

TI 参考设计 集成触觉反馈的触摸金属按钮



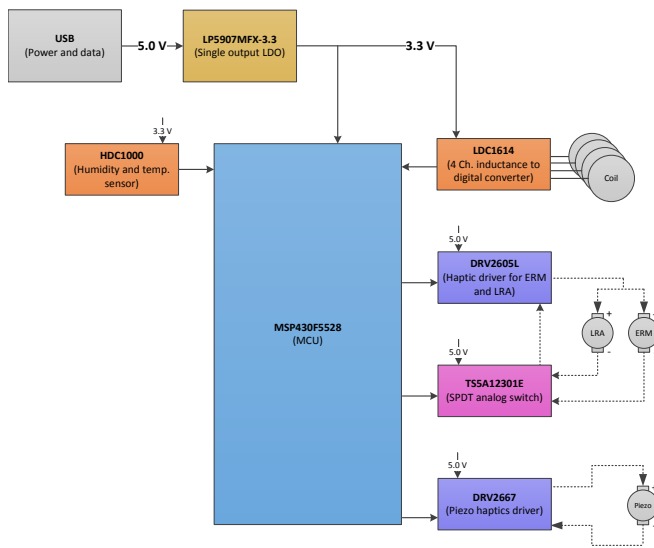
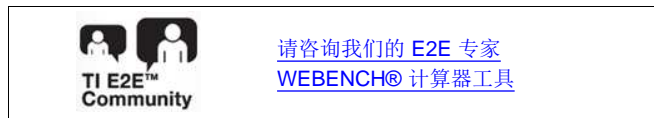
TI 参考设计

TI 参考设计为您提供所需的原理、测试和设计文件，以便您快速评估和定制系统。TI 参考设计可帮助您缩短产品上市时间。

设计资源

[TIDA-00314](#)
[LDC1614](#)
[DRV2605L](#)
[DRV2667](#)
[HDC1000](#)
[MSP430F5528](#)
[LP5907](#)
[TS5A12301E](#)
[TPD2E2U06](#)
[TPD1E10B06](#)

设计文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹
产品文件夹

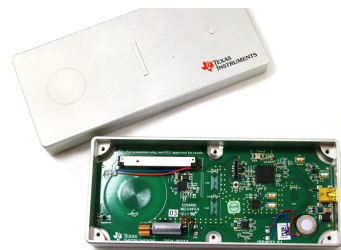


设计特性

- 通过高分辨率电感式金属触摸方案替换机械按键
- 可定制触觉反馈和波形提供高品质用户体验
- 可编程的按钮灵敏度（从轻触到用力按压）
- 一块连续金属片经过密封和接地，可防止电磁干扰 (EMI)、水、油、灰尘和其他污染物的影响。
- 支持在佩戴手套的情况下、在水下（密封情况下）以及在严酷环境下操作
- 可用于压力和多步按钮按压序列
- 已实现三个按钮选项：
 - 20 mm 按钮
 - 3 × 10 mm（两个按钮）
 - 3 mm 按钮
- 通过不同的机械设计实现不同的按钮配置

特色应用

- 楼宇自动化
- 工业和汽车接口
- 移动设备接口
- 电子销售终端
- 设备接口
- 替代机械按钮



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

TouchSense is a registered trademark of Immersion Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

1 系统主要技术规格

参数	技术规格	详细信息
触摸金属传感器类型	4 x PCB 电感线圈	2.2 节
触觉致动器类型	压电式 线性谐振致动器 (LRA) 偏轴转动惯量 (ERM)	2.4 节
输入电压	标称 5V (源自 USB 的 VBUS)	2.8 节
校准方法	LRA 和 ERM 致动器自动校准	4.4 节
工作温度	-20°C 至 70°C	2.6 节
工作环境	室内或室外	2.6 节
环境感测	温度和湿度	2.6 节
热“冲击”	温度快速变化不会造成错误的按钮检测	6.6 节
相对湿度“冲击”	湿度快速变化不会造成错误的按钮检测	6.7 节
相邻按钮按压	在相邻传感器上不会造成错误的按钮检测	节 6.2.1
触控操作对 LDC1614 的影响	触控操作不会造成错误的按钮检测	6.3 节
系统消耗的总电流	LDC1614 测量过程中为 8.4mA (峰值) 压电致动器工作过程中为 408mA (峰值) ERM 致动器工作过程为 580mA (峰值) LRA 致动器工作过程中为 216mA (峰值)	6.4 节
IEC 61000-4-2	接触静电放电 (ESD): 外壳上 ± 4 kV 空气 ESD: 外壳上 ± 8 kV	节 6.8.1
IEC 61000-4-3	抗辐射干扰: 10V/m 时为 80MHz 至 2.7GHz	节 6.8.2
IEC 61000-4-4	电快速瞬变 (EFT): VBUS 上 ± 2 kV	节 6.8.3
IEC 61000-4-5	浪涌: VBUS 上 0.5kV	节 6.8.4
IEC 61000-4-6	抗传导干扰: 在 VBUS 上达到 3 V _{RMS}	节 6.8.5
封装	12.5 cm x 5.5 cm x 1.5 cm, 铝外壳	2.5 节

2 系统描述

工业、汽车行业和消费品行业的许多终端设备系统和产品当前需要采用机械按钮使用户输入。然而，机械按钮往往会增加系统成本，按压一定次数后会出现磨损，而且会提高系统抵御环境影响的密封实现方案的复杂程度。

得益于德州仪器 (TI) 的电感数字转换技术及触控技术，TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮展现了能够替代机械按钮的触摸金属概念，以及可为用户提供真实反馈的集成触觉功能。

从较高层次看，此 TI 参考设计系统由铝质机械外壳组成，顶部外壳内置了四个按钮。该设计的独特之处在于，顶部外壳由单一单片金属构成，此设计是在此金属中实现的。这些按钮在金属表面仅为刻蚀的轮廓或者凸起的图案。利用顶部外壳下方电路板中的德州仪器 (TI) 电感式金属形变检测技术，可测出金属铝极为细微的形变（微米量级），然后激活触觉反馈，为用户提供与机械按钮相似的触觉反馈。

本设计指南介绍了该 TI 参加设计系统的组件选择、设计理论和测试结果。对于需要具有触觉反馈的高分辨率触摸金属按钮按压检测功能的新应用，当在其中集成 TI 的电感数字转换器及触觉驱动技术时，本设计指南能够为系统设计人员带来优势。

后续章节介绍参考设计系统中的各模块，以及实现相应功能的最关键特性。

2.1 电感数字转换器

电感数字转换器 (LDC) 可测量用作按钮的金属表面的形变，以此检测按钮是否被按下。要检测按钮是否被按下，子系统必须能够检测出金属表面上微米量级的极为细微的形变，如图 1 所示。此系统必须具备极低的噪声，才能测出按下按钮本身时所测得的变化。另外，系统必须能够区分相邻按钮的按下操作，以避免检测到错误的按钮按压操作。在此 TI 参加设计配置中，机械设计可以确保按钮两两之间紧密相邻；因此，当按下一个按钮时，相邻的按钮并不会检测到按压操作，反之亦然。

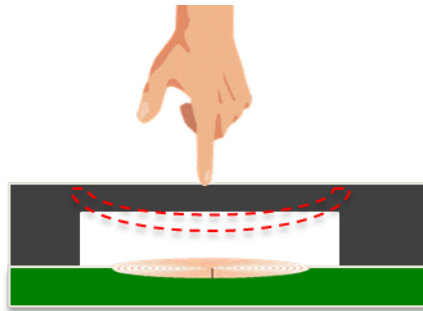


图 1. 机械形变详图

电感数字转换器在选型时的另一个考虑因素是，是否能够处理不同环境条件下的测量结果变化。此 TI 参加设计实现了固件滤波，以减轻环境变化所带来的影响。此外，如果要求在环境变化时保持较高精度，设计中还可以包括湿度和温度传感器。

LDC1614 器件是此 TI 参加设计的理想组件，因为它将高分辨率电感感测与四个输入通道相结合。

LDC1614 分辨率较高，可以使系统轻松区分相邻按钮的按压操作（节 6.2.1 相邻按钮按压性能）。另外，LDC1614 器件功耗低（6.4 节 电流消耗），易于使用，因此可直接集成到终端设备中。如果终端设备需要实现压力或多步按钮序列，LDC1614 器件的高分辨率特性还有助于实现此类应用。

2.2 传感器线圈设计

LDC1614 器件上的传感器线圈设计对于实现所需的触摸金属按钮检测性能来说至关重要。在此 TI 参加设计中，会手工生成适当的传感器线圈。“大”和“小”按钮均采用圆形传感线圈来检测轴向移动。“向上”和“向下”按钮采用矩形传感线圈，通常用于检测横向移动。

在终端设备应用中，可使用 [WEBENCH® 电感感测设计工具](#) 根据子系统的机械特性来生成传感器线圈。传感线圈设计取决于感测距离、精度和目标尺寸等机械要求。因此，传感线圈设计取决于终端设备上传感线圈与金属片间距、按钮灵敏度和按钮尺寸等要求。

2.3 触觉驱动器

触觉驱动器的选型取决于系统所需的触觉致动器（请参见 [2.4 节 触感致动器](#)）。

对于线性谐振致动器 (LRA) 和偏轴转动惯量 (ERM) 触觉致动器，DRV2605L 器件具备闭环致动器控制系统，可提供高质量的触觉反馈。DRV2605L 器件提供了 Immersion 公司的许可版 TouchSense 2200™ 软件，其中包含 100 多种许可版效果（六个 ERM 库和一个 LRA 库）和 audio-to-vibe 功能，因此无需设计触觉波形。

对于压电致动器，DRV2667 器件集成了 105V 升压开关、功率二极管、全差分放大器和数字前端。DRV2667 器件的这些特性使其成为驱动高压和低压压电触觉致动器的理想之选。

2.4 触觉致动器

为全面介绍当前可用的触觉技术，TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮采用了三种触觉致动器：LRA、ERM 和压电式致动器。

LRA 是一个谐振系统，当以谐振频率或接近谐振频率运行时会产生振动。LRA 往往是硬币形状，但也可采用其它外形。由于技术创新，LRA 致动器的尺寸得以进一步缩减，高度可不超过 2.5mm，直径可不超过 8mm。此微型化趋势使 LRA 致动器成为可穿戴设备的最佳选择之一。因为此器件通常以谐振频率运行，功耗往往低于其它致动器。

ERM 是一种存在偏心质量的直流电机，通过旋转产生振动。当 ERM 旋转时，偏心质量会产生向心力；这种向心力会使电机产生位移。人们将这种位移视为振动。ERM 由于旋转力而产生振动，所以会在两个轴（X、Y 或 Z 轴）上存在加速度。这种加速度在某些应用中会在无意的轴形成损耗。因为该致动器是一种直流电机，所以与其它类型的致动器相比，需要更多电能来保持旋转。

