

Application Note

利用 **ADS125H18** 设计符合 **EMC** 标准的高精度电压 ($\pm 10\text{V}$) 和电流 ($4\text{-}20\text{mA}$) 输入测量系统

Bryan Lizon

摘要

本应用手册为设计适用于工业环境的电磁兼容性 (EMC) 优化型电压 ($\pm 10\text{V}$) 和电流 ($4\text{-}20\text{mA}$) 测量系统提供了实用指南。本应用手册深入探讨了可帮助设计人员通过标准 EMC 测试的重要设计方面，包括有效电路设计和印刷电路板 (PCB) 布局技术。此外，本应用手册还介绍了使用 ADS125H18 EMC 测试板的测试设置注意事项，并解释了 IEC 61000-4-x 标准 EMC 测试结果，有助于开发可靠的工业模拟输入模块。

内容

1 设计概述和测量性能 (正常运行)	2
1.1 设计概述.....	2
1.2 正常运行期间的 EMC 测试板电压测量性能.....	4
1.3 正常运行期间的 EMC 测试板电流测量性能.....	6
2 EMC 测试板电路和 PCB 布局注意事项.....	8
2.1 针对 EMC 合规性的电路设计注意事项.....	8
2.2 针对 EMC 合规性的 PCB 布局注意事项.....	17
3 EMC 测试系统、标准和结果.....	23
3.1 EMC 测试系统.....	23
3.2 EMC 测试标准.....	24
3.3 EMC 测试结果.....	24
4 原理图、PCB 布局和物料清单.....	41
4.1 原理图.....	41
4.2 PCB 布局.....	45
4.3 物料清单 (BOM).....	47
5 总结.....	52
6 参考资料.....	53

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 设计概述和测量性能 (正常运行)

本节简要介绍了 ADS125H18 EMC 测试板，并展示了正常运行期间的电压和电流输入测量性能。

1.1 设计概述

现代工业控制系统在工厂或设备的监测和运行中通常使用过程级电压 ($\pm 10V$) 或电流 (4-20mA) 信号。模拟输入模块接收这些信号并将其转换为数字信号，以便控制系统能够做出高效精确的决策。因此，设计出既能实现高精度电压与电流测量，又能抵御电磁干扰 (EMI)、过压以及其他干扰信号的系統至关重要。

本应用手册中讨论的 EMC 测试板采用了 ADS125H18，这是一款精密、24 位、1MSPS 的 $\Delta\Sigma$ 模数转换器 (ADC)，专为模拟输入模块而设计。ADS125H18 最多可测量 8 路全差分模拟输入，或最多 16 路单端高压输入信号。每个输入都包含一个高阻抗分压器，其中集成了精密匹配电阻器，可将输入电压按比例缩小至 ADC 的输入范围。ADS125H18 具有一个通道自动序列发生器和一个 FIFO (先入先出) 缓冲器。电源可扩展架构提供了四种速度模式来优化数据速率、分辨率和功耗。图 1-1 展示了 ADS125H18 功能方框图：

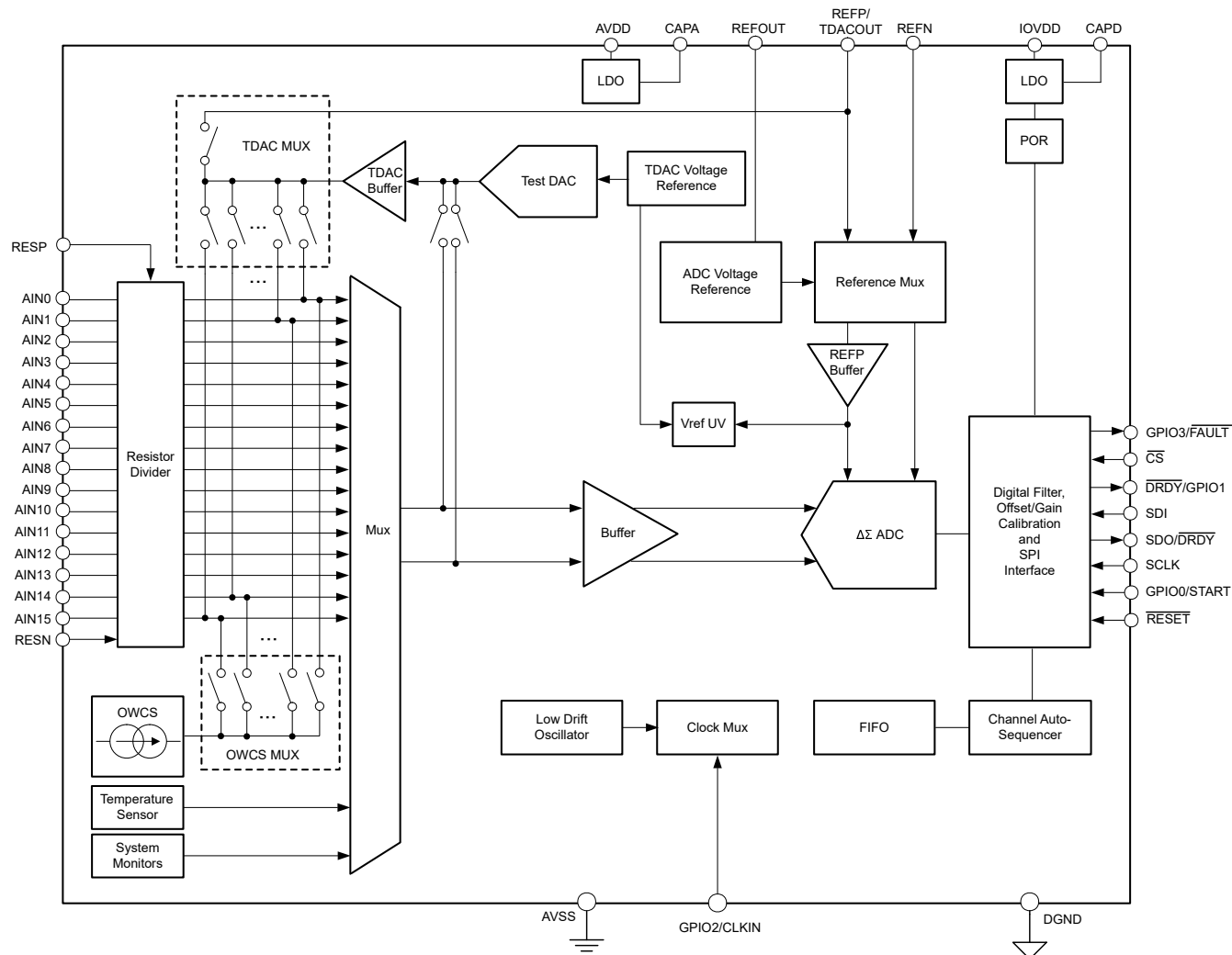


图 1-1. ADS125H18 功能框图

ADS125H18 EMC 测试板包括外部隔离式电源和数字隔离器。数字隔离器在 ADC 串行外设接口 (SPI) 与精密主机接口 (PHI) 控制器卡 (用于监控来自 ADS125H18 的转换数据) 之间提供电隔离。PCB 设计用于在恶劣电磁环境中运行的系统，满足 IEC 61000-4-x 标准。

图 1-2 展示了 EMC 测试板布局的整体视图：

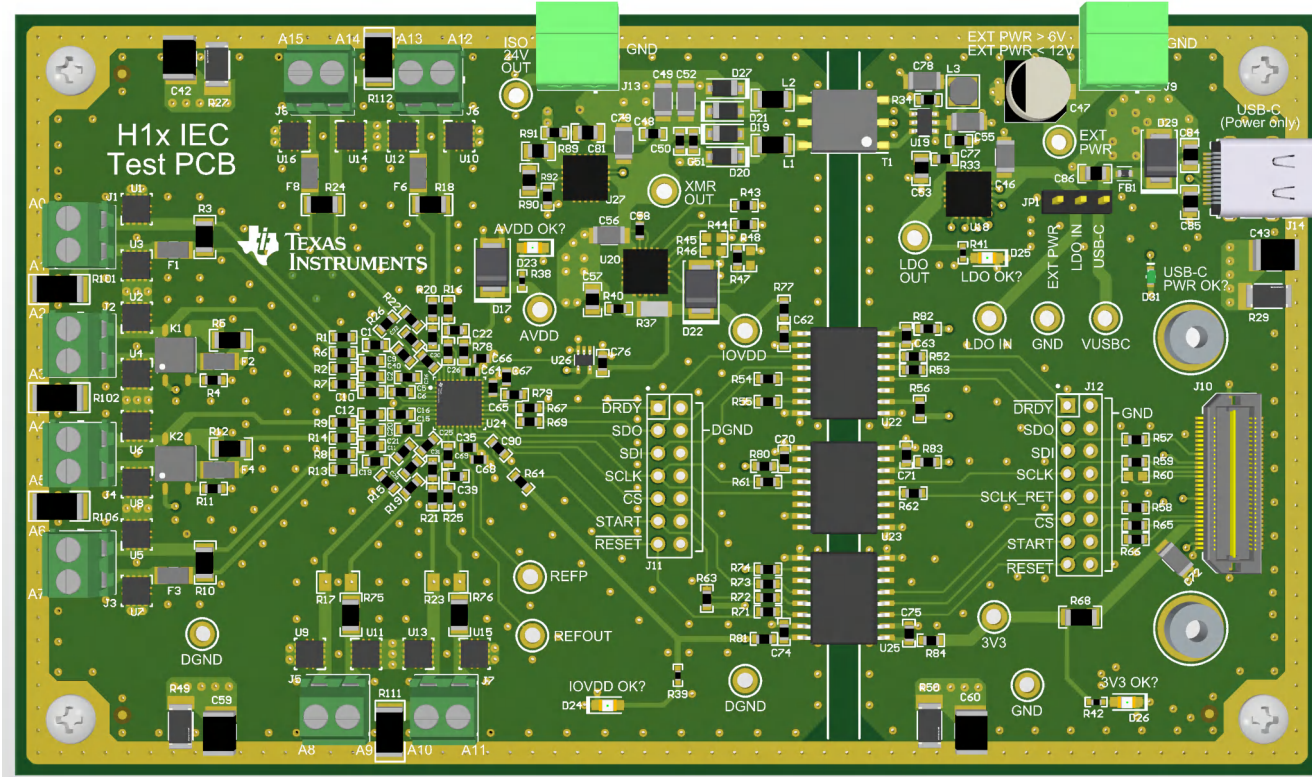


图 1-2. ADS125H18 EMC 测试板

1.2 正常运行期间的 EMC 测试板电压测量性能

图 1-3 展示了测量 10V 输入信号的 ADS125H18 方框图。请注意，此案例中不需要外部元件，因为 ADS125H18 在每个通道中集成了一个高压电阻分压器，使 ADC 可以直接测量 10V 信号。

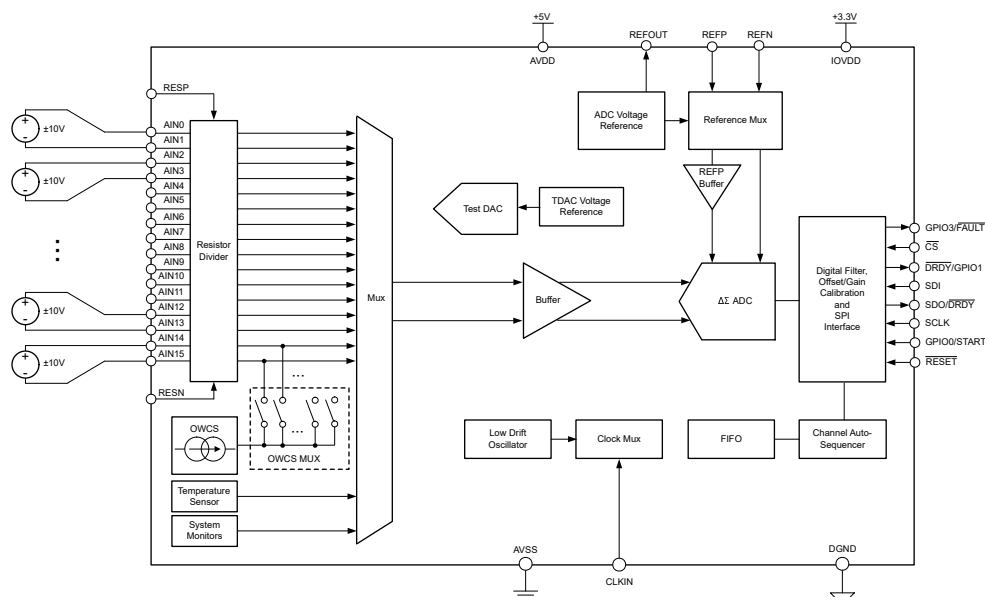


图 1-3. 使用 ADS125H18 测量电压输入 (±10V)

EMC 测试板上的 ADS125H18 已按照以下设置进行编程，以测量图 1-3 中所示的电路：

- 12.5kSPS 数据速率
- Sinc4 数字滤波器
- AIN8/AIN9 差分模拟输入
- 内部 2.5V 基准
- 内部 25.6MHz 振荡器
- 速度模式 3 ($f_{MOD} = 12.8\text{MHz}$)

图 1-4 展示了实际的 ADS125H18 EMC 测试板，其将 9V 电池连接到输入端来模拟 10V 过程信号：

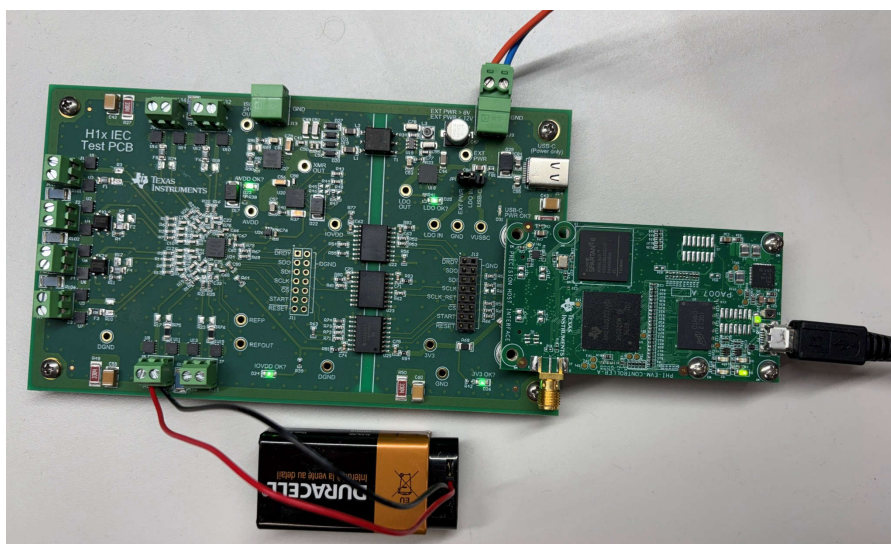


图 1-4. 测量 9V 电池的 ADS125H18 EMC 测试板

首先使用数字万用表 (DMM) 测量实际输入信号和基准电压，从而计算 ADS125H18 EMC 测试板的性能。测得的这些值如下所示：

- $V_{IN} = 9.300V$
- $V_{REF} = 2.508V$

图 1-5 展示了测试期间 ADS125H18 EVM 图形用户界面 (GUI) 上的电压测量输出：

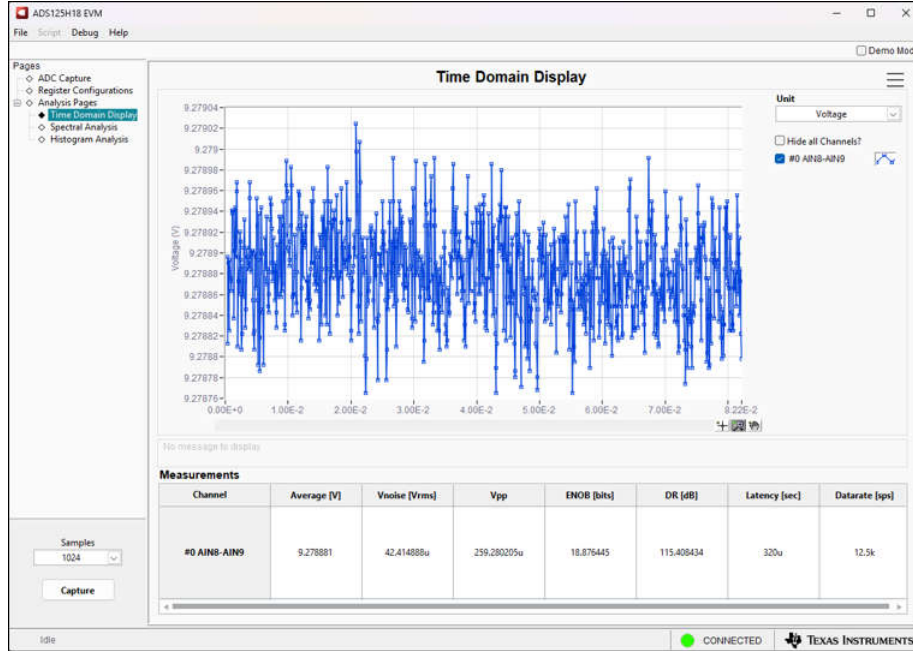


图 1-5. ADS125H18 EMC 测试板 GUI 上的电压测量结果

利用 方程式 1，根据此信息来确定这些测量的总体未调节误差 (TUE)：

$$TUE = \frac{(V_{ADC} - V_{DMM})}{V_{DMM}} \times 100 \quad (1)$$

其中：

- V_{ADC} = ADC 测得的电压
- V_{DMM} = 使用 DMM 在端子块上测得的电压

方程式 2 使用 图 1-5 中的平均值 9.278881V 来计算电压测量误差

$$TUE = \frac{(9.278881V - 9.300V)}{9.300V} \times 100 = -0.228\% \quad (2)$$

使用实际测得的 V_{REF} 电压来确定消除 V_{REF} 误差后的 TUE。方程式 3 计算比例因子值，假设 $V_{REF_Ideal} = 2.5V$ 且 $V_{REF_Measured} = 2.508V$ ：

$$\text{Scaling Factor} = \frac{V_{REF_Measured}}{V_{REF_Ideal}} = \frac{2.508V}{2.5V} = 1.0032 \quad (3)$$

方程式 4 计算消除 V_{REF} 误差后的电压测量误差：

$$TUE_{No_VREF_Error} = \frac{(9.278881V - 9.300V)}{9.300V} \times 100 = 0.04\% \quad (4)$$

最终，这些结果表明，ADS125H18 EMC 测试板是一款适用于过程级电压测量（例如 $\pm 10V$ ）的高性能系统。

1.3 正常运行期间的 EMC 测试板电流测量性能

图 1-6 展示了测量 20mA 输入信号的 ADS125H18 方框图。这些测量需要使用外部分流器将电流转换为 ADC 可测量的电压。为此，ADS125H18 EMC 测试板在某些通道上包含电流测量分流器。

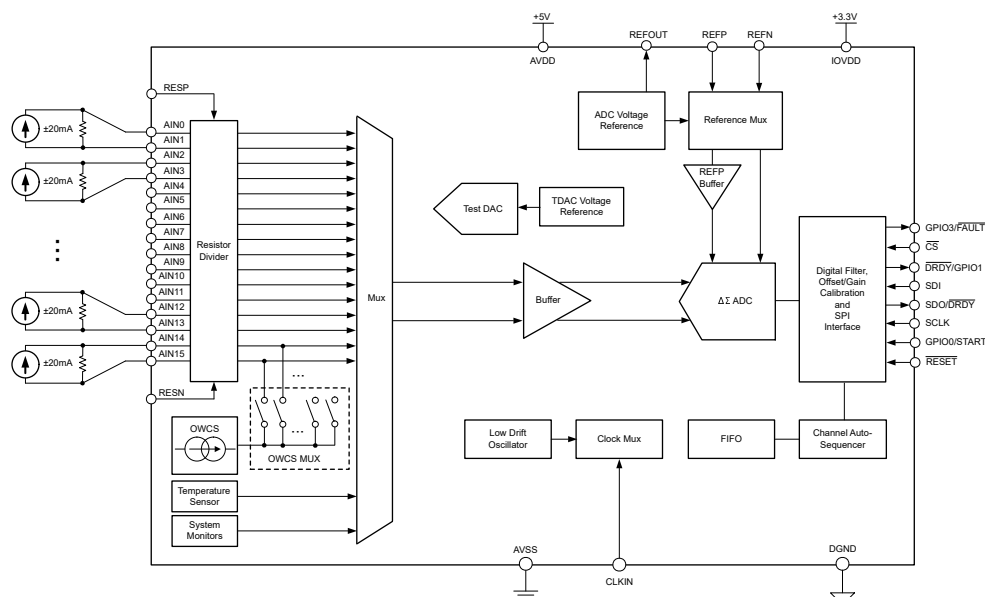


图 1-6. 使用 ADS125H18 测量电流输入 ($\pm 20\text{mA}$)

EMC 测试板上的 ADS125H18 已按照以下设置进行编程，以测量图 1-6 中所示的电路：

- 12.5kSPS 数据速率
- Sinc4 数字滤波器
- AIN0/AIN1 差分模拟输入
- 内部 2.5V 基准
- 内部 25.6MHz 振荡器
- 速度模式 3 ($f_{\text{MOD}} = 12.8\text{MHz}$)

图 1-7 展示了实际的 ADS125H18 EMC 测试板，其连接到用于生成电流输出信号的 XTR111EVM。EMC 测试板隔离式 24V 输出为 XTR111EVM 供电。XTR111EVM 使用 2.5V ADC REFOUT 电压作为其输入来生成 10mA 输出。ADS125H18 通过置于 AIN0 和 AIN1 输入端之间的外部 100Ω 分流器来测量此 10mA 输出。

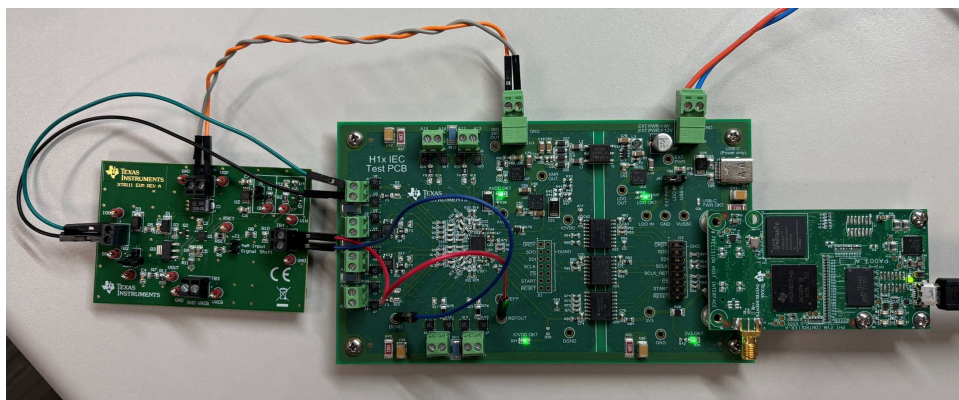


图 1-7. 测量 XTR111EVM 电流输出的 ADS125H18 EMC 测试板

通过首先使用万用表测量实际输入电流、分流器电阻和基准电压，计算 ADS125H18 EMC 测试板的性能。测得的这些值如下所示：

- $R_{\text{Shunt}} = 100\ \Omega$
- $I_{\text{IN}} = 10.06\text{mA}$
- $V_{\text{IN}} = 100\ \Omega \times 10.06\text{mA} = 1.006\text{V}$
- $V_{\text{REF}} = 2.508\text{V}$

