

## Application Note

# 使用 ADS124S08 来设计符合 EMC 标准的高精度温度测量 (RTD/热电偶) 系统



Dale Li

## 摘要

本应用手册为设计适用于工业环境的电磁兼容性 (EMC) 优化型电阻式温度检测器 (RTD) 及热电偶 (TC) 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, 包括适用于 2 层和 4 层电路板的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测试设置注意事项和 IEC 61000-4-x 标准 EMC 测试结果的解释, 有助于开发可靠的工业温度测量解决方案。

## 内容

<b>1 电路设计和测试系统</b> .....	2
1.1 设计概述.....	2
1.2 RTD 测量的 EMC 测试板概述.....	4
1.3 TC 测量的 EMC 测试板概述.....	11
1.4 针对 EMC 合规性的电路设计注意事项.....	16
1.5 针对 EMC 合规性的 PCB 布局注意事项.....	22
1.6 测试系统.....	29
<b>2 测试细节和结果</b> .....	31
2.1 标准和测试准则.....	31
2.2 静电放电 (ESD).....	32
2.3 辐射抗扰度 (RI).....	35
2.4 电快速瞬变 (EFT).....	38
2.5 浪涌抗扰度 (SI).....	41
2.6 传导抗扰度 (CI).....	44
<b>3 原理图、PCB 布局和物料清单</b> .....	47
3.1 原理图 - RTD EMC 测试板.....	47
3.2 原理图 - TC EMC 测试板.....	50
3.3 PCB 布局 - RTD EMC 测试板 (4 层).....	53
3.4 PCB 布局 - RTD EMC 测试板 (2 层).....	55
3.5 PCB 布局 - TC EMC 测试板 (4 层).....	56
3.6 PCB 布局 - TC EMC 测试板 (2 层).....	58
3.7 物料清单 - RTD EMC 测试板.....	59
3.8 物料清单 - TC EMC 测试板.....	60
<b>4 总结</b> .....	63
<b>5 参考资料</b> .....	64

## 1 电路设计和测试系统

本节讨论了输入配置、温度误差计算和测量、电路和 PCB 布局设计以及基于 RTD 与 TC 的温度测量系统设计和优化。

### 1.1 设计概述

许多工业系统都需要精确的温度测量，包括可编程逻辑控制器 (PLC) 中的温度变送器、温度控制器和温度检测输入模块。许多工业应用都需要高精度 RTD 和 TC 测量，并且还应受到电磁干扰 (EMI)、过压和其他干扰信号的影响。本应用手册讨论了专为温度测量系统设计的两种不同类型的 EMC 测试板，一种支持所有 RTD 接线配置，另一种可使用不同的偏置技术测量 TC。每种类型的电路都有一个 4 层及 2 层电路板。表 1-1 示出了每个电路板支持的功能和特性：

表 1-1. 电路板设计摘要

RTD	PCB 板层	支持 PT100/PT1000 ?	支持 2/3/4 线 RTD ?	支持低侧和高侧基准 ?	支持 1 或 2 个 IDAC ?
电路板 1	4	是	是	是	是
电路板 2	2	是	是	是	是
TC	PCB 板层	上拉和下拉电阻偏置 ?	电阻偏置到负极引线 ?	用于传感器偏置的 VBIAS ?	使用上拉电阻进行 REFOUT 偏置 ?
电路板 3	4	是	是	是	是
电路板 4	2	是	是	是	是

表 1-1 中的  $\Delta \Sigma$  电路板都使用 ADS124S08，这是一款精密的 24 位  $\Delta - \Sigma$  模数转换器 (ADC)，可提供低功耗和许多集成功能，从而在测量小信号传感器的应用中降低系统成本和减少元件数量。此 ADC 具有一个低噪声，可编程增益放大器 (PGA)，用于放大电阻电桥、RTD 或热电偶应用中的低电平信号。此外，两个可编程电流源 (IDAC) 可在 RTD 应用中轻松准确地激励电流。最后，输入多路复用器支持多达 12 个输入信号，这些信号可在任何组合中连接到 ADS124S08，以实现设计灵活性。

表 1-1 中的所有电路板还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 ADS124S08 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。

表 1-1 显示，除了 4 层和 2 层 PCB 设计外，所有 EMC 测试板都包含相同的电路和特性。RTD 电路板 1 和电路板 2 具有相同的原理图，但使用的层数不同。TC 电路板 3 和电路板 4 具有相同的原理图，但使用的层数不同。有关详细信息，请参阅节 3。

为简单起见，本文的其余部分使用两个不同的设计示例来说明温度测量系统的行为和操作：

- RTD 温度测量：使用 3 线 RTD 并采用低侧及高侧电压基准配置的电路板 1。
- TC 温度测量：具有 VBIAS 及 REFOUT 偏置配置的电路板 3。

如果适用，每个部分详细说明了电路板 1 或电路板 3 与表 1-1 中所述的其他电路板之间的任何差异。

图 1-1 示出了 ADS124S08 RTD EMC 测试板 1。

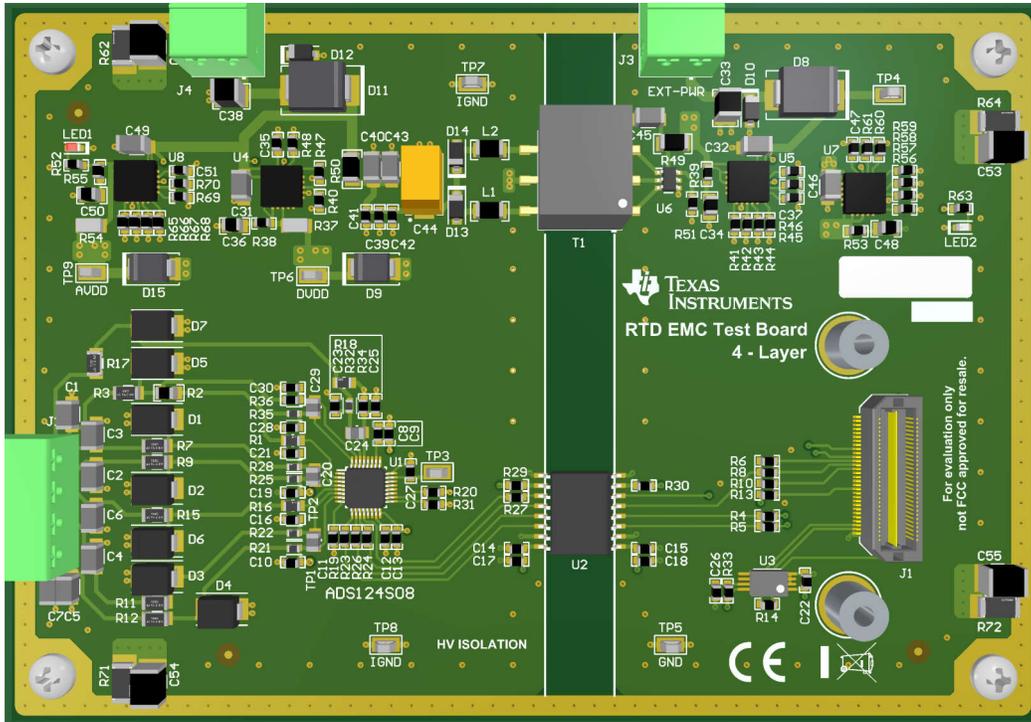


图 1-1. 采用 ADS124S08 的 RTD EMC 测试板 (4 层)

图 1-2 示出了 ADS124S08 TC EMC 测试板 3。

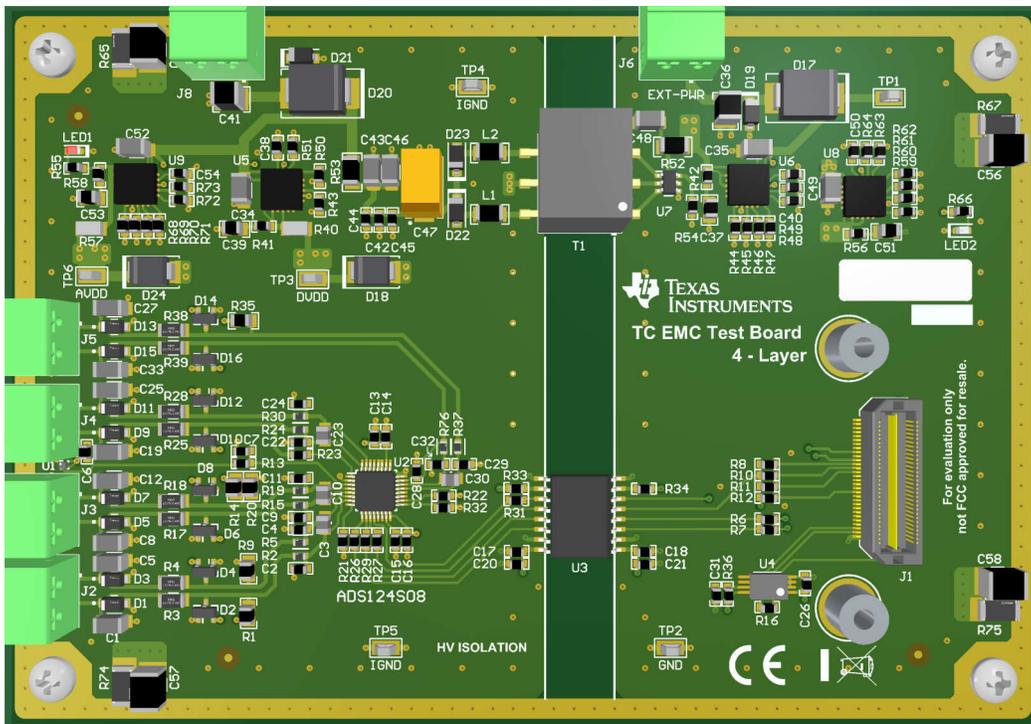


图 1-2. 采用 ADS124S08 的 TC EMC 测试板 (4 层)

## 1.2 RTD 测量的 EMC 测试板概述

本节介绍 RTD EMC 测试板输入配置，并提供实际测量的温度误差性能结果。

- 输入配置及 ADC 设置
- 温度误差 - RTD 测量

### 1.2.1 输入配置及 ADC 设置

本节介绍了 RTD EMC 测试板输入连接以及采用低侧与高侧基准配置的 3 线 RTD 测量配置。

- 采用低侧基准的 3 线 RTD 测量的配置及设置
- 采用高侧基准的 3 线 RTD 测量的配置及设置

#### 1.2.1.1 采用低侧基准的 3 线 RTD 测量的配置及设置

图 1-3 示出了具有 EMC 测试板使用的低侧基准配置的 3 线 RTD 测量系统。使用两个匹配 IDAC 电流源来消除引线电阻。ADS124S08 使用 EMC 测试板上的 AIN4 及 AIN3 模拟输入通道测量 RTD 电压。

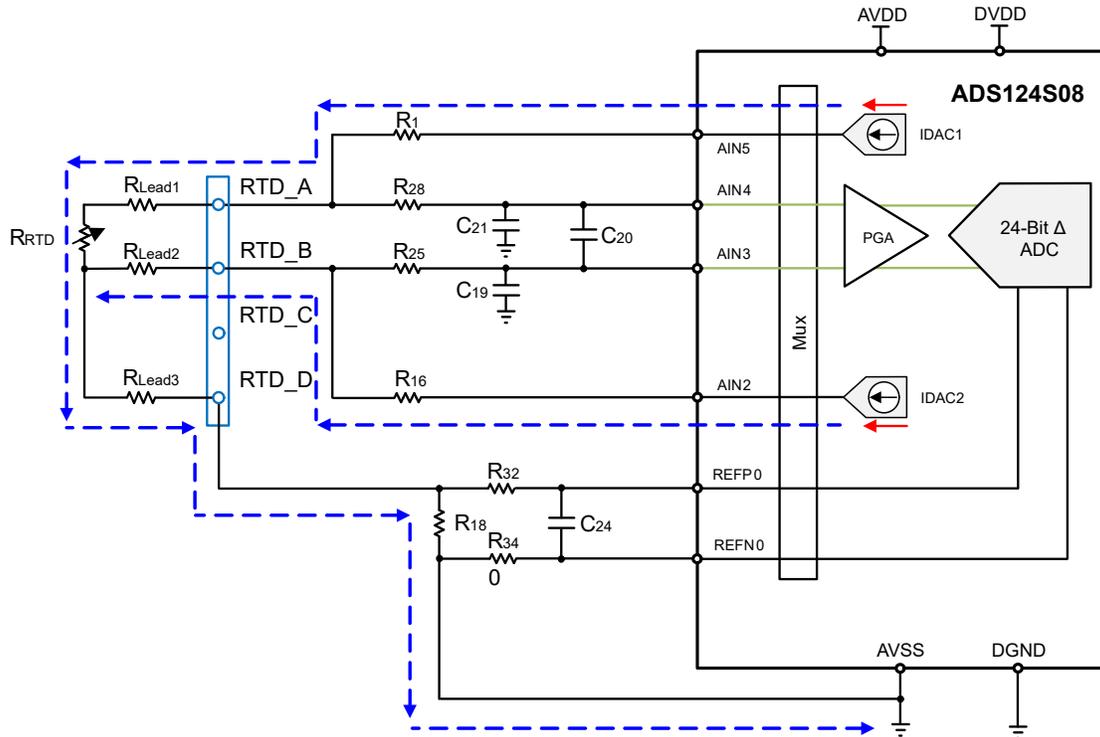


图 1-3. 3 线 RTD 低侧基准测量电路

ADS124S08 已按照以下设置进行编程，以测量图 1-3 中所示的电路：

- 4kSPS 数据速率
- Sinc3 数字滤波器
- AIN4/AIN3 模拟输入
- IDAC1=IDAC2=250uA
- AIN5 上的 IDAC1，AIN2 上的 IDAC2
- REFP0/REFN0 上的外部电压基准
- 正基准缓冲器已启用

公式 1 至公式 7 计算出，使用低侧基准尽可能地提高 RTD 测量的 ADS124S08 动态范围需要增益 8：

$$R1=3.4k\Omega, R2=0\Omega \quad (1)$$

$$R_{RTD_{min}} \approx 18.5\Omega \text{ at } -200^{\circ}\text{C (PT100)} \quad (2)$$

$$V_{RTD_{max}} = I_{IDAC} \times R_{RTD_{min}} = 250\mu\text{A} \times 18.5\Omega = 0.004625\text{V} \quad (3)$$

$$V_{ADC_{min}} = \text{Gain} \times V_{RTD_{min}} = 8 \times 0.004625\text{V} = 0.037\text{V} \quad (4)$$

$$R_{RTD_{max}} \approx 390\Omega \text{ at } +850^{\circ}\text{C (PT100)} \quad (5)$$

$$V_{RTD_{max}} = I_{IDAC} \times R_{RTD_{max}} = 250\mu\text{A} \times 390\Omega = 0.0975\text{V} \quad (6)$$

$$V_{ADC_{max}} = \text{Gain} \times V_{RTD_{max}} = 8 \times 0.0975\text{V} = 0.78\text{V} \quad (7)$$

**公式 8** 用于计算指定 IDAC 电流流过精密 2.2kΩ 基准电阻器 (R18) 而产生的 ADS124S08 基准电压：

$$V_{REF} = 2 \times I_{IDAC} \times R_{REF} = 2 \times 250\mu\text{A} \times 2.2\text{k}\Omega = 1.1\text{V} \quad (8)$$

**公式 9** 和 **公式 10** 示出了如何根据转换代码以十进制格式计算 RTD 电阻 ( $R_{RTD}$ )：

$$\text{CODE} = \frac{V_{RTD} \times \text{Gain} \times 2^{N-1}}{V_{REF}} = \frac{I_{IDAC} \times R_{RTD}(\Omega) \times \text{Gain} \times 2^{N-1}}{2 \times I_{IDAC} \times R_{REF}} = \frac{R_{RTD}(\Omega) \times \text{Gain} \times 2^{N-2}}{R_{REF}} \quad (9)$$

$$R_{RTD} = \frac{\text{CODE} \times R_{REF}}{\text{Gain} \times 2^{N-2}} \quad (10)$$

其中：

- CODE 是从 ADS124S08 获得的转换代码。
- $R_{REF}$  为外部基准电阻器。
- N 是 ADC 的分辨率，其中 ADS124S08 的 N = 24。
- 增益是 ADS124S08 PGA 增益的值。

### 1.2.1.2 采用高侧基准的 3 线 RTD 测量的配置及设置

图 1-4 示出了具有 EMC 测试板使用的高侧基准配置的 3 线 RTD 测量系统。使用两个匹配 IDAC 电流源来消除引线电阻。ADS124S08 使用 EMC 测试板上的 AIN4 及 AIN3 模拟输入通道测量 RTD 电压。

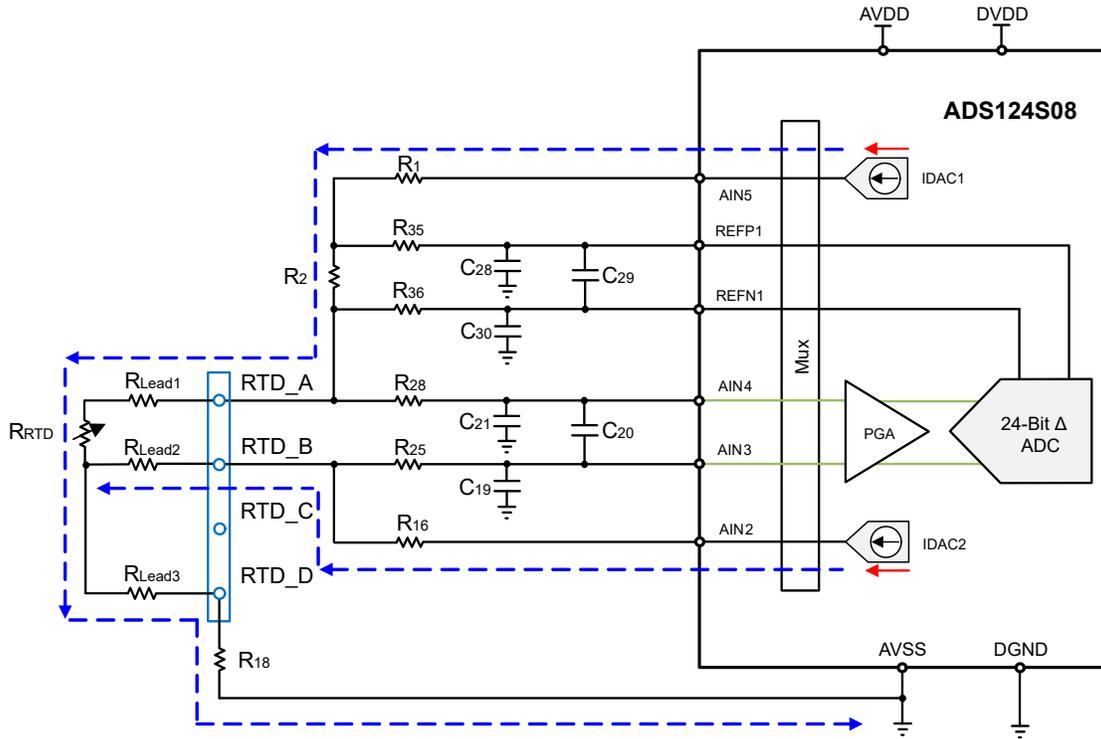


图 1-4. 3 线 RTD 高侧基准测量电路

ADS124S08 已按照以下设置进行编程，以测量图 1-4 中所示的电路：

- 4kSPS 数据速率
- Sinc3 数字滤波器
- AIN4/AIN3 模拟输入
- IDAC1=IDAC2=250uA
- AIN5 上的 IDAC1，AIN2 上的 IDAC2
- REFP1/REFN1 上的外部电压基准
- 正负基准缓冲器均已启用

公式 11 至公式 17 计算出，使用高侧基准尽可能地提高 RTD 测量的 ADS124S08 动态范围需要增益 4：

$$R1=0\Omega, R18=400\Omega \text{ (bias resistor)} \quad (11)$$

$$R_{RTD_{min}} \approx 18.5\Omega \text{ at } -200^\circ\text{C (PT100)} \quad (12)$$

$$V_{RTD_{min}} = I_{IDAC} \times R_{RTD_{min}} = 250\mu\text{A} \times 18.5\Omega = 0.004625\text{V} \quad (13)$$

$$V_{ADC_{min}} = \text{Gain} \times V_{RTD_{min}} = 4 \times 0.004625\text{V} = 0.0185\text{V} \quad (14)$$

$$R_{RTD_{max}} \approx 390\Omega \text{ at } +850^\circ\text{C (PT100)} \quad (15)$$

$$V_{RTD_{max}} = I_{IDAC} \times R_{RTD_{max}} = 250\mu\text{A} \times 390\Omega = 0.0975\text{V} \quad (16)$$

$$V_{ADC_{max}} = \text{Gain} \times V_{RTD_{max}} = 4 \times 0.0975\text{V} = 0.39\text{V} \quad (17)$$

公式 18 用于计算指定 IDAC 电流流过精密 2.2kΩ 基准电阻器 (R2) 而产生的 ADS124S08 基准电压：

$$V_{REF} = I_{IDAC} \times R_{REF} = 250 \mu A \times 2.2 k\Omega = 0.55 V \quad (18)$$

公式 19 和公式 20 示出了如何根据转换代码 (CODE) 计算 RTD 电阻 ( $R_{RTD}$ ) :

$$CODE = \frac{V_{RTD} \times Gain \times 2^{N-1}}{V_{REF}} = \frac{I_{IDAC} \times R_{RTD}(\Omega) \times Gain \times 2^{N-1}}{I_{IDAC} \times R_{REF}} = \frac{R_{RTD}(\Omega) \times Gain \times 2^{N-1}}{R_{REF}} \quad (19)$$

$$R_{RTD} = \frac{CODE \times R_{REF}}{Gain \times 2^{N-1}} \quad (20)$$

其中 :

- CODE 是从 ADS124S08 获得的转换代码。
- $R_{REF}$  为外部基准电阻器。
- N 是 ADC 的分辨率, 其中 ADS124S08 的 N = 24。
- 增益是 ADS124S08 PGA 增益的值。

此外, 选择的电阻值、IDAC 电流和增益设置应满足这两种设计中 ADS124S08 IDAC 顺从电压。

### 1.2.2 温度误差 - RTD 测量

本节介绍了如何计算 ADS124S08 输出数据温度误差并且提供了 RTD EMC 测试板性能结果。

- [根据 RTD 电阻计算 RTD 温度](#)
- [根据 RTD 测量值计算温度误差](#)
- [实验设置和结果](#)

#### 1.2.2.1 根据 RTD 电阻计算 RTD 温度

RTD 使用 Callendar-Van Dusen 方程来描述 RTD 电阻与所测温度之间的关系。在两个不同的温度范围内需要不同公式 :

公式 21 提供了  $0^{\circ}C$  至  $850^{\circ}C$  范围内 RTD 电阻同温度之间的关系 :

$$R_{RTD}(T) = R_0 \times (1 + A \times T + B \times T^2) \quad (21)$$

通过求解公式 22 中的二次方程, 根据电阻计算温度 :

$$T_{RTD}(^{\circ}C) = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4 \times B \times \left(1 - \frac{R_{RTD}(T)}{R_0}\right)}}{2 \times B} \quad (22)$$

其中 :

- $R_{RTD}(T)$  = 温度 (T) 下的电阻。
- $R_0$  =  $0^{\circ}C$  下的电阻 (对于 PT100 RTD,  $R_0 = 100 \Omega$ )。
- T = 以摄氏度 ( $^{\circ}C$ ) 为单位的温度。

公式 22 中的 A、B 和 C 称为 Callendar-Van Dusen 常量, 从符合 IEC 60751 和 ASTM E1137 标准的铂 RTD 经过实验确定的参数推导得出 :

$$A = 3.908310^{-3} \quad (23)$$

$$B = -5.77510^{-7} \quad (24)$$

$$C = -4.18310^{-12} \quad (25)$$

公式 26 提供了  $-200^{\circ}C$  至  $0^{\circ}C$  范围内 RTD 电阻同温度之间的关系 :

$$R_{RTD}(T) = R_0 \times [1 + A \times T + B \times T^2 + C \times (T-100) \times T^3] \quad (26)$$

根据电阻计算温度需要确定该二次方程的倒数，该二次方程涉及复杂数学运算。相反，使用公式 27 中所示的最佳拟合五阶多项式作为高精度近似值：

$$T_{RTD}(^{\circ}\text{C}) = -242.02 + 2.2228 \times R_{RTD} + (2.585910^{-3}) \times R_{RTD}^2 - (4.82610^{-6}) \times R_{RTD}^3 \\ - (2.818310^{-8}) \times R_{RTD}^4 + (1.524310^{-10}) \times R_{RTD}^5 \quad (27)$$

### 1.2.2.2 根据 RTD 测量值计算温度误差

本节介绍了根据 ADS124S08 输出数据来计算 RTD 温度误差的步骤。

1. 使用公式 10 或者公式 20 根据转换代码计算 RTD 电阻 ( $R_{RTD}$ )。
2. 使用公式 22 或者公式 27 将  $R_{RTD}$  转换为 RTD 温度 ( $T_{RTD}$ )。
3. 使用 Keysight Technologies 3458A 数字万用表 (或者类似万用表) 测量 RTD 电阻值 ( $R_{MEAS}$ )。
4. 使用公式 22 或者公式 27 将  $R_{MEAS}$  转换为温度 ( $T_{MEAS}$ )。  $T_{MEAS}$  是对应于  $R_{MEAS}$  的温度。
5. 使用公式 28 来计算测得的温度误差：

$$T_{ERROR}(^{\circ}\text{C}) = T_{MEAS} - T_{RTD} \quad (28)$$

### 1.2.2.3 实验设置和结果

RTD 性能测试使用精密电阻器来模拟温度变化，而不是使用实际的 PT100 传感器，以保持高精度测量并简化测试。使用 Keysight Technologies 3458A 数字万用表校准输入信号，以消除电阻器的误差。图 1-5 示出了可与低侧或高侧基准配置结合使用的 RTD EMC 测试板电路。