压电材料是一种在施加电压后会发生形变（移动）的材料。压电触觉致动器能够精确驱动高清触觉，与 ERM 和 LRA 相比，启动时间更短、驱动电压带宽更宽、可闻噪声更低且振动更强。压电致动器有两种类型：单层压电致动器和多层压电致动器。由于压电致动器是容性负载，所以单层压电致动器在移动同样距离时需要更高的电压。多层压电致动器所需的电压较低，但需要较高的电流。向压电致动器施加电压时压电致动器会发生弯曲，如果施加脉宽调制 (PWM) 或正弦波电压时，会在一个方向上产生振动。总的来说，压电致动器具备更大的加速度、更快的响应时间以及更低的功耗。

[表 1](#) 对比了本 TI 参加设计系统中所使用的三种触觉致动器。有关各种触觉致动器的更多信息，请参见 [SLOA194](#) 和 [SLOA207](#)。

表 1. 致动器对比

属性	ERM	LRA	层数较少的压电致动器	层数较多的压电致动器
性能	良好	更好	最好	最好
加速度 (g)	约 1g	约 1-2g	约 3-5g	约 3-5g
可闻噪声	非常大	中等	无噪声	无噪声
响应时间	约 50ms	约 30ms	0.5ms	0.5ms
高清触觉	否	否	是	是
成本	\$	\$\$	\$\$	\$\$\$

2.5 机械设计

集成触觉反馈的触摸金属按钮 TI 参加设计系统的机械设计由铝质外壳、印刷电路板 (PCB) 和橡胶垫圈所组成。铝质外壳的外形尺寸约为 12.5 cm × 5.5 cm × 1.5 cm。

铝质外壳由顶部和底部两部分组成。顶部包含四个按钮：铝质外壳上刻蚀出轮廓的大按钮；在顶部中央凸起“向上”、“向下”按钮；以及铝质外壳上呈小型凸起的“小”按钮。顶部外壳如图 2 上半部分所示。该按钮布局旨在为终端设备解决方案中多种不同按钮配置提供示例。PCB 通过双面胶带 (3M™ VHB™ 转移胶带 F9460PC, 更多信息请参见 www.3m.com) 固定在顶部外壳内侧。

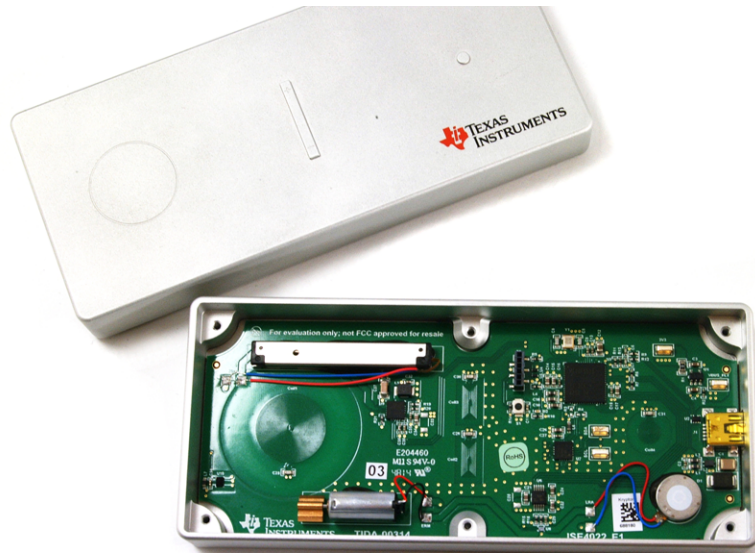


图 2. 集成触觉反馈的触摸金属按钮的机械外壳详图

底部外壳仅是一块铝板，通过六枚穿过橡胶垫圈的机械螺钉与顶部固定，如图 3 所示。橡胶垫圈用于在外壳的顶部和底部之间实现机械隔离。底部外壳会安装在固定表面，比如桌面或墙壁。在触觉致动器工作时，橡胶垫圈有助于顶部外壳自由移动。当最终用户按下顶部外壳上的其中一个按钮时，顶部外壳的这种移动方式能够很好地将触摸能量传递到用户手指。

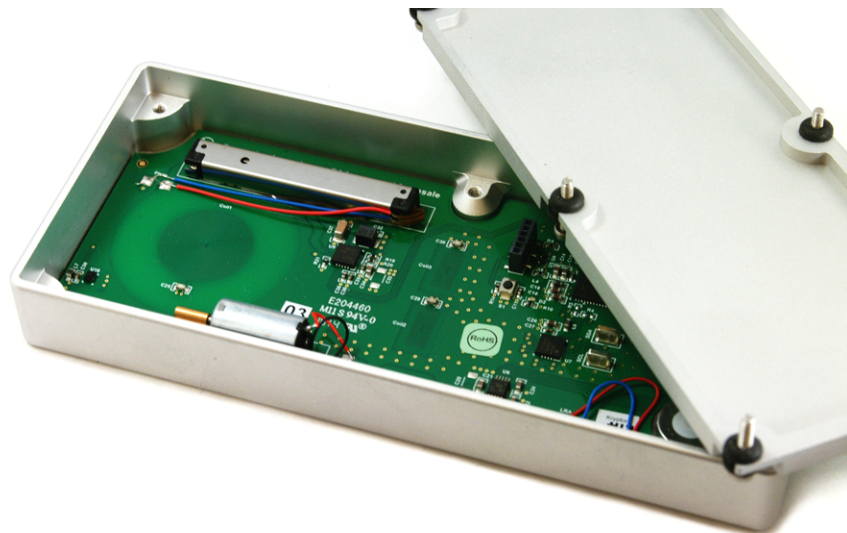


图 3. 集成触觉反馈的触摸金属按钮的机械外壳详图

2.6 环境传感器

许多工业终端设备系统工作的位置会经历剧烈的环境变化，其中包括温度和湿度的变化。

TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮通过固件算法来降低环境变化所带来的影响，并可根据终端设备的要求，针对环境条件进行主动修正，从而实现更高的测量精度。有关该 TI 参加设计系统应对环境影响的相关方法的详细信息，请参见 4.3 节 利用固件技术进行环境补偿。

为进一步降低环境变化对金属触摸测量的影响，本设计在 PCB 上使用了 HDC1000 器件。HDC1000 器件能以高达 14 位的分辨率测量湿度和温度，而且功耗极低。HDC1000 器件的工作温度范围为 -20°C 至 85°C ，可在 -40°C 至 125°C 温度范围内进行检测；然而由于系统内其它各种组件的温度范围较窄，所以规定整个 TI 参加设计系统的工作温度范围是 -20°C 至 70°C 。本 TI 参加设计系统可以同时监控温度和湿度，所以既可在室内工作，也能在室外工作。

2.7 微控制器

TI 参加设计系统集成触觉反馈的触摸金属按钮对微控制器的要求相对较低。本设计中所使用的所有器件均通过 I²C 进行通信，不会出现地址冲突。因此，微控制器只需要使用一个 I²C 模块即可。微控制器需要数个用于引脚中断和模拟开关控制的通用输入输出 (GPIO)。微控制器选型的最后一项主要要求是，处理器速度必须足够快，能够在所需的系统刷新率下处理 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据。

本设计选择 MSP430F5528™ 微控制器作为中央处理器，以此展示德州仪器 (TI) 的技术。这是一款功能齐全的微控制器，具备各类外设，可远远超出 TI 参加设计的要求。

2.8 电源管理

为充分展示 TI 参加设计系统集成触觉反馈的触摸金属按钮的性能，LP5907 低压降 (LDO) 稳压器将输入电压稳定至 3.3V。该设计的硬件由标准 USB 端口供电，标称电压为 5V。此外，如果终端设备上存在子系统，则这些子系统可通过合适的电源轨进行供电。

电感数字转换器、湿度和温度传感器以及微控制器均需要通过 3.3V 电压轨供电才能工作。然而，触觉驱动器和致动器均直接由 VBUS 供电，即在 TI 参考设计系统输入端提供的 5V 电压轨。

若要将本设计所展示的技术集成到终端设备，需要采用其它电源管理配置。根据已有的输入电压轨，可以更改选择用于电源管理的器件。如果已有较低电压的负载点电源轨，则可选用其它 TI 器件进行电源管理，以符合系统条件（请参见 www.ti.com/power）。低噪声电源轨是 LDC1614 器件发挥最佳性能的理想之选。

[WEBENCH 设计工具](#)是一款用于确定合适器件的绝佳工具。

2.9 EMI 保护

TI 参加设计系统触觉反馈的触摸金属按钮经过专门设计，能够有效抵抗电磁干扰 (EMI)，尤其是 USB 电源线上的电磁干扰。由于不同的终端设备系统采用不同的电源架构（由此需要采取不同的防护措施来抵抗 EMI），本 TI 参加设计能够展示构建的一种实际系统，且此系统能够符合多种 EMI 标准 (IEC61000)。EMI 测试结果使我们确信，如果系统设计正确，德州仪器 (TI) 技术能够满足 EMI 标准。

主 EMI 保护电路以及联合测试行动组 (Joint Test Action Group, JTAG) 编程连接器均位于 USB 接口内。主电源输入网上具备分立器件保护网络。该器件网络包括高压 (2kV) 接地分流电容、瞬态电压抑制 (TVS) 器件、共模扼流器、快速旁路电容，以及在正电压轨和返回电压轨上的铁氧体磁珠。该网络可保护系统免受主电源输入端的瞬态电压和瞬态电流的影响，另外还能降低差模和共模 RF 瞬变。

选用 TPD1E10B06 单通道 ESD 保护器件来保护 JTAG 编程接口。选用 TPD2E2U06 双通道高速 ESD 保护器件来保护 USB 总线的数据引脚。有关本 TI 参加设计系统 EMI 保护机制性能的详细信息，请参见 [6.8 节 EMI 保护性能](#)。

