

# TI 高精度设计： 经认证的设计 具有 4mA 至 20mA 电流环路输出的数字校准桥式传感器信号调 理模块



## TI 高精度设计

TI 高精度设计是由 TI 模拟产品专家创建的模拟解决方案。 经认证的设计提供理论、组件选择、仿真、完整的印刷电路板 (PCB) 电路原理图 & 布局布线、物料清单、测试性能和有用电路的经认证的测试结果。 还讨论了有助于符合替代设计目标的修改电路。

## 电路描述

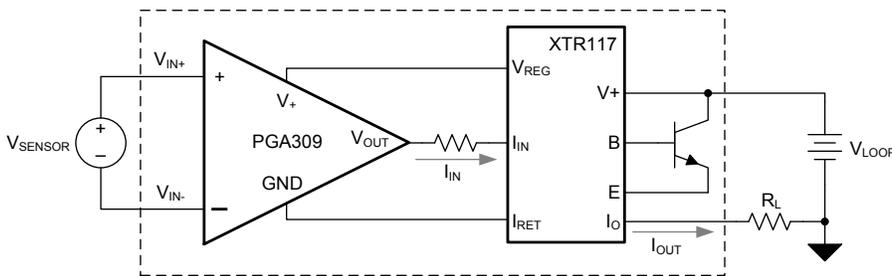
这个桥式传感器调模块将一个经良好稳压的电流输出传送到一个以地为基准的负载。 第一个级使用混合信号可编程增益放大器 (PGA) 来为差分桥式传感器电压提供线性度和温度补偿。 第二级将 PGA 输出电压转换为电流，并且通过一个标准 4mA 至 20mA 电流环路来发送电流。 额外的电路保护模块能够抵抗静电放电 (ESD)，电子快速瞬态 (EFT)，辐射和传导电磁干扰 (EMI) 和浪涌的影响。

## 设计资源

- [设计存档](#) 全部设计文件
- [TINA-TI](#) SPICE 仿真器
- [PGA309](#) 产品文件夹
- [XTR117](#) 产品文件夹



[请咨询模拟产品专家](#)  
[WEBENCH® 设计中心](#)  
[TI 高精度设计库](#)



这个 TI 参考设计末尾的一个重要声明解决了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

TINA-TI 是德州仪器 (TI) 的商标  
WEBENCH 是德州仪器 (TI) 的注册商标

## 1 设计汇总

设计要求如下：

- 电流环路电压： 7.5V - 40V 直流
- 传感器电压满量程灵敏度： 1mV/V - 245mV/V
- 输出： 4mA - 20mA 直流

Table 1 中总结了设计目标和性能。 Figure 1 图示了设计测得的传递函数。 由于模块可针对广泛的传感器进行优化，显示的输入电压值只代表一个系统。 这个设计中使用的输入传感器配置的信息请参考补充设计存档中的 PGA309 传感器配置试算表。

表 1. 设计目标、仿真和测试性能的比较

	目标值	测得值
输出误差 (温度和压力范围内 % 满量程 (FSR))	0.1	0.04
输出电流噪声 ( $\mu A_{PP}$ )	15	6
传感器的最大非线性 (%)	$\pm 3$	$\pm 4$

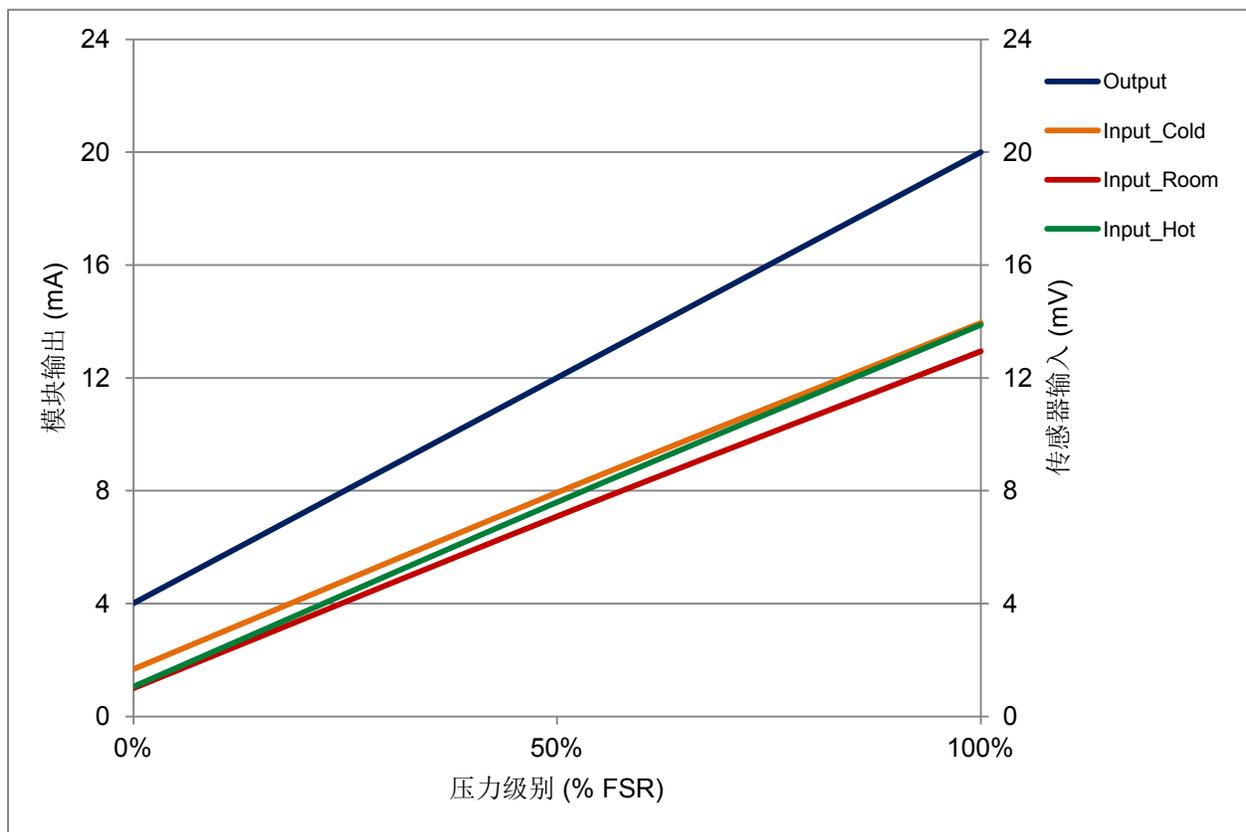


图 1： 测得的传递函数

## 2 操作原理

Figure 2 中显示了这个设计更加完整的电路原理图 此电路的传递函数基于输入电压,  $V_{\text{SENSOR}}$ , 增益和 PGA309 内的偏移模块, 以及到 XTR117 的输入电流之间的关系。在第一级, 桥式传感器差分输入电压,  $V_{\text{SENSOR}}$ , 被 PGA309 调节和线性化, 以产生  $V_{\text{OUT}}$ 。在第二级,  $V_{\text{OUT}}$  被一个串联电阻转换为电流, 然后与一个恒定基准电流相加来生成  $I_{\text{IN}}$ , 成为到 XTR117 的总电流输入。  $I_{\text{IN}}$  被 XTR117 的固定电流增益放大, 并且在 一个两线制电流环路上发出。

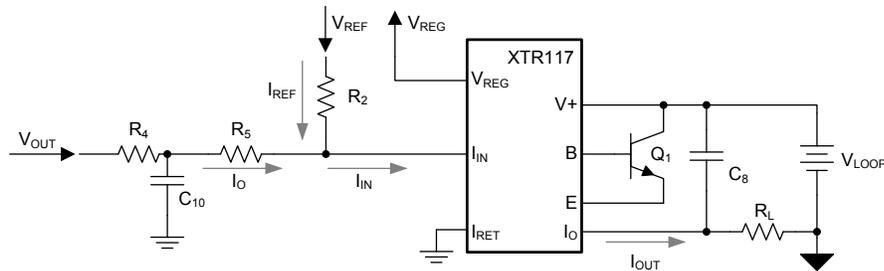
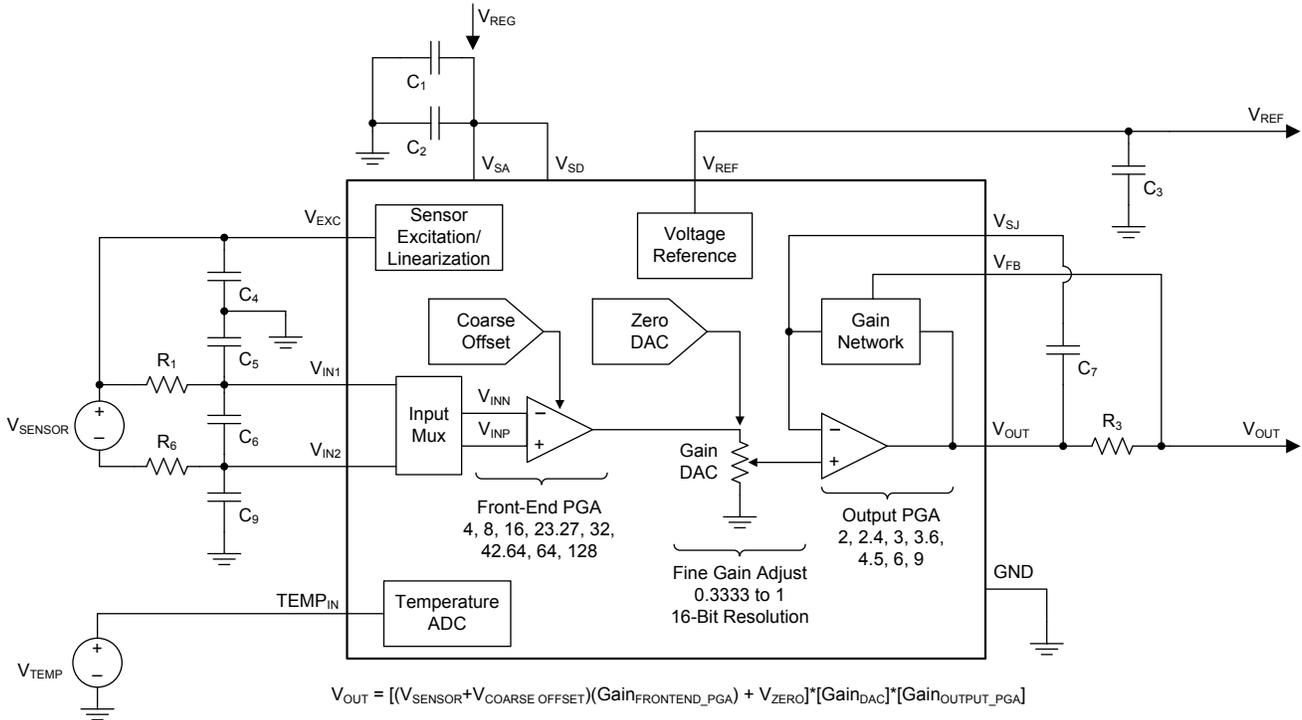


图 2: 完整电路原理图

这个设计的转换功能由以下等式定义：

$$V_{OUT} = [(V_{SENSOR} + V_{COARSE\ OFFSET}) * (Gain_{FRONTEND\_PGA}) + V_{ZERO}] * [Gain_{DAC}] * [Gain_{OUTPUT\_PGA}] \quad (1)$$

$$I_0 = \frac{V_{OUT}}{R_4 + R_5} \quad (2)$$

$$I_{REF} = \frac{V_{REF}}{R_2} \quad (3)$$

$$I_{IN} = I_0 + I_{REF} \quad (4)$$

$$I_{OUT} = I_{IN} * 100 \quad (5)$$

## 2.1 第一级：电压输出桥式传感器信号调理模块

此电路的第一级使用 PGA309 来调节一个差分桥式传感器电压。PGA309 的输出，可被数字校准至非常精确的值（误差小于满量程的 0.1%）。为了确保输入信号尽可能的没有噪声，在传感器输出和 PGA309 输入引脚之间放置一个低通滤波器网络。

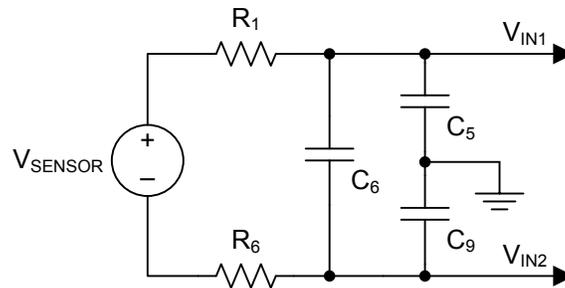


图 3：传感器电压输入滤波器

此输入滤波器同时具有共模组件和一个差模组件。由于传感器电压信号是一个直流信号，为了减弱任何可能出现的交流噪声，这滤波器的截至频率可被设定到非常低的值。

此滤波器的截止频率由以下等式定义：

$$R_1 = R_6; C_5 = C_9; C_6 = 10 * C_5 \quad (6)$$

$$f_{C\_DIFF} = \frac{1}{2 * \pi * 2R_1 * (10C_5 + \frac{1}{2}C_5)} = \frac{1}{42 * \pi * R_1 * C_5} \text{ Hz} \quad (7)$$

$$f_{C\_CM} = \frac{1}{2 * \pi * R_1 * C_5} \text{ Hz} \quad (8)$$

此差模滤波器所需的截至频率为  $f_{C\_DIFF} = 20\text{Hz}$ ，以有效削减全部差模交流噪声。针对共模滤波器的截至频率应该至少被设定为十倍频，以避免将共模噪声拾取（诸如 60Hz 噪声）转换为一个由 PGA309 放大的差分信号。要设定所需的差分滤波器频率，计算出  $R_1$  和  $C_5$  将自动实现这一要求，这是因为  $C_6$ ，共模滤波电容器，被设定为  $C_5$  值的十倍。

一个计算所需无源组件值的简单方法是为  $C_5$  选择一个常用值，通常为 10nF，并且算出  $R_1$ 。通过重新排列上面等式的项目，所需的  $R_1$  值被定义为：

$$R_1 = \frac{1}{42 * \pi * C_5 * f_{C\_DIFF}} \quad (9)$$

将  $C_5 = 10\text{nF}$  和  $f_{C\_DIFF} = 20\text{Hz}$  代入上面的等式，得出以下  $R_1$  理想值：

$$R_1 = 37.9 \text{ k}\Omega$$

通过这个理想值， $39.2\text{k}\Omega$  被选为一个接近 1% 的标准值。使用  $R_1 = 39.2\text{k}\Omega$  以及  $C_5 = 10\text{nF}$  的最终电路，滤波器的最终截止频率为：

$$f_{C\_DIFF} = 19.3 \text{ Hz}$$

$$f_{C\_CM} = 406 \text{ Hz}$$

一旦传感器电压信号到达 PGA309，器件内部的增益、偏移和线性化电路执行所需的信号调理功能。这是 PGA309 内的 6 个关键功能模块：

1. **线性化数模转换器 (DAC)：** 调整桥式传感器激励电压， $V_{EXC}$ ，以补偿传感器的固有非线性。
2. **粗糙偏移 DAC：** 添加一个直流电压偏移到前端 PGA 的输入。
3. **前端 PGA：** 提供 4V/V 至 128V/V 的增益。
4. **调零 DAC：** 添加一个精细直流电压偏移到前端 PGA 的输出。
5. **增益 DAC：** 将前端 PGA 的输出减少到 1/3。
6. **输出 PGA：** 提供 2V/V 至 9V/V 的增益。

通过 PGA309 内部的寄存器或一个外部 EEPROM，这些功能模块中的每一个可被数字设定为一个特定值。应该通过一个单线制或 I<sup>2</sup>C 数字接口来校准这些值。在补充设计存档中给出了校准算法的完整说明。

在部分 2 开始部分给出了定义 PGA309 传递函数的等式。要获得 PGA309 内部电路的详细说明，请见 [《PGA309 用户指南》](#) 的部分 2。

## 2.2 第二级：V-I 转换器和电流发送器

此电路的第二级使用一个串联电阻， $R_4 + R_5$ ，来将  $V_{OUT}$  转换为一个电流， $I_0$ 。从直流角度来说， $R_4$  和  $R_5$  可被一个单个电阻取代，但是双电阻拓扑结构可使得额外一阶低通滤波器的执行更加简便。

PGA309 的固定基准电压， $V_{REF}$ ，与  $R_2$  一同使用，以创建一个恒定偏移电流， $I_{REF}$ 。将  $I_0$  和  $I_{REF}$  相加以生成  $I_{IN}$ ，即流入 XTR117 的总输入电流。XTR117 将  $I_{IN}$  放大，并且通过一个两线制电流环路来发送获得的输出电流， $I_{OUT}$ 。XTR117 的电流增益被固定在 100A/A，所以，为了实现  $I_{OUT} = 4\text{mA}$  至  $20\text{mA}$ ， $I_{IN}$  必须等于  $40\mu\text{A}$  至  $200\mu\text{A}$ 。

