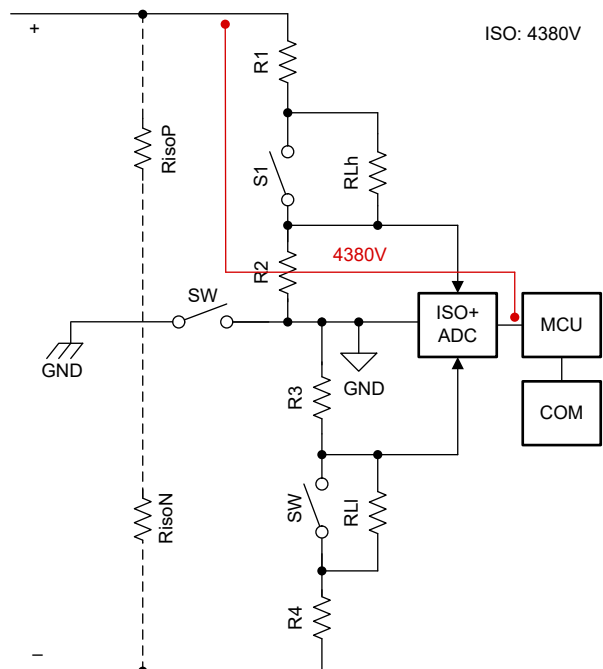


图 2-11. Topo2-高压 和 低压 (MCU)③4380V

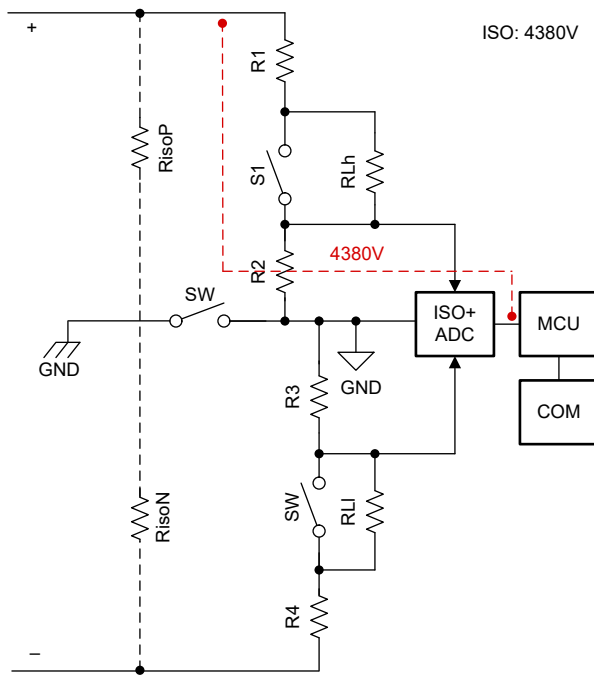


图 2-12. Topo2-高压和通信④4380V

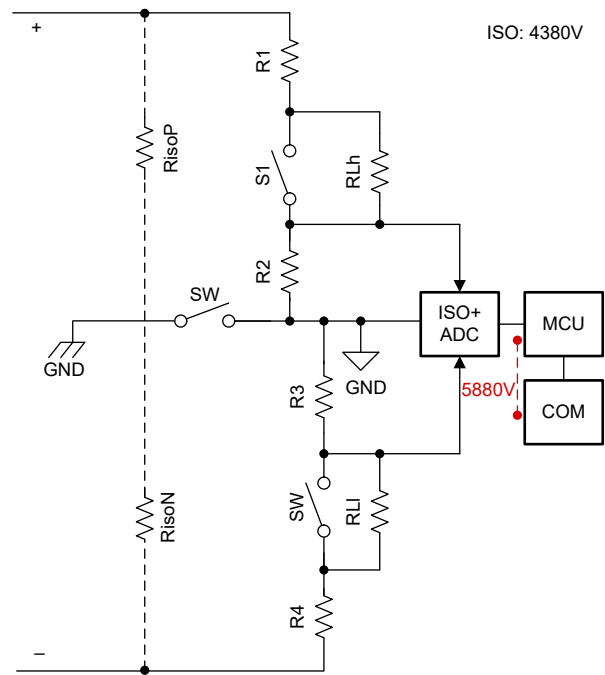


图 2-13. Topo2-低压和通信⑤4380V

2.2.1 测试步骤

1. 关闭 SW1 和 SW3、打开 SW2，获取 V+。
2. 关闭 SW2、打开 SW1，获取 V-。
3. 将 V+ 和 V- 代入 RisoP 和 RisoN 计算公式。

基于两个电路的工作模式，计算 RisoP 和 RisoN 的公式如下：

$$R_p = \frac{V_{DC} + V_{Bn1} - \frac{V_{Bn1} \times V_{Bp}}{V_{Bp} - V_{DC}}}{\frac{V_{Bn1}}{R_3 + R_4 + R_{L1}} + \frac{V_{Bp} \times V_{Bn1}}{(R_1 + R_2) \times (V_{Bp} - V_{DC})} - \frac{V_{DC} + V_{Bn1}}{R_1 + R_2 + R_{Lh}} - \frac{V_{Bn1}}{R_3 + R_4}} \quad (3)$$

$$R_n = \frac{-1}{\frac{1}{R_3 + R_4 + R_{L1}} + \frac{-1}{V_{Bp}} + \frac{V_{Bp}}{R_p \times (V_{Bp} - V_{DC})}} \quad (4)$$

在计算公式中将注入电阻误差、采样电阻误差和高电压检测误差考虑在内，得到最差的精度：

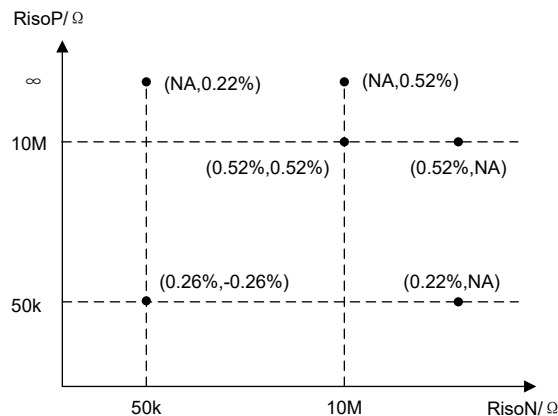


图 2-14. Topo 2 的最坏情况

2.3 高压侧拓扑中的双路开关采样

使用 topo3-双路开关、采样 ADC 和高压侧的控制信号，并借助隔离式运算放大器进行高压采样和绝缘监测。基于电介质强度的拓扑和器件要求如下：

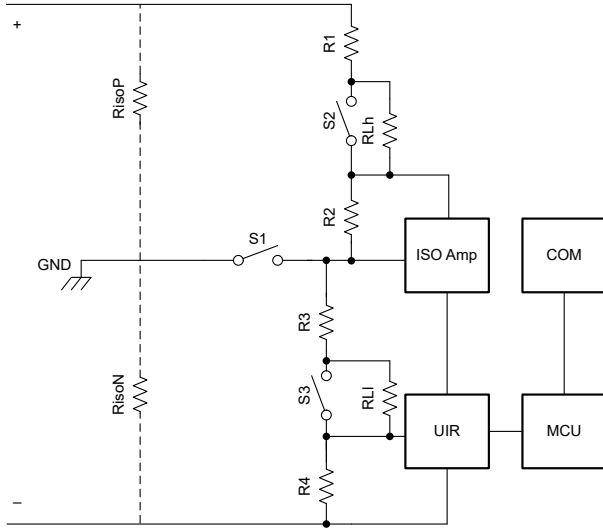


图 2-15. 双路开关和连接至高压的采样 GND (topo3)

