

## 按照IEC 61000-4-x和CISPR 11标准测试、采用AD4111、 适合工业自动化应用的模拟输入设计

作者：李可 Li Ke

### 简介

AD4111集成了低噪声、快速建立、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型模数转换器(ADC)和模拟前端，支持全差分或单端、双极性 $\pm 10$  V电压输入和单端20 mA输入。AD4111设计用于工业自动化应用的可编程逻辑控制器(PLC)和分布式控制系统(DCS)模块。

本应用笔记详细介绍了AD4111电磁兼容性(EMC)印刷电路板(PCB)的功能，该电路板可与AD4111一起使用，支持典型的 $\pm 10$  V电压和0 mA至20 mA电流输入。电路板设计展示

了一种针对工业自动化应用的验证EMC的解决方案。IEC 61000-4-x系列标准在系统层面讨论电气和电子设备抗扰度的评估。

AD4111 EMC测试板已经过一系列测试，以确保电路性能不受辐射射频(RF)或传导RF干扰的影响，并具有足够的抗静电放电(ESD)、电快速瞬变(EFT)和浪涌的能力。该板还针对CISPR 11进行了测试，其辐射发射水平远低于A类限值。

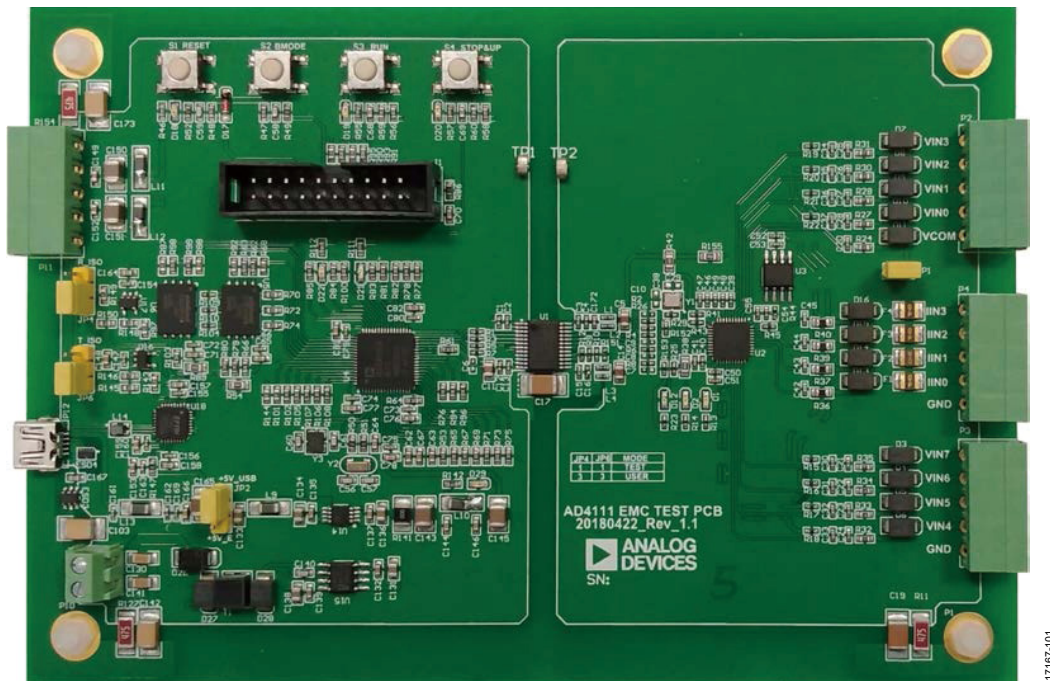


图1. AD4111 EMC测试板照片

## 目录

简介.....	1	电压源保护.....	7
修订历史.....	2	ESD保护.....	7
系统设计.....	3	AD4111 EMC测试板的EMC和EMI测量结果.....	8
AD4111 ADC说明.....	3	传导抗扰度.....	8
电路说明.....	3	静电放电抗扰度.....	9
电路评估与测试.....	4	电快速瞬变抗扰度.....	13
软件要求.....	5	浪涌抗扰度.....	16
设备要求.....	5	辐射抗扰度.....	19
标准和性能指标.....	5	辐射发射.....	22
印刷电路板.....	6	EMC板原理图与印刷电路板版图.....	24
器件放置和布局注意事项.....	6	订购信息.....	30
其他器件注意事项.....	7	物料清单.....	30

## 修订历史

2018年10月—修订版0：初始版

## 系统设计

### AD4111 ADC说明

AD4111是一款低功耗、低噪声、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC，集成了模拟前端(AFE)，支持全差分或单端双极性 $\pm 10$  V电压输入及0 mA至20 mA电流输入。对于完全建立的数据，AD4111的最大通道扫描速率为6.2 kSPS (161  $\mu$ s)。

嵌入式2.5 V、低漂移(5 ppm/ $^{\circ}$ C)带隙内部基准电压源(带输出基准电压缓冲器)减少了外部元件数量。数字滤波器提供灵活的设置，包括以27.27 SPS输出数据速率实现50 Hz和60 Hz同时抑制。用户可根据应用中每个通道的需求选择不同的滤波器设置。自动通道序列器支持ADC转接每个使能的通道。

AD4111的精密性能通过集成ADI公司专有的*iPassives*<sup>™</sup>技术而实现。该器件经过工厂校准，实现了非常高的额定精度。AD4111具有独特的电压输入开路检测功能(正在申请专利)，可用于系统级诊断。该器件采用3 V或5 V单电源供电，很容易用于电气隔离应用。

有关详细信息，请参阅AD4111数据手册。

### 电路说明

AD4111专为涉及恶劣工业环境的PLC和DCS应用而设计。

AD4111还符合IEC 6100-4-x和CISPR 11标准。

图2所示电路展示了一个采用AD4111的典型多通道、分組隔离、工业电压和电流输入模块，适用于恶劣的EMI和EMC状况。

在示例电路中，ADuCM3029超低功耗Arm<sup>®</sup> Cortex-M3微控制器单元(MCU)处理本地板载控制和与主机的数据通信。ADuM5411四通道隔离器集成DC-DC转换器，可实现整洁稳健的隔离模拟输入设计解决方案，采用3 V或5 V单电源供电。AD4111可以同时处理电流输入(单端或双极性差分电压输入)。

两个低压差稳压器(LDO)大大简化了示例电路中的板载电源，为电路板功能提供必要的电压。ADP7142将6 V至40 V输入电压降至5 V，为ADuM5411的初级端供电。ADP124将ADP7142输出调节至3.3 V，以用于微处理器和ADuM5411的数字隔离器部分。

这些电源的稳健性无意与典型工业自动化控制系统中的电源模块或背板电源相媲美，仅为供电电路实现了基本保护。该AD4111 EMC测试板可以选择使用主机的5 V通用串行总线(USB)电源正常运行，同时通过非隔离通用异步接收器发送器(UART)连接到USB端口与主机通信。当进行电磁兼容测试时，AD4111 EMC测试板改由一个独立的12 V直流电源供电，而数据通过板外隔离数据链路发送到主机。

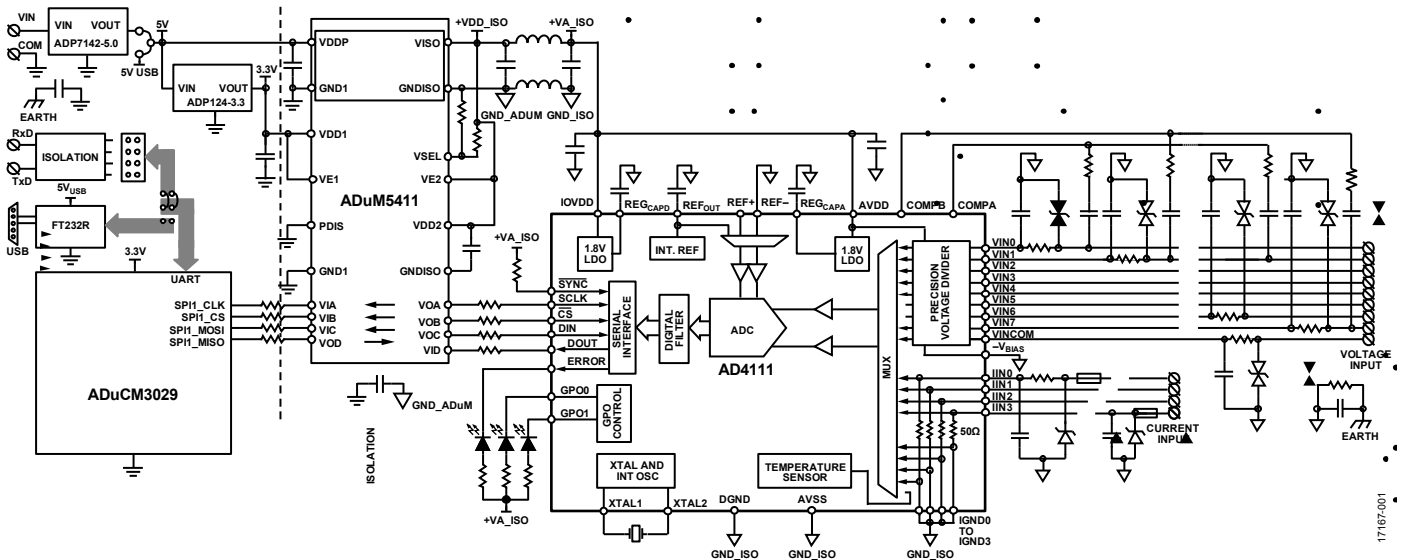


图2. AD4111 EMC测试板电路框图

## 电路评估与测试

AD4111 EMC测试板可以连接到主机来运行，或在独立模式下运行。工作参数在板载闪存中编程。在辐射测试期间，测试板与主机断开连接，而固件运行，硬件保持工作状态。在抗扰度测试中，测试板通过隔离数据链路连接到主机。主机上的串行端口数据捕获程序从AD4111接收ADC转换样本。

EMC测试板上的AD4111仅进行过器件级的标准工厂校准，没有做进一步的电路板级校准。

当输出数据速率设置为1007 SPS时，AD4111配置为连续对以下电压和电流输入通道顺序采样：VIN0至VIN1、VIN6、VIN2至VIN3、VIN7、VIN4至VIN5、IIN3、IIN2、IIN1和IIN0。当评估EMC测试的性能时，VIN2至VIN3代表差分电压输入通道，VIN7代表单端电压输入通道，IIN3代表电流输入通道。表1详细列出了EMC测试中的其他连接。

表1. EMC测试中的AD4111引脚连接

AD4111引脚	EMC测试中的连接
AVDD	5 V
IOVDD	5 V
AVSS	GND_ISO
DGND	GND_ISO
REF+	内部使能
VIN0至VIN1	GND_ISO
VIN6	GND_ISO
VIN2至VIN3	2.5 V
VIN7	2.5 V
VIN4至VIN5	GND_ISO
IIN3	2.5 V
IIN2	GND_ISO
IIN1	GND_ISO
IIN0	GND_ISO

在每次可能的破坏性EMC测试之前和之后，测试板采用独立的精密台式数字万用表(DMM)对2.5 V外部信号源进行采样。转换为电压或电流后，来自代表性通道的AD4111样本与同一期间DMM的测量结果进行比较，以量化误差。两个测量结果之间的偏差必须保持在预定范围内才能满足性能判据。最大允许误差为满量程的0.1%，这符合工业自动化应用的常见要求。

在非破坏性EMC测试期间，测试板利用台式DMM对2.5 V外部信号源进行采样。电压或电流测量值与DMM的测量值进行比较，以判断是否符合性能判据。

在辐射测试期间，电路板的模拟输入通道短接到隔离地。电路板与主机断开连接，而AD4111继续以1007 SPS的速率对每个通道中采样。此设置中的唯一辅助设备是12 V电池，用于为EMC测试板供电，假设其不会产生电磁辐射。EMC测试的通用设置如图3所示。

一对绞合引线（后接一个低通滤波器）探测精密信号源的输出。滤波后的输出通过一对绞合引线连接到DMM。DMM通过USB线缆连接到PC。主机上的RealTerm软件通过电隔离数据链路记录AD4111样本。对于每个EMC测试项目，EMC测试板都在电压输入模式和电流输入模式下进行测试。

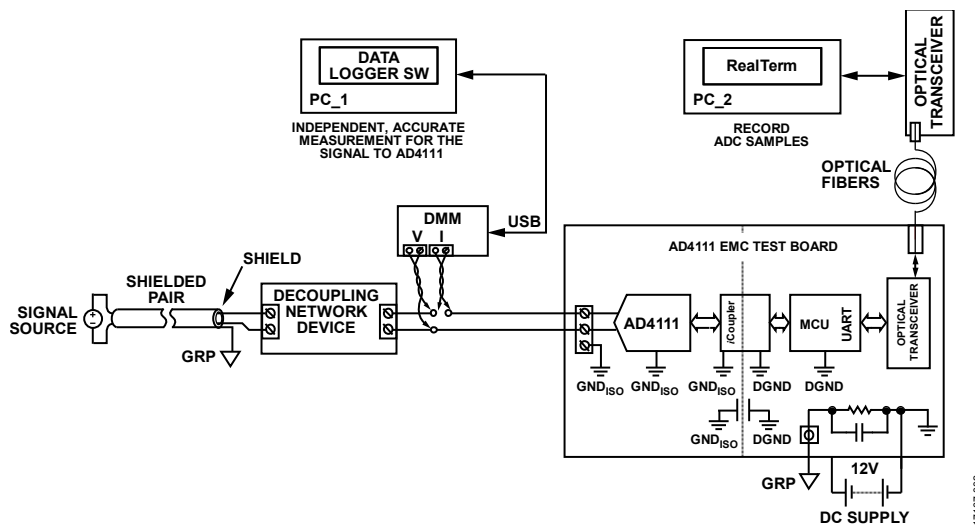


图3. 通用EMC测试设置

## 软件要求

要对AD4111执行EMC测试，需要以下软件：

- AD4111 EMC板上的固件版本为E0-01
- RealTerm: 串行/TCP终端2.0.0.70
- Keysight Technologies BenchVue软件2.6版

## 设备要求

要对AD4111执行EMC测试，需要以下设备：

- 光电USB收发器板
- 工业光缆
- 运行Windows® 7（64位版本，映像V3.0.2011.10.14）的PC
- 直流电源：Agilent 3630A或YUASA NP7-12
- 数字万用表：Keysight 33470A
- 精密信号源：ADR421
- 屏蔽双芯电缆，铝箔/编织
- Schaffner FN353Z-30-33

## 标准和性能指标

此测试板设计所针对的EMC和电磁干扰(EMI)测试项目、限值以及性能判据根据IEC 61131-2进行定义。根据该标准选择了以下六项适用的测试：

- IEC 61000-4-2
- IEC 61000-4-3
- IEC 61000-4-4
- IEC 61000-4-5
- IEC 61000-4-6
- CISPR 11

根据这些标准，性能指标分类如表4所示。

AD4111 EMC测试板经过测试，符合表2和表3中详列的CISPR 11和IEC 61000-4-x标准。

表2. 辐射性能概览

测试	基本标准	频率范围	限值	实测最小裕量	结果
辐射发射	CISPR 11 Class A	30 MHz至1000 MHz	参见表11和表12	7.5 dB $\mu$ V	通过

表3. 抗扰度性能概览

测试	基本标准	测试级别	性能判据	实测最小裕量	结果
传导抗扰度	IEC 61000-4-6	10 V/m	A	见表5	通过
辐射抗扰度	IEC 61000-4-3	10 V/m	A	见表9	通过
静电放电	IEC 61000-4-2	$\pm 6$ kV	B	见表6	通过
电快速瞬变脉冲群	IEC 61000-4-4	$\pm 2$ kV	B	见表7	通过
浪涌	IEC 61000-4-5	$\pm 2$ kV	B	见表8	通过

表4. 性能判据

性能判据	说明
A	在制造商指定的误差范围内正常工作。
B	功能暂时丧失或性能下降，干扰消除后不复存在。被测设备无需操作员干预即可恢复正常性能。
C	功能暂时丧失或性能下降，性能校正需要操作员干预，如手动重启、断电或上电。
D	无法恢复的功能丧失或性能下降。硬件或软件永久性损坏，或者数据丢失。

## 印刷电路板

AD4111 EMC测试板是与判据AD4111评估板EVAL-AD4111SDZ不同的独立设计，后者旨在提供最佳ADC性能，但未针对EMC和EMI测试进行优化。

AD4111 EMC测试板基于FR4四层PCB。PCB堆叠如图4所示。顶面和底面均有0.5盎司铜箔。测试板的系统侧（由LDO、微处理器、ADuM5411的初级端和UART到USB收发器组成）位于四层结构上。内层有1盎司铜。这些层设计用于在不直接承载AD4111的电路板部分提供最佳EMC和EMI性能。