为该级选择组件的最直接方法如下：

1. 为该应用定义最适合的目标 PGA309  $V_{OUT}$  和 XTR117  $I_{OUT}$  范围。
2. 根据之前步骤中定义的输出电压和输出电流范围计算  $R_4$  和  $R_5$  的值。
3. 计算生成所需最小 XTR117 输出电流的  $R_2$  值。
4. 计算将在 XTR117 的输入上创建所需低通滤波器截止频率的  $C_{10}$  值。

### 2.2.1 定义目标 范围

定义 XTR117 线性输出电流的目标范围比较简单，这是因为这个范围应该遵循 4mA 至 20mA 工业应用标准。然而，为了适应可能出现的超量程和欠量程故障情况，在设计中使用更宽的输出范围将比较有利。指定的实际范围取决于终端应用的需要，但是对于这个参考设计，目标输出电流范围被设定如下：

$$I_{\text{OUT\_MAX}} = 25 \text{ mA}$$

$$I_{\text{OUT\_MIN}} = 2.85 \text{ mA}$$

PGA309 的输出电压可在其电源轨的 100mV 范围内摆动，因此，所需的输出电压范围被设定为这些限值，加上额外的 50mV 裕量。

$$V_{\text{OUT\_MAX}} = 4.85 \text{ V}$$

$$V_{\text{OUT\_MIN}} = 0.15 \text{ V}$$

### 2.2.2 $R_4$ 和 $R_5$ 计算

$R_4$  和  $R_5$  转换 PGA309 输出电压， $V_{\text{OUT}}$ ，至一个电流，在这个设计中被定义为  $I_0$ 。 $R_4$  和  $R_5$  所需的总串联电阻可从之前步骤中定义的目标  $I_{\text{OUT}}$  和  $V_{\text{OUT}}$  范围计算得出。XTR117 100A/A 的电流增益可被考虑在内。

$$(R_4 + R_5) = \frac{V_{\text{OUT\_MAX}} - V_{\text{OUT\_MIN}}}{\frac{I_{\text{OUT\_MAX}}}{100} - \frac{I_{\text{OUT\_MIN}}}{100}} = \frac{4.85 \text{ V} - 0.15 \text{ V}}{250 \mu\text{A} - 28.5 \mu\text{A}} = 21.2 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

$R_4$  和  $R_5$  的串联组合应该等于 21.2 k $\Omega$ ，并且确定每个电阻阻值的简单方法是为  $R_5$  选择一个常见值，并算出  $R_4$ 。如果  $R_5$  被选为 10k $\Omega$ ，可使用以下等式轻松计算出  $R_4$ 。

$$R_4 = 21.2 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega = 11.2 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

最接近的 1% 标准电阻器值为 11.3k $\Omega$ ，这个值是为这个设计选择的值。

### 2.2.3 $R_2$ 计算

在部分 2.2.1 中，最小输出电流， $I_{\text{OUT\_MIN}}$ ，被定义为 2.85mA。可使用以下等式计算实际最小输出电流：

$$I_{\text{OUT\_MIN\_actual}} = \frac{V_{\text{OUT\_MIN}}}{R_4 + R_5} * 100 = \frac{0.15 \text{ V}}{21.3 \text{ k}\Omega} * 100 = 704.225 \mu\text{A} \quad (12)$$

根据这个结果，可以很明显地看出，需要额外的电流来实现所需输出。PGA309 的电压基准， $V_{\text{REF}}$ ，可与  $R_2$  一起用来创建这个额外电流，被称为  $I_{\text{REF}}$ 。可使用以下等式计算出所需的  $I_{\text{REF}}$  和  $R_2$  值：

$$I_{\text{REF}} = I_{\text{OUT\_MIN}} - I_{\text{OUT\_MIN\_actual}} = 2.85 \text{ mA} - 704.225 \mu\text{A} = 2.146 \text{ mA} \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{V_{\text{REF}}}{I_{\text{REF}}} = \frac{4.096 \text{ V}}{2.146 \text{ mA}} = 190.9 \text{ k}\Omega \quad (14)$$

最接近的 1% 标准电阻值为 191k $\Omega$ ，这是为这个设计选择的值。现在可计算最小和最大输出电流的近似值。任何误差将在校准过程中被校正。

$$I_{\text{OUT\_MIN}} = \left( \frac{V_{\text{OUT\_MIN}}}{R_4 + R_5} + \frac{V_{\text{REF}}}{R_2} \right) * 100 = \left( \frac{0.15 \text{ V}}{21.3 \text{ k}\Omega} + \frac{4.096 \text{ V}}{191 \text{ k}\Omega} \right) * 100 = 2.85 \text{ mA} \quad (15)$$

$$I_{\text{OUT\_MAX}} = \left( \frac{V_{\text{OUT\_MAX}}}{R_4 + R_5} + \frac{V_{\text{REF}}}{R_2} \right) * 100 = \left( \frac{4.85 \text{ V}}{21.3 \text{ k}\Omega} + \frac{4.096 \text{ V}}{191 \text{ k}\Omega} \right) * 100 = 24.91 \text{ mA} \quad (16)$$

### 2.2.4 $C_{10}$ 计算

$R_4$  和  $C_{10}$  创建一个低通滤波器，在信号到达 XTR117 输入引脚之前减少由 PGA309 生成的高频噪声。滤波器的截止频率被定义为：

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R_4 * C_{10}} \quad (17)$$

PGA309 生成 2kHz 以及以上的噪声，所以滤波器需要的截止频率为 1.4kHz。这确保实现 2kHz 的较大衰减。由于  $R_4$  的值已经被确定，等式 13 中的项可被重新排列以算出  $C_{10}$ 。

$$C_{10} = \frac{1}{2 * \pi * R_4 * f_c} = \frac{1}{2 * \pi * 11.3 \text{ k}\Omega * 1.4 \text{ kHz}} = 10.06 \text{ nF} \quad (18)$$

10nF 是标准电容值，也是为这个设计选中的值。

## 3 组件选择

### 3.1 半导体选择

这个参考设计是一个非标准设计，这是因为必须使用特定器件来实现这份文档中描述的功能。为了实现正确的桥式传感器信号调理，其中包括温度补偿，需要使用 PGA309。这个应用不需要任何其他包含完整特性集的器件。

第二级内电流发送器的要求是非常直接明确的。此器件必须是一款能够处理宽环路电源范围的两线制发送器，可发送器能够接受电流输入，并且为其它具有集成稳压器的电路供电。XTR117 是一款具有 7.5V 至 40V 环路电源电压的两线制发送器，此发送器的最大输入电流为 250 $\mu$ A，并且具有一个内部 5V 稳压器。XTR117 的低静态电流确保符合功耗要求，并且低跨度误差漂移将减少校准后的总体系统误差。

### 3.2 晶体管选择

外部晶体管， $Q_1$ ，传导绝大多数满量程输出电流。这个晶体管的功率耗散在高环路电压（40V）和 20mA 输出电流时接近 0.8W。实际上，任何满足电压、电流和功率额定值的 NPN 晶体管都适用于这个设计。外壳类型和热安装注意事项常常影响任一指定应用的选择。

FCX690BTA NPN 晶体管被选择用于这个设计，这是因为此器件超过所有关键技术规格，并且借助其小外形尺寸晶体管（SOT）-89 封装占用最少的 PCB 面积。

### 3.3 无源组件选择

对这个设计会产生最大影响的无源组件是 PGA309 输入滤波器网络中的电阻器和电容器， $R_1$ ， $R_6$ ， $C_5$ ， $C_6$  和  $C_9$ ，XTR117 输入滤波器以及电压至电流转换网络中的电阻器和电容器， $R_4$ ， $C_{10}$ ， $R_5$  和  $R_2$ 。

在大多数应用中，滤波器的截止频率不需要十分精确。在这个情况下， $\pm 1\%$  的电阻器耐受值和  $\pm 10\%$  的电容器耐受值是足够的。如果应用需要的话，可选择更加严格的耐受值。此外，在电压至电流转换电路中，通常不需要非常高精度或非常低温度系数的电阻器，这是因为任何误差将被校准，并且此电路通常被安装在一个密封的、热稳定封闭环境中。

这个设计中其它无源组件可被选为 1% 或更大的耐受值，这是因为它们将不直接影响这个设计转换功能。请确保所有选择的电容器具有足够的电压额定值。

### 3.4 保护组件选择

几个额外的电路组件确保系统具有足够的保护来通过一系列的 EMC（电磁兼容性）测试，在这些测试中，系统被暴露在极端的电气条件下，其中包括 ESD（静电放电），EFT（电子快速瞬态），浪涌（模拟一个闪电冲击）和 EMI（电磁干扰）。如果系统能够通过这些测试，那么它的稳健耐用性可使其在某些恶劣的电气环境中不受损坏。

由一个肖特基二极管和两个 TVS（瞬态电压抑制器）二极管来提供针对 ESD，EFT 和浪涌的保护。BAS70-TP 肖特基二极管确保在电源端子连接极性相反时，没有电流流经电流环路。这个二极管可针对高达 70V 的反向电流提供保护，并且小型 SOT-23 封装占用最小的 PCB 面积。

由于系统的环路电源电压可高达 40V，靠近 XTR117 的二极管应该具有一个稍微高于 40V 的击穿电压。相似的，靠近 PGA309 的 TVS 二极管应该具有一个稍微高于 5V 的击穿电压。这些二极管还必须是双向的，具有 5 $\mu$ A 或更小的反向泄露电流，以不对电流输出的精度产生重大影响，并且具有少于 1ns 的响应时间来适当地处理不同的测试条件。根据这些要求，SMBJ40CA 和 SMBJ5V0CA 被分别选择用来保护 XTR117 和 PGA309。

对 EMI 的保护有一对与电流环路电源串联的铁氧体磁珠提供。这些组件应该在大多数临界交流频率时具有高阻抗，大于最大环路电流的电流额定值，和一个低直流电阻，以便在正常运行期间防止明显压降。HZ0603C601R-10 符合这些要求，并且采用小型 0603 封装。

## 4 仿真

在编写此文档时，没用适用于 PGA309 和 XTR117 的仿真模型，所以目前不可能仿真系统的全部功能。然而，系统中的滤波器网络由无源组件组成，可以很容易地建模来验证它们的转换特性。Figure 4 到 Figure 9 中显示的 TINA-TI™ 电路原理图包括设计过程中获得的组件值。