3 框图

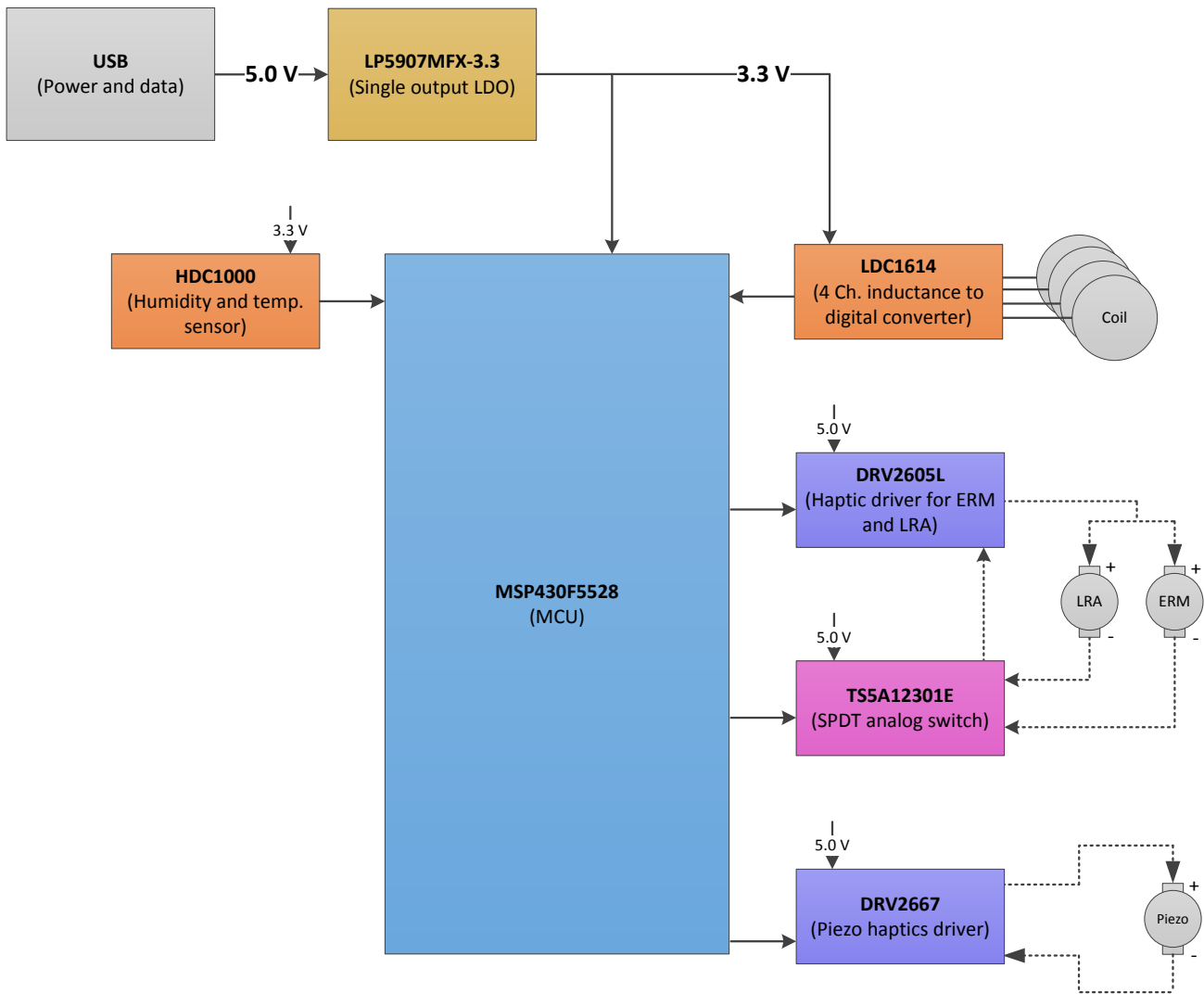


图 4. 集成触觉反馈的触摸金属按钮系统方框图

3.1 重点产品

集成触觉反馈的触摸金属按钮参考设计采用以下器件：

- LDC1614 (节 3.1.1)：4 通道 28 位电感数字转换器，带用于电感感测的 I²C 接口
- DRV2605L (节 3.1.2)：具有内置库和智能环路架构的 ERM 和 LRA 触觉驱动器
- DRV2667 (节 3.1.3)：具有升压、数字前端和内部波形存储器的压电式触觉驱动器
- HDC1000 (节 3.1.4)：集成温度传感器的低功耗、高精度数字湿度传感器
- MSP430F5528 (节 3.1.5)：16 位超低功耗微控制器，配有 128KB 闪存、8KB RAM、USB、12 位 ADC、2 个通用串行通信接口 (USCI)、32 位硬件乘法器
- LP5907 (节 3.1.6)：250mA 超低噪声低压降稳压器
- TS5A12301E (节 3.1.7)：具备 IEC 4 级 ESD 保护，带 1.8V 兼容输入逻辑的 0.75 欧姆单刀双掷 (SPDT) 模拟开关。
- TPD2E2U06 (节 3.1.8)：双通道高速 ESD 保护
- TPD1E10B06 (节 3.1.9)：采用 0402 封装的单通道 ESD (10pF 电容和 6V 击穿电压)
- 有关这些器件的具体信息，请参见 www.ti.com.cn 上对应的产品文件夹。

3.1.1 LDC1614 简介

LDC1312 和 LDC1314 分别是用于电感感测解决方案的 2 通道和 4 通道 12 位电感数字转换器 (LDC)。由于具备多通道且支持远程感测，LDC1312 和 LDC1314 能以最低的成本和功耗实现高性能且可靠的电感感测。此类产品使用简便，仅需要传感器频率处于 1kHz 至 10MHz 的范围内即可开始工作。由于支持的传感器频率范围 1kHz 至 10MHz 较宽，因此还支持使用非常小的 PCB 线圈，从而进一步降低感测解决方案的成本和尺寸。

LDC1312 和 LDC1314 提供匹配良好的通道，可实现差分测量与比率测量。因此，设计人员能够利用一个通道来补偿感测过程中的环境条件和老化条件，例如温度、湿度和机械漂移。得益于易用、低能耗、低系统成本等特性，这些产品有助于设计人员大幅改进现有传感解决方案，从而为所有市场（尤其是消费品和工业应用）中的产品引入全新的感测功能。相比同类感测技术，电感感测具有更高的性能、可靠性和灵活性，而且系统成本与功耗更低。

LDC1312 和 LDC1314 能够通过 I²C 接口轻松进行配置。双通道 LDC1312 采用 WSON-12 封装，四通道 LDC1314 采用 WQFN-16 封装。LDC1612 和 LDC1614 分别是用于电感感测解决方案的 2 通道和 4 通道 28 位电感数字转换器 (LDC)。由于具备多通道且支持远程感测，LDC1612 和 LDC1614 能以最低的成本和功耗实现高性能且可靠的电感感测。

高分辨率通道可支持更大的感测范围，在两倍线圈直径范围外依然可保持良好的性能。良好匹配的通道支持差分与比率测量，因此，设计人员能够利用一个通道来补偿感测过程中的环境条件和老化条件，例如温度、湿度和漂移等。

得益于易用、低能耗、低系统成本等特性，这些产品有助于设计人员大幅提高现有传感解决方案的性能、可靠性和灵活性，从而为所有市场（尤其是消费品和工业应用）中的产品引入全新的感测功能。

这些器件可以通过 I²C 接口轻松进行配置。双通道 LDC1612 采用 WSON-12 封装，四通道 LDC1614 采用 WQFN-16 封装。

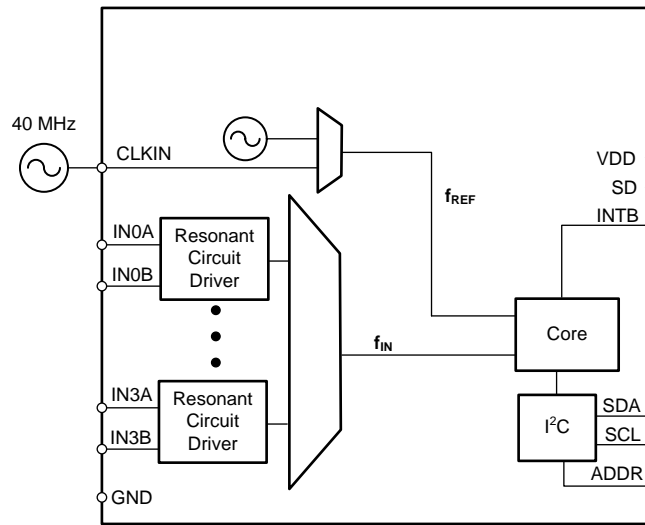


图 5. LDC1614 功能方框图

3.1.1.1 LDC1614 特性

- 易于使用 — 配置要求极低
- 单个 IC 可测量多达四个传感器
- 具备多通道，支持对环境和老化条件进行补偿
- 多通道远程感测，可将成本降至最低
- 中等分辨率和高分辨率器件引脚兼容
 - LDC1312/4: 2/4 通道 12 位 LDC
 - LDC1612/4: 2/4 通道 28 位 LDC
- 感测范围超过两倍线圈直径
- 支持 1kHz 至 10MHz 较宽的传感器频率范围
- 功耗：
 - 35 μ A（低功耗休眠模式）
 - 200nA（关断模式）
- 3.3V 工作电压
- 支持内部或外部基准时钟
- 抗直流磁场和磁铁干扰

3.1.2 DRV2605L 简介

DRV2605L 器件是一款低压触觉驱动器，其包含触觉效果库和闭环致动器控制系统，可为 ERM 和 LRA 提供高质量的触觉反馈。此方案有助于提升致动器在加速度稳定性、启动时间和制动时间方面的性能，通过共用的 I²C 兼容总线或 PWM 输入信号即可触发该方案。

DRV2605L 器件提供了 Immersion 公司的许可版 TouchSense 2200 软件，其中包含 100 多种许可版效果（6 个 ERM 库和 1 个 LRA 库）和 audio-to-vibe 功能，因此无需设计触觉波形。

此外，主机处理器可利用实时回放模式绕过库回放引擎并通过 PC 从主机直接播放波形。

DRV2605L 器件内部采用智能环路架构，可轻松实现自动谐振 LRA 驱动，以及优化反馈的 ERM 驱动，从而提供自动过驱动和制动功能。这种架构可构建简化的输入波形接口，并且能够提供可靠的电机控制和稳定的电机性能。此外，DRV2605L 器件还能够在 LRA 致动器不产生有效反电动势电压时自动切换至开环系统。当 LRA 产生有效反电动势电压时，DRV2605L 器件会自动与 LRA 同步。DRV2605L 还可以利用内部生成的 PWM 信号实现开环驱动。此外，audio-to-vibe 模式可自动将音频输入信号转换为实际的触控效果。