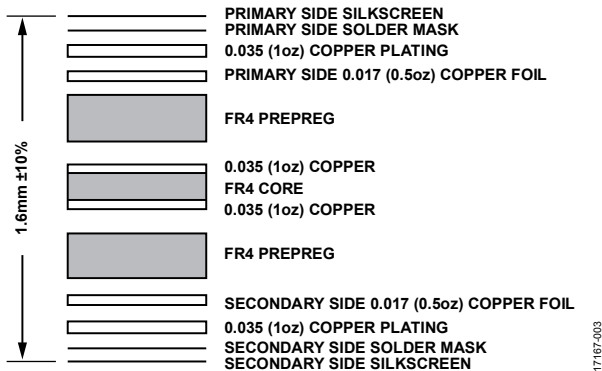


图4. PCB堆叠

EMC板的现场侧包括AD4111及其全部外设，位于一个伪二层结构上，其中用于接地和电源平面的内层被完全蚀刻掉。这些层旨在演示AD4111在低成本双层PCB上实现额定工作性能以及EMC和EMI性能的可行性。

### 器件放置和布局注意事项

由于AD4111的分辨率较高且噪声电平很低，因此应谨慎对待去耦、接地和布局。模拟和数字部分在EMC板上是分开的，并局限在电路板的某些区域内。当使用2层以上的印刷电路板时，AD4111放置在一个实心接地层上，AVSS和

DGND引脚均焊接到该接地层。AD4111的数字接口侧靠近隔离器，模拟侧面对电压和电流输入端子。电源通过0.1  $\mu$ F电容与10 nF电容的并联组合去耦。两者都是低等效串联电阻(ESR)陶瓷电容，采用表面贴装封装，尽可能靠近AD4111电源引脚。

数字线路上的几十到几百欧姆的阻尼电阻会衰减互补金属氧化物半导体(CMOS)开关切换导致的电瞬态，帮助降低EMI。电阻还能减轻串行外设接口(SPI)中串联的铁氧体磁珠所引起的振铃效应。

在参考ADuM5411数据手册中关于改善辐射发射性能的建议时需要特别注意。 $V_{DD1}$ 引脚和 $GND_1$ 引脚之间， $V_{DDP}$ 引脚和 $GND_1$ 引脚之间， $V_{ISO}$ 引脚和 $GND_{ISO}$ 引脚之间，以及 $V_{DD2}$ 引脚和 $GND_{ISO}$ 之间引脚，有至少两个电容的并联组合用于抑制噪声和降低纹波。0.1  $\mu$ F和10 nF低ESR陶瓷电容在高频下提供低电感。10  $\mu$ F电容用于抑制纹波以及适当调节 $V_{DDP}$ 和 $V_{ISO}$ 。这两个电容均尽可能靠近ADuM5411电源引脚放置，使PCB走线长度最短。

表面贴装铁氧体磁珠(BLM15HD182SN1D)与 $V_{ISO}$ 和 $GND_{ISO}$ 引脚串联，以增加对高频电流的阻抗。在100 MHz到1 GHz之间，铁氧体磁珠的典型阻抗为2 k $\Omega$ ，可降低125 MHz初级侧开关频率以及250 MHz次级侧整流频率和谐波的辐射。 $V_{ISO}$ 通过短走线直接为 $V_{DD2}$ 供电。 $GND_{ISO}$ （引脚23）内部连接到其他 $GND_{ISO}$ 引脚。引脚23仅连接到旁路电容，如图5所示。

高压表面贴片(SMT)电容直接连接在 $GND_1$ （引脚12）和 $GND_{ISO}$ （引脚13）之间，以获得最佳性能。为了进一步降低辐射，可以运用PCB拼接电容，详见应用笔记AN-0971。

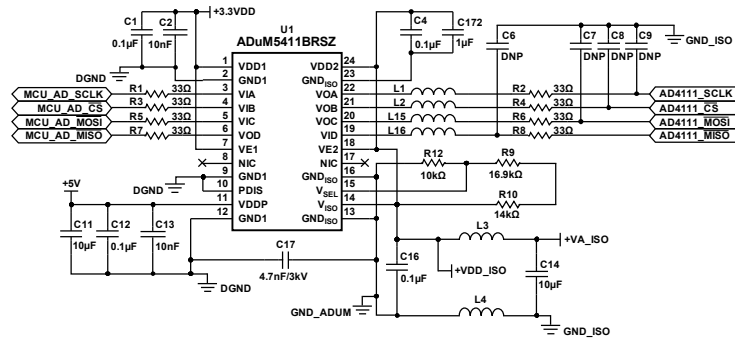


图5. ADuM5411旁路和外设

## 其他器件注意事项

AD4111 EMC测试板采用0.1μF、50 V/X5R、10%、低ESR陶瓷电容，封装尺寸C0402，作为测试板现场侧的去耦电容。使用低ESR电容是权衡性能、降额、成本和节省空间等因素的结果。系统微处理器侧的去耦电容为0.1μF、50 V/X7R、10%、低ESR陶瓷电容，封装尺寸为C0603。

## 电压源保护

EMC和EMI评估与演示的范围集中在AD4111及其配套器件上。AD4111 EMC测试板上的电源电路为电路板功能提供必要的电压。这些电源电路的稳健性无意与工业自动化控制系统中的电源模块或背板电源相媲美，故仅为供电电路实现了基本保护。1 nF电容放置在电源输入端子的每个引脚旁，连接到受保护地，瞬态能量可通过3.3 nF/3 kV电容放电至地。4.7 MΩ电阻将能量释放到大地，以免其在受保护地上积聚。正向串联二极管以防止电源输入接线错误。SMBJ26CA瞬态电压抑制(TVS)二极管用于箝位瞬态电压，使之不高于24 V（标称值）。共模电感阻止下游电路的辐射逸出。电感之后的第二个SMCJ26CA TVS二极管为瞬态提供进一步的箝位。

## ESD保护

EMC测试板上必须存在适当的ESD保护电路。保护由限流电阻、瞬态电压箝位和瞬态能量转移电容组成。

针对AD4111电压输入通道中的EMC和EMI，最少须有三个元件：一个180Ω电阻、一个4.7 nF电容和一个TVS器件。AD4111 VINx引脚和端子板之间的走线上的180Ω电阻与4.7 nF/50 V C0G GRT155R71H472KE01D电容一起为ADC提供抗混叠滤波。在EMC测试期间，RC滤波器可以衰减RF干扰。由于AD4111 VINx引脚内部连接到约1 MΩ电阻，所以180Ω串联电阻在AD4111和TVS箝位的高电压之间会提供一些额外的隔离。在EMC事件期间，TVS器件对于箝位电路板上的电瞬态至关重要。在AD4111和输入端子板之间插入SMAJ33CA-TR。用短而粗的走线将TVS引脚连到VINx终端引脚。

针对AD4111电流输入通道中的EMC和EMI，最少须有四个元件：一个PTC可复位保险丝、一个180Ω电阻、一个TVS器件和一个GRM1555C1H471JA01D电容。当流过其中的电流超过150 mA时，保险丝断路。AD4111 IINx引脚与端子板之间的走线上的180 Ω电阻有助于限制进出器件的瞬态电流，因为IINx的输入电阻约为60 Ω。在EMC事件期间，TVS器件对于箝位电路板上的电瞬态至关重要。在输入端子板之后和限流电阻之前插入SMA6J10A-TR。用短而粗的走线将TVS引脚连到VINx终端。位于限流电阻之后的470 pF/50 V C0G GRM1555C1H471JA01D电容将少量高频瞬态转移到隔离接地。

## AD4111 EMC测试板的EMC和EMI测量结果

### 传导抗扰度

根据IEC 61000-4-6, 被测设备(EUT)放置在高于参考地平面0.1米高的绝缘支架上。从EUT接出的所有电缆都支撑在参考地平面上方至少30 mm的高度。干扰通过耦合/去耦网络(CDN) KEMA 801A注入。电缆通过衰减箝位器KEMA 801A去耦。扫描频率范围为150 kHz至80 MHz (10 V/m), 使用1 kHz正弦波调制的80%幅度的干扰信号。以递增方式扫描频率, 步长最初为起始频率的1%, 然后是前一频率值的1%。每个频率下的调幅载波的停留时间为1秒。

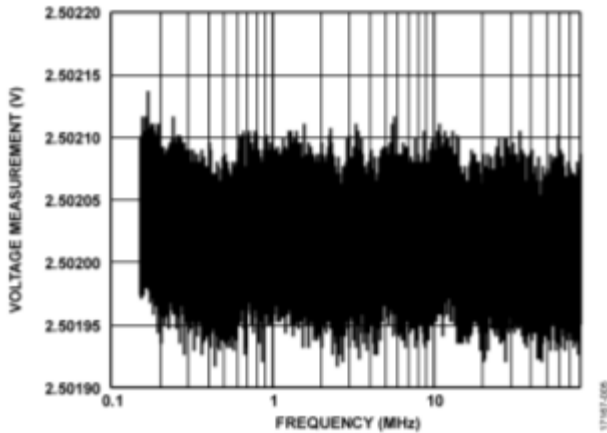


图6. 电压测量与频率的关系, VIN2至VIN3在10 V/m下

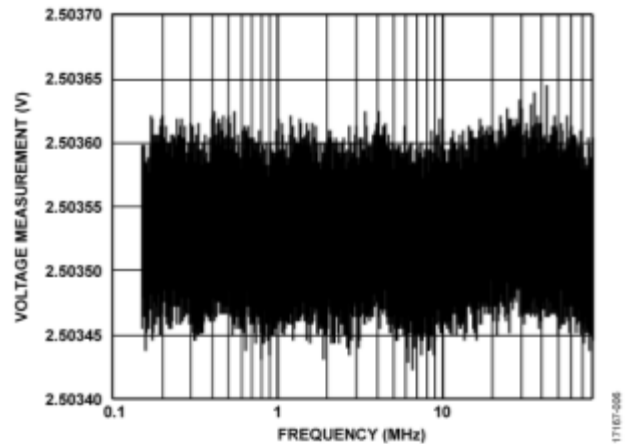


图7. 电压测量与频率的关系, VIN7在10 V/m下

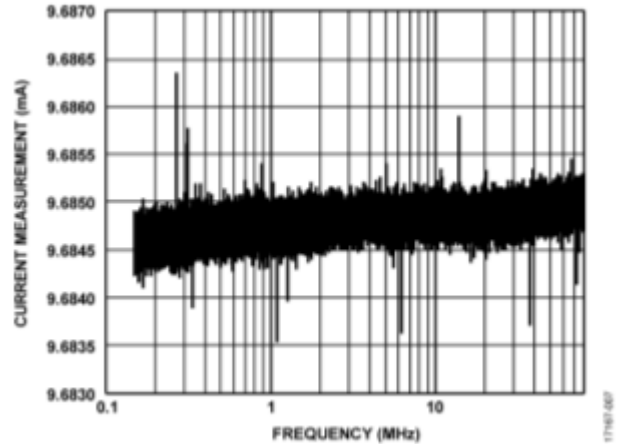


图8. 电流测量与频率的关系, IIN3在10 V/m下

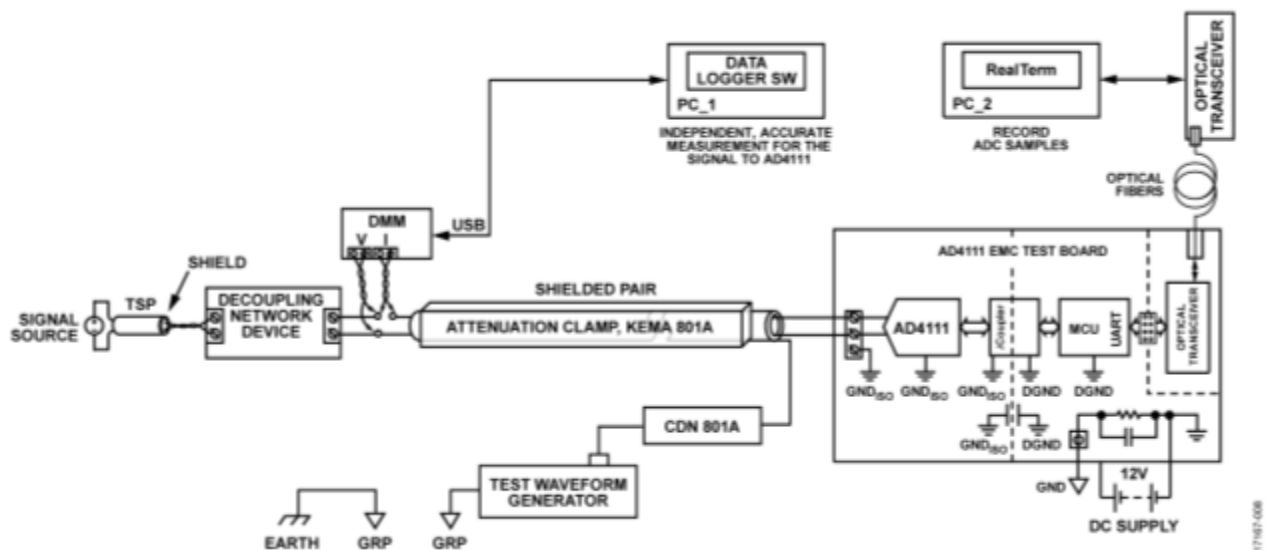


图9. IEC 61000-4-6测试设置连接图





图10. IEC 61000-4-6测试设置照片

表5. 61000-4-6测试级别和结果

输入模式	平均值	放电期间		偏差	通过或失败
		最小值	最大值		
VIN2至VIN3	2.502017	2.501917	2.502137	-10 ppm、12 ppm × 满量程(FS)	通过, 判据A
VIN7	2.503531	2.503422	2.503645	-4 ppm、5 ppm × FS	通过, 判据A
IIN3	9.684782	9.681976	9.688193	-14 ppm、18 ppm × 满量程范围(FSR)	通过, 判据A

**ESD抗扰度**

根据IEC 61000-4-2, 测试设置包括一个0.8 m高的非导电工作台, 其立在参考地平面上。桌面上放置一个1.6 m × 0.8 m的水平耦合平面(HCP)。EUT及其电缆通过0.5 mm厚的绝缘垫与耦合平面隔离。接触放电施加于AD4111输入端子板的VINx和IINx螺丝。在每个额定值下, EUT接受至少20次放电, 正负极性各10次。以每秒1次的速率重复放电。

辅助设备的精密信号本质上是一个电压源, 所以在抗扰度测试期间, AD4111电流模式下的测量结果可能会因测量环路中元件的参数漂移而变化。对于电流输入通道, 2.5 V基准电压产生大约10 mA直流电流。性能根据AD4111读数和万用表读数之差来判断, 而不是绝对测量结果。这同样适用于EFT和浪涌测试。