4.1 PGA309 输入滤波器 (差分)

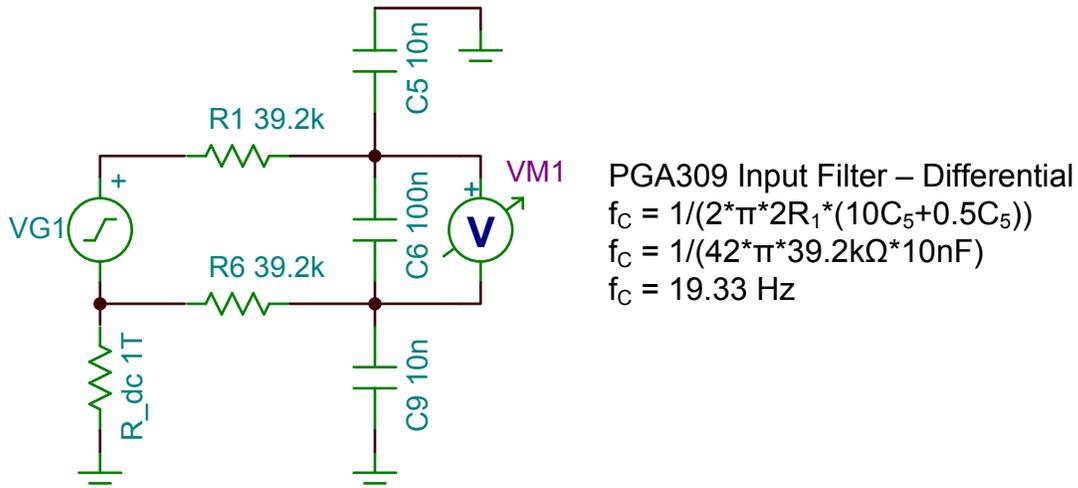


图 4: PGA309 输入滤波器 (差分) - 电路原理图

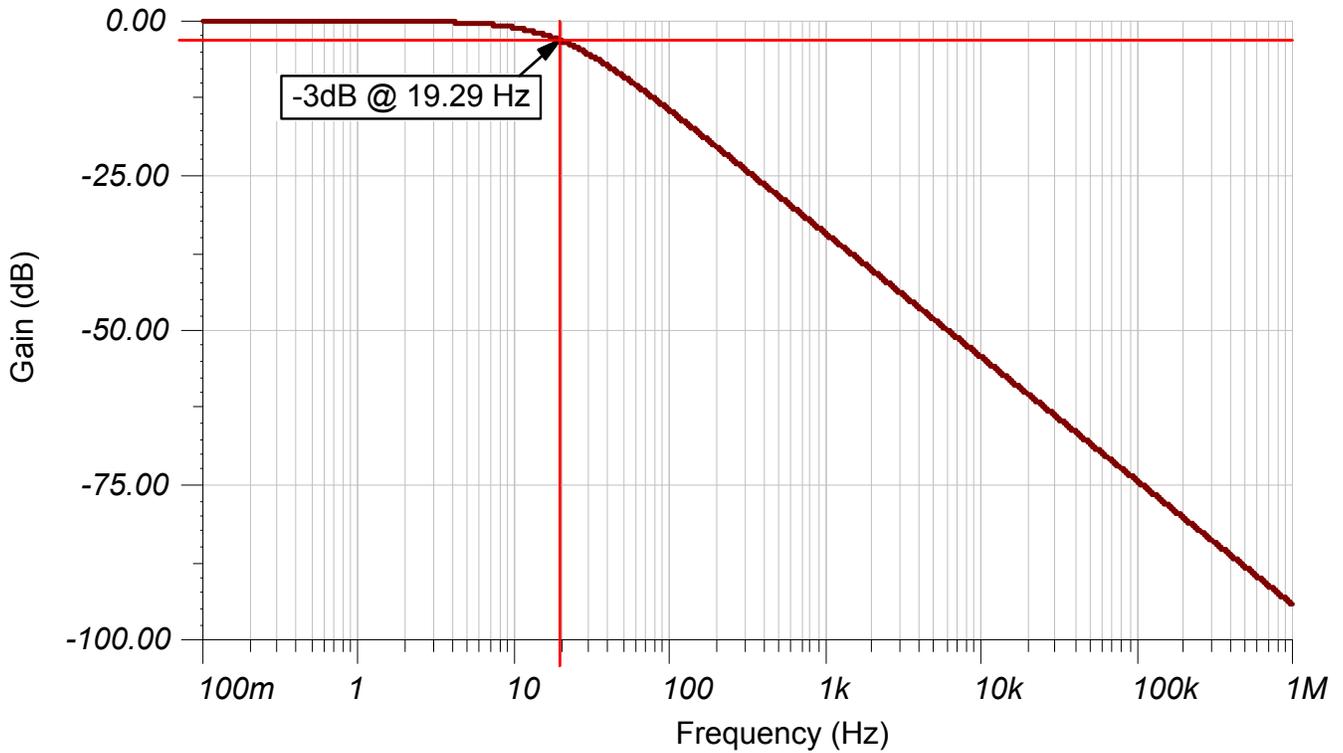


图 5: PGA309 输入滤波器 (差分) - 转换特性

4.2 PGA309 输入滤波器 (共模)

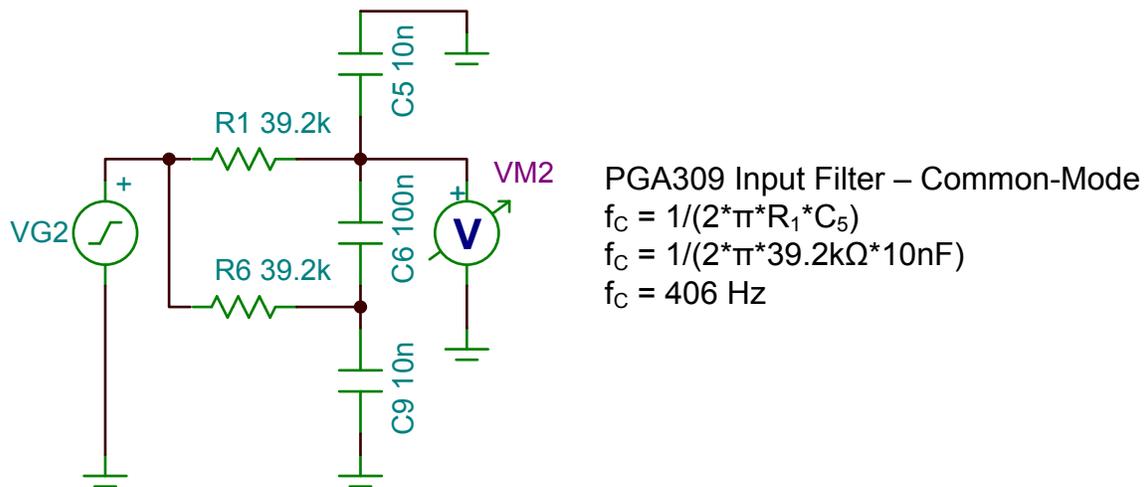


图 6: PGA309 输入滤波器 (共模) - 电路原理图

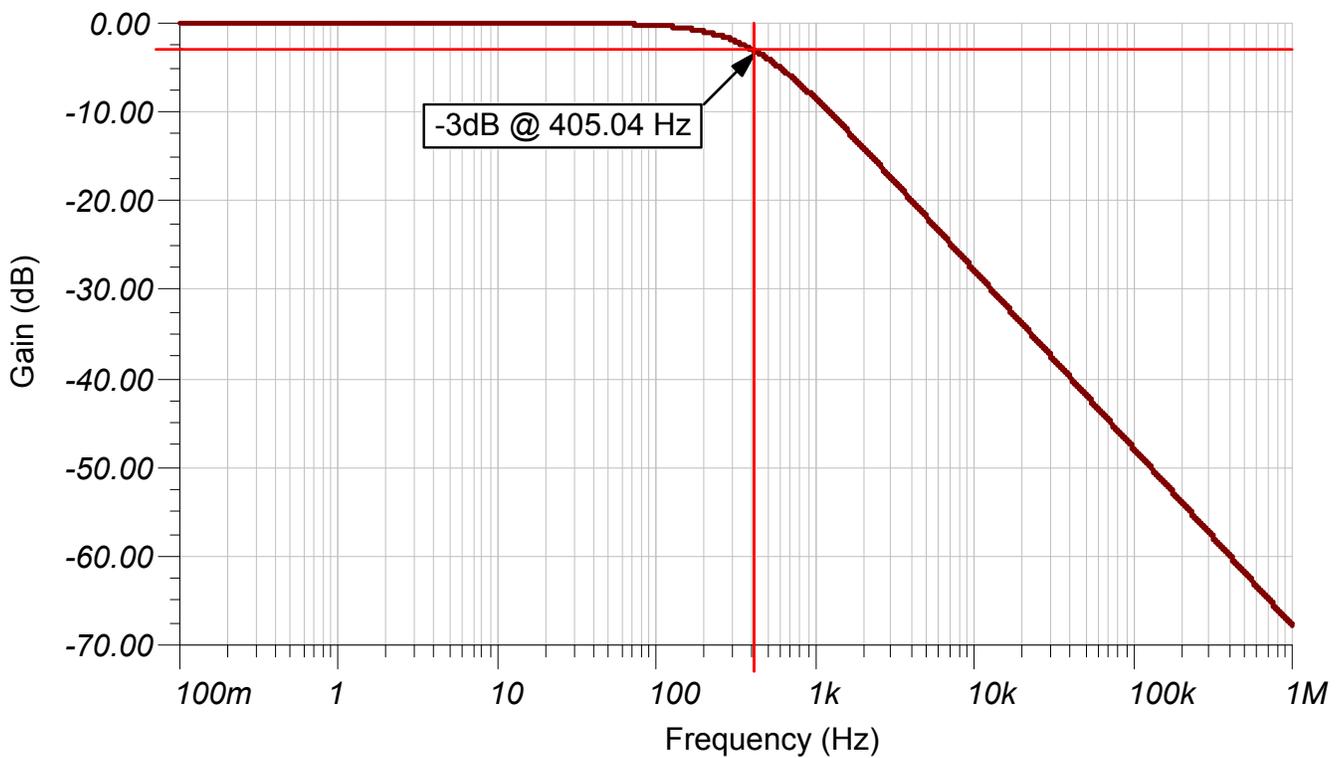


图 7: PGA309 输入滤波器 (共模) - 转换特性

### 4.3 XTR117 输入滤波器

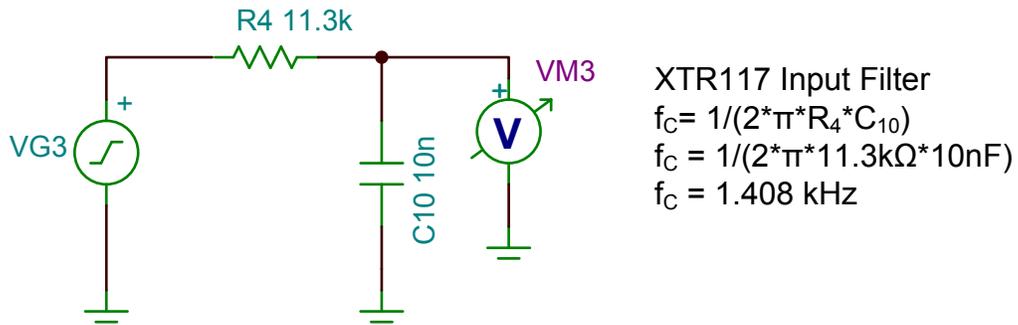


图 8: XTR117 输入滤波器 - 电路原理图

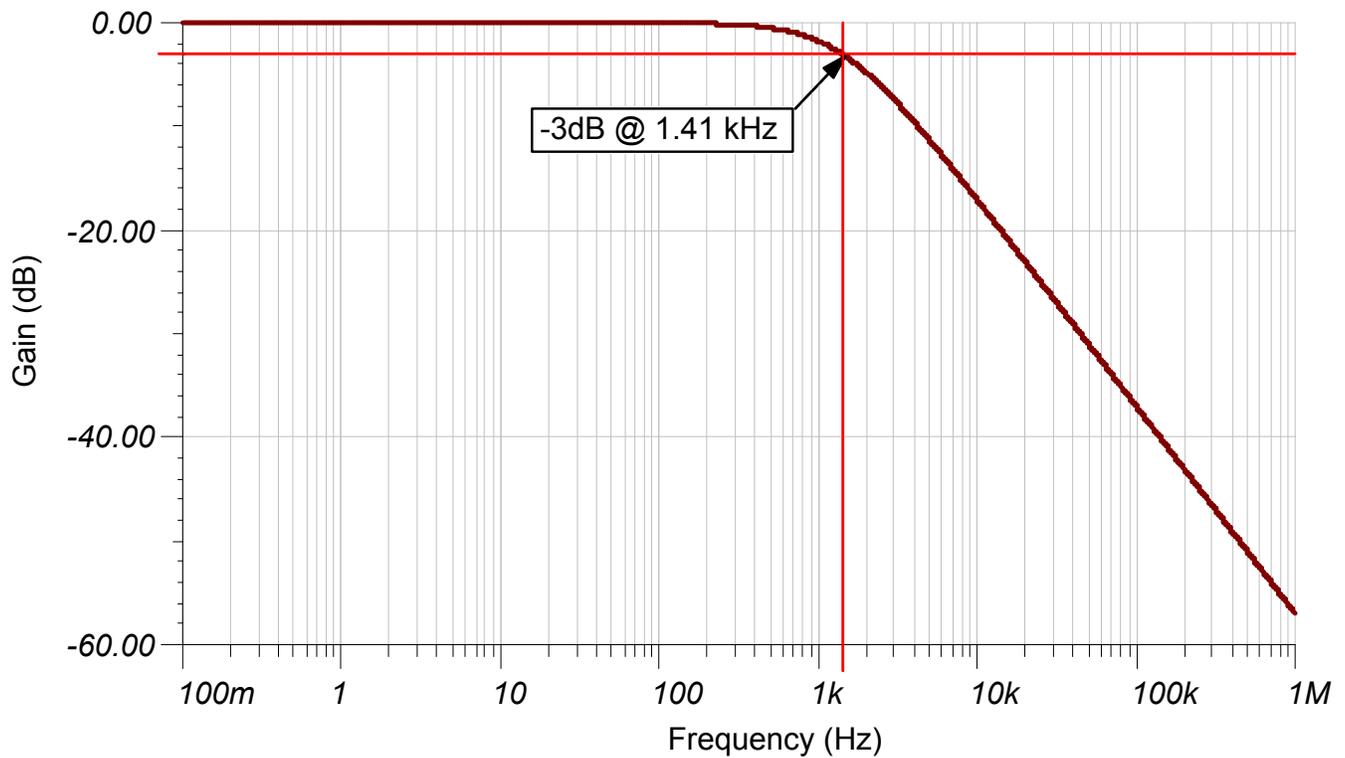


图 9: XTR117 输入滤波器 - 转换特性

## 5 PCB 设计

可在 Appendix A 中找到 PCB 电路原理图和物料清单。

### 5.1 PCB 布局布线

这个设计中使用的 PCB 为直径 1 英寸的圆形。这个形状和大小在传感器模块系统中很常见，并且在实际产品中，只需很小的改动即可轻松实现此设计。由于这个小尺寸，组件放置非常密，而有效走线很关键。这个布局布线的高级方法是放置一级组件 - PGA309 (U2) 和辅助电路 - 到顶层，而二级组件 - XTR117 (U1) 和辅助电路，以及保护组件 - 到底层。

到外部桥式传感器的连接在 J2 上，并且差分桥式传感器信号走线很短，并且直接接至 PGA309 输入引脚。数字通信迹线 (I<sup>2</sup>C, SDA, SCL) 的走线远离模拟信号走线以防止串扰。全部去耦合电容器被放置在非常靠近它们相关电源引脚的位置上。两个层上的全铜覆区提供到接地的出色低阻抗路径。在 J3 上连接电流环路电源，而单线制数字接口连接在 J1 上。

Q<sub>1</sub> 内功率耗散产生的热量会导致环境温度变化，而这个温度变化会影响 XTR117 的性能。为了最大限度地减小此影响，Q<sub>1</sub> 被放置在尽可能远离 XTR117 的位置上。

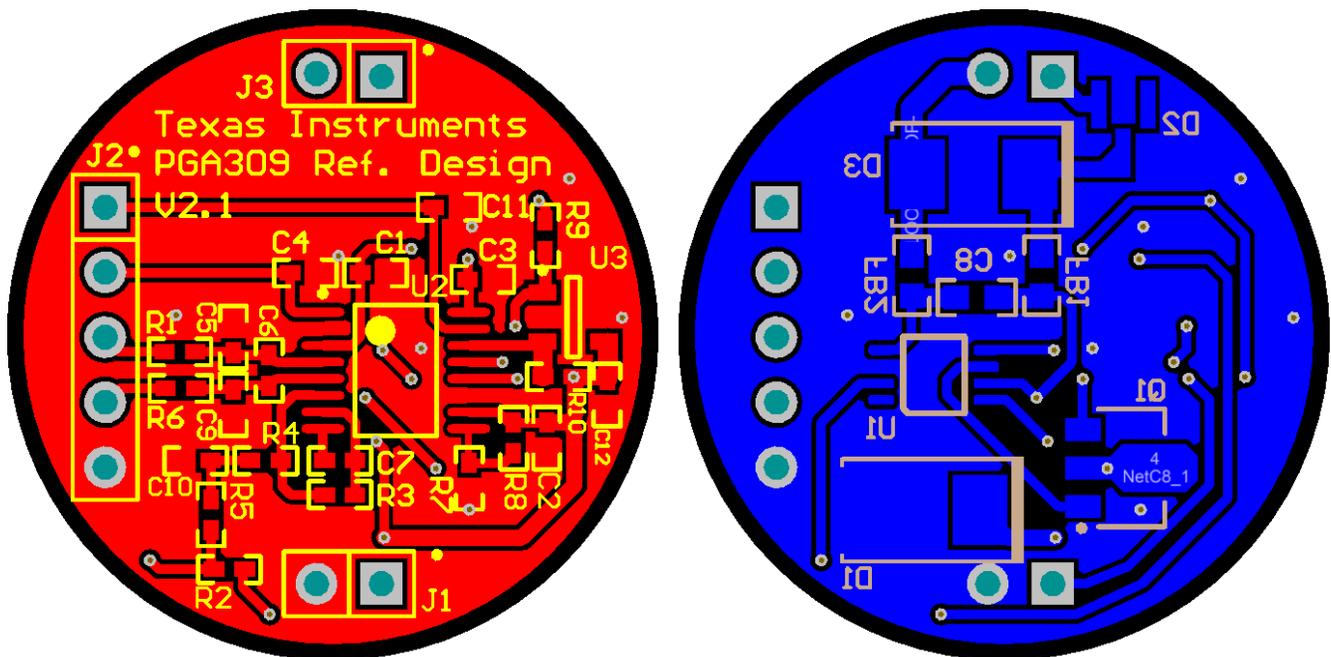


图 10: PCB 布局布线

## 6 验证 & 测得的性能

### 6.1 测试装置搭建

这个参考设计中定义的电路被用来代表一个实际应用中的功能模块，将只是一个更大完整系统的一部分。因此，需要额外硬件和软件来校准和测试此设计。所需的测试装置包括下面列出的组件。通过单击每个组件名称上的链接可获得额外的文档和下载。Figure 11 和 Figure 12 显示了一个完整的测试装置和一个成功校准之后的软件屏幕截图。

1. [针对评估模块 \(EVM\) 的传感器模拟器](#)：模拟桥式传感器压力和温度信号。它的输出特性是用户可配置并且可通过使用补偿设计 .zip 文件中的 PGA309 传感器配置电子表格来确定。
2. [USB-DAQ 平台](#)：生成数字通信信号，连接至电流环路电源，测量模块输出
3. [PGA309EVM-USB 软件](#)：控制 PGA309 的数字通信，并根据 USB-DAQ 平台的测量值执行全部校准计算
4. 金属漆罐：作为针对参考设计模块的一个外壳，并且通过阻断外来噪声来提高性能。



图 11： 测试装置

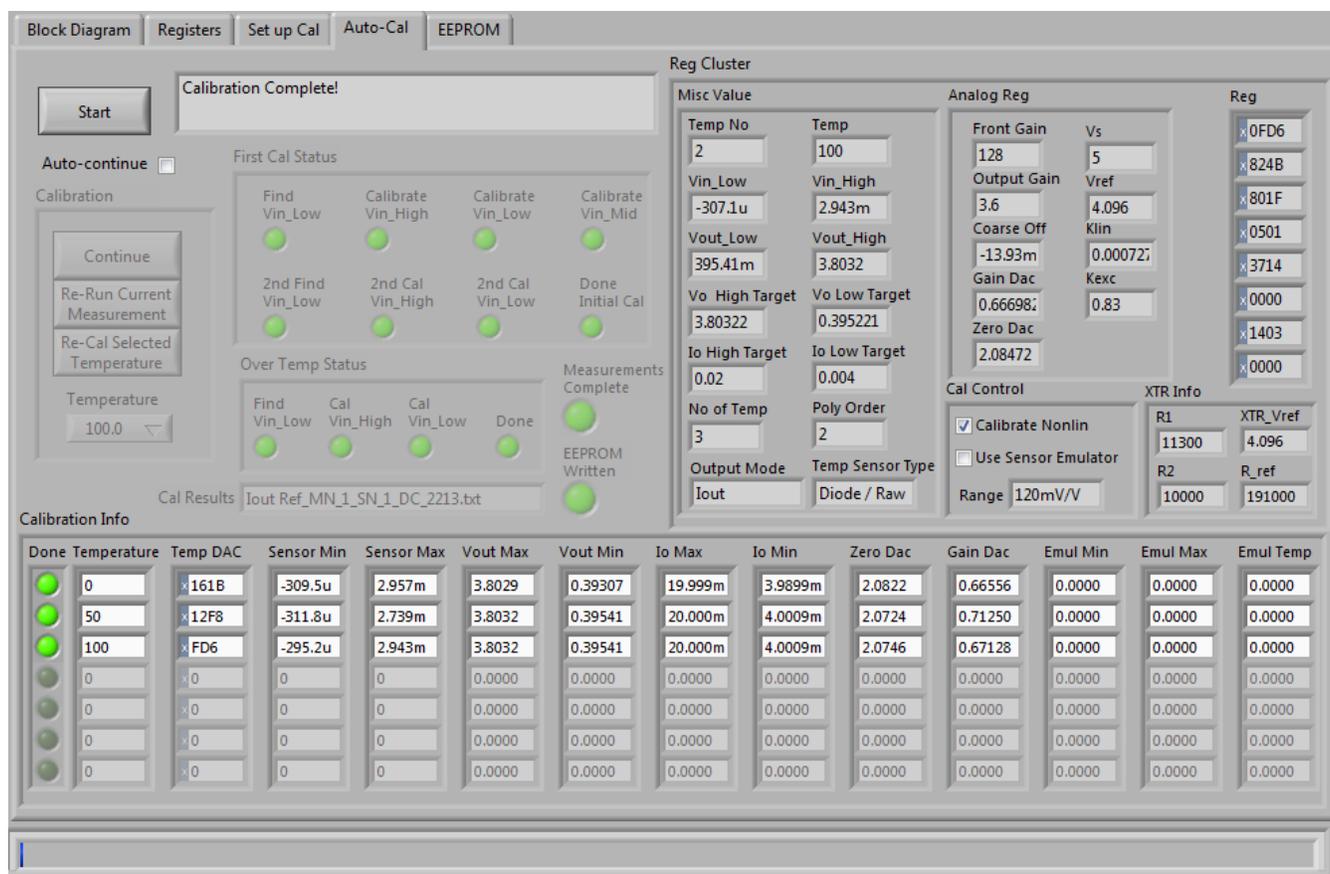


图 12: PGA309EVM-USB 软件 (后置校准)