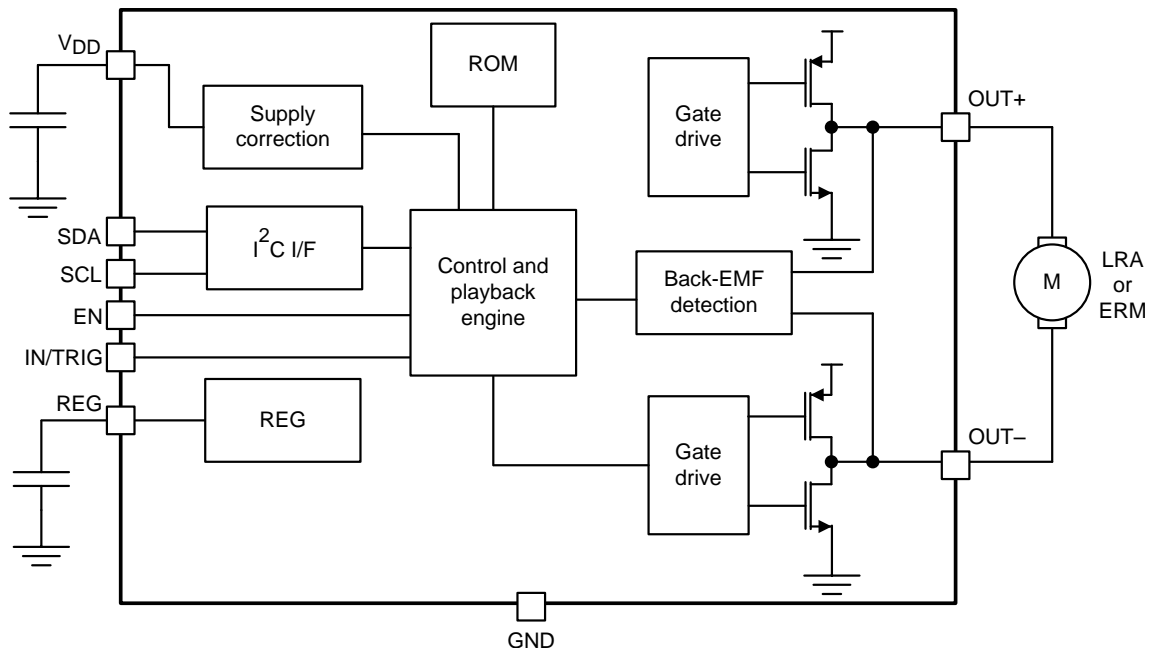


图 6. DRV2605L 功能方框图

3.1.2.1 DRV2605L 特性

- 适用于汽车电子应用
- 下列性能符合 AEC-Q100 标准:
 - 器件温度等级 0: -40°C 至 150°C
 - 器件人体模型 (HBM) 静电放电 (ESD) 分类等级 2
 - 器件充电器件模型 (CDM) ESD 分类等级 C4B
- 灵活的触觉和振动驱动器
 - LRA (线性谐振致动器)
 - ERM (偏轴转动惯量)
- 数字回放引擎由 I²C 控制
 - 波形序列器和触发器
 - 实时回放模式通过 I²C 实现
 - 针对定制波形的内部 RAM
 - I²C 双模式驱动 (开环和闭环)
- 智能环路架构⁽¹⁾
 - 自动过驱动和制动
 - 自动谐振跟踪和报告 (仅限 LRA)
 - 自动致动器诊断
 - 自动级别校准
 - 支持宽泛的致动器型号
- 许可版与 Immersion TouchSense® 3000 兼容的 2200 特性:
 - 集成 Immersion 效果库
 - Audio-to-vibe
- 可在电池放电过程进行驱动补偿
- 宽泛的工作电压范围 (2V 至 5.2V)
- 高效的差分开关输出驱动
- PWM 输入, 占空比可控范围为 0% 至 100%
- 硬件触发输入
- 启动时间快
- 1.8V 兼容, V_{DD} 容限数字接口 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ 正在申请专利的控制算法

3.1.3 DRV2667 简介

DRV2667 是一款压电式触觉驱动器，此驱动器集成有 105V 升压开关、集成功率二极管、集成型全差分放大器和集成型数字前端。这个多用途器件能够驱动高压和低压压电式触觉致动器。输入信号可在 I²C 端口上或者通过模拟输入驱动。

DRV2667 数字接口可通过一个 I²C 兼容总线实现。数字接口可减轻主机系统中处理器应对 PWM 生成或满足其它模拟通道要求所需的昂贵负担。对内部 FIFO 执行的任何写入操作均会自动唤醒此器件，并在 2ms 的内部启动程序之后开始播放波形。当数据流停止（或者 FIFO 正在运行）时，该器件将自动进入一个无爆音关断程序。

DRV2667 还包含有深度易失性波形存储器，用于以最小的延迟保存且读取波形，并包含一个高级波形合成器，以最少的存储空间构建复杂触觉波形。这就提供了一个硬件加速方式，从而减轻了处理器的触觉生成工作并大大减少了触觉接口上的总线流量。

升压电压通过两个外部电阻进行设置，升压电流限制可通过 R_{EXT} 电阻进行编程。2ms 的典型启动时间使得 DRV2667 成为实现快速触觉响应压电式驱动器的理想选择。热过载保护防止过驱时对器件造成的损坏。

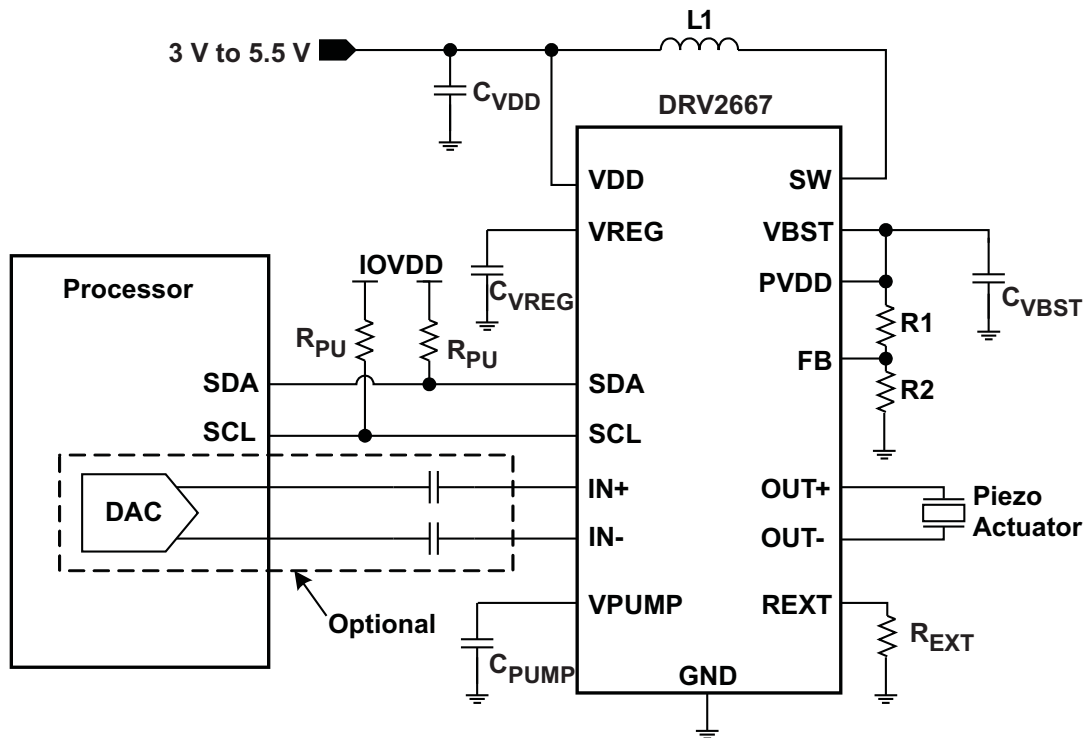


图 7. DRV2667 系统图

3.1.3.1 DRV2667 特性

- 集成数字前端
 - 高达 400kHz 的 I²C 总线控制
 - 高级波形合成器
 - 2kB 内部波形存储器
 - 内部 100 字节的先入先出 (First-in First-out, FIFO) 接口
 - Immersion TS5000 兼容
 - 可选模拟输入
- 高压压电式触觉驱动器
 - 在 200V_{pp}和 300Hz 上驱动高达 100nF 的负载
 - 在 150V_{pp}和 300Hz 上驱动高达 150nF 的负载
 - 在 100V_{pp}和 300Hz 上驱动高达 330nF 的负载
 - 在 50V_{pp}和 300Hz 上驱动高达 680nF 的负载
 - 差分输出
- 集成 105V 升压转换器
 - 可调升压电压
 - 可调升压电流限制
 - 集成功率场效应晶体管 (FET) 和二极管
 - 无需变压器
- 2ms 的快速启动时间 (典型值)
- 3V 至 5.5V 的宽电源电压范围
- 1.8V 兼容, VDD 容限数字引脚
- 采用 4mm x 4mm x 0.9mm 四方扁平无引线 (QFN) 封装 (RGP)
- 引脚与 DRV8662 类似, 且与 DRV2665 的引脚兼容

3.1.4 HDC1000 简介

HDC1000 是一款集成温度传感器的数字湿度传感器，其能够以超低功耗提供出色的测量精度。该器件基于新型电容式传感器来测量湿度。湿度和温度传感器均经过出厂校准。创新型 WLCSP（晶圆级芯片规模封装）凭借超紧凑型封装简化了电路板设计。HDC1000 的传感元件位于器件底部，这样可使 HDC1000 免受灰尘、粉尘以及其它环境污染物的影响，从而提高耐用性。HDC1000 可在整个 -40°C 至 125°C 温度范围内进行检测。

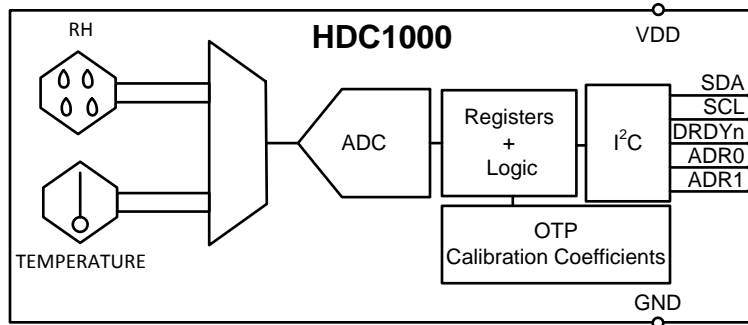


图 8. HDC1000 功能方框图

3.1.4.1 HDC1000 特性

- 相对湿度 (RH) 工作范围为 0% 至 100%
- 14 位测量分辨率
- 相对湿度精度为 $\pm 3\%$
- 温度范围
 - 工作温度为 -20°C 至 85°C
 - 可检测温度为 -40°C 至 125°C
- 温度精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
- 200nA 休眠模式电流
- 平均电源电流：
 - 1sps、11 位相对湿度 (RH) 测量时为 820nA
 - 1sps、11 位 RH 与温度测量时为 1.2 μA
- 电源电压范围：3V 至 5V
- 微型 2mm \times 1.6mm 器件封装
- I²C 接口

3.1.5 MSP430F5528 简介

Texas Instruments™ MSP430 系列超低功耗微控制器由多个器件组成，这些器件针对不同应用具有不同的外设集。此架构，与多种低功耗模式配合使用，是在便携式测量应用中实现延长电池寿命的最优选择。该器件具有一个强大的 16 位 RISC CPU，使用 16 位寄存器，以及常数发生器，以便于获得最大编码效率。此数控振荡器 (DCO) 可使器件在 3.5 μs（典型值）内从低功耗模式唤醒至激活模式。

MSP430F5529, MSP430F5527, MSP430F5525 和 MSP430F5521 是微控制器器件，配置有支持 USB 2.0 的集成 USB 和物理层 (PHY)，4 个 16 位定时器，1 个高性能 12 位模数转换器 (ADC)，2 个通用串行通信接口 (USCI)，1 个硬件乘法器，DMA，1 个带有警报功能的实时时钟 (RTC) 模块，以及 63 个 I/O 引脚。MSP430F5528, MSP430F5526, MSP430F5524 和 MSP430F5522 包含同样的外设，但具有 47 个 I/O 引脚。

MSP430F5519, MSP430F5517 和 MSP430F5515 是微控制器器件，配置有支持 USB 2.0 的集成 USB 和 PHY、4 个 16 位定时器、2 个通用串行通信接口 (USCI)、1 个硬件乘法器、DMA、1 个具有报警功能的 RTC 模块以及 63 个 I/O 引脚。MSP430F5514 和 MSP430FF5513 包含同样的外设，但具有 47 个 I/O 引脚。