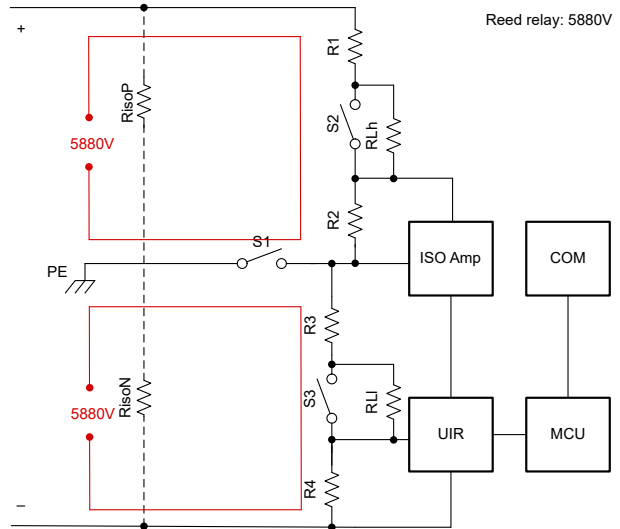


图 2-16. Topo3-高压 (BAT+ 或 BAT-) 和 PE①5880V

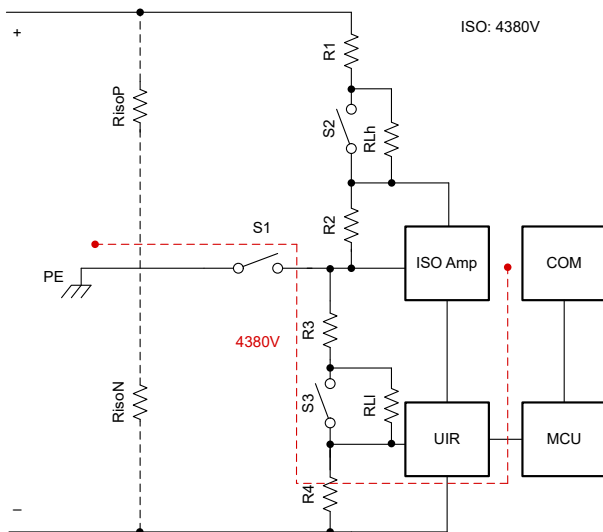


图 2-17. Topo3-通信和 PE②4380V

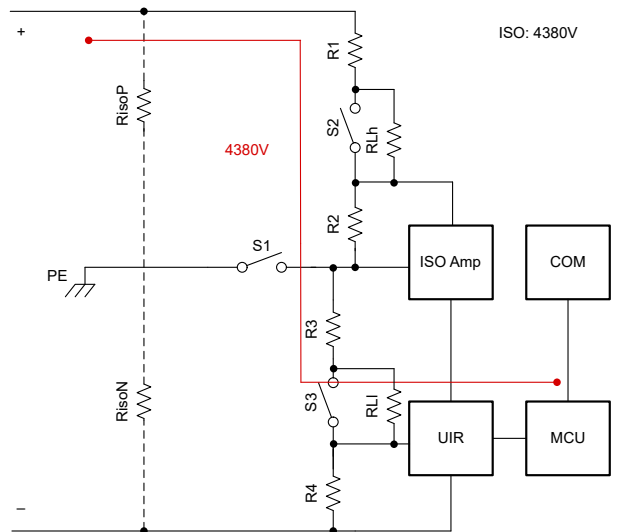


图 2-18. Topo3-高压和低压(MCU)③4380V

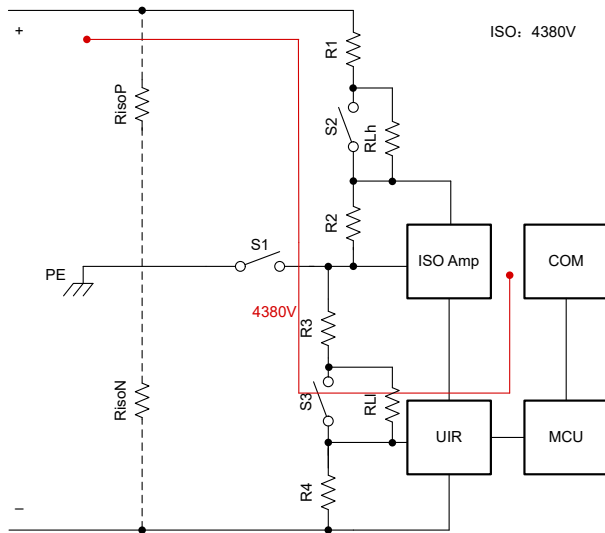


图 2-19. Topo3-高压和通信④ 4380V

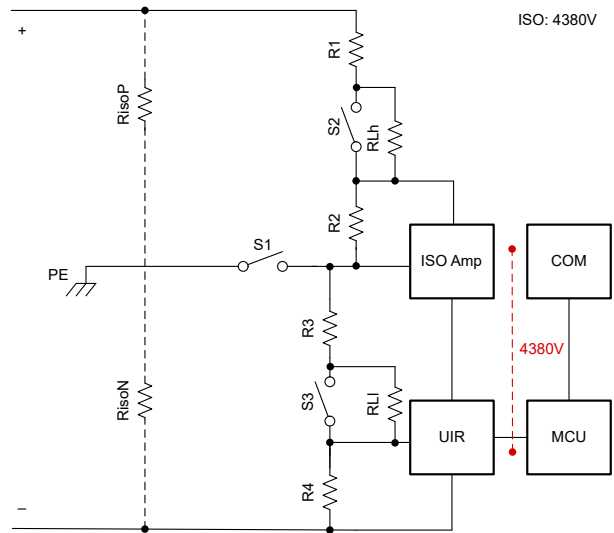


图 2-20. Topo3-低压和通信⑤ 4380V

测试步骤：

1. 关闭 SW1&SW3，打开 SW2，获取 V+。
2. 关闭 SW2，打开 SW1，获取 V-。
3. 将 V+ 和 V- 代入 Risop 和 RisoN 计算公式。