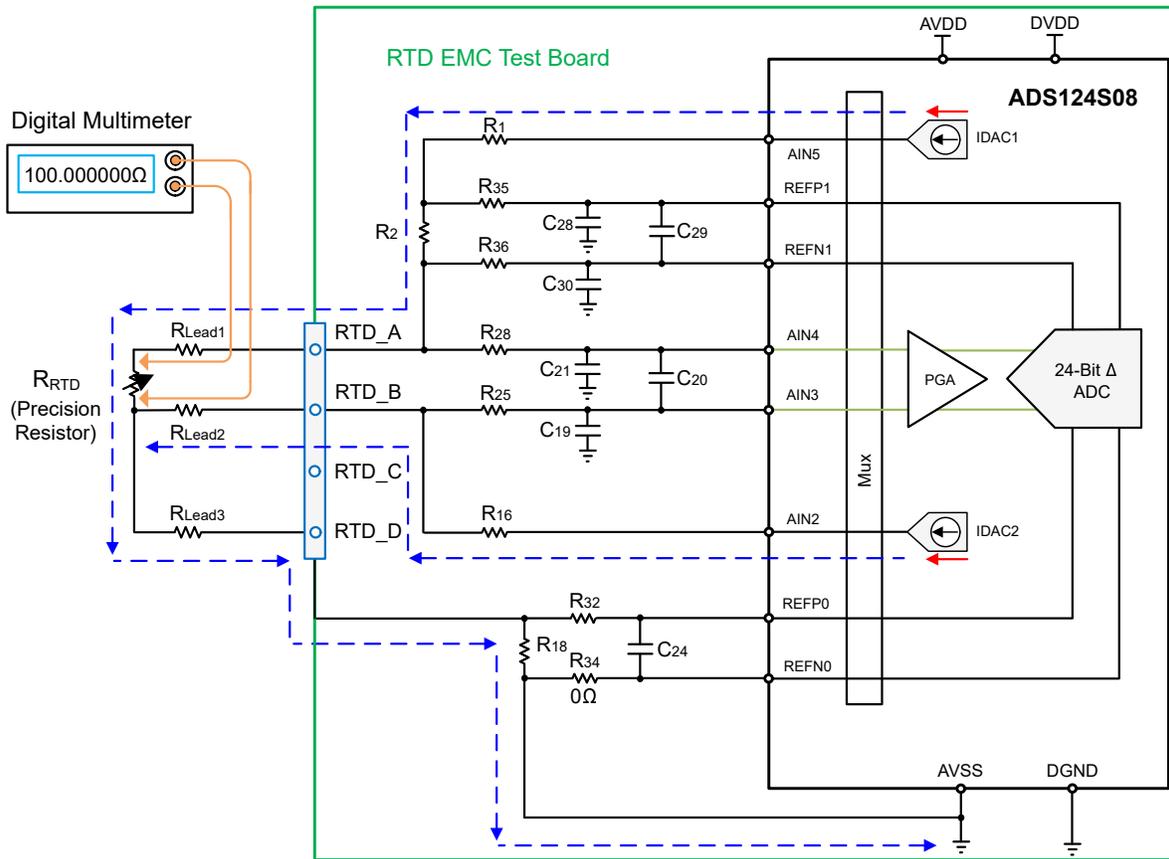


图 1-5. EMC 测试板上的低侧及高侧 RTD 测量电路

图 1-6 示出了低侧参考配置的蓝色测量的未校准温度误差和红色测量的校准温度误差。此图使用从室温下运行并测量 3 线 RTD 的 4 层 RTD EMC 测试板所收集的数据。图 x 轴示出了从施加到 ADS124S08 的测量电阻转换而来的 RTD 温度。

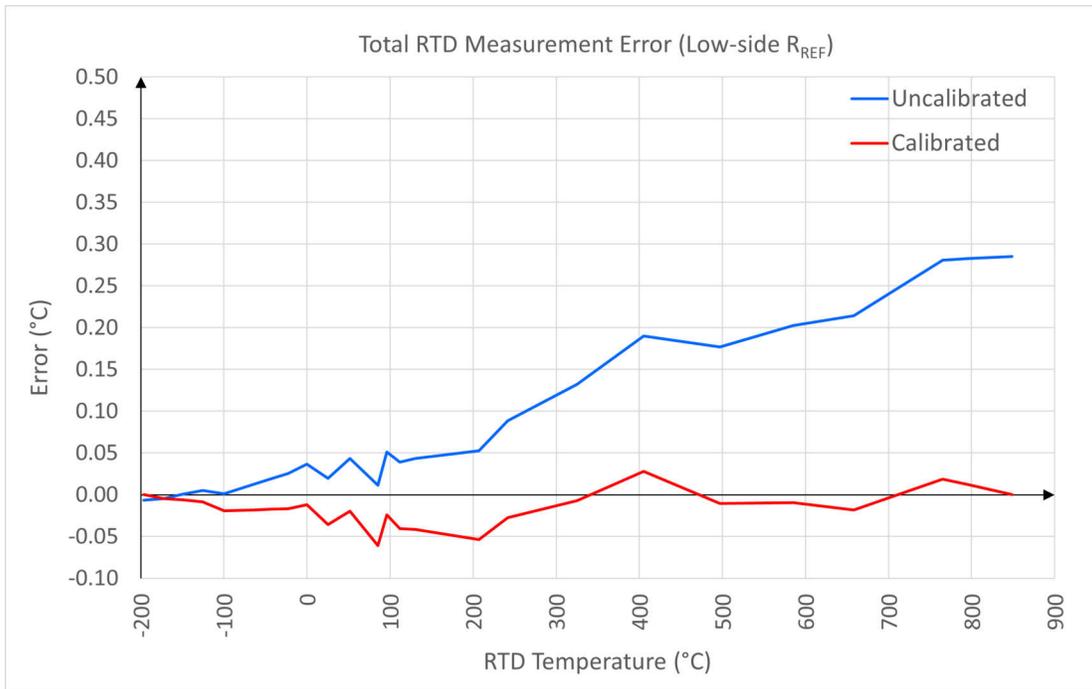


图 1-6. 未校准与已校准总 RTD 测量误差 (采用低侧 R<sub>REF</sub> 时)

图 1-7 示出了高侧参考配置的蓝色测量的未校准温度误差和红色测量的校准温度误差。此图使用从室温下运行并测量 3 线 RTD 的 2 层 RTD EMC 测试板所收集的数据。图 x 轴示出了从施加到 ADS124S08 的测量电阻转换而来的 RTD 温度。

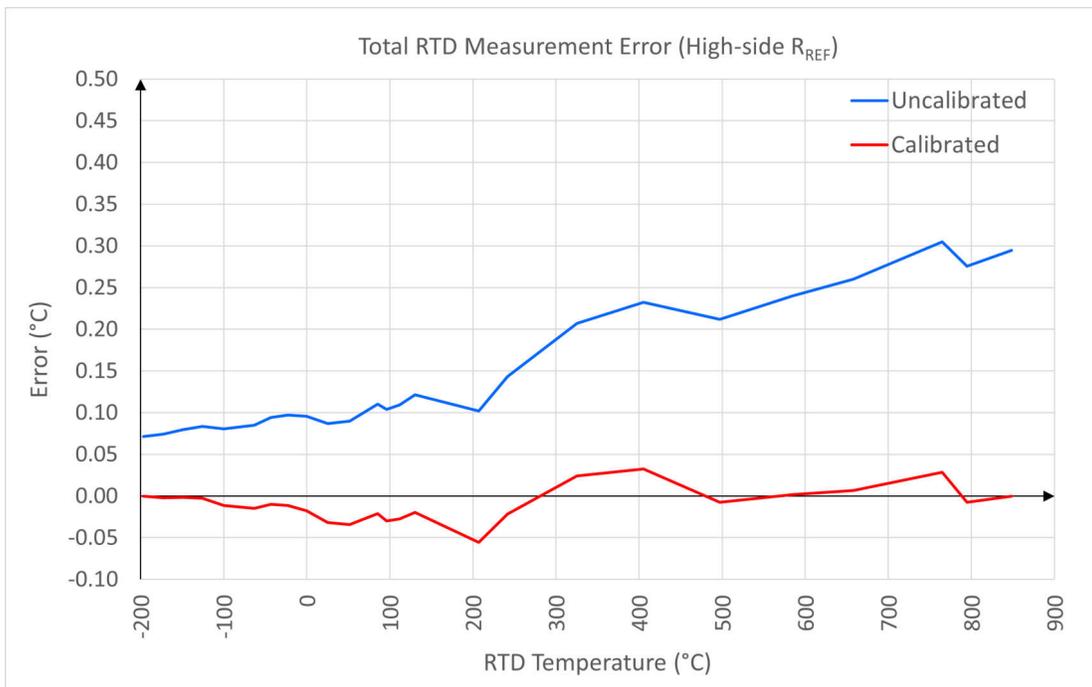


图 1-7. 未校准与已校准总 RTD 测量误差 (采用高侧 R<sub>REF</sub> 时)

可以调整电阻器和 IDAC 设置，使其与 PT1000 或其他类型 RTD 传感器兼容。有关 RTD 测量的更多信息，请参阅应用手册：[RTD 测量基本指南](#)。

### 1.3 TC 测量的 EMC 测试板概述

本节介绍 TC EMC 测试板输入配置，并提供实际测量的温度误差性能结果。

- [输入配置及 ADC 设置](#)
- [温度误差 - TC 测量](#)

#### 1.3.1 输入配置及 ADC 设置

本节介绍使用 VBIAS 和 REFOUT 偏置进行 TC 测量的输入配置、热电偶特性及 ADC 设置。

- [输入配置](#)
- [热电偶特性及 ADC 设置](#)

##### 1.3.1.1 输入配置

TC EMC 测试板支持四种不同偏置电路。每个偏置电路在 ADS124S08 上使用不同模拟输入通道对。本节介绍了用于在 EMC 合规性测试期间偏置热电偶的两种电路拓扑。

图 1-8 示出了使用 ADS124S08 VBIAS 发生器的热电偶偏置电路。VBIAS 发生器通过 AINCOM 引脚施加到热电偶的负极引线，并将共模电压设置为中点电压。

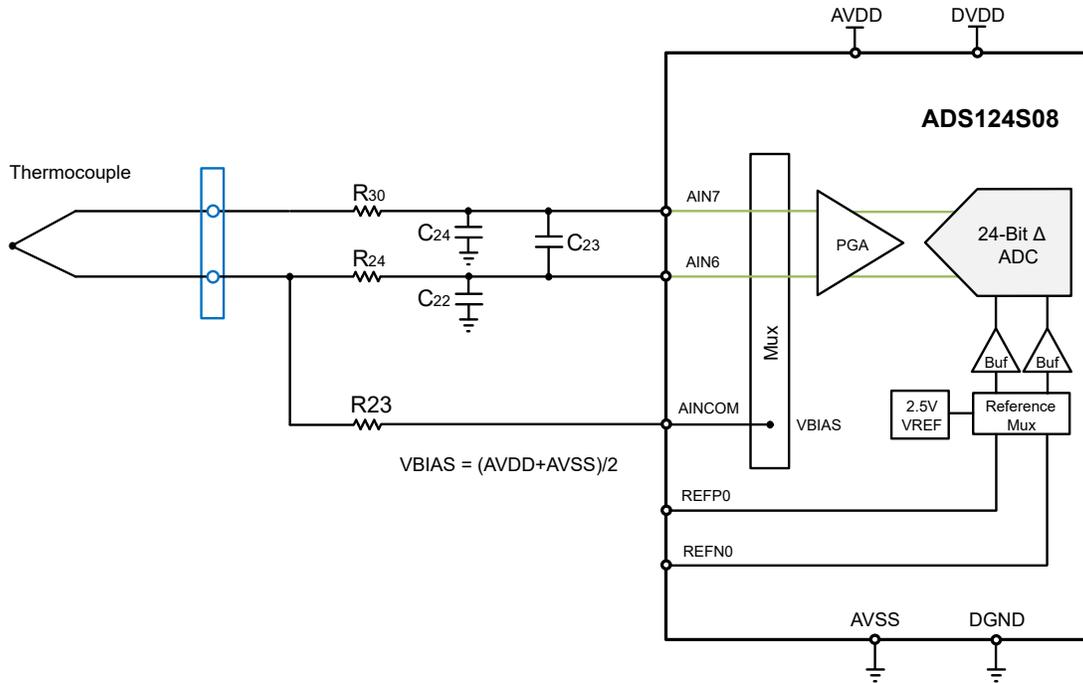


图 1-8. EMC 测试板上的 VBIAS 偏置、TC 测量电路

图 1-9 示出了一个使用 ADS124S08 内部电压基准 (REFOUT) 的热电偶偏置电路。该电路将热电偶信号的共模电压设置为 2.5V，这是 AVDD 为 +5V 时的中点电压。将电阻器 (R35) 上拉至 AVDD，无需单独测量即可实现烧毁检测。

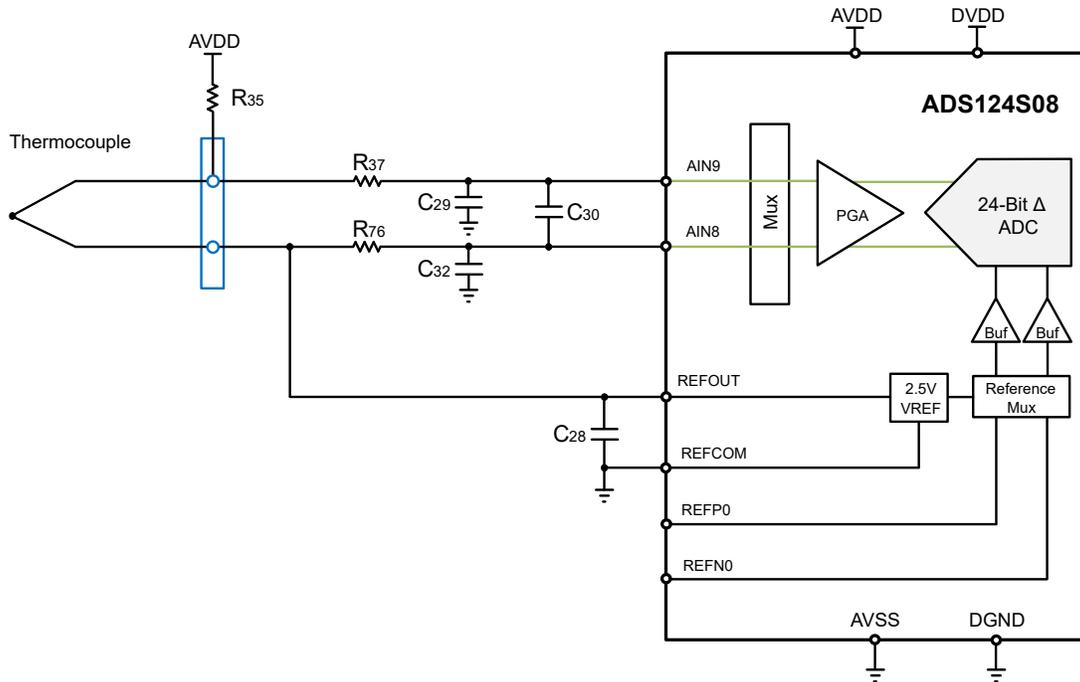


图 1-9. EMC 测试板上的 REFOUT 偏置、TC 测量电路

有关 TC 测量的更多信息，请参阅应用手册：[热电偶测量基本指南](#)。

### 1.3.1.2 热电偶特性及 ADC 设置

有多种热电偶类型适合不同的应用。根据金属的物理特性，每种类型的热电偶在温度范围、灵敏度、电压范围和应用能力方面都有不同的特性。表 1-2 列出了几种常见的热电偶类型及其特性。

表 1-2. 常见热电偶的温度及电压范围

热电偶类型	可测量的温度范围 (°C)	温度范围内的电压 (mV)
J	-210 至 1200	-8.095 至 69.553
K	-270 至 1370	-6.458 至 54.886
T	-200 至 400	-6.258 至 20.872
E	-270 至 1000	-9.385 至 76.373
S	-50 至 1768	-0.236 至 18.693

K 型热电偶是工业应用中最为常用的热电偶。因此，本文档使用 K 型热电偶的典型电压范围作为测试输入信号。

ADS124S08 采用以下设置进行编程，以测量图 1-8 和图 1-9 中所示的电路：

- 4kSPS 数据速率
- Sinc3 数字滤波器
- 内部 2.5V 电压基准 ( $V_{REF}$ )
- 增益 = 32，以最大限度地扩大 K 型热电偶的 ADS124S08 动态范围
- AIN7/AIN6 模拟输入，启用 AINCOM 引脚上的 VBIAS，以便通过 VBIAS 偏置进行 TC 测量
- AIN9/AIN8 模拟输入，将 REFOUT 连接到 AIN8 以使用 REFOUT 偏置进行 TC 测量

使用公式 29 可根据 ADS124S08 转换代码 (CODE) 计算热电电压 ( $V_{TC}$ )：

$$V_{TC} = \frac{CODE \times V_{REF}}{Gain \times 2^{N-1}} \quad (29)$$

### 1.3.2 温度误差 - TC 测量

本节介绍了如何计算 ADS124S08 输出数据温度误差并且提供了 TC EMC 测试板性能结果。

- 根据 TC 热电电压计算温度
- 根据 TC 测量值计算温度误差
- 实验设置和结果

#### 1.3.2.1 根据 TC 热电电压计算温度

1990 年国际温度尺度 (ITS-90) 标准定义了几个将热电偶测量的电压输出与温度相关联的多项式方程。使用这些方程可以根据温度计算热电电压或根据热电电压计算温度。

TC EMC 测试板支持冷端补偿 (CJC)，这是准确地确定绝对热电偶结温所必需的。但是，本应用手册中的测试结果不包括补偿。如果需要 CJC，请参阅应用手册以了解有关热电偶测量的详细信息：[热电偶测量基本指南](#)。

公式 30 显示了用于基于热电偶电压计算温度的一般多项式函数。

$$T_{TC}(^{\circ}\text{C}) = d_0 + d_1 \times E + d_2 \times E^2 + d_3 \times E^3 + d_4 \times E^4 + d_5 \times E^5 + d_6 \times E^6 + d_7 \times E^7 + d_8 \times E^8 + d_9 \times E^9 \quad (30)$$

其中：

- E 是 ADS124S08 测得的电压，以微伏为单位
- $T_{TC}$  是温度，单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

表 1-3 以 K-型热电偶的系数为例。请注意，多项式系数因测量的温度范围而异。

表 1-3. K 型热电偶的 ITS-90 温度系数

温度范围	-200°C 至 0°C	0°C 至 500°C	500°C 至 1372°C
电压范围	-5.891mV 至 0mV	0mV 至 20.644mV	20.644mV 至 54.886mV
$d_0$	0	0	$-1.31805810^{-2}$
$d_1$	$2.517346210^{-1}$	$2.50835510^{-1}$	$4.83022210^{-1}$
$d_2$	-1.1662878	$7.86010610^{-2}$	-1.646031
$d_3$	-1.0833638	$-2.50313110^{-1}$	$5.46473110^{-2}$
$d_4$	$-8.97735410^{-1}$	$8.31527010^{-2}$	$-9.65071510^{-4}$
$d_5$	$-3.734237710^{-1}$	$-1.22803410^{-2}$	$8.80219310^{-6}$
$d_6$	$-8.663264310^{-2}$	$9.80403610^{-4}$	$-3.11081010^{-8}$
$d_7$	$-1.045059810^{-2}$	$-4.41303010^{-5}$	0
$d_8$	$-5.192057710^{-4}$	$1.05773410^{-6}$	0
$d_9$	0	$-1.05275510^{-8}$	0
误差范围	0.04°C 至 -0.02°C	0.04°C 至 -0.05°C	0.06°C 至 -0.05°C

使用查找表是根据热电电压来确定温度的另一种有效方法。

### 1.3.2.2 根据 TC 测量值计算温度误差

本节介绍了根据 ADS124S08 输出数据来计算 TC 温度误差的步骤。

1. 使用公式 29 根据转换代码计算热电电压 ( $V_{TC}$ )。
2. 使用公式 30 和表 1-3 为 K-型热电偶将  $V_{TC}$  转换为 TC 温度 ( $T_{TC}$ )。
3. 使用 Keysight Technologies 3458A 数字万用表 (或类似万用表) 测量 ADS124S08 输入端上的测试信号 ( $V_{MEAS}$ )。
4. 使用公式 30 和表 1-3 将  $V_{MEAS}$  转换为温度  $T_{MEAS}$ 。  $T_{MEAS}$  是对应于  $V_{MEAS}$  的温度。
5. 使用公式 31 计算温度误差：

$$T_{ERROR}(^{\circ}C) = T_{MEAS} - T_{TC} \quad (31)$$

### 1.3.2.3 实验设置和结果

TC 性能测试使用精密信号发生器 (DP8200) 来模拟温度变化, 而不是实际的 K 型 TC, 以保持高精度测量并简化测试。使用 Keysight Technologies 3458A 数字万用表 (或类似万用表) 校准输入信号, 以消除信号发生器中的误差。图 1-10 示出了 TC EMC 测试板电路, 该电路可与 VBIAS 或 REFOUT 热电偶偏置电路配合使用。

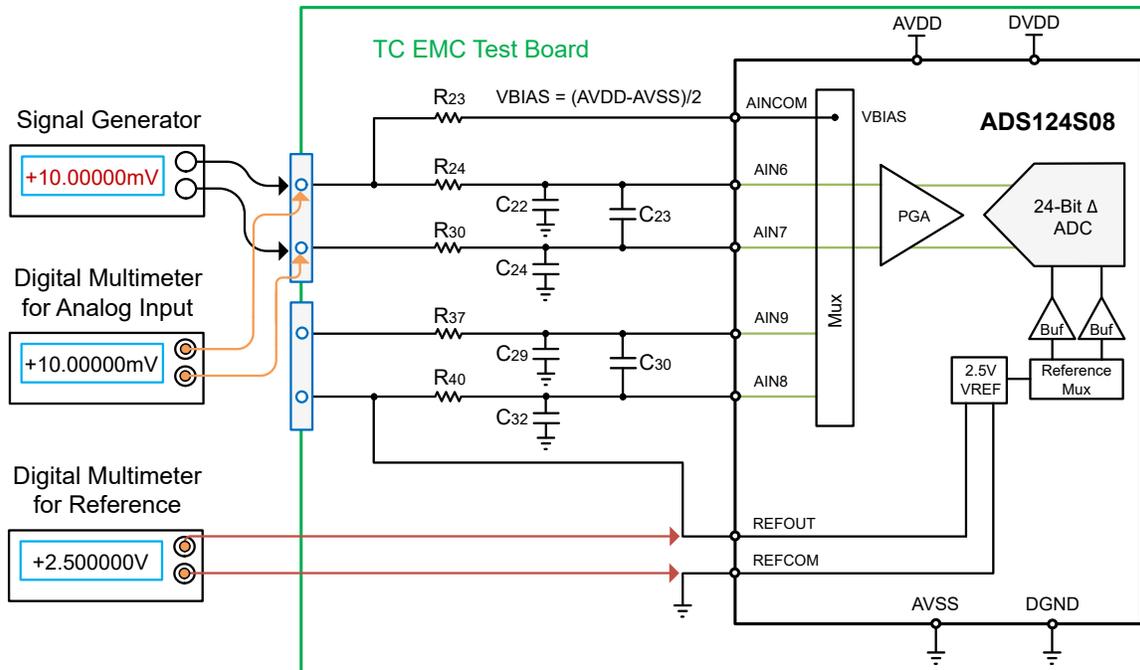


图 1-10. EMC 测试板上的 VBIAS 及 REFOUT 偏置 TC 测量电路

图 1-11 以蓝色显示测得的未校准温度误差, 以红色显示使用 VBIAS 热电偶偏置测量的校准温度误差。此图使用从室温下运行的 2 层 TC EMC 测试板收集的数据。图 x-轴示出了使用精密信号发生器从施加到 ADS124S08 的测量电压转换而来的 TC 温度。

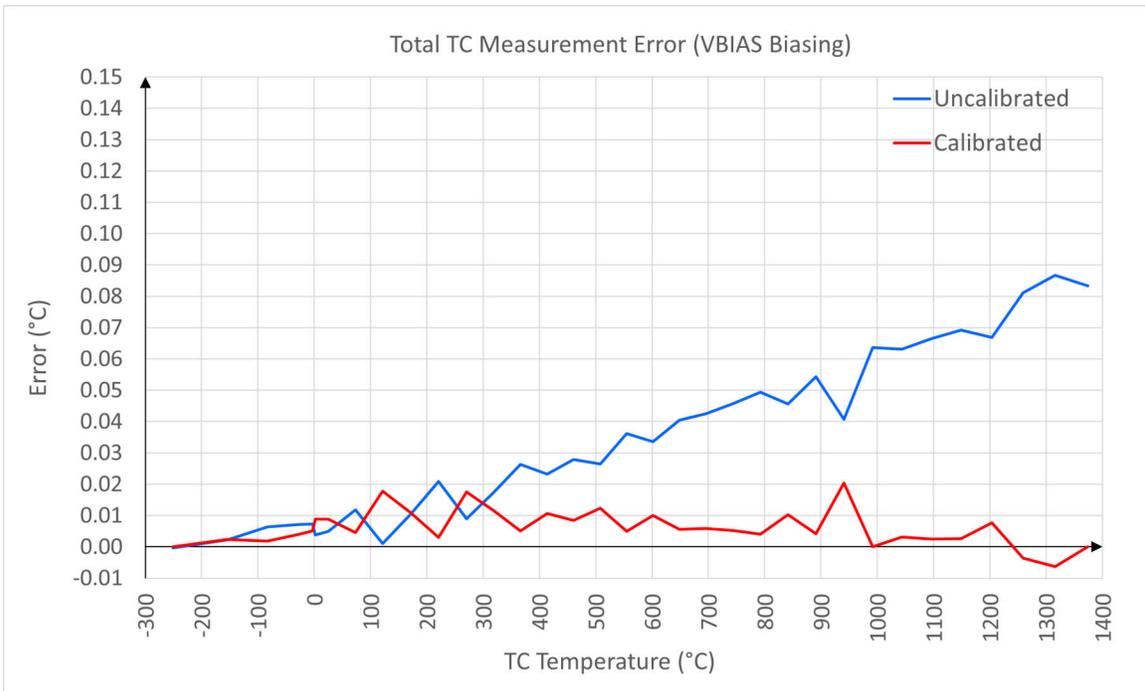


图 1-11. 未校准与已校准总 TC 测量误差间的关系 (采用 VBIAS 偏置时)

图 1-12 以蓝色显示测得的未校准温度误差，以红色显示使用 REFOUT 热电偶偏置测量的校准温度误差。此图使用从室温下运行的 2 层 TC EMC 测试板收集的数据。图 x-轴示出了使用精密信号发生器从施加到 ADS124S08 的测量电压转换而来的 TC 温度。

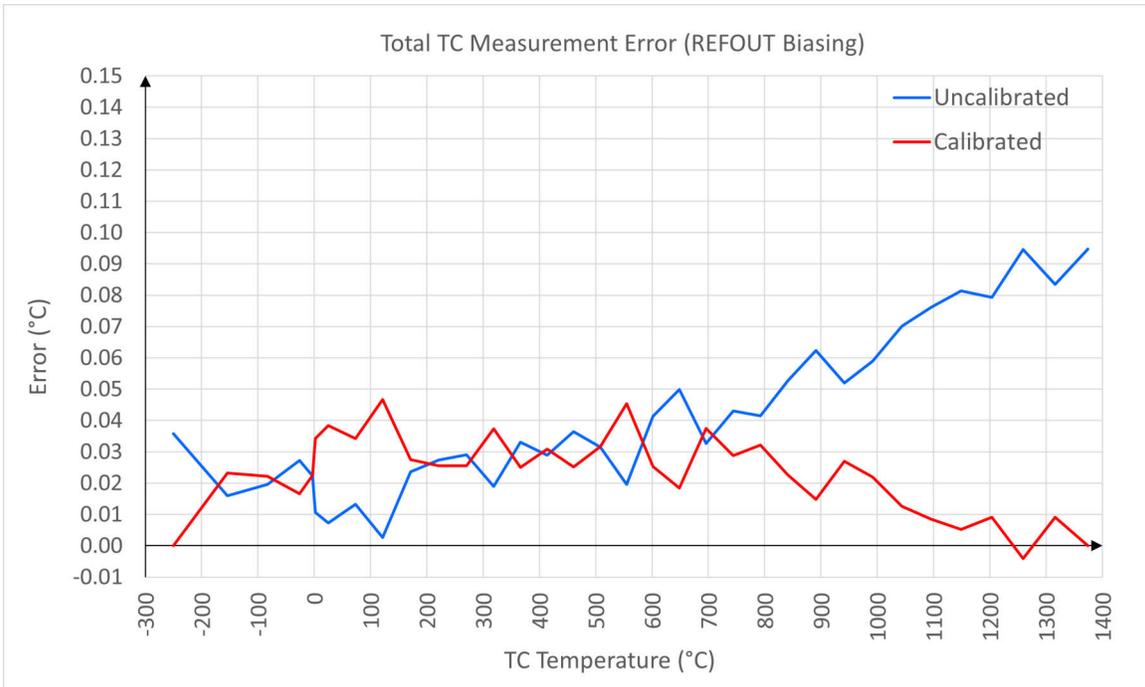


图 1-12. 未校准与已校准总 TC 测量误差间的关系 (采用 REFOUT 偏置时)