图 1-8 显示了测试期间 ADS125H18 EVM GUI 的电流测量输出：



图 1-8. ADS125H18 EMC 测试板 GUI 上的电流测量结果

利用 方程式 5，根据此信息来确定这些测量的总体未调节误差 (TUE)：

$$\text{TUE} = \frac{(V_{\text{ADC}} - V_{\text{DMM}})}{V_{\text{DMM}}} \times 100 \quad (5)$$

方程式 6 使用 图 1-8 中的平均值 1.003111V 来计算电流测量误差

$$\text{TUE} = \frac{(1.003111\text{V} - 1.006\text{V})}{1.006\text{V}} \times 100 = -0.287\% \quad (6)$$

使用实际测得的 V_{REF} 电压来确定消除 V_{REF} 误差后的 TUE。方程式 7 计算比例因子值，假设 $V_{\text{REF}_{\text{Ideal}}} = 2.5\text{V}$ 且 $V_{\text{REF}_{\text{Measured}}} = 2.508\text{V}$ ：

$$\text{Scaling Factor} = \frac{V_{\text{REF}_{\text{Measured}}}}{V_{\text{REF}_{\text{Ideal}}}} = \frac{2.508\text{V}}{2.5\text{V}} = 1.0032 \quad (7)$$

方程式 8 计算消除 V_{REF} 误差后的电流测量误差：

$$\text{TUE}_{\text{No}_V\text{REF_Error}} = \frac{(1.00632\text{V} - 1.006\text{V})}{1.006\text{V}} \times 100 = 0.032\% \quad (8)$$

最终，这些结果表明，ADS125H18 EMC 测试板是一款适用于过程级电流测量（例如 4-20mA 或 $\pm 20\text{mA}$ ）的高性能系统。

2 EMC 测试板电路和 PCB 布局注意事项

本节讨论了实现符合 EMC 标准的过程级电压和电流测量系统的电路和 PCB 布局注意事项。

2.1 针对 EMC 合规性的电路设计注意事项

本节介绍了 EMC 测试板设计，该设计可以保护 ADS125H18，提高系统 EMC 性能并维持测量精度。图 2-1 展示了 ADS125H18 EMC 测试板的方框图：

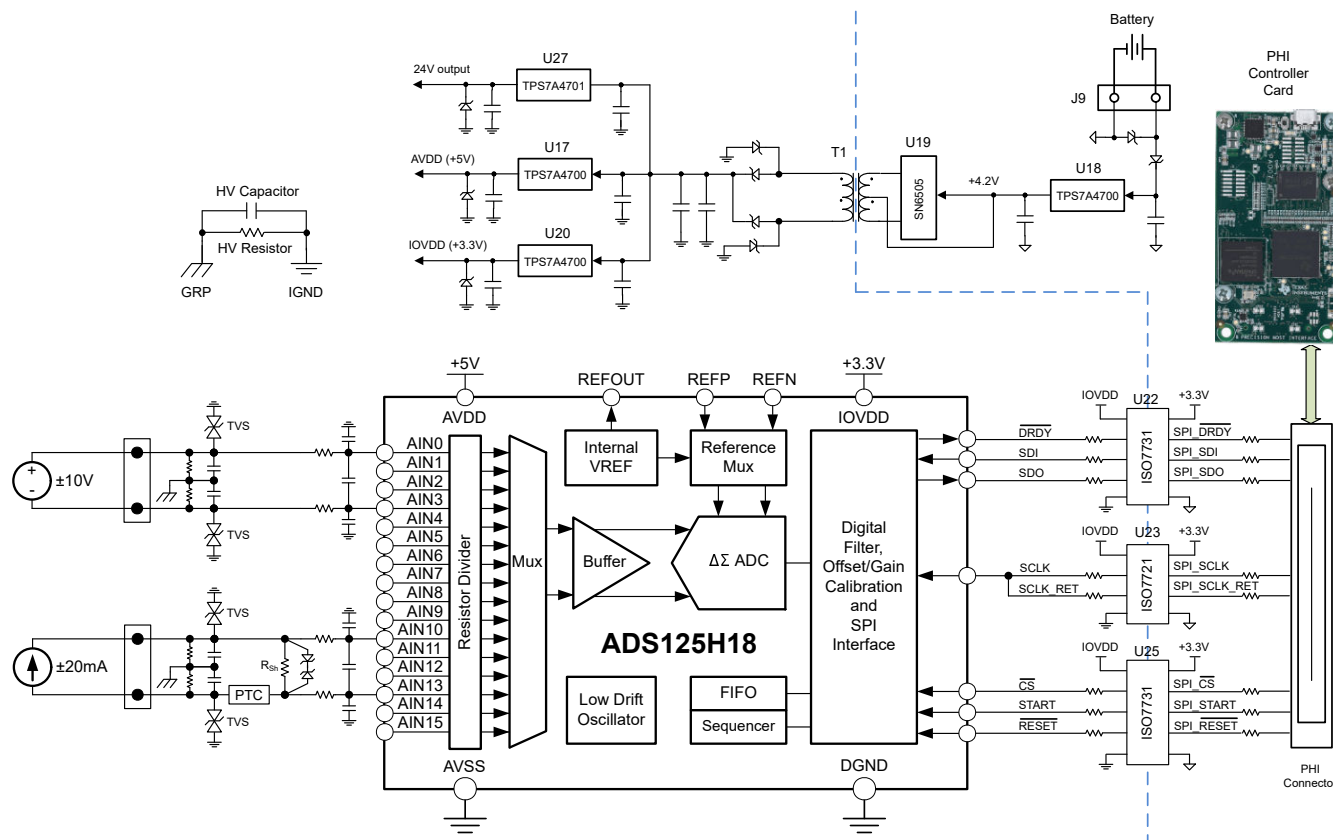


图 2-1. ADS125H18 具有 10V 输入信号和 PHI 连接的 EMC 测试电路板

EMC 测试板的注意事项包括：

- 每个输入连接器引脚上的高压电容器和电阻器
- TVS 二极管
- 保护分流器：PTC 和齐纳二极管
- 数字信号串联电阻器
- 数字隔离
- 电源和保护
- 用于放电路径的高压电容器及电阻器

2.1.1 每个输入连接器引脚上的高压电容器和电阻器

直接在输入连接器上对信号进行滤波有助于提高静电放电抗扰度，减少辐射发射并提高输入端耦合突发信号的抗扰度。进入 PCB 的每个输入信号都需要一个滤波器元件，例如陶瓷电容器。使用宽走线将该电容器连接在输入连接器与大地之间。将此电容器尽可能靠近连接引脚放置。

图 2-2 展示了 EMC 测试板上的高压电容器电路。

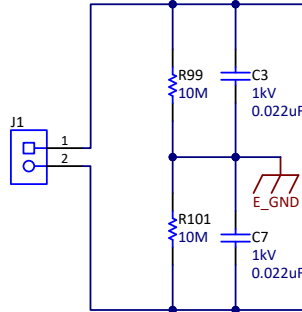


图 2-2. 输入连接器上的高压电容器

使用高额定电压电容器，因为在 EMC 测试期间，该元件会暴露在高能瞬变信号（包括静电放电，电气快速瞬变或浪涌信号）中。

使用输入信号频率来确定电容值。此设计测量低频电压和电流信号，因此可以使用容值更大的电容器。因此，此设计在每个 ADC 通道上尽可能靠近输入端子块的位置使用 1kV 高压 X7R 型 0.022 μF 陶瓷电容器，以便通过最短路径将瞬态能量释放到大地。

图 2-2 展示了一个与该电容器并联的 10MΩ 电阻器。这些电阻器有助于对电容器进行放电，以避免在反复瞬变期间积累电荷。否则，此电荷会累积并降低电容器的有效性。为这些元件使用 1-10MΩ 范围内的高额定电压电阻器。

2.1.2 TVS 二极管

每个模拟输入都包括一个接地的双向 TVS 二极管。TVS3301 平缓钳位 TVS 二极管的反向截止电压为 $\pm 33\text{V}$ ，典型击穿电压为 $\pm 37.5\text{V}$ 。这些 TVS 二极管在整个温度范围内具有低泄漏电流，适用于高精度应用。这些二极管特性可将瞬态能量分流到远离信号路径的位置，同时：

- 能够无干扰地测量双向信号 ($\pm 10\text{V}$)
- 支持高达 30V 的输入电压，包括共模偏移
- 在持续的过压故障条件下（例如 24V 电源短接到输入端）保持非活动状态

为获得出色性能，请选择具有类似特性的替代 TVS 二极管。图 2-3 显示，在 ADS125H18 EMC 测试板的一个电流输入通道上，A0 和 A1 引脚各安装了一个 TVS3301。

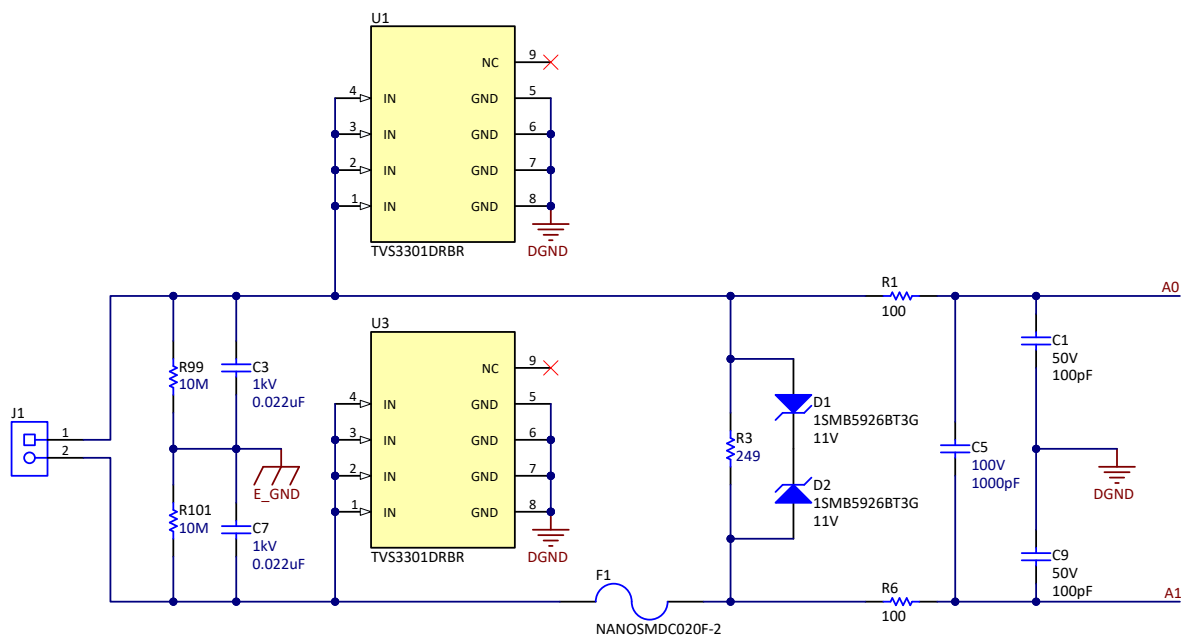


图 2-3. 各模拟输入上的双向 TVS 二极管

2.1.3 保护分流器：PTC 和齐纳二极管

图 2-3 显示 EMC 测试板在某些模拟输入上包含 249 Ω 分流器 (R3)。这些分流器将现场变送器的电流输出转换为 ADC 在正常运行期间测得的电压。但是，可能会出现对分流器施加持续过压并可能导致损坏的故障情况。例如，最常见的过压事件是标称 24V 电源意外短接到输入端。方程式 9 和方程式 10 分别计算了在施加 24V 电压时流过 249 Ω 分流器的电流及其耗散的功率：

$$I_{\text{Shunt}} = \frac{V_{\text{Supply}}}{R_{\text{Shunt}}} = \frac{24\text{V}}{249\Omega} = 96.4\text{mA} \quad (9)$$

$$P_{\text{Shunt}} = I_{\text{Shunt}}^2 \times R_{\text{Shunt}} = 96.4\text{mA}^2 \times 249\Omega = 2.31\text{W} \quad (10)$$

方程式 10 显示，在这些故障条件下，典型的 0.1W 或 0.25W 分流器会被损坏。因此，ADS125H18 EMC 测试板采用背对背齐纳二极管和 PTC 保险丝来帮助保护分流器，具体如下：

- 背对背齐纳二极管 (图 2-3 中的 D1 和 D2) 通过在正负过压期间钳制到特定电压来保护分流器。该钳位电压限制了流过分流器的电流，使得任何剩余的故障电流都流经二极管
- PTC 保险丝 (图 2-3 中的 F1) 通过在温度升高时增加其电阻来保护齐纳二极管。温度升高是由于大故障电流流过二极管导致过大的功率耗散。随后，升高的 PTC 保险丝电阻会减小电源提供的总故障电流，并使系统保持稳定

图 2-4 展示了 ADS125H18 EMC 测试板上的电流输入通道、其中背对背齐纳二极管和 PTC 保险丝以黄色突出显示：

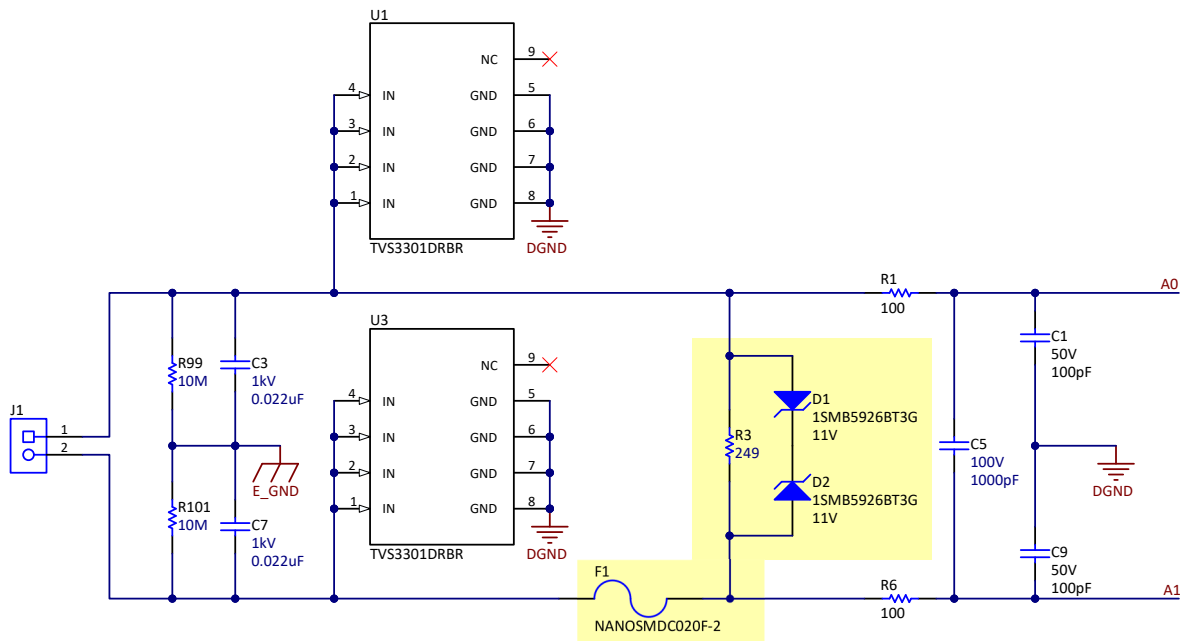


图 2-4. ADS125H18 EMC 测试板上的分流保护电路

表 2-1 介绍了重要的齐纳二极管参数，其定义以及示例值：

表 2-1. 重要的齐纳二极管参数、定义和值

参数	定义	值 (25°C 时)
齐纳电压 (V_Z)	可以通过 PTC 而不会导致跳闸的电流	11V
浪涌功率 (P_S)	二极管能够维持给定输入电流的时间量	在 90W 下维持 1.5ms
正向电压 (V_F)	正向偏置时的二极管压降	0.7V
泄漏电流 (I_R)	在关断状态下流过分流器并产生测量误差的剩余器件电流	1 μ A
直流齐纳电流 (I_Z)	齐纳二极管钳制到的电流	136mA

表 2-2 介绍了重要的 PTC 保险丝参数，其定义以及示例值：

表 2-2. 重要 PTC 保险丝参数、定义和值

参数	定义	值 (25°C 时)
保持电流 (I_H)	在 25°C 下可以通过 PTC 而不会导致跳闸的电流	200mA
跳闸电流 (I_T)	在 25°C 下 PTC 开始跳闸的电流	600mA
最大电流 (I_{MAX})	可以流过 PTC 而不会损坏器件的最大电流	30A
功率耗散 (P_D)	PTC 在跳闸状态下耗散的功率	0.9W
跳闸时间 (t_{Trip})	在给定输入电流下 PTC 跳闸的时间量	8A 时为 1.5ms

通过一个示例，可以帮助了解这些元件如何保护分流器。假设在分流器两端意外短接了一个具有 8A 电流限制的 24V 电源。齐纳二极管会立即钳制分流器两端的电压，同时故障电流流经齐纳二极管而非分流器。方程式 11 使用表 2-1 中的值计算了分流器两端的总钳位电压：

$$V_{Clamp} = V_Z + V_F = 11V + 0.7V = 11.7V \quad (11)$$

齐纳二极管将分流器两端的电压钳制在 11.7V。方程式 12 和方程式 13 分别计算了在此条件下流过分流器的电流以及分流器耗散的功率：

$$I_{Shunt} = \frac{V_{Clamp}}{R_{Shunt}} = \frac{11.7V}{249\Omega} = 47mA \quad (12)$$

$$P_{Shunt} = \frac{V_{Clamp}^2}{R_{Shunt}} = \frac{11.7V^2}{249\Omega} = 0.55W \quad (13)$$

剩余的电源电流流经齐纳二极管。方程式 14 和方程式 15 分别计算了在此条件下流过二极管的电流以及二极管耗散的功率：

$$I_{Zener} = I_{Supply} - I_{Shunt} = 8A - 47mA = 7.953A \quad (14)$$

$$P_{Zener} = V_{Zener} \times I_{Zener} = 11V \times 7.953A = 87.48W \quad (15)$$

二极管浪涌功率 (P_S) 规格指明了二极管能够承受过流事件多长时间。二极管数据表通常会提供一张曲线图，x 轴为脉冲持续时间，y 轴为峰值功率，因为二极管能承受的电流会随脉冲持续时间缩短而增大。在此示例中，齐纳二极管可承受 $P_S = 90W$ 维持 1.5ms。因此，根据方程式 15 中的结果，该二极管能够承受过流条件大约 1.5ms。图 2-5 展示了电源短接到输入瞬间的电路行为。请注意，为简单起见，已移除部分元件。

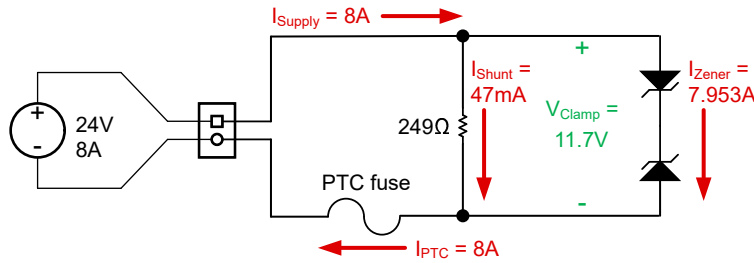


图 2-5. 电源短路瞬间的分流保护电路

选择 PTC 保险丝时，需确保该元件的跳闸时间与电流的关系曲线低于 P_S ，以免二极管损坏。本例中，根据表 2-2 中的规格，PTC 保险丝在 8A 下的跳闸时间 $t_{Trip} = 1.5ms$ ，从而保护了二极管。PTC 保险丝在跳闸状态下电阻显著增大，从而减小了电源提供的电流，并且保险丝两端的剩余电源电压降低，如方程式 16 所示：

$$V_{PTC} = V_{Supply} - V_{Shunt} = 24V - 11.7V = 12.3V \quad (16)$$

PTC 保险丝还会在跳闸状态下维持其功率耗散规格 (P_D)。方程式 17 根据表 2-2 中的 P_D 规格计算了 PTC 保险丝电流：

$$I_{PTC} = \frac{P_D}{V_{PTC}} = \frac{0.9W}{12.3V} = 73mA \quad (17)$$

剩余电流流经齐纳二极管，如方程式 18 所示：

$$I_{Zener} = I_{PTC} - I_{Shunt} = 73mA - 47mA = 26mA \quad (18)$$

确认当 PTC 保险丝跳闸时， I_{Zener} 小于齐纳二极管最大直流电流规格 (I_Z)。方程式 18 显示 $I_{Zener} = 26mA$ ，这完全在表 2-1 所规定的 $I_Z = 136mA$ 的限值之内。图 2-6 显示了在 1.5ms 后 PTC 保险丝跳闸时的电路行为。

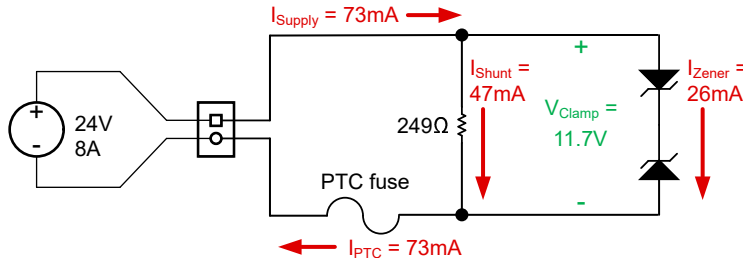


图 2-6. 电源短路后 1.5ms 的分流保护电路

电路将保持图 2-6 所示的状态，直至故障条件解除。因此，设计系统时应确保所有元件能够无限期承受所需的电压和电流。此外，在工业应用中选择分流保护元件时，还需考虑以下因素：

- PTC 保险丝的行为会随温度变化。在低温下要格外小心，因为此时的跳闸电流和功率耗散会高得多。这种行为要求齐纳二极管在 PTC 保险丝跳闸后能够承受更大的直流电流。相比之下，在较高温度下，PTC 保险丝会在低得多的电流下跳闸。这可能会导致系统正在测量有效电流时，PTC 保险丝就发生跳闸
- 将两个分流器并联，有助于降低每个器件上的总功率耗散，因为电流会减半，而电阻会加倍。然而，功率公式中使用了电流的平方 ($P = I^2R$)，因此与单个分流器相比，每个分流器耗散的功率将减半。
- 齐纳二极管的泄漏电流会叠加到被测输入电流中，从而产生误差。应选择低泄漏电流元件，以保持系统的高精度

2.1.4 数字信号串联电阻器

高速数字信号上的快速转换可能会导致在传输线路较长的情况下产生辐射发射或者反射。添加串联电阻器有助于增加任何数字信号（尤其是高速时钟信号）的上升和下降时间，并通过以下方式影响 EMC 性能：

- 减慢转换边沿：串联端接电阻器通过增加与走线电容和电感串联的电阻，有效地增加数字线路的时间常数。
- 减少反射和发射：串联端接电阻器可以使源阻抗与传输线路的特征阻抗相匹配，从而最大限度地减少可能导致振铃、过冲和下冲的反射。
- 降低高频谐波：转换时间越长，通常导致辐射发射的带宽和高频谐波就越低。
- 提高信号完整性：串联端接电阻器有助于提高数字信号的完整性，从而实现更可靠的数据传输。

选择与传输线路的特性阻抗匹配的串联电阻值，从而实现出色的阻抗匹配和最小反射。图 2-7 展示了 ADS125H18、数字隔离器和 PHI 控制器板之间的数字线路上的 $49.9\ \Omega$ 电阻器。将串联电阻器放置在尽可能靠近驱动器的位置，以实现有效的串联端接。