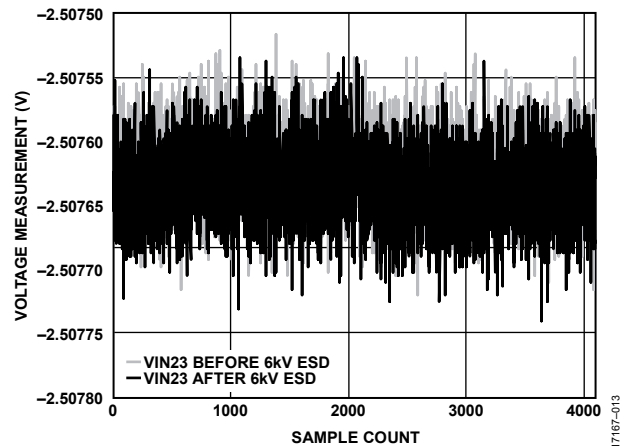


图11. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在6 kV ESD下

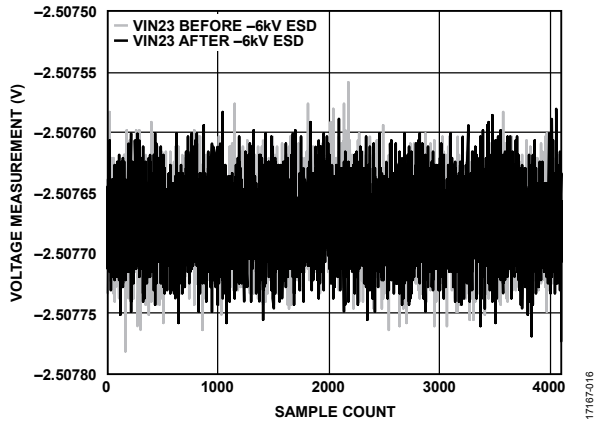


图12. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在-6 kV ESD 下

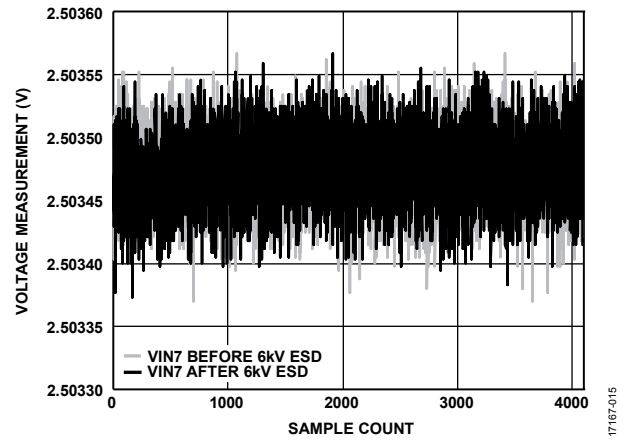


图15. 电压测量与样本数的关系, VIN7在6 kV ESD 下

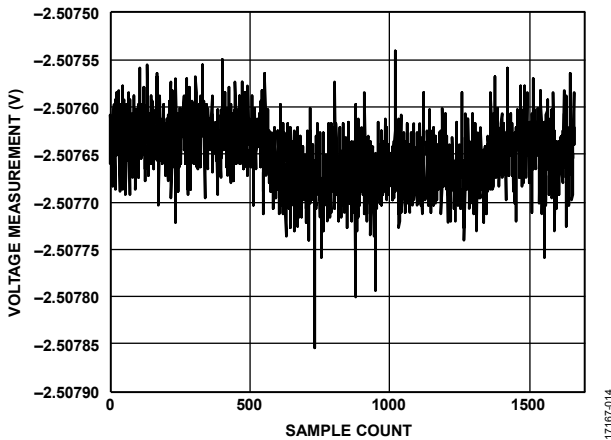


图13. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在6 kV ESD 期间

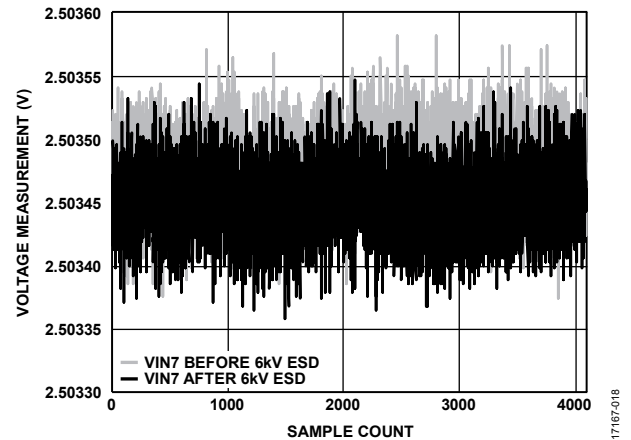


图16. 电压测量与样本数的关系, VIN7在6 kV ESD 下

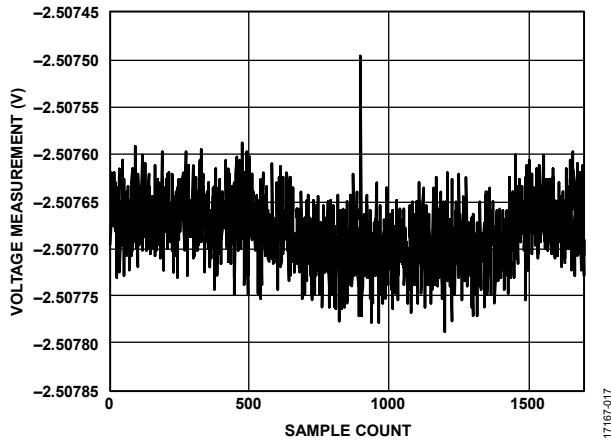


图14. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在-6 kV ESD 期间

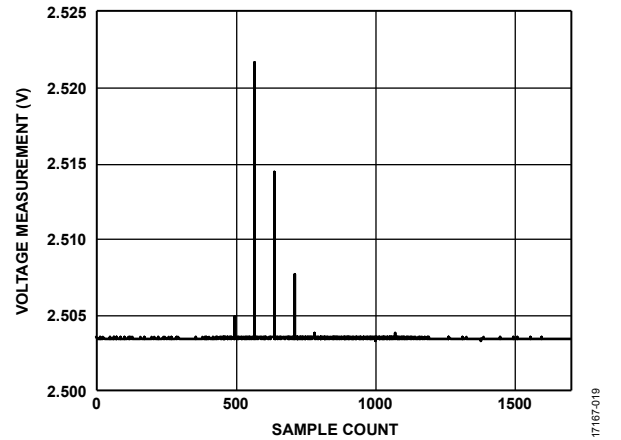


图17. 电压测量与样本数的关系, VIN7在6 kV ESD 期间

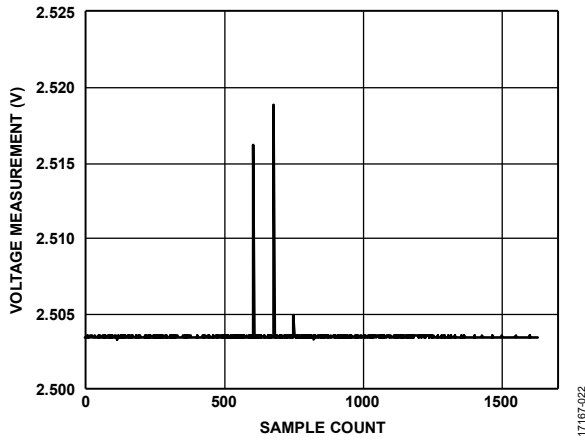


图18. 电压测量与样本数的关系, VIN7在-6 kV ESD期间

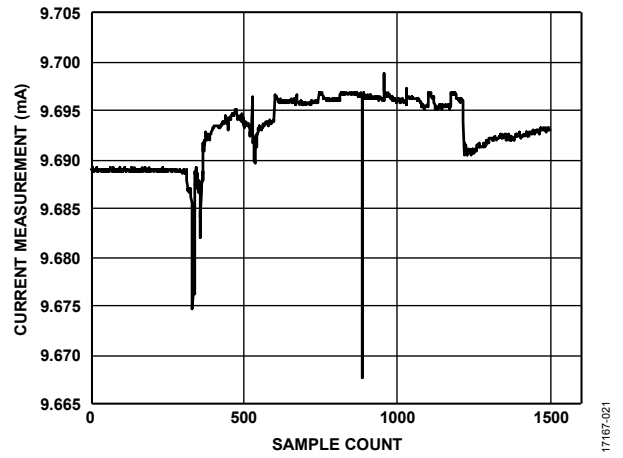


图21. 电流测量与样本数的关系, IIN3在6 kV ESD期间

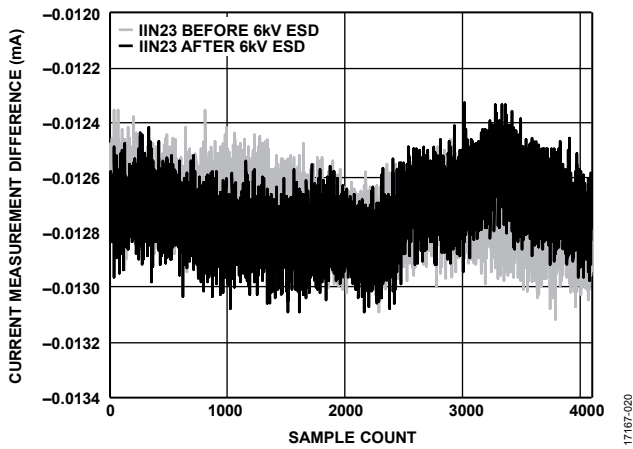


图19. 电流测量差值与样本数的关系,  $\Delta$ IIN3在6 kV ESD下

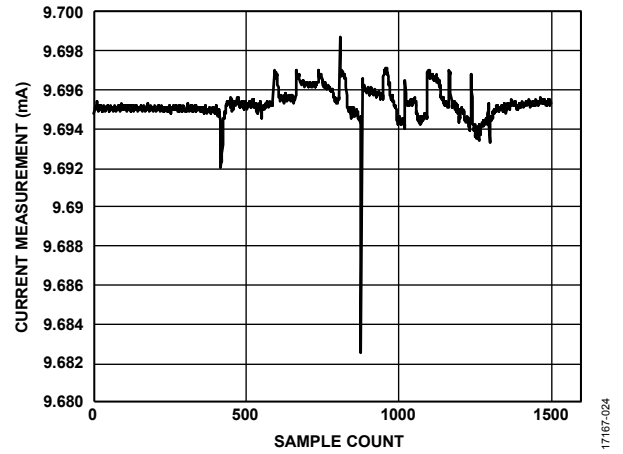


图22. 电流测量与样本数的关系, IIN3在-6 kV ESD期间

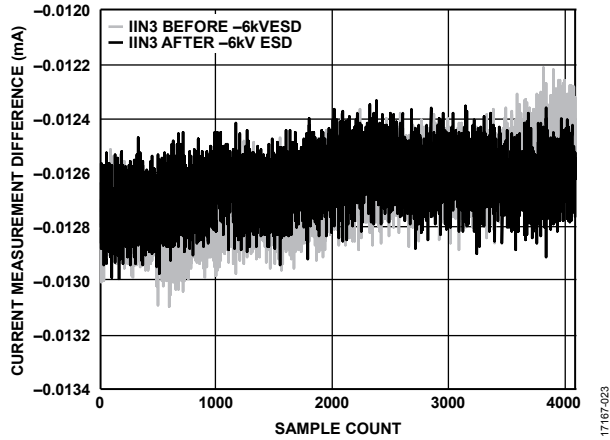
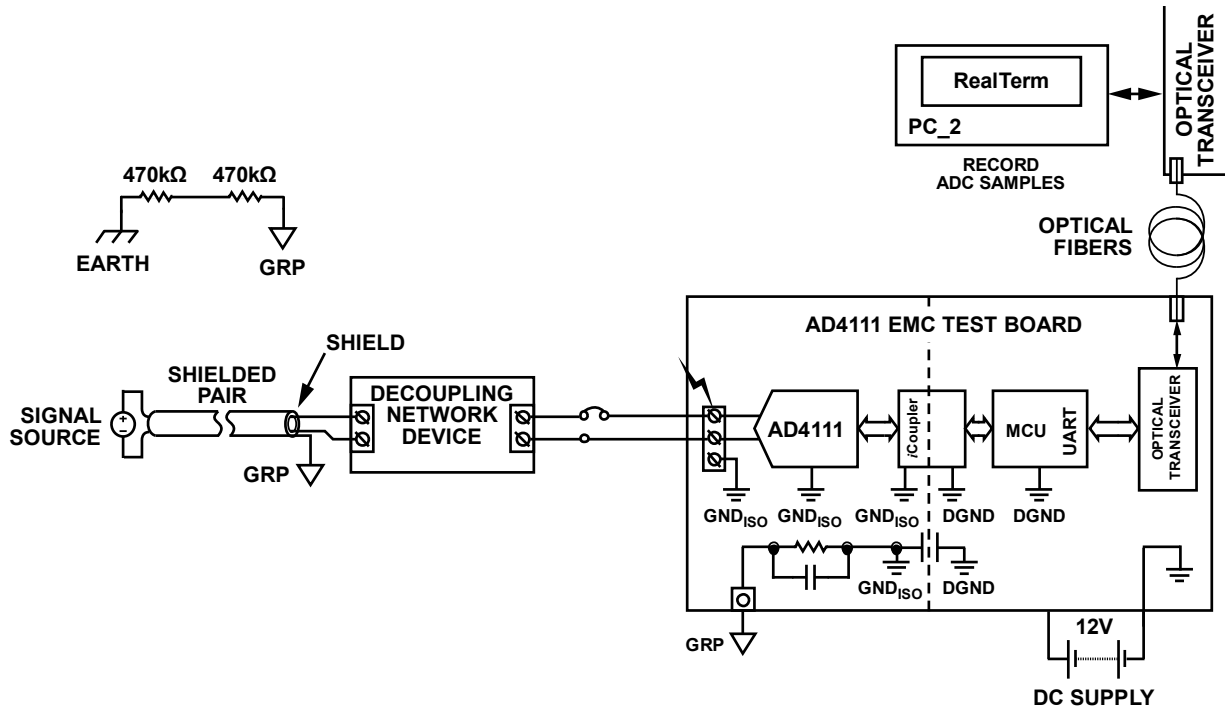
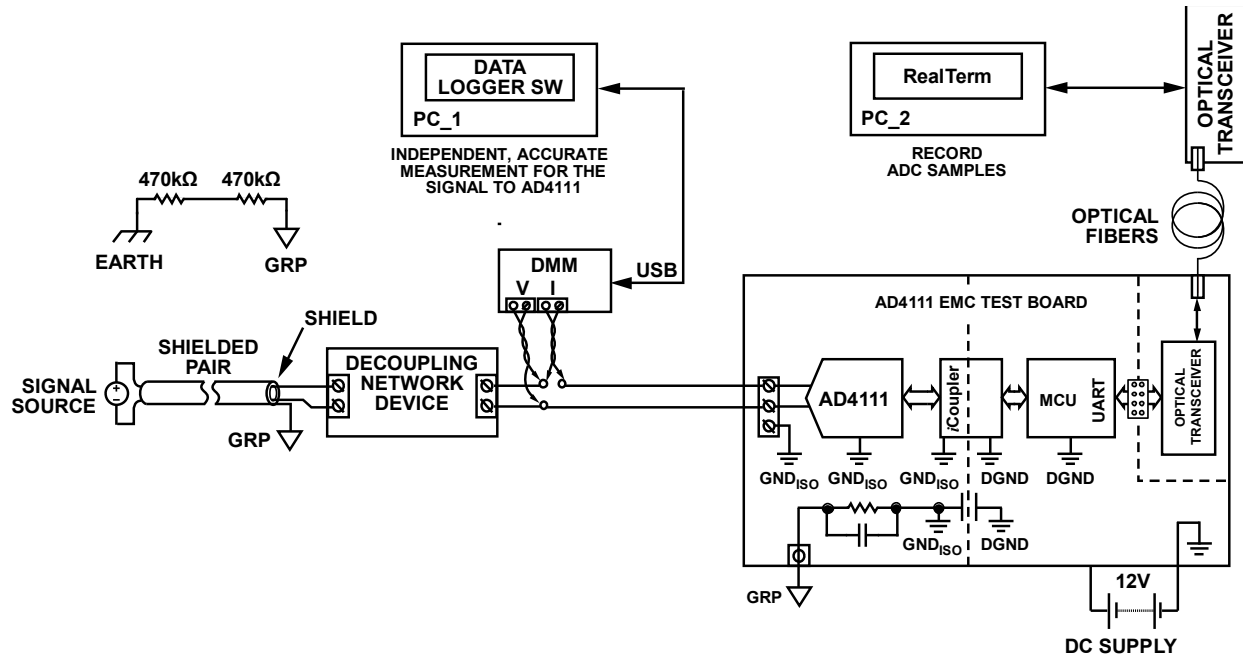


图20. 电流测量差值与样本数的关系,  $\Delta$ IIN3在-6 kV ESD下



17167-010

图23. IEC 61000-4-2测试设置连接图



17167-011

图24. IEC 61000-4-2测试设置，干扰前和干扰后进行测量

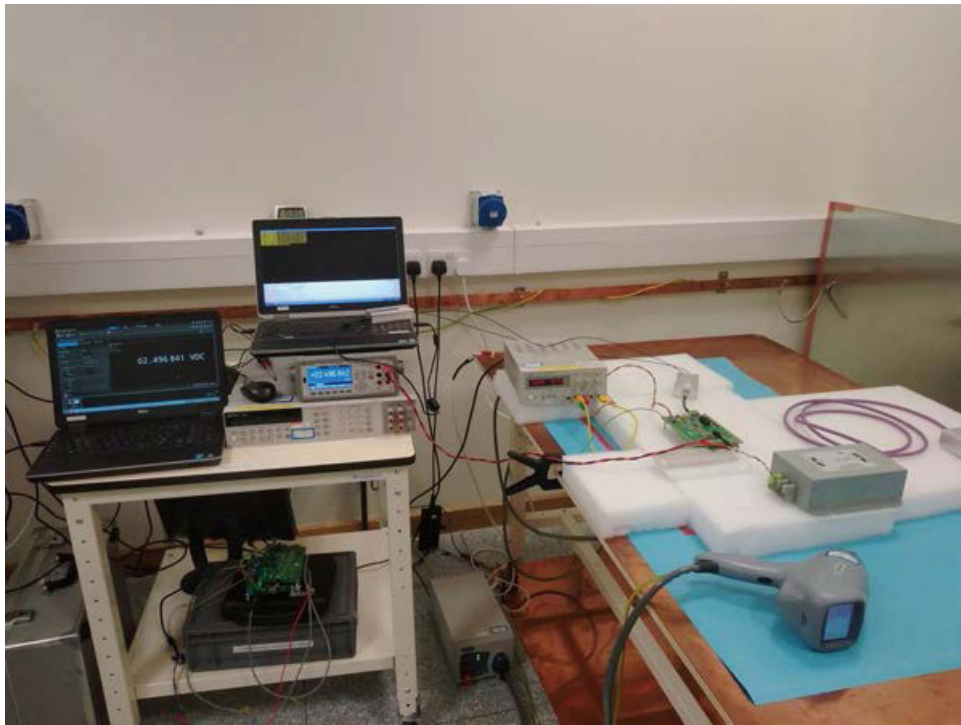


图25. IEC 61000-4-2测试设置照片

17167-012

表6. IEC 61000-4-2测试级别和结果, ±6 kV接触ESD

输入模式	放电点	测试级别(kV)	放电前	放电后	偏差(ppm)	通过或失败
差分电压	VIN2至VIN3	6	-2.507621 V	-2.507634 V	-5	通过, 判据A
		-6	-2.507673 V	-2.507674 V	-0.4	通过, 判据A
单端电压	VIN7	6	2.503477 V	2.503476 V	-0.5	通过, 判据B
		-6	2.503480 V	2.503452 V	-11	通过, 判据B
电流	ΔIIN3	6	-12.731 μA	-12.734 μA	-0.4	通过, 判据B
		-6	-12.669 μA	-12.641 μA	3	通过, 判据B