## 1.4 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 ADS124S08，提高系统 EMC 性能并保持测量精度。

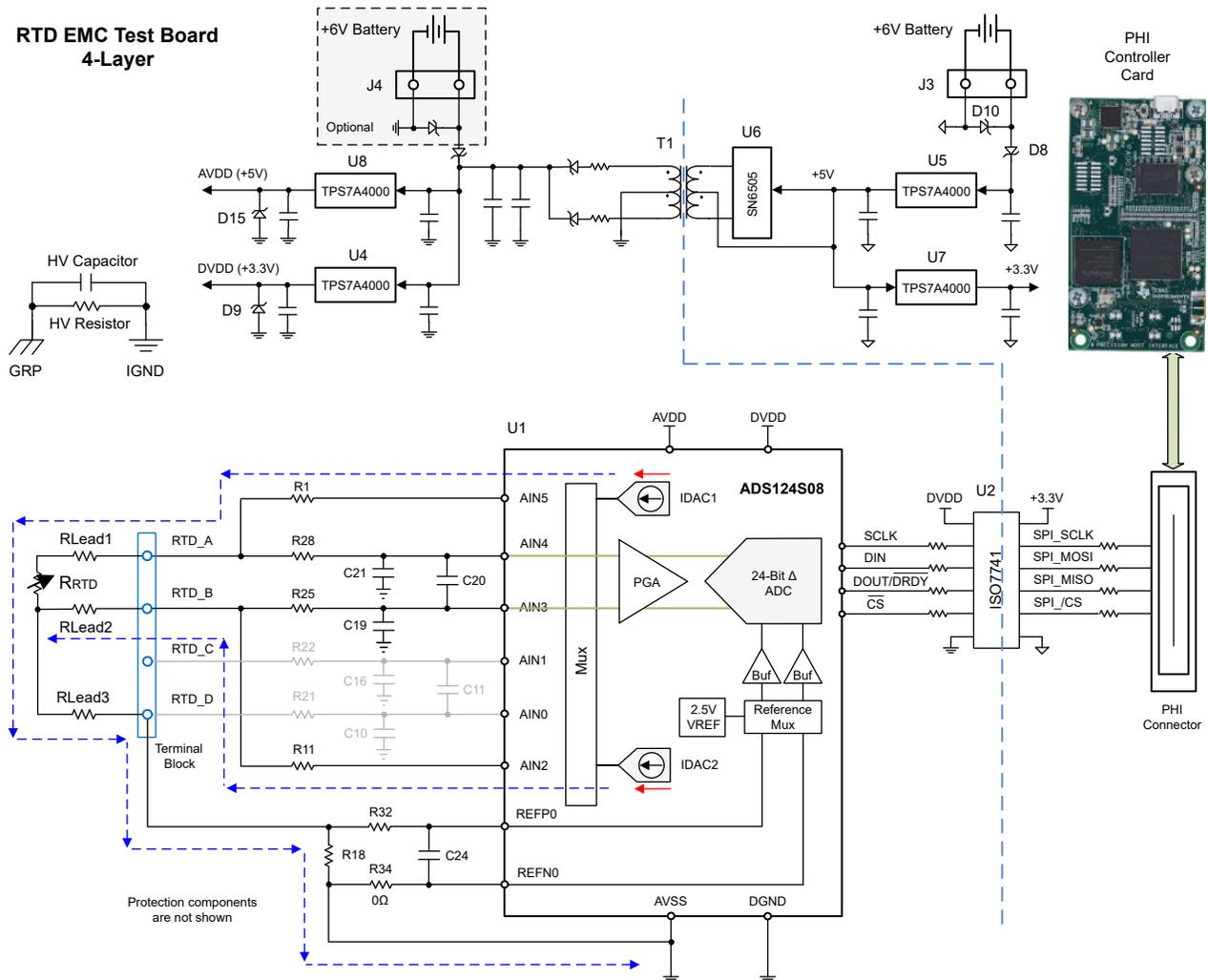


图 1-13. EMC 测试电路板 (3 线 RTD, 低侧基准) 及 PHI 连接

图 1-13 以带有低侧参考测量电路的 3 线 RTD 为例，示出了完整的 EMC 测试板方框图。TC EMC 测试板使用与 RTD 测试板类似的设计来实现抗混叠滤波器、保护电路、隔离式电源、隔离式数字隔离器及 PCB 布局。只有输入配置不同。为简单起见，本节的其余部分使用 4 层 RTD EMC 测试板作为电路和布局设计以及所有测试板运行的示例。

EMC 测试板的注意事项包括：

- 模拟输入保护
- 抗混叠滤波器
- 每个输入连接器引脚上的高压电容器
- 用于放电路径的高压电容器及电阻器
- 数字信号串联电阻器
- 数字隔离
- 电源和保护

### 1.4.1 模拟输入保护

每个模拟输入都包括一个外部保护电路，用于保护 ADS124S08 免受电过应力 (EOS) 的影响。此外，每个模拟输入都包含正确选择的双向瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管，以帮助将瞬态能量分流到远离信号路径的位置。

一般选择指导准则如下：

- TVS 二极管：低漏电流、低温漂漏电流、适当的关断电压
- 限流电阻：额定功率、温漂、容差、ADC IDAC 顺从电压

有关保护技术和元件选型的详细信息，请参阅应用手册：在 RTD 测量中保护 ADC ADS124S08 免受 EOS 影响的电路。

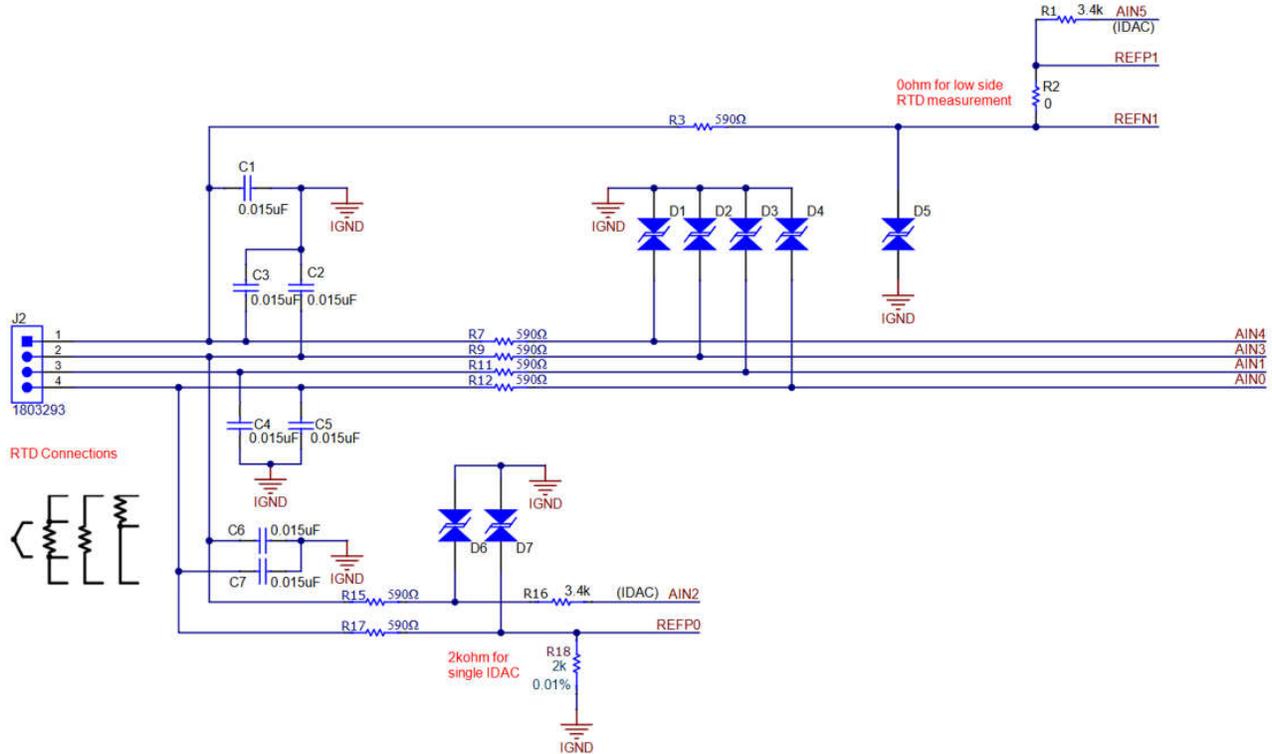


图 1-14. 模拟输入保护

### 1.4.2 抗混叠滤波器

抗混叠滤波器的设计是为了防止频率内容在  $\Delta-\Sigma$  ADC 调制器频率或其附近混叠回通带，因为这些频率不会被数字滤波器本身拒绝。因此，首先选择一个比调制器频率低 10 到 100 倍的差分滤波器 3dB 截止频率。这将分别导致调制器频率附近出现 20dB 至 40dB 的频率抑制。抑制量取决于设计目标。

由于 ADC 输入漏电流，较大的滤波电阻可能会在 ADC 输入端引入显著的失调电压误差。通常可以选择抗混叠滤波器中不大于 10kΩ 的电阻值来帮助更最大限度地减小这些失调电压误差，但在大多数情况下， $R_{\text{FILTER}} < 5\text{k}\Omega$  通常就足够了。选择比差分电容器小 10 到 20 倍的共模电容器，这样这两个电容器之间的任何不匹配都不会导致共模噪声成为差分噪声。

ADS124S08 EMC 测试板使用两个 4.99kΩ 电阻、两个 4.7nF 共模电容器和一个 47nF 差分电容器来作为 ADC 模拟输入端的抗混叠滤波器。

抗混叠滤波器的差分截止频率由公式 32 给出：

$$f_{\text{DIFF}} = \frac{1}{2\pi \times (2 \times R_{\text{FILTER}}) \times C_{\text{DIFF}}} = \frac{1}{2\pi \times (2 \times 4.99 \times 10^3) \times 47 \times 10^{-9}} = 339.5\text{Hz} \quad (32)$$

抗混叠滤波器的共模截止频率由公式 33 给出：

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi \times R_{FILTER} \times C_{CM}} = \frac{1}{2\pi \times 4.99 \times 10^3 \times 4.7 \times 10^{-9}} = 6.79 \text{kHz} \quad (33)$$

图 1-15 示出了 EMC 测试板上的典型抗混叠滤波器电路：

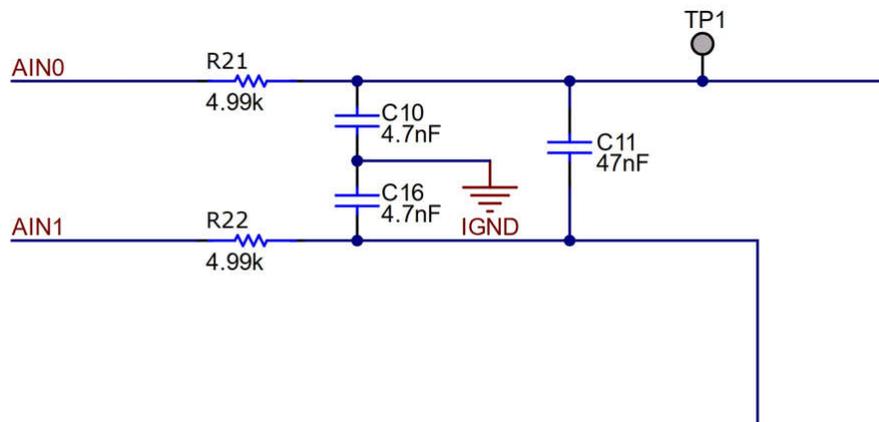


图 1-15. 抗混叠滤波器中的 RC 元件

### 1.4.3 每个输入连接器引脚上的高压电容器

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 板的每个输入信号都需要一个滤波器元件，例如陶瓷电容器。在输入连接器和本地接地平面之间使用宽布线来连接电容器。将此电容器尽可能靠近连接引脚放置。

使用 C0G /NPO 型电容器以更大限度地减少输入信号失真，因为 C0G /NPO 电容器的电容随温度的变化极小，电容漂移随电压和频率的变化可忽略不计，并且无老化特性。

使用高额定电压的电容器，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。

电容器的电容由输入信号的频率决定。此设计测量缓慢移动的温度信号，以便可以使用容值更大的电容器。因此，该设计在尽可能靠近输入端子块的每个 ADC 通道上使用 250V 高压 C0G 型 0.015 $\mu$ F 陶瓷电容器，以便通过最短路径将瞬态能量释放到接地端。

图 1-16 示出了 EMC 测试板上的高压电容电路：

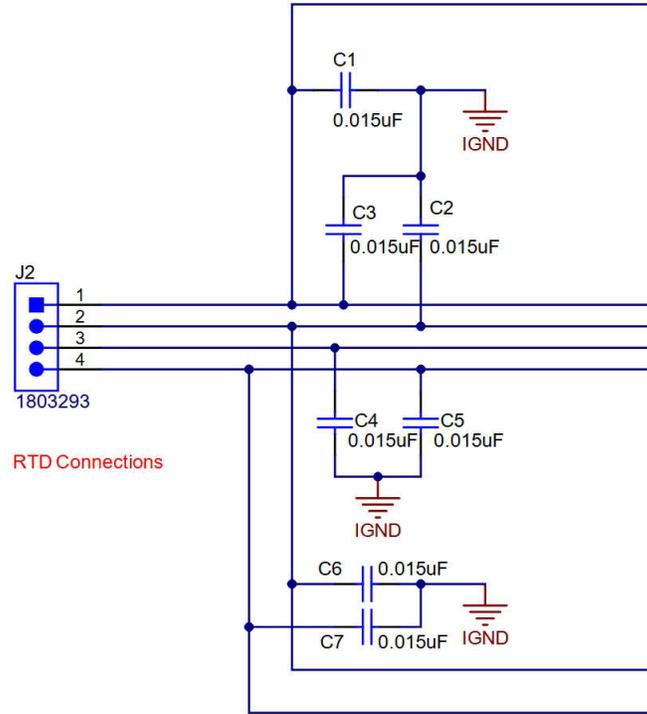


图 1-16. 输入连接器上的高压电容器

#### 1.4.4 用于放电路径的高压电容器及电阻器

在受保护本地接地和接地参考平面 (GRP) 之间并联了一个 3kV、2.2nF 电容器及一个 2.2kV、3.3MΩ 电阻器。这些元件提供了一种将瞬态能量放电至 GRP (E\_GND) 并且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 R62 || C52 及 R71 || C54)。EMC 测试板的非隔离侧使用相同的并联元件 R64 || C53 及 R72 || C55。

图 1-17 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：

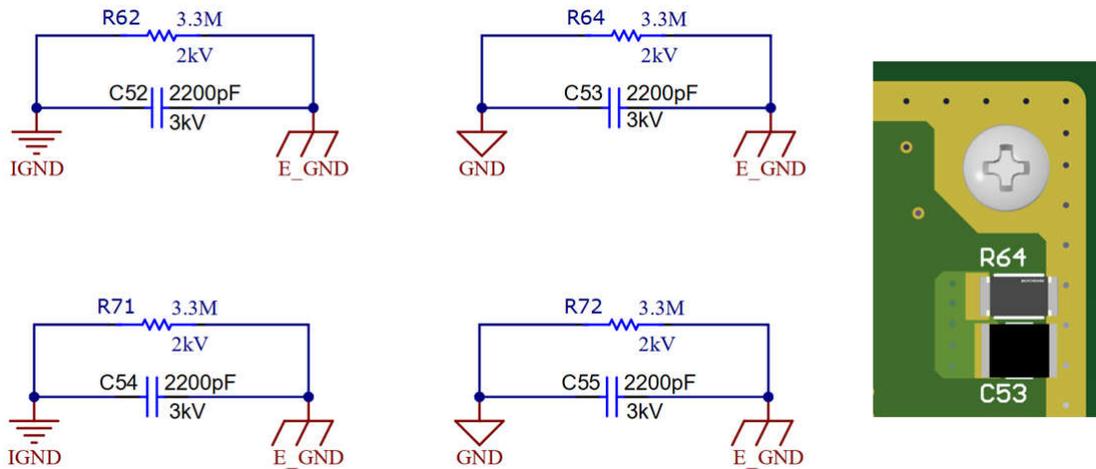


图 1-17. 添加高压电容器及电阻器

### 1.4.5 数字信号串联电阻器

在高速数字信号上的快速转换可能会导致在长传输线路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数字线路的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。

- 减少高频谐波：

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。

选择串联电阻值以匹配传输线路的特性阻抗，从而实现出色的阻抗匹配和最小反射。此设计中选择了 ADS124S08，数字隔离器和 PHI 控制器板之间数字线路上的 49.9 Ω 电阻器，如图 1-18 所示。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。

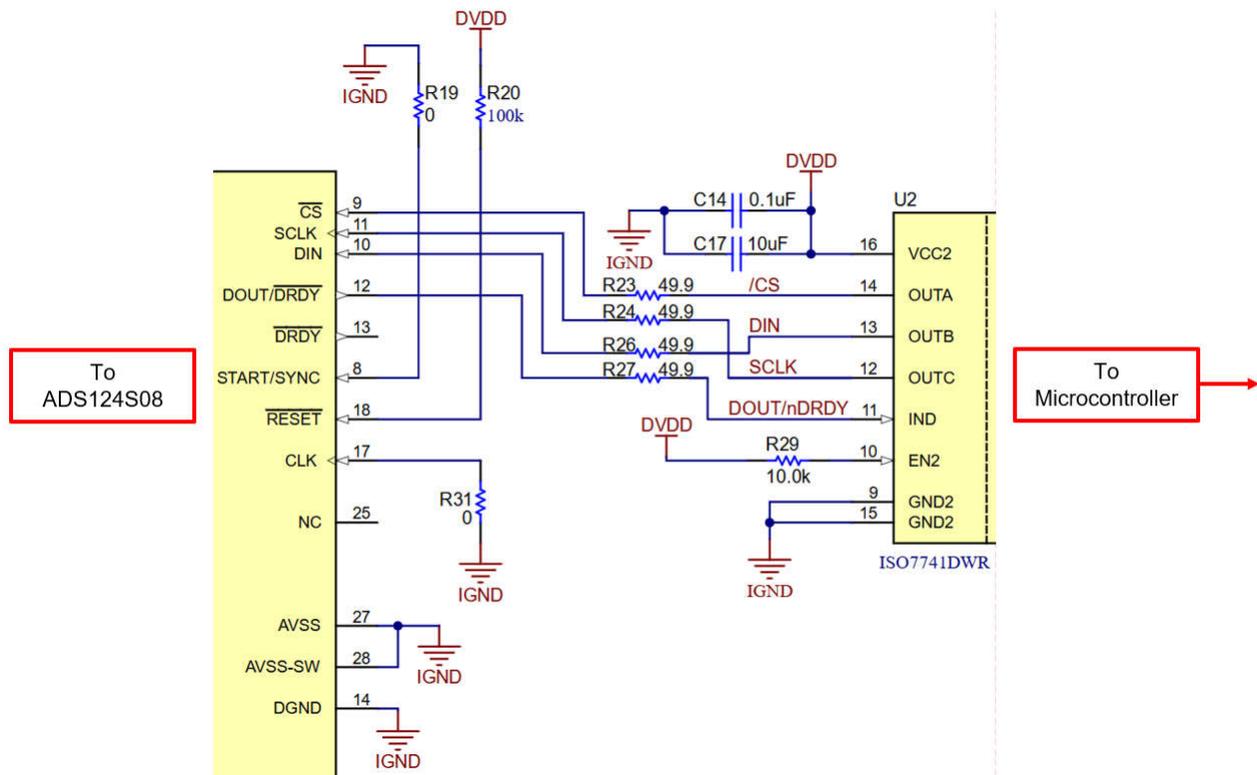


图 1-18. 插入数字信号串联电阻器

### 1.4.6 数字隔离

此 EMC 测试板设计采用 ISO7741 数字隔离器来隔离数据通信。ISO7741 隔离器具有高抗扰度，符合 UL 1577 的 5kVrms ( DW 封装 ) 隔离额定值，8kVpk 最大瞬态隔离电压和 6kVpk 最大浪涌隔离电压。该隔离器最高支持 100MSPS 的信号速率，具有低传播延迟 (10.7ns) 和宽电源电压范围 ( 2.35V 至 5.5V ) 。

图 1-19 示出了 EMC 测试板上的数字隔离电路：

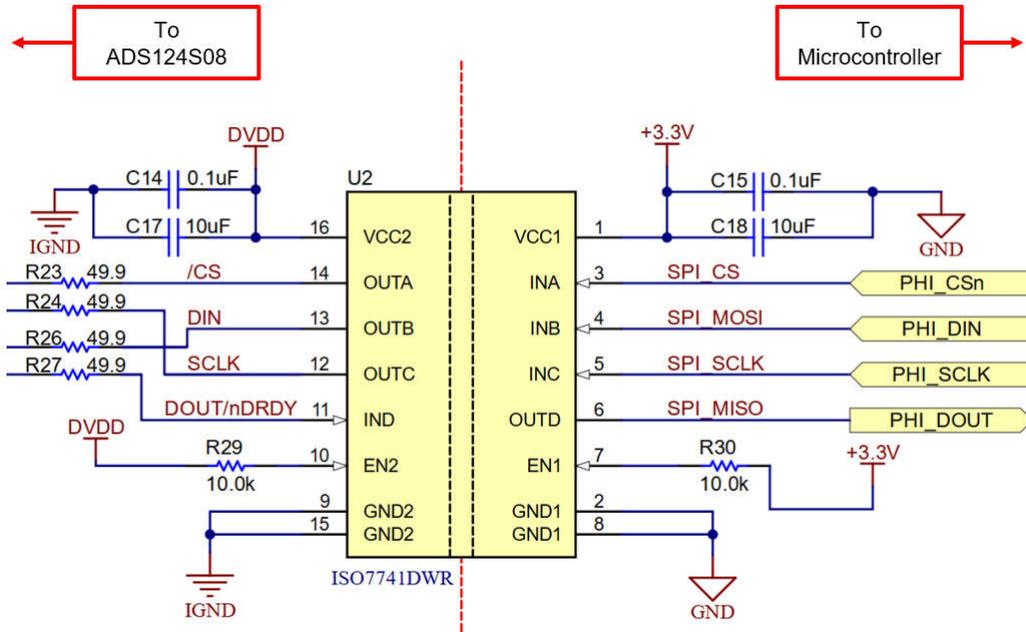


图 1-19. 数字隔离

### 1.4.7 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。EMC 测试板有一个替代解决方案，由两个直流电源通过 J3 和 J4 供电，在 EMC 测试板的隔离侧和非隔离侧分别提供必要的电源。默认情况下，J3 上只需要一个 +5V 至 +12V 之间的电源即可为整个电路板供电。

非隔离侧：

TPS7A4700 (U5) 是一款低压降稳压器 (LDO)，可将外部电源 (6V 至 12V) 转换为稳定的 +5V。该 +5V 输出为测试板上非隔离侧的元件供电，其中包括低噪声、低 EMI 推挽式变压器驱动器 SN6505 (U6)。第二个 TPS7A4700 (U7) 用于为测试板上的 ISO7741 数字隔离器 (U2)，将 +5V 调解至 +3.3V。

隔离侧：

TPS7A4700 (U4) 会调节变压器 (T1) 的输出，并为 ADS124S08 (U1) DVDD 电源和数字隔离器 (U2) 生成 +3.3V 的电压。第二个 TPS7A4700 (U8) 为电路板隔离侧的 ADS124S08 (U1) AVDD 电源生成 +5V 电压。+3.3V 电源采用 3.3V TVS 二极管 (D9) 保护，+5V 电源采用 TVS 二极管 (D15) 保护。

## 1.5 针对 EMC 合规性的 PCB 布局注意事项

为 RTD 及热电偶应用设计 PCB 板时需要特别注意通过 EMC 测试。这些传感器产生低振幅、高阻抗信号，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 布线中出现 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

### 1.5.1 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。使用 4 层 PCB 堆叠实现精确的 RTD 和 TC 温度测量。将高速信号和关键信号（例如 SPI 总线的 SCLK）放置在靠近接地层的层上，而非关键信号可以放置在电源平面附近。图 1-20 示出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）：电源平面与隔离的模拟和数字部分
- 底层：如果需要，额外的信号布线或屏蔽。

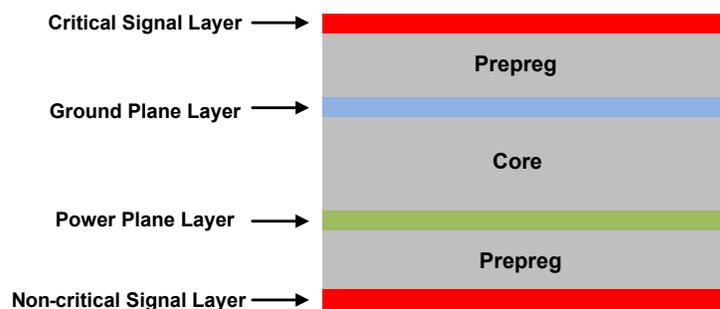


图 1-20. 4 层 PCB 堆叠

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。

2 层 PCB 本身提供的屏蔽选项更少，从而将一整层专门用作实心接地平面。通过拼接过孔，在 PCB 的顶层和底层上放置尽可能大的覆铜接地覆铜。接地覆铜将确保每个信号在附近都有接地回路，这将有助于设计通过 EMC 测试。所有信号布线都应布置在该接地平面正上方的顶层，以确保返回电流沿着信号布线下方的短而直接的路径流动。这种配置为低成本电路板提供了最佳折衷方案，同时仍提供可接受的 EMC 性能。

### 1.5.2 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。这对于 RTD 和热电偶等模拟传感器信号尤其重要，因为这些信号对噪声非常敏感。

### 1.5.3 避免 PCB 布线中出现 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 布线发生 90 度急剧弯曲，因为它们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。遵守此类指导是在模拟信号路由中保持信号完整性的一种良好做法，而这在高速数字电路中更为重要。

图 1-21 示出了在 EMC 测试板上避免 90 度弯曲的示例。

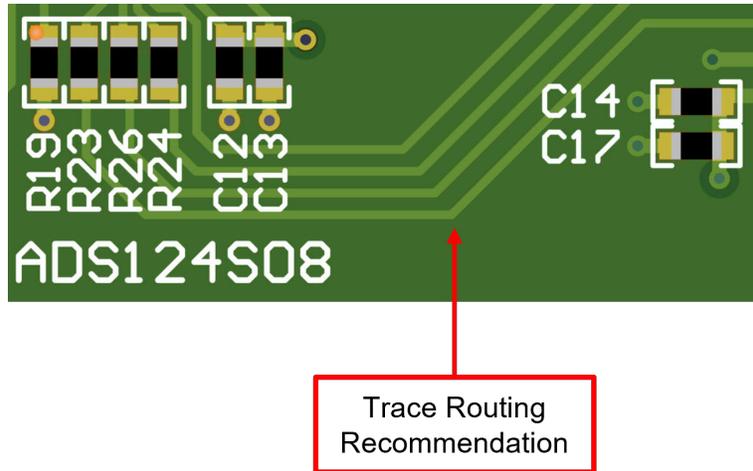


图 1-21. 避免 PCB 布线中出现 90 度弯曲

### 1.5.4 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。添加防护环是将高度敏感的模拟信号或 ADC 与附近的噪声源或干扰信号屏蔽的有效技术。图 1-22 示出了 4 层电路板上防护环的侧视图。