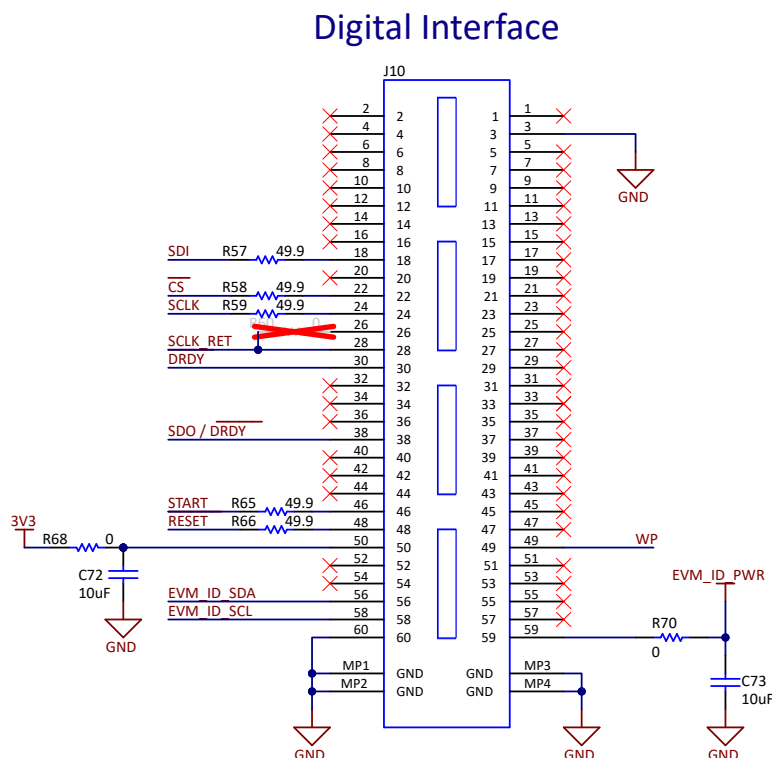


图 2-7. 插入数字信号串联电阻器

2.1.5 数字隔离

此 EMC 测试板采用 ISO7721、ISO7730 和 ISO7731 数字隔离器来隔离数据通信。这些增强型隔离器具有高抗扰度，5kVrms（DW 封装）隔离额定值，8kVpk 最大瞬态隔离电压和 12.8kVpk 最大浪涌隔离电压。这些隔离器最高支持 100Mbps 的信号速率，具有低传播延迟（11ns）和宽电源电压范围（2.25V 至 5.5V）。

每个数字隔离器在电源引脚上还包含一个 $0\ \Omega$ 电阻器，可用于滤除高频噪声。将这些电阻器替换为 $1\text{--}3\ \Omega$ 元件或安装一个铁氧体磁珠，可消除特定频率。

图 2-8 展示了 EMC 测试板上的数字隔离电路：

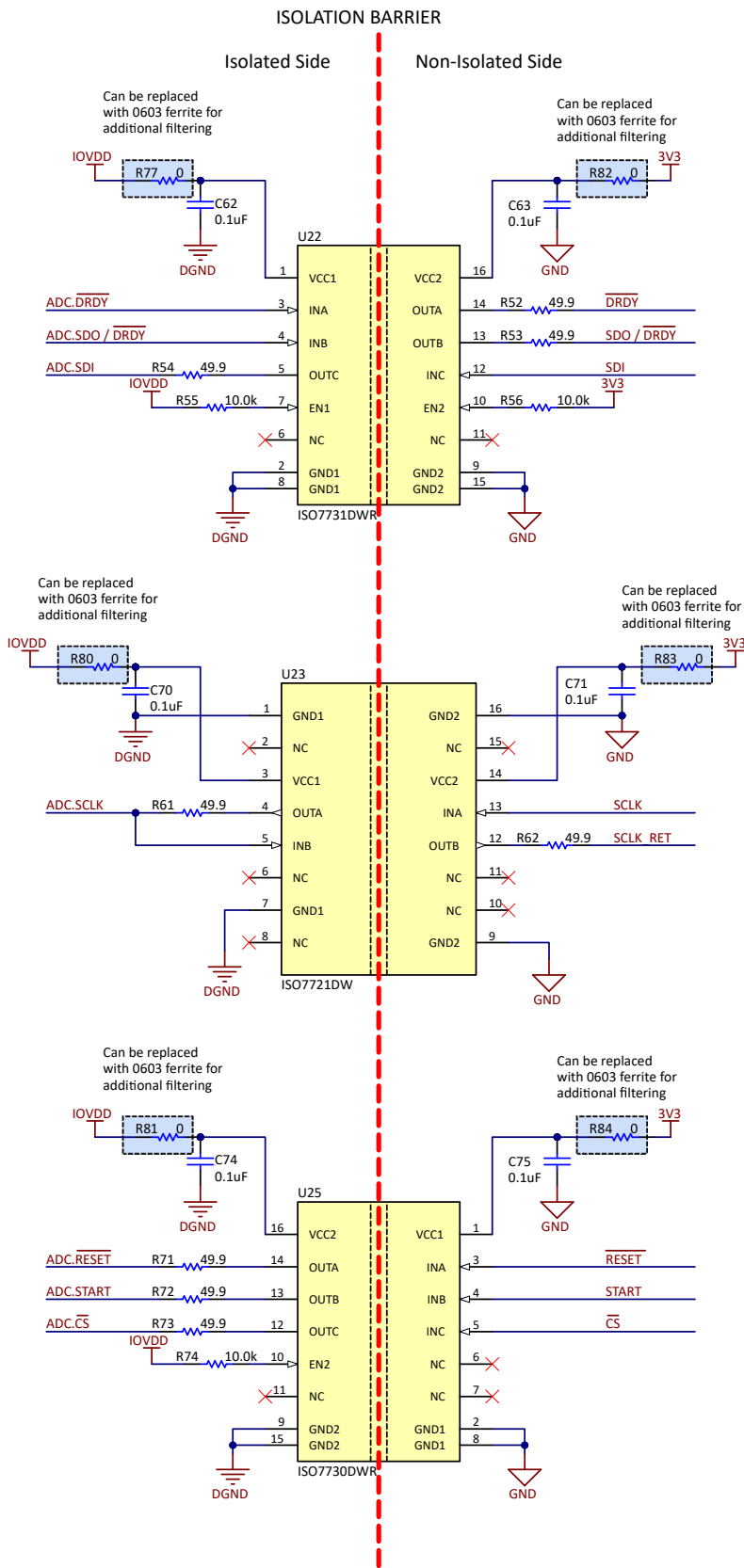


图 2-8. 数字隔离

2.1.6 电源和保护

EMC 测试板电源电路经过专门设计，可模拟典型的工业系统。默认情况下，J9 上只需要一个 +6V 至 +12V 之间的电源即可为整个电路板供电。

非隔离侧

TPS7A4700 (U18) 是一款低压降稳压器 (LDO)，可将外部提供的电源 (6V 至 12V) 转换为稳定的 4.2V。该 4.2V 输出为低噪声、低 EMI 推挽式变压器驱动器 SN6505 (U19) 供电。PHI 控制器卡直接为测试板非隔离侧的 ISO7721、ISO7730 和 ISO7731 数字隔离器提供 3.3V 电源。

ADS125H18 EMC 测试板也可通过连接器 J14 使用外部 USB-C 电源供电。该连接旨在为任何非 EMC 测试期间的主板供电。输入 LDO (U18) 输出 4.2V，专门用于补偿 USB 电压中的任何损耗。

隔离侧

变压器 T1 的匝数比为 1:3.45，采用双极性配置，从板的非隔离侧到隔离侧产生约 6.9 的电压增益。因此，4.2V 的输入电压在变压器输出端约为 29V。该电压模拟了模拟输入模块系统中标准的 24V 隔离式电源电压。

TPS7A4701 (U27) 对变压器输出进行稳压, 以在连接器 J13 处产生 24V 输出信号。未经稳压的变压器输出电压还被提供给两个 TPS7A4700 (U17 和 U20) LDO, 分别产生 ADS125H18 的 AVDD (5V) 和 DVDD (3.3V) 电源。TVS 二极管可保护每个稳压电源的输出

图 2-9 展示了电源原理图。

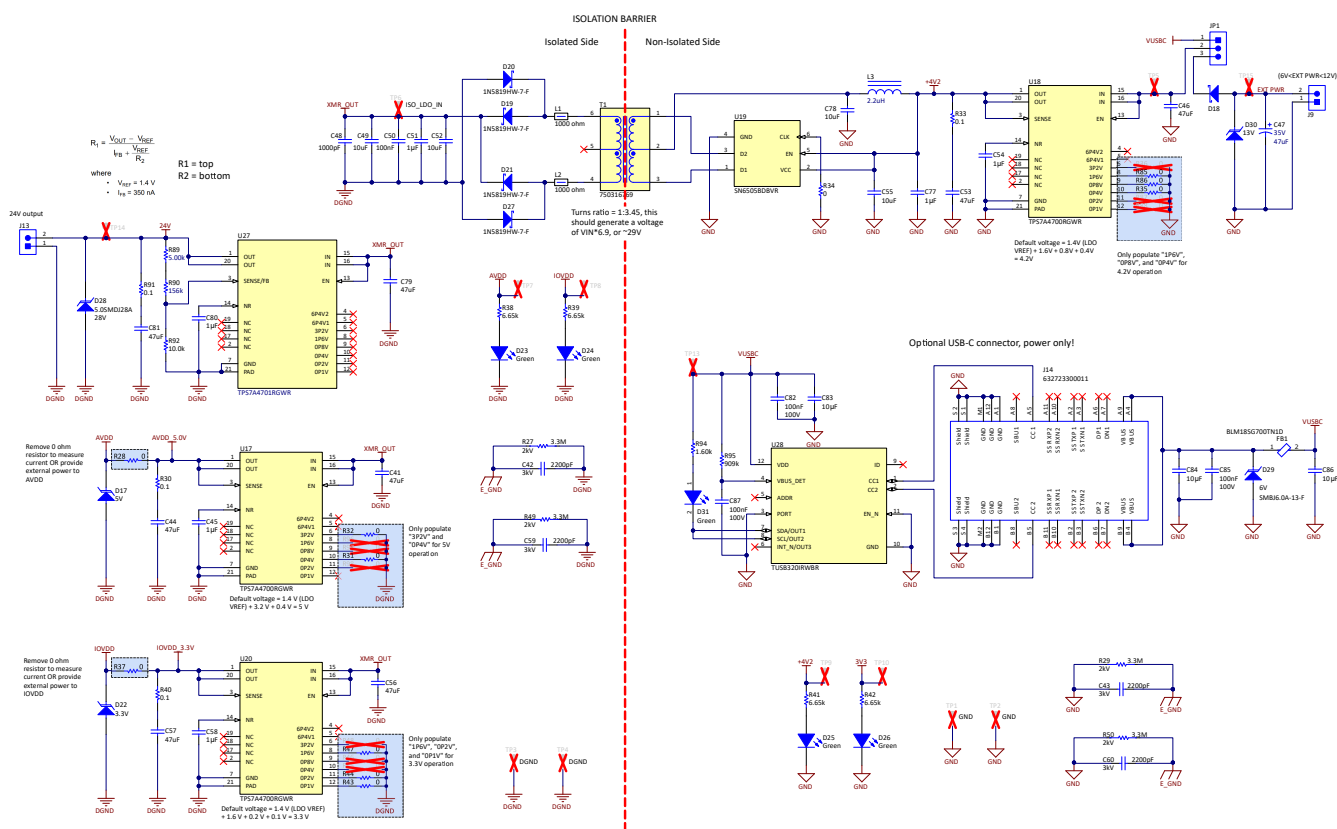


图 2-9. ADS125H18 EMC 测试板电源原理图

2.1.7 用于放电路径的高压电容器及电阻器

在本地接地和大地之间并联放置一个高压 3kV、2.2nF 电容器和一个 2.2kV、3.3M Ω 电阻器。这些元件提供了一条将瞬态能量放电至大地并保护电路板上元件的路径。电路板的隔离侧设计了两个放电路径 (包括 R27 || C42 及 R49 || C59)。相同的并联元件也安装在 EMC 测试板的非隔离侧：R29 || C43 和 R50 || C60。

图 2-10 示出了 EMC 测试板上的高压电容器和电阻器原理图以及 PCB 布局示例：

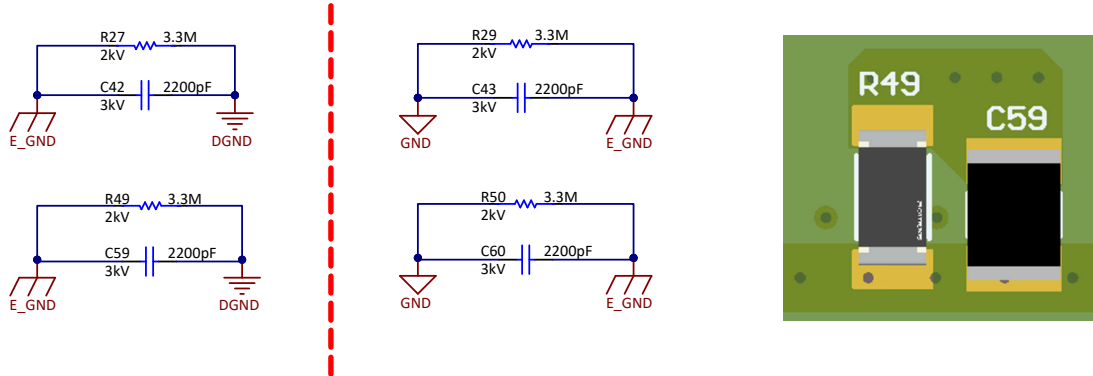


图 2-10. 添加高压电容器及电阻器

2.2 针对 EMC 合规性的 PCB 布局注意事项

设计测量电压和电流过程信号的 PCB 板时，需要特别注意通过 EMC 测试，因为这些信号非常容易受到辐射和传导干扰的影响。以下布局实践有助于确保 PCB 设计不易受 EMC 现象的影响，同时保持信号完整性和测量精度：

- PCB 层堆叠及接地平面
- 避免较长返回路径
- 避免 PCB 走线中出现 90 度弯曲
- 利用防护环隔离干扰信号
- 去耦电容器
- 差分布线
- 拼接过孔
- 隔离栅布局
- 元件放置

2.2.1 PCB 层堆叠及接地平面

连续且不间断的接地平面是实现 EMC 合规性的关键。不间断的接地平面为信号电流提供低阻抗返回路径，并充当防止外部干扰的屏蔽层。

此外，正确的 PCB 层堆叠对于 EMC 性能和信号完整性至关重要。将更高速信号和关键信号 (例如 SPI SCLK 信号) 放置在靠近接地平面的层上，而非关键信号可以放置在电源平面附近 (如果适用)。图 2-11 展示了典型的多层电路板堆叠情况。电源平面和接地平面彼此相邻，因为它们提供额外的平面间电容，这有助于实现电源的高频去耦。

一个好的配置如下：

- 顶层：混合模拟/数字信号路由
- 第 2 层 (内层)：实心接地平面
- 第 3 层 (内层)：
 - 具有隔离式模拟和数字部分的电源平面 (如有必要)
 - 实心接地平面 (如果不需要电源平面)

- 底层：如果需要，额外的信号布线或屏蔽。

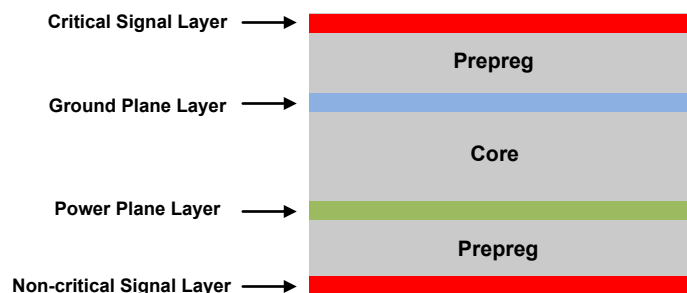


图 2-11. 4 层 PCB 堆叠示例

典型的 4 层 PCB 应至少有一个专用层作为接地平面，以确保返回信号的低阻抗路径。该堆叠设计在信号层直接相邻的位置放置了一个实心接地层，以提供一致的返回路径并更大限度地减小环路面积和电磁辐射。ADS125H18 EMC 测试板使用两个实心接地平面，如 图 4-6 和 图 4-7 所示。

2.2.2 避免较长返回路径

电流返回路径较长或中断时可能会充当辐射天线，从而增加对 EMI 的易感性并违反 EMC 要求。必须对每个信号布线进行布线，使其返回电流在其正下方通过接地平面流动。这种做法对于 $\pm 10V$ 或 4-20mA 等高精度过程信号测量非常重要。

2.2.3 避免 PCB 走线中出现 90 度弯曲

布线几何形状会显著影响信号完整性及发射。应避免 PCB 走线发生 90 度急剧弯曲，因为这种程度的弯曲会产生阻抗不连续性，从而导致信号反射并增加高频辐射。相反，在进行转弯时应布放具有两个 45 度弯曲或平滑电弧的布线，以保持受控阻抗并更大限度地减少发射。遵守此类指南不仅有助于在模拟信号布线中保持信号完整性，在高速数字电路中更为重要。

图 2-12 展示了在 EMC 测试板上避免 90 度弯曲的示例。

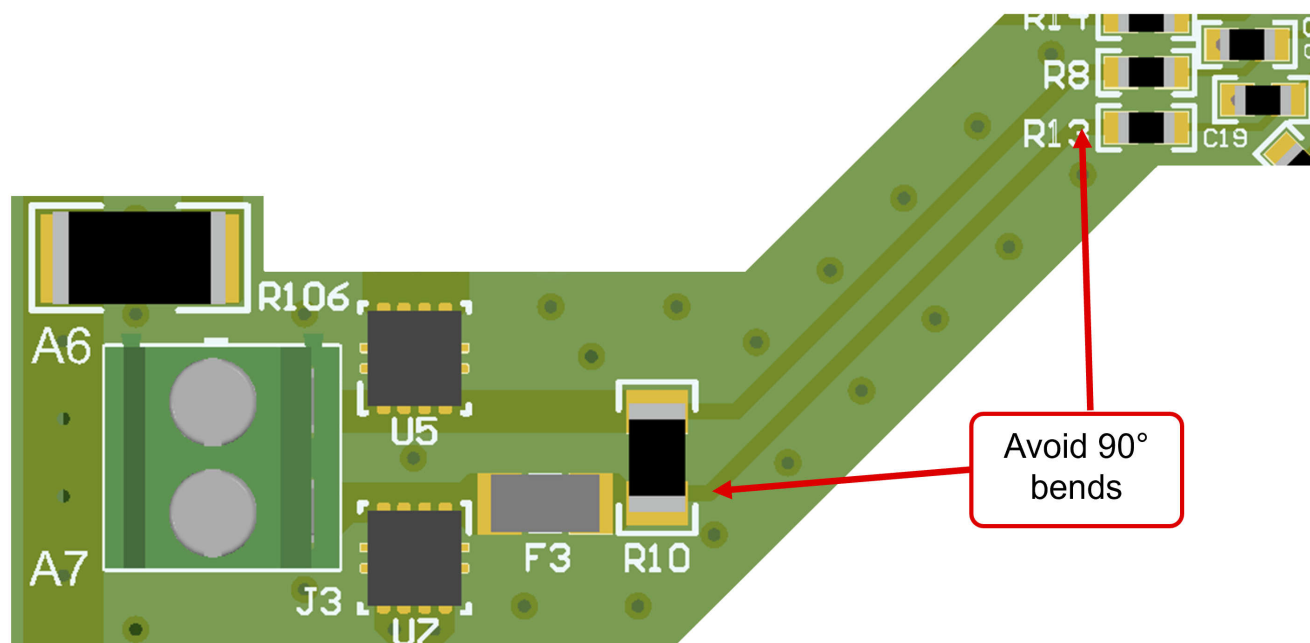


图 2-12. 避免 PCB 走线中出现 90 度弯曲

2.2.4 利用防护环隔离干扰信号

防护环是一种环绕 PCB 周边或者特定电路区域的连续导电布线。将防护环连接到系统机箱接地或大地作为 PCB 级的法拉第笼，从而减少电路板发出和接收的电磁干扰信号。添加防护环是一种屏蔽高度敏感的模拟信号或 ADC，使其免受附近噪声源或干扰信号影响的有效技术。图 2-13 展示了典型 4 层电路板上的防护环侧视图，这些防护环通过等间距的过孔连接在一起。

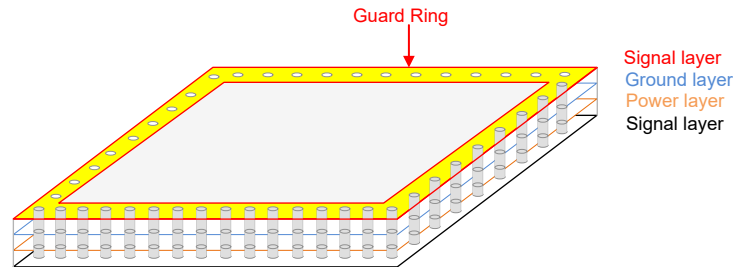


图 2-13. 4 层电路板上的防护环侧视图

使用防护环的目的及好处包括:

- 减少辐射发射：防护环提供电流返回路径并限制高频信号电流，从而减少来自电路板边缘的意外辐射。
- 提高静电放电、快速瞬变及浪涌抗扰度：瞬态信号可通过空气和耦合（直接接触、传导和电磁场）进入电路，并影响电路的功能。接地防护环有助于将能量从敏感电路中消散。
- 用作接地参考屏蔽层：多层电路板外层上的防护环有助于保持信号完整性并减少高速部分及模拟部分之间的耦合。

实施防护环的准则包括：

- 层放置：将防护环放置在 2 层电路板的顶层及底层上或 4 层电路板的外层上。确保环形成闭环，以获得最大效果。使用过孔将所有防护环连接在一起。
- 过孔之间的孔间距：使用过孔将顶层和底层的防护环连接在一起。遵循 方程式 19 中的波长限制来确定过孔之间的适当孔间距，以确保防护环有效，其中 S 是防护环走线上过孔之间的间距。所有波长大于此限值的信号均可得到有效屏蔽。

$$Wavelength (L) > \left(\frac{S}{4}\right) \quad (19)$$

- 防护环走线宽度：确定防护环的适当布线宽度。更宽的布线可增强保护效果，但会占用更多空间。根据一般的经验法则，防护环的布线宽度应等于受保护信号布线的 2~3 倍宽度。将防护环的布线宽度设置为受保护信号布线的约 5 倍宽度，以实现低阻抗保护。本指南为关键高速或射频布线提供了可靠屏蔽。
- 防护环间隙：3W 规则指定了信号线路、防护布线及实心接地层之间的间隙。保持间隙，以通过等于单个信号布线宽度 3 倍的距离减少串扰和耦合。
- 底盘接地连接：为了增强保护功能，请将防护环连接到机箱接地端、保护性接地端或屏蔽接地端以隔离直流接地，但仍然允许高频放电。本指南通过 EMC 测试板上的高压电阻器及电容器来实现。

ADS125H18 EMC 测试板的两个内层均指定为接地层（GND 和 DGND），以实现良好的去耦合和接地电流回流。ADS125H18 EMC 测试板的防护环分布于所有层，这些层上的边缘防护通过间距为 100mil 的过孔相互连接，以衰减最高 472GHz 的高频信号发射。图 2-14 展示了 EMC 测试板防护环的一部分：