计算公式和最坏情况与 Topo2 相同，因为仅是采样点位置差异，并不会影响公式。

2.4 交流注入拓扑

在交流注入方法中，通过在电源电池的正负端子之间以特定频率注入低电压交流信号来获得系统的绝缘电阻。缺点是测试信号会在系统中产生纹波干扰，从而影响系统的正常运行。交流注入需要高精度 AD / DA、注入电容器和电流检测。RMS 检测、低通、带通、分析检测到的信号…此操作可在数十毫秒内完成。由于精度的不确定性，因此本文不需要对其进行分析。

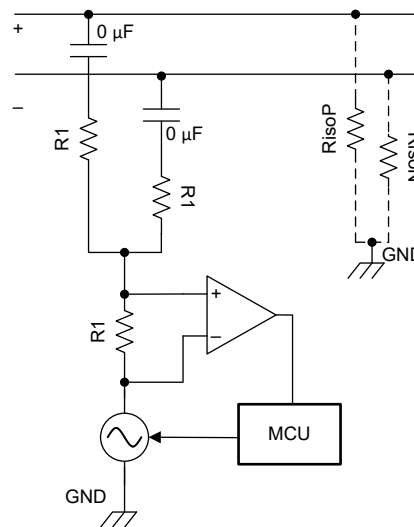


图 2-21. 交流注入绝缘测试拓扑

3 设计比较

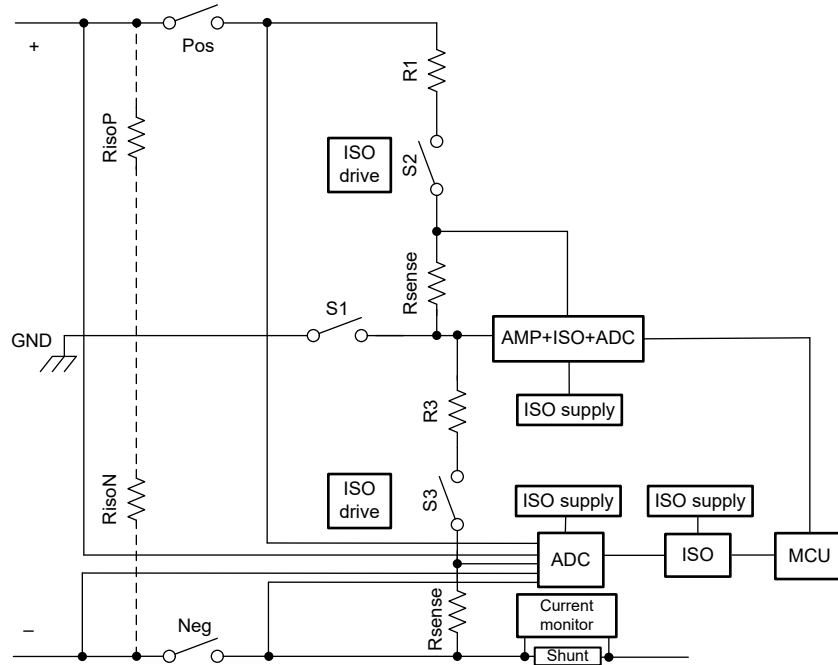


图 3-1. 控制方框图

根据 BMS 对绝缘检测和存储能量中高压检测的要求，双开关拓扑的控制方框图如上图所示。如果使用差分 ADC，则要求在采样继电器前和继电器闭合后两端压降。如果使用单端 ADC 且高压负侧被视为采样点，则需要两个电压采样和三个电压采样通道。此外，还需要对分流器进行绝缘监测和电流监测。

因此，系统需要使用运输、隔离和 ADC 进行绝缘电压采样，而隔离也需要额外电源，同时需要使用三个 ADC 进行高压采样。此外，还需要额外的隔离和电源以及单个电流样本。

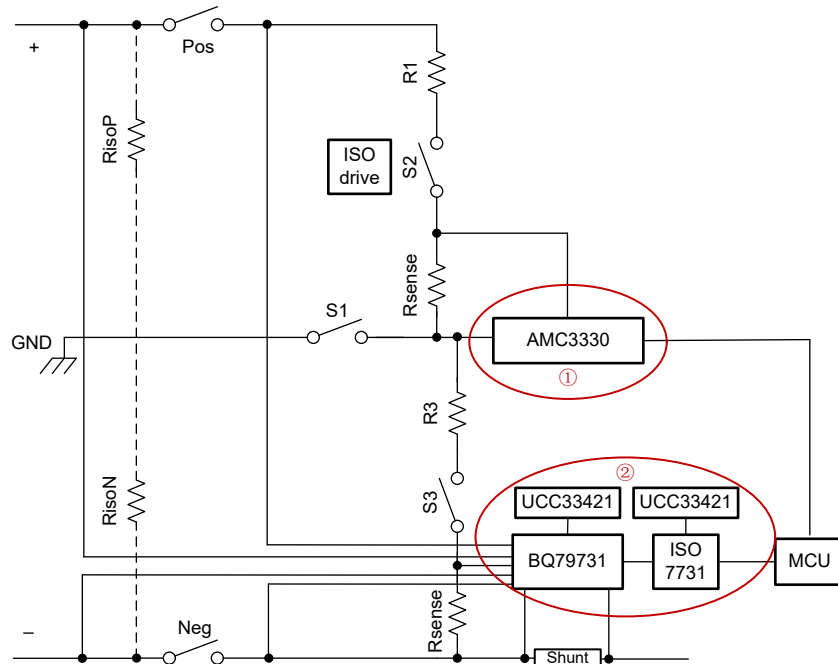


图 3-2. 基于 Topo 2 的设计 1

根据采样点的排列情况，有三个选项可供选择、第一个选项是具备隔离和处理功能的集成式 AMC3330。使用 MCU 的 ADC 进行采样，并使用 BQ79731 进行高压采样和电流采样。如果在高侧使用 ADC 控制两个 SSR，则 SSR 和高侧的控制无需承受来自中等强度测试点 4380V 的中等强度测试电压，因此无需额外的隔离器件来控制 SSR。