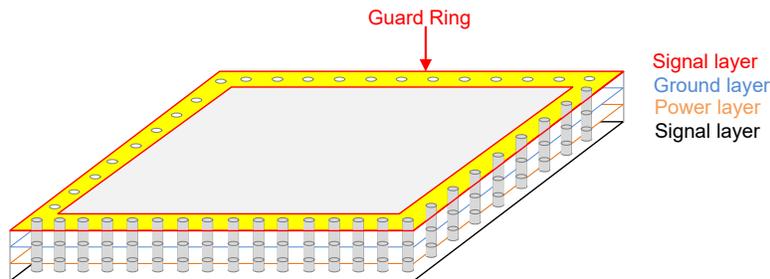


图 1-22. 4 层电路板上的防护环侧视图

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。
  - 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。通过遵循波长限制作为经验法则，确定过孔之间的适当孔间距，以确保高屏蔽有效性：  
波长  $(L) > (S/4)$   
其中 **S** 是防护环迹线上过孔之间的间距。通过有效屏蔽超过上述限值的所有信号波长，可实现高效率。
  - 防护环的布线宽度：  
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。
  - 防护环的间隙：  
**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。
- 4 层 ADS124S08 EMC 测试板的第二层设计为内部接地层 (GND 和 IGND)，以获得良好的去耦和接地回路。ADS124S08 EMC 测试板保护环设计在所有层上，这些层上的边缘保护每隔 100mil 通过通孔连接在一起，以衰减高达 472GHz 的高频信号发射。2 层 ADS124S08 EMC 测试板具有与 4 层 EMC 测试板一样的防护环设计。图 1-23 示出了在 EMC 测试板上设计的防护环：

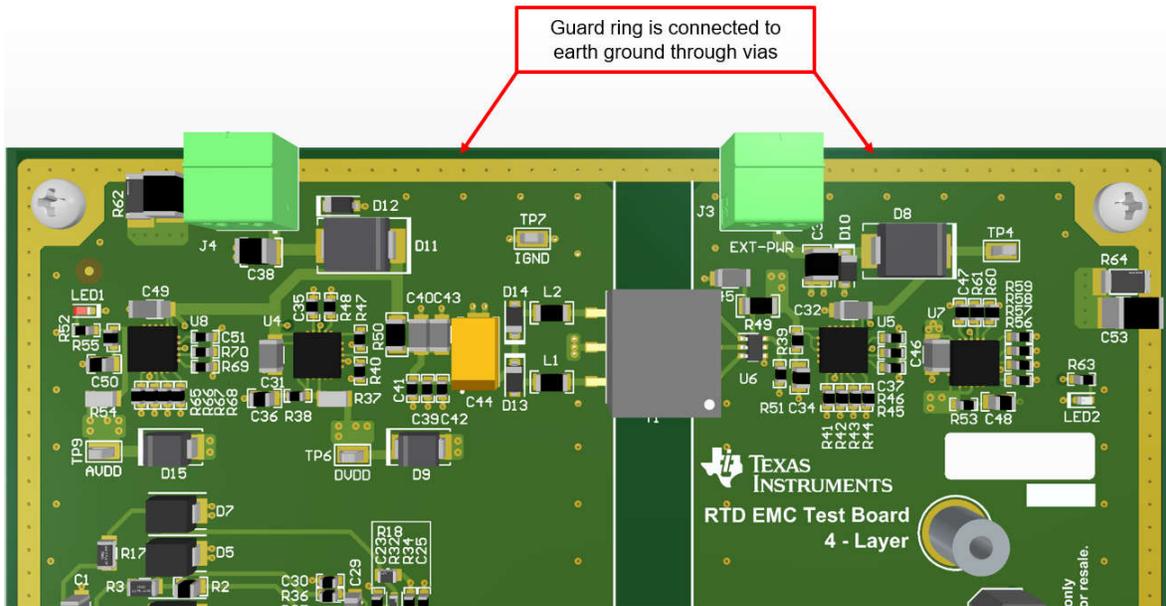


图 1-23. EMC 测试板上的防护环

### 1.5.5 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。建议使用电源平面而不是单独的迹线，以减少电感并提供更好的接地平面去耦。RTD 或热电偶传感器等敏感模拟信号可从纯净的本地稳压模拟电源和精细的去耦中受益匪浅。图 1-24 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）。

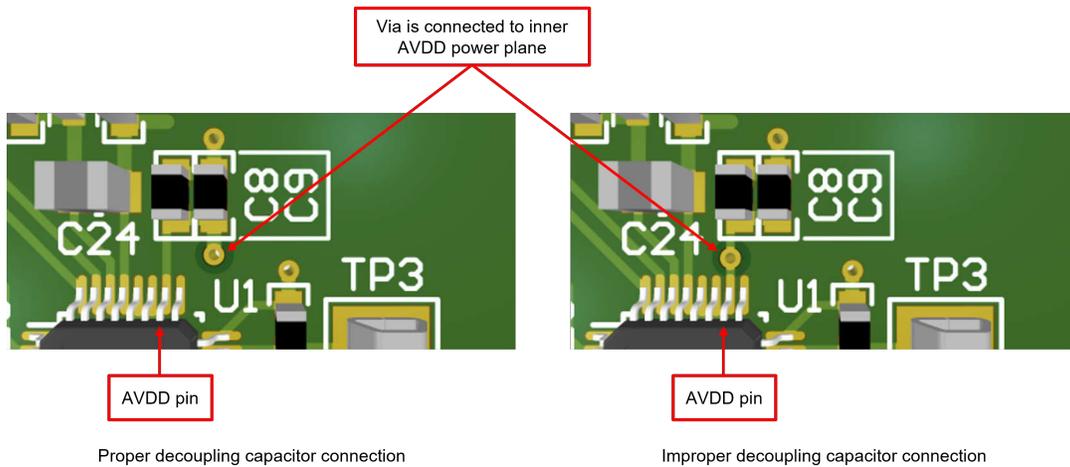


图 1-24. 去耦电容器连接

### 1.5.6 差分信号布线

RTD 或热电偶信号为差分信号。EMC 测试板严格对称地对每个差分对进行布线，以使任何外部干扰或噪声平等地耦合到两条布线中。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 1-25 示出了 EMC 测试板上的差分布线示例：

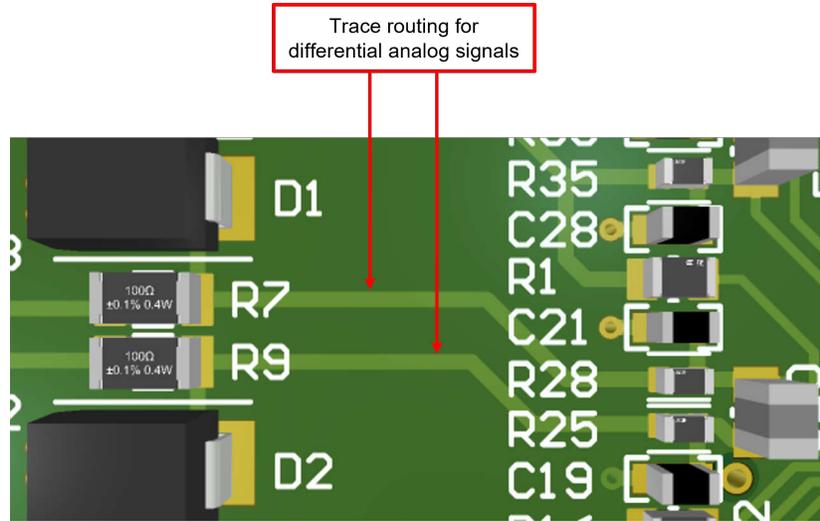


图 1-25. 差分信号布线

### 1.5.7 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。EMC 测试板采用拼接过孔，用于多种不同用途，包括：

#### 增强高速信号完整性及可靠性：

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 1-26 示出了 4 层电路板上拼接过孔的侧视图。

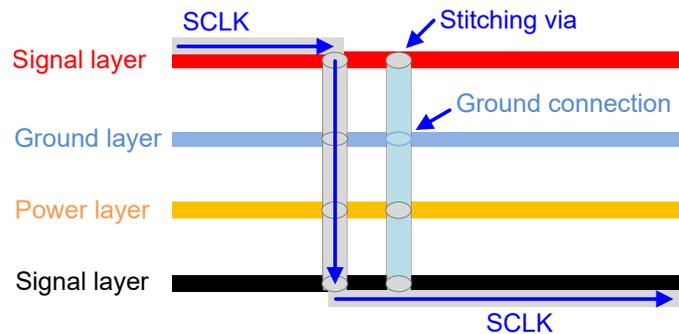


图 1-26. 高速信号的拼接过孔的侧视图

EMC 测试板在 ADC 及数字隔离器之间的顶层布置 SCLK 迹线。然后，SCLK 布线从数字隔离器和连接器 J1 延续到顶层的控制器板。因此，该设计不需要 SCLK 信号的拼接过孔。图 1-27 示出了 RTD EMC 测试板上 DIN 和 DOUT 信号的拼接过孔示例。

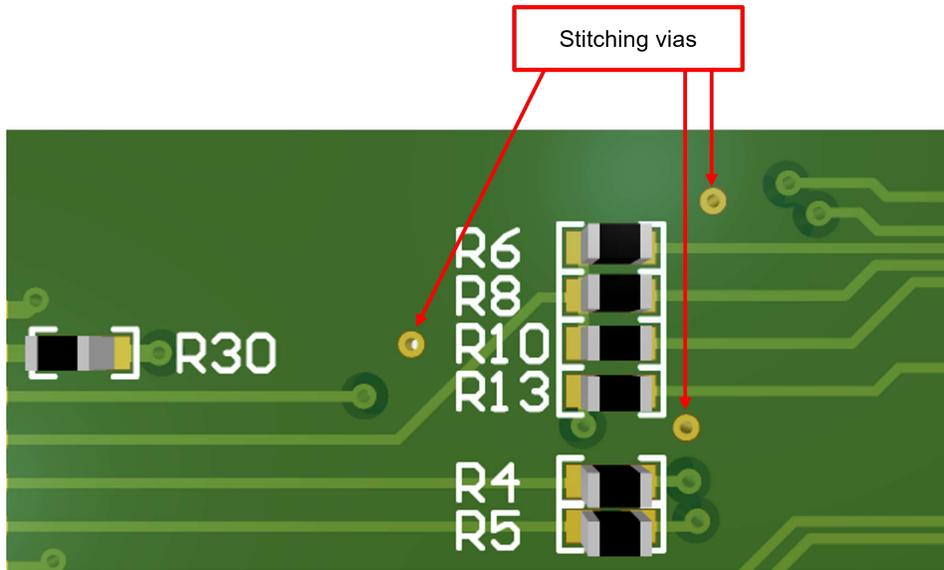


图 1-27. 信号拼接过孔

#### 层转换和接地覆铜连接：

通过为信号提供一致的参考平面和低阻抗返回路径，使用在层之间转换的拼接过孔来提高信号完整性。拼接过孔还用于在多层上连接接地覆铜，并确保沿 PCB 参考平面传播的任何返回电流具有最小的阻抗。图 1-28 示出了 2 层 RTD EMC 测试板上的层转换和接地连接设计示例。

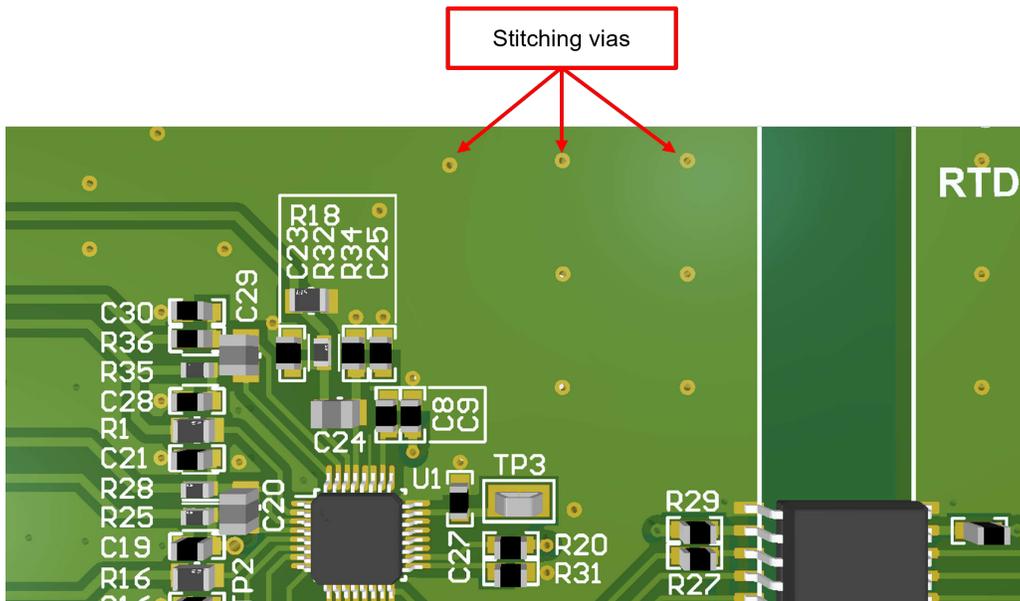


图 1-28. 用于层转换和接地连接的拼接过孔

#### 1.5.8 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



## 1.6 测试系统

图 1-30 示出了 TC 采用 ADS124S08 的 RTD/EMC 测试板的一般设置。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 ADS124S08 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：

- ADS124S08 的 RTD/EMC TC 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
- 带有精密电阻器的双绞线 (用于 RTD) 或用于 TC 测量的精密信号
- 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
- ZEUS® 6V 电池

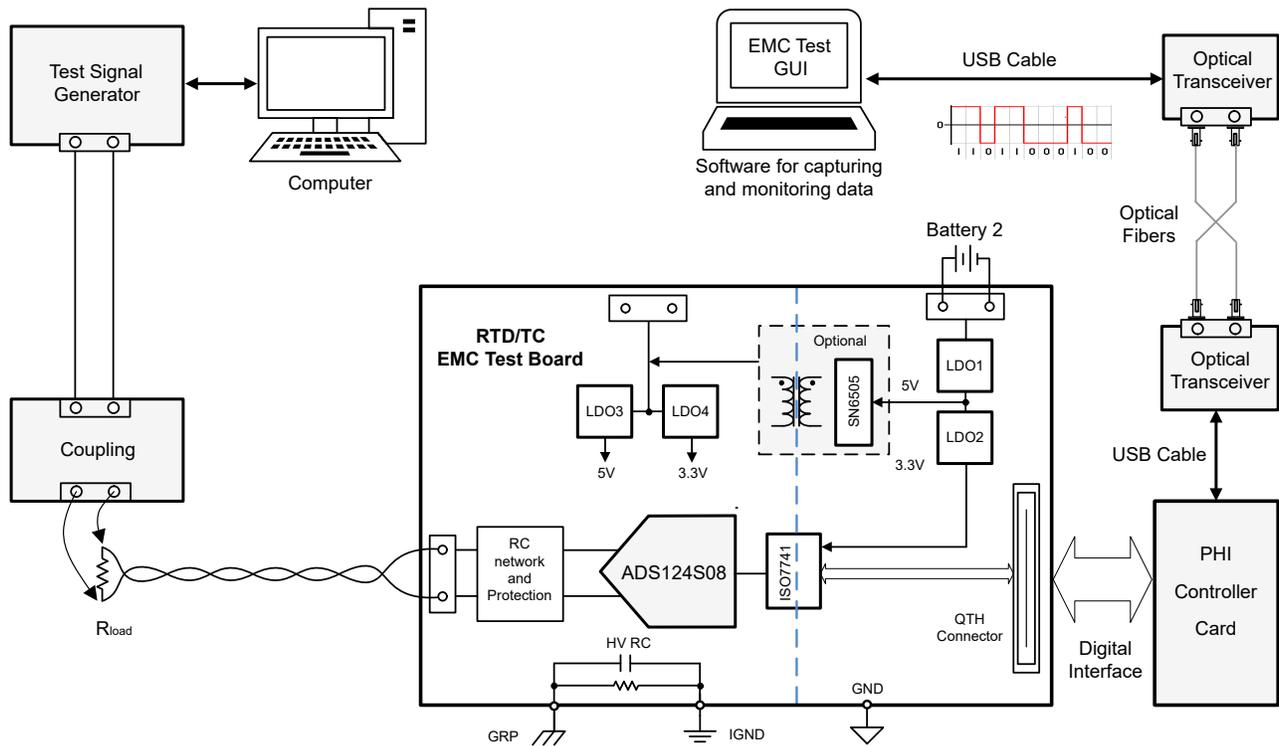


图 1-30. EMC 测试通用设置

### 测试软件：

采用专用测试图形用户界面 (GUI) 软件进行 EMC 测试。在每次测试开始之前，GUI 都会将预先写入的寄存器配置文件加载到 EMC 测试板上的 ADS124S08。GUI 持续监控来自 EMC 测试板的数据流，以确保数据采集开始后，在测试过程中不会丢失任何信息。

图 1-31 示出了 EMC 测试环境中测试 GUI 的范围和功能。

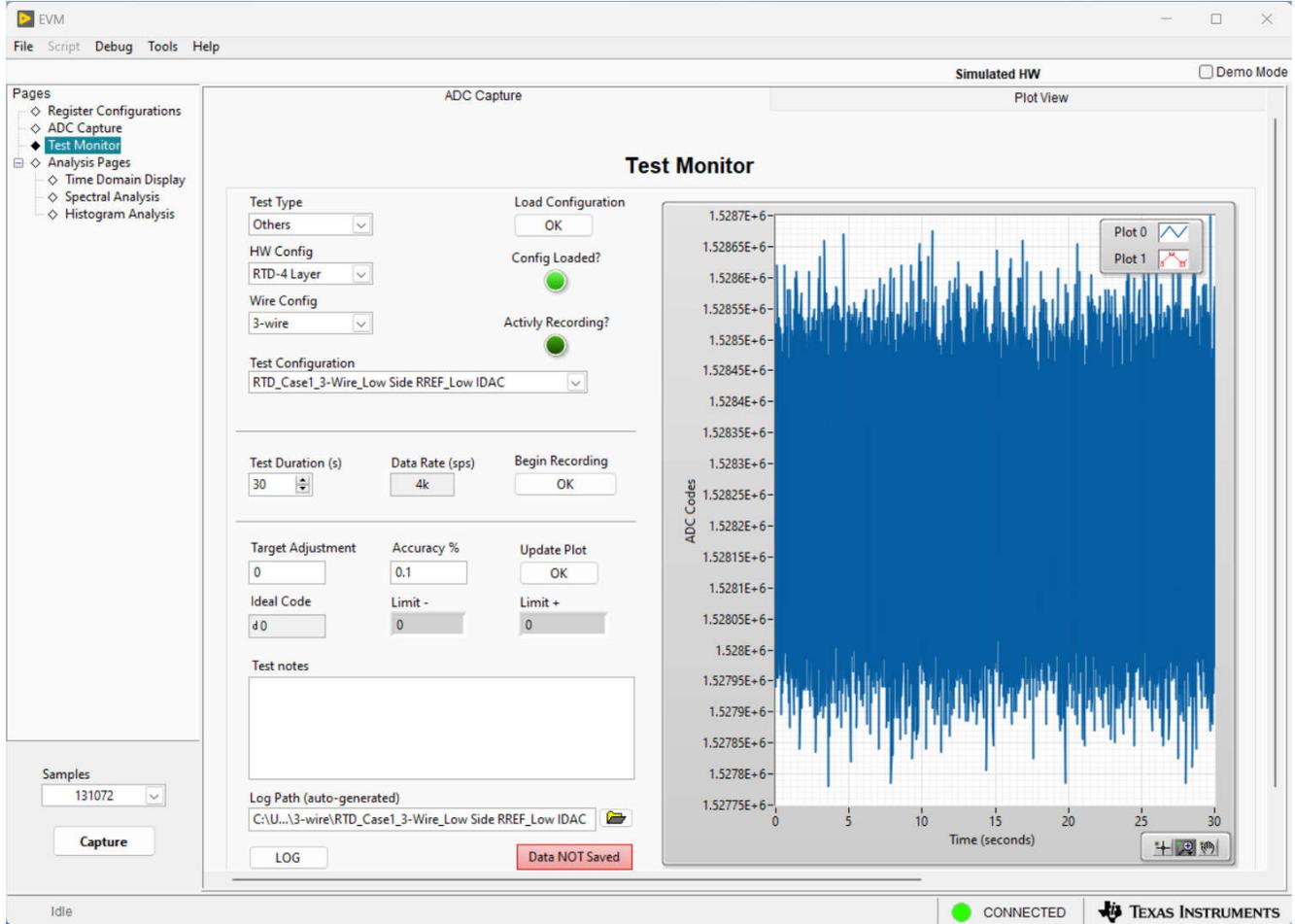


图 1-31. 用于 EMC 测试的 GUI 软件

## 2 测试细节和结果

本节介绍每项测试的测试标准和条件、测试设置和结果。

### 2.1 标准和测试准则

ADS124S08 EMC 测试板可以满足工业应用的 EMC 和 EMI 测试标准及准则。为该测试选择了以下五个测试：

- 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)

#### 测试准则

EMC 测试标准定义了测试电子器件的限制和条件，以确保其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 2-1 示出了对产品可靠性和符合监管标准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 2-1. 测试准则

标准	说明
A	性能正常，处于规定限值范围内
B	暂时性的性能损失，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

## 2.2 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 2-1 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。

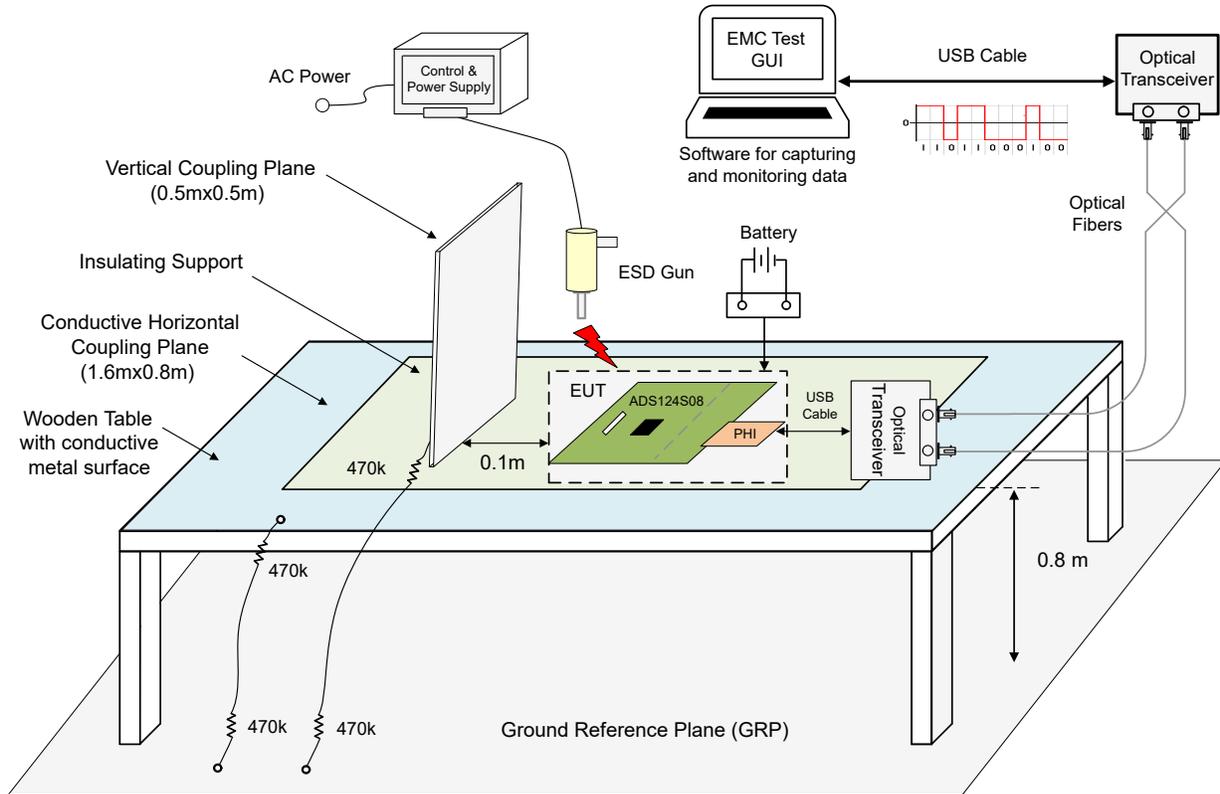


图 2-1. ESD 测试的实验室设置图

ESD 测试有两种类型：接触放电和空气放电。接触放电测试是一种最激进的直接放电测试，其中 ESD 枪的尖端直接接触 ADS124S08 RTD EMC 测试板上输入端子块 (J2) 的导电螺钉和 ADS124S08 TC EMC 测试板的输入端子块 (J2/J3/J4/J5)。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。空气间隙放电测试将 ESD 枪的尖端放置在 ADS124S08 EMC 测试板上输入端子块的绝缘表面附近。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。

图 2-2 示出了施加 ESD 冲击的放大视图。对于向 HCP 和 VCP 的放电，分别由 ESD 枪 1 和 ESD 枪 2 在接触放电模式下完成。ESD 枪垂直于 VCP 边缘，然后 ESD 冲击放电到平面边缘。

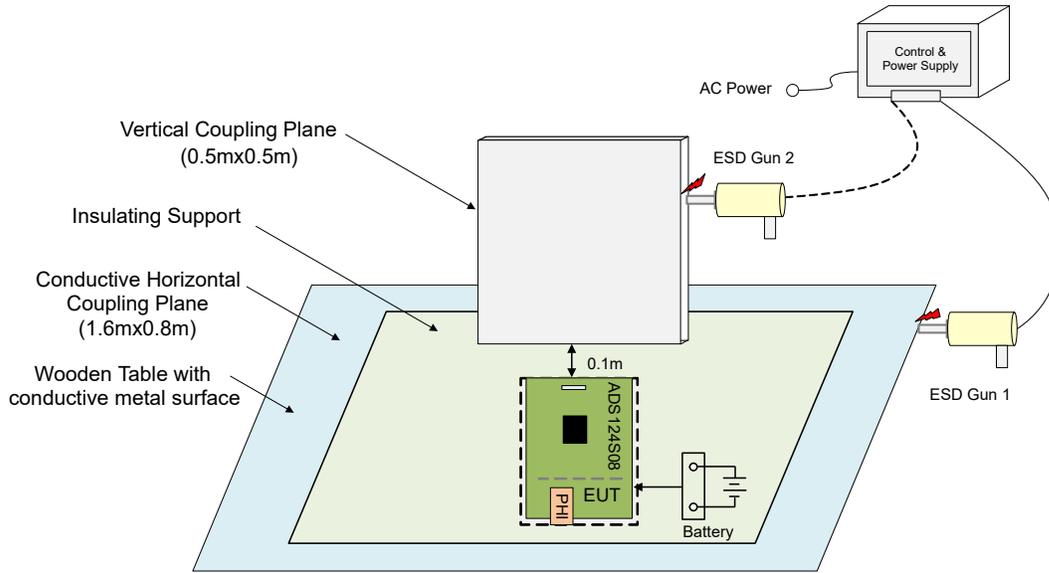


图 2-2. 分别使用 ESD 枪 1 和枪 2 向 HCP 和 VCP 放电

表 2-2 指定 IEC 61000-4-2 测试级别：

表 2-2. : ESD 测试的测试级别

接触放电		空气放电	
等级	测试电压 (kV)	等级	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 2-3 示出了 ADS124S08 EMC 测试板上 ESD 测试的实际设置照片。