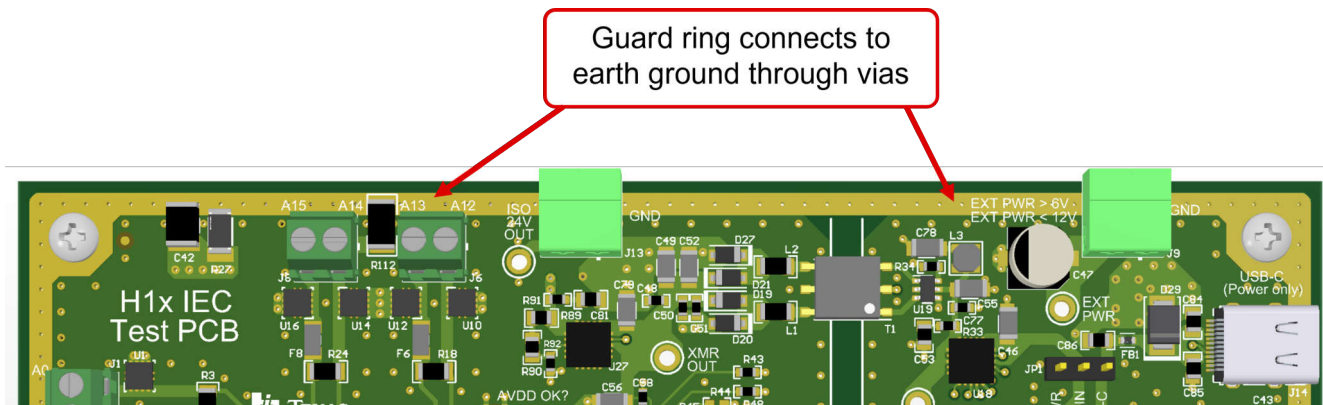


图 2-14. EMC 测试板防护环

2.2.5 去耦电容器

去耦电容器对于稳定电源及降低高频噪声至关重要。将一个本地去耦电容器（通常为 $0.1\mu\text{F}$ ）尽可能靠近每个电源引脚放置，并采用一条短而直接的接地平面返回路径。也可以并联放置 $1\mu\text{F}$ 或 $10\mu\text{F}$ 等较大的大容量电容器，以减少低频电源波动。在电源和器件的电源引脚之间放置去耦电容器，以实现出色的去耦效果。过程级电压和电流信号受益于纯净的局部稳压模拟电源和仔细的去耦。图 2-15 中左侧的电路是在 EMC 测试板上针对 AVDD 上的去耦电容器实现的适当 PCB 布局示例，右侧的电路是不适当的 PCB 布局示例（并非在 EMC 测试板上设计）。

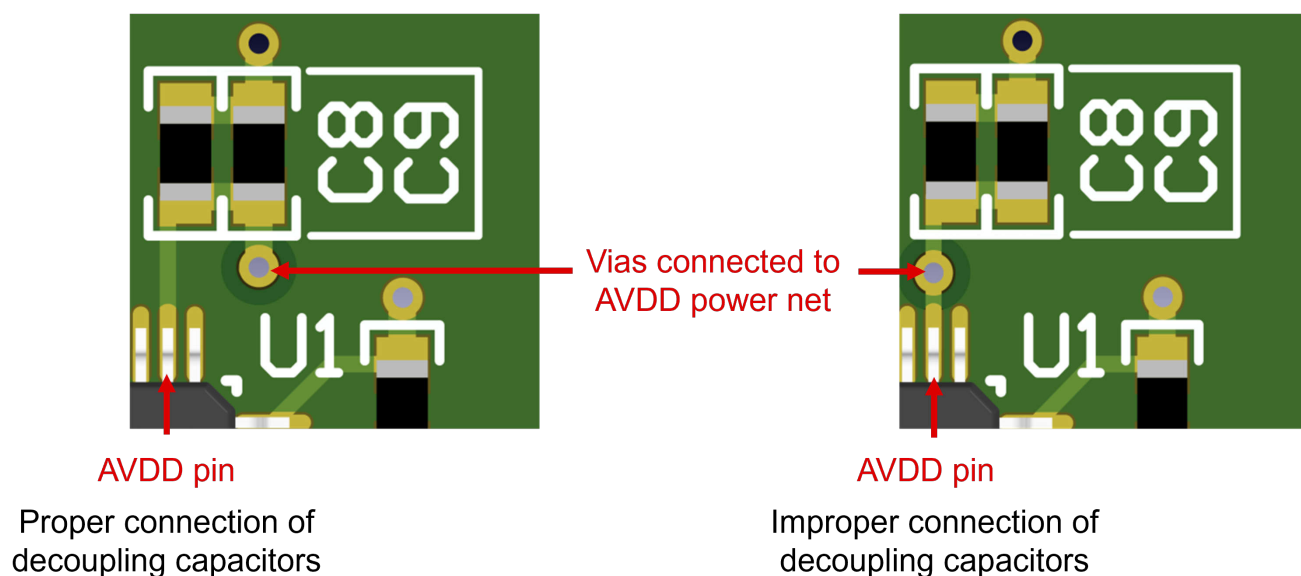


图 2-15. 适当的（左）和不适当的（右）去耦电容器

2.2.6 差分信号布线

电压和电流过程信号可以是差分信号或单端信号。EMC 测试板紧密且对称地对差分信号进行布线，以使任何外部干扰或噪声均等地耦合到两条走线上。因此，感应噪声信号是一种共模信号，ADC 将会在共模抑制比 (CMRR) 规格限制范围内抑制该信号。避免在差分布线之间放置元件及过孔。在差分对之间放置元件或者过孔可能会导致 EMC 问题和阻抗不连续。

图 2-16 示出了 EMC 测试板上的差分布线示例：

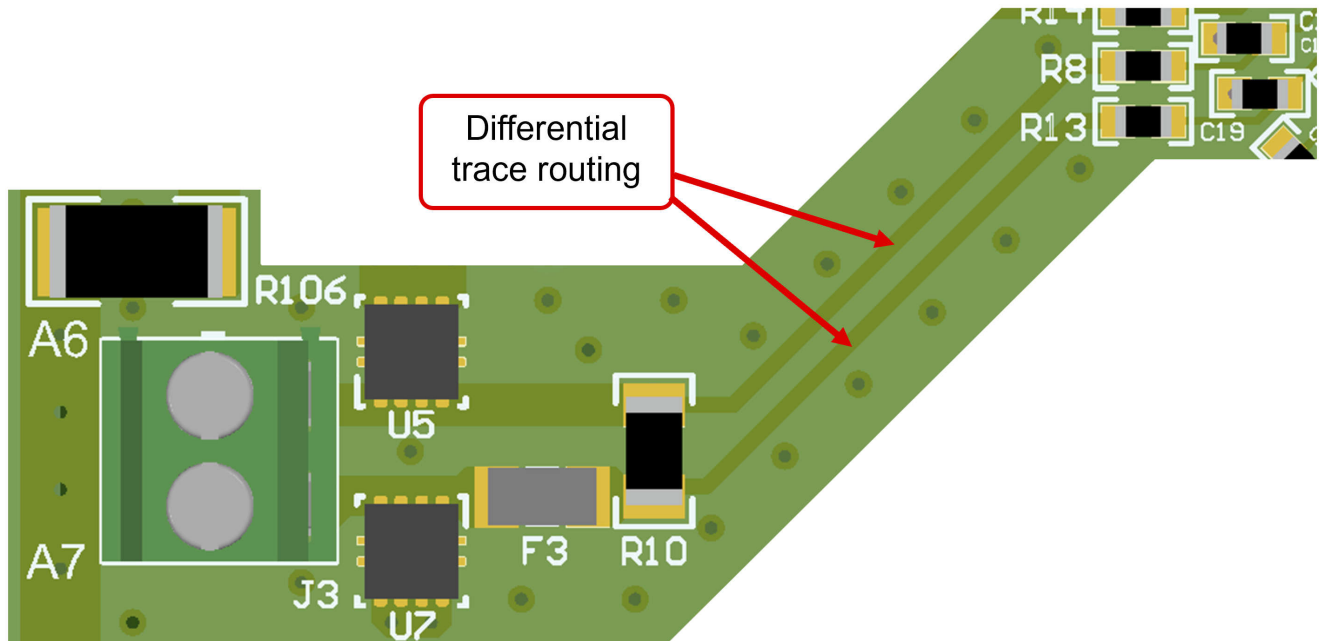


图 2-16. 差分信号布线

2.2.7 拼接过孔

拼接过孔可改善信号完整性、降低阻抗和电感、更大限度地降低噪声和串扰，并增强 EMI 屏蔽。ADS125H18 EMC 测试板采用拼接过孔来增强高速信号完整性和可靠性。许多 ADC 所需的串行时钟信号可高达 50MHz。拼接过孔通过提供低阻抗接地返回路径，减少接地振铃和串扰，可以显著提升高速信号的信号完整性和可靠性。如果可能，将高速信号保持在与 ADC 相同的层。如果必须在不同层之间路由高速信号，则使用单个拼接过孔或拼接过孔阵列。图 2-17 示出了 4 层电路板上拼接过孔的侧视图。

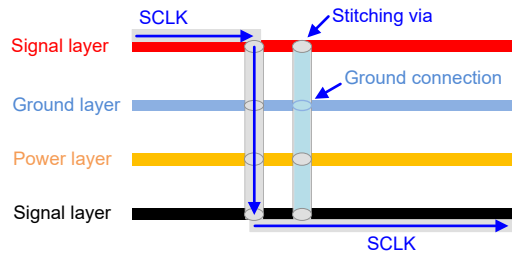


图 2-17. 高速信号的拼接过孔的侧视图

2.2.8 隔离栅布局

高压 PCB 设计中的两个重要隔离栅注意事项是间隙及爬电距离。保持穿过隔离栅的空间尽可能宽，以满足最短的间隙和爬电距离要求并防止电气故障。在 PCB 板边缘使用圆形或平滑的角，以避免覆铜和电荷累积之间的电容耦

合。该指南对于通过高电压和高频信号测试（例如电气快速瞬变及辐射抗扰度测试）非常重要。图 2-18 展示了 ADS125H18 和 PHI 控制器卡之间的隔离栅设计，以及 EMC 测试板上的 PCB 转角设计。

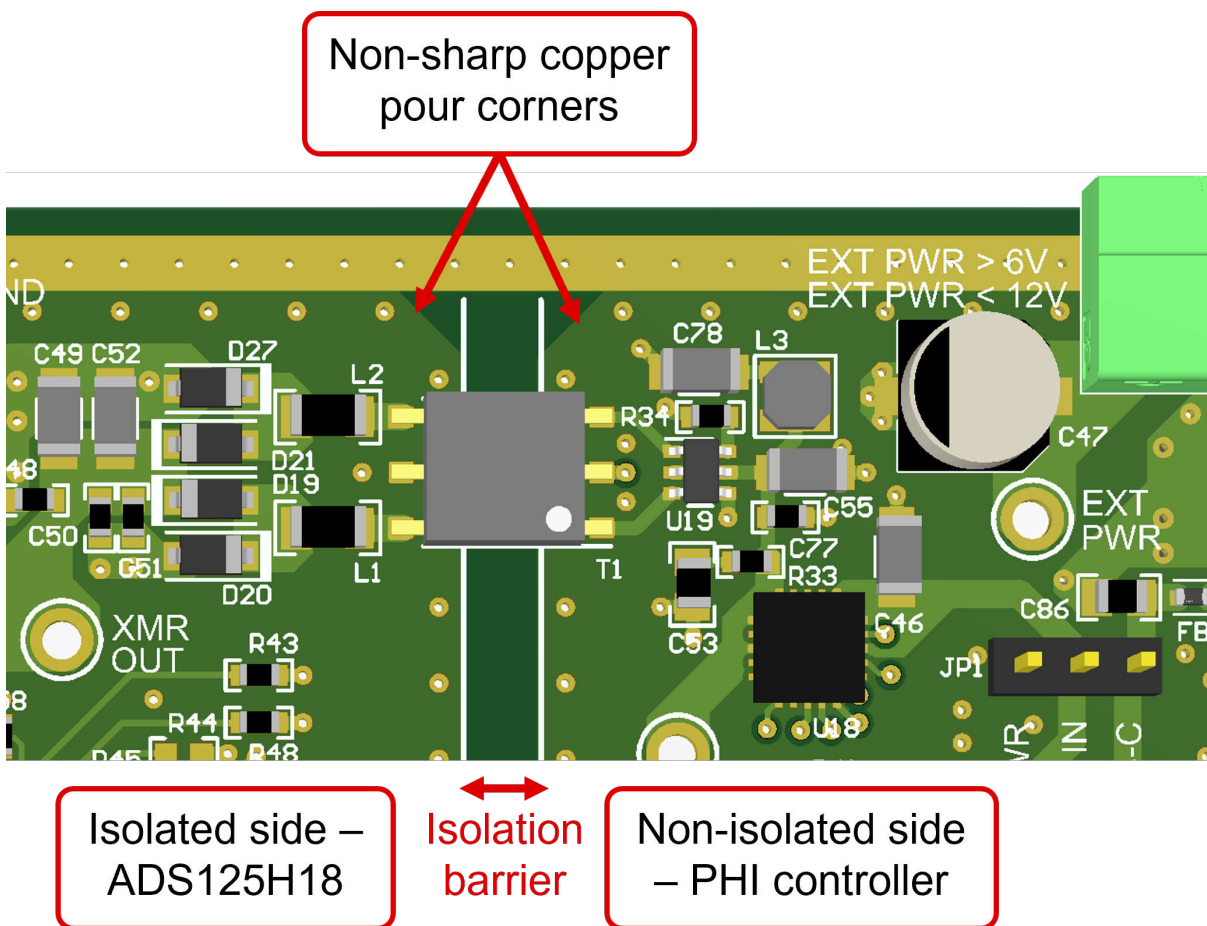


图 2-18. 隔离栅布局

2.2.9 元件放置

对于混合信号电路中的精密信号测量和电磁兼容性设计，正确的元件放置非常重要。设计人员必须分析功能块、信号路径和连接，以优化每个元件位置。例如，将连接器放置在 PCB 边缘，将去耦电容器靠近 ADC 的电源和基准引脚放置，并将输入差分电容器尽可能靠近 ADC 放置。分离模拟和数字元件有助于更最大限度地减少共享返回路径中的干扰或噪声，从而确保信号完整性。

3 EMC 测试系统、标准和结果

本节介绍每项测试的测试标准和条件、测试设置和结果。

3.1 EMC 测试系统

图 3-1 展示了 ADS125H18 EMC 测试板的通用设置。软件脚本配置系统参数，包括 SPI 接口、时钟频率配置、ADC 模式选择、数据捕获和分析、数据监测以及导出以进行后处理。在 EMC 测试之前，软件和 PHI 控制器会验证测试系统和受测设备 (EUT) 的运行情况。在 EMC 事件期间，系统会持续捕获和监测数据，并在 EMC 测试后检查 EUT 功能。

PHI 控制器卡通过 USB 2.0 (或更高版本) 接口，在 ADS125H18 EMC 测试板和笔记本电脑之间提供了通信接口，用于数字输入和输出。测试系统在笔记本电脑及 PHI 控制器卡之间使用电池供电的光收发器对。光收发器对将恶劣的瞬态信号与测试环境隔离开来，并为用户设备提供额外的保护层。

测试硬件

- ADS125H18 EMC 测试板
- 德州仪器 (TI) 的 PHI 控制器卡
- 带光纤电缆的光纤收发器
- 双绞线搭配 9V 电池进行电压测量，或连接精密信号源用于电流测量
- 每次 EMC 测试的专用设备
- 运行 64 位版本 Windows® 10 或 11 的笔记本电脑
- 用于浮地系统供电的实验室电源或 9V 铅酸电池

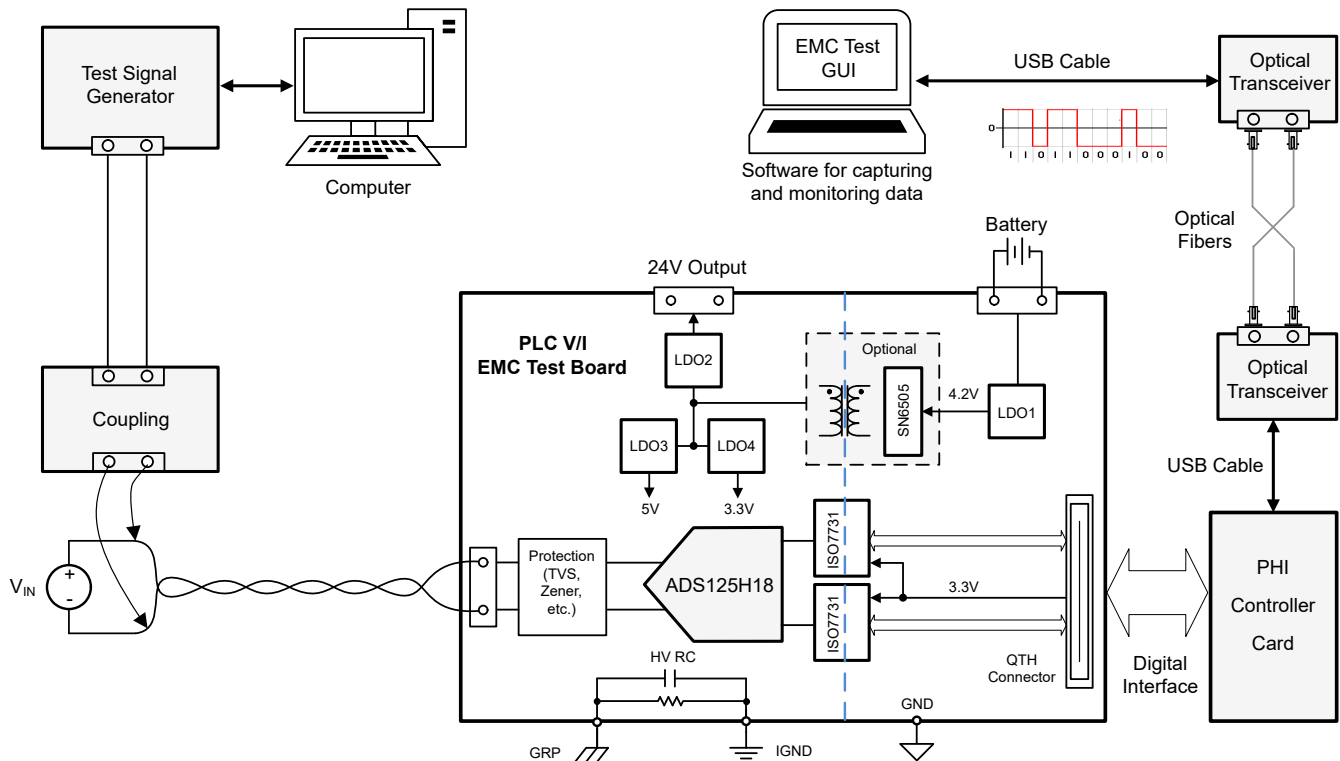


图 3-1. EMC 测试通用设置

3.2 EMC 测试标准

ADS125H18 EMC 测试板可以满足工业应用的 EMC 和 EMI 测试标准及准则。EMC 测试标准定义了测试电子器件的限制和条件，以确保器件在预期环境中正常运行，而不会引起干扰或受到干扰的影响。表 3-1 展示了对产品可靠性和监管标准合规性至关重要的测试标准。定义 EMC 测试标准涉及指定测试类型（发射和抗扰度）、测试方法（辐射及传导）、频率范围及可接受的性能水平。

表 3-1. IEC 61000-4-x 测试标准

标准	说明
A	性能正常，处于规定限值范围内
B	暂时性能损失，可在扰动结束后恢复
C	暂时性的功能或性能损失，可在用户干预下恢复
D	由于数据损坏或丢失而造成的永久性功能或性能损失

3.3 EMC 测试结果

本文档介绍了五项 IEC 61000-4-x 测试。点击下方列表中的链接，可查看有关 ADS125H18 EMC 测试板性能的详细信息：

- [IEC 61000-4-2：静电放电 \(ESD\)](#)
- [IEC 61000-4-3：辐射抗扰度 \(RI\)](#)
- [IEC 61000-4-4：电快速瞬变 \(EFT\)](#)
- [IEC 61000-4-5：浪涌抗扰度 \(SI\)](#)
- [IEC 61000-4-6：传导抗扰度 \(CI\)](#)

表 3-2 汇总了所有测试的结果，以供快速参考：

表 3-2. ADS125H18 EMC 测试板结果汇总

测试	IEC 标准	说明	测试条件	标准	测试结果
ESD	IEC 61000-4-2	接触放电 (HCP/VCP)	±8kV	A	通过
			±15kV	A	通过
		接触放电（屏蔽保护螺钉）	±4kV	A	通过
			±6kV	C	USB 通信失败
RI	IEC 61000-4-3	20V/m	80MHz-1GHz（水平和垂直）	A	通过
				A	通过
			1GHz-2.7GHz（水平和垂直）	A	通过
				A	通过
EFT	IEC 61000-4-4	电压输入	±4kV 5kHz	A	通过
			±4kV 100kHz	A	通过
		电流输入	±4kV 5kHz	A	通过
			±4kV 100kHz	A	通过
		直流端口	±4kV 5kHz	C	USB 通信失败
			±4kV 100kHz	C	USB 通信失败
		直流端口	±3kV 5kHz	A	通过
			±3kV 100kHz	A	通过
SI ⁽¹⁾	IEC 61000-4-5	电压输入	500V	B	通过
			1000V	B	通过
		电流输入	500V	B	通过
			1000V	B	通过
		DC 输入	500V	B	通过
			1000V	B	通过

表 3-2. ADS125H18 EMC 测试板结果汇总 (续)

测试	IEC 标准	说明	测试条件	标准	测试结果
CI	IEC 61000-4-6	电压输入	20V/m (级别 > 3) , 150kHz-80MHz	A	通过
		电流输入		A	通过
		直流端口		A	通过
		地线		A	通过

(1) 线对地 (2Ω 源阻抗 + 来自耦合网络的 40Ω) 和线对线 (直流输入上的 2Ω 源阻抗)

3.3.1 静电放电 (ESD)

IEC 61000-4-2 标准规定了 ESD 测试的细节，包括测试标准和设置要求。IEC 61000-4-2 测试确定了 EUT 在运行期间对外部 ESD 事件的抗扰度。图 3-2 示出了 ESD 测试的设置和连接图。GRP 上立着一张 0.8 米高的木桌。桌上放置一个 1.6m × 0.8m 的水平耦合平面 (HCP)。EUT 在一个 0.5mm 厚的绝缘垫上进行测试和隔离，该绝缘垫放置在 HCP 上。EUT 放置在距离 0.5m × 0.5m 垂直耦合平面 (VCP) 0.1m 的绝缘垫上。