## 6.2 模块输出误差

在校准之前, 让系统以最大输出功率运行 10 分钟, 以达到热平衡。 下一步, 在三个温度点上 (“低温”、“室温”、“高温”) 上, 模块的输出在 0%, 50%, 和 100% 压力时校准。 这创建了总共 9 个测试条件 - 每个测试条件针对一个压力和温度的组合。 所要求的运行状态为模块的输出将保持在理想值的 0.1% 范围内, 与温度无关。 Table 2 列出了每个压力条件的理想输出, 以及最小和最大允许输出。

表 2. 模块输出技术规格

压力信号 (% FSR)	理想输出 (mA)	最小输出 (mA)	最大输出 (mA)
0	4	3.984	4.016
50	12	11.984	12.016
100	20	19.984	20.016

使用针对以满量程百分比计算的误差的标准等式确定模块输出的误差。 这个等式被定义为:

$$\text{Error}_{\%FSR} = \frac{\text{Value}_{\text{MEASURED}} - \text{Value}_{\text{IDEAL}}}{\text{Span}} * 100 \quad (19)$$

一旦校准完成, 每个压力和温度条件测试 10 分钟。 这段时间内, 输出被一个数据采集程序记录, 并且导出至电子表格。 平均输出值被确定, 并且计算出误差。 Figure 13 给出了测试结果。 这个结果只表示一个系统的运行状态, 所以结果会有所不同。

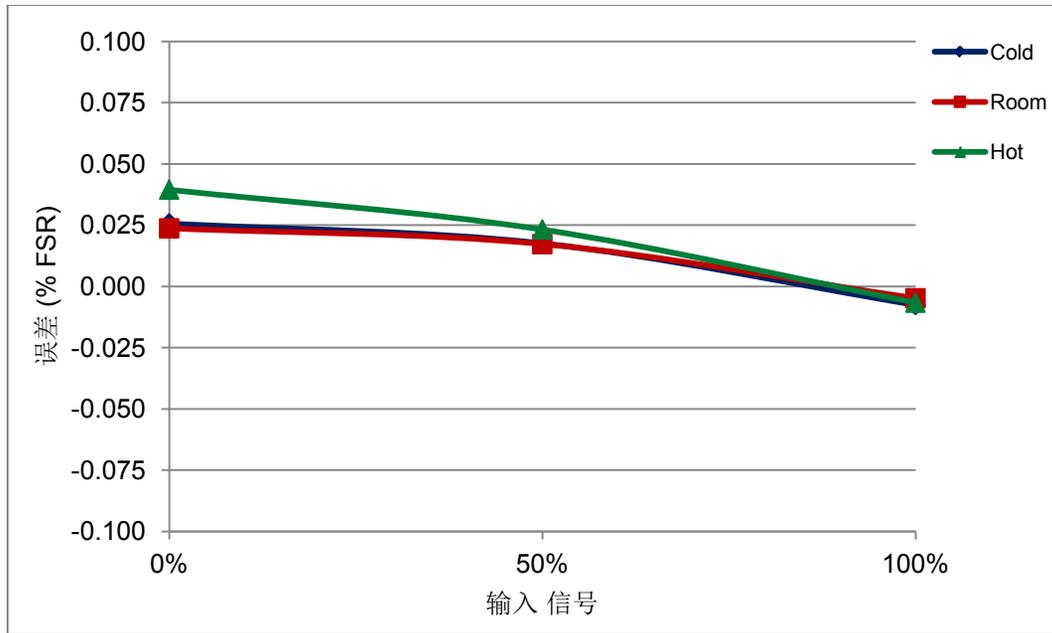


图 13: 模块输出误差测试结果

### 6.3 模块输出噪声

在进行了部分 6.2 中描述的输出误差测试后，此系统被放置在一个密封的金属漆罐中，以模拟密封金属封闭环境中的真实产品。这个罐作为外来噪声的有效屏障，从而确保任何测得的噪声都来自电路内部。Figure 14 中显示此罐。



图 14: 金属漆罐

输入信号在室温时被设定为 100%，并且系统输出被记录。Figure 15 给出此测试的结果。这个结果只表示一个系统运行状态，所以结果会有所不同。

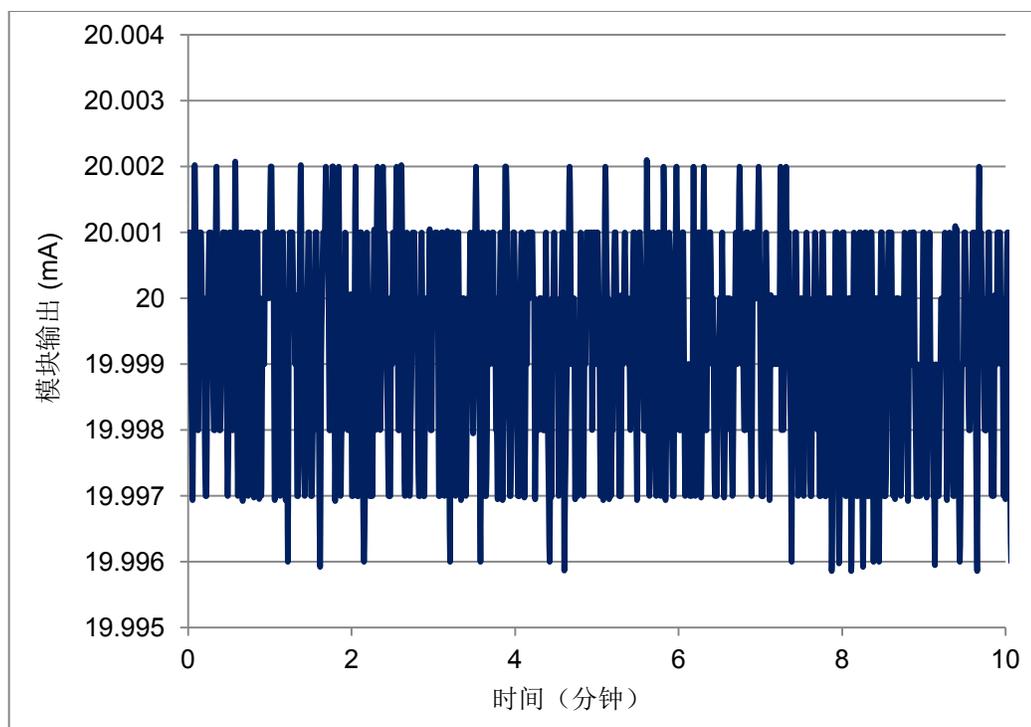


图 15: 模块输出噪声测试结果

#### 6.4 最大传感器非线性

这个 PGA309 输入上的桥式传感器的特性会因应用的不同而发生很大变化。为了处理这个变化, PGA309 必须具有一个宽范围的可调功能。Table 3 列出了 PGA309 针对几个桥式传感器参数的调整范围。

表 3. PGA309 传感器调节功能

满量程灵敏度	1mV/V 至 245mV/V
量程漂移	> $\pm 3300$ ppmFS/ $^{\circ}$ C
量程漂移非线性	$\geq 10\%$
零偏移	$\pm 200\%$ FS
零偏移漂移	> $\pm 3300$ ppmFS/ $^{\circ}$ C
零偏移漂移非线性	$\geq 10\%$
传感器阻抗	> 200 $\Omega$

传感器阻抗

一个未列出的关键技术规格是此传感器的最大压力非线性 - 传感器输出电压的二阶非线性与已施加压力信号 (以跨度的 % 给出) 之间的关系。

Figure 16 中给出了这个非线性的一个示例。

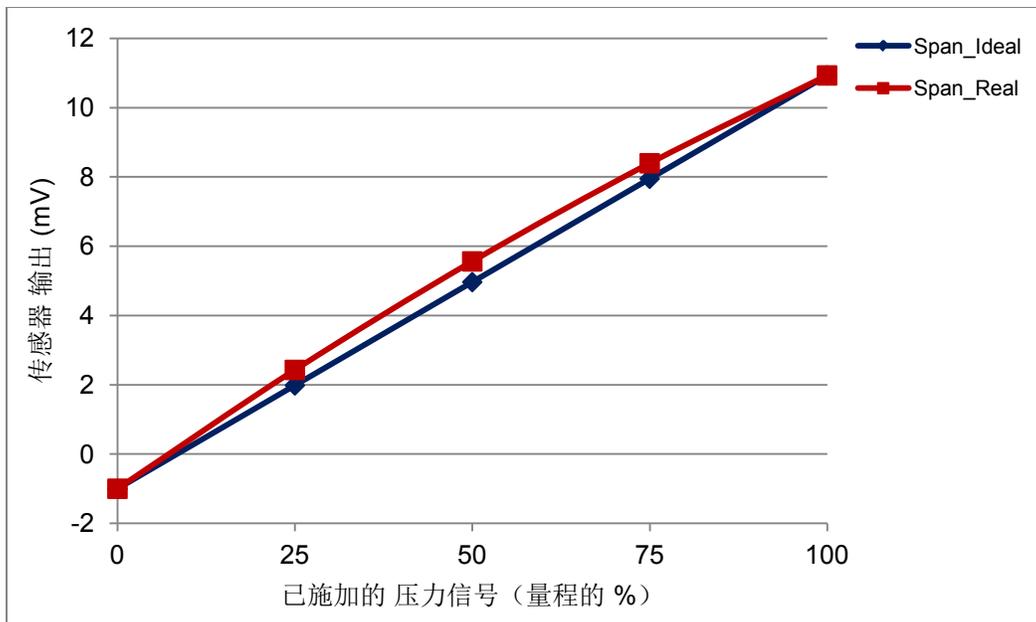


图 16: 传感器输出, 理想值与 +4% 非线性之间的关系

未指定这个最大非线性的原因是没有适用于每个系统的单个技术规格。PGA309 电源, 基准和输出电压, 以及桥式传感器跨度和偏移, 所有这些都影响最大非线性。线性化功能的详细说明请见 [《PGA309 用户指南》](#) 的部分 2.6。

知道这一点后, 只有 **我们测试系统** 的最大非线性可被确定。此外, 这个测试的结果只适用于 **这个指定的配置** - 使用的桥式传感器特性请参考补偿设计存档中的 PGA309 传感器配置电子表格。

测试这个功能是很简单的。经模拟压力信号的非线性在最初被设定为零, 然后在系统校准失败前递增。由于非线性可正可负, 测试在正负方向上重复。

表 4. PGA309 压力传感器非线性调节功能

最大非线性	+4%
最小非线性	-4%

## 6.5 测得的结果汇总

表 5. 设计目标和测得的性能之间的比较

	目标值	测得值
输出误差 (在温度和压力范围内 % FSR)	0.1	0.04
输出电流噪声 ( $\mu A_{PP}$ )	15	6
传感器最大非线性 (%)	$\pm 3$	$\pm 4$

## 7 认证测试结果

由于产品不同，通常情况下，没有针对不同认证测试的通过/失败条件的标准定义。相反地，产品的设计人员为经测试的特定产品定义通过/失败条件。

这个设计的预期运行状态是，它将其经校准输出电流保持在少于 0.1% 误差范围内，所以针对每个测试的通过/失败条件是输出电流误差保持在  $\pm 0.1\%$  的误差范围内。

在 Appendix B 中给出了每个测试的详细说明，其中包括硬件设置和施加到经测试部件的信号电平。

### 7.1 IEC 61000-4-2: ESD (静电放电)

ESD 测试对于模块的输出影响很小。它能够在 Table 6 中所列出的全部条件下保持精确性能。Figure 17 显示全部 ESD 测试期间模块输出的捕捉。如图所示，在测试期间，在任何一个点上，数据都未偏离到额定值以外。测试完成后，预测试条件没有可测得的偏差。

表 6. ESD 测试结果

测试	结果	类
垂直耦合放电 - 8kV	通过	A
水平耦合放电 - 8kV	通过	A
接触放电 - 8kV	通过	A
空气放电 - 15kV	通过	A

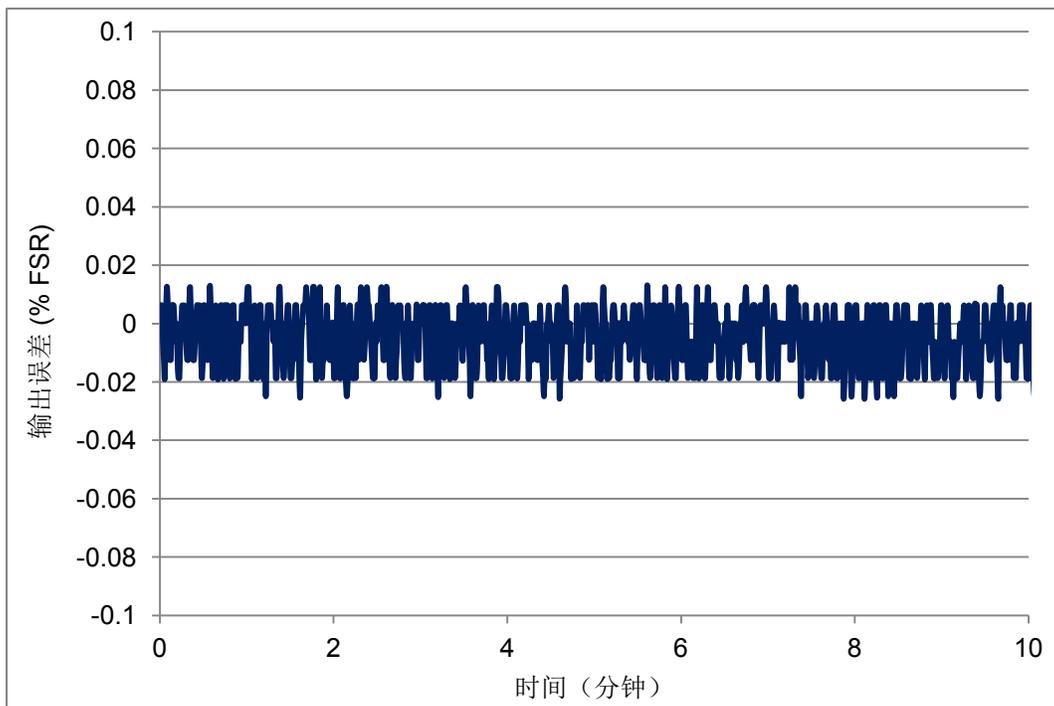


图 17: ESD 测试期间的模块输出误差

## 7.2 IEC 61000-4-3: 辐射 EMI 抗扰度

暴露在 3V/m 的电磁场内会导致模块输出的某些变化，特别是在较低频率时更是如此。然而，此模块绝不会运行在  $\pm 0.1\%$  误差范围以外，并且能够通过 Table 7 中列出的全部条件。Figure 18 显示这些测试期间，此模块输出的捕捉。将模块安装在屏蔽漆罐内能够在很大程度上减少输出的变化。测试完成后，预测试条件没有可测量到的偏差。

表 7. 辐射 EMI 抗扰度测试结果 - 3V/m

测试	结果	类
垂直 - 空 PCB	通过	A
垂直 - 漆罐内部	通过	A
水平 - 空 PCB	通过	A
水平 - 漆罐内部	通过	A

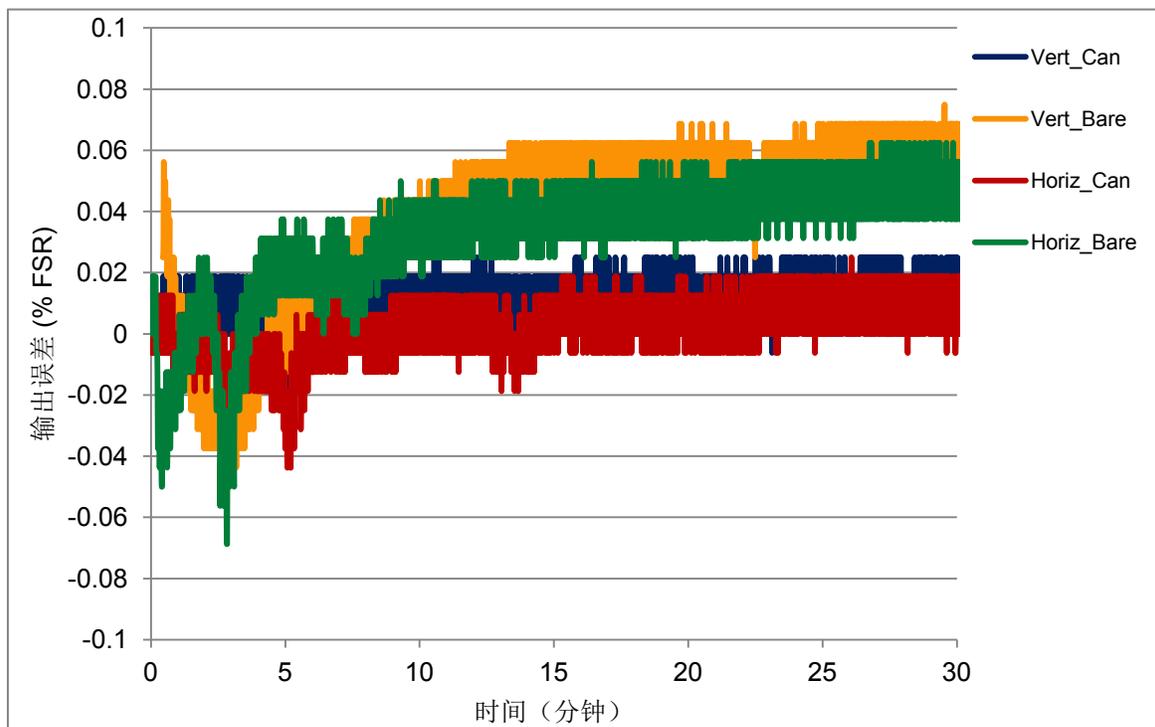


图 18: 辐射抗扰度测试 - 3V/m

暴露在 10V/m 的电磁场内会导致模块输出的重大变化，特别是在较低频率时更是如此。在大多数测试中，此模块运行在  $\pm 0.1\%$  误差范围以外，同时电磁场被施加。然而，测试完成后，预测试条件没有可测量到的偏差，并且此模块能够通过 Table 8 中列出的全部条件。Figure 19 显示这些测试期间，此模块输出的捕捉。将模块安装在屏蔽漆罐内能够在很大程度上减少输出的变化。