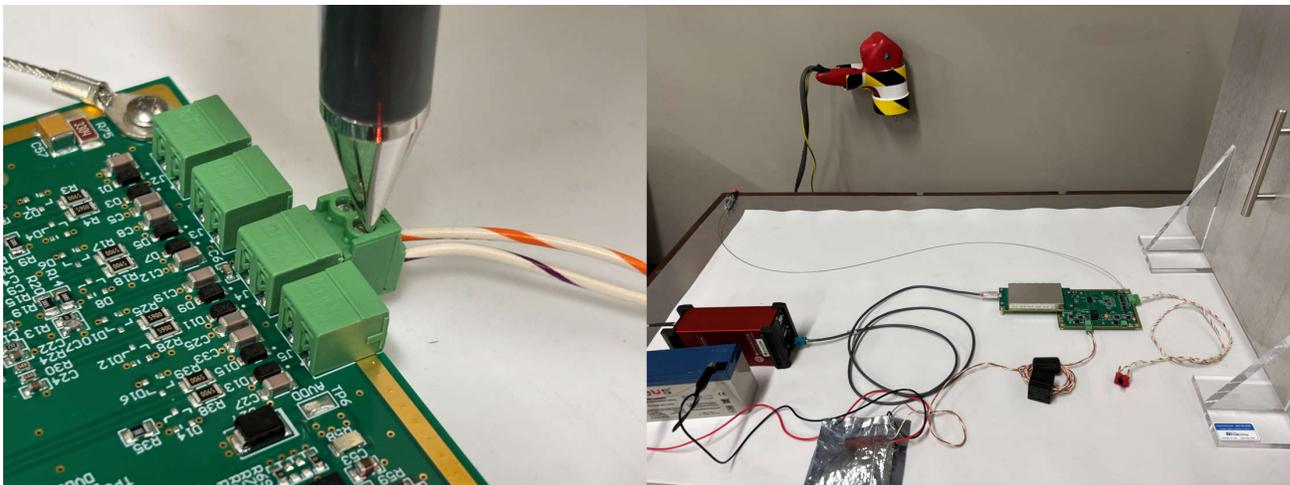


图 2-3. ESD 测试的实验室设置

图 2-4 示出了使用 2 层 TC EMC 测试板进行 ESD 测试时未校准的 ADS124S08 输出温度数据。测试板配置为使用内部 VBIAS 电压来偏置传感器，从而测量热电偶。图左侧的图示出了在输入通道上施加正 ESD 放电时的 ADC 转换代码。右侧的图示出了在输入通道上施加负 ESD 放电时的 ADC 转换代码。这两个图都表明，ESD 测试影响

了 ADS124S08，导致了暂时性的性能损失。但是，器件会在没有任何用户干预的情况下自动恢复。因此，ADS124S08 EMC 测试板通过了标准 B 的 ESD 测试

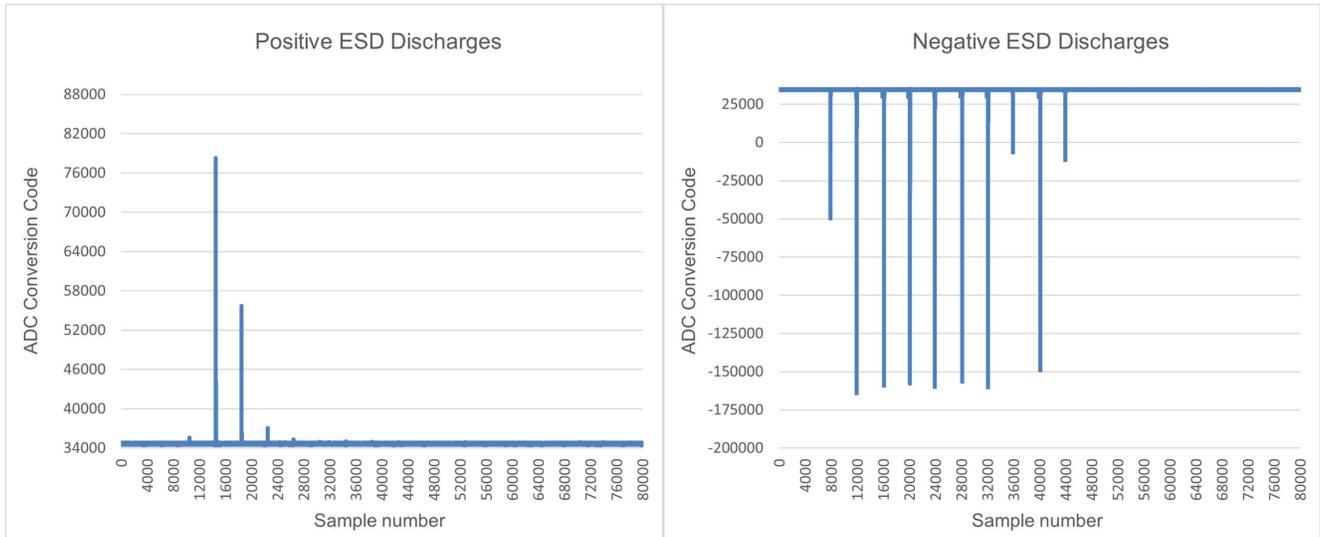


图 2-4. 为 ESD 测试捕获的 ADC 转换代码

表 2-3 显示了 ESD 测试的结果。所有 RTD 和 TC EMC 测试板上每种配置的测试结果都相同。

表 2-3. ESD 测试的测试结果

测试	IEC 标准	配置	测试信号			标准	测试结果
			测试类型	测试级别	测试电压		
ESD	IEC 61000-4-2	RTD : 4 层、3 线、低侧 R <sub>REF</sub>	接触放电	4	+8kV	B	通过
					-8kV	B	通过
			空气放电	4	+15kV	B	通过
					-15kV	B	通过
		RTD : 2 层、3 线、高侧 R <sub>REF</sub>	接触放电	4	+8kV	B	通过
					-8kV	B	通过
			空气放电	4	+15kV	B	通过
					-15kV	B	通过
		TC : 2 层，用于传感器偏置的 VBIAS	接触放电	4	+8kV	B	通过
					-8kV	B	通过
			空气放电	4	+15kV	B	通过
					-15kV	B	通过
TC : 2 层 REFOUT 偏置上拉电阻器	接触放电	4	+8kV	B	通过		
			-8kV	B	通过		
	空气放电	4	+15kV	B	通过		
			-15kV	B	通过		

## 2.3 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 18V/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。

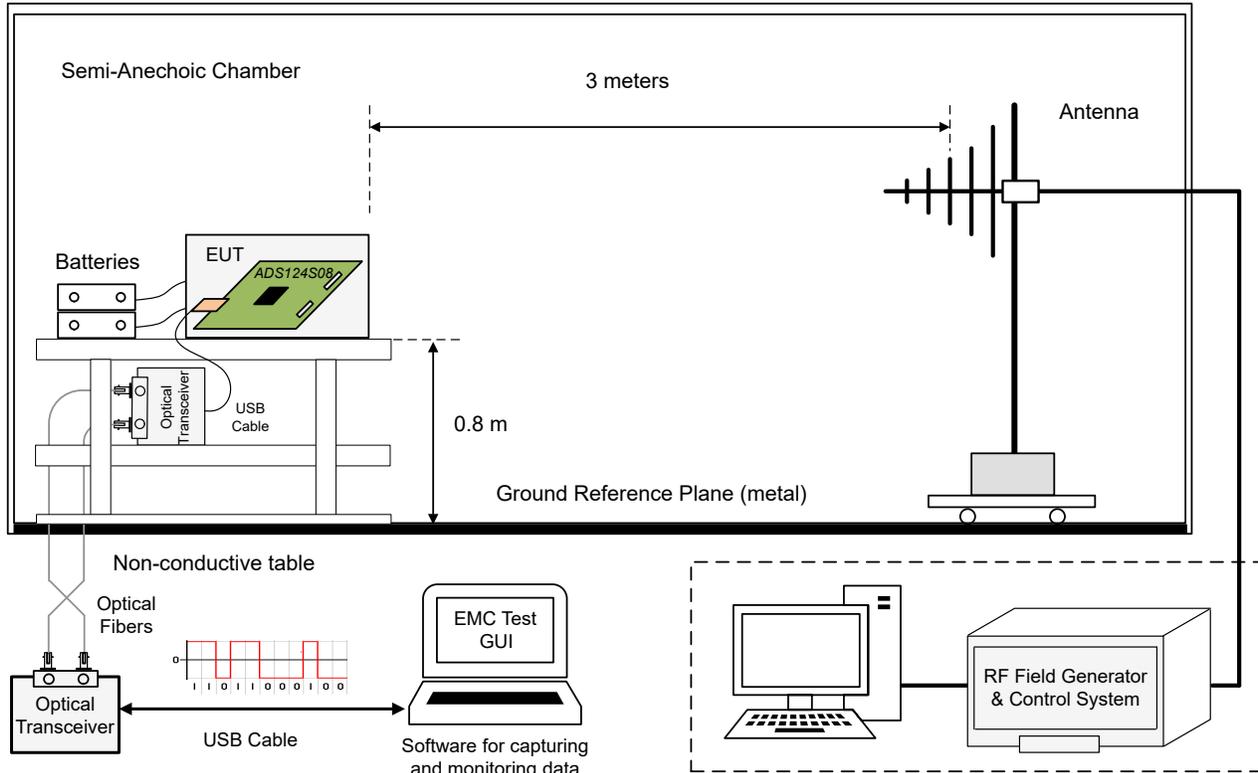


图 2-5. 辐射抗扰度测试的实验室设置图

表 2-4 指定 IEC 61000-4-3 测试级别：

表 2-4. 辐射抗扰度测试的测试级别

等级	测试信号的场强 (V/m)
1	1
2	3
3	10
4	30
x	这是一个开放的测试级别，相关的场强可以是任何值。该级别可以在产品标准中指定。

图 2-6 示出了 ADS124S08 EMC 测试板上辐射抗扰度测试的实际设置。



RF Immunity Test: 80 – 1000MHz

RF Immunity Test: 1 - 2.7GHz

图 2-6. 传导抗扰度测试的实验室设置照片

图 2-7 示出了辐射抗扰度测试期间及之后使用 4 层 RTD EMC 测试板未经校准的 ADS124S08 输出温度数据。测试板被配置为使用低压侧电压基准来测量这些测试的 3 线 RTD。左侧的图示出了当测试信号频率从 80MHz 扫描到 1GHz 时，在辐射抗扰度测试期间从 ADC 捕获的温度数据。中间的图示出了当测试信号频率从 1GHz 扫描到 2.7GHz 时从 ADC 捕获的温度数据。右侧的图示出了当辐射抗扰度测试完成时从 ADC 采集的温度数据。如图所示，ADS124S08 不受测试信号的影响。因此，ADS124S08 EMC 测试板通过了标准 A 的辐射抗扰度测试。

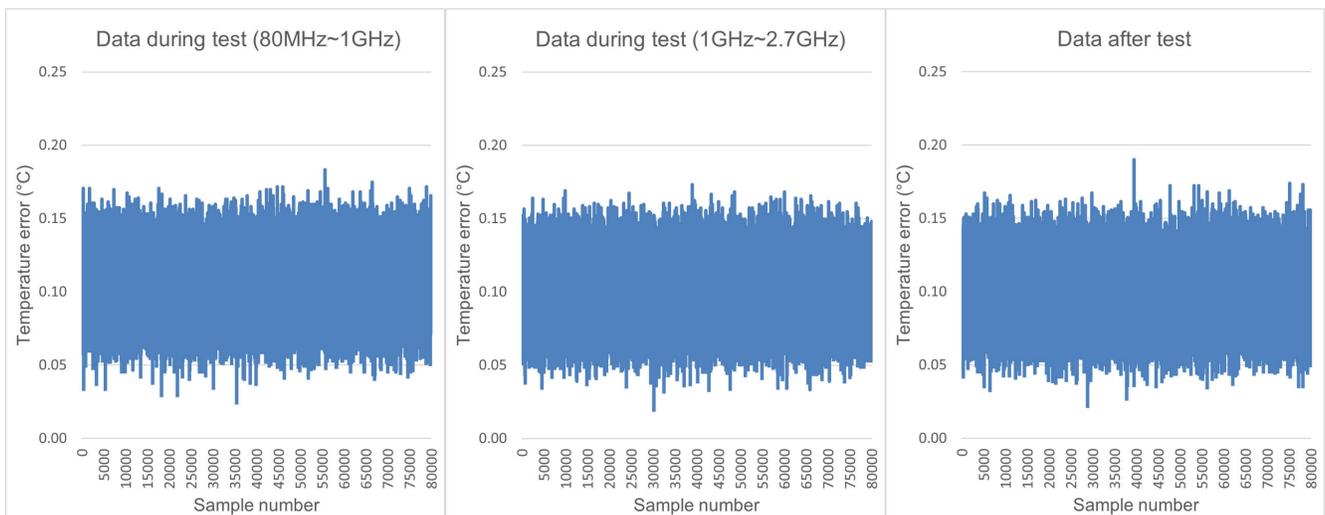


图 2-7. 为辐射抗扰度测试捕获的温度数据

表 2-5 显示了 RI 测试的结果。所有 RTD 和 TC EMC 测试板上每种配置的测试结果都相同。

表 2-5. 辐射抗扰度测试的测试结果

测试	IEC 标准	配置	测试信号			标准	测试结果
			场强	频率	天线极化		
辐射抗扰度 (RI)	IEC 61000-4-3	RTD : 4 层、3 线、低 R <sub>REF</sub>	10V/m ( 3 级 )	80kHz -1GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
				1GHz -2.7GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
		RTD : 2 层、3 线、高侧 R <sub>REF</sub>	10V/m ( 3 级 )	80kHz -1GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
				1GHz -2.7GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
		TC : 2 层 REFOUT 偏置上拉电阻器	10V/m ( 3 级 )	150kHz -80MHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过
				1GHz -2.7GHz	水平	A	通过
					垂直	A	通过

## 2.4 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。ADS124S08 EMC 测试板在标准 1kV 与 2kV 级别以及更极端 4kV 级别下进行了测试。ADS124S08 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 2-8 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 ADS124S08 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。

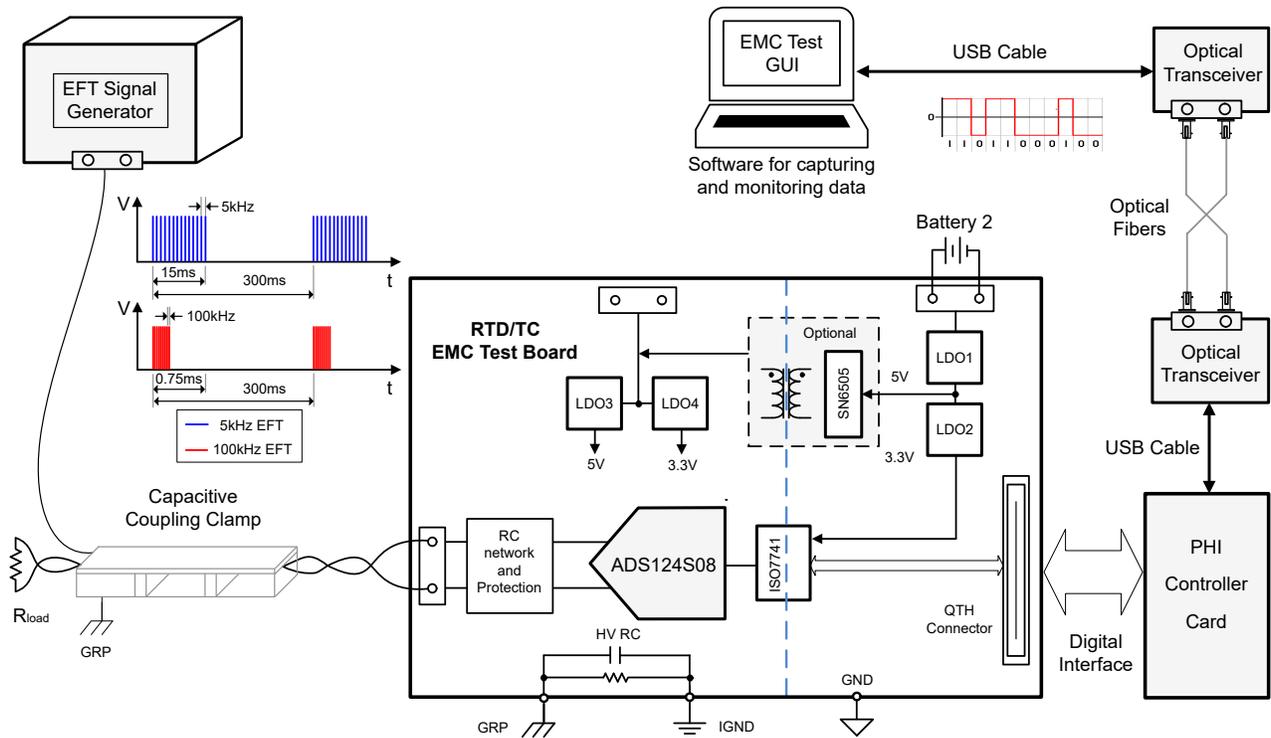


图 2-8. EFT 测试的实验室设置图

表 2-6 指定 IEC 61000-4-4 测试级别：

表 2-6. EFT 测试的测试级别

等级	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	这是一个开放测试级别，并且测试级别可以是任意值。该级别可以在产品标准中指定。					

图 2-9 示出了 ADS124S08 EMC 测试板上 EFT 测试的实际设置。

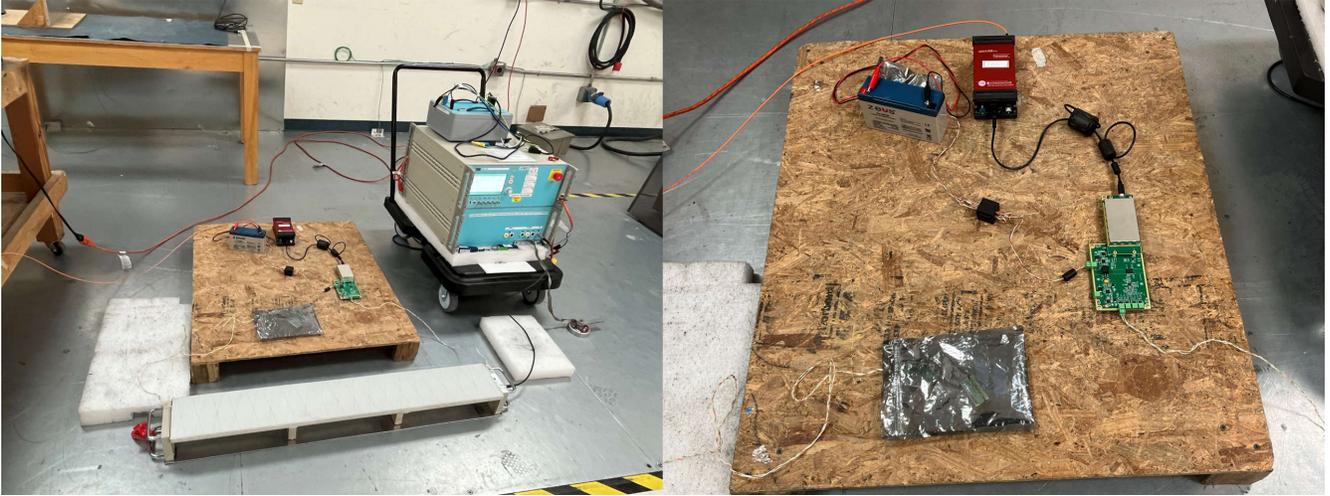


图 2-9. EFT 测试的实验室设置

图 2-10 示出了 EFT 测试之前、期间和之后使用 2 层 TC EMC 测试板未校准的 ADS124S08 输出温度数据。EFT 测试信号耦合至使用内部 VBIAS 电压来偏置传感器的通道。左侧的图示出了在 EFT 测试之前和之后从 ADC 捕获的温度数据。右图示出了在 EFT 测试完成期间及之后从 ADC 捕获的温度数据。这两个图都表明，EFT 测试影响了 ADS124S08，导致了暂时性的性能损失。但是，器件会在没有任何用户干预的情况下自动恢复。因此，ADS124S08 EMC 测试板通过了标准 B 的 EFT 测试。

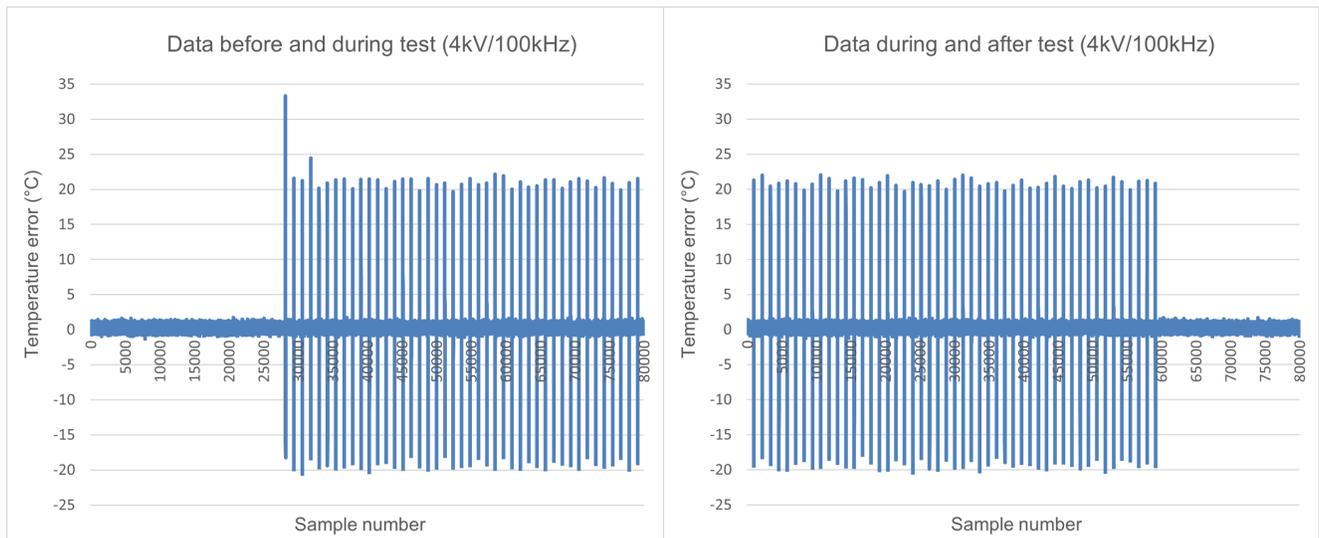


图 2-10. 为 EFT 测试捕获的温度数据

表 2-7 显示了 EFT 测试的结果。所有 RTD 和 TC EMC 测试板上每种配置的测试结果都相同。

**表 2-7. EFT 测试的测试结果**

测试	IEC 标准	配置	测试信号		测试级别	标准	测试结果
			电压	频率			
EFT	IEC 61000-4-4	RTD : 4 层、3 线、低侧 R <sub>REF</sub>	±4kV	5kHz	4	B	通过
			±4kV	100kHz	4	B	通过
		RTD : 2 层、3 线、高侧 R <sub>REF</sub>	±4kV	5kHz	4	B	通过
			±4kV	100kHz	4	B	通过
		TC : 2 层, 用于传感器 偏置的 VBIAS	±4kV	5kHz	4	B	通过
			±4kV	100kHz	4	B	通过
		TC : 2 层 REFOUT 偏置 上拉电阻器	±4kV	5kHz	4	B	通过
			±4kV	100kHz	4	B	通过

## 2.5 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 $\mu$ s / 700 $\mu$ 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 $\mu$ s / 50 $\mu$ s CWG。其他情况下的浪涌均包括 1.2  $\mu$ s / 50  $\mu$ s（上升时间为 1.2  $\mu$ s，脉冲宽度为 50  $\mu$ s）开路电压波形，以及 8  $\mu$ s / 20  $\mu$ s（上升时间为 8  $\mu$ s，脉冲宽度为 20  $\mu$ s）短路电流波形。在每个额定值下，EUT 会经受 2 个正浪涌和 2 个负浪涌。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 $\mu$ F 电容器和绞合电缆的 CDN 进行浪涌测试。

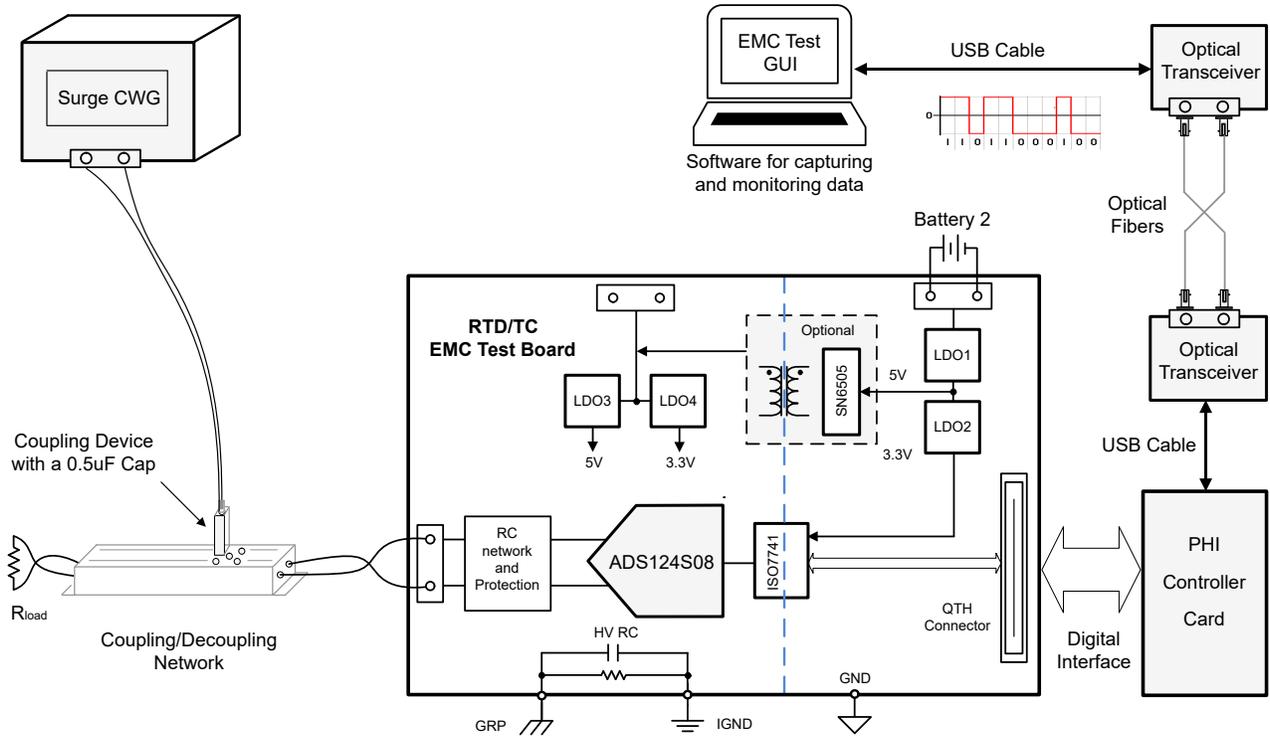


图 2-11. 浪涌测试的实验室设置图

表 2-8 指定 IEC 61000-4-5 测试级别：

表 2-8. 浪涌测试的测试级别

等级	开路测试电压 $\pm 10\%$ (kV)
1	0.5
2	1.0
3	2.0
4	4.0
X	特别适用于任何级别，即高于、低于或介于其他级别之间的级别。该级别可以在产品标准中指定。