表7. IEC 61000-4-2测试结果, ±6 kV接触ESD期间

输入模式	放电点	测试级别(kV)	放电前(V)	放电期间(V)		偏差
				最小值	最大值	
差分电压	VIN2至VIN3	6	-2.507621	-2.507854	-2.507541	-32 ppm, 93 ppm
		-6	-2.507673	-2.507788	-2.507496	-11 ppm, 18 ppm
单端电压	VIN7	6	2.503477	2.503362	2.521655	-46 ppm, 0.73%
		-6	2.503480	2.503291	2.518806	-75 ppm, 0.61%
电流	ΔIIN3	6	9.597673	9.667706	9.698868	0.73%, 1.05%
		-6	9.597954	9.682500	9.698671	0.88%, 1.05%

### 电快速瞬变抗扰度

根据IEC 61000-4-4, EUT在模拟输入电缆上进行2000 V放电测试。正极和负极放电均要施加。从EFT发生器的同轴输出端到EUT端子的带电导线长度不得超过1米。每个测试序列的持续时间为1分钟。瞬态和突发波形依据IEC 61000-4-4, 持续5 ns或50 ns。

该配置包括一个0.8米高的木桌, 上面覆盖着至少0.25毫米厚的铜板, 连接到保护接地系统。EUT放在0.1μm厚的隔离支架上。EUT和实验室墙壁之间的最小距离为0.5米。

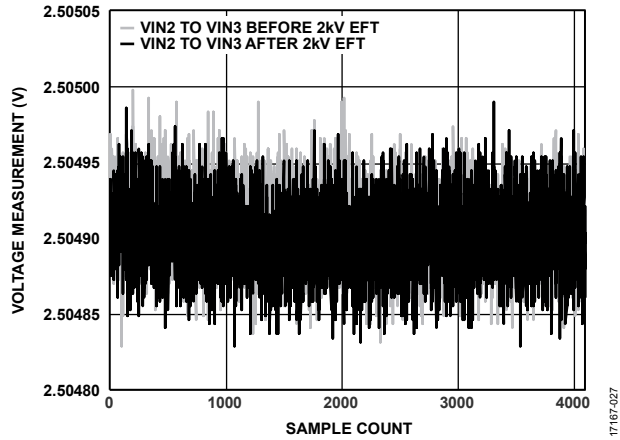


图26. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在2 kV EFT下

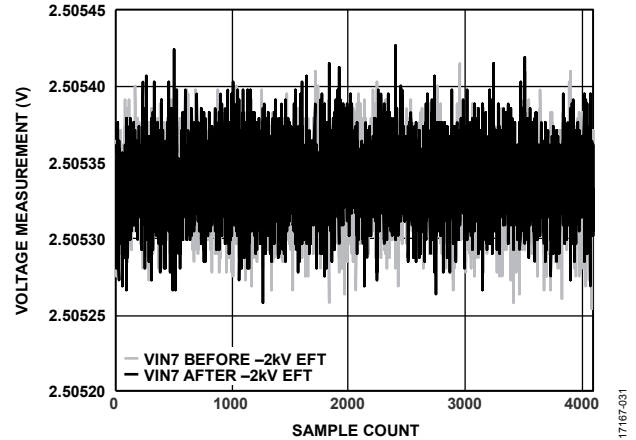


图29. 电压测量与样本数的关系, VIN7在-2 kV EFT下

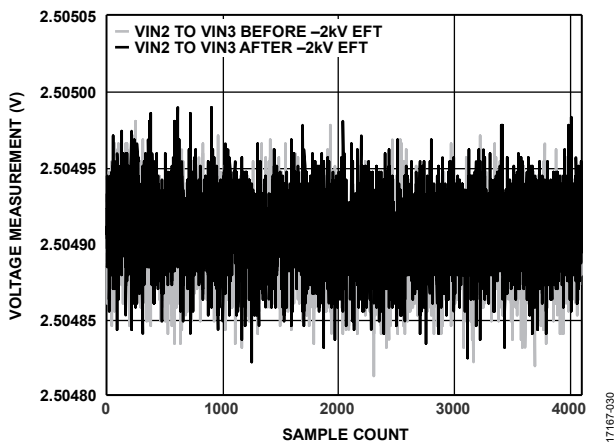


图27. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在-2 kV EFT下

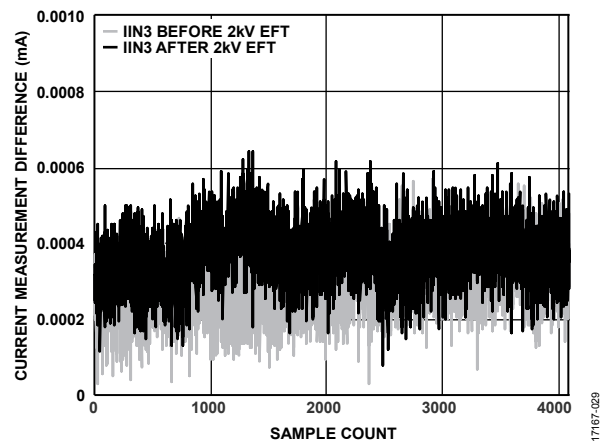


图30. 电流测量差值与样本数的关系,  $\Delta I_{N3}$ 相对于DMM, 在2 kV EFT下

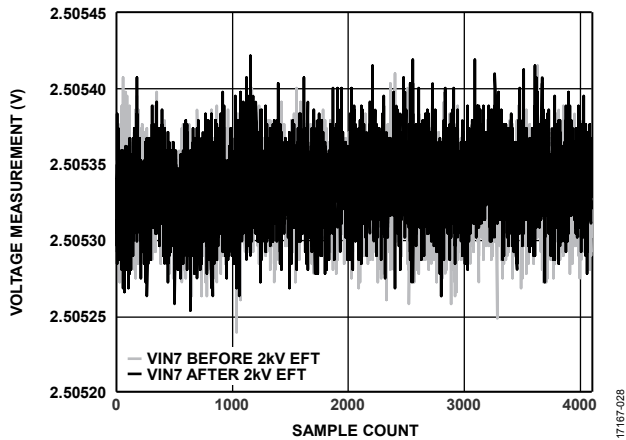


图28. 电压测量与样本数的关系, VIN7在2 kV EFT下

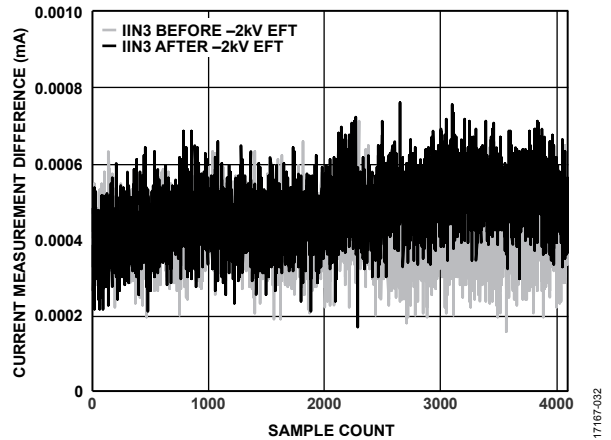


图31. 电流测量差值与样本数的关系,  $\Delta I_{N3}$ 相对于DMM, 在-2 kV EFT下

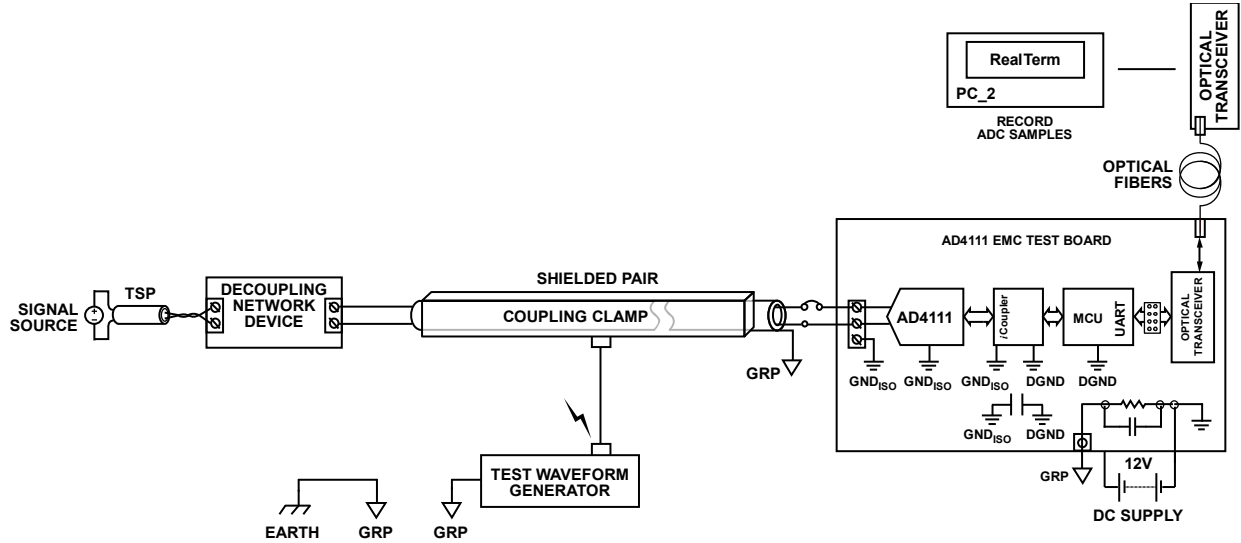


图32. IEC 61000-4-4测试设置连接图

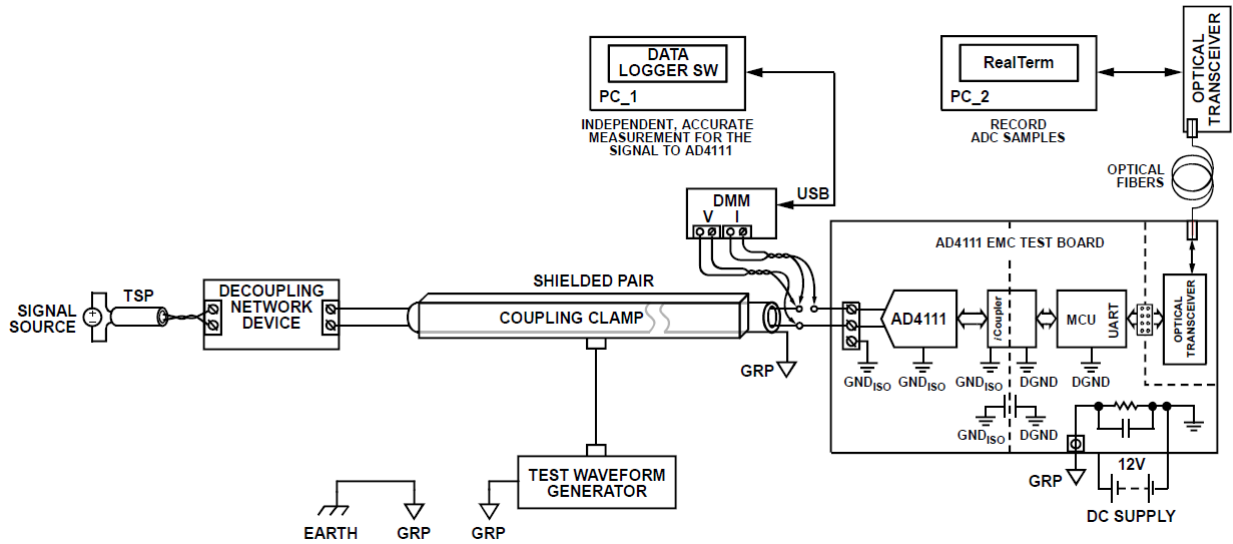


图33. IEC 61000-4-4测试设置，干扰前和干扰后进行测量

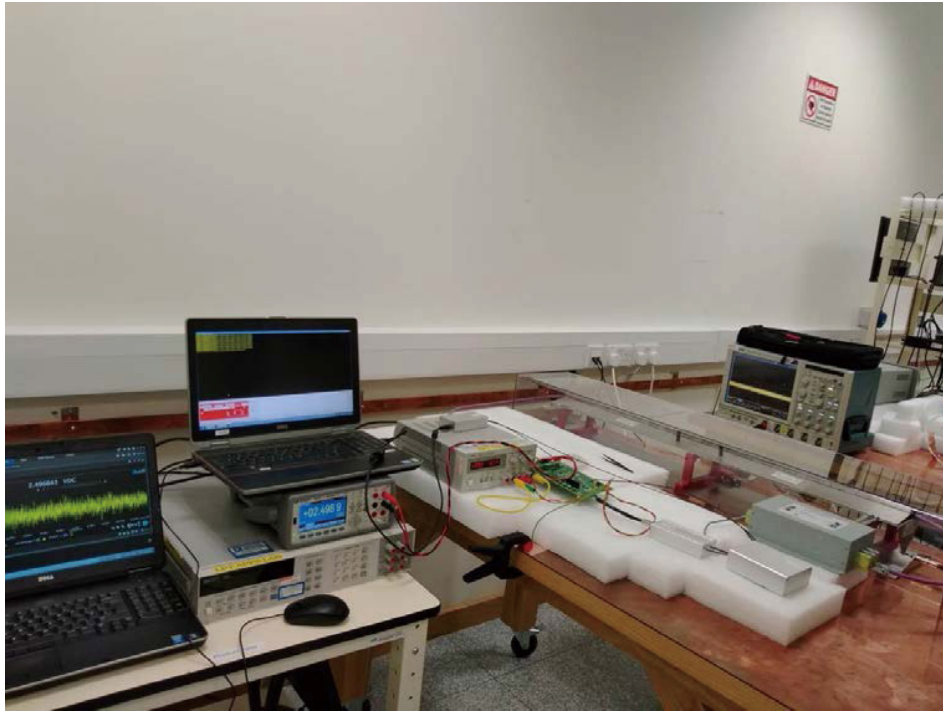


图34. IEC 61000-4测试设置照片

表8.  $\pm 2$  kV EFT的测试级别和结果

输入模式	放电点	测试级别(kV)	放电前	放电后	偏差(ppm)	通过或失败
差分电压	VIN2至VIN3	2	2.504909 V	2.504802 V	-0.1	通过, 判据B
		-2	2.504900 V	2.504908 V	-0.5	通过, 判据B
单端电压	VIN7	2	2.505330 V	2.505337 V	-0.2	通过, 判据B
		-2	2.505335 V	2.505339 V	0.2	通过, 判据B
电流	IIN3	2	0.292 $\mu$ A	0.373 $\mu$ A	9	通过, 判据B
		-2	0.404 $\mu$ A	0.474 $\mu$ A	8	通过, 判据B

## 浪涌抗扰度

根据IEC 61000-4-5, 浪涌是 $1.2\mu$ S和 $50\mu$ S开路电压、 $8\mu$ S和 $20\mu$ S短路电流的组合波。在每个额定值下, EUT接受五次正浪涌和五次负浪涌。每次浪涌之间的间隔为1分钟。浪涌通过AD4111输入电缆进行测试, 将该电缆视为EUT的非屏蔽非对称操作互连线。浪涌通过电容耦合施加到线路上。耦合和去耦网络不能影响EUT的额定工作条件。EUT与耦合和去耦网络之间的互连线路长度为2米(或更短)。