表 8. 辐射 EMI 抗扰度测试结果 - 10V/m

测试	结果	类
垂直 - 空 PCB	通过	B
垂直 - 漆罐内	通过	B
水平 - 空 PCB	通过	B
水平 - 漆罐内	通过	A

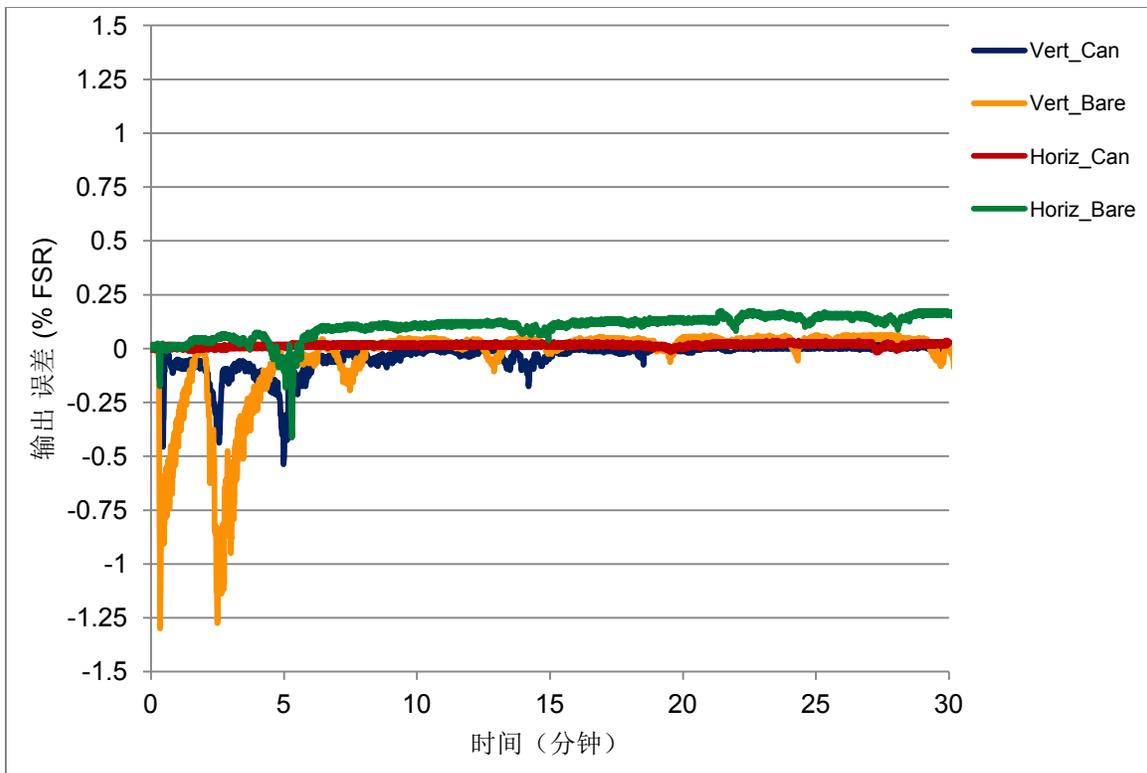


图 19: 辐射抗扰度测试 - 10V/m

### 7.3 IEC 61000-4-4: EFT (电快速瞬态)

EFT 测试对于模块的输出影响很小。它能够在 Table 9 中所列出的全部条件下保持精确性能。Figure 20 显示全部 EFT 测试期间模块输出的捕捉。如图所示，在测试期间，在任何一个点上，数据都未偏离到额定值以外。测试完成后，预测试条件没有可测得的偏差。

表 9. EFT 测试结果

测试	结果	类
2kV - I/O 和电源	通过	A
2kV - I/O 和电源	通过	A
4kV - I/O 和电源	通过	A
4kV - I/O 和电源	通过	A

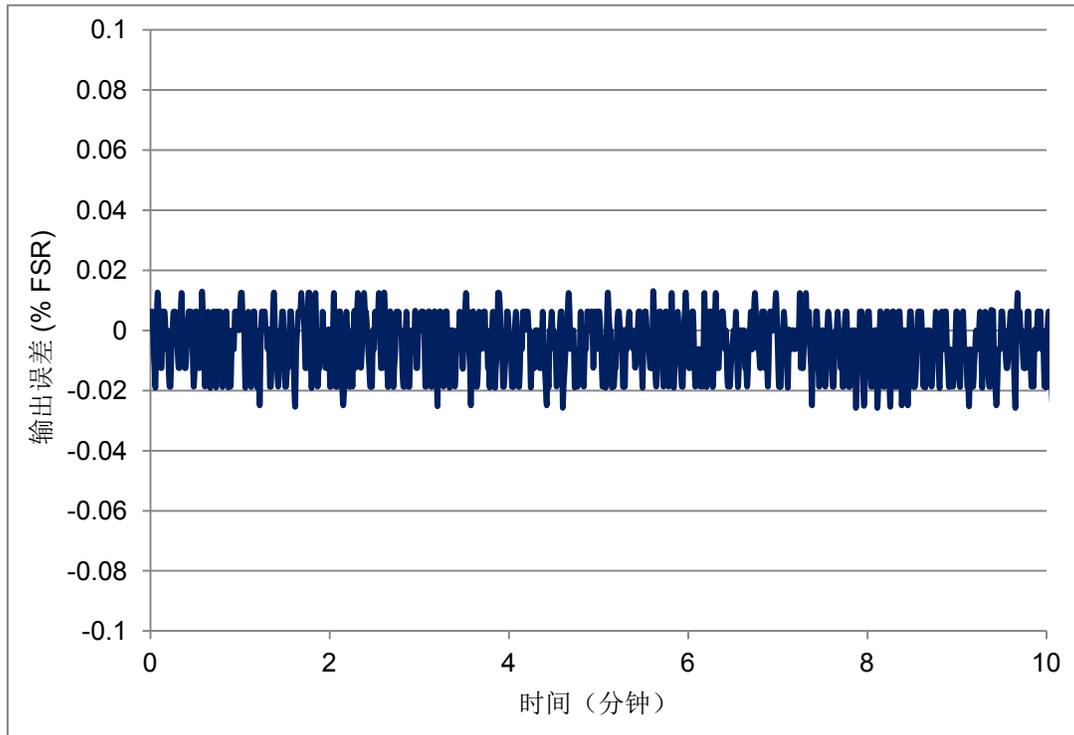


图 20: EFT 测试期间的模块输出误差

### 7.4 IEC 61000-4-5: 浪涌

浪涌测试在输出上导致某些直流偏移和毛刺脉冲，但是此模块绝不会运行在  $\pm 0.1\%$  误差范围以外，并且能够通过 Table 10 中列出的全部条件。Figure 21 显示全部浪涌测试期间模块输出的捕捉。测试完成后，按照之前测试条件没有可测得的偏差。

表 10. 浪涌测试结果

测试	结果	类
500V - I/O 和电源	通过	A
1KV - I/O 和电源	通过	A
2KV - I/O 和电源	通过	A
5KV - I/O 和电源	通过	A

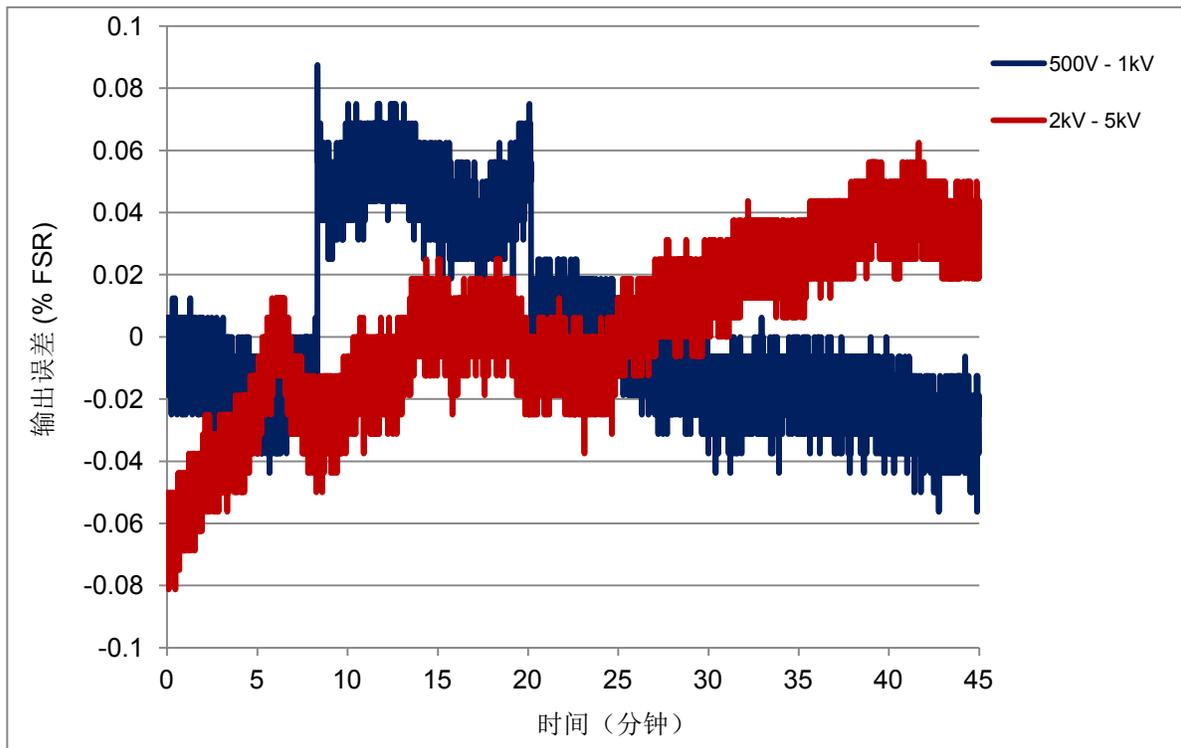


图 21: 浪涌测试期间的模块输出误差

## 7.5 IEC 61000-5-6: 传导 EMI 抗扰度

传导 EMI 测试会导致输出的变化，但是此模块绝不会运行在  $\pm 0.1\%$  误差范围以外，并且能够通过 Table 11 中列出的全部条件。Figure 22 显示全部浪涌测试期间模块输出的捕捉。测试完成后，按照之前测试条件没有可测得的偏差。