浪涌发生器使用 2  $\Omega$  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 ( $R_{eq}$ ) 决定，其中  $R_{eq}$  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 2-9 示出了不同浪涌电压和阻抗下浪涌电流电平的参考矩阵：

表 2-9. 浪涌测试电压及阻抗的电流电平

	1 级	2 级	3 级	4 级
	500V	1kV	2kV	4kV
Req = 42 Ω	12A	24A	48A	96A
Req = 12 Ω	42A	84A	167A	334A
Req = 2 Ω	250A	500A	1000A	2000A

图 2-12 示出了 ADS124S08 EMC 测试板上浪涌测试的实际设置。

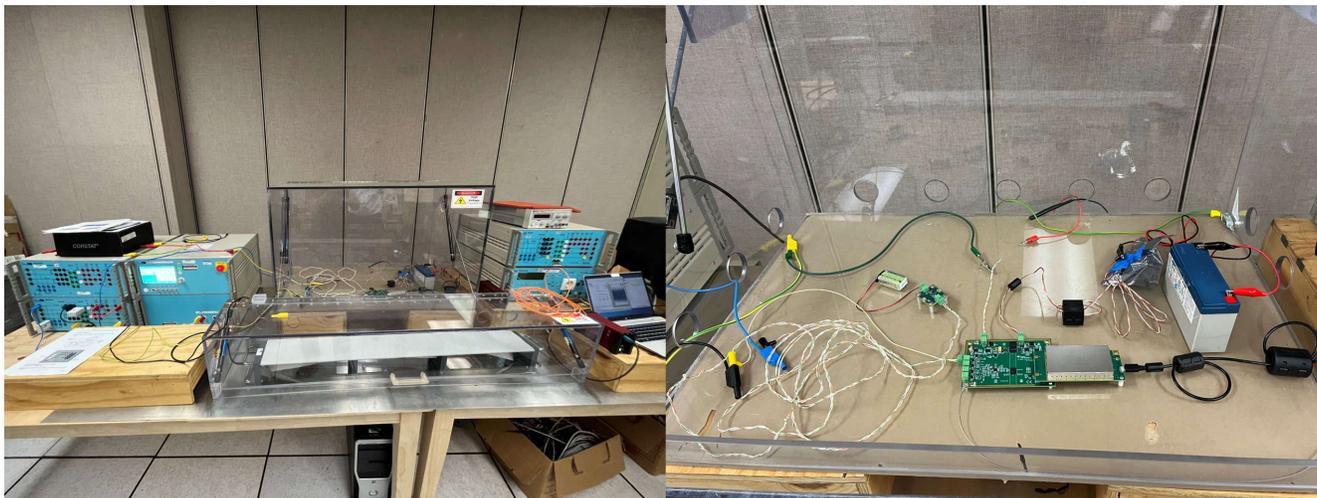


图 2-12. 浪涌测试的实验室设置

图 2-13 示出了在浪涌测试 ( $\pm 1.5\text{kV}$  和线路至 GND) 期间使用 2 层 TC EMC 测试板时的未校准 ADS124S08 输出数据。浪涌测试信号耦合到测量通道, 该测量通道配置为通过上拉电阻使用 REFOUT 偏置。左图示出了施加正浪涌信号时的 ADC 转换代码。右图示出了向输入通道施加负浪涌信号时的 ADC 转换代码。这两个图都表明, 浪涌测试影响了 ADS124S08, 并导致暂时性的性能损失。但是, 器件会在没有任何用户干预的情况下自动恢复。因此, ADS124S08 EMC 测试板通过了标准 B 的浪涌测试。

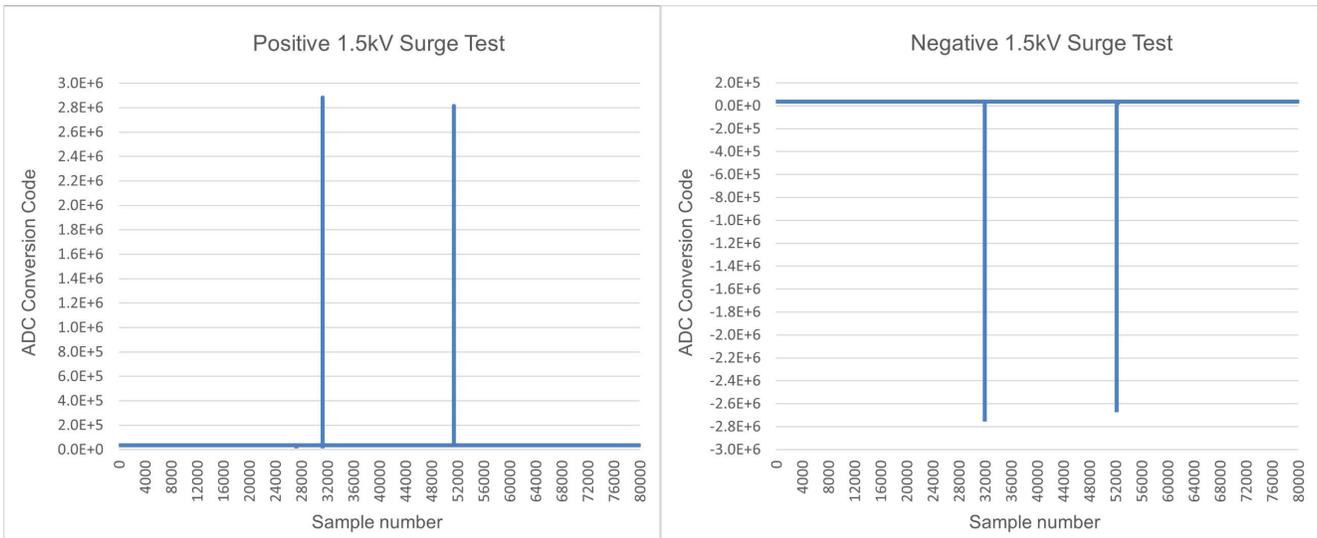


图 2-13. 为浪涌测试捕获的 ADC 转换代码

表 2-10 显示了浪涌测试的结果。所有 RTD 和 TC EMC 测试板上每种配置的测试结果都相同。

表 2-10. 浪涌测试的测试结果

测试	标准	类型和阻抗	配置	测试电压	测试级别	标准	测试结果
浪涌	IEC 61000-4-5	线路对地 ( 2Ω 源阻抗 + 来自耦合网络的 40Ω )	RTD : 4 层、3 线、低侧 R <sub>REF</sub>	500V	1	B	通过
				1kV	2	B	通过
			RTD : 2 层、3 线、高侧 R <sub>REF</sub>	500V	1	B	通过
				1kV	2	B	通过
			TC : 2 层, 用于传感器偏置的 VBIAS	1kV	2	B	通过
				1.5kV	> 2	B	通过
TC : 2 层 REFOUT 偏置上拉电阻器	1kV	2	B	通过			
	1.5kV	> 2	B	通过			

## 2.6 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 2-14 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)。

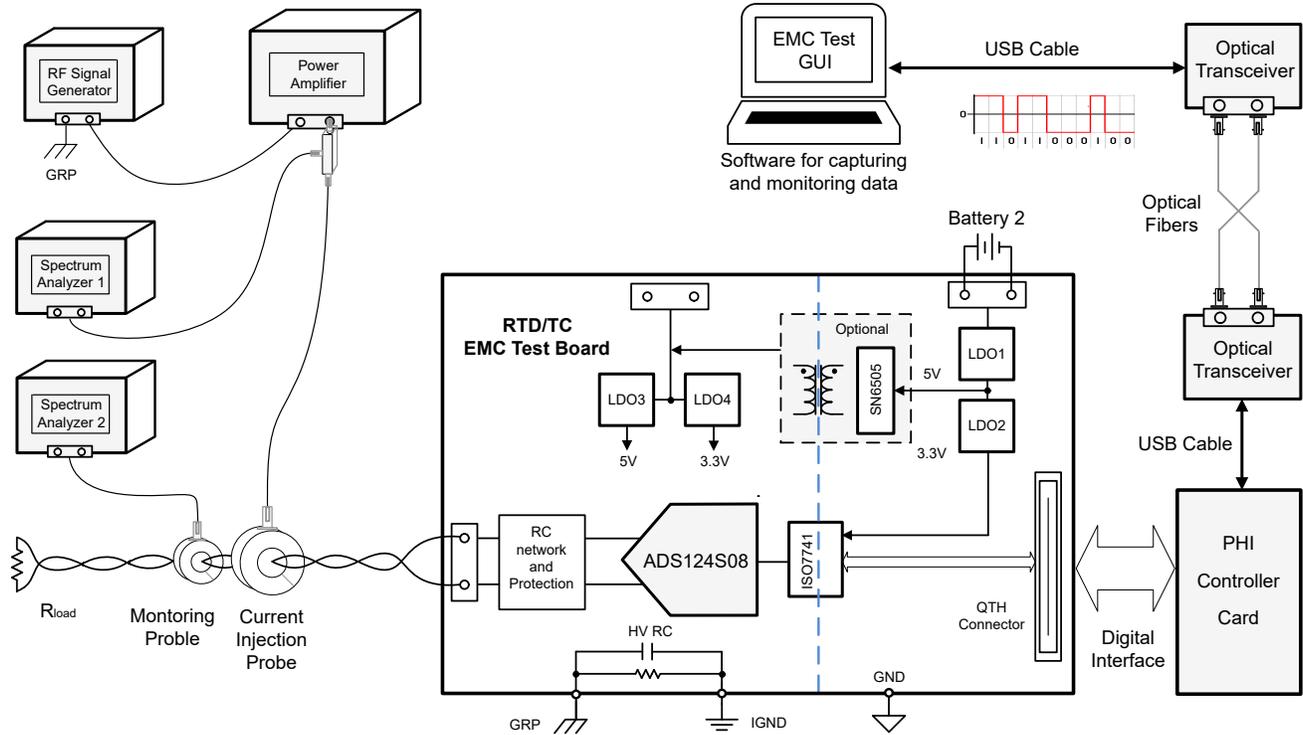


图 2-14. 传导抗扰度测试的实验室设置图

表 2-11 指定 IEC 61000-4-6 测试级别：

表 2-11. 传导抗扰度测试的测试等级

等级	测试信号的场强	
	V0 (10V/m)	V0 (dBuV)
1	1	120
2	3	129.5
3	10	140
x	特别适用于任何级别，即高于、低于或介于其他级别之间的级别。该级别可以在产品标准中指定。	

图 2-15 示出了 ADS124S08 EMC 测试板上传导抗扰度测试的实际设置。

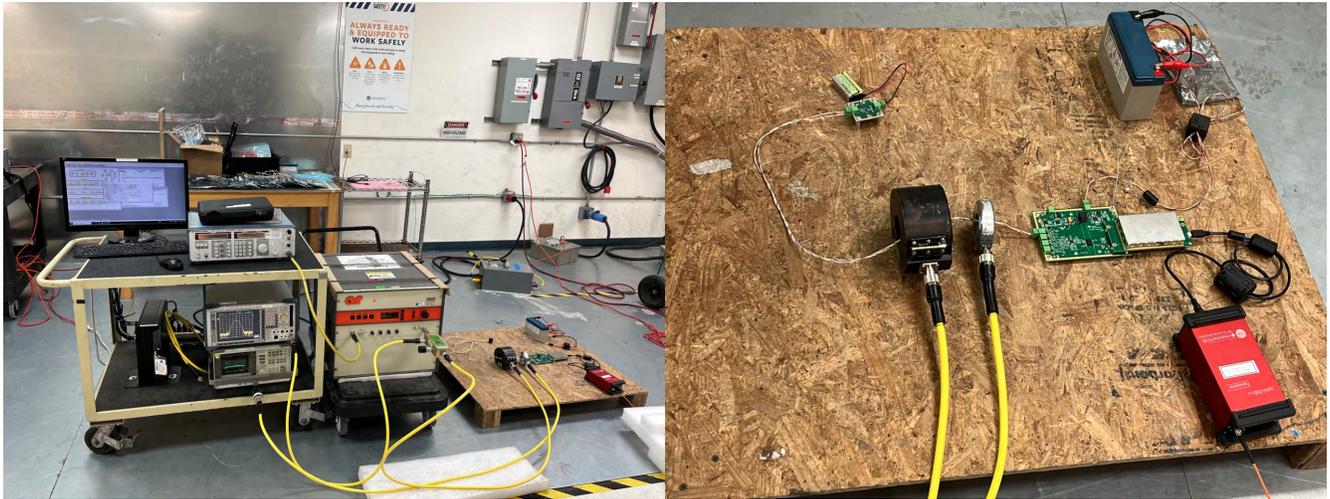


图 2-15. 传导抗扰度测试的实验室设置

图 2-16 示出了 CI 测试期间和之后使用 2 层 TC EMC 测试板已校准的 ADS124S08 输出温度数据。CI 测试信号耦合到测量通道，该测量通道配置为通过上拉电阻使用 REFOUT 偏置。左图示出了在传导抗扰度测试期间从 ADC 捕获的温度数据。右图示出了传导抗扰度测试完成时从 ADC 采集的温度数据。这两个图表都显示，当测试信号频率从 150kHz 扫描到 80MHz 时，CI 测试不会影响 ADS124S08。因此，ADS124S08 EMC 测试板通过了标准 A 的传导抗扰度测试。

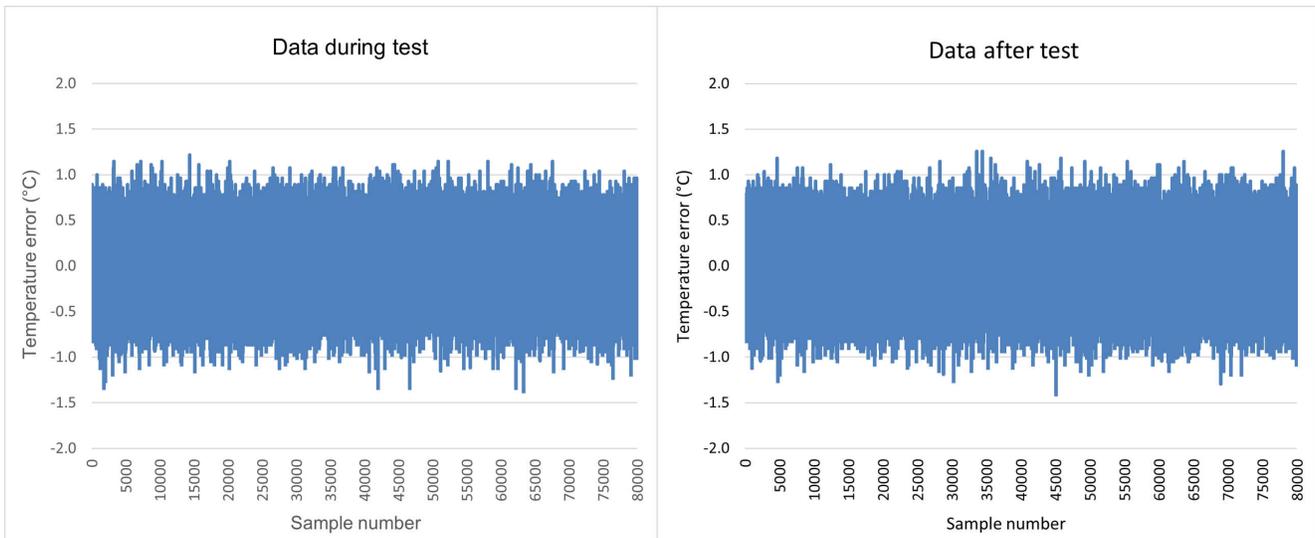


图 2-16. 为传导抗扰度测试捕获的温度数据

表 2-12 显示了 CI 测试的结果。所有 RTD 和 TC EMC 测试板上每种配置的测试结果都相同。

**表 2-12. 传导抗扰度测试的测试结果**

测试	IEC 标准	配置	测试信号		标准	测试结果
			场强	频率		
传导抗扰度 (CI)	IEC 61000-4-6	RTD : 4 层、3 线、低/高侧 R <sub>REF</sub>	10V/m ( 3 级 )	150kHz-80MHz	A	通过
		RTD : 2 层、3 线、高侧 R <sub>REF</sub>	10V/m ( 3 级 )	150kHz-80MHz	A	通过
		TC : 2 层 REFOUT 偏置上拉电阻器	10V/m ( 3 级 )	150kHz-80MHz	A	通过