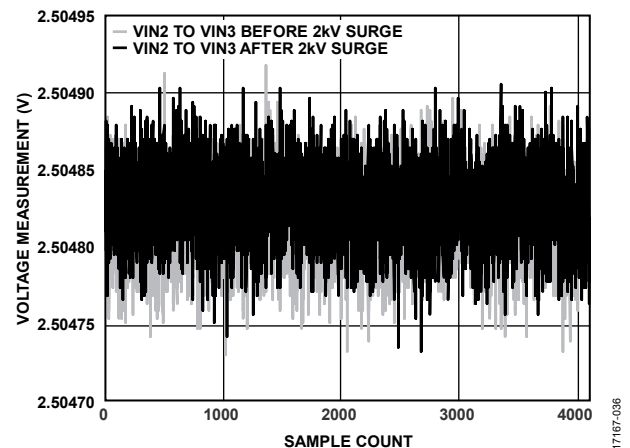


图35. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在2 kV浪涌下



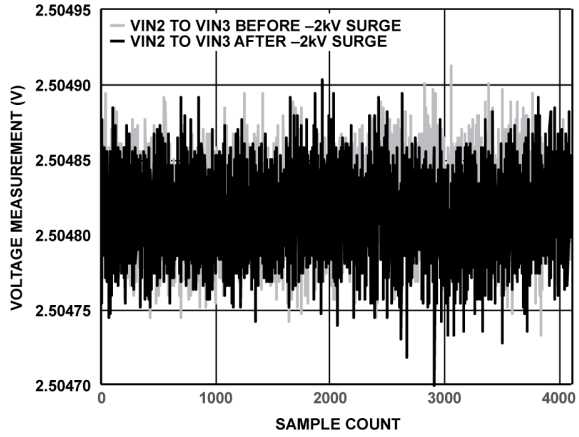


图36. 电压测量与样本数的关系, VIN2至VIN3在-2 kV浪涌下

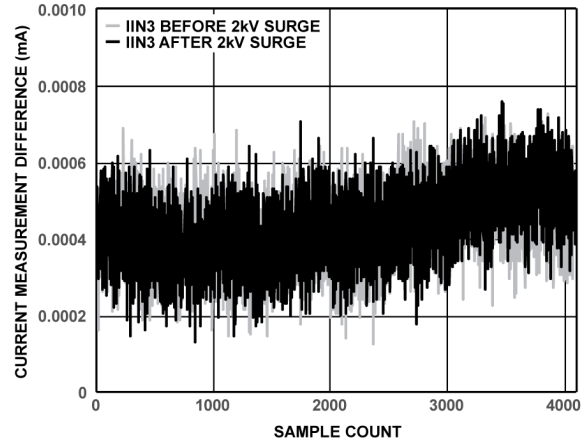


图39. 电流测量差值与样本数的关系,  $\Delta IIN3$ 相对于DMM, 在2 kV浪涌下

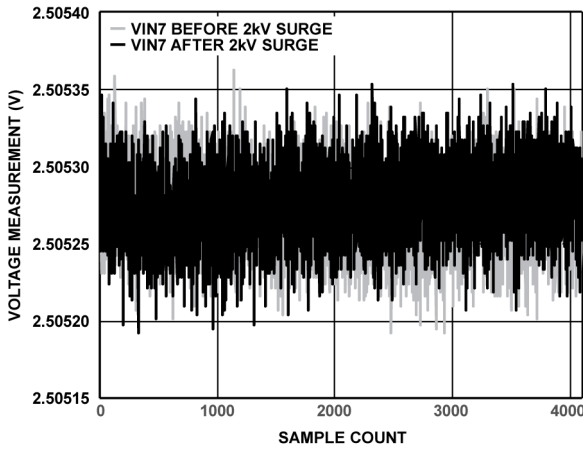


图37. 电压测量与样本数的关系, VIN7在2 kV浪涌下

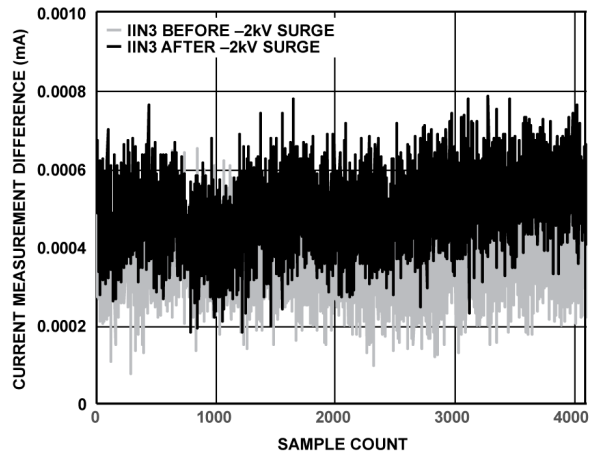


图40. 电流测量差值与样本数的关系,  $\Delta IIN3$ 相对于DMM, 在-2 kV浪涌下

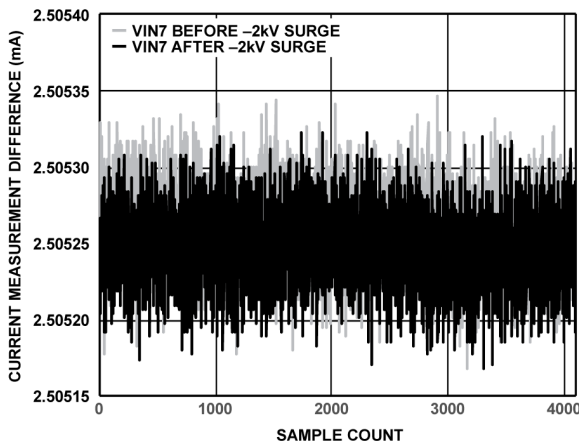


图38. 电流测量差值与样本数的关系, VIN7在-2 kV浪涌下

17167-039

17167-038

17167-037

17167-041

17167-040

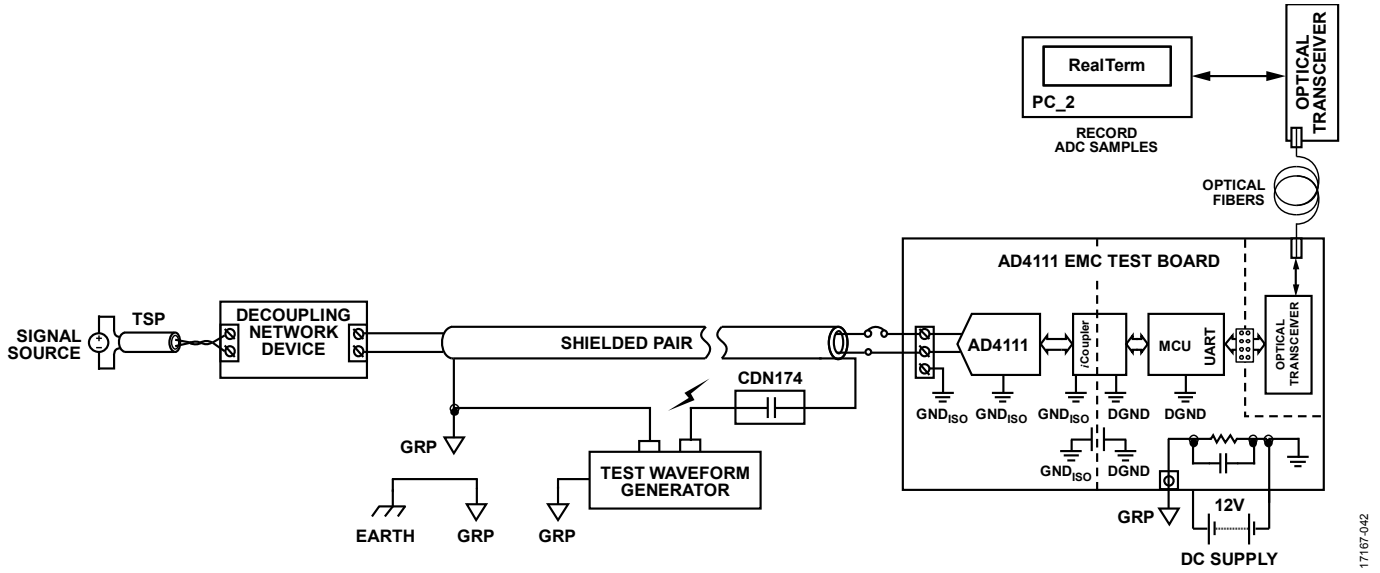


图41. IEC 61000-4-5测试设置连接图

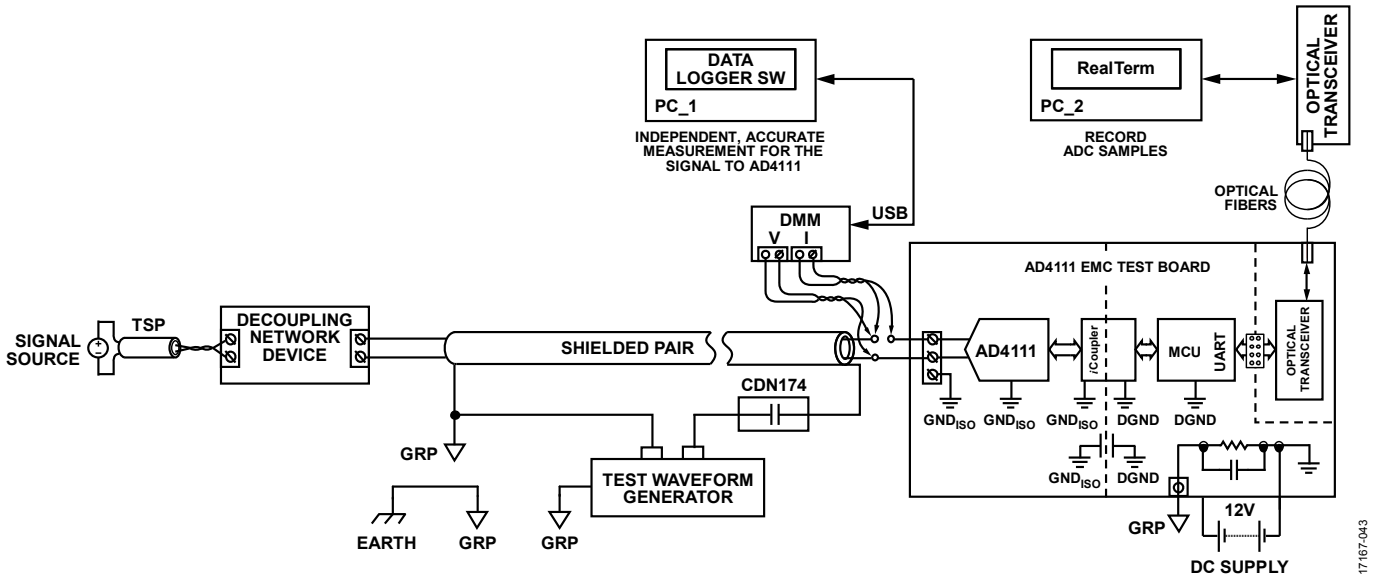


图42. IEC 61000-4-5测试设置连接图，干扰前和干扰后进行测量

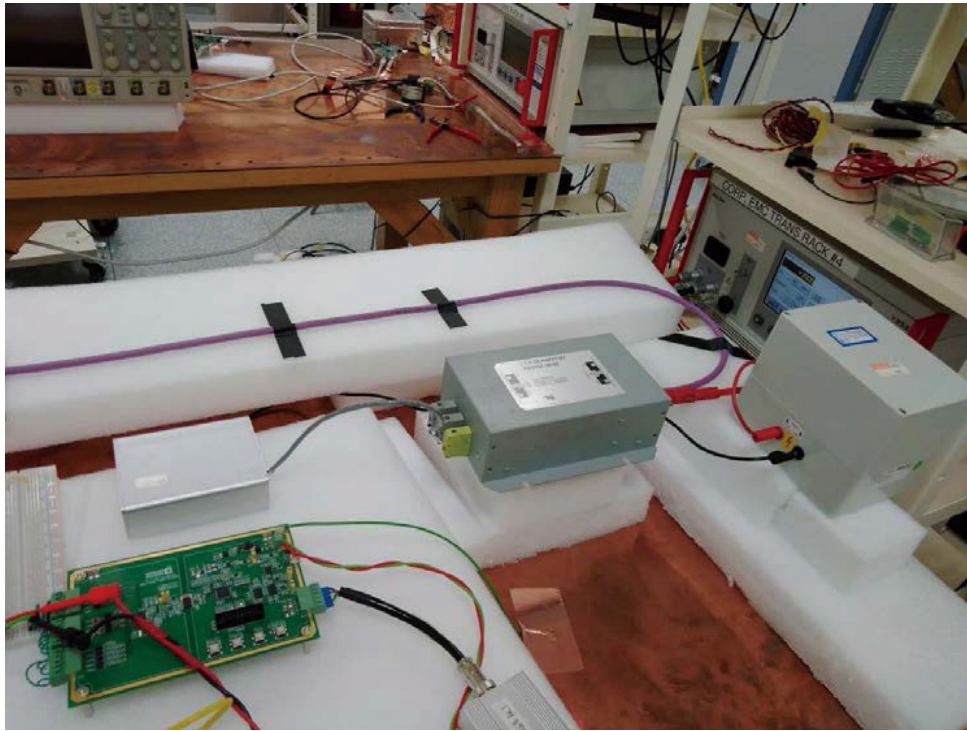


图43. IEC 61000-4-5测试设置照片

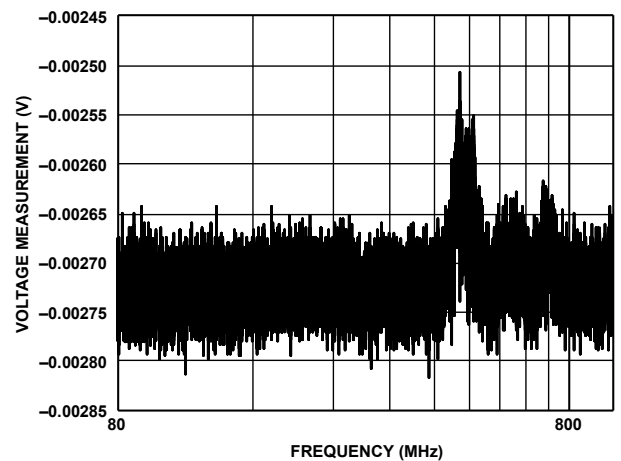
17167-143

表9. IEC 61000-4-5测试级别和结果

输入模式	放电点	测试级别(kV)	放电前	放电后	偏差(ppm)	通过或失败
差分电压	VIN2至VIN3	2	2.504817 V	2.504828 V	5	通过, 判据B
		-2	2.504820 V	2.504813 V	-3	通过, 判据B
单端电压	VIN7	2	2.505272 V	2.505276 V	2	通过, 判据B
		-2	2.505263 V	2.505248 V	-6	通过, 判据B
电流	IIN3	2	0.435 $\mu$ A	0.440 $\mu$ A	0.5	通过, 判据B
		-2	0.375 $\mu$ A	0.496 $\mu$ A	13	通过, 判据B

### 辐射抗扰度

根据IEC 61000-4-3, 测试在全电波暗室中进行。EUT放置在0.8米高的非导电工作台上。AD4111输入短接到隔离接地。发射天线距离EUT 3米。扫描频率范围为80 MHz至1000 MHz, 使用1 kHz正弦波调制的80%幅度的信号。以递增方式扫描整个频率范围, 步长为前一频率值的1%。每个频率的停留时间为1秒, 并且不能小于EUT响应所需的时间。场强为10 V/m。测试在EUT暴露于垂直和水平极化场的情况下进行。AD4111样本通过光电学隔离数据链路发送到暗室外的主机PC。