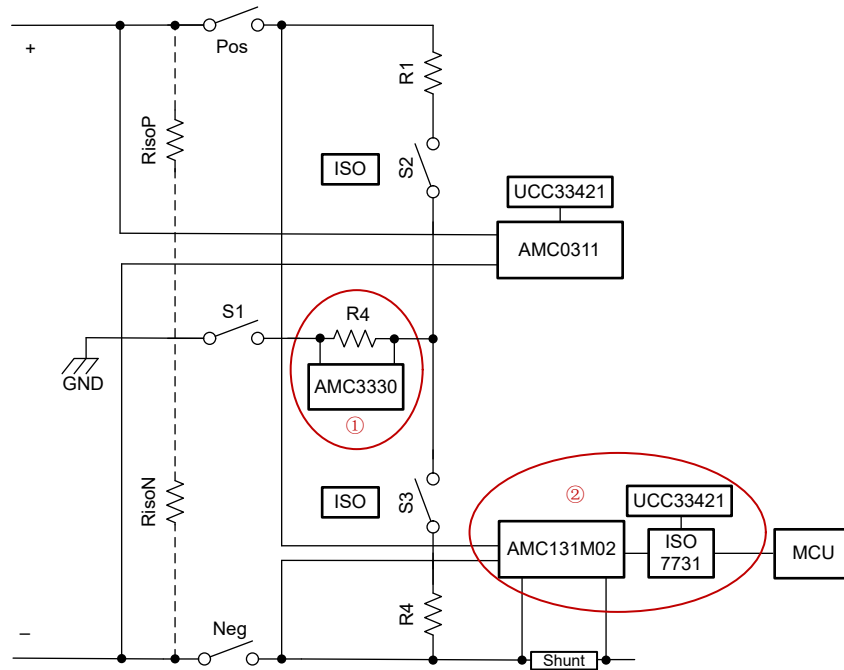


图 3-3. 基于 Topo 3 的设计 2

第二种设计是将 AMC131M03 与两个隔离式 ADC 和一个电流采样配合使用，与 BQ79731 相比，这种电压和电流采样成本更低，但精度也更低。绝缘采样需要双通道 AMC131M02。而 SSR 的控制信号需要进行隔离以满足介质强度测试要求。

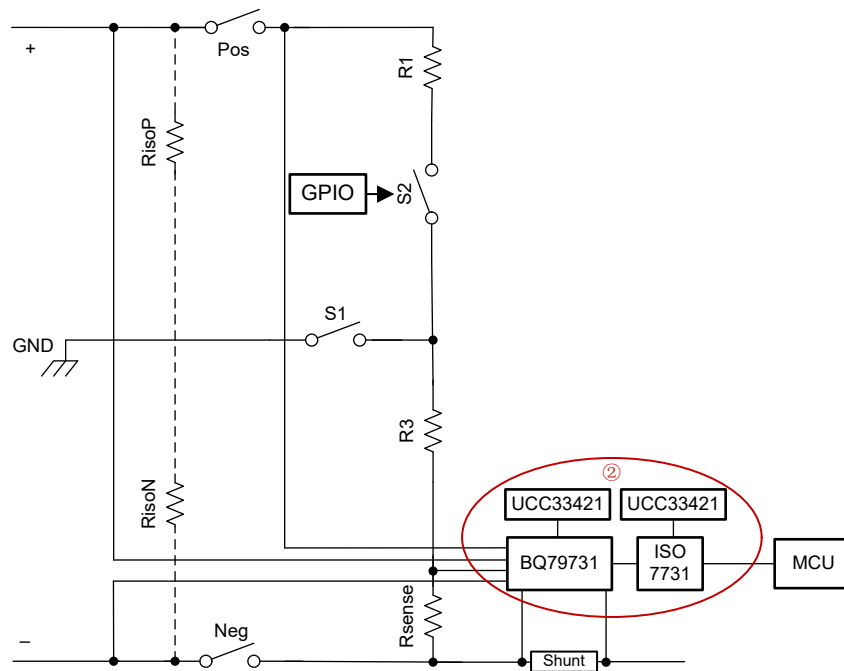


图 3-4. 基于 Topo 1 的设计 3

第三种设计是基于单开关和单采样点拓扑的低成本设计。在这种设计中使用 **BQ79731** 对三种电压和分流电流进行采样。可以使用 **BQ79731** 中的 **GPIO** 控制开关而无须隔离，但其精度比双开关拓扑低 **5.3%**，即使如此，仍然能满足法规规定的 **20%** 的要求。

3.1 注入电阻对精度的影响

在电桥拓扑方法中，我们更改不同的注入电阻以计算最终精度，并发现绝缘检测精度与注入电阻精度成正比。

表 3-1. 注入电阻对绝缘检测精度的影响

注入电阻精度	注入电阻值		
	4.5M	5.5M	6.5M
	绝缘电阻检测精度		
0.1%	0.31%	0.29%	0.30%
0.2%	0.63%	0.58%	0.54%
0.5%	1.59%	1.45%	1.36%
1.0%	3.22%	2.93%	2.74%

4 电容对采样时间的影响

绝缘测试中的 Y 电容对绝缘测试的速度有很大影响。影响绝缘检测的 Y 电容机制（例如在网桥法中）能延迟稳态建立的时间。如果使用未收敛电压值计算，得出的绝缘电阻值也不准确。

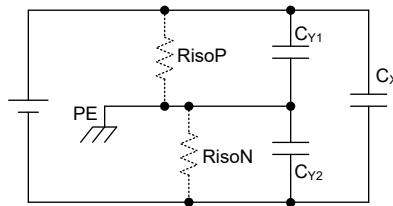


图 4-1. 绝缘电路中的 Y 电容器

4.1 如何选择 Y 电容器

尽管高压分量的输入滤波、HV+和 HV-到 PE 的 Y 电容理论值相同。由于 Y 电容器本身的容差和与其并联的寄生电容差，CY1 和 CY2 通常不相等。但由于电桥方法为不同时断开和收集上桥臂和下绕曲臂，因此，Y 电容越大，对绝缘电阻测量的影响越大，所以我们在静态测试中一般按以下方式计算外部 CY1 和 CY2：

注意：在最大工作电压下，B 级电压与电气平台带电部件之间的总容量不超过 0.2J，在最大工作电压下储存的能量不超过 0.2J（自动模式下遵守 GB 18384-2020），B 级电压电路正极侧电容 Cy+或负极侧电容的最大储能 ($Q=0.5 \times C \times U^2$) 为 0.2J。

备注

1.27 的系数是温度对电容值的影响所产生的比例参数。

在 1500V 储能系统，Y 电容器须小于 230nF 并且可以在本文评估中选择 200nF。

4.2 采样时间

假设电源 Vu 通过电阻器 R 给电容器 C 充电、V0 为电容器的初始电压值、Vu 为电容器充满电后的电压值、Vt 为电容器在任何时间 t 的电压值，那么所获得的计算公式如下：

如果电容器的初始电压为 0，则公式可简化为：

从上面的公式可知，由于指数值只能无限接近 0，但绝不等于 0，因此电容器完全充满电需要无限长的时间。

当 $t = RC$ 、 $V_t = 0.63V_u$ ；而 $t = 2RC$ 、 $V_t = 0.86V_u$ ；而 $t = 3RC$ 、 $V_t = 0.95V_u$ 时；