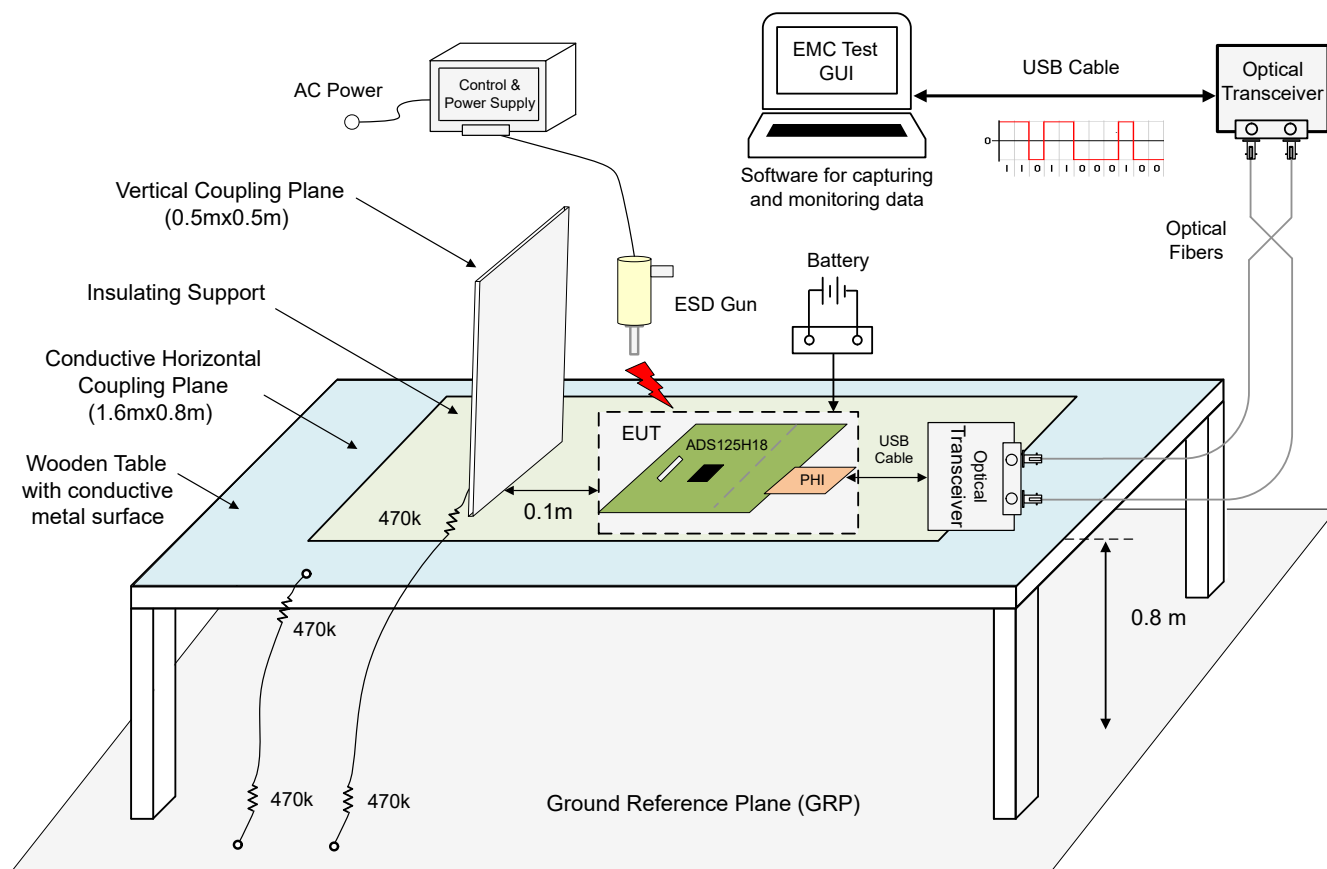


图 3-2. ESD 测试的实验室设置图

ESD 测试有两种类型：接触放电和空气放电。接触放电测试是最激进的直接放电测试，在测试过程中，ESD 枪的尖端直接接触输入端子块的导电螺钉和 ADS125H18 测试板上的屏蔽保护螺钉。空气放电测试以三种不同的方式执行：直接空气间隙放电、向水平耦合平面 (HCP) 以及垂直耦合平面 (VCP) 间接放电。在空气间隙放电测试中，ESD 枪的尖端放置在 EMC 测试板输入端子块绝缘表面附近。间接放电测试将 ESD 信号施加到 HCP 或 VCP 中，这表示安装设计的设备机架上存在 ESD 冲击。

表 3-3 指定 IEC 61000-4-2 测试级别：

表 3-3. ESD 测试级别

接触放电		空气放电	
级别	测试电压 (kV)	级别	测试电压 (kV)
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
x	特殊	x	特殊

图 3-3 展示了 ADS125H18 EMC 测试板屏蔽保护螺钉上 ESD 测试的实际设置照片。

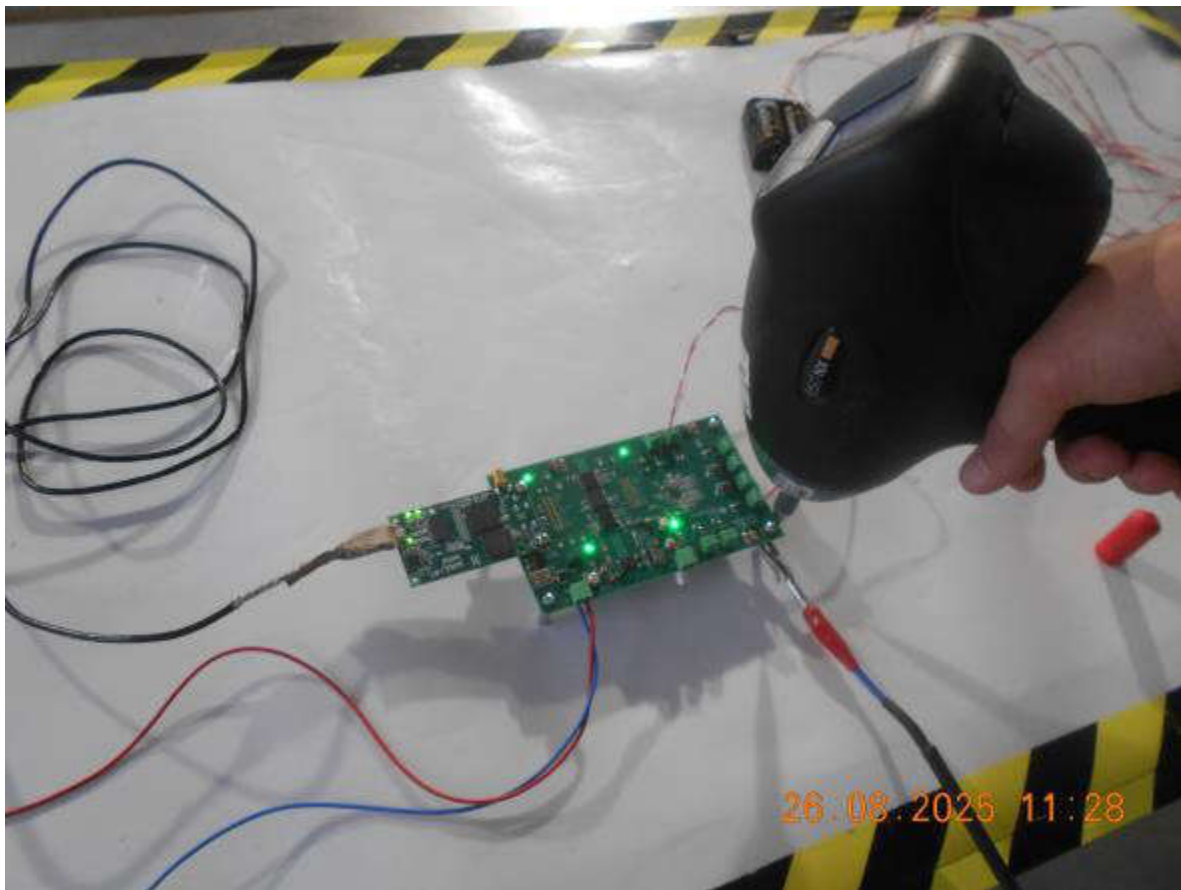


图 3-3. ESD 测试的实验室设置

对于 ESD 测试，在每个额定值下，对 EUT 的螺钉至少进行了 100 次放电，并对耦合板进行 10 次放电。图 3-4 展示了在 ESD 测试期间，当 ADC 测量电压输入（左）和电流输入（右）时，ADS125H18 EMC 测试板的输出数据。两个图均表明，ADS125H18 未受到 ESD 测试信号的显著影响。因此，ADS125H18 EMC 测试板通过了 ESD 测试并达到了标准 A。

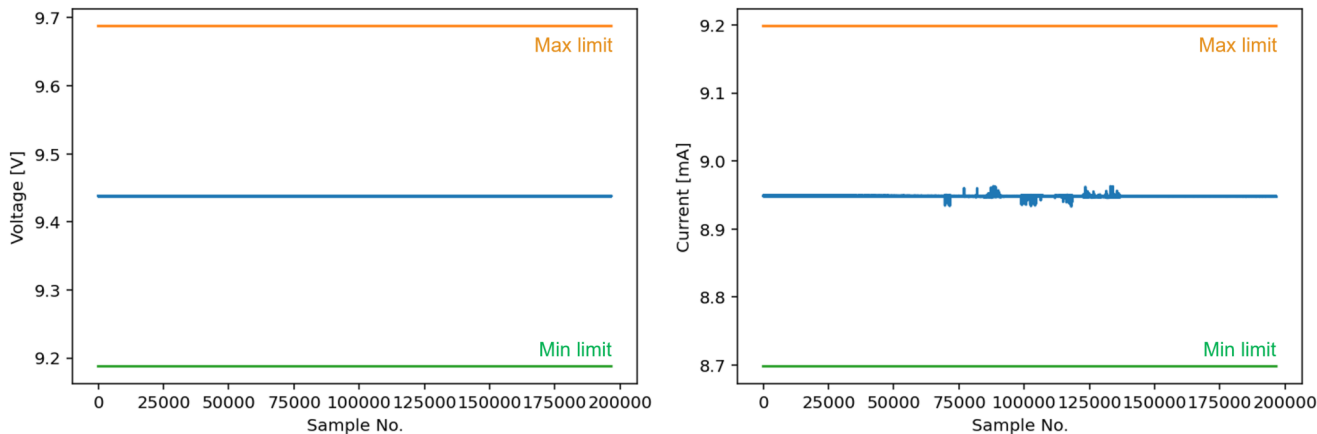


图 3-4. ESD 测试期间捕获的电压（左）和电流（右）测量值

表 3-4 列出了 ESD 测试的结果。EMC 测试板上的电压通道和电流通道测试结果是相同的。

表 3-4. 使用 ADS125H18 EMC 测试板的 ESD 测试结果

测试	IEC 标准	类型	测试电压	标准	测试结果
ESD	IEC 61000-4-2	接触放电 (HCP/VCP)	±8kV	A	通过
			±15kV	A	通过
		接触放电 (屏蔽保护螺钉)	±4kV	A	通过
			±6kV	C	USB 通信失败

3.3.2 辐射抗扰度 (RI)

IEC 61000-4-3 标准规定了 RI 测试的细节，包括测试标准和设置要求。IEC61000-4-3 测试确定了 EUT 在运行期间对于外部电磁辐射的抗扰度。测试在电波暗室中进行，期间 EUT 放置在 0.8m 高的非导电桌上。EUT 和天线之间的测试距离为 3m。在每个额定值下，EUT 会暴露在水平和垂直场极性中。测试中使用 80% 振幅的干扰信号（由 1kHz 正弦信号进行调制），从 80MHz 到 1GHz，然后从 1GHz 到 2.7GHz，对射频测试信号进行了扫描。每个频率范围的场强为 10V/m 和 20V/m。在测试中，使用 PHI 控制器卡从 EUT 获取转换数据，并通过完全隔离的光纤电缆，将其发送到在暗室外运行软件脚本的笔记本电脑。

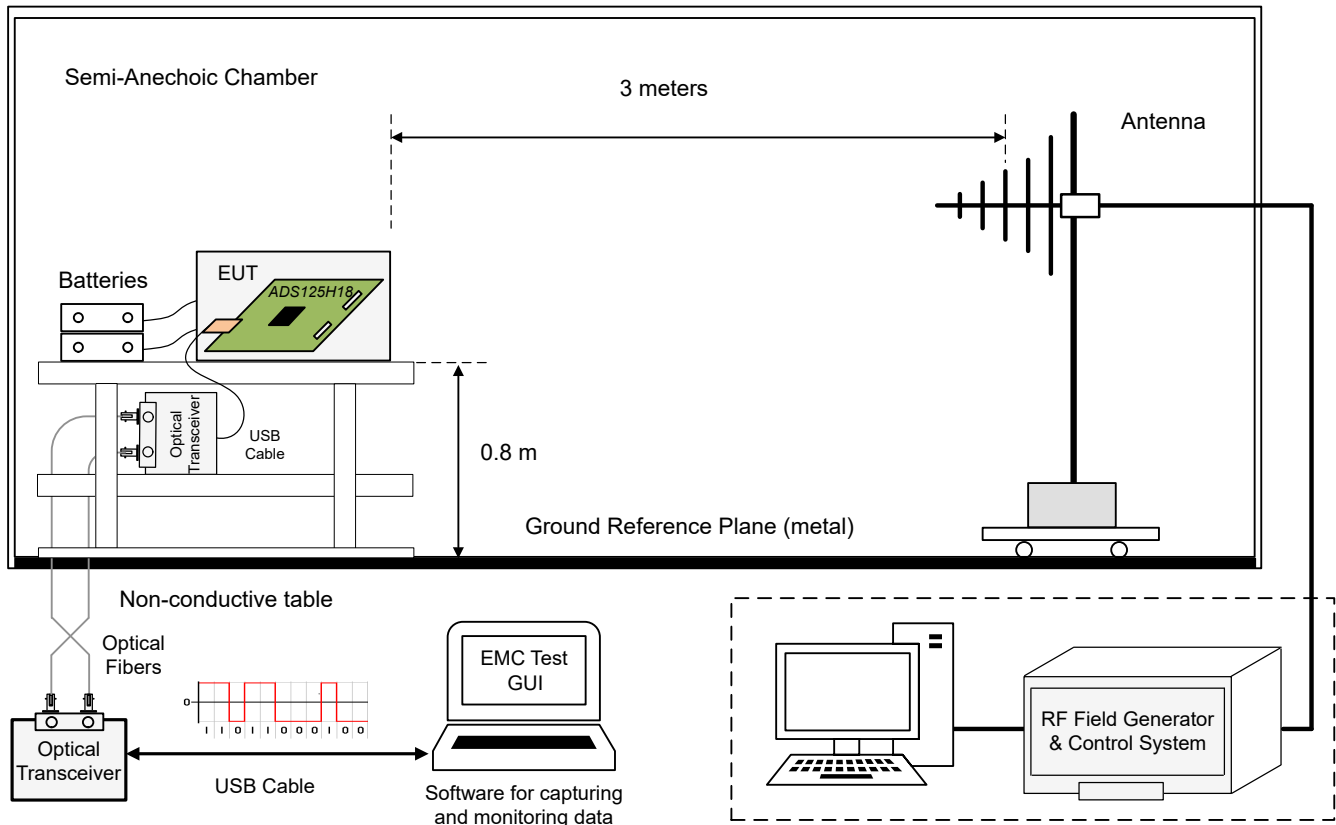


图 3-5. RI 测试的实验室设置图

表 3-5 指定了 IEC 61000-4-3 测试级别。

表 3-5. RI 测试级别

级别	测试信号的场强 (V/m)
1	1
2	3
3	10
4	30
x	可能高于、低于或介于其他级别之间的特殊级别。该级别可以在产品标准中指定。

图 3-6 示出了 ADS124S08 EMC 测试板上 RI 测试的实际设置。



图 3-6. RI 测试的实验室设置

图 3-7 展示了在 RI 测试期间，当 ADC 测量电压输入（左）和电流输入（右）时，ADS125H18 EMC 测试板的输出数据。这些图表明，干扰信号并未影响 ADS125H18。因此，ADS125H18 EMC 测试板通过了 RI 测试并达到了标准 A。

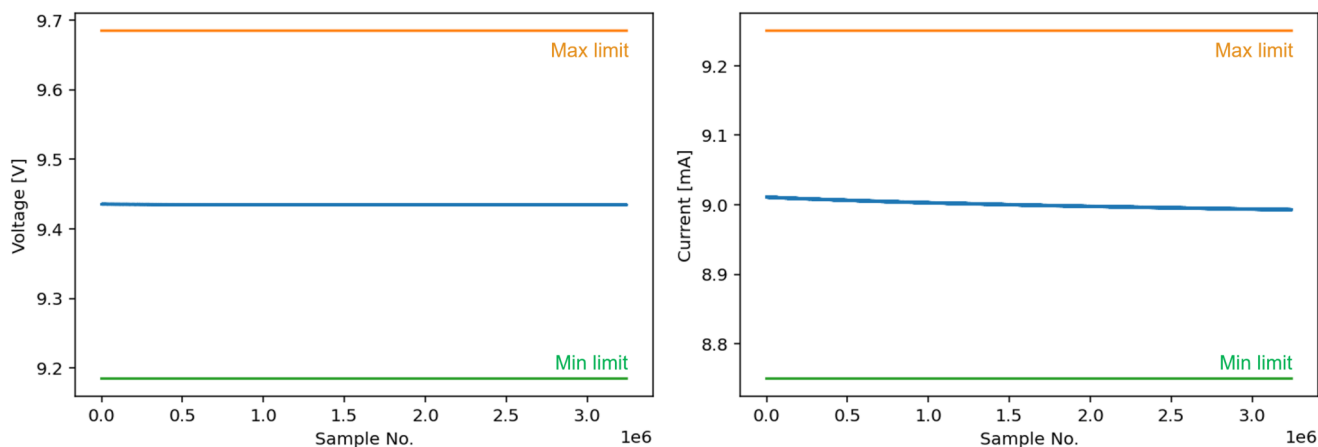


图 3-7. RI 测试期间捕获的电压（左）和电流（右）测量值

表 3-6 显示了 RI 测试的结果。EMC 测试板上的电压通道和电流通道测试结果是相同的。

表 3-6. 使用 ADS125H18 EMC 测试板的 RI 测试结果

测试	IEC 标准	测试信号			标准	测试结果
		场强	频率	天线极化		
RI	IEC 61000-4-3	20V/m	80MHz -1GHz	水平	A	通过
				垂直	A	通过
			1GHz -2.7GHz	水平	A	通过
				垂直	A	通过

3.3.3 电快速瞬变 (EFT)

IEC 61000-4-4 标准规定了 EFT 测试的细节, 包括测试标准和设置要求。IEC61000-4-4 测试确定 EUT 对于持续时间短且运行期间上升时间短的外部瞬态信号脉冲群的抗扰度。该标准为信号及控制端口定义了具有两种重复频率的四个测试电压电平: 在 5kHz 及 100kHz 重复频率下为 0.25kV、0.5kV、1kV 和 2kV。每次测试还需要正极和负极性放电。ADS125H18 EMC 测试板在标准 1kV 与 2kV 级别以及更极端的 4kV 级别下进行了测试。

ADS125H18 EMC 测试板在 5kHz 和 100kHz 频率下进行了测试。EFT 瞬变脉冲群包含 75 个快速脉冲，后跟一个中断间隔。5kHz 时每 15ms 发生一次脉冲，100kHz 时每 0.75ms 发生一次脉冲，每 300ms 重复一次突发。每一个突发脉冲都是一个双指数波形，上升时间为 5ns，总脉冲持续时间为 50ns。每次测试的总测试时间约为一分钟。

图 3-8 示出了 EFT 抗扰度测试的设置和连接图。在此设置中, 2m 双绞线输入线穿过一个 1m 长的标准电容 EFT 耦合夹, 从而对 ADS125H18 EMC 测试板的模拟输入施加了 EFT 信号。测试中的所有电缆都放置在绝缘支撑材料上, 以使其与 GRP 隔离。EUT 放置在 GRP 顶部, 并通过 0.1m 绝缘平台与 GRP 隔离。

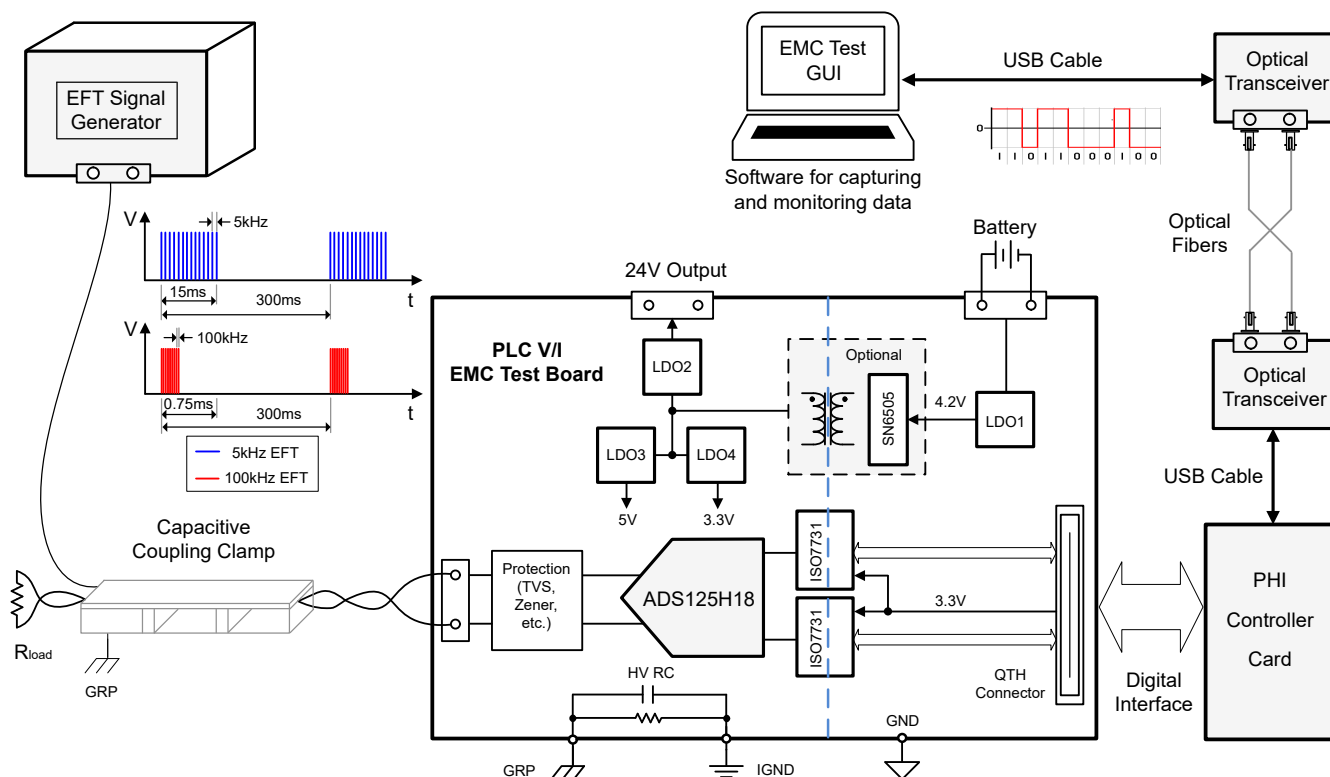


图 3-8. EFT 测试的实验室设置图

表 3-7 指定 IEC 61000-4-4 测试级别：

表 3-7. EFT 测试级别

级别	在电源端口上			在 I/O、信号、数据和控制线上		
	开路电压 (kV)	短路电流 (A)	重复率 (kHz)	开路电压 (kV)	短路电流 (A)	重复率 (kHz)
1	0.5	10	5 或 100	0.25	5	5 或 100
2	1	20	5 或 100	0.5	10	5 或 100
3	2	40	5 或 100	1	20	5 或 100
4	4	80	5 或 100	2	40	5 或 100
x	可能高于、低于或介于其他级别之间的特殊级别。该级别可以在产品标准中指定。					