典型应用包括需要与多种 USB 主机连接的模拟和数字传感器系统，数据记录器和其它应用。

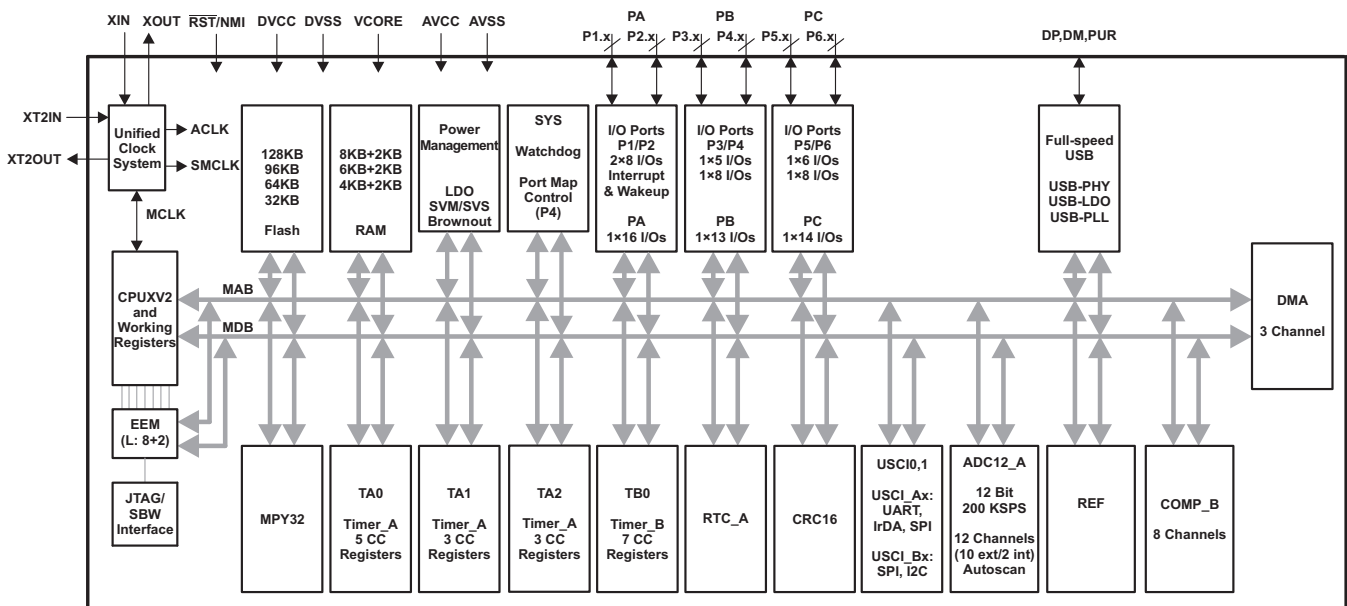


图 9. MSP430F5528 功能方框图

3.1.5.1 MSP430F5528 特性

- 低电源电压范围：
从 3.6 V 低至 1.8 V
- 超低功耗
 - 激活模式 (AM):
所有系统时钟激活
在 8MHz, 3.0V, 闪存程序执行时为 290μA/MHz (典型值)
在 8MHz, 3.0V RAM 程序执行时为 150μA/MHz (典型值)
 - 待机模式 (LPM3):
带有晶振的实时时钟 (RTC), 看门狗和电源监控器可用, 完全 RAM 保持, 快速唤醒:

- 2.2V 时为 1.9 μ A, 3.0V 时为 2.1 μ A (典型值)
- 低功耗振荡器 (VLO), 通用计数器, 看门狗和电源监控器可用, 完全 RAM 保持, 快速唤醒:
- 3.0V 时为 1.4 μ A (典型值)
- 关闭模式 (LPM4):
 - 完全 RAM 保持, 电源监控器可用, 快速唤醒:
 - 3.0V 时为 1.1 μ A (典型值)
- 关断模式 (LPM4.5):
 - 3.0V 时为 0.18 μ A (典型值)
- 在 3.5 μ s (典型值) 内从待机模式唤醒
- 16 位精简指令集计算 (RISC) 架构, 扩展存储器, 高达 25MHz 的系统时钟
- 灵活的电源管理系统
 - 具有可编程稳压内核电源电压的完全集成 LDO
 - 电源电压监控、监视和欠压保护
- 单一时钟系统
 - 用于稳定频率的频率锁相环 (FLL) 控制环路
 - 低功耗低频内部时钟源 (VLO)
 - 低频修整内部基准源 (REFO)
 - 32kHz 手表晶振 (XT1)
 - 高达 32MHz 的高频晶振 (XT2)
- 配有五个捕捉/比较寄存器的 16 位定时器 TA0, Timer_A
- 配有三个捕捉/比较寄存器的 16 位定时器 TA1, Timer_A
- 配有三个捕捉/比较寄存器的 16 位定时器 TA2, Timer_A
- 具有七个捕捉/比较影子寄存器的 16 位定时器 TB0, Timer_B
- 两个通用串行通信接口
 - USCI_A0 和 USCI_A1 均支持:
 - 增强型通用异步接收器/传输器 (UART) 支持自动波特率检测
 - IrDA 编码器和解码器
 - 同步串行外设接口 (SPI)
 - USCI_B0 和 USCI_B1 均支持:
 - I²C
 - 同步串行外设接口 (SPI)
- 全速通用串行总线 (USB)
 - 集成的 USB - PHY
 - 集成 3.3V 和 1.8V USB 电源系统
 - 集成 USB 锁相环 (PLL)
 - 八输入和八输出端点
- 配有内部基准、采样保持和自动扫描功能的 12 位模数转换器 (ADC) (仅适用于 MSP430F552x)
- 比较器
- 硬件乘法器支持 32 位运算

- 串行板上编程，无需外部编程电压
- 三通道内部直接内存存取 (DMA)
- 具有 RTC 功能的基本定时器
- 汇总了可用的系列产品成员
- 关于完整的模块介绍，请参见《MSP430x5xx 和 MSP430x6xx 系列产品用户指南》(文献编号: [SLAU208](#))

3.1.6 LP5907 简介

LP5907 是一款能够提供 250mA 输出电流的线性稳压器。LP5907 器件具备低噪声、高电源抑制比 (PSRR)、低静态电流以及低线路或负载瞬态响应系数等特性，可满足 RF 和模拟电路的要求。LP5907 采用创新的设计技术，无需噪声旁路电容便可提供出色的噪声性能，并且支持远距离安置输出电容。

此器件设计为与 1 μ F 输入和 1 μ F 输出陶瓷电容搭配使用（无需独立的噪声旁路电容）。

其固定输出电压介于 1.20V 和 4.50V 之间（以 25mV 为单位增量）。如需特定的电压选项，请联系德州仪器 (TI) 销售代表。

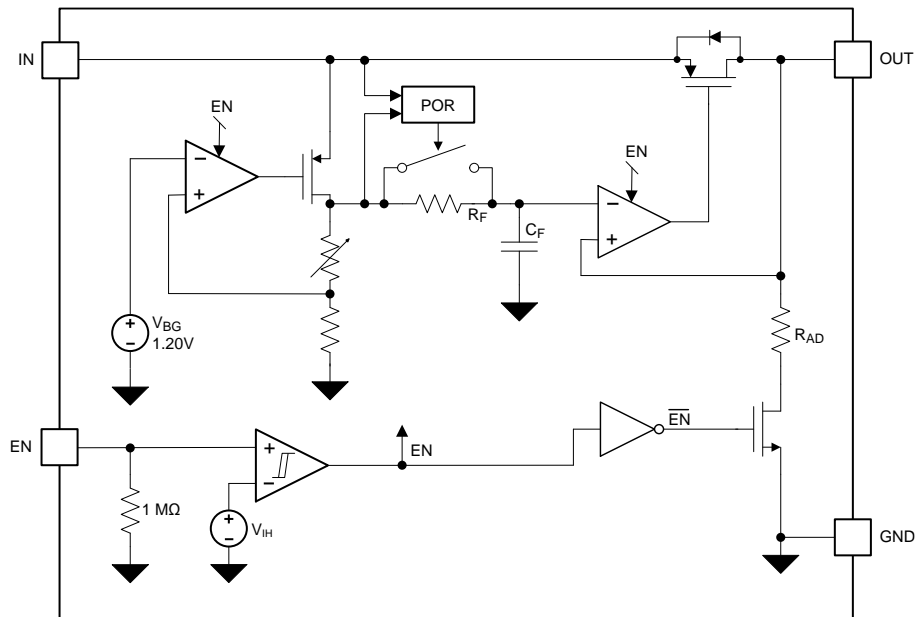


图 10. LP5907 功能方框图

3.1.6.1 LP5907 特性

- 输入电压范围：2.2V 至 5.5V
- 输出电压范围：1.2V 至 4.5V
- 输出电流：250mA
- 与 1 μ F 陶瓷输入和输出电容搭配使用，性能稳定
- 无需噪声旁路电容
- 支持远距离安置输出电容
- 具备热过载和短路保护功能
- 运行结温范围：-40°C 到 125 C

- 低输出电压噪声: $< 10\mu\text{V}_{\text{RMS}}$
- PSRR: 1kHz 频率时为 82dB
- 输出电压容差: $\pm 2\%$
- 几乎零 IQ (禁用时): $< 1\mu\text{A}$
- 极低 I_Q (使能时): $12\mu\text{A}$
- 启动时间: 80 μs
- 低压降: 120mV (典型值)

3.1.7 TS5A12301E 简介

TS5A12301E 是一款单刀双掷 (SPDT) 模拟开关, 设计工作电压范围为 2.25V 至 5.5V。该器件具有导通状态电阻和出色的通道间导通状态电阻匹配, 且其先断后合的特性可防止信号在路径间传输时出现失真。

该器件的总谐波失真 (THD) 性能出色, 并且功耗超低。这些特性使得这款器件适合于便携式音频应用。控制输入 (IN) 引脚可连接到低压 GPIO, 从而通过 1.8V 信号进行控制。

TS5A12301E 具备 COM 端口到地的 $\pm 15\text{kV}$ 气隙放电保护和 $\pm 8\text{kV}$ 接触放电 ESD 保护, 因此符合 IEC 4 级 ESD 标准 (IEC 61000-4-2)。

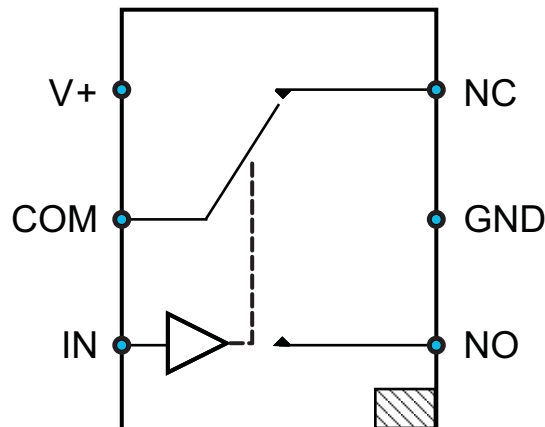


图 11. TS5A12301E 逻辑图

3.1.7.1 TS5A12301E 特性

- 低导通状态电阻 (0.75 Ω)
- 低电荷注入
- 出色的导通状态电阻匹配
- 断电模式下的隔离, $V_+ = 0$
- 指定的先合后断开关
- 2.25V 至 5.5V 电源 (V_+)
- 6M Ω 输入下拉电阻能够使控制输入端 (IN) 处于未连接状态
- 1.8V 兼容控制输入阈值, 与 V_+ 无关
- 闩锁性能超过 100 mA, 符合 JESD 78 II 类规范
- ESD 性能经测试符合 JESD 22 规范
 - 3000V 人体模型