当 $t = 4RC$ 、 $V_t = 0.98V_u$ ；而 $t = 5RC$ 、 $V_t = 0.99V_u$ 时；

由此可知，达到 5t 时，基本上接近最终值。

因此，在 1500V 绝缘检测系统中，可以将 Y 电容器选择为 200nF。如此以来，需要 4.5s 才能检测到 0.995u 的电压。

按照上述分析，在 [表 4-1](#) 中得出结论。

表 4-1. 三种设计的比较

设计	设计 1	设计 2	设计 3
	器件	器件	器件
开关	簧片继电器× 1	簧片继电器× 1	簧片继电器× 1
	SSR × 2	SSR× 2	SSR × 1
绝缘监测	UIR BQ79731-Q1× 1	AMC131M02 × 1	UIR BQ79731-Q1
高压感应	-	AMC0311 × 1	-
绝缘采样	AMC3330 × 1	AMC3330 × 1	AMC3330 × 1
ISO	ISO7731 × 1	ISO7731 × 1	
电源	UCC33421 × 2	UCC33421 × 2	UCC33421 × 1
成本摘要	10.21 美元	9.72 美元	7.8 美元
分流器	是	是	是
精度 (最坏情况)	0.82%	0.82%	5.9%
HV 电源	性能	性能	性能
采样时间	$=R \times 2C_Y$	$=R \times 2C_Y$	$=RC_Y$

1. 成本几乎全部来自 TI 器件且数量大于 1ku。

考虑到成本和精度，使用双臂和控制高压可能是储能系统中绝缘监测的更好选择。

5 关键器件

5.1 BQ79731-Q1

BQ79731-Q1 可用于测量电池系统中的高电压分压节点。它可以测量保险丝和接触器两端的电压，并检查电池接线盒 (BJB) 系统中的隔离电压。该器件具有两条支持低侧分流电阻器的集成式电流检测 (BQ79731-Q1) 路径。库仑计数 (BQ79731-Q1) 功能可用于进行精确的 SOC 计算。有 15 个 GPIO/辅助输入可用于高压测量、热敏电阻测量和驱动继电器。有 4 个 SW 输出可用于驱动测量路径中的 MOSFET 开关。该器件可用作 SPI 集线器并与多达 8 个独立的 SPI 器件/组进行连接。可以使用 HW 引脚自主实现过流保护响应，以便在危险的过流事件中提供快速保护。隔离式双向菊花链端口支持基于电容器和变压器的隔离。该器件还可以通过 SPI 和 UART 与 MCU 通信。

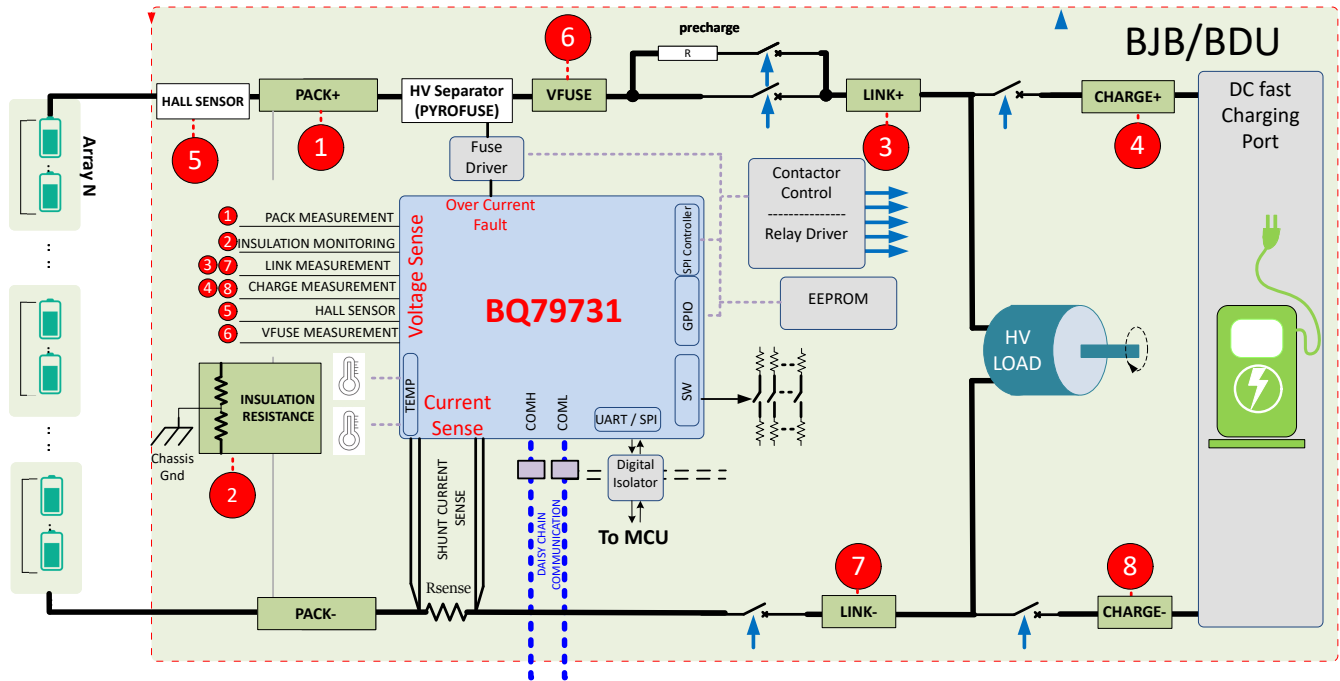


图 5-1. BQ79731-Q1 功能方框图

5.2 UCC33421-Q1

UCC33421-Q1 是一款采用集成变压器技术且符合汽车标准的直流/直流电源模块，可提供 1.5W 的隔离式输出功率。它可支持 4.5V 至 5.5V 的输入电压工作范围，并可通过 5.5V 的可选余量调节 5.0V 输出电压。UCC33421-Q1 具有专有变压器架构，可实现 5kVRMS 隔离额定值，同时支持低 EMI 和出色的负载调节。UCC33421-Q1 具有保护特性，能提高系统稳健性，例如具有故障报告机制的使能引脚、短路保护和热关断功能。UCC33421-Q1 采用小型化、薄型设计 SOIC (5.85mm x 7.50mm) 封装，高度为 2.65mm，爬电距离和间隙大于 8.2mm。