图 3-9 示出了 ADS125H18 EMC 测试板上 EFT 测试的实际设置。

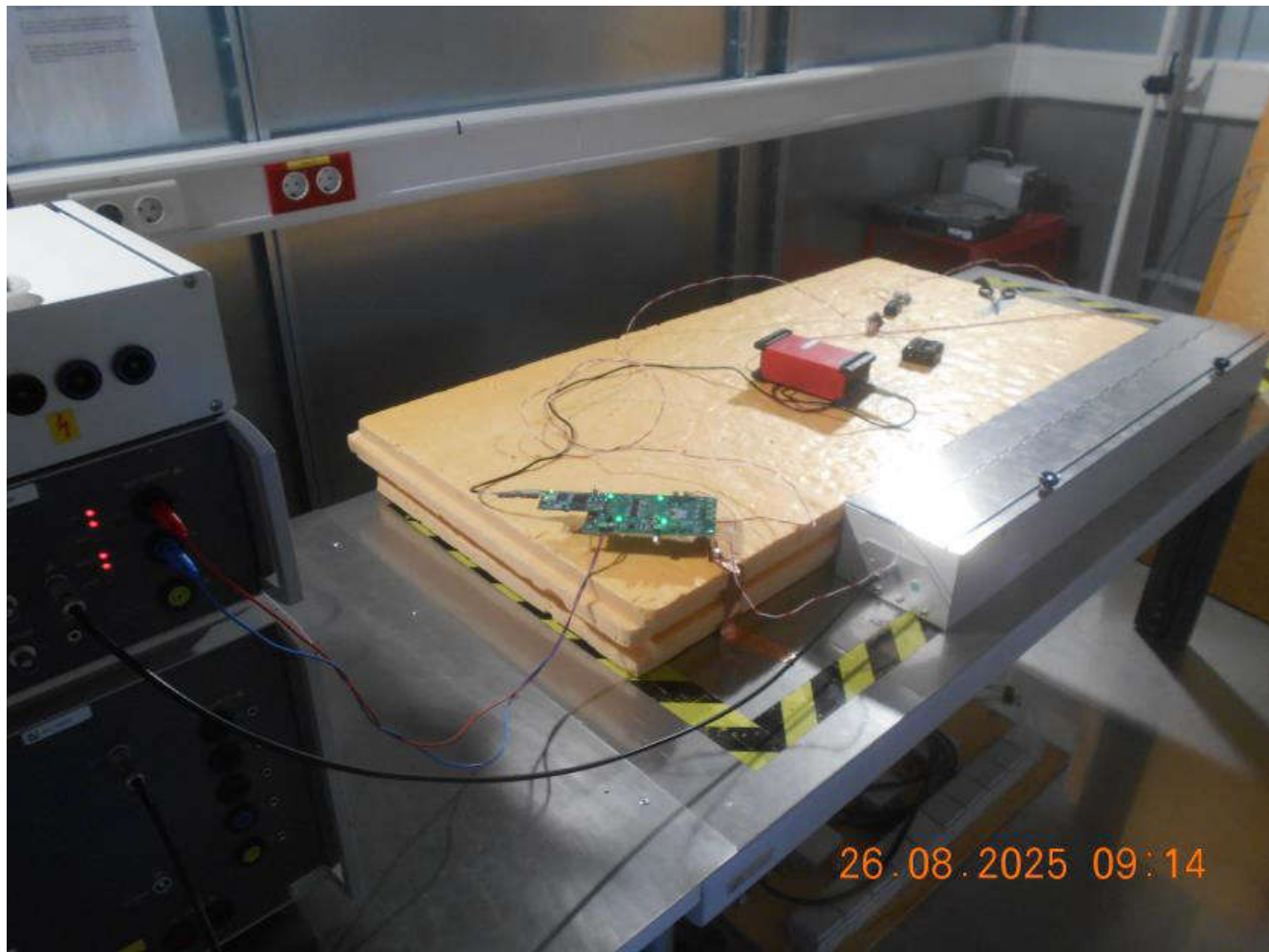


图 3-9. EFT 测试的实验室设置

图 3-10 展示了在 EFT 测试期间，当 ADC 测量电压输入（左）和电流输入（右）时，ADS125H18 EMC 测试板的输出数据。这些图显示，ADS125H18 受 EFT 信号的影响，导致微小的暂时性性能损失。但是，此性能损失在规定限值内。因此，ADS125H18 EMC 测试板通过了 EFT 测试并达到了标准 A。

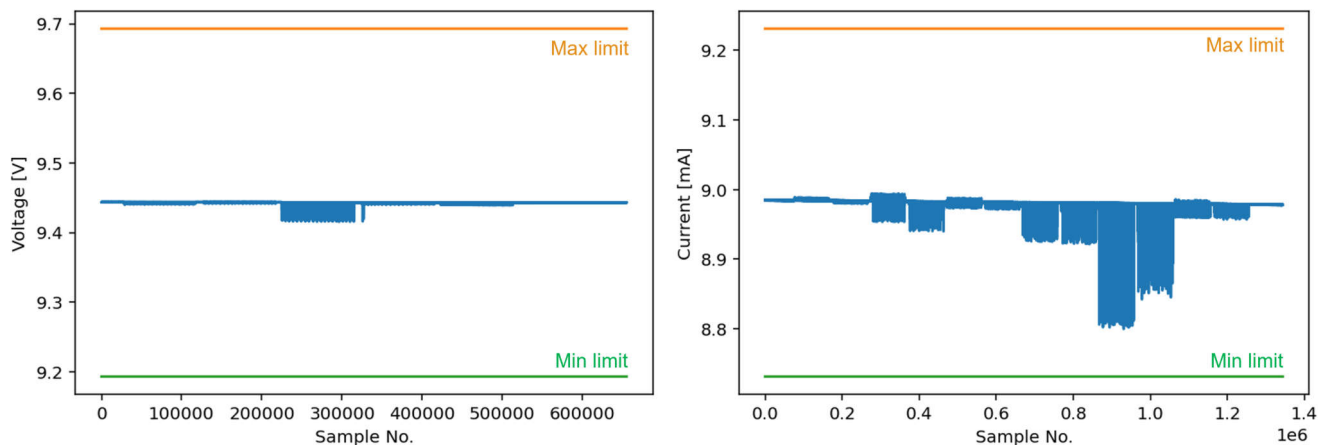


图 3-10. EFT 测试期间捕获的电压（左）和电流（右）测量值

表 3-8 显示了 EFT 测试的结果。EMC 测试板上的电压通道和电流通道测试结果是相同的。

表 3-8. 使用 ADS125H18 EMC 测试板的 EFT 测试结果

测试	IEC 标准	配置	测试信号		标准	测试结果
			电压	频率		
EFT	IEC 61000-4-4	电压输入	±4kV	5kHz	A	通过
			±4kV	100kHz	A	通过
		电流输入	±4kV	5kHz	A	通过
			±4kV	100kHz	A	通过
		直流端口	±4kV	5kHz	C	USB 通信失败
			±4kV	100kHz	C	USB 通信失败
		直流端口	±3kV	5kHz	A	通过
			±3kV	100kHz	A	通过

3.3.4 浪涌抗扰度 (SI)

IEC 61000-4-5 标准规定了 SI 测试的细节，包括测试标准和设置要求。设置包括在特定源阻抗和耦合模式（线对线或线对地）下，执行浪涌测试所需的测试设备和程序。IEC61000-4-5 测试确定了 EUT 对电源线及数据线上的外部高能量浪涌的抗扰度。这些能量浪涌可能由电力系统开关、负载变化及短路故障或者直接或间接的雷击引起。IEC 61000-4-5 规定了两种类型的组合波发生器 (CWG)。10 μ s / 700 μ s CWG 专门用于测试对称电信线路的端口。其他情况下，全部使用 1.2 μ s / 50 μ s CWG。其他情况下的浪涌均包括 1.2 μ s/50 μ s (上升时间为 1.2 μ s , 脉冲宽度为 50 μ s) 开路电压波形，以及 8 μ s/20 μ s (上升时间为 8 μ s , 脉冲宽度为 20 μ s) 短路电流波形。在每个额定值下，EUT 会经受 2 次正浪涌和 2 次负浪涌。浪涌每分钟至少重复一次。浪涌测试需要耦合/去耦网络 (CDN)。IEC 61000-4-5 定义了不同情况下耦合网络中使用的阻抗和电容。EUT 通过带有 0.5 μ F 电容器和绞合电缆的 CDN 进行浪涌测试。

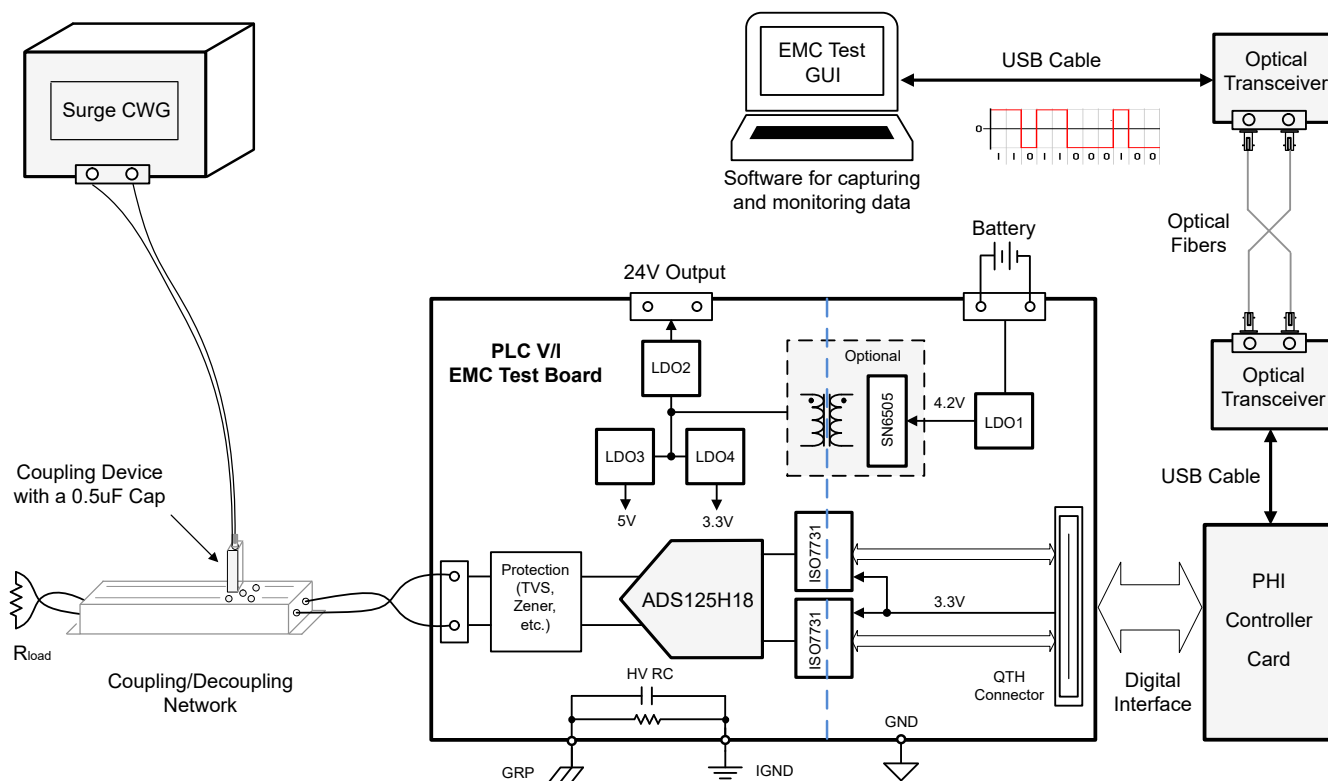


图 3-11. SI 测试的实验室设置图

表 3-9 指定 IEC 61000-4-5 测试级别：

表 3-9. SI 测试级别

级别	开路测试电压 $\pm 10\%$ (kV)
1	0.5
2	1.0
3	2.0
4	4.0
X	可能高于、低于或介于其他级别之间的特殊级别。该级别可以在产品标准中指定。

浪涌发生器使用 2Ω 输出阻抗来对低压电源的源阻抗及波形发生器的固有源阻抗进行建模。根据电源和数据线测试要求，EUT 和浪涌发生器之间可能需要一个额外的串联电阻。浪涌电流由浪涌电压电平和总阻抗 (**Req**) 决定，其中 **Req** 是浪涌发生器输出阻抗和额外串联电阻的组合。阻抗的选择取决于设备类型及测试要求。

表 3-10 展示了不同浪涌电压和阻抗下的浪涌电流电平：

表 3-10. 各浪涌测试电压及阻抗的电流电平

级别	1	2	3	4
电压 (V)	500	1000	2000	4000
Req = 42 Ω	12A	24A	48A	96A
Req = 12 Ω	42A	84A	167A	334A
Req = 2 Ω	250A	500A	1000A	2000A

图 3-12 示出了 ADS125H18 EMC 测试板上 SI 测试的实际设置。

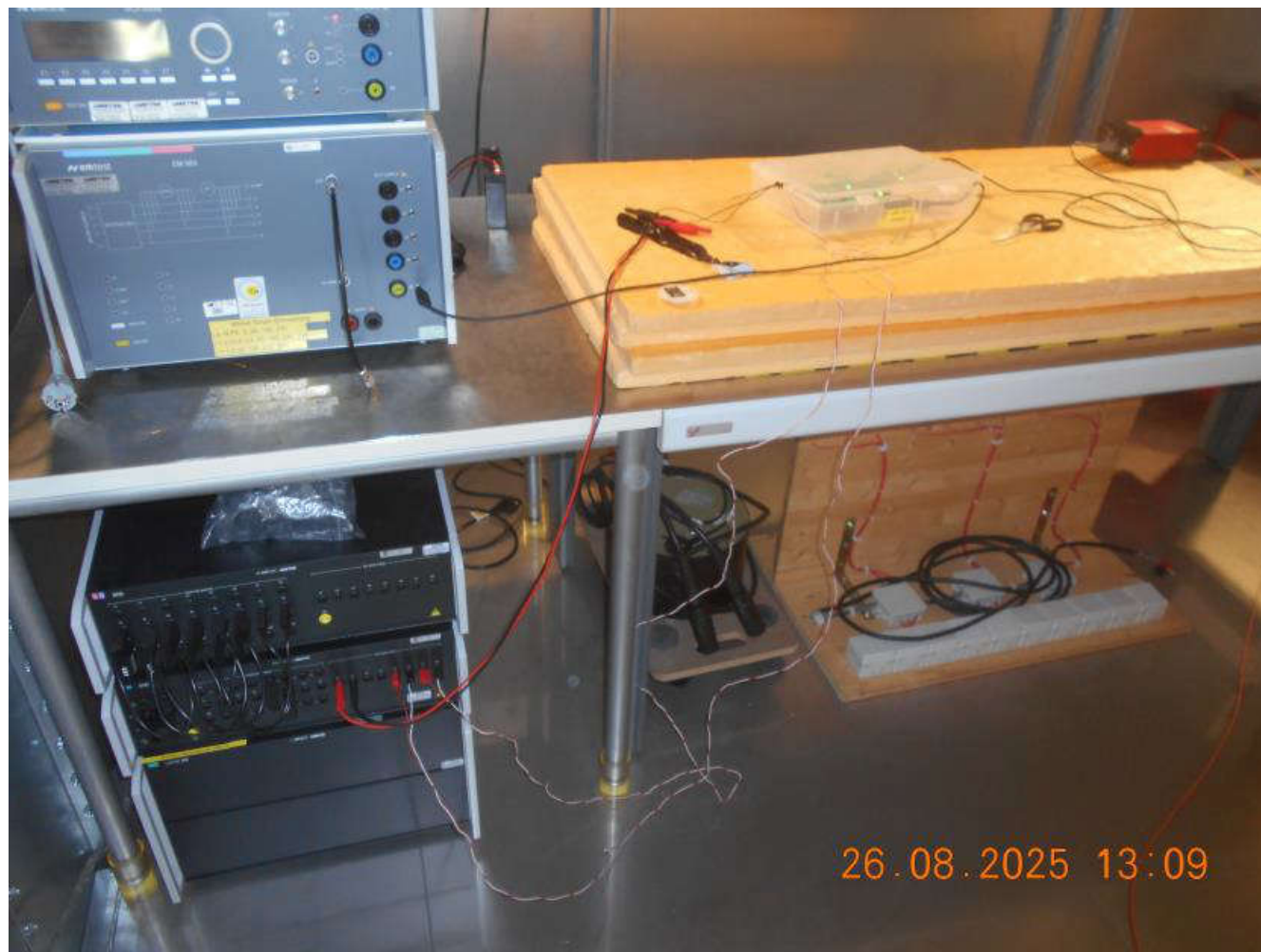


图 3-12. SI 测试的实验室设置

图 3-13 展示了在 SI 测试期间 ($\pm 1\text{kV}$ 、线对线、42 Ω)，当 ADC 测量电压输入 (左) 和电流输入 (右) 时，ADS125H18 EMC 测试板的输出数据。图中显示，浪涌信号影响了 ADS125H18 输出，导致测试期间出现较大的尖峰和暂时性能损失。但扰动停止后，该器件无需任何干预即可自行恢复。因此，ADS125H18 EMC 测试板通过了标准 B 的 SI 测试。

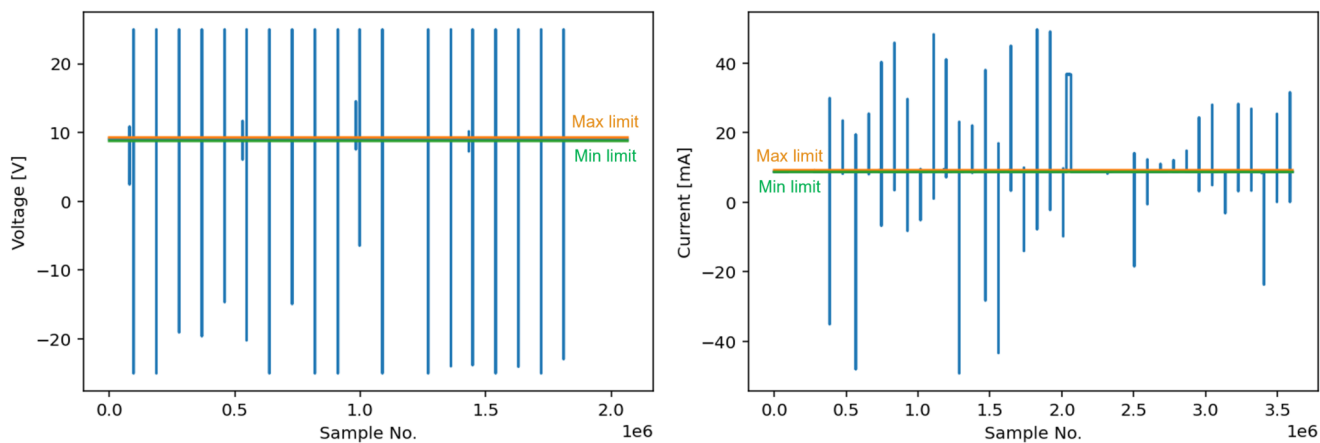


图 3-13. SI 测试期间捕获的电压 (左) 和电流 (右) 测量值

表 3-11 显示了 SI 测试的结果。EMC 测试板上的电压通道和电流通道测试结果是相同的。

表 3-11. 使用 ADS125H18 EMC 测试板的 SI 测试结果

测试	标准	类型和阻抗	配置	测试电压	标准	测试结果
SI	IEC 61000-4-5	线对地 (2Ω 源阻抗 + 来自耦合网络的 40Ω) 和线对线 (直流输入上的 2Ω 源阻抗)	电压输入	500V	B	通过
				1000V	B	通过
			电流输入	500V	B	通过
				1000V	B	通过
			直流输入	500V	B	通过
				1000V	B	通过

3.3.5 传导抗扰度 (CI)

IEC 61000-4-6 标准规定了 CI 测试的细节, 包括测试标准和设置要求。IEC61000-4-6 测试确定了 EUT 在运行期间对于外部传导电磁干扰的抗扰度。图 3-14 示出了测试信号由射频信号发生器产生, 而射频功率放大器用于将测试信号放大到指定电平。测试信号通过注入探头注入到 EMC 测试板输入内。频谱分析仪 1 用于监测功率放大器的输出, 而频谱分析仪 2 用于监测和验证注入的信号。测试中使用 80% 振幅的干扰信号 (由 1kHz 正弦信号进行调制), 从 150kHz 到 80MHz, 对信号频率进行了扫描。EUT 应置于接地平面上方指定的高度 (10cm)

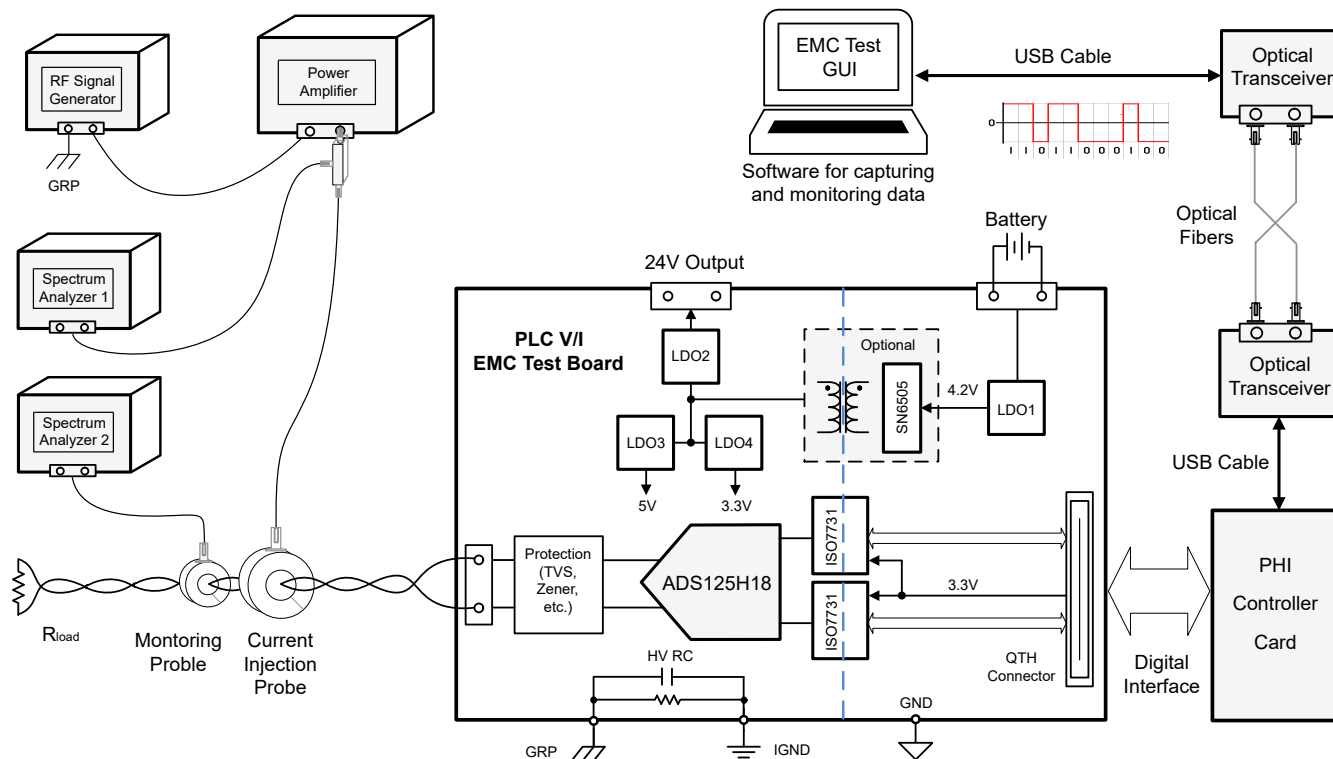


图 3-14. CI 测试的实验室设置图

表 3-12 指定了 IEC 61000-4-6 测试级别。

表 3-12. CI 测试级别

级别	测试信号的场强	
	V0 (10V/m)	V0 (dB μ V)
1	1	120
2	3	129.5
3	10	140
x	可能高于、低于或介于其他级别之间的特殊级别。该级别可以在产品标准中指定。	