17167-044

图44. 电压测量与频率的关系, VIN2至VIN3在10 V/m下, 水平天线

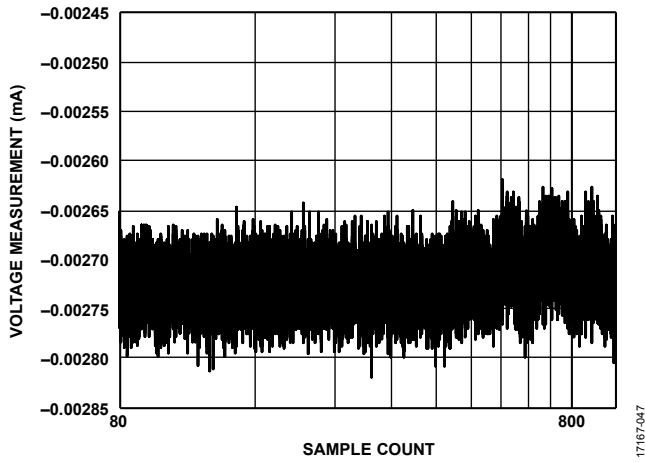


图45. 电压测量与频率的关系, VIN2至VIN3在10 V/m下, 垂直天线

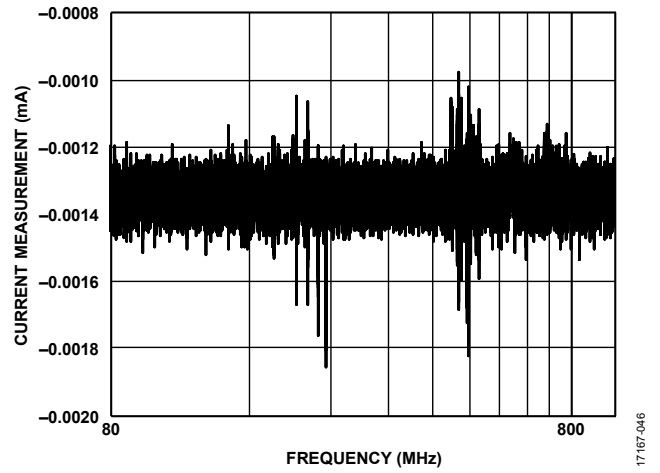


图48. 电流测量与频率的关系, IIN3在10 V/m下, 水平天线

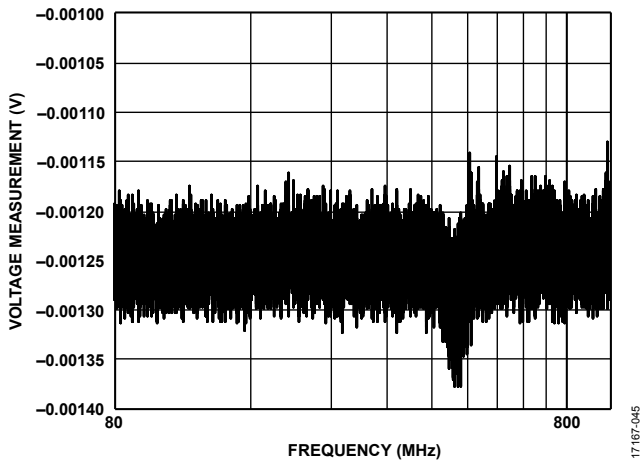


图46. 电压测量与频率的关系, VIN7在10 V/m下, 水平天线

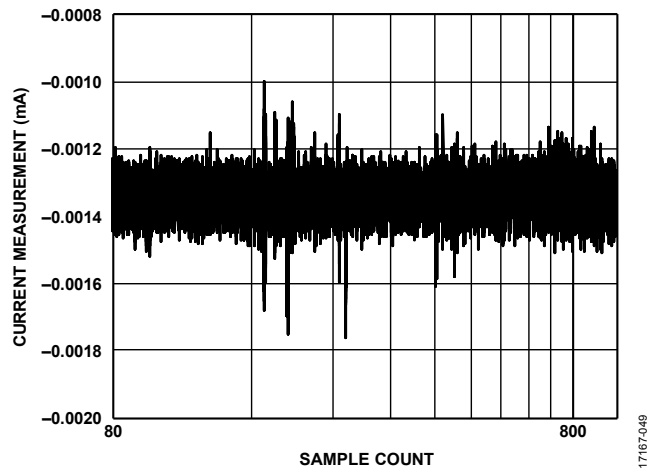


图49. 电流测量与频率的关系, IIN3在10 V/m下, 垂直天线

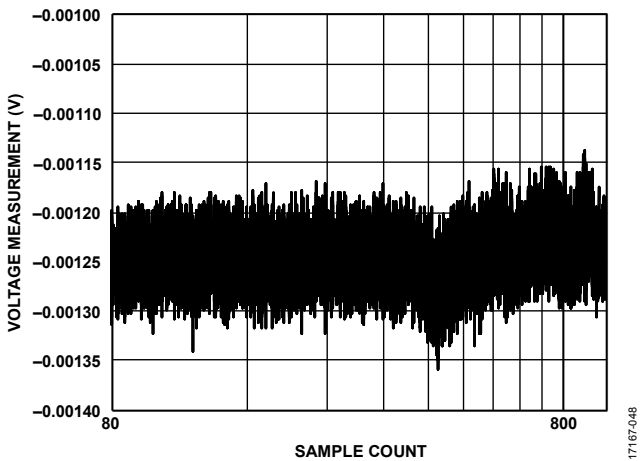
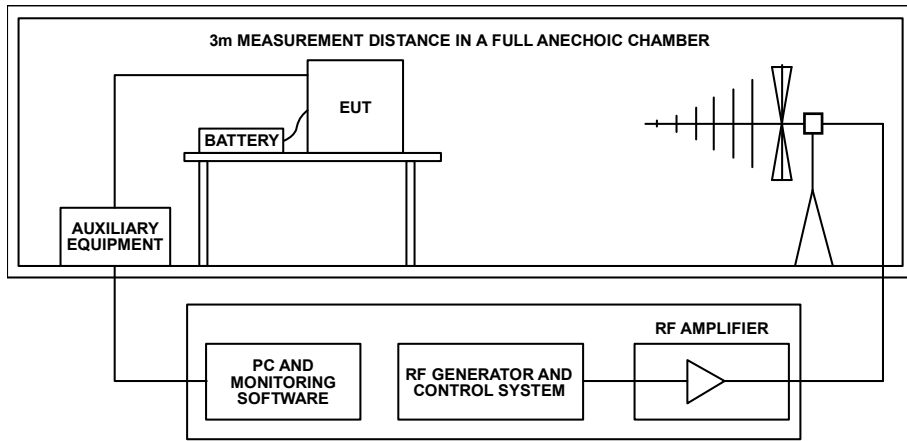


图47. 电压测量与频率的关系, VIN7在10 V/m下, 垂直天线



17167-150

图50. IEC 61000-4-3测试设置配置图



17167-151

图51. IEC 61000-4-3测试设置照片

表10. IEC 61000-4-3测试级别和结果，10 V/m辐射射频抗扰度

输入模式	输入通道	平均值	放电期间		偏差(ppm)	天线	通过或失败
			最小值	最大值			
差分电压	VIN2至VIN3	-2.729 mV	-2.816 mV	-2.506 mV	22 × FS	水平	通过, 判据A
		-2.728 mV	-2.819 mV	-2.620 mV	11 × FS	垂直	通过, 判据A
单端电压	VIN7	-1.249 mV	-1.377 mV	-1.130 mV	-13 × FS	水平	通过, 判据A
		-1.248 mV	-1.359 mV	-1.138 mV	11 × FS	垂直	通过, 判据A
电流	IIN3	-1.345 μA	-1.854 μA	-0.978 μA	-25 × FSR	水平	通过, 判据A
		-1.343 μA	-1.764 μA	-1.001 μA	-21 × FSR	垂直	通过, 判据A

辐射发射

根据CISPR 11, EUT放置在10米半电波暗室内离地面0.8米高的旋转工作台上。工作台旋转360°, 找出辐射最高的位置。EUT放在离干扰接收天线10米处, 可以将其设置为水平或垂直极化位置。天线安装在可变高度天线塔的顶部。天线高度在地面以上1米到4米之间变化, 以找出场强的最大值。EUT配置为最坏情况, 天线调谐到1米至4米的高度, 工作台从0度转到360度以找出最大读数。测试接收器系统设置为准峰值检测模式。EUT由12 V 直流电池组供电, 因此无需考虑来自辅助电源的辐射发射。

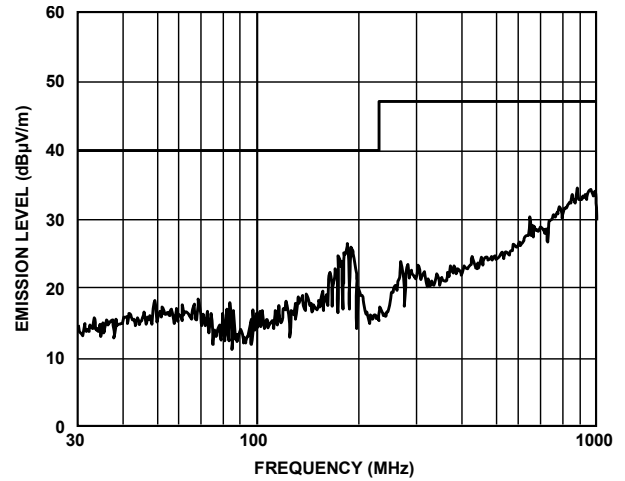


图52. 辐射水平与频率的关系, 辐射发射, 垂直天线极化

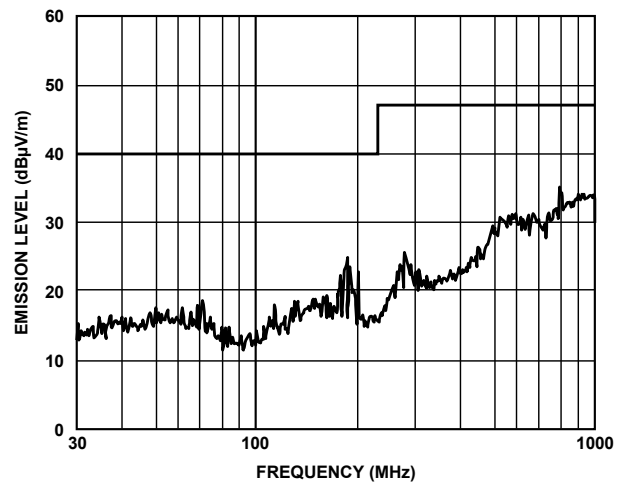


图53. 辐射水平与频率的关系, 辐射发射, 水平天线极化

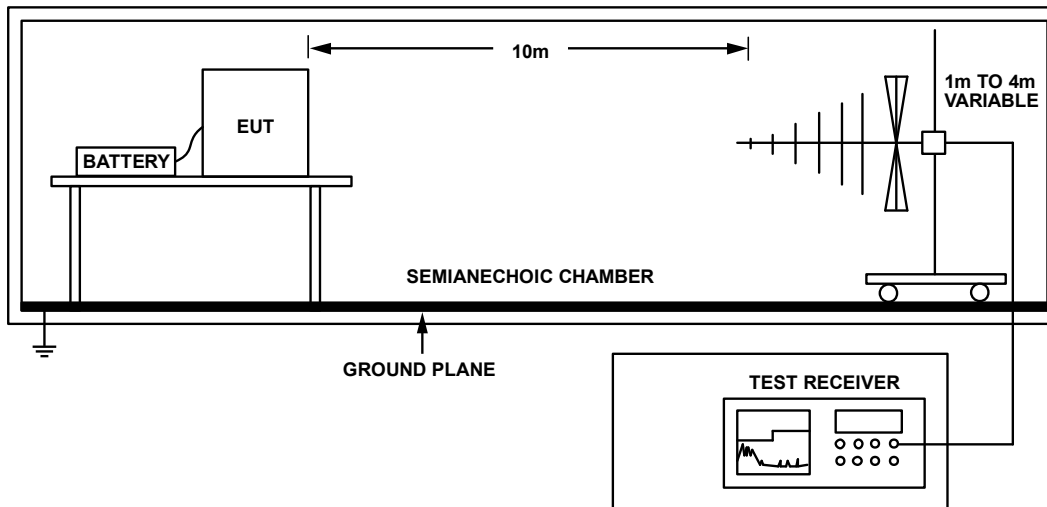


图54. CISPR 11 测试设置配置图



17167-155

图55. CISPR 11测试设置照片

表11. CISPR 11辐射发射，临界频率下的垂直天线极化

频率(MHz)	结果(dB $\mu$ V)	限值(dB $\mu$ V)	裕量(dB)	高度(cm)	天线极化	条件
140.004	14.8	40	-25.2	1	垂直	准峰值
890.712	28.9	47	-18.1	1	垂直	准峰值

表12. CISPR 11辐射发射，临界频率下的水平天线极化

频率(MHz)	结果(dB $\mu$ V)	限值(dB $\mu$ V)	裕量(dB)	高度(cm)	天线极化	条件
187.216	32.5	40	-7.5	4	水平	准峰值
201.360	25.6	40	-14.4	2.5	水平	准峰值
276.256	29.2	47	-17.8	4	水平	准峰值
567.672	29.7	47	-17.3	1	水平	准峰值
788.512	36.9	47	-10.1	3	水平	准峰值