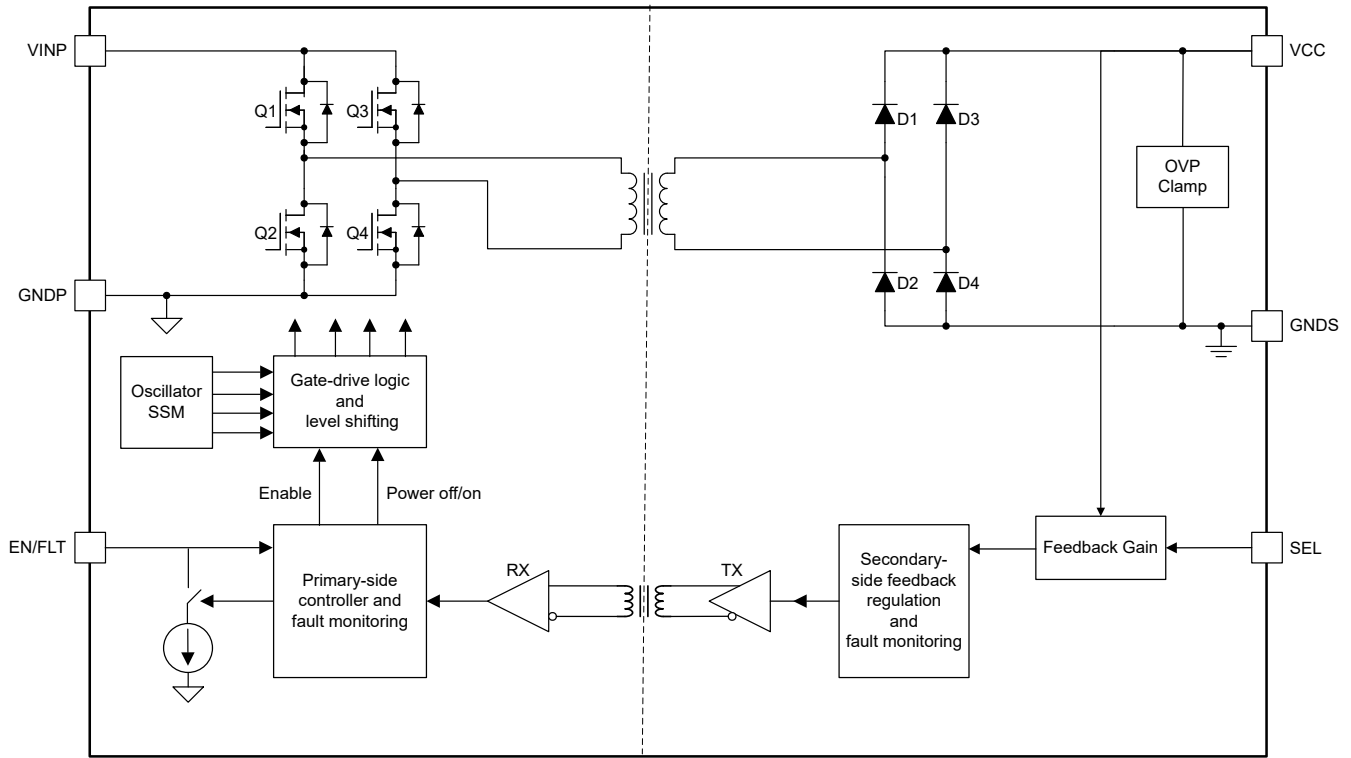


图 5-2. UCC33421-Q1 功能方框图

5.3 AMC131M02

AMC131M02 是一款精密的两通道数据和电源隔离式同步采样 24 位 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)。AMC131M02 具有宽动态范围、低功耗和特定于电能测量的功能，非常适合电能计量和功率计量应用。由于该器件具有高输入阻抗，因此 ADC 输入可直接连接到电阻分压器网络或分流传感器。AMC131M02 具有完全集成的隔离式直流/直流转换器，能实现器件低侧的单电源运行。增强型电容隔离栅已通过 VDE 0884-17 和 UL1577 认证。该隔离栅将在不同共模电压电平下运行的系统器件分开，并保护低压器件免受损坏，使 AMC131M02 成为使用分流传感器的多相电能计量的理想选择。

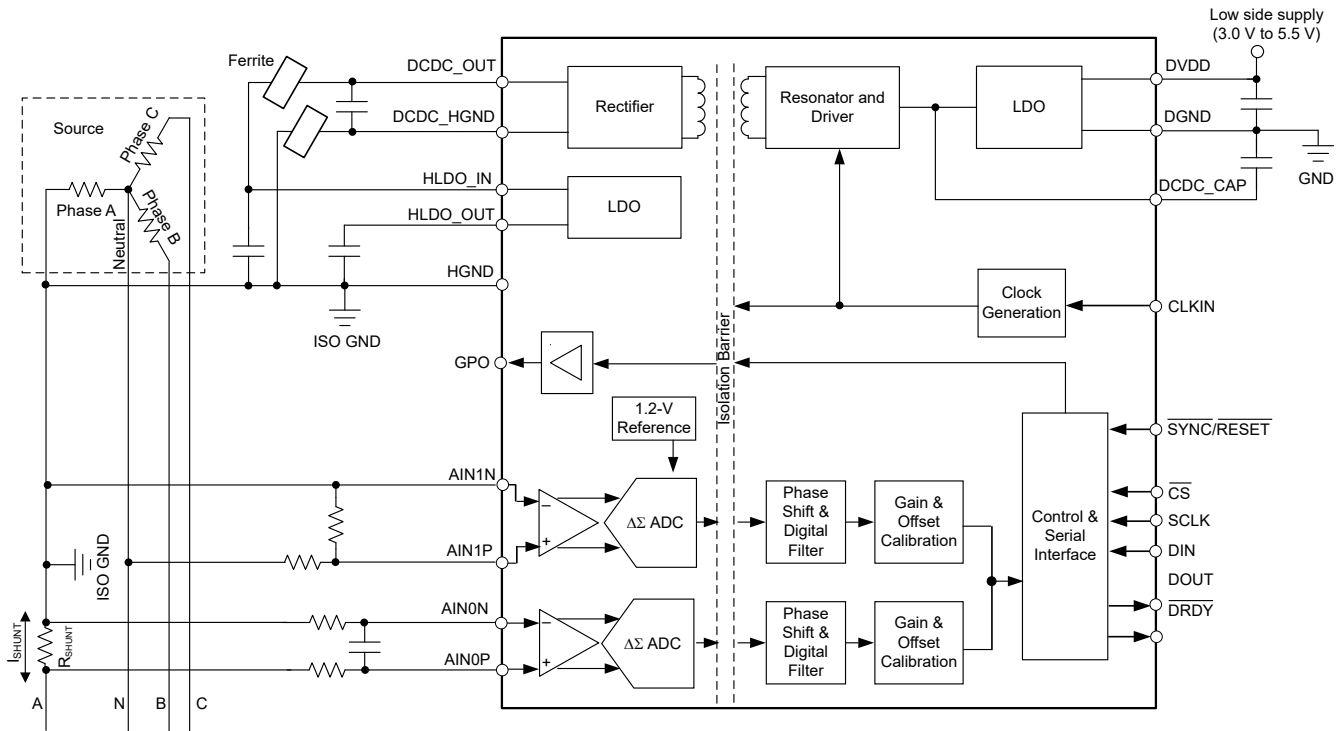


图 5-3. AMC131M02 功能方框图

5.4 AMC3330

AMC3330 是一款具有高输入阻抗的全差分精密隔离式放大器，也是一个集成式直流/直流转换器，利用此转换器，可以从低压侧的单个 3.3V 或 5V 电压电源为器件供电。该器件的输入级驱动一个二阶 Δ - Σ 调制器。调制器使用内部电压基准和时钟发生器将模拟输入信号转换为数字比特流。驱动器（在功能方框图中称为 TX）通过隔离高侧和低侧电压域的隔离栅传输调制器的输出。接收的比特流和时钟由低侧的第四阶模拟滤波器进行同步和处理，并呈现为差分模拟输出。