- (A114-B, II 类)
- 1000V 充电器件模型 (C101)
- COM 端口到地的 ESD 保护
 - 8000V 人体模型 (A114-B, II 类)
 - $\pm 8\text{kV}$ 接触放电 (IEC 61000-4-2)
 - $\pm 15\text{kV}$ 气隙放电 (IEC 61000-4-2)

3.1.8 TPD2E2U06 简介

TPD2E2U06 是一款双通道超低电容 ESD 保护器件。此器件提供 $\pm 25\text{kV}$ IEC 接触和 $\pm 30\text{kV}$ IEC 空气间隙 ESD 保护。TPD2E2U06 的 1.5pF 线路电容使得此器件适合于广泛应用。典型应用接口为 USB 2.0, 低压差分信令 (LVDS) 接口和 I²C。

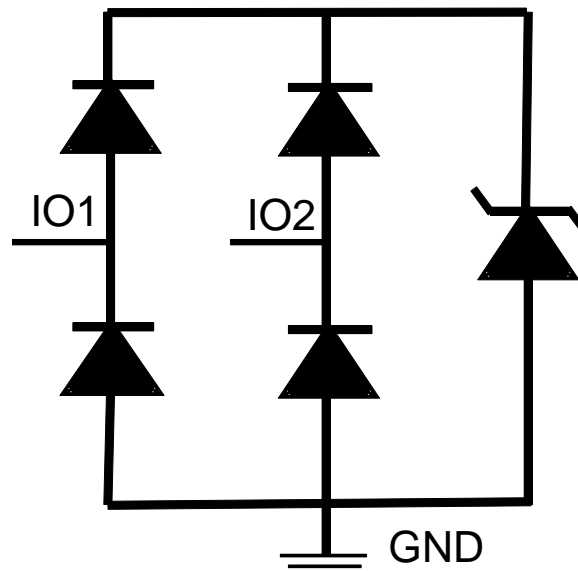


图 12. TPD2E2U06 功能方框图

3.1.8.1 TPD2E2U06 特性

- 为低压 IO 接口提供系统级的 ESD 保护
- IEC 61000-4-2 4 级
 - $\pm 25\text{kV}$ (接触放电)
 - $\pm 30\text{kV}$ (空气间隙放电)
- IO 电容值 1.5pF (典型值)
- 直流击穿电压为 6.5V (最小值)
- 超低泄漏电流 10nA (最大值)
- 低 ESD 钳位电压
- 工业温度范围: -40°C 至 125°C

- 小型易于走线的 DRL 封装

3.1.9 TPD1E10B06 简介

TPD1E10B06 是一个采用小型 0402 封装的单通道 ESD 保护器件。此器件提供超过 $\pm 30\text{kV}$ IEC 气隙、超过 $\pm 30\text{kV}$ 接触 ESD 保护，并具有一个采用背对背二极管的 ESD 钳位电路以支持双极或者双向信号。10pF 线路电容适用于能够支持高达 400Mbps 数据速率的宽范围应用。TPD1E10B06 的典型应用领域包括音频线路（麦克风、耳机和免提听筒电话）、SD 接口、键盘或者其他按钮、和 USB 端口 (ID) 的 VBUS 引脚。

0402 封装是行业标准并且便于在节省空间的应用中放置部件。TPD1E10B06 在 -40°C 至 125°C 的环境温度范围内运行。

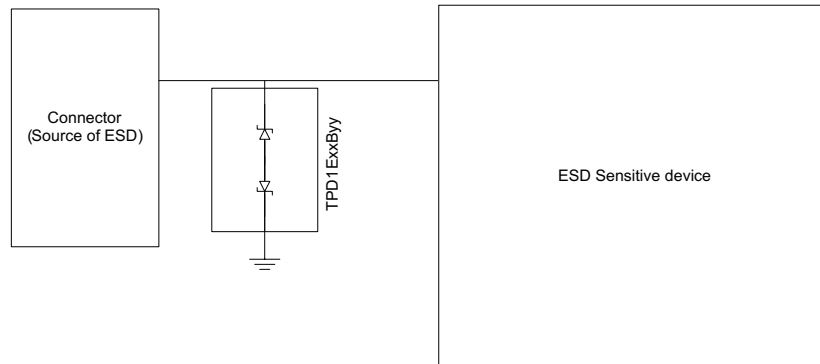


图 13. TPD1E10B06 器件配置

3.1.9.1 TPD1E10B06 特性

- 为低压 IO 接口提供系统级的 ESD 保护
- IEC 61000-4-2 4 级
 - $> \pm 30\text{ kV}$ (空气间隙放电),
 - $> \pm 30\text{ kV}$ (接触放电)
- IEC 61000-4-5 (浪涌): 6A (8/20 μs)
- IO 电容值 12pF (典型值)
- R_{DYN} 0.4 Ω (典型值)
- 直流击穿电压为 $\pm 6\text{V}$ (最小值)
- 超低泄漏电流 100nA (最大值)
- 10V 钳位电压 ($I_{\text{PP}} = 1\text{A}$ 时的最大值)
- 工业温度范围: -40°C 至 125°C
- 采用 0402 封装 (1mm x 0.6mm x 0.5mm), 可节省空间

4 系统设计理论与注意事项

4.1 触摸金属按钮按压检测设计注意事项

TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮借助 TI 的电感感测技术来检测金属表面的物理触摸操作。LDC1614 器件可测量 L-C 振荡电路谐振器的电感，此谐振器由 PCB 线圈电感和分立电容所组成。只要用户手指按压而导致金属外壳顶部发生形变，L-C 振荡电路的电感值就会发生变化。铝外壳的形变实际上仅为数微米，而 LDC1614 器件可轻松检测出这种变化。

有关 LDC1614 器件工作的更多信息，请参见器件数据表 ([SNOSCY9](#))。

利用电感感测技术在终端设备系统中设计触摸金属按钮时，需要考虑一些注意事项。首先，传感器线圈必须设计成与所需的按钮形状相匹配。在此 TI 参加设计系统中，传感器线圈与刻蚀或嵌入到外壳顶部的四个按钮的形状相匹配。传感器线圈的 L-C 振荡电路必须设计成能在 LDC1614 器件的运行参数范围内产生谐振。

另一项需要注意的是感测线圈与金属外壳或表面之间的距离。所建议的最大距离大约是感测线圈直径的 1/2。在本 TI 参加设计中，配有感测线圈的 PCB 通过双面胶带 (3M™ VHB™ 转移胶带 F9460PC，更多信息请参见 www.3m.com) 固定在顶部外壳内侧。在终端设备解决方案中，可能需要将配有感测线圈的 PCB 与按钮所在的金属表面稍微分开一些。LDC1614 器件可以轻松应对数毫米的分离间隔，而且仍能保持可靠检测金属表面按钮按压所需的测量分辨率。

设计按钮所在的金属表面时，请务必确保对按钮进行充分的机械隔离，从而使 LDC1614 器件能够区分相邻按钮的按压操作。本 TI 参加设计中的“向上”和“向下”按钮用示例说明了 LDC1614 器件如何区分彼此间通过机械方式连接的按钮 (更多信息，请参见 [节 6.2.1 相邻按钮按压性能](#))。

设计触摸金属按钮按压检测时，最后一项注意事项是要考虑按钮所在的金属表面的材质。目前的 TI 参加设计系统采用 1 毫米厚的铝金属表面，但终端设备系统可能会要求采用其它材质或其它厚度。只要材质具备导电性，而且金属厚度可以确保在按压时产生充分形变，那么 LDC1614 器件便能够检测任何的按钮按压操作。如果金属厚度过大，最终用户用手指触摸表面从而按压时将无法产生 LDC1614 器件能够测出的金属形变。然而，LDC1614 器件能够实现亚微米级的感测分辨率；所以系统设计得当时，TI 的电感感测技术可以替代现有的机械式或电容式开关。

4.2 触觉设计注意事项

在终端设备系统中实现触觉技术时，首要设计考量因素是触觉驱动器的选型。本 TI 参加设计系统包含三种不同类型的触觉驱动器，以便于评估各种可用的技术。关于触觉驱动器的详细对比，请参见 [表 1](#)。

选择触觉驱动器后，务必要选择合适的触觉驱动器。对于 ERM 和 LRA 驱动器，DRV2605L 器件为理想之选。对于压电驱动器设计，DRV2667 器件能够出色地处理高压驱动。

触觉集成设计的最后一项考量因素是外壳或触摸表面的机械设计。如果终端设备是固定式安装的设备（而非手持设备），请务必确保机械设计在安装点与用户接触面之间存在机械隔离。例如，在本 TI 参加设计系统中，外壳的顶部通过橡胶垫圈与底部进行机械隔离。将外壳底部固定在安装表面上时，顶部可自由振动而不会将大部分触摸能量传递到安装表面上。

4.3 利用固件技术实现环境补偿

在 TI 参加设计系统集成触觉反馈的触摸金属按钮中，仅利用 LDC1614 输出数据值的相对变化来确定按钮是否被按下。这是利用基于无限脉冲响应 (IIR) 滤波器的移动平均值算法对数据进行后处理而确定的。因此，如果环境变化导致 LDC1614 的基准输出数据发生变化，固件可通过移动平均值进行补偿。

实际采用的算法为 [公式 1](#) 所示的形式：

$$MA[n] = \frac{MA[n-1] \times N - MA[n-1] + X[n]}{N}$$

其中，各个变量表示以下值：

- MA[n]: 新的移动平均值
- MA[n-1]: 上一个移动平均值
- N: 要求平均值的样本数（必须是 2 的幂次，才能在微控制器处理器中实现高效运算）
- X[n]: 当前的 LDC 样本

(1)

该算法已专门经过优化，适用于低功耗微控制器，因为 IIR 滤波器的响应在单变量 (N) 条件下可调，而且该算法工作过程仅使用位移运算和加法运算。实际的 IIR 滤波器具有指数级响应，突出 LDC1614 器件中最近的样本。

如果 LDC1614 器件输出数据的绝对值是特定终端设备应用所必需的信息，则可以利用 HDC1000 器件的输出数据，基于运行时所测得的湿度和温度条件进行主动补偿。如果环境变化为线性变化，则可以利用增益和偏移算法来进行补偿，而如果环境变化在一定程度上为非线性变化，则可以利用查询表程序进行补偿。

4.4 固件控制

TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的硬件预先加载了用于控制系统所有组件的固件。MSP430F5528 器件经过编程，能够利用 I²C 模式下的 USCI_B1 通用串行通信接口来控制 LDC1614、HDC1000、DRV2605L 和 DRV2667 器件。固件会对 MSP430F5528 中的通信模块、计时器模块以及时钟系统进行初始化。

LDC1614、DRV2605L 和 DRV2667 器件中的多个控制寄存器和配置寄存器必须置位才能在此 TI 参加设计中正常工作。这些寄存器的详细信息在对应的数据表中介绍。