# EMC板原理图与PCB布局图

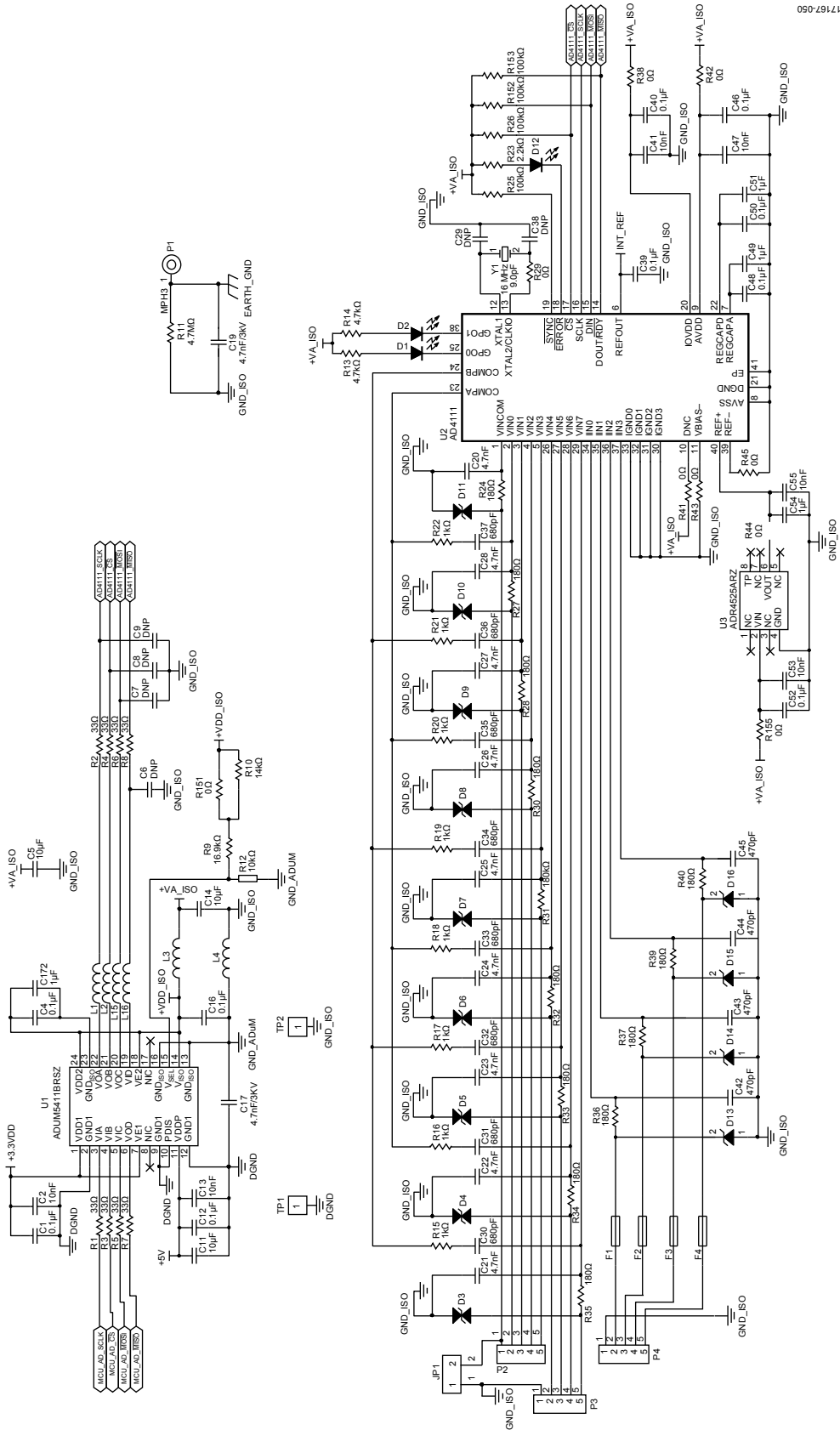


图56. EMC板原理图, AD4111和ADuM5411



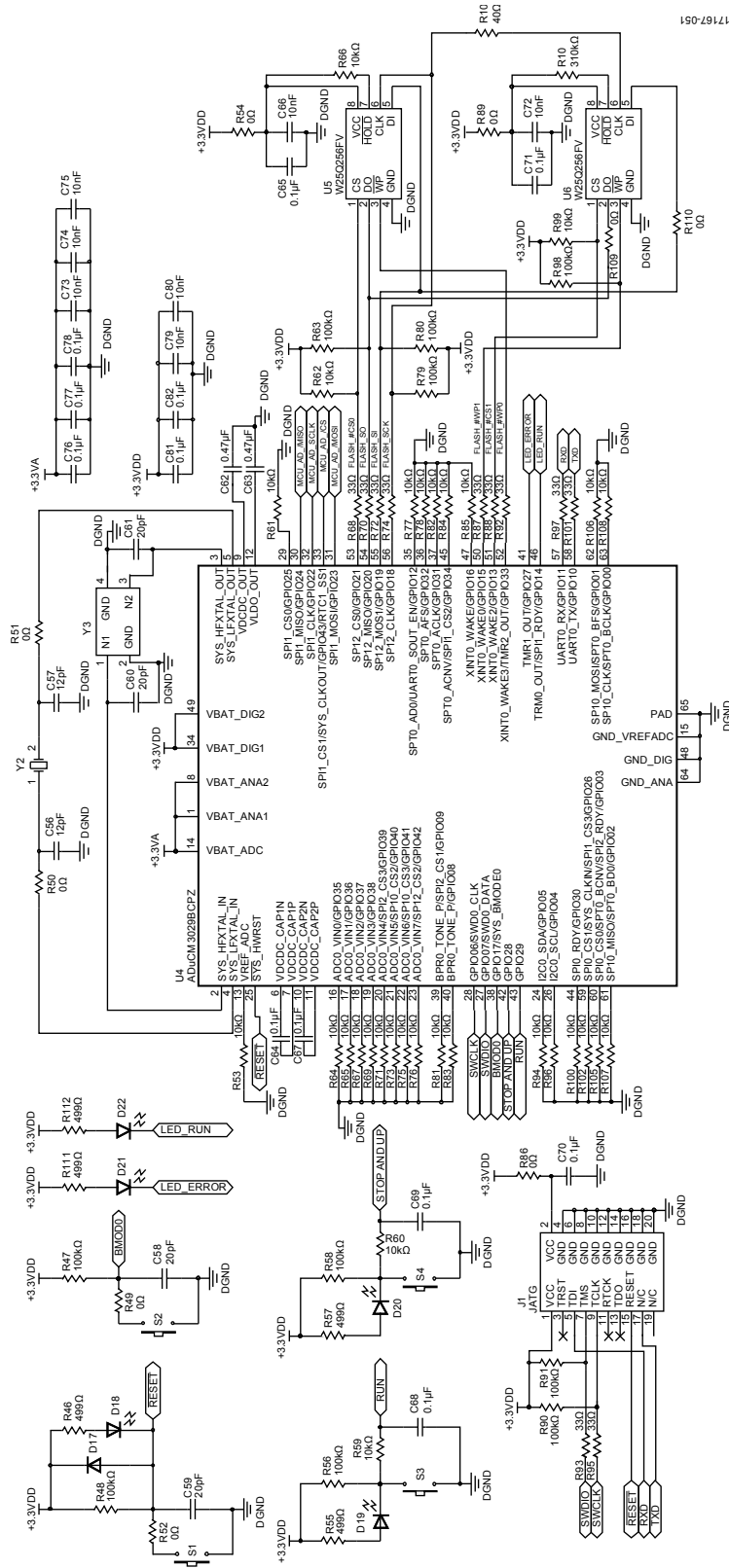


图57. EMC板原理图，MCU和外设

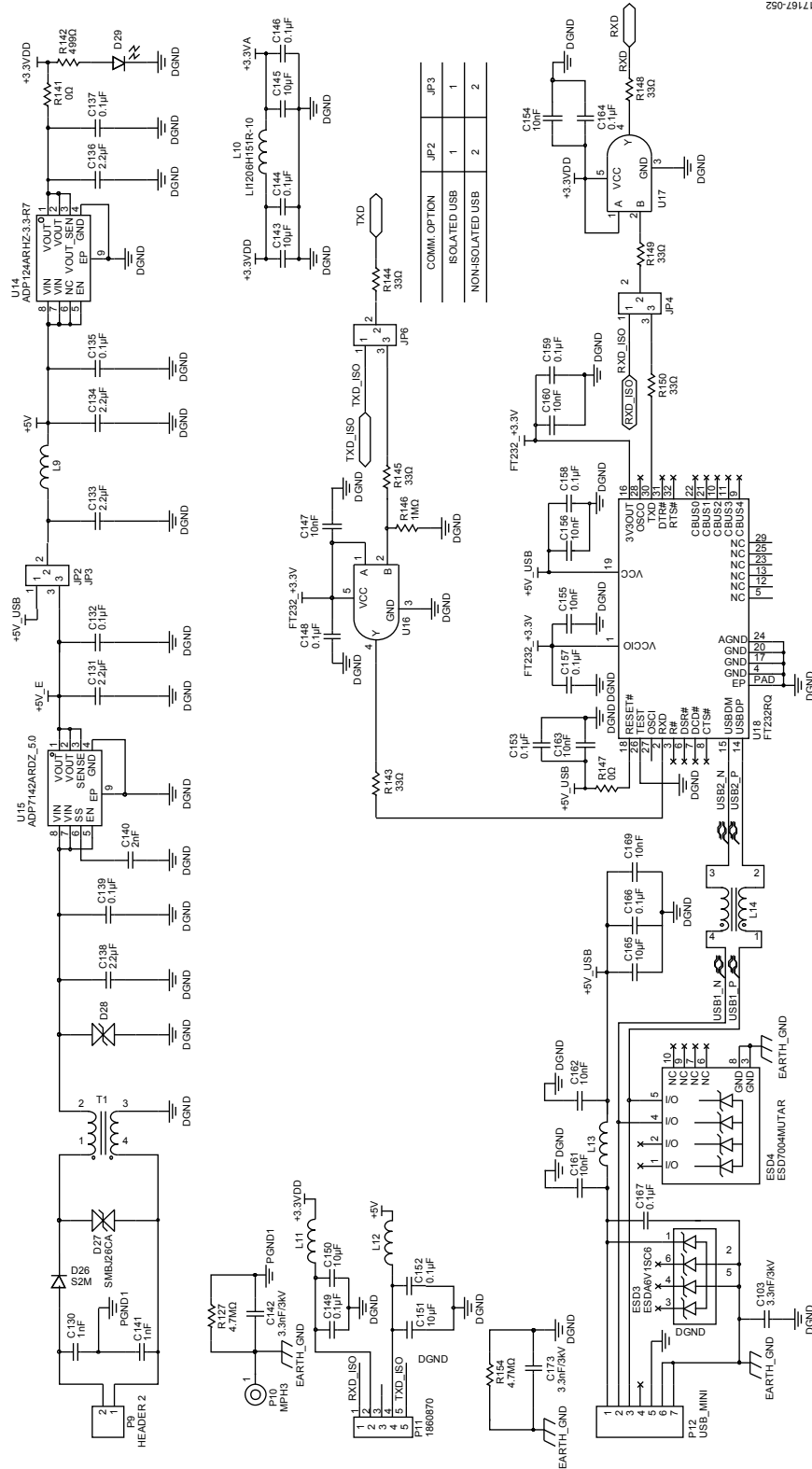
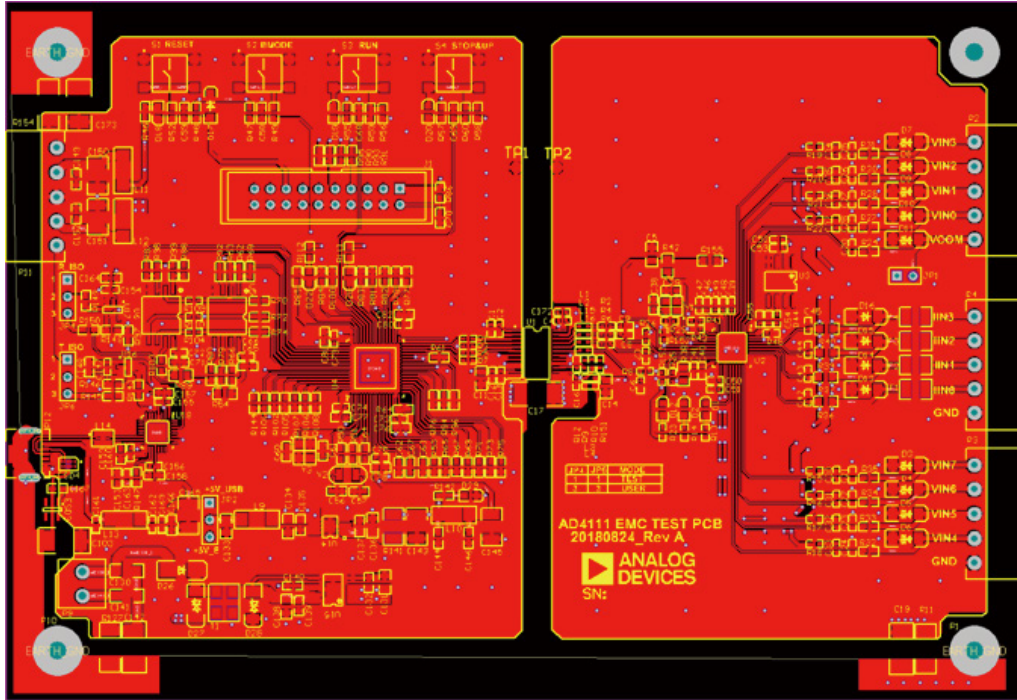
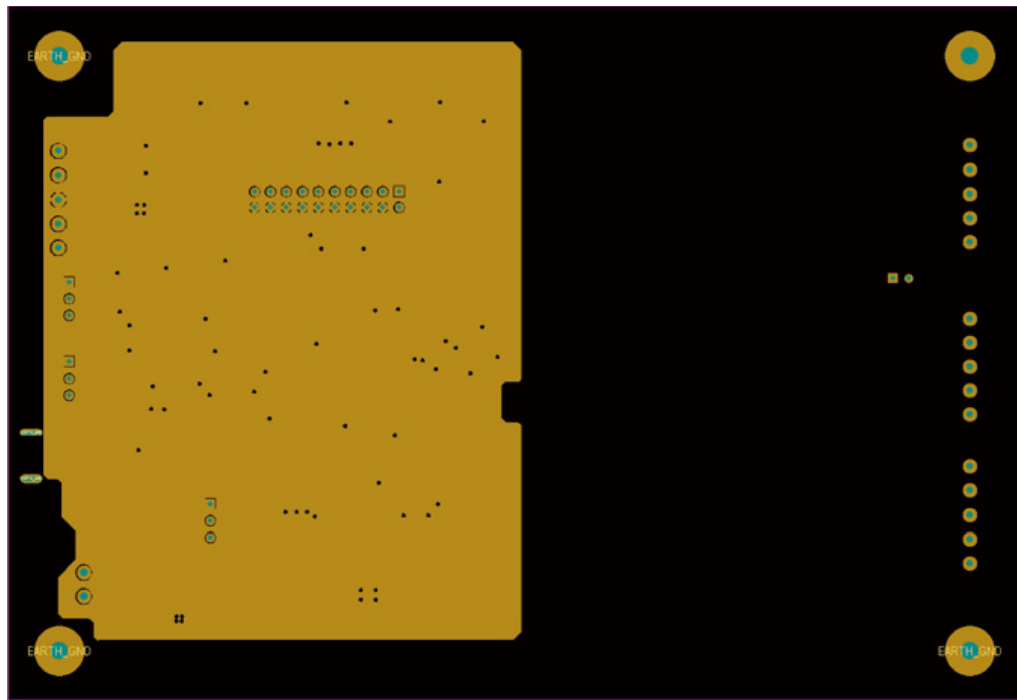


图58. EMC板原理图，电源和通信接口



17167-053

图59. 第1层, 正面



17167-054

图60. 第2层, 内接地层

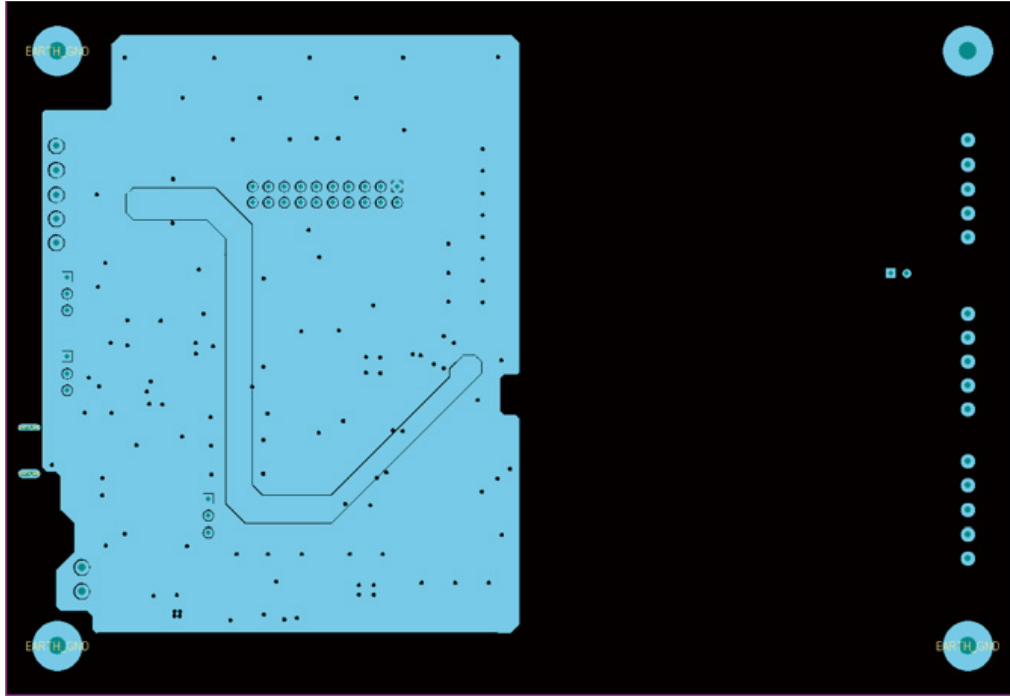


图61. 第3层, 内电源层

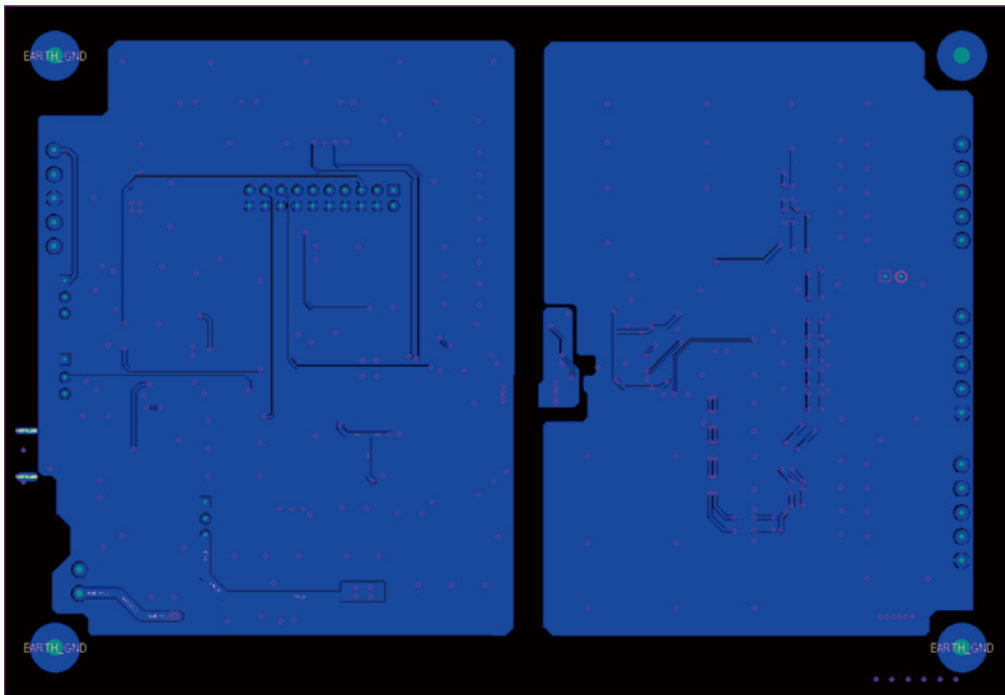
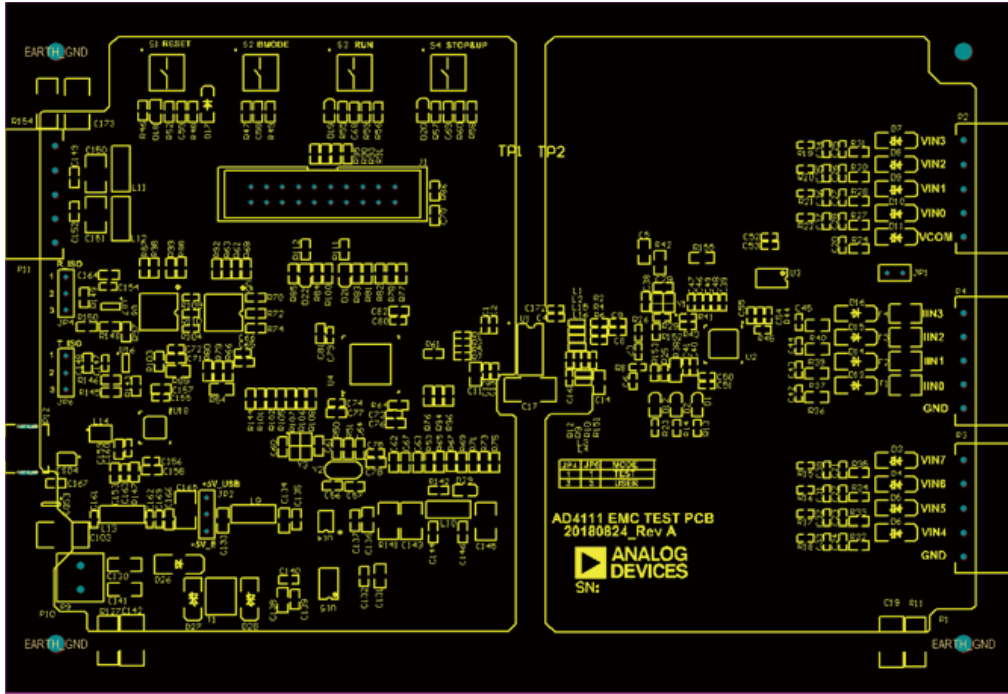
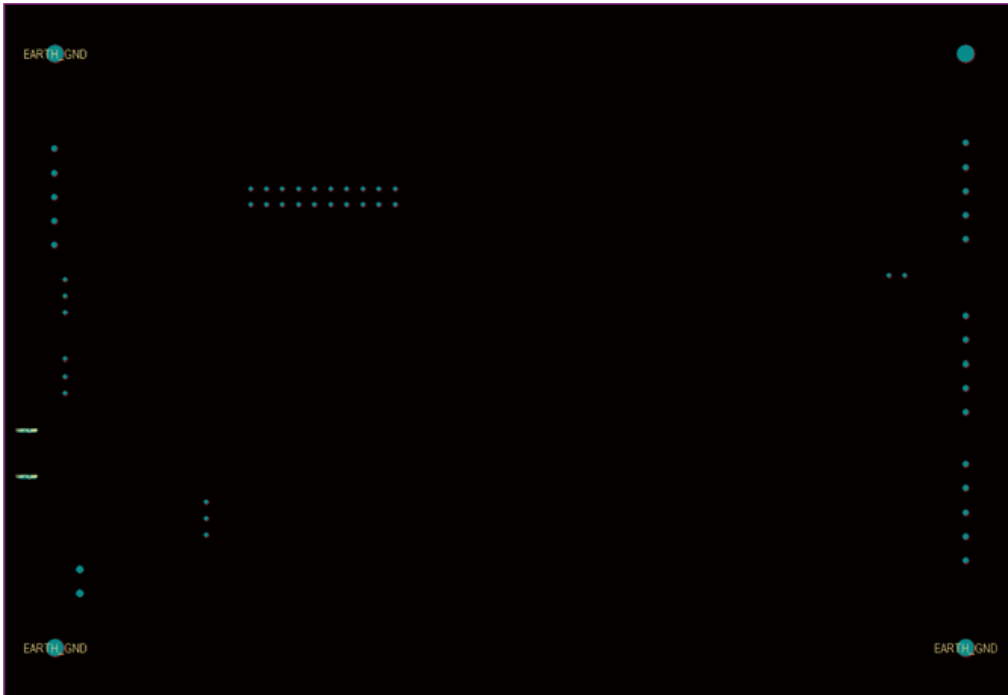