表 11. 传导 EMI 抗扰度测试结果

测试	结果	类
10V/m - I/O 和电源	通过	A

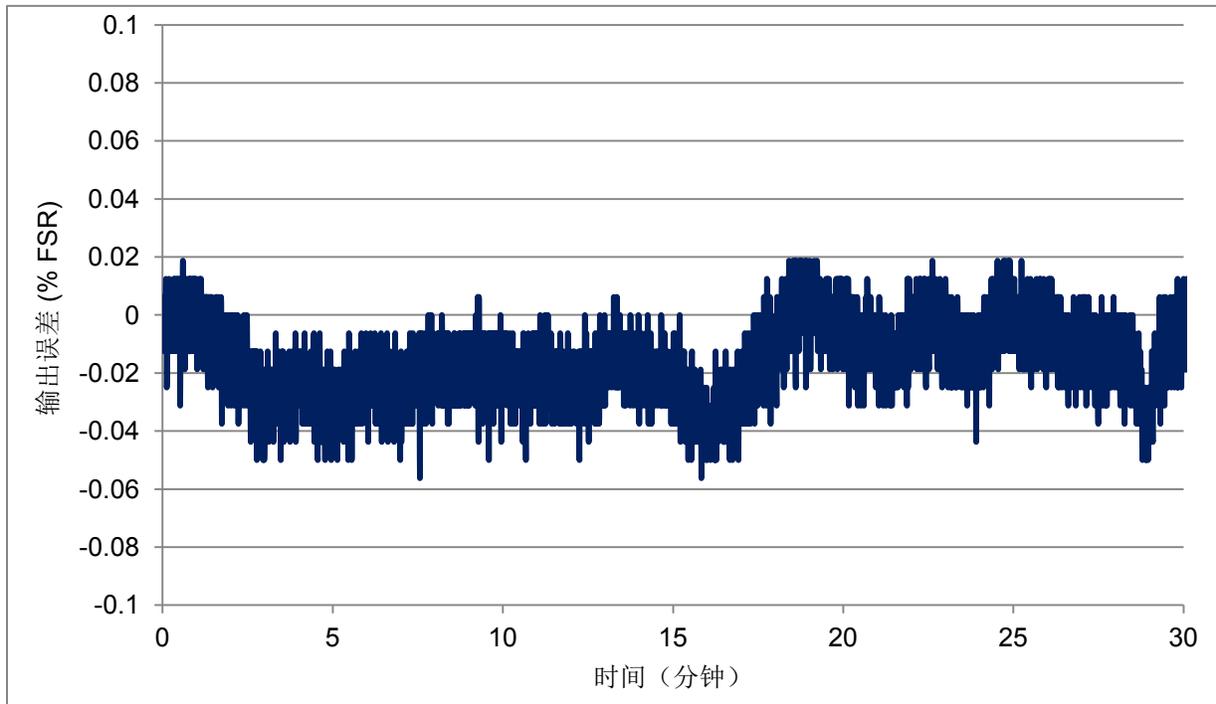


图 22: 传导 EMI 抗扰度测试期间的模块输出误差

### 7.6 FCC 标题 47, 部分 15.109: 辐射 EMI 发射

这个参考设计模块主要是一个直流系统，并且不会辐射大量的 EMI。它可以轻松通过根 FCC B 类标准设定的测试。

表 12. 辐射 EMI 发射测试结果

测试	结果	类
发射 - 垂直	通过	FCC B 类
发射 - 水平	通过	FCC B 类

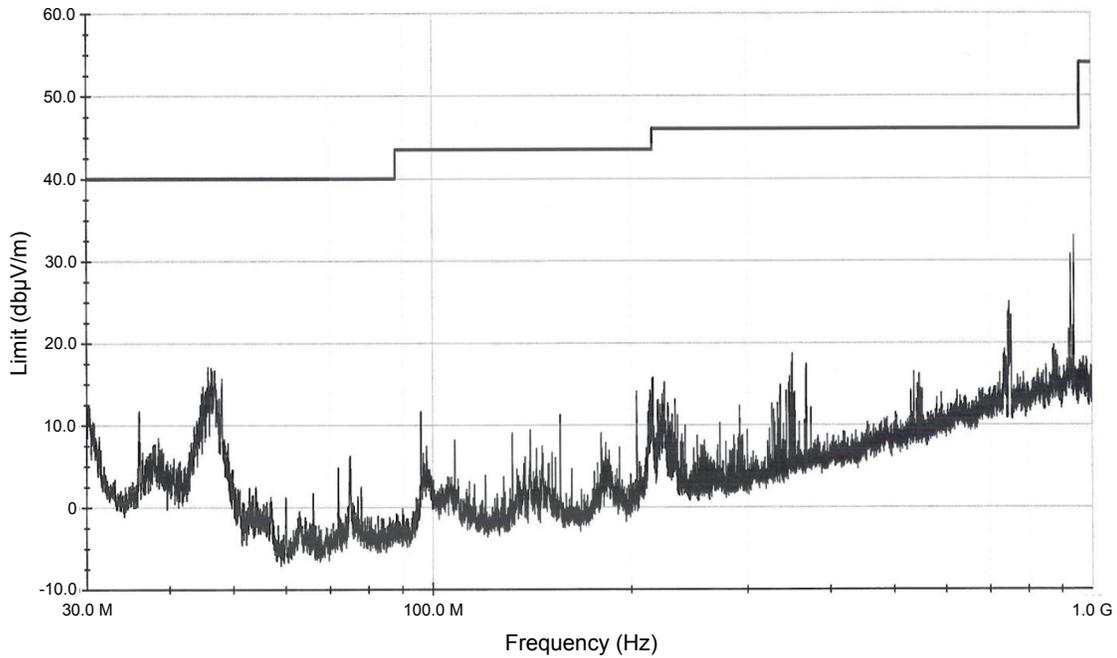


图 23: 辐射 EMI 发射测试 - 垂直

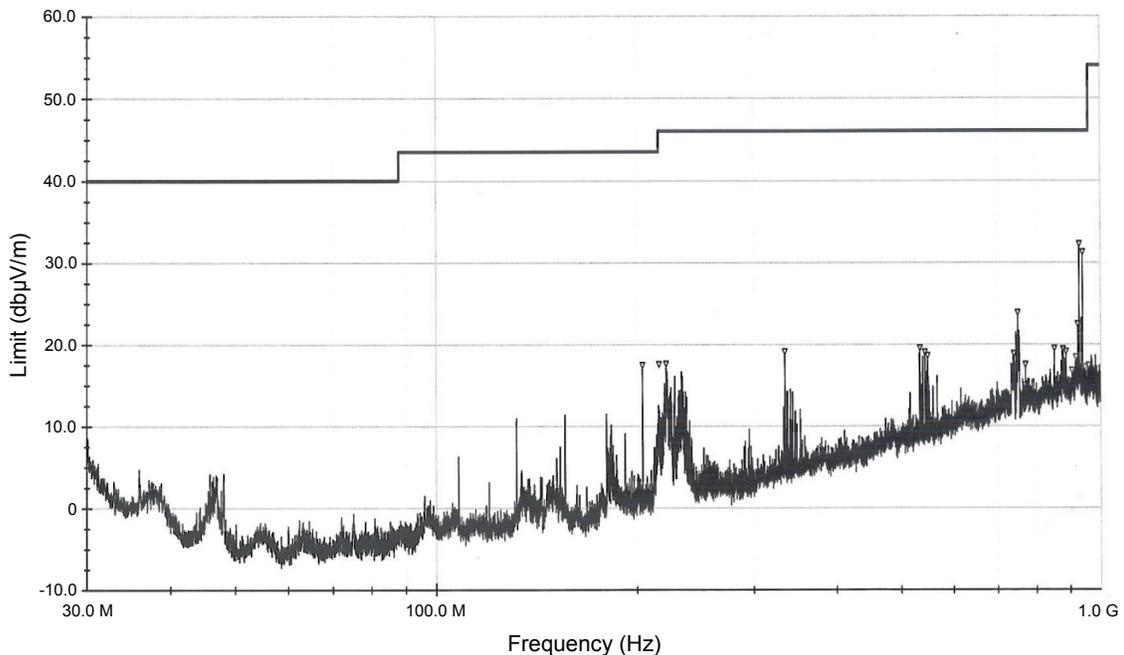


图 24: 辐射 EMI 辐射测试 - 水平

## 8 修改

为这个设计选择的组件是基于设计过程开始部分列出的设计目标。

选择一个诸如 PGA309 的数字校准信号调节器件删除了通过会影响这个设计中的放大器的误差。虽然 PGA309 的零漂移特性使其在温度范围内的性能基本保持恒定，但是设计中的其它电阻器有可能在  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $125^{\circ}\text{C}$  的整个温度范围内漂移较大。因此，如果此设计需要在宽温度范围内运行，建议为 V 至 I 转换和滤波器电阻器选择低温度系数和低耐受值组件。

在某些应用中，成本有可能是一个关键因素。有可能电阻器安装在一个非常稳定的热环境中。对于这样一个应用，PGA308 是一个理想选择。它在核心功能方面与 PGA309 类似，但是线性化和温度补偿电路被移除。它还包括 7 组 OTP（一次性可编程）非易失性存储器，所以无需外部 EEPROM - 这有助于减小总体解决方案尺寸，并且减少整个组件成本。

Table 13 比较了 PGA308 和 PGA309 在这个设计中作为可能的信号调节器所发挥的作用。

**表 13. 桥式传感器信号调节器的简单比较**

信号调节器	最大电源电压 (V)	传感器线性化	传感器漂移补偿	板上存储器
PGA309	5.5	是	是	无（外部 EEPROM）
PGA308	5.5	否	否	有（7 组 OTP）

Table 14 汇总了其它相对于 XTR117 的有可能用于这个设计的电流发送器。XTR115 和 XTR116 适用于这个系统，在直流精度（更高）、额外的内部电压基准和成本方面（更高）有细微差别。然而，这些器件的更高精度是没有必要的，这是因为整个系统已被校准，并且由于 PGA309 已经包含一个更加精确的校准，电压基准是冗余的。

**表 14. 电流发送器的简单比较**

电流发送器	最大电源电压 (V)	$V_{REF}$ 电压 (V)	静态电流 ( $\mu\text{A}$ )	量程误差漂移 ( $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ )	偏移电压漂移 ( $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ )
XTR117	40	无	130	$\pm 3$	$\pm 0.7$
XTR116	36	4.096	200	$\pm 3$	$\pm 0.7$
XTR115	36	2.5	200	$\pm 3$	$\pm 0.7$

## 9 关于作者

Ian Williams ([ian@ti.com](mailto:ian@ti.com)) 德州仪器 (TI) 高精度模拟 - 线性产品团队的一名应用工程师，他为工业用产品和应用提供支持。Ian 毕业于达拉斯的德州大学，在这里他获得了电子工程理学学士学位，主修微电子学。

Iven Xu ([iven-xu@ti.com](mailto:iven-xu@ti.com)) 毕业于桂林电子科技大学，在这里他获得通信和信息系统硕士学位。他还在青岛科技大学获得通信工程工学学士学位。他通过 AFAA 培训项目加入德州仪器 (TI)，与高精度模拟 - 线性团队一同工作。

## 10 致谢 & 参考文献

### 10.1 致谢

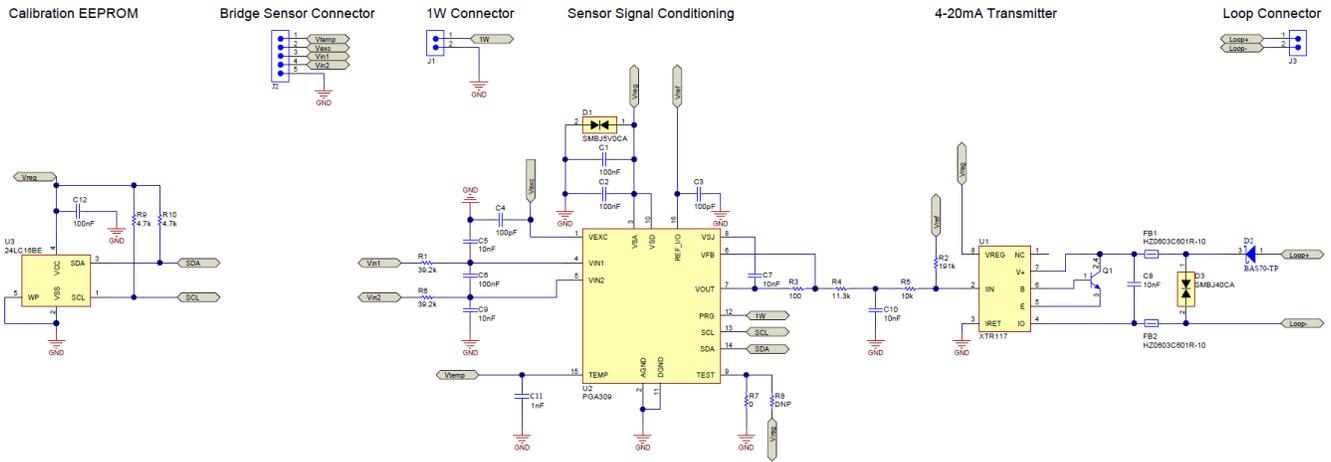
作者对位于德州普拉诺的 NTS ([National Technical Systems](http://www.nts.com)) 在执行电磁兼容性测试方面提供的帮助表示感谢。

### 10.2 参考文献

1. IEC 出版 61000-4-2 “电磁兼容性 (EMC) - 部分 4-2: 测试和测量技巧 - 静电放电抗扰度测试,” 国际电工委员会, 2008 年
2. R. Ashton (2009 年, 12 月 7 日) 轻松测试便携式器件中 IEC 61000-4-2 应力水平。获得方法: <http://electronicdesign.com/test-amp-measurement/take-stress-out-measuring-iec-61000-4-2-stress-levels-portable-devices>
3. IEC 出版 61000-4-3 “电磁兼容性 (EMC) - 部分 4-3: 测试和测量技巧 - 辐射、射频、磁场抗扰度测试,” 国际电工委员会, 2006 年
4. IEC 出版 61000-4-4 “电磁兼容性 (EMC) - 部分 4-4: 测试和测量技巧 - 电快速瞬态/突发抗扰度测试,” 国际电工委员会, 2012 年
5. IEC 出版 61000-4-5 “电磁兼容性 (EMC) - 部分 4-5: 测试和测量技巧 - 浪涌抗扰度测试,” 国际电工委员会, 2009 年
6. IEC 出版 61000-4-6 “电磁兼容性 (EMC) - 部分 4-6: 测试和测量技巧 - 由射频场引入的传导电感抗扰度测试,” 国际电工委员会, 2008 年
7. Semtech 保护产品 (2002 年, 2 月) 浪涌对策 - TVS 二极管使用说明 (AN96-07)。获得方法: [http://www.semtech.com/images/datasheet/transient\\_immunity\\_standards\\_iec\\_61000-4-x.pdf](http://www.semtech.com/images/datasheet/transient_immunity_standards_iec_61000-4-x.pdf)
8. T. Williams 和 R. Marshall. (2013 年, 6 月访问) IEC 61000-4-6 传导抗扰度测试的缺陷和实践 获得方法: [http://www.elmac.co.uk/pdfs/PNP\\_61000-4-6.pdf](http://www.elmac.co.uk/pdfs/PNP_61000-4-6.pdf)
9. A. Kay. (2006 年, 4 月) 使用具有 PGA309 的 XTR115 来生成 4mA 至 20mA 输出 (SBOA107B)。获得方法: <http://www.ti.com/lit/an/sboa107b/sboa107b.pdf>

## Appendix A.

### A.1 电气原理图



图表 A-1: 电气原理图

### A.2 物料清单

Item #	Quantity	Value	Designator	Description	Manufacturer	Part Number	Supplier Part Number
1	4	100nF	C1, C2, C6, C12	CAP CER 0.1UF 10V 10% X7R 0402	TDK Corporation	C1005X7R1A104K050BB	445-4958-1-ND
2	2	100pF	C3, C4,	CAP CER 100PF 50V 10% X7R 0402	Yageo	CC0402KRX7R9BB101	311-1419-1-ND
3	4	10nF	C5, C7, C9, C10	CAP CER 10000PF 10V 10% X7R 0402	Kemet	C0402C103K8RACTU	399-7759-1-ND
4	1	10nF	C8	CAP CER 10000PF 50V 10% X7R 0603	TDK Corporation	C1608X7R1H103K080AA	445-1311-1-ND
5	1	1nF	C11	CAP CER 1000PF 6.3V 10% X7R 0402	Kemet	C0402C102K9RACTU	399-8941-1-ND
6	2	39.2K	R1, R6	RES 39.2K OHM 1/10W 1% 0402 SMD	Panasonic Electronic Components	ERJ-2RKF3922X	P39.2KLCT-ND
7	1	191K	R2	RES 191K OHM 1/10W 1% 0402 SMD	Panasonic Electronic Components	ERJ-2RKF1913X	P191KLCT-ND
8	1	100	R3	RES 100 OHM 1/10W 1% 0402 SMD	Panasonic Electronic Components	ERJ-2RKF1000X	P100LCT-ND
9	1	11.3K	R4	RES 11.3K OHM 1/16W 0.1% 0402	TE Connectivity	4-1879215-1	A102592CT-ND
10	1	10K	R5	RES 10.0K OHM 1/16W 0.1% 0402	TE Connectivity	7-1879208-3	A102579CT-ND
11	1	0	R7	RES 0.0 OHM 1/10W 0402 SMD	Panasonic Electronic Components	ERJ-2GE0R00X	P0.0JCT-ND
12	1	N/A	R8	DNP, 0402	N/A	N/A	N/A
13	2	4.7K	R9, R10	RES 4.70K OHM 1/10W 1% 0402 SMD	Panasonic Electronic Components	ERJ-2RKF4701X	P4.70KLCT-ND
14	2	FERRITE BEAD	FB1, FB2	FERRITE 300MA 600 OHM 0603 SMD	Laird-Signal Integrity Products	HZ0603C601R-10	240-2380-1-ND
15	1	TVS	D1	TVS BIDIRECT 600V 5V SMB	Fairchild Semiconductor	SMBJ5V0CA	SMBJ5V0CACT-ND
16	1	SCHOTTKY	D2	DIODE SCHOTTKY 70V 70MA SOT23	Micro Commercial Co	BAS70-TP	BAS70TPM3CT-ND
17	1	TVS	D3	TVS BIDIRECT 600V 40V SMB	Fairchild Semiconductor	SMBJ40CA	SMBJ40CAF3CT-ND
18	1	NPN	Q1	TRANSISTOR NPN 45V 2000MA SOT-89	Diodes Inc	FCX890BTA	FCX890BCT-ND
19	1	XTR117	U1	XTR117	Texas Instruments	XTR117AIDGKT	296-18744-1-ND
20	1	PGA309	U2	PGA309	Texas Instruments	PGA309AIPWR	296-16726-1-ND
21	1	EEPROM	U3	IC EEPROM 16KBIT 400KHZ SOT23-5	Microchip Technology	24LC16BHT-I/OT	24LC16BHT-I/OTCT-ND
22	2		J1, J3	CONN HEADER 2POS .100" T/H GOLD	Samtec Inc	HTSW-102-07-G-S	HTSW-102-07-G-S-ND
23	1		J2	CONN HEADER 5POS .100" T/H GLD	Samtec Inc	HTSW-105-07-G-S	HTSW-105-07-G-S-ND

图表 A-2: 物料清单

## Appendix B.

### B.1 认证测试通用信息

在这个参考设计上执行的 EMC 认证测试遵循由两个实体设定的标准集：IEC ([国际电工委员会](#)) and the FCC ([联邦通信委员会](#))。

IEC 是一个推动电气和电子系统内标准化事物国际合作的全球组织。他们已经开发出一套瞬态和 EMI 抗扰度标准，这些标准已经成为那些希望在欧盟和世界范围内从事商业活动的制造商的最低要求。适用于这个参考设计标准被称为 IEC 61000-4。

FCC 是美国通信技术的权威组织，此组织创建并且执行整个射频频谱范围内波段的使用。他们已经针对有可能从电子器件发出的辐射发射量定义了一组限值，这些值在《美国联邦法规》中给出。

总的来说，一个器件可针对每个测试实现四个性能分类中的一个。

**表 B-1: EMC 测试性能分类**

类	说明
A	这些限值内的正常性能由制造商、请求者和购买者指定。
B	干扰停止后停止的临时功能丧失或性能降级，测试中的设备无需操作干预恢复其正常性能。
C	临时功能丧失或性能降级，对这些问题的校正要求操作干预。
D	由于硬件或软件损坏，或数据丢失造成的功能丧失或性能降级是不可恢复的。

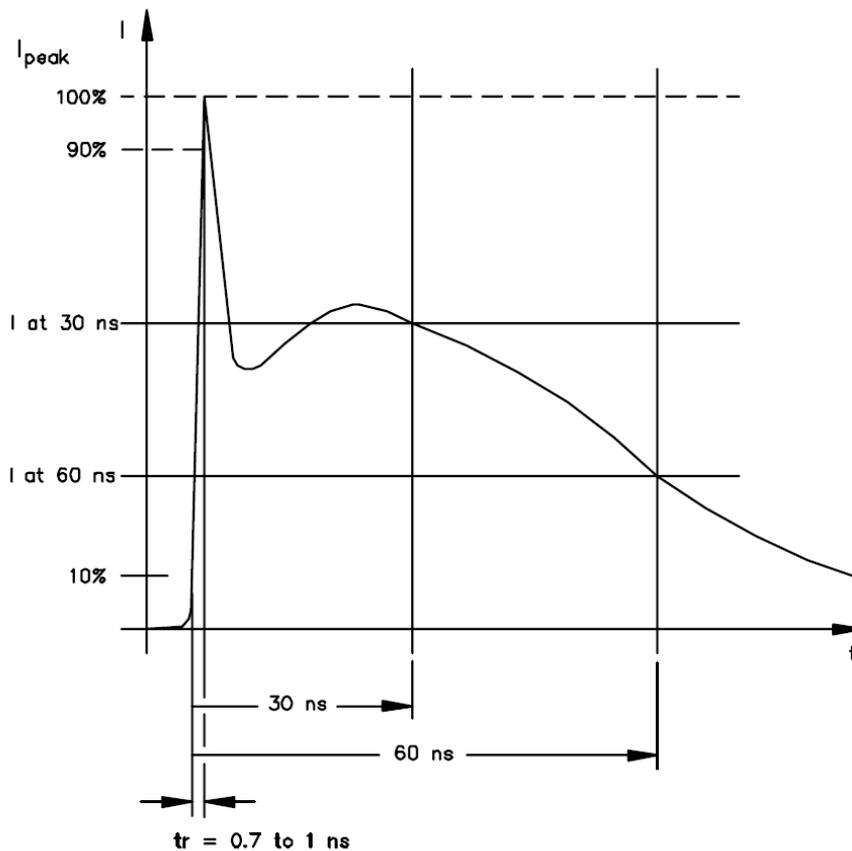
### B.2 IEC 61000-4-2: ESD (静电放电)