### 3 原理图、PCB 布局和物料清单

#### 3.1 原理图 - RTD EMC 测试板

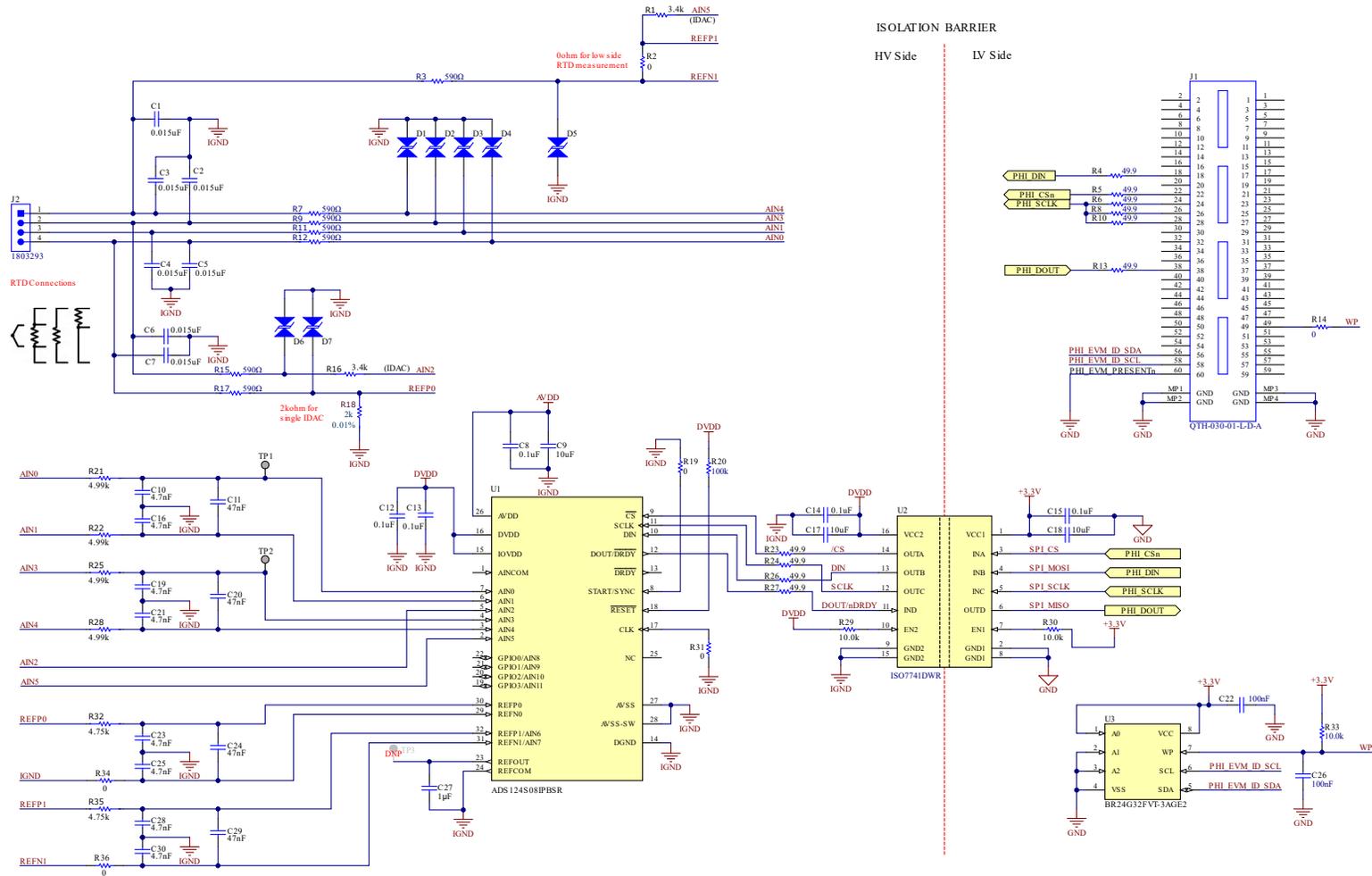


图 3-1. 原理图 - ADC

"DNP" => Do Not Populate

ISOLATION BARRIER

DUT Side

DIG Side

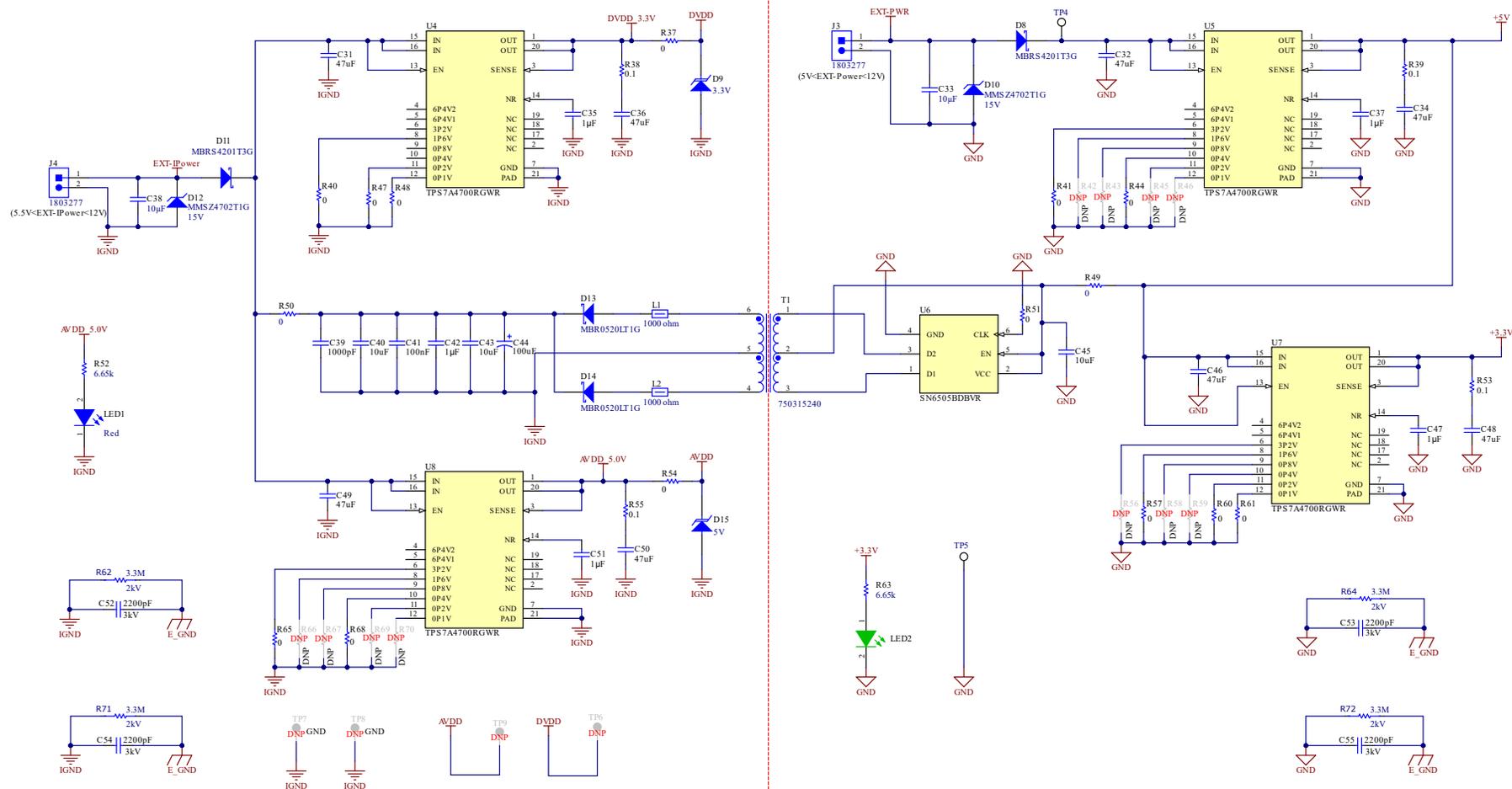


图 3-2. 原理图 - 电源

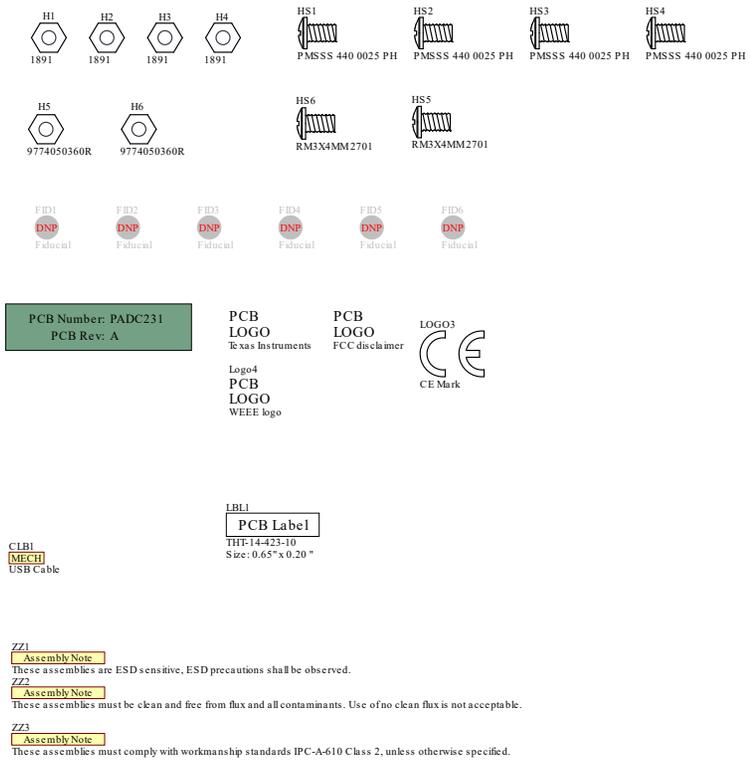


图 3-3. 原理图 - 硬件

### 3.2 原理图 - TC EMC 测试板

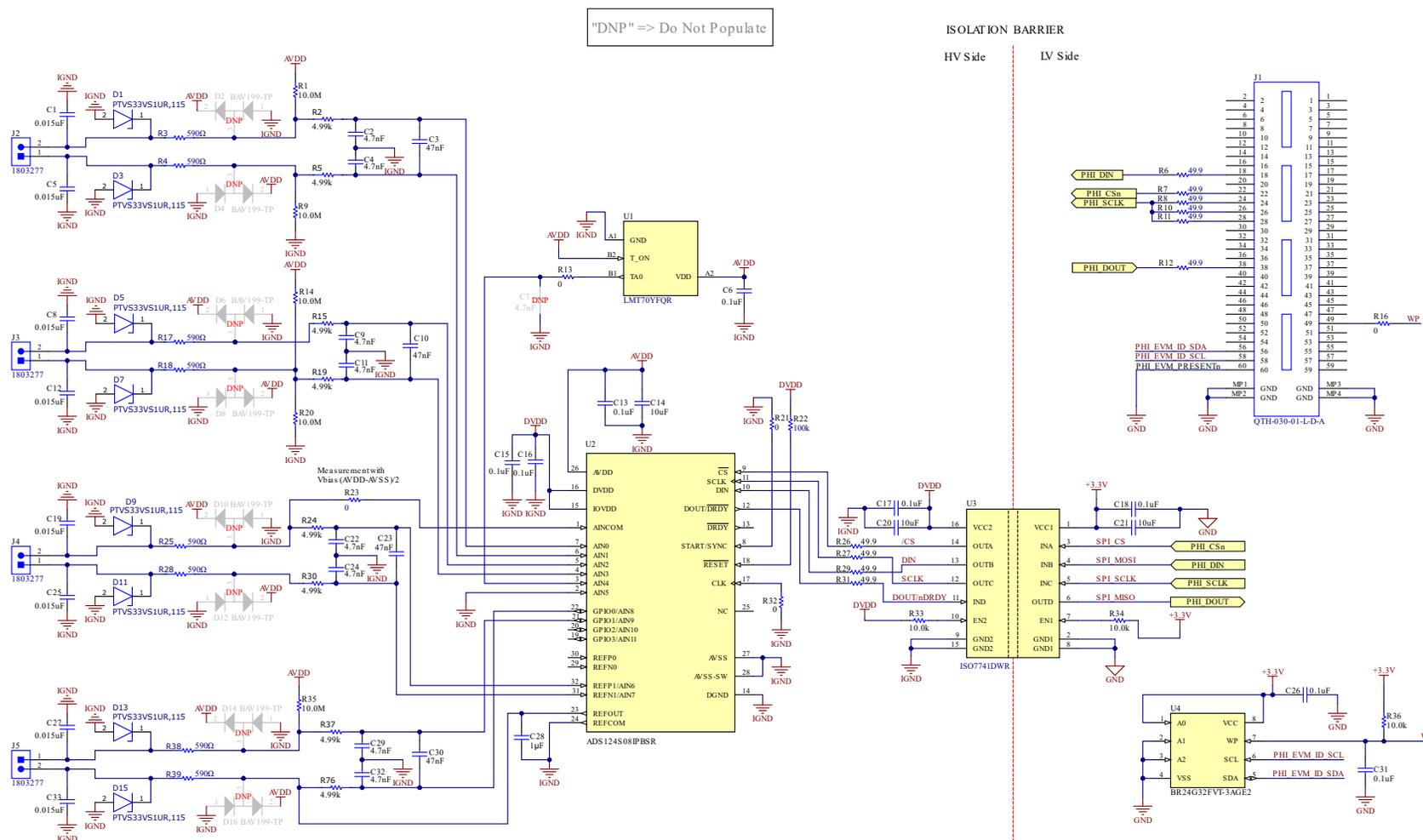


图 3-4. 原理图 - ADC

"DNP" => Do Not Populate

ISOLATION BARRIER

HV Side LV Side

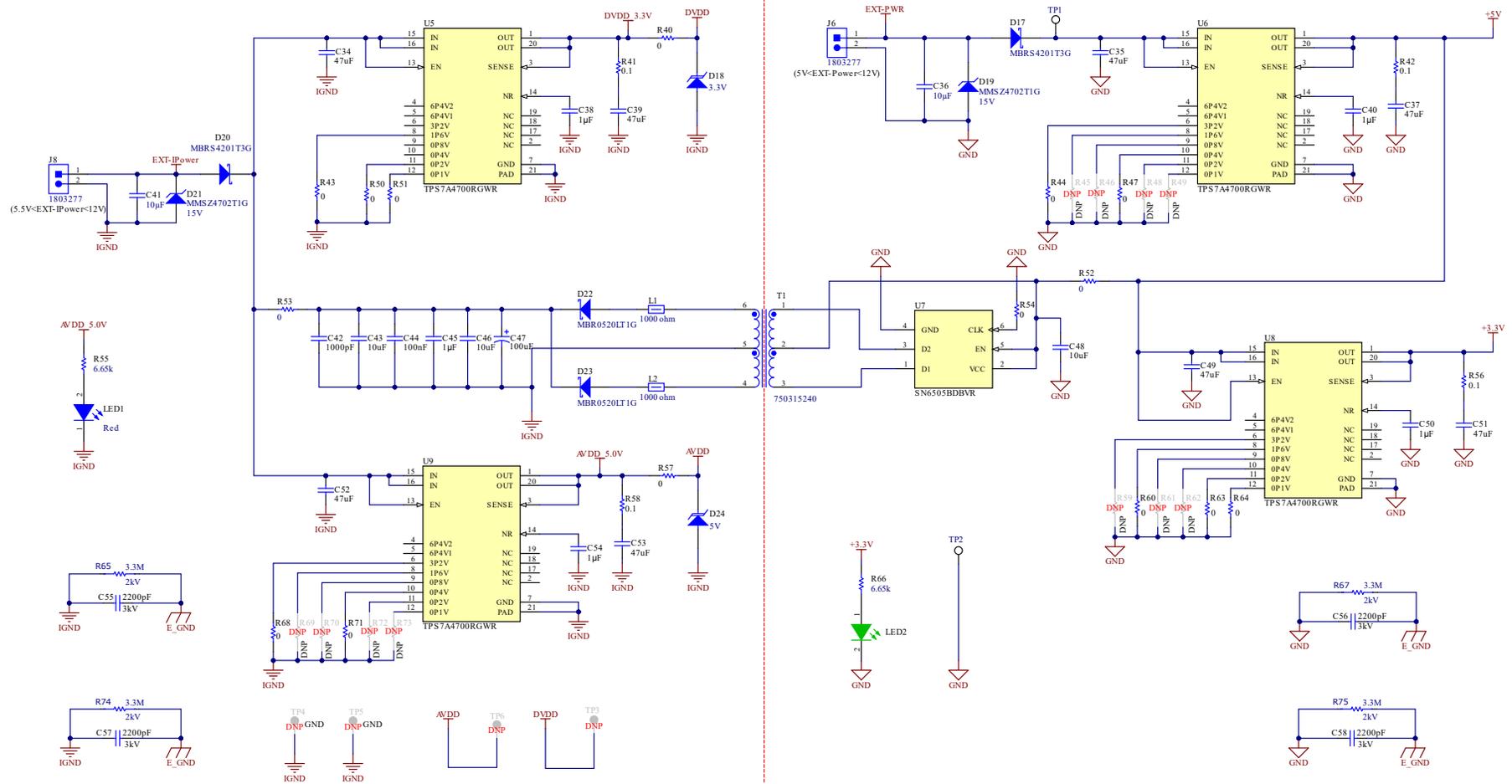


图 3-5. 原理图 - 电源

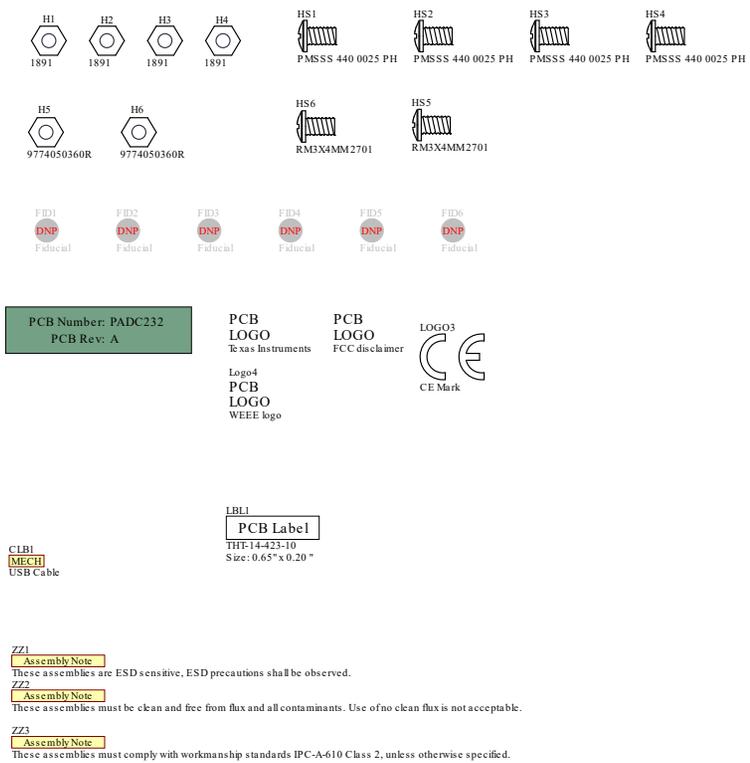


图 3-6. 原理图 - 硬件

### 3.3 PCB 布局 - RTD EMC 测试板 (4 层)

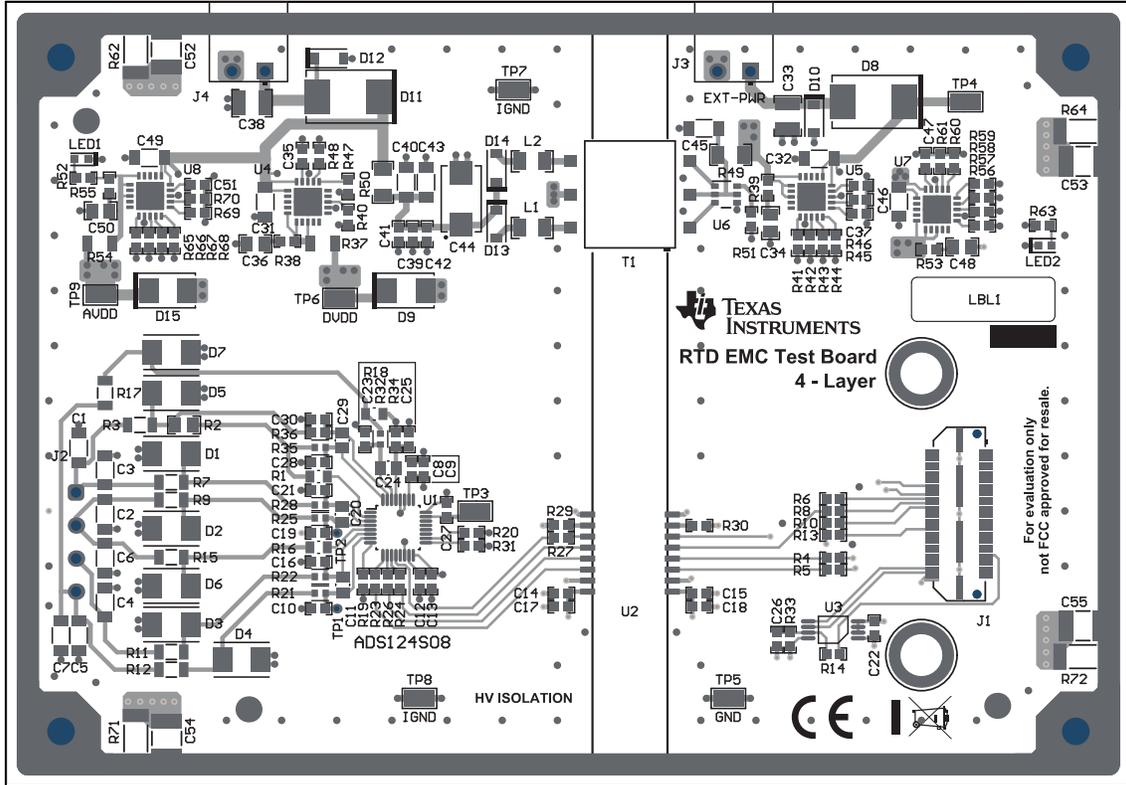


图 3-7. 顶层和丝印

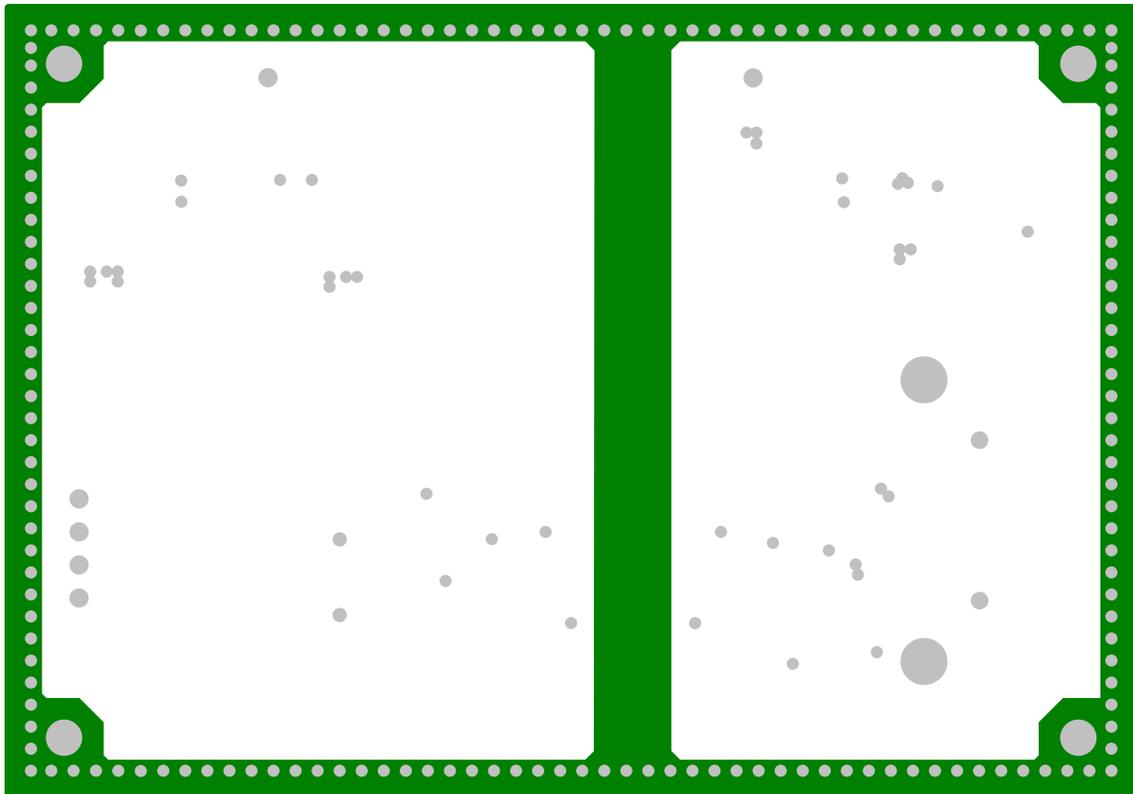


图 3-8. 内接地层

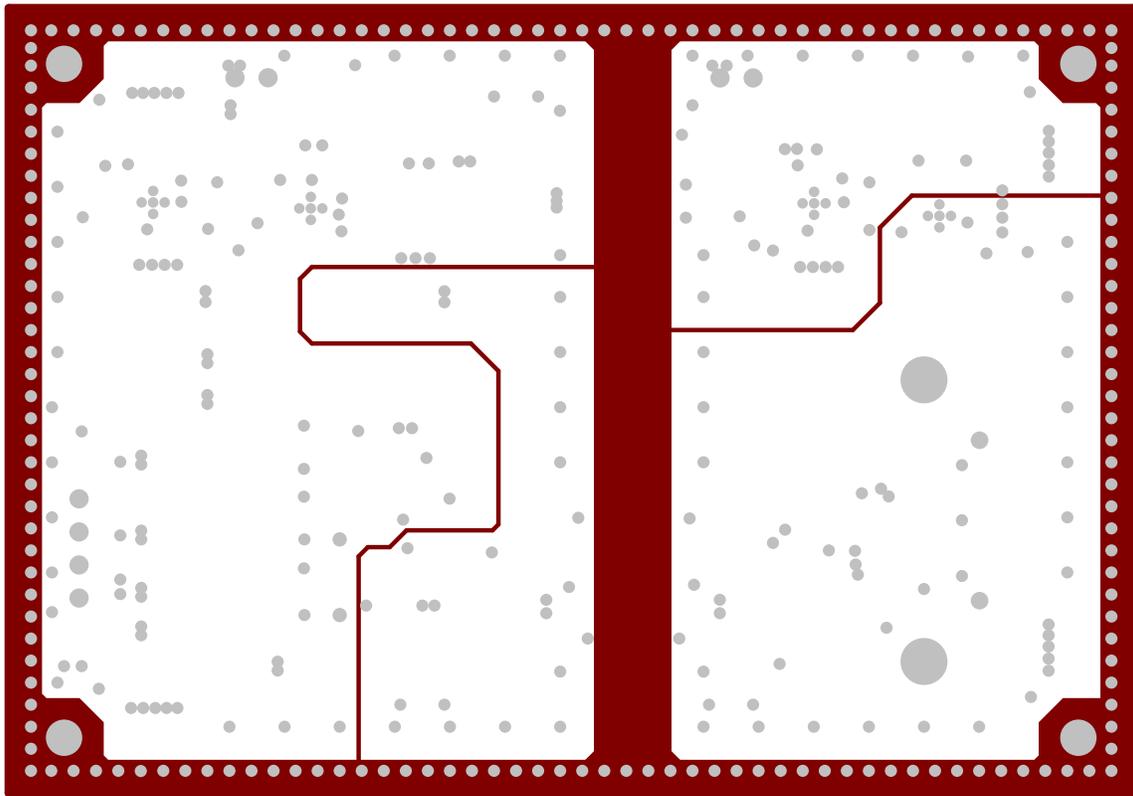


图 3-9. 内电源层

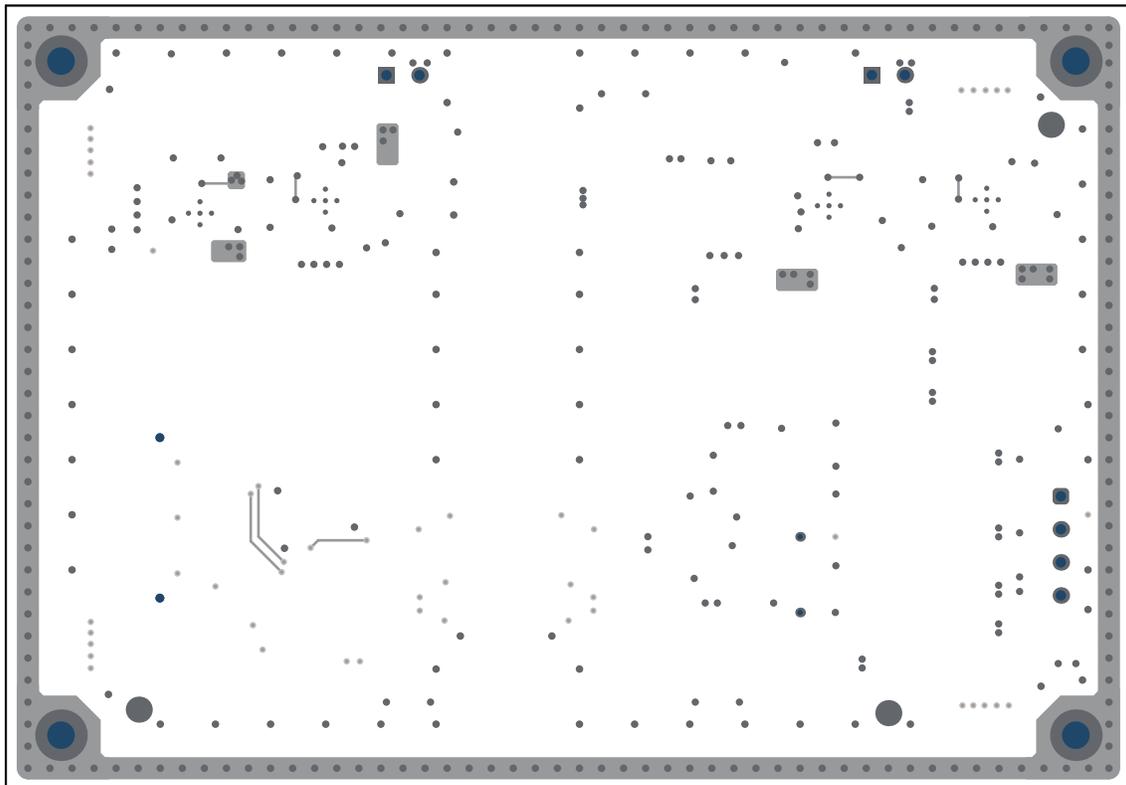


图 3-10. 底层和丝印



### 3.5 PCB 布局 - TC EMC 测试板 (4 层)

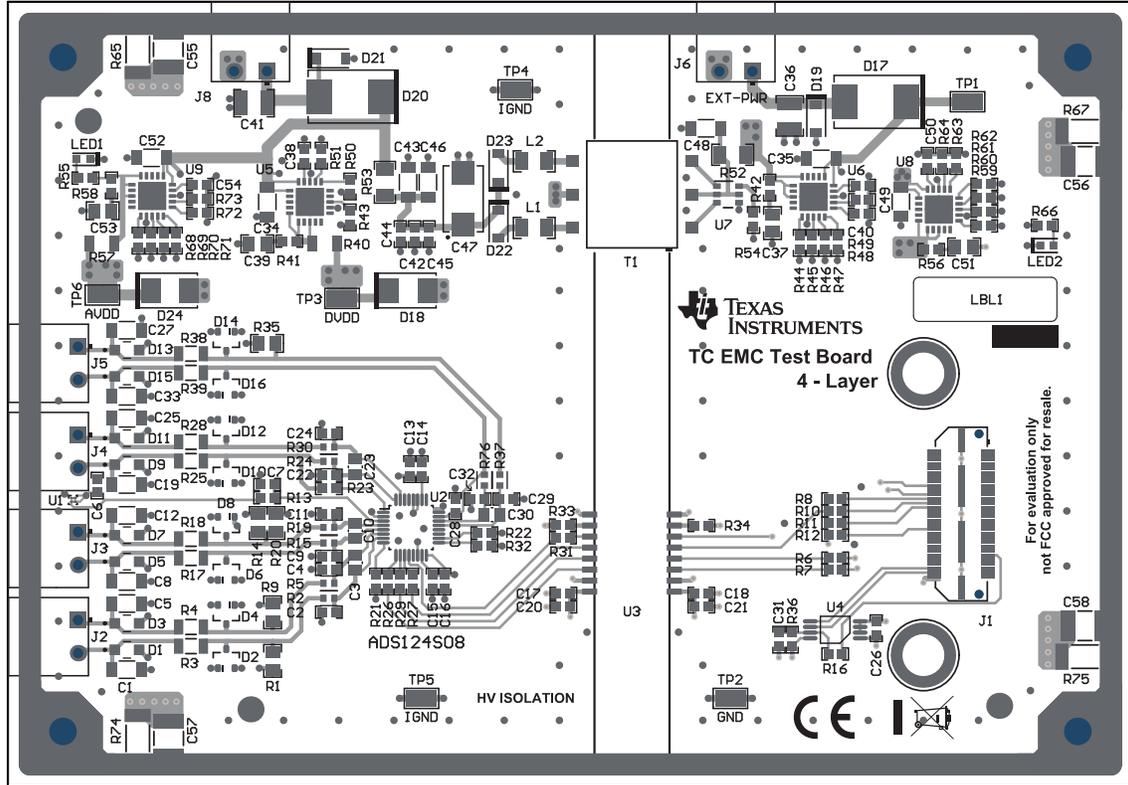


图 3-13. 顶层和丝印

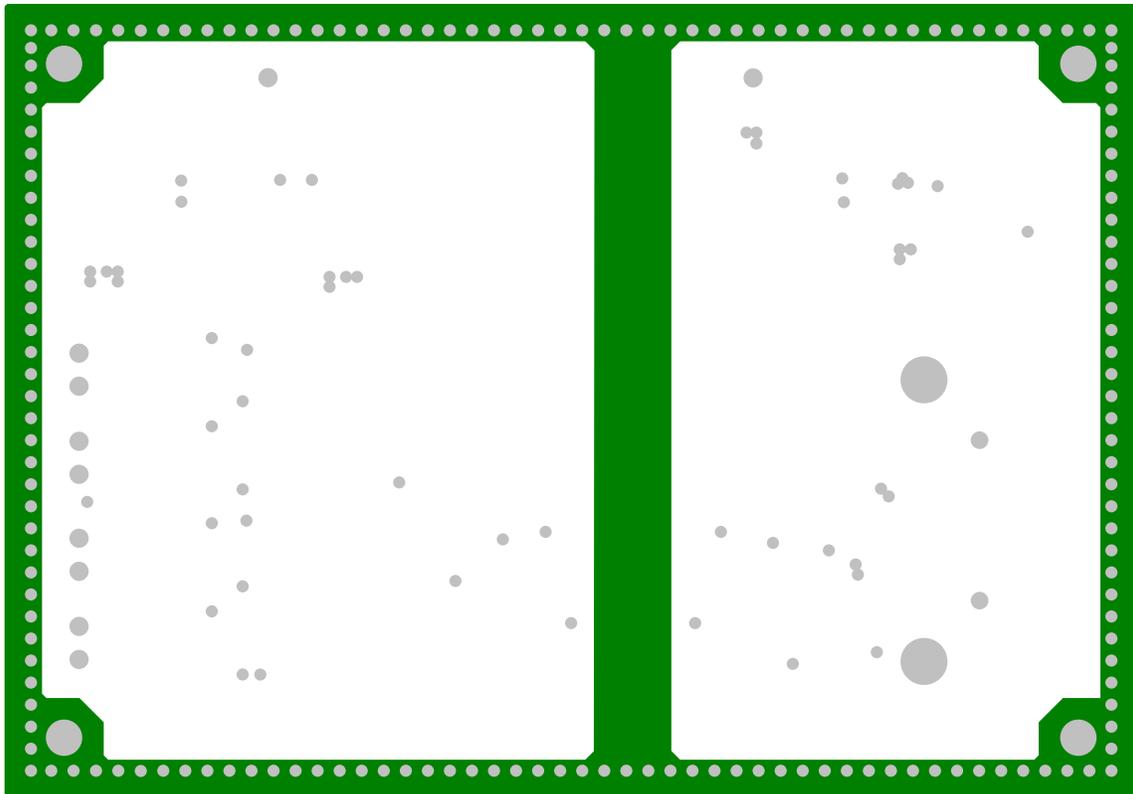


图 3-14. 内接地层

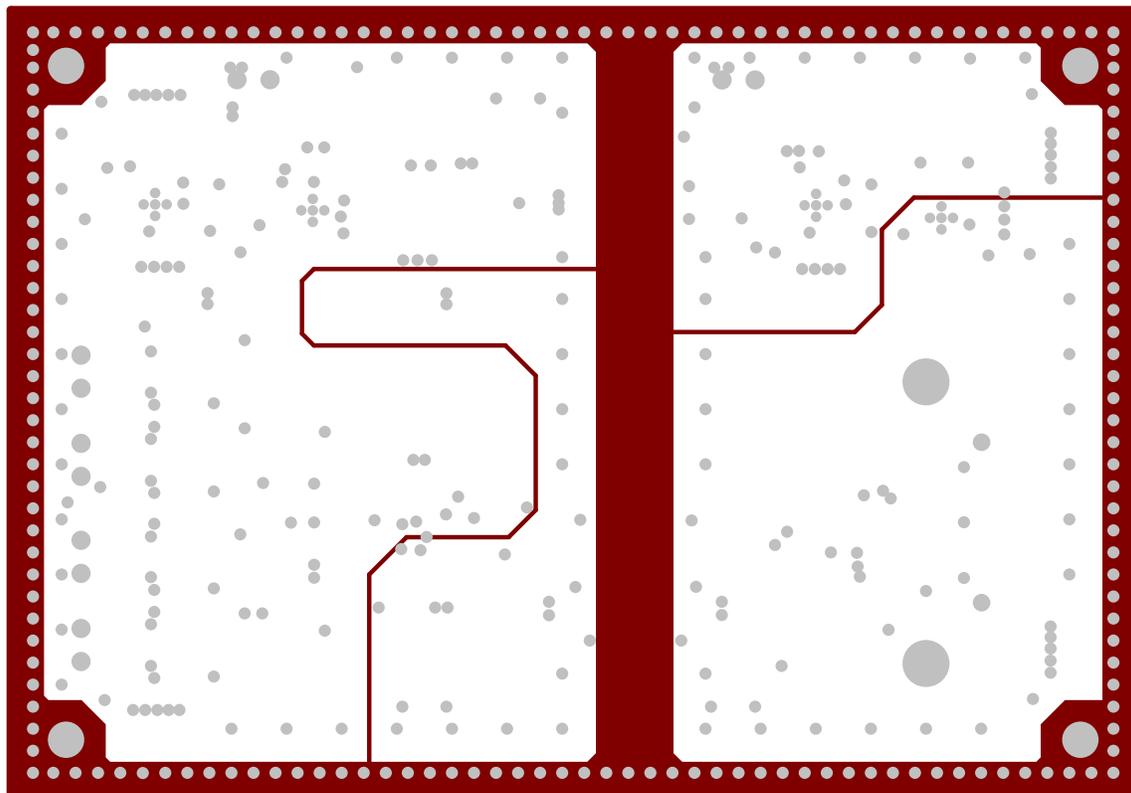


图 3-15. 内电源层

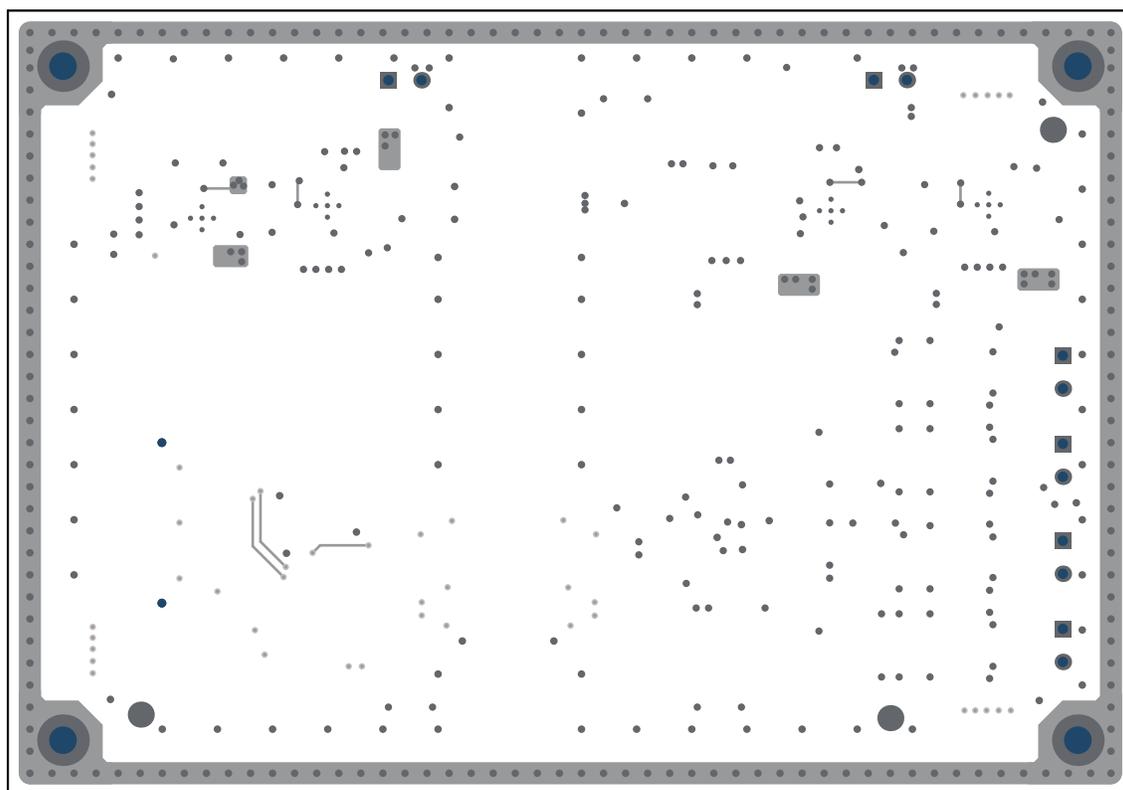


图 3-16. 底层和丝印

### 3.6 PCB 布局 - TC EMC 测试板 (2 层)

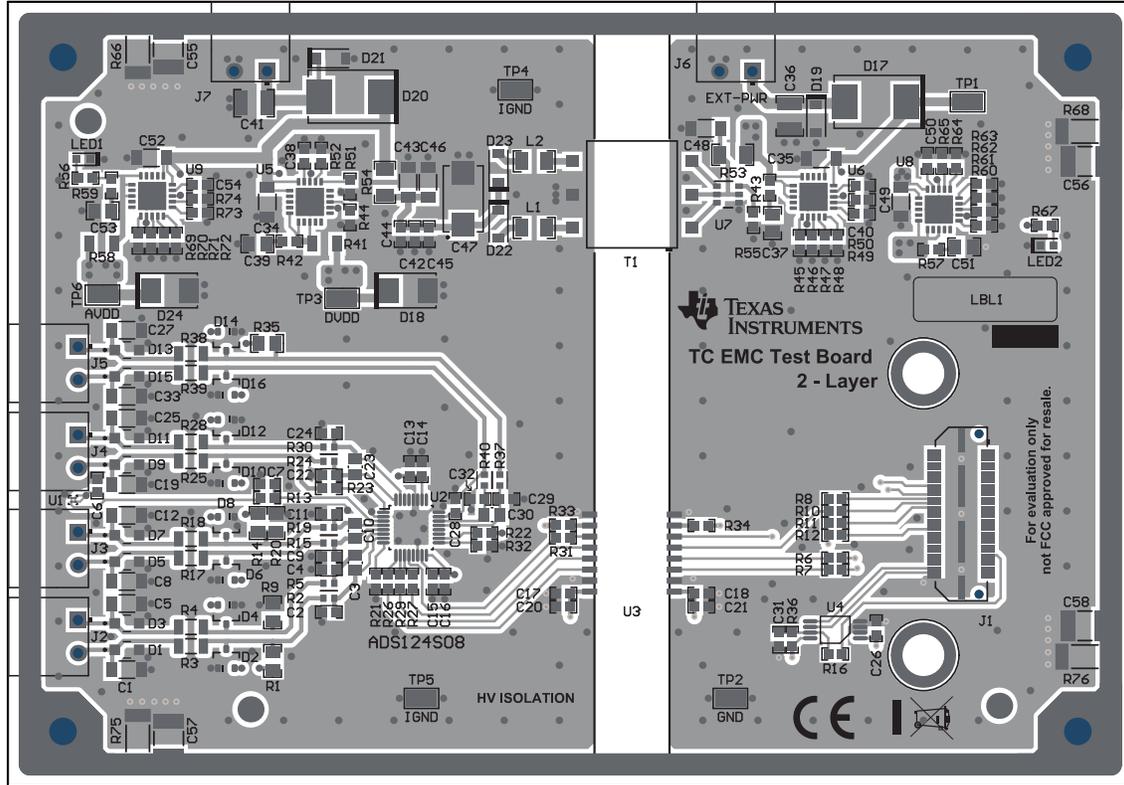


图 3-17. 顶层和丝印

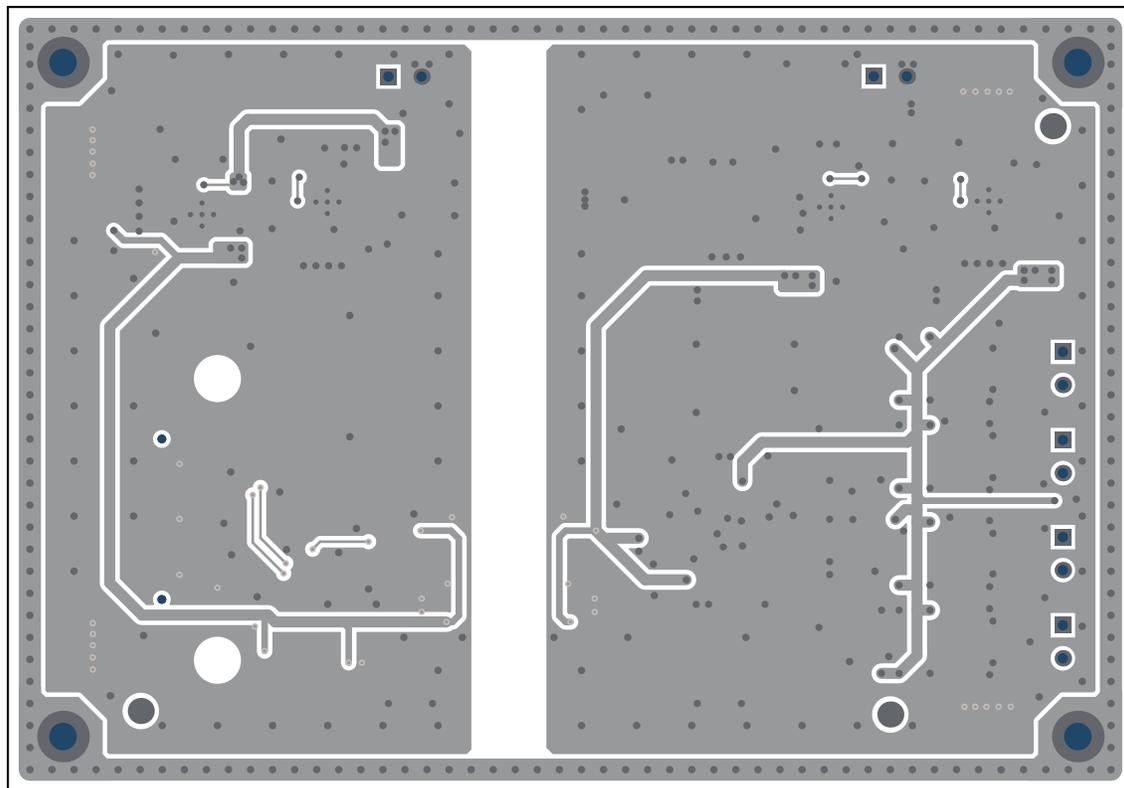


图 3-18. 底层和丝印

### 3.7 物料清单 - RTD EMC 测试板

C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7	C3216C0G2E153J160AA	TDK	电容, 陶瓷, 0.015 $\mu$ F, 250V, +/-5%, C0G/NP0, 1206
C8、C12、C13、C14、C15、C22、C26、C41	C0603C104K5RACTU	Kemet	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 50V, +/-10%, X7R, 0603
C9、C17、C18	GRM188R61E106MA73D	MuRata	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 25V, +/-20%, X5R, 0603
C10、C16、C19、C21、C23、C25、C28、C30	C0603C472J1GAC7867	Kemet	电容, 陶瓷, 4700pF, 100V, +/-5%, C0G/NP0, 0603
C11、C20、C24、C29	C0805C473J3GACTU	Kemet	电容, 陶瓷, 0.047 $\mu$ F, 25V, +/-5%, C0G/NP0, AEC-Q200 1 级, 0805
C27、C35、C37、C42、C47、C51	06033C105KAT2A	AVX	电容, 陶瓷, 1 $\mu$ F, 25V, +/-10%, X7R, 0603
C31、C32、C46、C49	C3216X5R1E476M160AC	TDK	电容, 陶瓷, 47 $\mu$ F, 25V, +/-20%, X5R, 1206_190
C33、C38	CL32B106KBJNNWE	Samsung Electro-Mechanics	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 50V, +/- 10%, X7R, 1210
C34、C36、C48、C50	C2012X5R1A476M125AC	TDK	电容, 陶瓷, 47 $\mu$ F, 10V, +/-20%, X5R, 0805
C39	GRM1885C1H102FA01J	MuRata	电容, 陶瓷, 1000pF, 50V, +/-1%, C0G/NP0, 0603
C40、C43、C45	CL31A106KBHNNNE	Samsung Electro-Mechanics	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 50V, +/-10%, X5R, 1206_190
C44	293D107X9020E2TE3	Vishay-Sprague	电容, 钽, 100 $\mu$ F, 20V, +/- 10%, 0.5 $\Omega$ , SMD
C52、C53、C54、C55	1812HC222KAT1A	AVX	电容, 陶瓷, 2200pF, 3000V, +/-10%, X7R, 1812
CLB1	6607652	CNC Teck	102-1092-BL-00100; 线缆, USB, A 公型转 B Micro 公型, 1M; 6607652 包装项
D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7	SMBJ14CA	Littelfuse	二极管, TVS, 双向, 14V, SMB
D8、D11	MBRS4201T3G	ON Semiconductor	二极管, 肖特基, 200V, 4A, SMC
D9	SMBJ3V3-E3/52	Vishay-Semiconductor	二极管, TVS, 单向, 3.3V, 7.3Vc, AEC-Q101, SMB
D10、D12	MMSZ4702T1G	ON Semiconductor	二极管, 齐纳, 15V, 500mW, SOD-123
D13、D14	MBR0520LT1G	ON Semiconductor	二极管, 肖特基, 20V, 0.5A, SOD-123
D15	SMBJ5.0A-13-F	Diodes Inc.	二极管, TVS, 单向, 5V, 9.2Vc, SMB
H1、H2、H3、H4	1891	Keystone	六角螺柱, 4-40, 铝, 1/4 英寸
H5、H6	9774050360R	Würth Elektronik	圆形电路板衬垫 M3 钢制 5MM
HS1、HS2、HS3、HS4	PMSSS 440 0025 PH	B&F Fastener Supply	机械螺丝, 飞利浦盘形头 4-40
HS5、HS6	RM3X4MM 2701	APM HEXSEAL	机械螺钉盘 PHILLIPS M3
J1	QTH-030-01-L-D-A	Samtec	接头 (带护罩), 19.7mil, 30x2, 金, SMT
J2	1803293	Phoenix Contact	端子块, 4 位, 3.81mm, 锡, R/A, TH
J3、J4	1803277	Phoenix Contact	接线端子, 2x1, 3.81mm, R/A, TH
L1、L2	HZ1206D102R-10	Laird-Signal Integrity Products	铁氧体磁珠, 1000 $\Omega$ @ 100MHz, 0.4A, 1206
LBL1	THT-14-423-10	Brady	热转印打印标签, 0.650" (宽) x 0.200" (高) - 10,000/卷
LED1	150060RS75000	Würth Elektronik	LED, 红色, SMD
LED2	LTST-C193TGKT-5A	Lite-On	LED, 绿色, SMD
R1、R16	RN73C2A3K4BTDF	TE Connectivity	3.4k $\Omega$ $\pm$ 0.1% 0.1W, 1/10W 片式电阻器 0805 (公制 2012) 薄膜
R2	CRCW08050000Z0EAHP	Vishay-Dale	电阻, 0, 5%, 0.333W, AEC-Q200 0 级, 0805

R3、R7、R9、R11、R12、R15、R17	RQ73C2B590RBTB	TE	RQ732B 1206 590 Ω 0.4W 10ppm/°C 0.1% 200V
R4、R5、R6、R8、R10、R13	RC0603FR-0749R9L	Yageo	电阻，49.9，1%，0.1W，0603
R14	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale	电阻，0，5%，0.1W，0603
R18	RNCF0805TKY2K00	Stackpole Electronics	2k Ω，±0.01%，0.125W，1/8W 片上电阻 0805 (2012 公制)，汽车 AEC-Q200 薄膜
R19、R31、R34、R36、R40、R41、R44、R47、R48、R51、R57、R60、R61、R65、R68	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale	电阻，0，5%，0.1W，AEC-Q200 0 级，0603
R20	RC0603FR-07100KL	Yageo	电阻，100k，1%，0.1W，0603
R21、R22、R25、R28	RQ73C1J4K99BTD	TE Connectivity	4.99k Ω ±0.1% 0.15W，片上电阻 0603 (公制 1608)，抗硫化，汽车 AEC-Q200，薄膜
R23、R24、R26、R27	CRCW060349R9FKEA	Vishay-Dale	电阻，49.9，1%，0.1W，AEC-Q200 0 级，0603
R29、R30	CRCW060310K0FKEA	Vishay-Dale	电阻，10.0k，1%，0.1W，AEC-Q200 0 级，0603
R32、R35	RQ73C1J4K75BTD	TE	4.75k Ω ±0.1% 0.15W，片上电阻 0603 (公制 1608)，抗硫化，汽车 AEC-Q200，薄膜
R33	RC0603FR-0710KL	Yageo	电阻，10.0k，1%，0.1W，0603
R37、R54	5108	Keystone	电阻，0，1%，0.5W，1206
R38、R39、R53、R55	ERJ-3RSFR10V	Panasonic	电阻，0.1，1%，0.1W，AEC-Q200 0 级，0603
R49、R50	CRCW12060000Z0EAHP	Vishay-Dale	电阻，0，0.75W，AEC-Q200 0 级，1206
R52、R63	RC0603FR-076K65L	Yageo	电阻，6.65k，1%，0.1W，0603
R62、R64、R71、R72	CHV2010-FX-3304ELF	Bourns	电阻，SMD，3.3m Ω，1%，1/2W，2010
T1	750315240	Würth Elektronik	变压器，110μH，SMT
TP4、TP5	5015	Keystone	测试点，微型，SMT
U1	ADS124S08IPBSR	德州仪器 (TI)	用于精密传感器测量且具有 PGA 和电压基准的 24 位、4kSPS、12 通道 Δ-Σ ADC，PBS0032A (TQFP-32)
U2	ISO7741DWR	德州仪器 (TI)	具有强大 EMC 性能的高速低功耗四通道数字隔离器，DW0016B (SOIC-16)
U3	BR24G32FVT-3AGE2	Rohm	I2C BUS EEPROM (2 线)，TSSOP-B8
U4、U5、U7、U8	TPS7A4700RGWR	德州仪器 (TI)	36V、1A、4.17 μ VRMS 射频低压降 (LDO) 稳压器，RGW0020A (VQFN-20)
U6	SN6505BDBVR	德州仪器 (TI)	1A、420kHz 低噪声变压器驱动器，DBV0006A (SOT-23-6)
R42、R43、R45、R46、R56、R58、R59、R66、R67、R69、R70	CRCW06030000Z0EA (未安装)	Vishay-Dale	电阻，0，5%，0.1W，AEC-Q200 0 级，0603
TP3、TP6、TP7、TP8、TP9	5015 (未安装)	Keystone	测试点，微型，SMT