在启动时将微控制器 GPIO 配置为实现最低功耗后，会对时钟系统进行初始化。采用 24MHz 的晶振来驱动 XT2，作为 ACLK、SMCLK 和 MCLK 的主要时钟源。ACLK 是 GPIO 的直接时钟源，用于驱动 LDC1614 器件的主时钟源 LDC_CLKIN。SMCLK 由 XT2 作为时钟源，但经过八分频，因为 SMCLK 用于驱动低速的 Timer_A0 模块。

I²C 和 USB 模块进行初始化，然后 DRV2605L 器件进行初始化，并设置为针对 ERM 和 LRA 致动器执行自动校准。自动校准是 DRV2605L 的一项特性，用于确定各个触觉致动器的多项运行参数。这一过程会针对被驱动的具体致动器对 DRV2605L 器件的性能进行优化。DRV2667 器件被初始化，而且波形库会加载至器件 RAM 中。

然后，将 HDC1000 器件配置为以 11 位分辨率执行温度和湿度测量。

将 LDC1614 器件配置为在全部四个通道上按顺序以连续测量模式（按顺序的）工作。之后，将 LDC1614 设为开始在全四个通道上将电感值转换为数字输出数据。关于 LDC1614 的通道分配，请参见表 2。

表 2. LDC1614 通道分配

LDC1614 通道	对应按钮名称
0	向下按钮
1	向上按钮
2	大按钮
3	小按钮

默认情况下，LDC1614 器件的原始输出数据会使用 IIR 滤波器求 16 次平均值以降低噪声；所得结果称为“瞬时平均值”。然后，缓慢移动平均值会通过同一 IIR 滤波器用 256 个“瞬时平均值”样本进行更新。如果“瞬时平均值”大于缓慢移动平均值的总和和各个通道阈值（由实验所确定），会将标志置位。该标志用于指示各个通道是否检测到按钮按压操作。在固件主循环中，分配给具体按钮的触觉会被激活。

如果低功耗是终端设备的主要限制，则可以设置 LDC1614 器件占空比，降低系统整体流耗。这种方法会降低整体采样率，从而降低信噪比；但考虑到节 6.2.2 LDC1614 基准性能所给出的高信噪比，系统性能还需要进一步折衷。

将 HDC1000 器件设为根据 Timer_A0 模块的计时，每秒测量一次温度和湿度。

USB 模块用于与图形用户界面 (GUI) 进行通信。

4.5 图形用户界面

该图形用户界面利用 USB 模块与 TI 参加设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的硬件进行通信。

GUI 支持以下功能：

- 以图形形式显示 LDC 数据输出和全部四个通道的阈值
- 显示温度和相对湿度
- 按下按钮时外壳突出显示
- USB 固件升级
- 固件配置设置
 - LDC 滤波长度配置
 - 触觉效果模式配置
 - 阈值模式配置
 - 按钮效果
 - 第一阈值
 - 第一阈值的触觉致动器
 - 第一阈值的触觉效果
 - 第二阈值
 - 第二阈值的触觉致动器
 - 第二阈值的触觉效果

5 开始使用

5.1 硬件概览

图 14 和图 14 所示为 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的硬件。压电致动器位于 PCB 板的左上方；ERM 位于左下方；LRA 致动器位于右下方。每个致动器均使用快干环氧树脂粘合剂固定在 PCB 上。

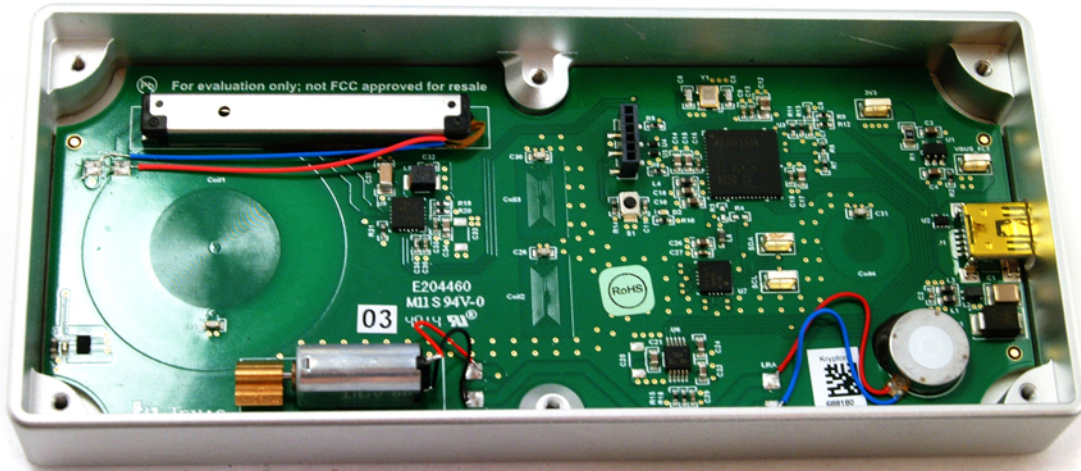


图 14. 集成触觉反馈的触摸金属按钮参考设计硬件

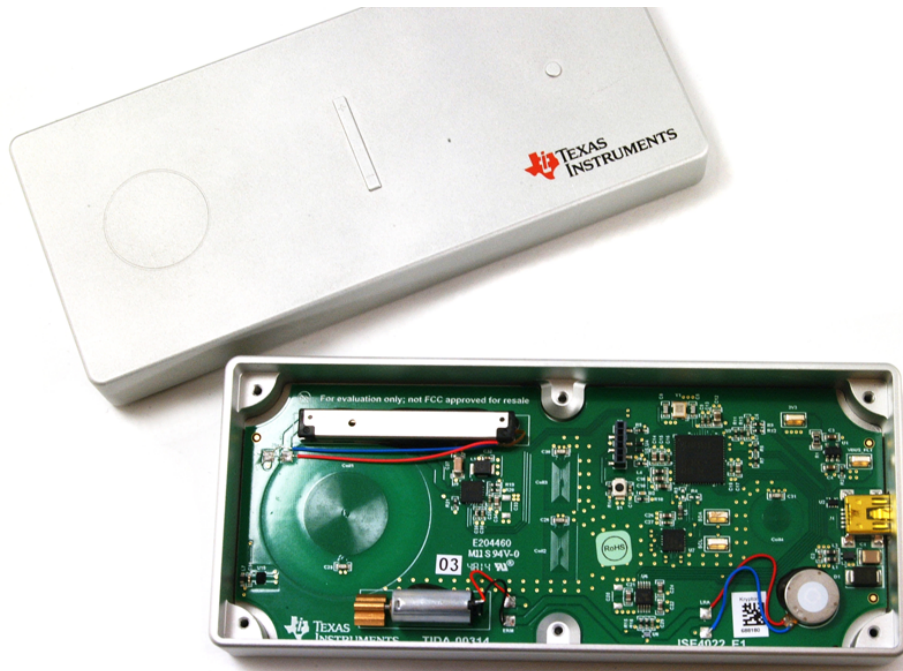


图 15. 集成触觉反馈的触摸金属按钮参考设计硬件

“大”按钮传感器线圈位于 PCB 中间靠左的位置，“向下”按钮和“向上”按钮传感器线圈位于 PCB 中间位置，“小”按钮传感器线圈位于 PCB 右侧。

DRV2667 器件靠近压电致动器，DRV2605L 器件位于 ERM 和 LRA 致动器之间。

LDC 1614 器件位于“向下”按钮和“向上”按钮之间，“小”按钮紧在 MSP430F5528 微控制器下方。

所有元件均放置在 PCB 的同一面，因为 PCB 的底面直接固定在顶部铝外壳上。

J2 是 JTAG 编程插座，设计用于标准 14 针 JTAG 编程端口的适配板。

PCB 上具有用于 I²C 通信线、VBUS_FLT 和 3V3 电压轨的测试点。

对 TI 参加设计硬件进行首次上电时，必须等待五秒，使缓慢移动平均值阈值根据具体硬件进行调整。固件中会插入合适的初始猜测值，但各个硬件单元之间会存在一些差别。

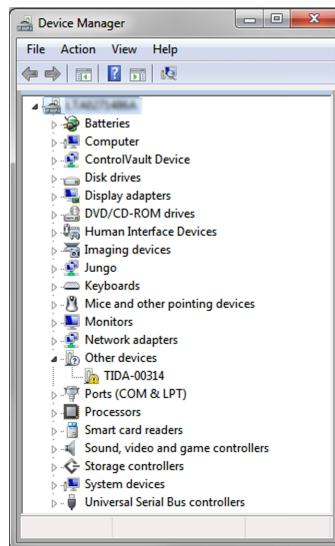
5.2 系统设置

TI 参加设计正常运行时并不需要 GUI；然而，GUI 可以将 LDC 通道进行可视化并可用于配置固件设置。

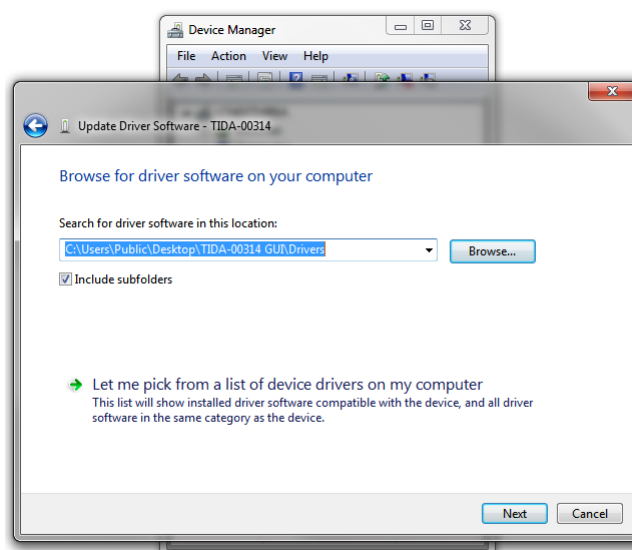
GUI 采用 Microsoft Visual Studio 2013® 编写，所以运行此应用程序需要安装 Microsoft .Net Framework 4.5 或更高版本。如果这些驱动程序缺失，请从 Microsoft 网站下载并安装或安装 *Drivers* 文件夹中的 *vcredist_x86.exe*。

用户还必须安装 MSP430 CDC Windows 驱动程序才能与 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮进行通信。使用以下步骤安装 USB 驱动程序。

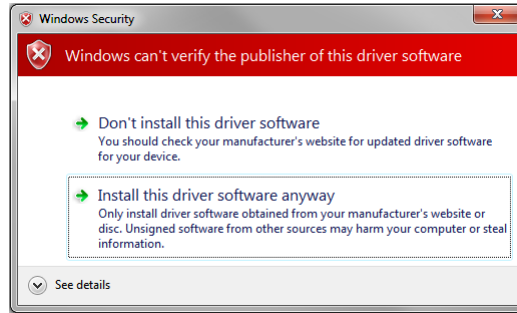
1. 将 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮插入 PC。
2. 打开 PC 中的 设备管理器 (Device Manager)。在其它设备 (Other devices) 下找到“TIDA-00314”。