图62. 第4层, 底面



17167-057

图63. 丝网正面



17167-068

图64. 丝网底面

## 订购信息

## 物料清单

表13.

器件位号	器件描述	值	制造商零件号	Farnell订购代码	制造厂商
C1、C4、C12、C16、C39、C40、C46、C48、C50、C52	陶瓷电容, 0.1 $\mu$ F, 50 V, X5R, 0402	0.1 $\mu$ F	GRM155R61H104KE19D	FEC-2218856	Murata
C2、C3、C13、C41、C47、C53、C55、C66、C72、C73、C74、C75、C79、C80、C147、C154、C155、C156、C160、C161、C162、C163、C169	陶瓷电容, 0.01 $\mu$ F, 50 V, X5R, 0402	0.01 $\mu$ F	GRM155R71H102JA01D	FEC-2470474	Murata
C5、C11、C14	陶瓷电容, 10 $\mu$ F, 10 V, X7R, 0805	10 $\mu$ F	C2012X7R1A106K125AC	FEC-2346934	TDK
C6、C7、C8、C9	陶瓷电容, 0402	不安放 (DNP)	不适用	不适用	不适用
C17、C19	陶瓷电容, 4.7 nF, 2000 V, X7R, 1812	4.7 nF	CC1812KKX7RDBB472	FEC-1284179	Yageo
C20、C21、C22、C23、C24、C25、C26、C27、C28	陶瓷电容, 4.7 nF, 50 V, C0G, 0402	4.7 nF	GRT155R71H472KE01D	FEC-2672129	Murata
C29、C38	陶瓷电容, 0603	DNP	不适用	不适用	不适用
C30、C31、C32、C33、C34、C35、C36、C37	陶瓷电容, 680 pF, 50 V, X7R, 0402	680 pF	GRT155R71H681KE01D	FEC-2672130	Murata
C42、C43、C44、C45	陶瓷电容, 470 pF, 50 V, C0G, 0402	470 pF	GRM1555C1H471JA01D	FEC-8819688	Murata
C49、C51、C54、C172	陶瓷电容, 1 $\mu$ F, 16 V, X5R, 0402	1 $\mu$ F	GRM155R61C105KA12D	FEC-2362093	Murata
C56、C57	陶瓷电容, 12 pF, 50 V, C0G, 0603	12 pF	GRM1885C1H120JA01D	FEC-1828907	Murata
C58、C59、C60、C61	陶瓷电容, 20 pF, 50 V, C0G, 0402	20 pF	MC0402N200J500CT	FEC-2627461	Multicomp
C62、C63	陶瓷电容, 0.47 $\mu$ F, 50 V, X7R, 0603	0.47 $\mu$ F	UMK107B7474KA-TR	FEC-2779057	Taiyo Yuden
C64、C65、C67、C68、C69、C70、C71、C76、C77、C78、C81、C82、C132、C135、C137、C139、C144、C146、C148、C149、C152、C153、C157、C158、C159、C164、C166、C167	陶瓷电容, 0.1 $\mu$ F, 50 V, X7R, 0603	0.1 $\mu$ F	MCSH18B104K500CT	FEC-1856385	Multicomp
C103、C142	陶瓷电容, 3300 pF, 3 kV, X7R, 1812	3.3 nF	HV1812Y332KXHATHV	FEC-2611555	Vishay
C130、C141	陶瓷电容, 1000 pF, 50 V, X7R, 1206	1 nF	C1206C102M5RACTU	FEC-2678368	KEMET
C131、C133、C134、C136、C138	陶瓷电容, 2.2 $\mu$ F, 50 V, X7R, 0805	2.2 $\mu$ F	UMK212BB7225KG-T	FEC-2779058	Taiyo Yuden
C140	陶瓷电容, 2000 pF, 50 V, C0G, 0603	2 nF	GRM1885C1H202JA01D	FEC-2470480	Murata
C143、C145、C150、C151、C165	陶瓷电容, 10 $\mu$ F, 25 V, X7R, 1210	10 $\mu$ F	C1210C106K3RACAUTO	FEC-2665759	KEMET
C173	陶瓷电容, 1812	不适用	不适用	不适用	不适用

索引标识符	器件描述	值	产品型号	Farnell订购代码	制造厂商
D1、D2	发光二极管(LED), 黄光, 0603, 表面贴装器件(SMD)	LED	TLMY1000-GS08	FEC-1328310	Vishay
D12、D21	LED, 红光, 0603, SMD	LED	TLMS1000-GS08	FEC-1328308	Vishay
D18、D19、D20、D22、D29	LED, 绿光, 0603, SMD	LED	KPT-1608LVZGCK	FEC-2610409	Kingbright
D13、D14、D15、D16	TVS二极管, 10V, 19.6V, 超小A型(SMA)	TVS	SMA6J10A-TR	Digi-Key 497-5915-1-ND	STMicroelectronics
D17	二极管, 通用, 75 V, 150 mA, SOD123	1N4148	1N4148W-E3-08	FEC-2433353	Vishay
D26	二极管, 通用, 1 kV, 2 A, DO214AA	S2M	S2M	FEC-2677413	Taiwan Semiconductor
D3、D4、D5、D6、D7、D8、D9、D10、D11	TVS二极管, 33V, 69.7V, SMA	TVS	SMAJ33CA-TR	FEC-9802843	STMicroelectronics
D27、D28	TVS二极管, 26V, 42.1 V, DO214AA	TVS	SMBJ26CA	FEC-1749366	STMicroelectronics
D13、D14、D15、D16	TVS二极管, 10V, 19.6V, SMA	TVS	SMA6J10A-TR	Digi-Key 497-5915-1-ND	STMicroelectronics
ESD3	TVS二极管, 5.25 V, SOT23-6	ESD	ESDA6V1SC6	FEC-9802274	STMicroelectronics
ESD4	TVS二极管, 5 V, 10 V, 10UDFN	ESD	ESD7004MUTAG	FEC-1961708	ON Semiconductor
F1、F2、F3、F4	正温度系数(PTC), 复位保险丝, 30 V, 50 mA, 1210	保险丝	MF-USMF005-2	FEC-2309134	Bourns
J1	连接头, 20位, 金质	联合测试 行动小组 (JATG)	5103308-5	FEC-2452432	TE Connectivity
JP1	2引脚(2x1), 0.1", 接头	JP2	M20-9990245	FEC-1022245	Harwin
JP2、JP4、JP6	3引脚(3x1), 0.1", 接头	JP3	M20-9990345	FEC-1022248	Harwin
插入JP1、JP2、JP4、JP6	2引脚(2x1), 0.1", 短接板	不适用	M7566-05	FEC-150411	Harwin
L1、L2、L3、L4、L15、L16	铁氧体磁珠, 1.8k $\Omega$ , 0402, 1线	1.8 k $\Omega$	BLM15HD182SN1D	FEC-1515786	Murata
L9、L10、L11、L12、L13	铁氧体磁珠, 150 $\Omega$ , 1206, 1线	150 $\Omega$	LI1206H151R-10	FEC-2292444	Laird Technologies
L14	USB, 共模滤波器, 0805	滤波器	0805USB-502MLB	FEC-2458105	Coilcraft
P1、P10	安装孔, 直径3 mm	不适用	不适用	不适用	不适用
P2、P3、P4、P11	端子板接头, 5位, 90°, 3.81 mm	CON5	1860870	Digi-Key 277-11004-ND	Phoenix Contact
P9	端子板, 2位, 3.81 mm, PCB, 绿色	CON2	1727010	FEC-3704579	Phoenix Contact
P12	连接座, mini USB 2.0, 5位	CON5	UX60SC-MB-5S8	FEC-2300433	Hirose (HRS)
R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8	电阻, SMD, 33 $\Omega$ , 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	33 $\Omega$	MCWR04X33R0FTL	FEC-2447161	Multicomp

索引标识符	器件描述	值	产品型号	Farnell订购代码	制造厂商
R9	电阻, SMD, 16.9 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	16.9 kΩ	CRCW040216K9FKED	FEC-1652757	Vishay
R10	电阻, SMD, 14 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	14 kΩ	MCWR04X1402FTL	FEC-2447109	Multicomp
R11、R127	电阻, SMD, 4.7 MΩ, 5%, 1/2 W, 2 kV, 2010	4.7 MΩ	CHV2010-JW-475ELF	FEC-2470939	Bourns
R12	电阻, SMD, 10 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	10 kΩ	RC0402FR-0710KL	FEC-2144755	Yageo
R13、R14	电阻, SMD, 4.7 kΩ, 1%, 1/10 W, 50 V, 0402	4.7 kΩ	ERJ2GEJ472X	FEC-2059234	Panasonic
R15、R16、R17、R18、R19、R20、 R21、R22	电阻, SMD, 1 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	1 kΩ	CRG0402F1K0	FEC-2331474	TE Connectivity
R23	电阻, SMD, 2.2 kΩ, 1%, 1/10 W, 50 V, 0402	2.2 kΩ	ERJ2RKF2201X	FEC-2302673	Panasonic
R24、R27、R28、R30、R31、R32、 R33、R34、R35	电阻, SMD, 180 Ω, 1%, 1/10 W, 50 V, 0603	180 Ω	MCWR06X1800FTL	FEC-2447267	Multicomp
R25、R26、R152、R153	电阻, SMD, 100 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	100 kΩ	MCWR04X1003FTL	FEC-2447094	Multicomp
R29、R41、R43、R44、R45、R104、 R109、R110、R151	电阻, SMD, 0 Ω, 1%, 1/16 W, 50 V, 0402	0 Ω	CRG0402ZR	FEC-1174140	TE Connectivity
R36、R37、R39、R40	电阻, SMD, 180 Ω, 5%, 1/2 W, 0805	180 Ω	ERJ-P6WJ181V	Digi-Key P16945CT-ND	Panasonic
R38、R42、R54、R89、R155	电阻, SMD, 0 Ω, 1%, 1/8 W, 150 V, 0805	0 Ω	WR08X000 PTL	FEC-2502664	Walsin
R46、R55、R57、R111、R112、 R142	电阻, SMD, 499 Ω, 1%, 1/16 W, 50 V, 0603	499 Ω	MC0603SAF4990T5E	FEC-1632442	Multicomp
R47、R48、R56、R58、R63、R79、 R80、R90、R91、R98	电阻, SMD, 100 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0603	100 kΩ	RC0603FR-13100KL	FEC-1799369	Yageo
R49、R50、R51、R52、R86、R147	电阻, SMD, 0 Ω, 1%, 1/16 W, 50 V, 0603	0 Ω	MC0603SAF0000T5E	FEC-2309111	Multicomp
R53、R59、R60、R61、R62、R64、 R65、R66、R67、R69、R71、 R73、R75、R76、R77、R78、 R81、R82、R83、R84、R85、 R94、R96、R99、R100、R102、 R103、R105、R106、R107、 R108	电阻, SMD, 10 kΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0603	10 kΩ	RC0603FR-0710KL	FEC-9238603	Yageo
R68、R70、R72、R74、R87、R88、 R92、R93、R95、R97、R101、 R143、R144、R145、R148、 R149、R150	电阻, SMD, 33 Ω, 1%, 1/16 W, 50 V, 0603	33 Ω	MCWR06X33R0FTL	FEC-2447344	Multicomp
R141	电阻, SMD, 0 Ω, 1%, 1/2 W, 200 V, 1210	0 Ω	CRCW12100000ZSTA	FEC-1653183	Vishay
R146	电阻, SMD, 1 MΩ, 1%, 1/16 W, 50 V, 0603	1 MΩ	MCWR06X1004FTL	FEC-2447285	Multicomp
R154	电阻, SMD, 2010	DNP	不适用	不适用	不适用
S1、S2、S3、S4	触动开关, 单刀单掷 (SPST), 编号, 0.05 A, 24 V	开关	B3S-1000	FEC-177807	Omron
T1	2线, 共模扼流圈, 表面 贴装, 190 Ω (100 MHz、 5 A时), 直流电阻20mΩ	DLW5BS	DLW5BSN191SQ2L	FEC-1515607	Murata
TP1、TP2	测试点, 锡, SMD	CON1	S1751-46R	FEC-2293786	Harwin
U1	IC数字iso, 2.5 kV, 4通 道, 24 SSOP	ADuM5411	ADUM5411BRSZ	FEC-2667947	ADI公司



索引标识符	器件描述	值	产品型号	Farnell订购代码	制造厂商
U2	IC, ADC, 24位, SPI, 串行, 40 LFCSP	AD4111	AD4111BCPZ	不适用	ADI公司
U3	IC, VREF, 系列, 2.5 V, 8 SOIC	ADR4525	ADR4525ARZ	FEC-2112685	ADI公司
U4	IC, MCU, 32位, 256 KB, 闪存, 64 LFCSP	ADuCM3029	ADUCM3029BCPZ	FEC-2747646	ADI公司
U14	IC, 稳压器, 线性, 3.3 V, 500 mA, 8 MSOP	ADP124	ADP124ARHZ-3.3-R7	FEC-1827296	ADI公司
U15	IC, 稳压器, 线性, 5.0 V, 200 mA, 8 MSOP	ADP7142	ADP7142ARDZ-5.0-R7	FEC-2727495	ADI公司
U5、U6	IC, 闪存, 256-mbit, 80 MHz, 8 WSON	W25Q256FV	W25Q256FV	Digi-Key W25Q256FVEIG-ND	Winbond Electronics
U16、U17	IC, 门电路, 1通道, 2-INP SOT23-5	74LVC1G08	SN74LVC1G08DBV	FEC-1287593	Texas Instruments
U18	IC, USB, FS, 串行, UART, 32-QFN	FT232R	FT232RQ	FEC-1146033	FTDI
Y1	晶振, 16.00 MHz, 9.0 pF, SMD	16 MHz	Q24FA20H00044 FA-20H 16 MHz 9.0 pF	FEC-1712814	Epson
Y2	晶振, 32.7680 KHz, 12.5 pF, SMD	32.768 KHz	ABS07-32.768KHZ-T	FEC-2101347	Abracon
Y3	晶振, 26.0000 MHz, 10 pF, SMD	26 MHz	ABM8G-26.000MHZ-B4Y-T	FEC-2101340	Abracon