### 3.8 物料清单 - TC EMC 测试板

C1、C5、C8、C12、C19、C25、C27、C33	C3216C0G2E153J160AA	TDK	电容，陶瓷，0.015μF，250V，+/-5%，C0G/NP0，1206_190
C2、C4、C9、C11、C22、C24、C29、C32	C0603C472J1GAC7867	Kemet	电容，陶瓷，4700pF，100V，+/-5%，C0G/NP0，0603

C3、C10、C23、C30	C0805C473J3GACTU	Kemet	电容, 陶瓷, 0.047 $\mu$ F, 25V, +/-5%, C0G/NP0, AEC-Q200 1 级, 0805
C6、C13、C15、C16、C17、C18、C26、C31、C44	C0603C104K5RACTU	Kemet	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 50V, +/-10%, X7R, 0603
C14、C20、C21	GRM188R61E106MA73D	MuRata	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 25V, +/-20%, X5R, 0603
C28、C38、C40、C45、C50、C54	06033C105KAT2A	AVX	电容, 陶瓷, 1 $\mu$ F, 25V, +/-10%, X7R, 0603
C34、C35、C49、C52	C3216X5R1E476M160AC	TDK	电容, 陶瓷, 47 $\mu$ F, 25V, +/-20%, X5R, 1206
C36、C41	CL32B106KBJNNWE	Samsung Electro-Mechanics	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 50V, +/- 10%, X7R, 1210
C37、C39、C51、C53	C2012X5R1A476M125AC	TDK	电容, 陶瓷, 47 $\mu$ F, 10V, +/-20%, X5R, 0805
C42	GRM1885C1H102FA01J	MuRata	电容, 陶瓷, 1000pF, 50V, +/-1%, C0G/NP0, 0603
C43、C46、C48	CL31A106KBHNNNE	Samsung Electro-Mechanics	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 50V, +/-10%, X5R, 1206_190
C47	293D107X9020E2TE3	Vishay-Sprague	电容, 钽, 100 $\mu$ F, 20V, +/- 10%, 0.5 $\Omega$ , SMD
C55、C56、C57、C58	1812HC222KAT1A	AVX	电容, 陶瓷, 2200pF, 3000V, +/-10%, X7R, 1812
CLB1	6607652	CNC Teck	102-1092-BL-00100; 线缆, USB, A 公型转 B Micro 公型, 1M; 6607652 包装项
D1、D3、D5、D7、D9、D11、D13、D15	PTVS33VS1UR,115	Nexperia	PTVS 系列 400 W 53.3 V 单向表面贴装 TVS 二极管 - SOD-123W
D17、D20	MBRS4201T3G	ON Semiconductor	二极管, 肖特基, 200V, 4A, SMC
D18	SMBJ3V3-E3/52	Vishay-Semiconductor	二极管, TVS, 单向, 3.3V, 7.3Vc, AEC-Q101, SMB
D19、D21	MMSZ4702T1G	ON Semiconductor	二极管, 齐纳, 15V, 500mW, SOD-123
D22、D23	MBR0520LT1G	ON Semiconductor	二极管, 肖特基, 20V, 0.5A, SOD-123
D24	SMBJ5.0A-13-F	Diodes Inc.	二极管, TVS, 单向, 5V, 9.2Vc, SMB
H1、H2、H3、H4	1891	Keystone	六角螺柱, 4-40, 铝, 1/4 英寸
H5、H6	9774050360R	Würth Elektronik	圆形电路板衬垫 M3 钢制 5MM
HS1、HS2、HS3、HS4	PMSSS 440 0025 PH	B&F Fastener Supply	机械螺丝, 飞利浦盘形头 4-40
HS5、HS6	RM3X4MM 2701	APM HEXSEAL	机械螺钉盘 PHILLIPS M3
J1	QTH-030-01-L-D-A	Samtec	接头 (带护罩), 19.7mil, 30x2, 金, SMT
J2、J3、J4、J5、J6、J8	1803277	Phoenix Contact	接线端子, 2x1, 3.81mm, R/A, TH
L1、L2	HZ1206D102R-10	Laird-Signal Integrity Products	铁氧体磁珠, 1000 $\Omega$ @ 100MHz, 0.4A, 1206
LBL1	THT-14-423-10	Brady	热转印打印标签, 0.650" (宽) x 0.200" (高) - 10,000/卷
LED1	150060RS75000	Würth Elektronik	LED, 红色, SMD
LED2	LTST-C193TGKT-5A	Lite-On	LED, 绿色, SMD
R1、R9、R14、R20、R35	CRCW080510M0FKEA	Vishay-Dale	电阻, 10.0M, 1%, 0.125W, AEC-Q200 0 级, 0805
R2、R5、R15、R19、R24、R30、R37、R76	RQ73C1J4K99BTD	TE Connectivity	4.99k $\Omega$ $\pm$ 0.1% 0.15W, 片上电阻 0603 (公制 1608), 抗硫化, 汽车 AEC-Q200, 薄膜
R3、R4、R17、R18、R25、R28、R38、R39	RQ73C2B590RBTB	TE	RQ732B 1206 590 $\Omega$ 0.4W 10ppm/ $^{\circ}$ C 0.1% 200V

R6、R7、R8、R10、R11、R12	RC0603FR-0749R9L	Yageo	电阻, 49.9, 1%, 0.1W, 0603
R13、R21、R32、R43、R44、R47、R50、R51、R54、R60、R63、R64、R68、R71	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale	电阻, 0, 5%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603
R16、R23	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale	电阻, 0, 5%, 0.1W, 0603
R22	RC0603FR-07100KL	Yageo	电阻, 100k, 1%, 0.1W, 0603
R26、R27、R29、R31	CRCW060349R9FKEA	Vishay-Dale	电阻, 49.9, 1%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603
R33、R34、R36	CRCW060310K0FKEA	Vishay-Dale	电阻, 10.0k, 1%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603
R40、R57	5108	Keystone	电阻, 0, 1%, 0.5W, 1206
R41、R42、R56、R58	ERJ-3RSFR10V	Panasonic	电阻, 0.1, 1%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603
R52、R53	CRCW12060000Z0EAHP	Vishay-Dale	电阻, 0, 0.75W, AEC-Q200 0 级, 1206
R55、R66	RC0603FR-076K65L	Yageo	电阻, 6.65k, 1%, 0.1W, 0603
R65、R67、R74、R75	CHV2010-FX-3304ELF	Bourns	电阻, SMD, 3.3m $\Omega$ , 1%, 1/2W, 2010
T1	750315240	Würth Elektronik	变压器, 110 $\mu$ H, SMT
TP1、TP2	5015	Keystone	测试点, 微型, SMT
U1	LMT70YFQR	德州仪器 (TI)	+/- 0.1°C 精密模拟温度传感器, YFQ0004ACAC (DSBGA-4)
U2	ADS124S08IPBSR	德州仪器 (TI)	用于精密传感器测量且具有 PGA 和电压基准的 24 位、4kSPS、12 通道 $\Delta$ - $\Sigma$ ADC, PBS0032A (TQFP-32)
U3	ISO7741DWR	德州仪器 (TI)	具有强大 EMC 性能的高速低功耗四通道数字隔离器, DW0016B (SOIC-16)
U4	BR24G32FVT-3AGE2	Rohm	I2C BUS EEPROM (2 线), TSSOP-B8
U5、U6、U8、U9	TPS7A4700RGWR	德州仪器 (TI)	36V、1A、4.17 $\mu$ VRMS 射频低压降 (LDO) 稳压器, RGW0020A (VQFN-20)
U7	SN6505BDBVR	德州仪器 (TI)	1A、420kHz 低噪声变压器驱动器, DBV0006A (SOT-23-6)
C7	C0603C472J1GAC7867	Kemet	电容, 陶瓷, 4700pF, 100V, +/-5%, C0G/NP0, 0603
D2、D4、D6、D8、D10、D12、D14、D16	BAV199-TP	Micro Commercial Components	二极管, 开关, 70V, 0.215A, SOT-23
FID1、FID2、FID3、FID4、FID5、FID6	不适用	不适用	基准标记。没有需要购买或安装的元件。
R45、R46、R48、R49、R59、R61、R62、R69、R70、R72、R73	CRCW06030000Z0EA	Vishay-Dale	电阻, 0, 5%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0603
sTP3、TP4、TP5、TP6	5015	Keystone	测试点, 微型, SMT

## 4 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。本应用手册为开发高精度温度测量系统同时确保强大 EMC 性能提供了实用的深入指导。该应用手册涵盖的主要主题包括：

1. **EMC 合规性设计**：保护电路设计和符合 EMC 标准的 2 层及 4 层电路板优化 PCB 布局的实用指南。
2. **测量基础知识**：详细说明了各种 RTD 和 TC 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. **RTD 系统**：在  $-200^{\circ}\text{C}$  到  $+850^{\circ}\text{C}$  的整个范围内，总校准系统误差小于  $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ 。
  - b. **TC 系统**：在  $-250^{\circ}\text{C}$  到  $+1372^{\circ}\text{C}$  的整个范围内，总校准系统误差小于  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。
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。

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 标准的温度测量系统。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。

## 5 参考资料

德州仪器 (TI), [RTD 测量基本指南](#) 应用手册。

德州仪器 (TI), [热电偶测量基本指南](#), 应用手册。

德州仪器 (TI), [用于在 RTD 测量中保护 ADC ADS124S08 免受 EOS 影响的电路](#), 应用手册。

德州仪器 (TI), [ADS124S08 : 适用于传感器测量且具有 PGA 和电压基准的 24 位、4kSPS、12 通道  \$\Delta\$ - \$\Sigma\$  ADC](#), 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、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