图 3-15 示出了 ADS125H18 EMC 测试板上 CI 测试的实际设置。



图 3-15. CI 测试的实验室设置

图 3-16 展示了在 CI 测试期间，当 ADC 测量电压输入（左）和电流输入（右）时，ADS125H18 EMC 测试板的输出数据。这些图显示，当测试信号频率从 150kHz 扫描到 80MHz 时，测试信号不会影响 ADS125H18 ADC。此测试还将干扰信号重复耦合到直流端口和地线。在所有情况下，ADS125H18 EMC 测试板通过了 CI 测试并达到了标准 A。

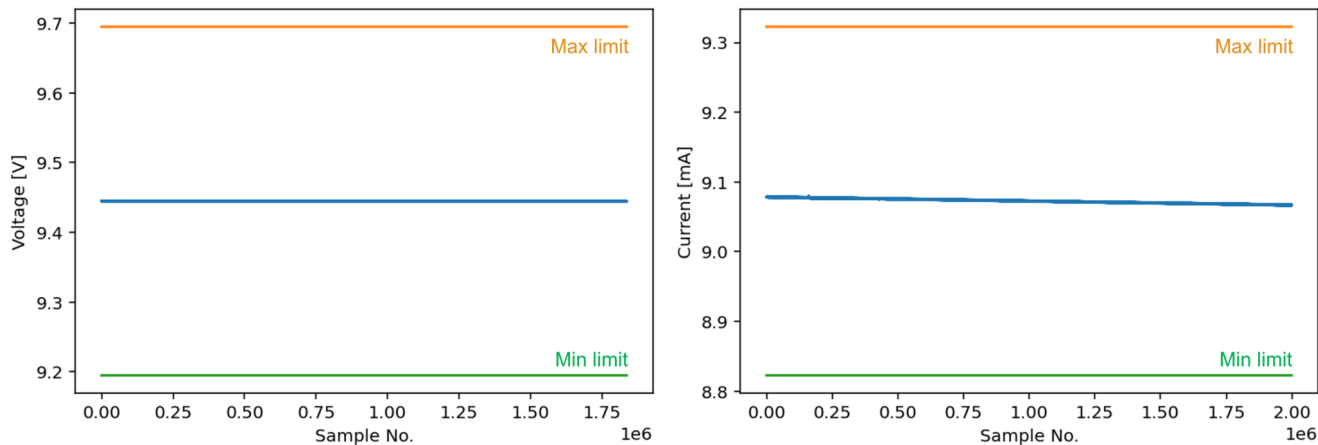


图 3-16. CI 测试期间捕获的电压（左）和电流（右）测量值

表 3-13 显示了 CI 测试的结果。EMC 测试板上的电压通道和电流通道测试结果是相同的。

表 3-13. 使用 ADS125H18 EMC 测试板的 CI 测试结果

测试	IEC 标准	测试信号		配置	标准	测试结果
		场强	频率			
CI	IEC 61000-4-6	20V/m (级别 > 3)	150kHz-80MHz	电压输入	A	通过
				电流输入	A	通过
				直流端口	A	通过
				地线	A	通过

4 原理图、PCB 布局和物料清单

节 4.1、节 4.2 和 节 4.3 分别展示了 ADS125H18 EMC 测试板的原理图、PCB 布局和物料清单

4.1 原理图

图 4-1 至 图 4-4 展示了 ADS125H18 EMC 测试板原理图：

Channels AIN0 through AIN7

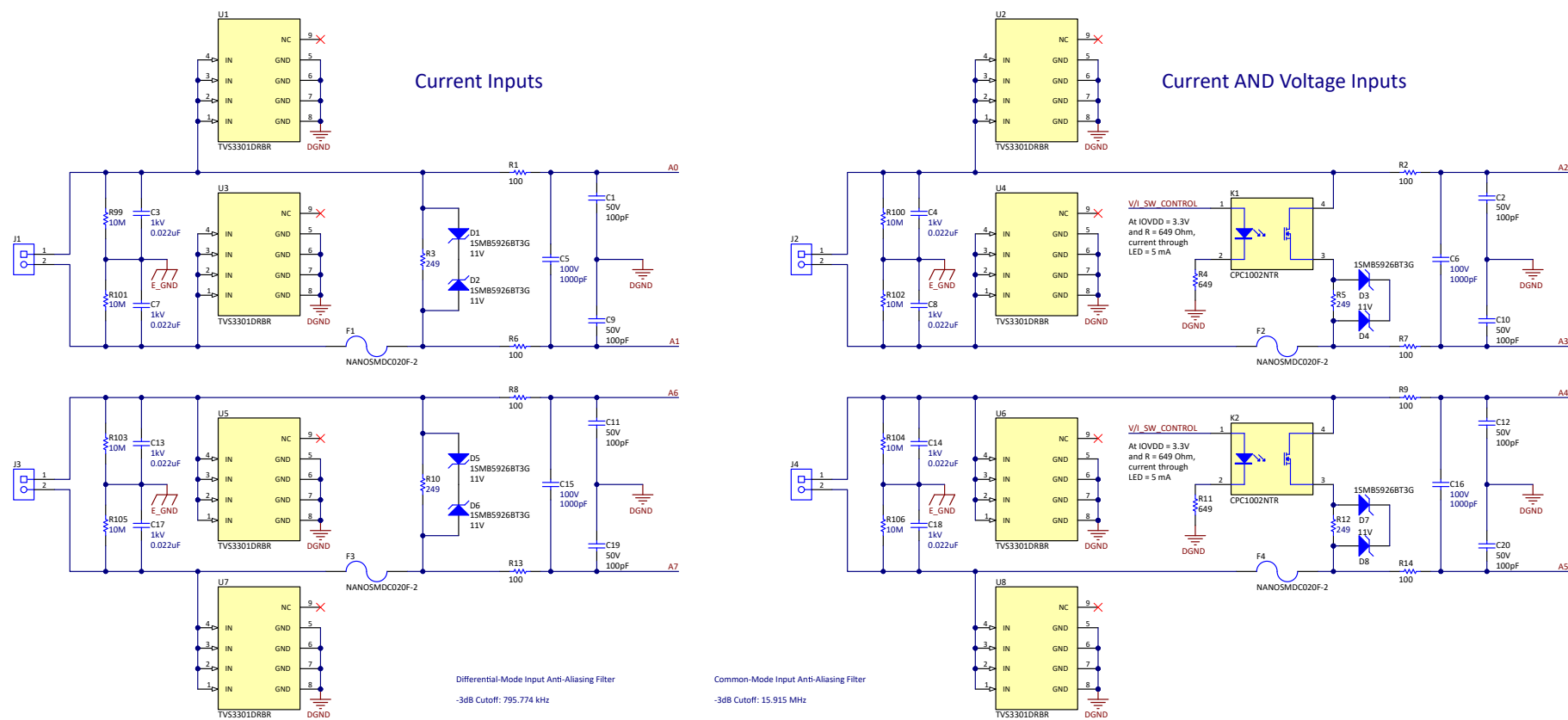


图 4-1. ADS125H18 EMC 测试板模拟输入 AIN0 至 AIN7 原理图

Channels AIN8 through AIN15

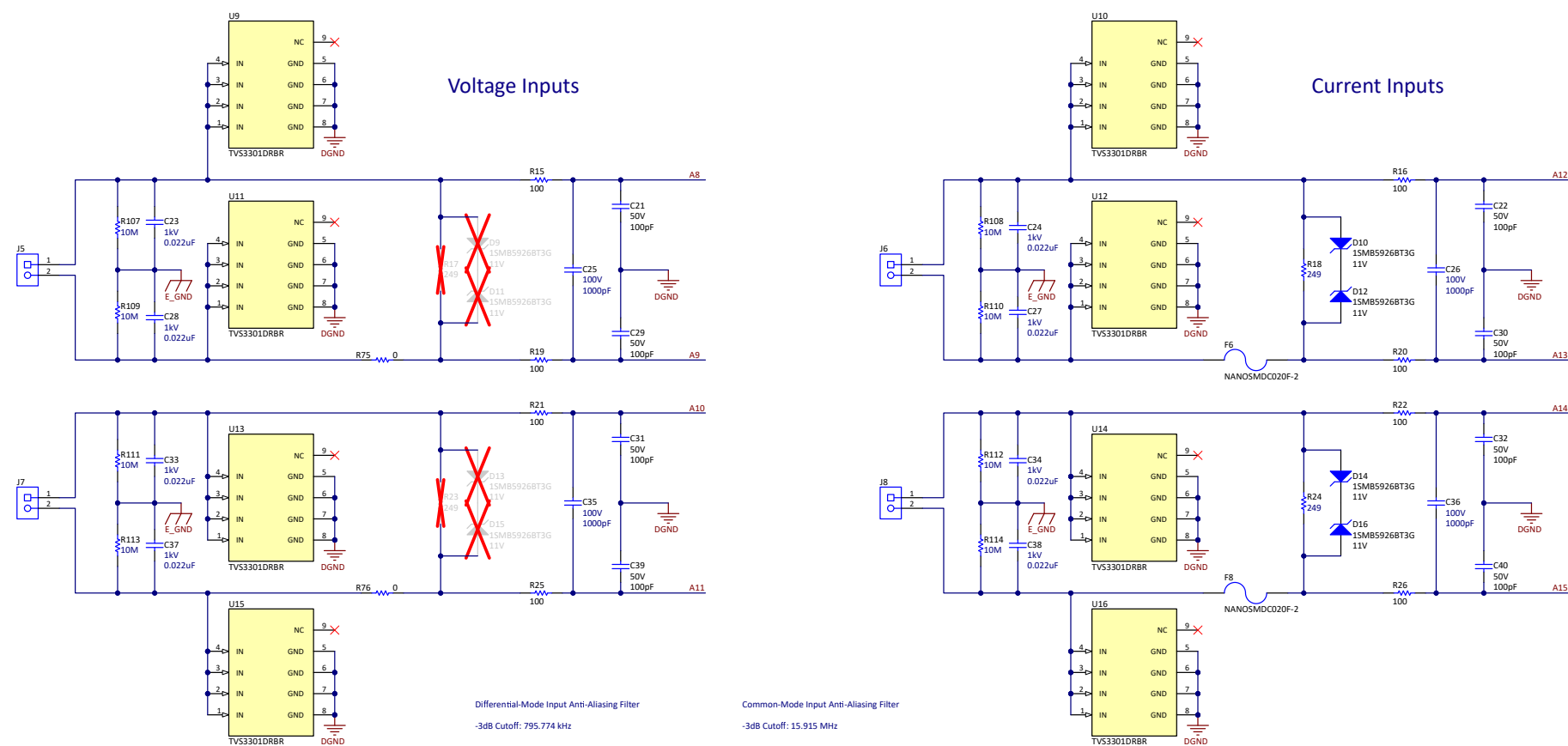


图 4-2. ADS125H18 EMC 测试板模拟输入 AIN8 至 AIN15 原理图

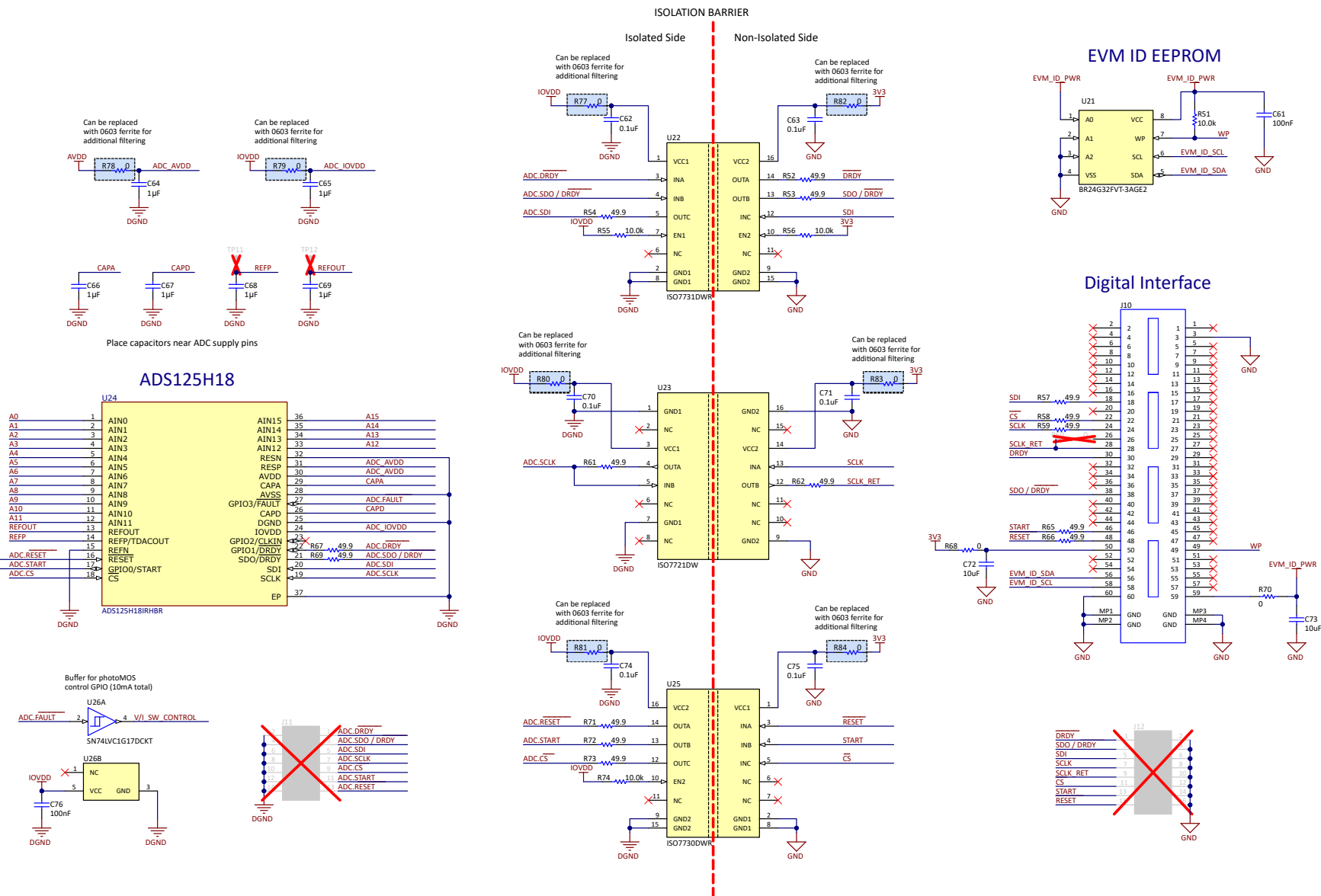


图 4-3. ADS125H18 EMC 测试板 ADC 和数字通信原理图

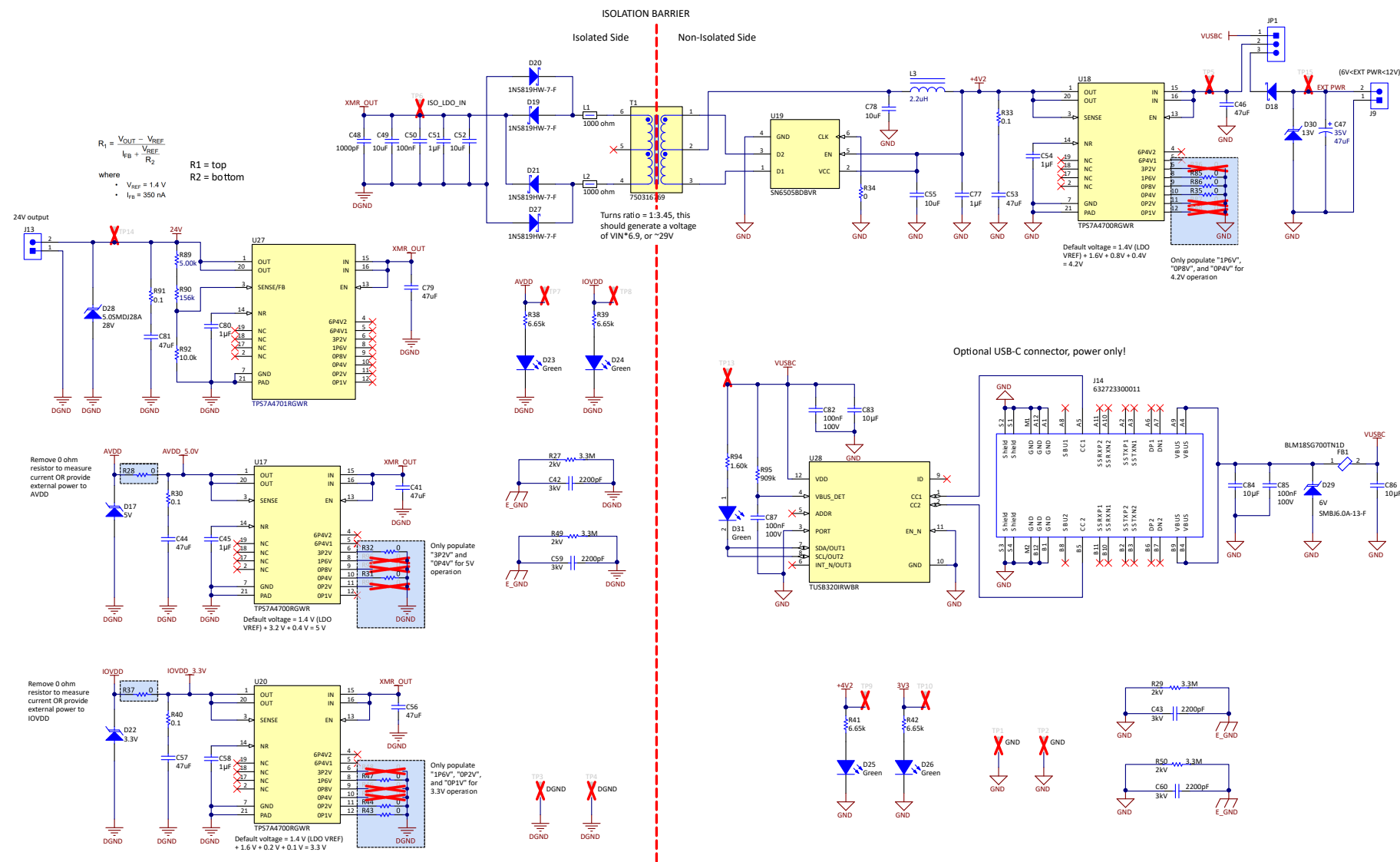


图 4-4. ADS125H18 EMC 测试板隔离式和非隔离式电源树原理图

4.2 PCB 布局

图 4-5 至 图 4-8 展示了 ADS125H18 EMC 测试板 PCB 布局：

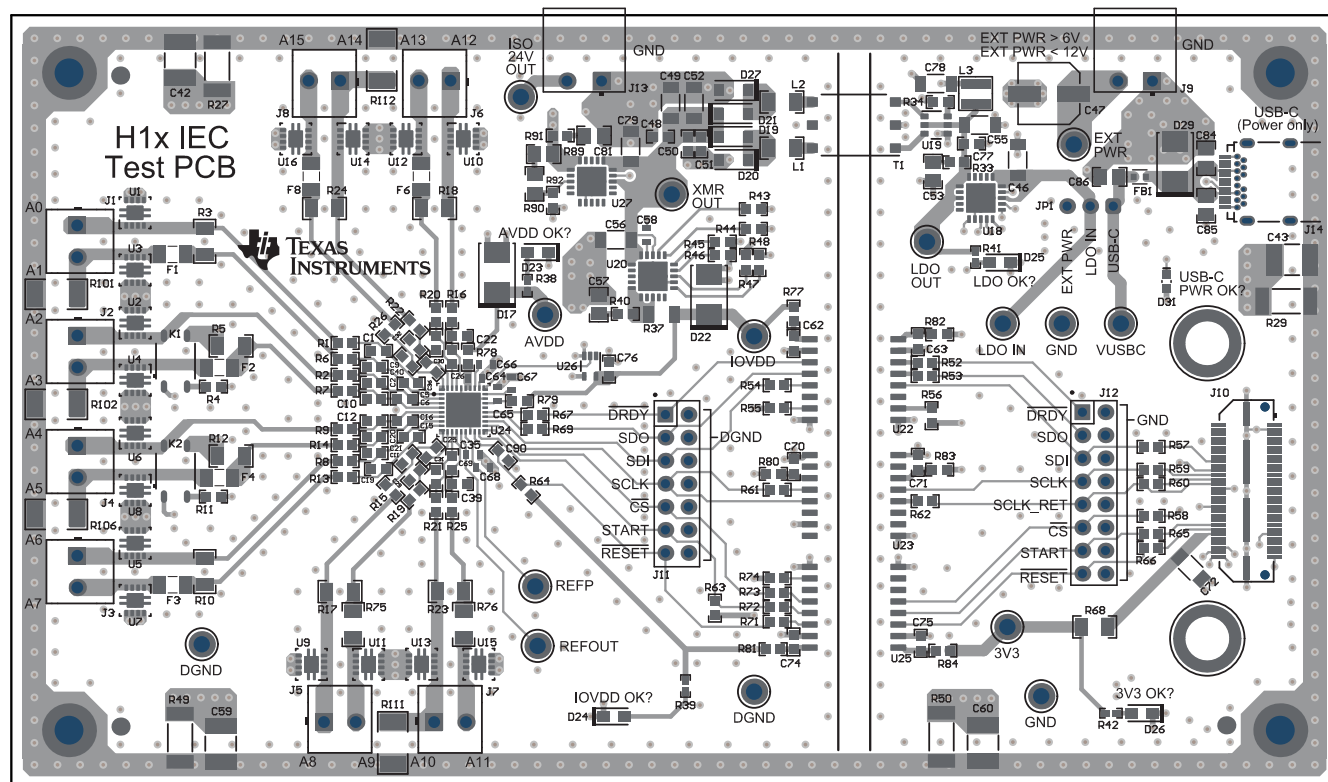


图 4-5. ADS125H18 EMC 测试板顶层 (具有丝印)