模拟输入级的 $1.2\text{G}\Omega$ 差分输入阻抗支持在使用高阻抗电阻分压器的高压应用中进行低增益误差信号感测。信号路径通过双电容二氧化硅 (SiO_2) 绝缘栅进行隔离，而电源隔离则采用片上变压器，以薄膜聚合物作为绝缘材料进行隔离。

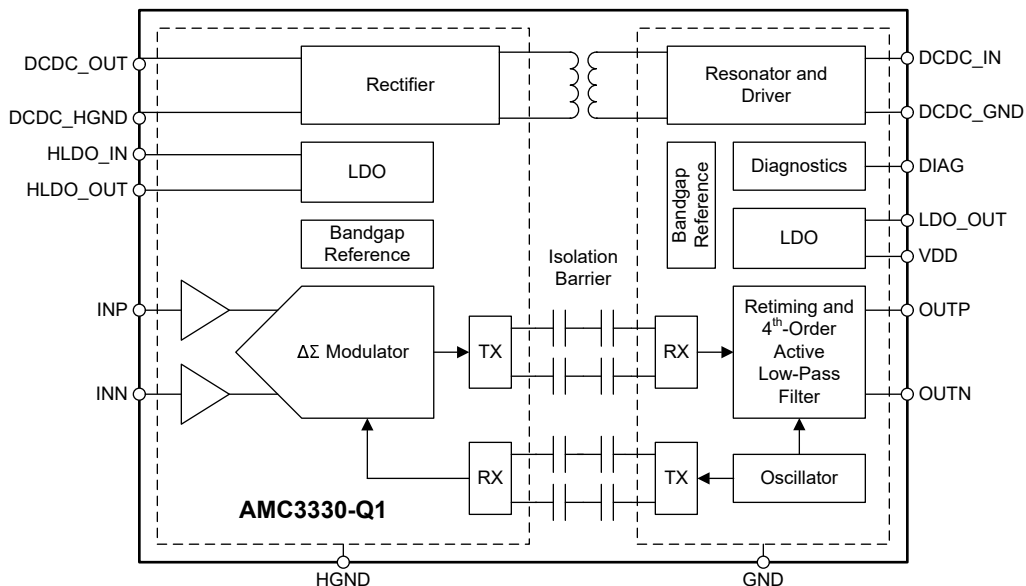


图 5-4. AMC3330 功能方框图

5.5 ISO773x

ISO773x 器件是高性能三通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的 5000VRMS (DW 封装) 和 3000VRMS (DBQ 封装) 隔离额定值。

该系列包含的器件具有符合 VDE、CSA、TUV 和 CQC 标准的增强绝缘等级。ISO7731B 器件专为仅需要基本绝缘额定值的应用而设计。

在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 时，ISO773x 系列器件可提供高电磁抗扰度和低辐射，并具备低功耗特性。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲器均由双电容二氧化硅 (SiO₂) 绝缘栅相隔离。该器件配有使能引脚，可用于将各自输出置于高阻态以适用于多控制器驱动应用中，并降低功耗。

ISO7730 器件具有三条正向通道，而 ISO7731 器件具有两条正向通道和一条反向通道。如果输入电源或信号丢失，不带后缀 F 的器件默认输出高电平，带后缀 F 的器件默认输出低电平。更多详细信息，请参阅器件功能模式部分。

此系列器件与隔离式电源结合使用，有助于防止数据总线 (例如 RS-485、RS-232 和 CAN) 或者其他电路上的噪声电流进入本地接地以及干扰或损坏敏感电路。凭借出色的芯片设计和布线技术，ISO773x 器件的电磁兼容性得到了显著增强，可缓解系统级 ESD、EFT 和浪涌问题并符合辐射标准。ISO773x 系列器件采用 16 引脚小外形尺寸集成电路 (SOIC) 和 QSOP 封装。