ESD (静电放电) 是电子系统中最常见的形式之一。ESD 源自两个非传导材料接触和分离时的电荷累积。当充电体被带到另外一个较低电势的物体的附近时，能量以 ESD 的形式被释放。

IEC 61000-4-2 根据材料类型、环境湿度和预期的处理量定义了四个危险级别。1 级是最轻微的，而 4 级是最严重的。IEC 61000-4-2 还指定与 ESD 相关的电流波形的参数。

**表 B-2: IEC 61000-4-2 严重等级和测试电压**

危险等级	相对湿度低至 (%)	材料类型	最大充电电压 (kV)	测试电压 - 接触放电 (kV)	测试电压 - 空气放电 (kV)
1	35	防静电	2	2	2
2	10	防静电	4	4	4
3	50	人工合成	8	6	8
4	10	人工合成	15	8	15



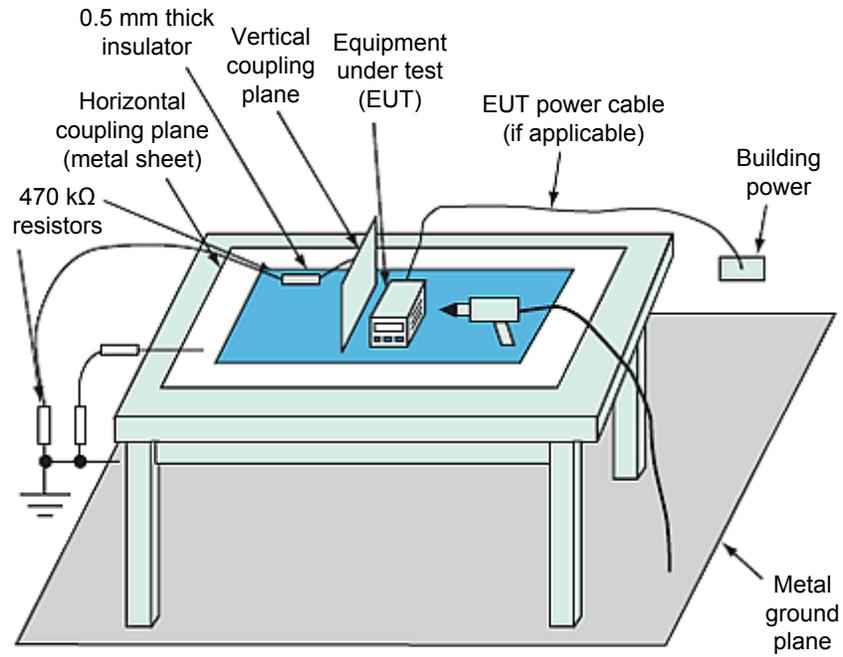
图表 B-1: IEC 61000-4-2 ESD 电流波形 [7]

表 B-3: IEC 61000-4-2 波形参数

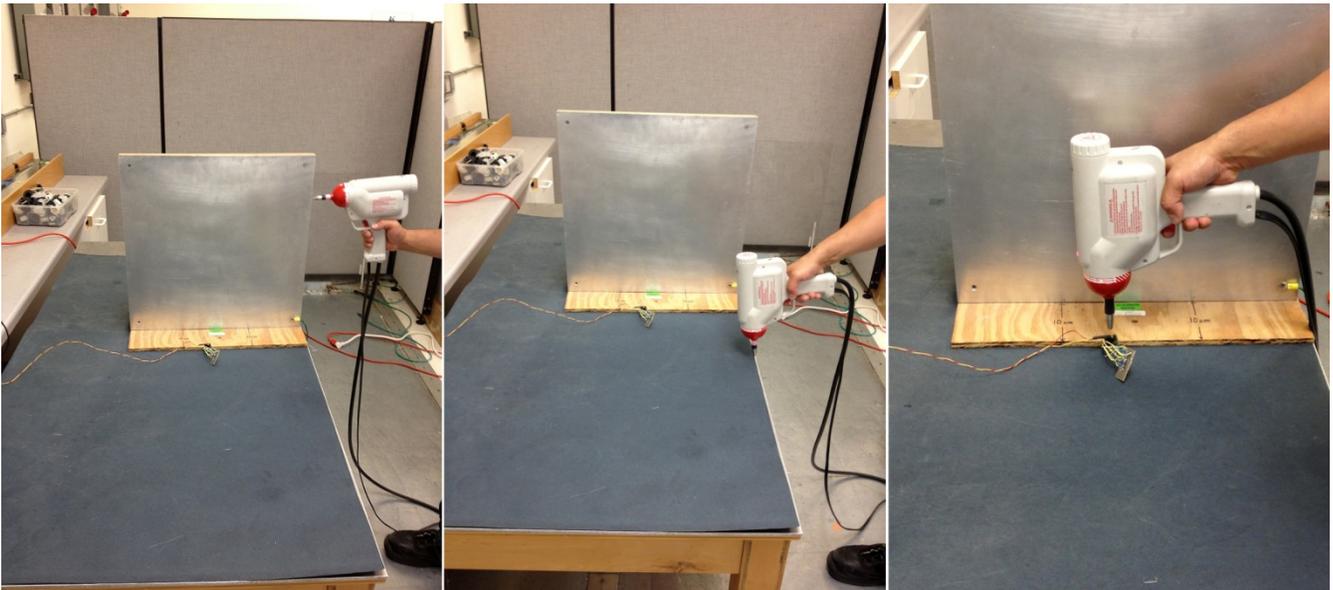
危险等级	指示电压 (kV)	放电 ±10% 的第一峰值电流 (A)	放电开关的上升时间 (ns)	30ns 时的电流 (±30%) (A)	60ns 时的电流 (±30%) (A)
1	2	7.5	0.7 至 1	4	2
2	4	15	0.7 至 1	8	4
3	6	22.5	0.7 至 1	12	6
4	8	30	0.7 至 1	16	8

图表 2 图示了针对不同 ESD 测试的测试硬件设置。通常执行四个测试：

1. 间接放电至 VCP（垂直耦合层）：测试器件被放置在距离金属层并且与之垂直的 10cm 处。ESD 对这个金属层放电十次。
2. 到 HCP（水平耦合层）的间接放电：经测试的器件被放置在一个绝缘垫上，此绝缘垫在一个具有水平金属层的工作台上。ESD 在这个层侧面上放电十次。
3. 空气放电：ESD 在距离测试器件 10cm 的地方放电十次。
4. 接触放电：ESD 发生器的顶端被放置在与测得器件接触的位置上。ESD 放电十次。



图表 B-2: IEC 61000-4-2 ESD 测试硬件设置 [2]



图表 B-3: IEC 61000-4-2 ESD 测试 - VCP, HCP, 空气放电

### B.3 IEC 61000-4-3: 辐射 EMI (电磁干扰) 抗扰度

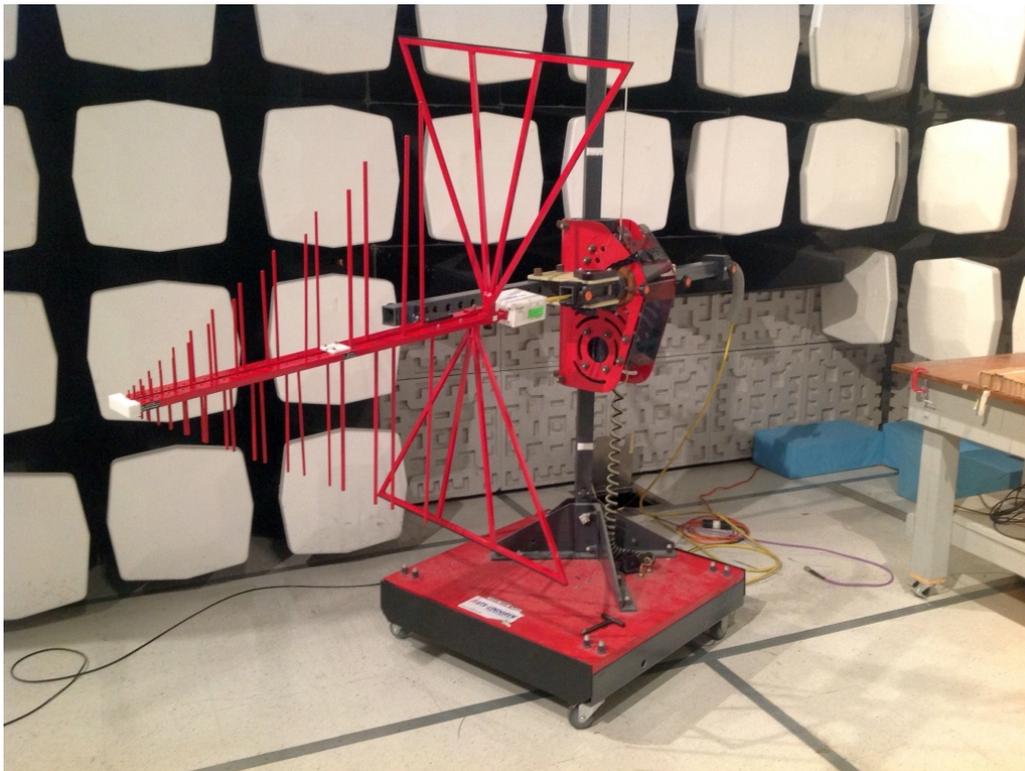
电子产品经常安装在靠近 RF (射频) 发射器的位置上。这些发射器产生的电磁场对其他电子器件的功能有很大影响。IEC 61000-4-3 标准与电气和电子设备对来自频率范围为 80MHz 至 1GHz 的 RF 发射器辐射的抗扰度要求相关。

表 B-4: IEC 61000-4-3 测试级

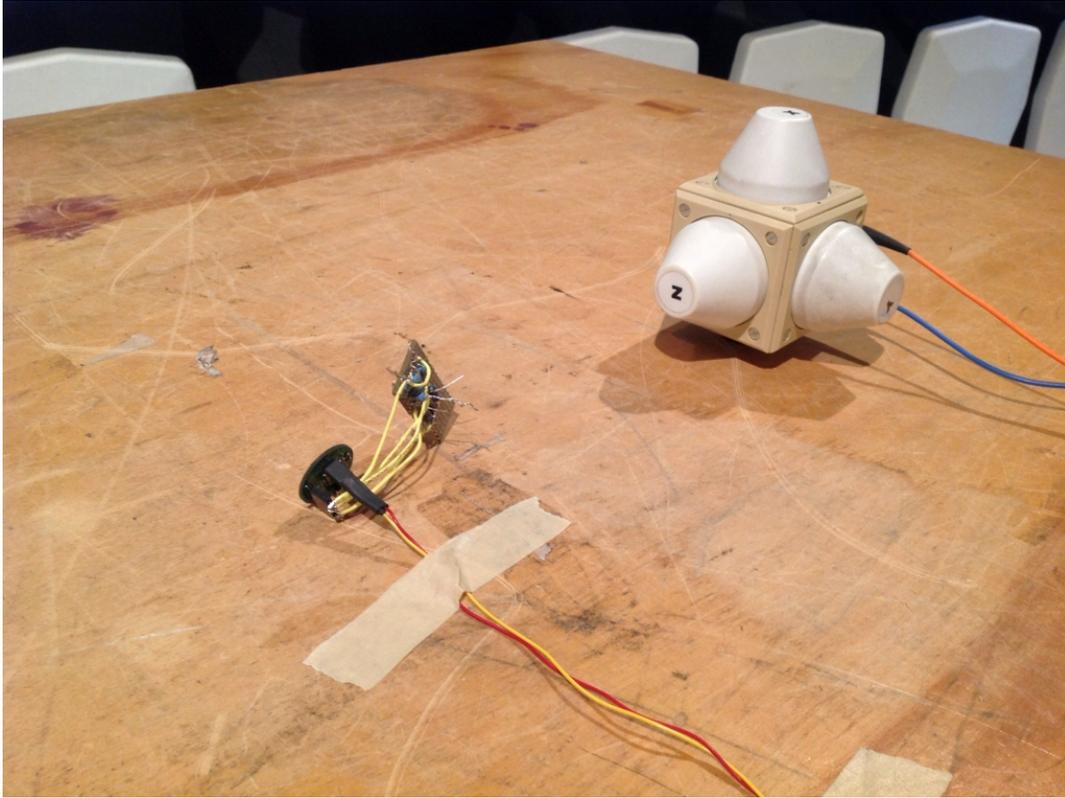
级别	测试场强度 (V/m)
1	1
2	3
3	10
4	30
x	特殊
请注意: x 是一个开放式测试级, 并且相关场强度可以为任意值。	

此测试在一个屏蔽的、无回声的空间内进行, 这个空间必须足够大以便为测试器件保持一个不变的场。RF 吸收器被用来抑制空间内的反射。一个通常有软件控制的 RF 信号发生器, 创建由一个功率放大器放大并且由生成场天线发射的测试信号。此天线可被设定为垂直和水平方向。

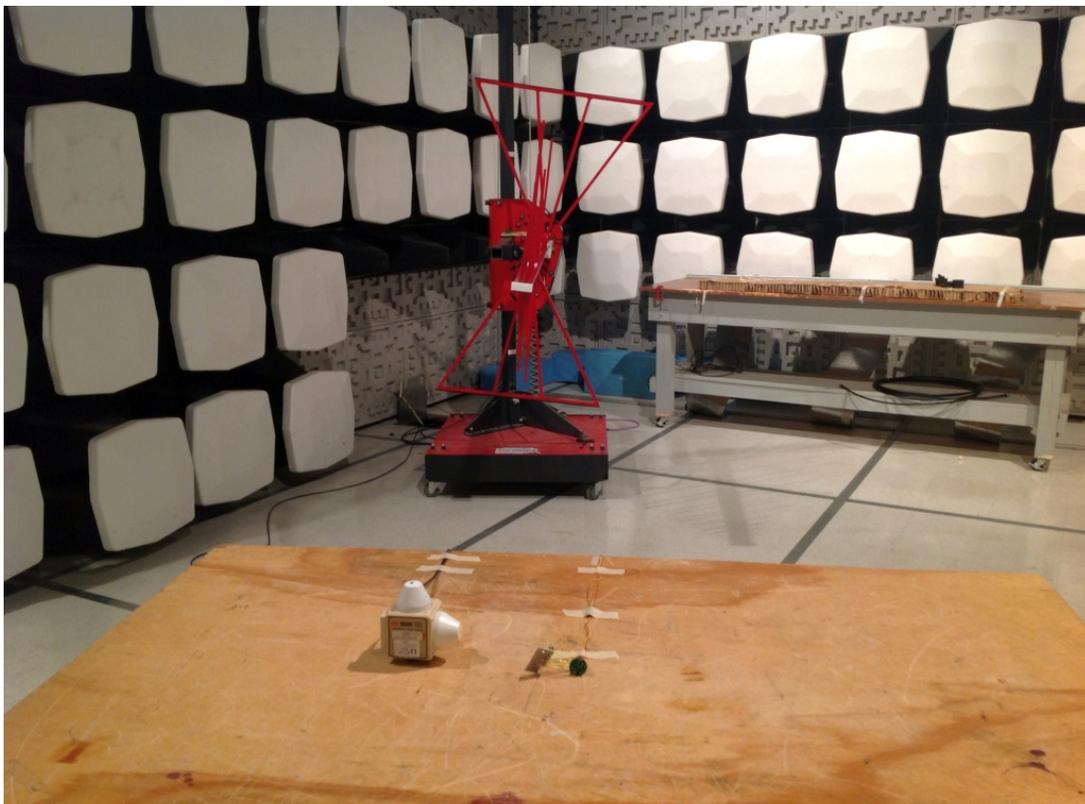
测试器件被放置在一个与天线距离固定的绝缘木质工作台上。此工作台位于一个电动转盘上, 可使测试器件旋转。为了校准和监控电磁场的强度, 一个场传感器被放置在靠近测试器件的位置上。