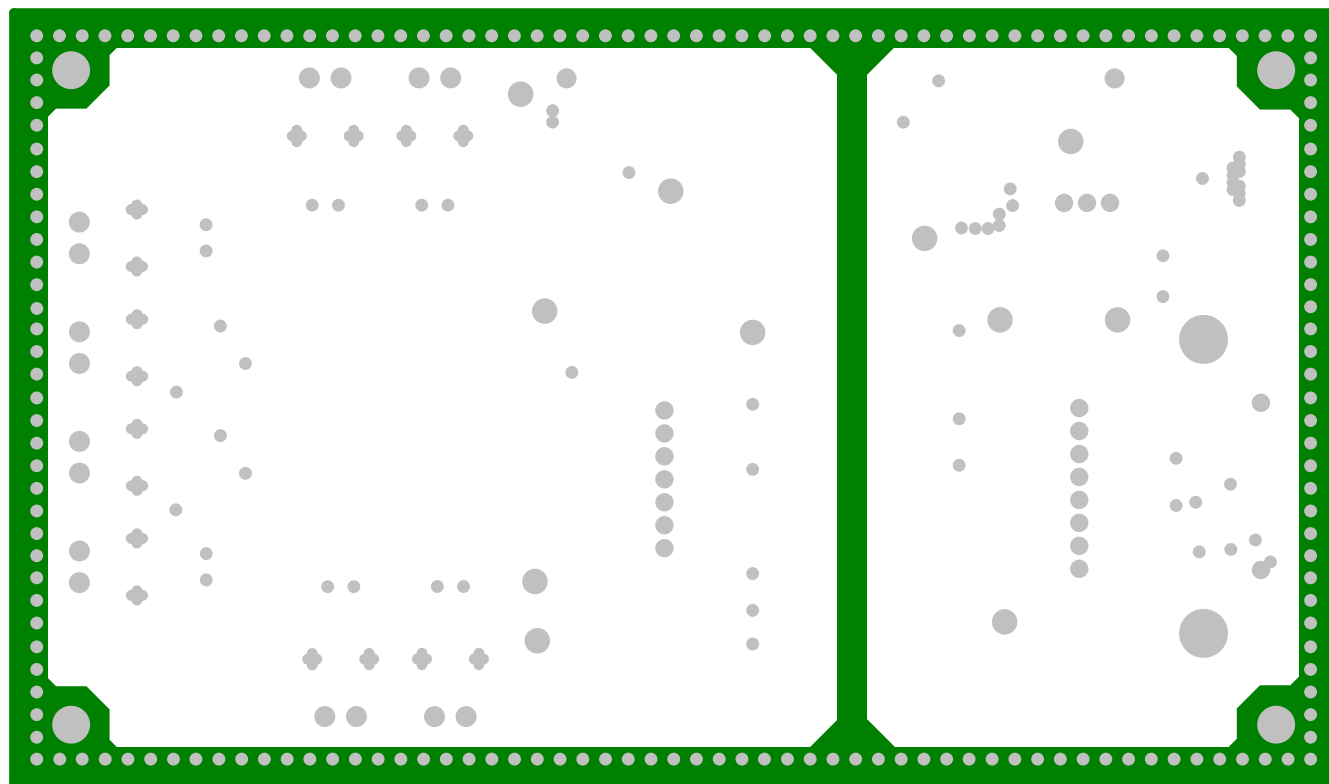


图 4-6. ADS125H18 EMC 测试板内部接地层 1

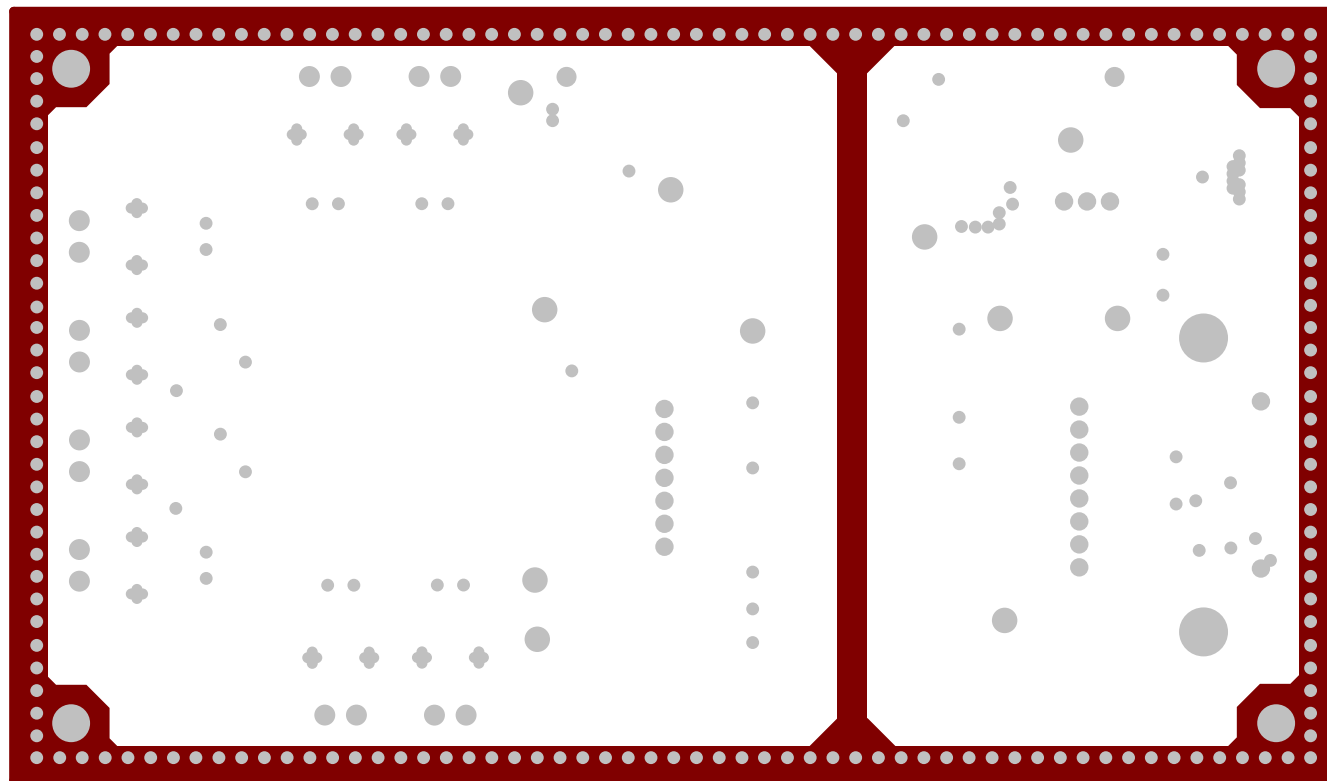


图 4-7. ADS125H18 EMC 测试板内部接地层 2

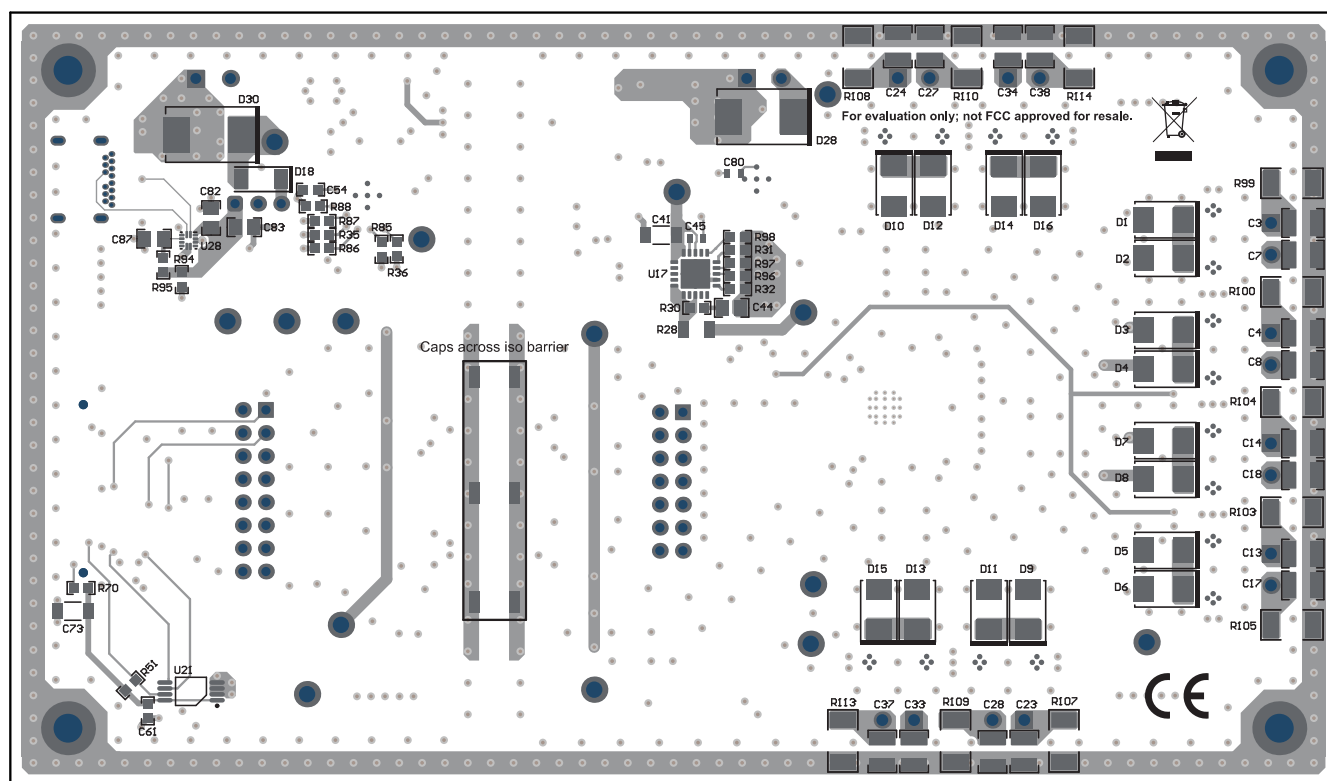


图 4-8. ADS125H18 EMC 测试板底层 (具有丝印)

4.3 物料清单 (BOM)

表 4-1 列出了 ADS125H18 EMC 测试板的物料清单 (BOM)。

表 4-1. 物料清单

位号	数量	值	说明	封装参考	器件型号	制造商
C1、C2、C9、C10、C11、C12、C19、C20、C21、C22、C29、C30、C31、C32、C39、C40	16	100pF	电容, 陶瓷, 100pF, 50V, +/-5%, C0G/NP0, 0603	603	C0603C101J5GAC	Kemet
C3、C4、C7、C8、C13、C14、C17、C18、C23、C24、C27、C28、C33、C34、C37、C38	16	0.022uF	电容, 陶瓷, 0.022μF, 1000V, +/-10%, X7R, 1210	1210	GRM32DR73A223KW01L	MuRata
C5、C6、C15、C16、C25、C26、C35、C36	8	1000pF	电容, 陶瓷, 1000pF, 100V, +/-5%, C0G/NP0, 0603	603	GRM1885C2A102JA01D	MuRata
C41、C46、C56、C79	4	47μF	电容, 陶瓷, 47 μF, 25V, +/-20%, X5R, 1206_190	1206_190	C3216X5R1E476M160AC	TDK
C42、C43、C59、C60	4	2200pF	电容, 陶瓷, 2200pF, 3000V, +/-10%, X7R, 1812	1812	1812HC222KAT1A	AVX
C44、C53、C57、C81	4	47μF	电容, 陶瓷, 47 μF, 10V, +/-20%, X5R, 0805	805	C2012X5R1A476M125AC	TDK
C45、C58、C64、C65、C66、C67、C68、C69、C80	9	1uF	电容, 陶瓷, 1μF, 25V, +/-10%, X7R, AEC-Q200 1 级, 0603	603	CGA3E1X7R1E105K080AC	TDK
C47	1	47μF	电容, 铝, 47 μF, 35V, +/-20%, 1 Ω, SMD	F55	EMVY350ADA470MF55G	Chemi-Con
C48	1	1000pF	电容, 陶瓷, 1000pF, 50V, +/-1%, C0G/NP0, 0603	603	GRM1885C1H102FA01J	MuRata
C49、C52、C55、C78	4	10uF	电容, 陶瓷, 10μF, 50V, +/-10%, X5R, 1206_190	1206_190	CL31A106KBHNNNE	Samsung Electro-Mechanics
C50、C62、C63、C70、C71、C74、C75、C90	8	0.1uF	电容, 陶瓷, 0.1μF, 50V, +/-10%, X7R, 0603	603	C0603C104K5RACTU	Kemet
C51、C54、C77	3	1uF	电容, 陶瓷, 1μF, 25V, +/-10%, X7R, 0603	603	06033C105KAT2A	AVX
C61、C76	2	0.1uF	电容, 陶瓷, 0.1 μF, 25V, +/-5%, X7R, 0603	603	C0603C104J3RACTU	Kemet
C72、C73	2	10uF	电容, 陶瓷, 10μF, 25V, +/-10%, X7R, 1206_190	1206_190	C1206C106K3RACTU	Kemet
C82、C85、C87	3	0.1uF	电容, 陶瓷, 0.1μF, 100V, +/-10%, X7R, 0805	805	CL21B104KCF5FNE	Samsung Electro-Mechanics

表 4-1. 物料清单 (续)

位号	数量	值	说明	封装参考	器件型号	制造商
C83、C84、C86	3	10uF	电容, 陶瓷, 10uF, 25V, +/-10%, X7R, 0805	805	GRM21BZ71E106KE15L	MuRata
D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8、D10、D12、D14、D16	12	11V	二极管, 齐纳, 11V, 550mW, SMB	SMB	1SMB5926BT3G	ON Semiconductor
D17	1	5V	二极管, TVS, 单向, 5V, 9.2Vc, SMB	SMB	SMBJ5.0A-13-F	Diodes Inc.
D18	1	30V	二极管, 肖特基, 30V, 5A, SOD-128	SOD-128	PMEG3050EP,115	Nexperia
D19、D20、D21、D27	4	40V	二极管, 肖特基, 40V, 1A, SOD-123	SOD-123	1N5819HW-7-F	Diodes Inc.
D22	1	3.3V	二极管, TVS, 单向, 3.3V, 7.3Vc, AEC-Q101, SMB	SMB	SMBJ3V3-E3/52	Vishay-Semiconductor
D23、D24、D25、D26	4	绿色	LED, 绿色, SMD	LED_0805	APT2012LZGCK	KINGBRIGHT
D28	1	28V	二极管, TVS, 单向, 28V, 45.4Vc, SMC	SMC	5.0SMDJ28A	Littelfuse
D29	1	6V	二极管, TVS, 单向, 6V, 10.3Vc, SMB	SMB	SMBJ6.0A-13-F	Diodes Inc.
D30	1	13V	二极管, TVS, 单向, 13V, 21.5Vc, SMC	SMC	5.0SMDJ13A	Littelfuse
D31	1	绿色	LED, 绿色, SMD	1.7x0.65x0.8mm	LG L29K-G2J1-24-Z	OSRAM
F1、F2、F3、F4、F6、F8	6		保险丝, 可复位, 0.2A, 24VDC, SMD	1206	NANOASMDCH020F-2	Littelfuse
FB1	1		70 Ω , 100MHz, 1 颗电源线铁氧体磁珠 0603 (公制 1608), 4A, 20m Ω	603	BLM18SG700TN1D	Murata
H1、H5、H9、H11	4		机械螺丝, 飞利浦盘形头 4-40	机械螺钉, 4-40, 1/4 英寸	PMSSS 440 0025 PH	B&F Fastener Supply
H2、H7、H10、H12	4		六角螺柱, 4-40, 铝, 1/4 英寸	1/4 英寸铝制六角螺柱	1891	Keystone
H3、H6	2		机械螺钉盘 PHILLIPS M3		RM3X4MM 2701	APM HEXSEAL
H4、H8	2		圆形电路板衬垫 M3 钢制 5MM	圆形电路板衬垫 M3 钢制 5MM	9774050360R	Würth Elektronik
J1、J2、J3、J4、J5、J6、J7、J8	8		端子块, 3.5mm, 2x1, 锡, TH	插座, 3.5mm, 2x1, TH	6.91214E+11	Würth Elektronik
J9、J13	2		接线端子, 2x1, 3.81mm, R/A, TH	连接器, 2 位, 3.8mm, RA	1803277	Phoenix Contact
J10	1		接头 (带护罩), 19.7mil, 30x2, 金, SMT	接头 (带护罩), 19.7mil, 30x2, SMT	QTH-030-01-L-D-A	Samtec
J14	1		连接器, 插口, USB Type C, R/A	连接器, 插口, USB Type C, R/A, THT/SMT	6.32723E+11	Würth Elektronik
JP1	1		接头, 100mil, 3x1, 金, TH	3x1 接头	TSW-103-07-G-S	Samtec
K1、K2	2		继电器, SPST-NO (1 Form A), 0.7A, SMD	4.089x3.81mm	CPC1002NTR	IXYS

表 4-1. 物料清单 (续)

位号	数量	值	说明	封装参考	器件型号	制造商
L1、L2	2	1000 Ω	铁氧体磁珠, 1000 Ω @ 100MHz, 0.4A, 1206	1206	HZ1206D102R-10	Laird-Signal Integrity Products
L3	1	2.2 μ H	电感器, 屏蔽鼓芯, 铁氧体, 2.2 μ H, 1.15A, 0.088 Ω , SMD	2.8 x 1.35 x 2.8mm	744029002	Würth Elektronik
R1、R2、R6、R7、R8、R9、R13、R14、R15、R16、R19、R20、R21、R22、R25、R26	16	100	电阻, 100, 0.1%, 0.1W, 0603	603	RG1608P-101-B-T5	Susumu Co Ltd
R3、R5、R10、R12、R18、R24	6	249	电阻, 249, 0.1%, 0.25W, 1206	1206	TNPW1206249RBEEA	Vishay-Dale
R4、R11	2	649	电阻, 649, 0.1%, 0.1W, 0603	603	RT0603BRD07649RL	Yageo America
R27、R29、R49、R50	4		电阻, SMD, 3.3M Ω , 1%, 1/2W, 2010	2010	CHV2010-FX-3304ELF	Bourns
R28、R37	2	0	电阻, 0, 1%, 0.5W, 1206	1206	5108	Keystone
R30、R33、R40、R91	4	0.1	电阻, 0.1, 1%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603	603	ERJ-3RSFR10V	Panasonic
R31、R32、R34、R35、R43、R44、R47、R77、R78、R79、R80、R81、R82、R83、R84、R85、R86	17	0	电阻, 0, 5%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603	603	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale
R38、R39、R41、R42	4	6.65k	电阻, 6.65k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	402	CRCW04026K65FKED	Vishay-Dale
R51、R55、R56、R63、R64、R74、R92	7	10.0k	电阻, 10.0k, 1%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603	603	CRCW060310K0FKEA	Vishay-Dale
R52、R53、R54、R57、R58、R59、R61、R62、R65、R66、R67、R69、R71、R72、R73	15	49.9	电阻, 49.9, 0.5%, 0.1W, 0603	603	RT0603DRE0749R9L	Yageo America
R68	1	0	电阻, 0, 0.75W, AEC-Q200 0 级, 1206	1206	CRCW12060000Z0EAHP	Vishay-Dale
R70	1	0	电阻, 0, 5%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603	603	ERJ-3GEY0R00V	Panasonic
R75、R76	2	0	电阻, 0, 5%, 0.25W, AEC-Q200 0 级, 1206	1206	ERJ-8GEY0R00V	Panasonic
R89	1	5.00k	电阻, 5.00k, 0.1%, 0.2W, 0805	805	PNM0805E5001BST5	Vishay 薄膜
R90	1	156k	电阻, 156k, 0.1%, 0.125W, 0805	805	RT0805BRD07156KL	Yageo America
R94	1	1.60k	电阻, 1.60k, 0.1%, 0.1W, 0603	603	RG1608P-162-B-T5	Susumu Co Ltd
R95	1	909k	电阻, 909k, 1%, 0.1W, 0603	603	RC0603FR-07909KL	Yageo

表 4-1. 物料清单 (续)

位号	数量	值	说明	封装参考	器件型号	制造商
R99、R100、R101、 R102、R103、R104、 R105、R106、R107、 R108、R109、R110、 R111、R112、R113、R114	16	10Meg	电阻, 10M, 5%, 0.5W, 2010	2010	HVC2010-10MJT3	TT Electronics/IRC
T1	1	350uH	变压器, 350μH, SMT	7.14x6.73mm	750316769	Würth Elektronik
U1、U2、U3、U4、U5、 U6、U7、U8、U9、U10、 U11、U12、U13、U14、 U15、U16	16		33V 双向平缓钳位浪涌保护器件, DRB0008A (VSON-8)	DRB0008A	TVS3301DRBR	德州仪器 (TI)
U17、U18、U20	3		36V、1A、4.17 μ VRMS 射频低压降 (LDO) 稳压器, RGW0020A (VQFN-20)	RGW0020A	TPS7A4700RGWR	德州仪器 (TI)
U19	1		1A、420kHz 低噪声变压器驱动器, DBV0006A (SOT-23-6)	DBV0006A	SN6505BDBVR	德州仪器 (TI)
U21	1		I2C BUS EEPROM (2 线), TSSOP-B8	TSSOP-8	BR24G32FVT-3AGE2	Rohm
U22	1		EMC 性能优异的高速三通道数字隔离器, DW0016B (SOIC-16)	DW0016B	ISO7731DWR	德州仪器 (TI)
U23	1		EMC 性能优异的高速、增强型双通道数字 隔离器, DW0016B (SOIC-16)	DW0016B	ISO7721DW	德州仪器 (TI)
U24	1		ADS125H18IRHBR	VQFN36	ADS125H18IRHBR	德州仪器 (TI)
U25	1		EMC 性能优异的高速三通道数字隔离器, DW0016B (SOIC-16)	DW0016B	ISO7730DWR	德州仪器 (TI)
U26	1		单路施密特触发缓冲器, DCK0005A, SMALL T&R	DCK0005A	SN74LVC1G17DCKT	德州仪器 (TI)
U27	1		36V、1A、4.17 μ VRMS 射频低压降 (LDO) 稳压器, RGW0020A (VQFN-20)	RGW0020A	TPS7A4701RGWR	德州仪器 (TI)
U28	1		适用于 USB 2.0 CC 端口控制器的 USB Type-C, RWB0012A (X2QFN-12)	RWB0012A	TUSB3201RWBR	德州仪器 (TI)
D9、D11、D13、D15	0	11V	二极管, 齐纳, 11V, 550mW, SMB	SMB	1SMB5926BT3G	ON Semiconductor
FID1、FID2、FID3	0		基准标记。没有需要购买或安装的元件。	不适用	不适用	不适用
J11	0		接头, 100mil, 7x2, 金, TH	7x2 接头	TSW-107-07-G-D	Samtec
J12	0		接头, 100mil, 8x2, 金, TH	8x2 接头	TSW-108-07-G-D	Samtec
R17、R23	0	249	电阻, 249, 0.1%, 0.25W, 1206	1206	TNPW1206249RBEEA	Vishay-Dale
R36、R45、R46、R48、 R60、R87、R88、R96、 R97、R98	0	0	电阻, 0, 5%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603	603	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale

表 4-1. 物料清单 (续)

位号	数量	值	说明	封装参考	器件型号	制造商
TP1、TP2、TP3、TP4、 TP5、TP6、TP7、TP8、 TP9、TP10、TP11、 TP12、TP13、TP14、 TP15	0		引脚，双转塔，TH	Keystone1593-2	1593-2	Keystone

5 总结

设计一种也可以通过严格 EMC 测试的高性能温度测量系统在许多设计人员面临的一项重大挑战。本应用手册为使用 ADS125H18 开发高精度电压 ($\pm 10V$) 和电流 (4-20mA) 输入测量系统，同时确保强大的 EMC 性能提供了实用、深入的指导。该应用手册涵盖的主要主题包括：

1. EMC 合规性设计：符合 EMC 标准的 4 层电路板保护电路设计和优化 PCB 布局的实用指南。
2. 测量基础知识：详细说明了电压和电流测量系统的输入连接、传感器配置、代码转换及误差计算方法。
3. 实现的精度：使用符合 EMC 标准的测量系统的特定配置可以在室温下实现超高精度：
 - a. 电压输入：0.04%
 - b. 电流输入：0.032%
4. 经验证的性能：测试设置和测量结果确认，每个设计都成功通过了所有相关的 IEC-61000-4 测试要求。

利用 ADS125H18，遵循实用指南，并使用本应用手册中介绍的经过验证的设计来实现高精度、可靠且符合 EMC 标准的电压和电流测量系统。此外，此信息通常可应用于任何还必须符合 EMC 标准的测量系统。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [ADS125H18EVM-PDK](#), ADS125H18 评估模块的产品页面。
2. 德州仪器 (TI), [TIDA-010988](#), 具有单电源的 8 通道电压和电流组合模拟输入模块参考设计的产品页面。
3. 德州仪器 (TI), [TI 高精度实验室 — ADC](#), 精密 ADC 按需培训视频。

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、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