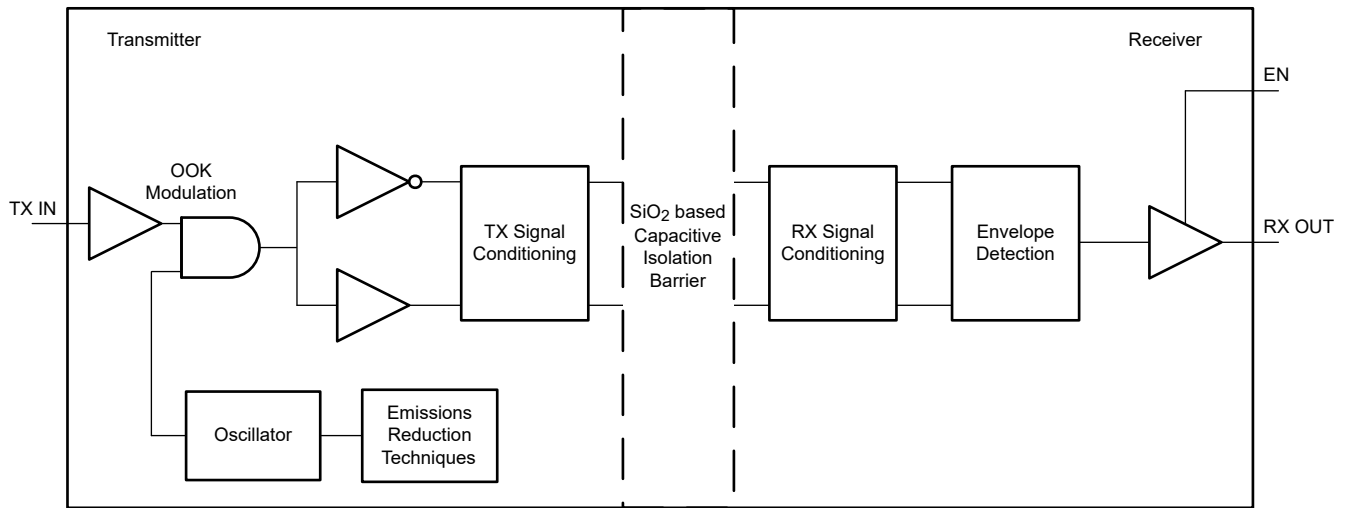


图 5-5. 数字电容隔离器概念方框图

6 Topos 仿真结果和结论

为以下三种设计构建仿真模型：

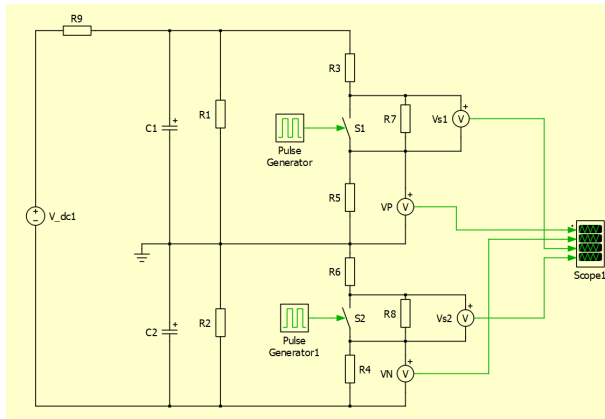


图 6-1. 设计 1 仿真模型

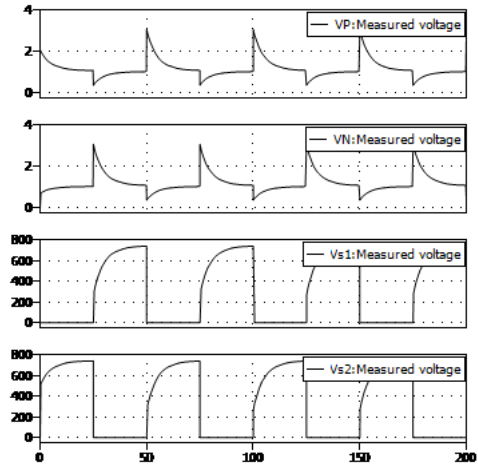


图 6-2. 设计 1 结果

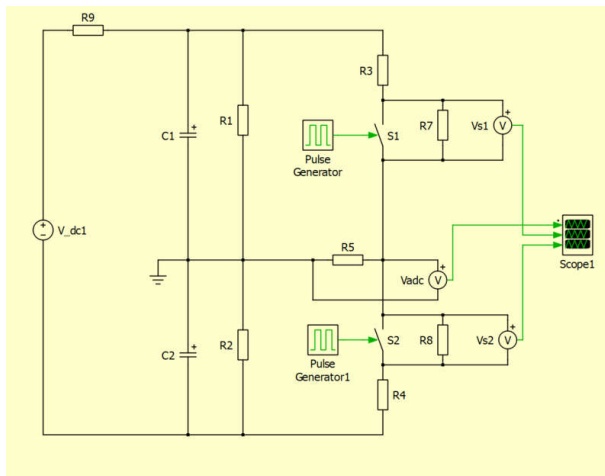


图 6-3. 设计 2 仿真模型

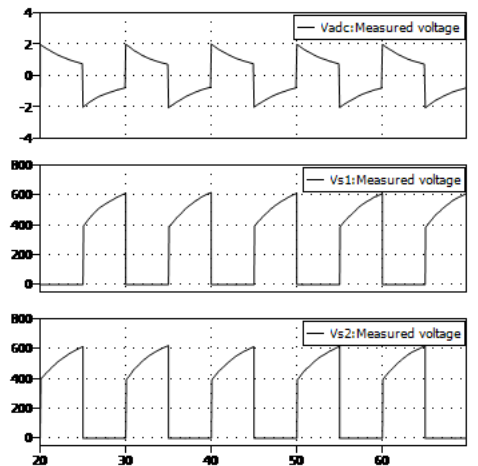


图 6-4. 设计 2 结果

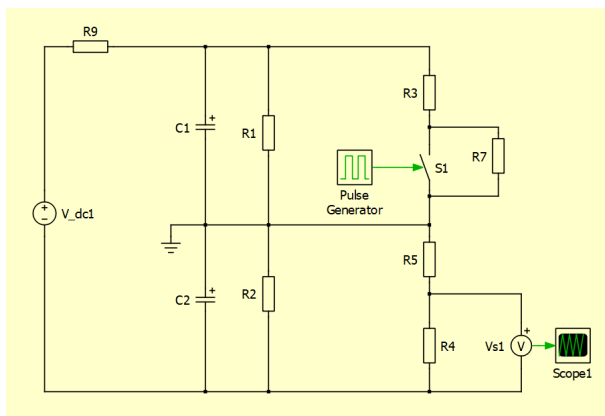


图 6-5. 设计 3 仿真模型

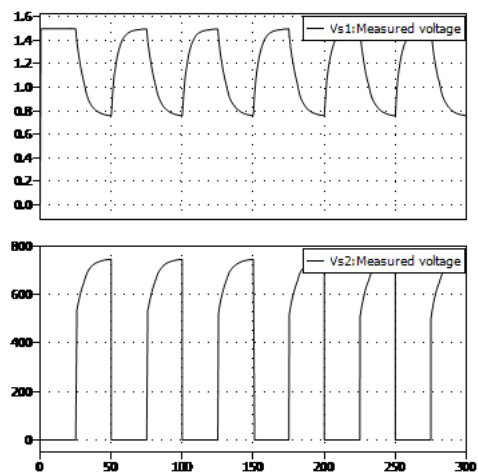


图 6-6. 设计 3 结果

以设计 3 为例，如仿真结果所示，当采样时间大于 5.175s 时，采样电压可为 0.995u。

表 6-1. 设计 3 测试结果

RisoP	RisoN	RisoP'	RisoN'	错误 P	错误 N
10000.0000	10000.0000	10065.1708	10028.0692	-0.6517%	-0.2807%
NC	10000.0000		10027.3703		-0.2737%
10000.0000	NC	10067.1862		-0.6719%	
50.0000	50.0000	50.4129	50.5771	-0.8258%	-1.1543%
50.0000	NC	46.8382		6.3236%	
NC	50.0000		50.7680		-1.5359%

如表中所示，当 RisoP=50kohm 时，获得最差的精度 6.3236%，实际测试结果与理论相符。

7 总结

总之，本文中提到的三种绝缘测试设计适用于不同的应用场景。该低成本设计也通过实验进行了验证。在进行绝缘监测时，您可以考虑这些设计。

8 参考资料

- 德州仪器，[高压电动汽车充电和太阳能中的绝缘监测 AFE 参考设计](#)。
- 德州仪器，[BQ79731-Q1 用于高压汽车 BMS 中的电池包电压电流和隔离电阻监测器](#)，数据表。
- 德州仪器，[UCC33421-Q1 超小型、1.5W、5.0V、5kVRMS 隔离、汽车直流/直流模块](#)，数据表。
- 德州仪器，[AMC131M02 具有集成直流/直流转换器的双通道、64kSPS、同步采样、24 位增强型隔离式 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#)，数据表。
- 德州仪器，[MC3330 具有集成式直流/直流转换器的 \$\pm\$ 1V 输入、增强型隔离式精密放大器](#)，数据表。
- 德州仪器，[ISO773x EMC 性能优异的高速、增强型和基础型三通道数字隔离器](#)，数据表。

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、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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司