图表 B-4: 对数周期双极天线 - 垂直方向



图表 B-5: 测试器件（具有传感器测试板）和场传感器



图表 B-6: IEC 61000-4-3 完全测试空间设置

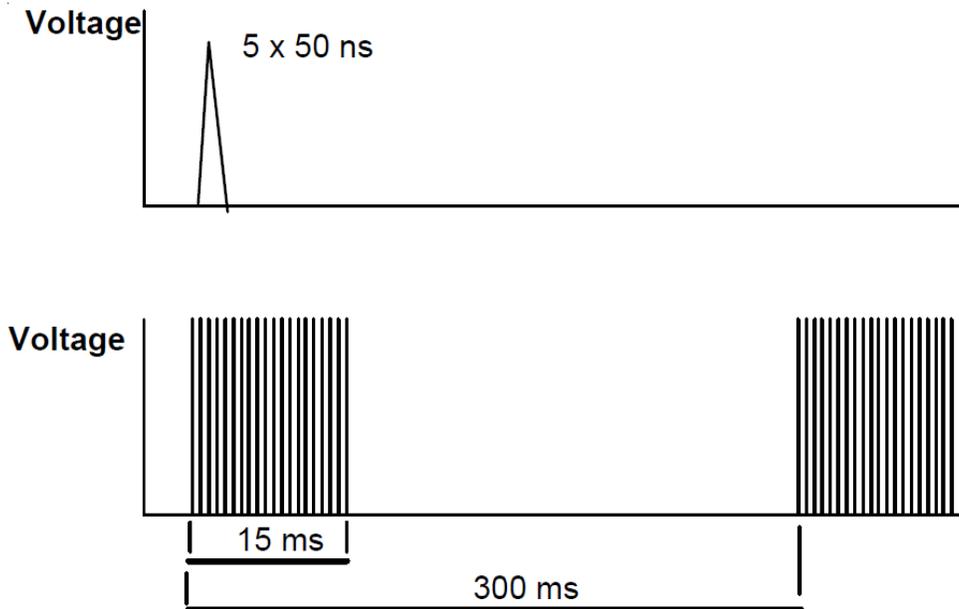
### B.4 IEC 61000-4-4: EFT (电快速瞬态)

EFT (电快速瞬态) 由开关和中继中的电弧接触所导致, 并且在使用机电开关来连接和断开电感负载的工业环境中很常见。IEC 61000-4-4 规定电源和数据线路中 EFT 危害等级

表 B-5: IEC 61000-4-4 严重等级和测试电压

危害等级	电源端口		I/O, 信号, 数据和控制线路	
	开路电压 (kV)	短路电流 (A)	开路电压 (kV)	短路电流 (A)
1	0.5	10	0.25	5
2	1	20	0.5	10
3	2	40	1	20
4	4	80	2	40

EFT 波形由 50 Ω 负载上的电压表示, 此负载来自一个具有 50 Ω 标称动态源阻抗的生成器 输出出现为 2kHz 至 5kHz 的重复频率范围上的高压尖峰突发。突发长度被定义为 15ms, 其重复的周期为 300ms。每个单独突发脉冲具有一个 5ns 上升时间, 总持续时间为 50ns。



图表 B-7: IEC 61000-4-4 EFT 电压波形 [7]

在 EFT 测试期间, 测试器件用 3m 电缆连接到其电源, 并且被放置在一个小木质平台上。此电缆的一部分通过一个具有木质侧面板的特殊槽和一个三角金属内部内室。EFT 发生器被连接到此槽的金属腔, 并且测试波形被施加。然后, EFT 波形能够耦合至测试器件的电源线缆。

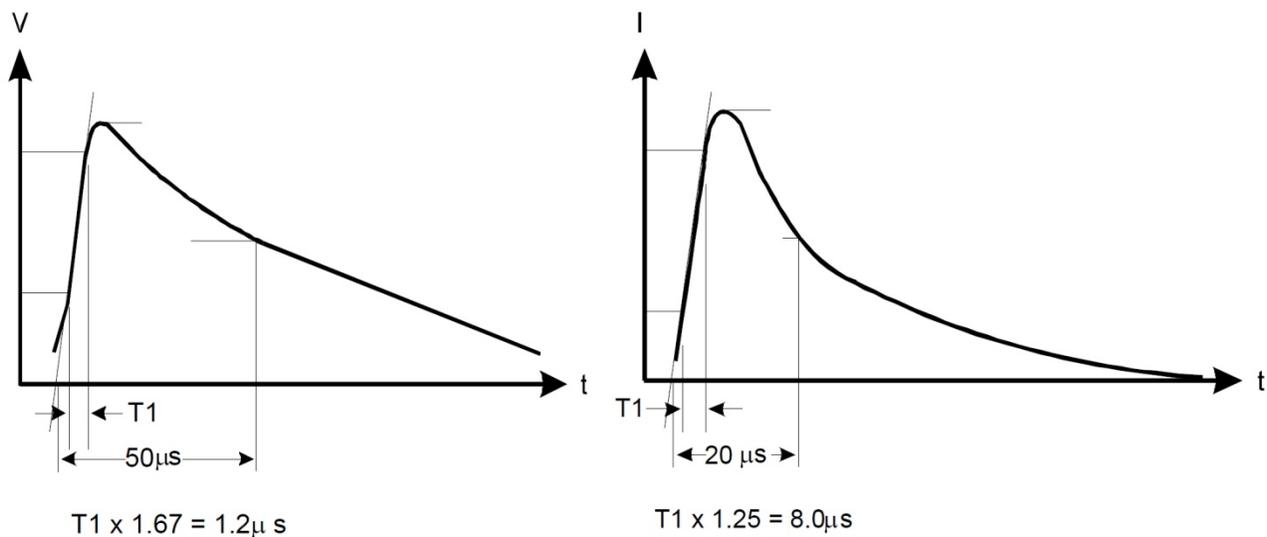


图表 B-8: IEC 61000-4-4 EFT 测试硬件设置

### B.5 IEC 61000-4-5: 浪涌

电源和数据线路上最严重的瞬态条件是由雷击和开关导致的浪涌。开关瞬态包括电源系统开关、负载变化和短路故障。雷击瞬态可能由直接雷击或电感电压和由于间接雷击产生的电流所导致。

IEC 61000-4-5 标准定义了一个瞬态进入点和一组安装条件。瞬态根据一个产生指定波形并且具有一个额定开路电压和源阻抗的发生器定义。被指定了两个浪涌波形：1.2 x 50μs 开路电压波形和 8 x 20μs 短路电流波形。



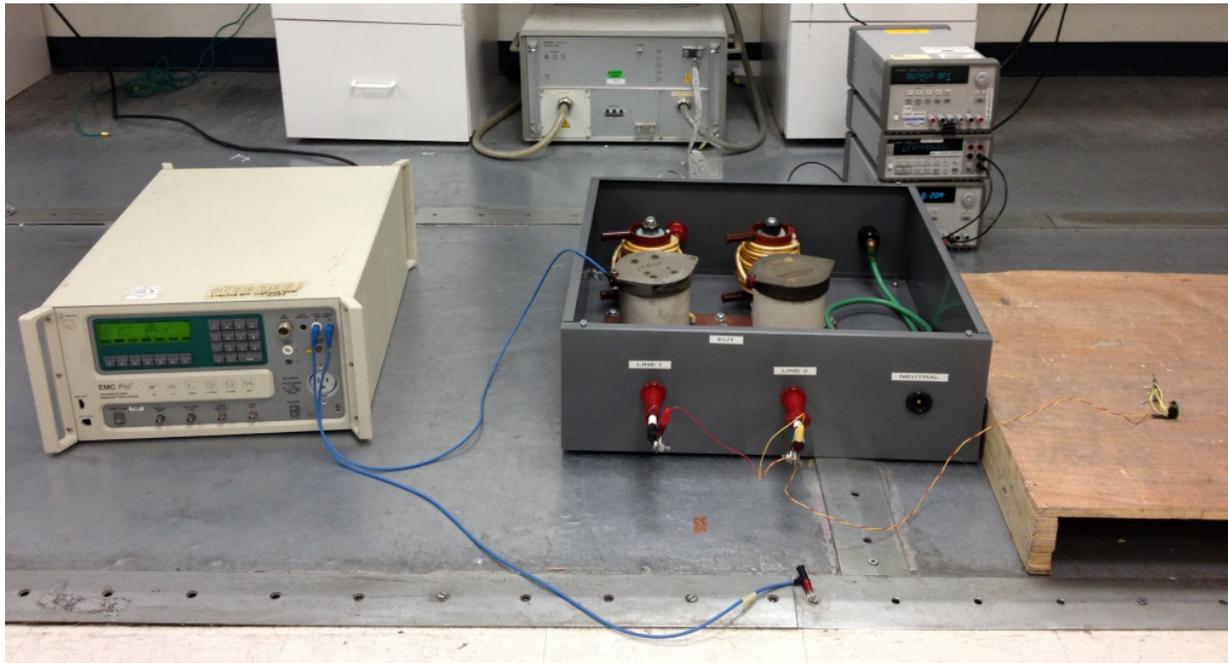
图表 B-9: IEC 61000-4-5 浪涌波形 [7]

表 B-6: IEC 61000-4-4 严重等级和测试电压

危害等级		电源		非对称线路 (长距离总线)		对称线路	数据总线 (短距离)
		耦合模式		耦合模式		耦合模式	耦合模式
		线路到线路 $Z_s = 2 \Omega$	线路至接地 $Z_s = 12 \Omega$	线路到线路 $Z_s = 42 \Omega$	线路至接地 $Z_s = 42 \Omega$	线路至接地 $Z_s = 42 \Omega$	线路到接地 $Z_s = 42 \Omega$
1	电压	不可用	0.5kV	不可用	0.5kV	1kV	不可用
	电流	不可用	42A	不可用	12A	24A	不可用
2	电压	0.5kV	1kV	0.5kV	1kV	1kV	0.5kV
	电流	250A	83A	12A	24A	24A	12A
3	电压	1kV	2kV	1kV	2kV	2kV	无
	电流	500A	167A	24A	48A	48A	不可用
4	电压	2kV	4kV	2kV	4kV	不可用	不可用
	电流	1kA	333A	48A	95A	不可用	不可用
5	电压	变化	变化	2kV	4kV	4kV	不可用
	电流	变化	变化	48A	95A	95A	不可用
波形	电压	1.2 x 50 $\mu$ s	1.2 x 50 $\mu$ s	1.2 x 50 $\mu$ s	1.2 x 50 $\mu$ s	1.2 x 50 $\mu$ s	1.2 x 50 $\mu$ s
	电流	8 x 20 $\mu$ s	8 x 20 $\mu$ s	8 x 20 $\mu$ s	8 x 20 $\mu$ s	8 x 20 $\mu$ s	8 x 20 $\mu$ s

对于浪涌测试，此测试器件被放置在一个小型木质平台上，并且通过一个稳健耐用的 LC 滤波器网络连接到其电源。此浪涌发生器被连接到 LC 滤波器的电容器，从而在保护电源的同时使得测试器件可被暴露在浪涌条件下。

浪涌电压在正负极性下测试。使用测试器件电源端子的全部可能组合进行连接，其中包括差分 and 共模端子。



图表 B-10: IEC 61000-4-5 浪涌测试硬件设置

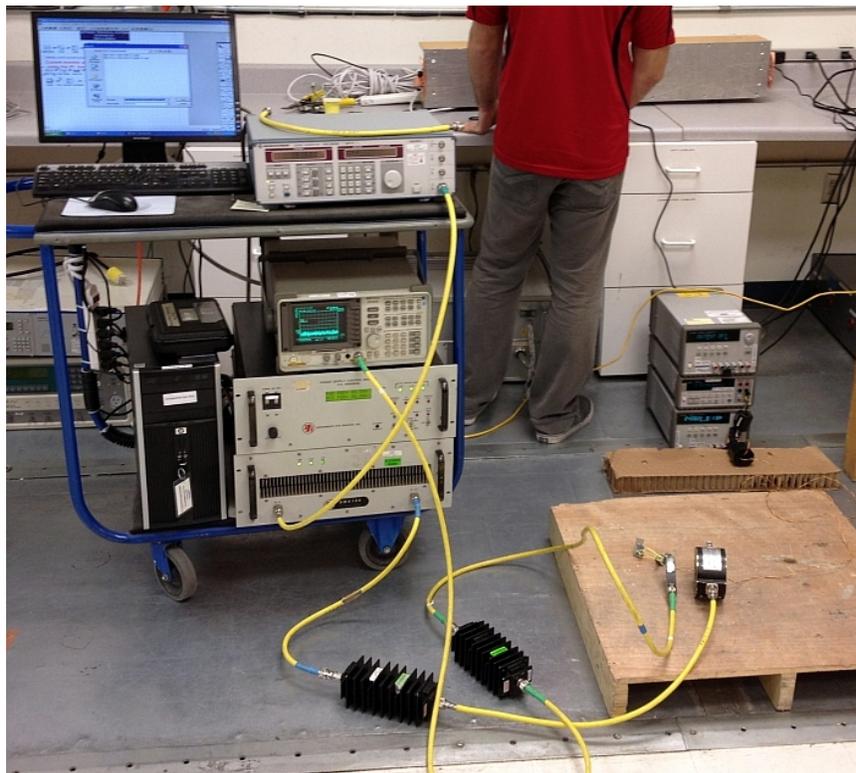
## B.6 IEC 61000-4-6: 传导 EMI 抗扰度

电子产品通常被安装在靠近 RF（射频）发射器的位置上。这些发送器创建会对其他电子器件的功能产生巨大影响的电磁场。IEC 61000-4-6 标准与电气和电子设备对来自频率范围 15kHz 至 80MHz RF 发射器干扰的传导抗扰度要求相关。

这个测试的原理是通过将 RF 应力施加到进入测试器件的特定线缆上来在器件内激励一个电磁干扰场。此器件的线缆内被刺入一个施加测试场的圆形注入探针，而另外一个探针监控这个场的强度。

表 B-7: IEC 61000-4-6 测试级别

产品类型	电场 (V/m)	频率范围 (MHz)	振幅调制深度 (%)	振幅调制频率 (kHz)
住宅、商用、照明行业	3	0.15 - 80	80	1
工业	10	0.15 - 80	80	1



图表 B-11: IEC 61000-4-6 传导 EMI 抗扰度测试硬件设置

## B.7 FCC 标题 47, 部分 15. 109: 辐射发射限值

FCC（联邦通信委员会）已经为电子器件可以发出的 EMI 数量指定了一个限值。这个标准是为了帮助保持更低水平的辐射干扰，以减少由辐射耦合导致的问题。

这个测试在与部分 9.2.2 中描述的辐射 EMI 抗扰度测试中所采用的无回声腔同样类型的空间内执行。然而，对于这个测试，测试器件作为 EMI 发送器，而测试腔的天线被配置为一个接收器。此天线在距离测试器件的一个指定位置测量电场强度。

表 B-8: FCC 辐射发射限值

频率范围	10m 时 A 类器件 (dB $\mu$ V/m)	3m 时 B 类器件 (dB $\mu$ V/m)
30 - 88 MHz	39.1	40.0
88 - 216 MHz	43.5	43.5
216 - 960 MHz	46.4	46.0
> 960MHz	49.5	54.0

## 针对 TI 参考设计的重要声明

德州仪器公司 ("TI") 参考设计只用于帮助设计人员 ("客户") 开发包含 TI 半导体产品的系统 (在这里也指"组件")。客户理解并同意他们对设计客户系统和产品中的独立分析、评估和判断负责。

TI 参考设计已经使用标准实验室条件和工程实践创建。TI 未采取任何测试, 除非那些在已发布文档中针对一个特定参考设计所专门描述的测试。TI 也许会对它的参考设计进行修正、提高、改进和其它改变。

客户被授权使用具有每个特定参考设计中确认的 TI 组件的 TI 参考设计, 并且在他们的终端产品开发中修改参考设计。然而, 在这里不授予任何其它 TI 知识产权的直接或隐含, 默许或其它方式的许可, 和任何第三方技术或知识产权的许可, 其中包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权、或者与采用了 TI 产品或服务的任何集成、机器或工艺相关的知识产权。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

TI 参考设计"按原样"提供。对于参考设计或者包括精度和完整性在内的直接、隐含或者法律规定的参考设计的使用, TI 不作出任何保证或声明。TI 不对任何隐含的适销性、针对特定用途的适用性、平静受益权、无干扰享有权, 以及与 TI 参考设计或其使用相关的任何第三方知识产权的非侵权作出任何保证。TI 不对任何与 TI 参考设计中提供的产品组合相关的或基于这些产品组合的第三方侵权声明负责, 并且不应为客户提供辩护或赔偿。不论是何原因造成任何实际的、特殊的、意外的、相应发生的或间接的损坏, 并且不论 TI 是否已经告知了 TI 参考设计的任何使用或 TI 参考设计的客户使用所造成的此类损坏的可能性, TI 都不应对此负责。

TI 保留根据 JESD46 最新标准, 对所提供的半导体产品和服务进行更正、增强、改进或其它更改的权限, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

对于 TI 数据手册、数据表或参考设计中的 TI 信息, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。第三方信息可能受到其它限制条件的制约。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在客户的安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。借助于这样的组件, TI 的目标是帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或"增强型塑料"的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的组件。客户认可并同意, 对还未指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 将不承担任何责任。

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道1568号, 中建大厦32楼邮政编码: 200122  
Copyright © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司

## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

产品	应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a> 通信与电信 <a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a> 计算机及周边 <a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a> 消费电子 <a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a> 能源 <a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a> 工业应用 <a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a> 医疗电子 <a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a> 安防应用 <a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a> 汽车电子 <a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a> 视频和影像 <a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a> 德州仪器在线技术支持社区 <a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道1568号, 中建大厦32楼邮政编码: 200122  
Copyright © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司