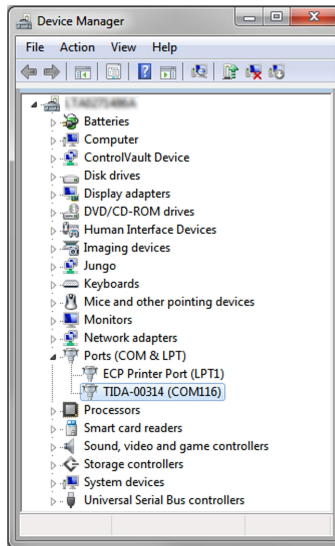
3. 右键单击“TIDA-00314”，然后选择“更新驱动程序软件...”(Update Driver Software...)
4. 选择“浏览计算机以查找驱动程序软件”(Browse my computer for driver software)。
5. 关于软件位置，请导航至 *TIDA-00314_GUIs Drivers*。



6. 单击下一步 (Next)。
7. 如果弹出警告“Windows 无法验证此驱动程序软件的发布者”(Windows can't verify the publisher of this driver software) 警告，请单击“始终安装此驱动程序软件”(install this driver software anyway)。



8. 安装后，“TIDA-00314”会列在端口 (Port) 部分，并带有有效的 COM 端口号。记下 COM 端口号，因为 TIDA-00314_GUI 中会用到此端口号。



5.3 GUI 功能与操作

后续章节介绍 TIDA-00314_GUI 的功能以及如何操作 TIDA-00314_GUI。

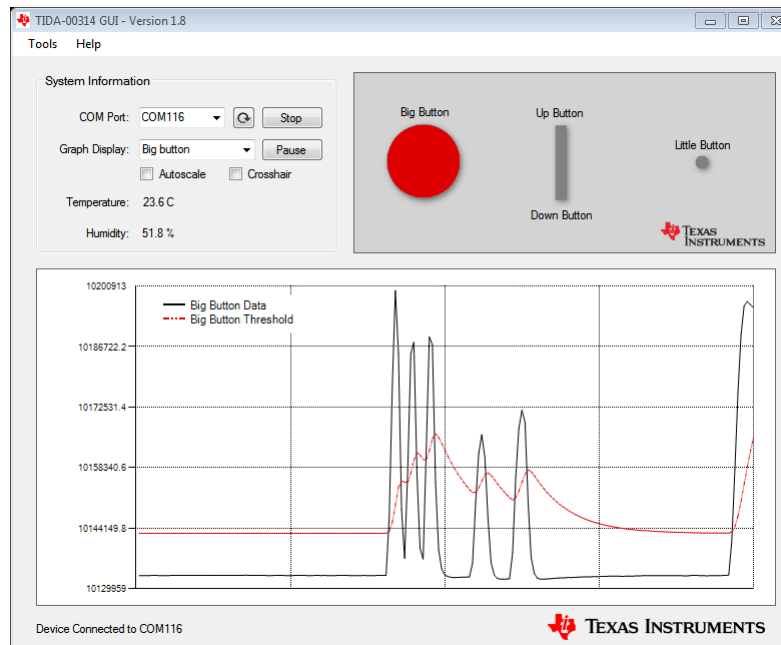


图 16. TIDA-00314_GUI

5.3.1 启动 GUI

1. 导航至 TIDA-00314_GUI 文件夹
2. 双击 *TIDA-00314_GUI.exe* 图标。

GUI 运行之后:

- 默认情况下, 固件会在 GUI 连接之后才发出 USB 流。
- 当按下启动 (Start) 按钮后, GUI 会发出一个数据包, 触发固件启动 USB 流。
- 按下停止 (Stop) 按钮或者关闭 GUI 后, GUI 会通知固件停止发送 USB 流。

5.3.2 选择 COM 端口

从 COM 端口下拉菜单中, 选择 TIDA-00314 参考设计的 COM 端口。如果需要, 可使用设备管理器 (Device Manager) 查找 COM 端口号。

如果在下拉菜单中未显示 COM 端口号, 请按下刷新按钮重新扫描 COM 端口。

选择正确的 COM 端口之后, 单击开始 (Start) 按钮, 开始更新图形、环境数据以及外壳按钮图形。该步骤还会启用 USB 固件更新功能。

5.3.3 图形显示

使用图形显示下拉菜单来选择需要在图形上显示的数据。有五个选项可供选择: 向下 (Down) 按钮, 向上 (Up) 按钮, 大 (Big) 按钮, 小 (Small) 按钮, 以及向下/向上 (Down/Up) 按钮。

黑色实线表示 LDC 数据输出。红线表示按钮按压检测的阈值。如果 LDC 数据输出超过阈值, 便检测到按钮按压操作。

MSP430 每秒会发出 16 个样本。y 轴的值会根据所接收的数据动态增大。

5.3.4 温度和相对湿度数据

系统信息下显示来自 HDC1000 器件的温度和相对湿度数据。

5.3.5 外壳按钮图形

当检测到按钮按压操作时，按钮会变为红色。

5.3.6 固件升级

GUI 能够使用 USB 引导加载程序 (BSL) 升级 MSP430 固件。若要开始升级固件，可运行工具 (Tools) > 刷新固件 (Flash Firmware)。

1. TIDA-00314_GUI 会通知 MSP430 进入 BSL 模式。
2. MSP430 等待三秒钟。在此期间，TIDA-00314_GUI 会处理剩余的所有数据，然后关闭 COM 端口。
3. 三秒等待时间结束后，MSP430 会禁用 USB 外设，然后进入 BSL 模式。
4. BSL 开始后，MSP430 USB 会注册为一个 HID 设备 (VID/PID = 0x2047/0x0200)。
5. TIDA-00314_GUI 会启动固件升级 (Firmware Upgrade) 工具。

要升级固件，请按以下步骤进行操作：

1. 单击浏览 (Browse)，然后打开固件文件 (TI-TXT 格式)。
2. 等待系统检测 BSL 器件。
3. 如果检测到 BSL 器件，并已指定对应文件，则会启用更新 (Update) 按钮。
4. 单击更新 (Update) 按钮。
5. 更新过程大约需要五秒钟才能完成。
6. 更新完毕后，日志窗口会显示“未找到 BSL 器件 (No devices in BSL found)”，因为应用程序已经用新固件重新启动，并且注册为 COM 设备。
7. 关闭固件升级 (Firmware Upgrade) 工具。
8. 选择 COM 端口并单击启动 (Start)。

5.3.7 固件配置设置

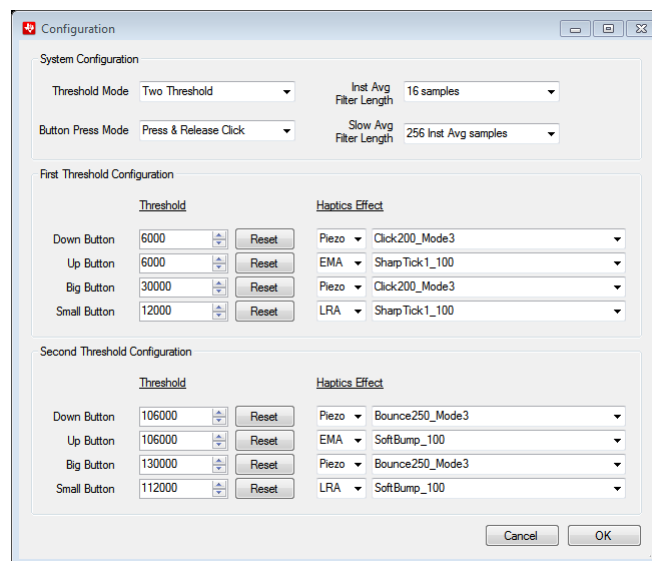


图 17. 固件配置

固件可通过 GUI 进行远程配置。 仅在用户想要更改固件的默认设置时，才需要配置固件。

注： 硬件重启后，配置并不会保存。 重启硬件会将固件恢复为默认值。

下文表 3 和表 4 介绍了多种固件配置。

表 3. 系统配置

系统配置	说明	参数
阈值模式 (Threshold mode)	配置用于检测的阈值数字	有效选项：一个阈值 (one threshold)，两个阈值 (two threshold) 默认设置：一个阈值 (one threshold)
按钮按压模式 (Button press mode)	配置按钮按压过程中何时使用触觉功能	单击按压 (Press)：触觉仅感知向下按压 单击按压和释放 (Press & release)：触觉既可感知向下按压，也能感知向上释放 (默认)。
瞬时平均滤波长度 (Inst avg filter length)	更改瞬时平均滤波器的样本数量	有效选项：1、2、4、8、16、32、64、128 和 256 个样本 默认设置：16 个样本 (16 samples)
缓慢平均滤波长度 (Slow avg filter length)	更改缓慢平均滤波器的样本数量	有效选项：1、2、4、8、16、32、64、128 和 256 个瞬时均值样本 默认设置：256 个瞬时均值样本 (256 instant average samples)

表 4. 阈值配置

阈值配置	说明	参数
第一阈值	更改用于按钮检测的第一个阈值	有效选项：1 至 999,999 按下复位按钮可恢复默认设置 向下按钮：6,000 向上按钮：6,000 大按钮：30,000 小按钮：12,000
第二阈值	更改用于按钮检测的第二个阈值	有效选项：(第一阈值) 至 999,999 第二阈值必须始终高于第一阈值。按下复位按钮可恢复默认设置。 向下按钮：106,000 向上按钮：106,000 大按钮：130,000 小按钮：112,000
触觉效果	第一个下拉菜单选择致动器 第二个下拉菜单选择波形	有效致动器：LRA、ERM 和压电致动器 有效波形列于下拉菜单中

6 测试数据

注： 除非另有说明，否则后续章节中的测试数据均是系统在室温下测得的数据。本节所有测量结果都是使用校准过的实验设备测得的。

6.1 概述

TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的特点在于同时具备多种用途（按钮按压、触觉和功耗性能）并且能够抵抗环境变化和电磁干扰 (EMI)。

测试结果和测量特性在后文介绍。LDC1614 器件输出数据的所有图表均通过传输到外部 PC 的 UART 输出流生成。使用 Microsoft Excel® 对数据执行格式化和分析。

6.2 触摸金属按钮按压性能

6.2.1 相邻按钮按压性能

TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的主要目标在于以高分辨率检测金属表面的按压操作。本设计的重要特性在于排除了相邻按钮按压的机械串扰。换言之，因为可按压表面是连续的金属片，下方具有多个按钮传感器，每个按钮传感器可以检测到相邻按钮按压所产生的电感变化。本 TI 参加设计必须能够区分由于相邻按钮被按下而产生的错误按压信号。

为确定该 TI 参加设计排除按下相邻按钮干扰的性能如何，在大约 13 秒的时间内执行按钮按压的测试序列。表 5 显示所执行的事件序列；按下两次“向下”按钮，然后按下两次“向上”按钮，以此类推。

表 5. 相邻按钮按压测试序列

事件编号	事件说明
1	按下向下按钮
2	按下向下按钮
3	按下向上按钮
4	按下向上按钮
5	按下大按钮
6	按下大按钮
7	按下小按钮
8	按下小按钮

在按钮按压测试过程中，会记录下 LDC1614 器件全部四个通道的输出数据，每个事件都会在图 18、图 19、图 20、和图 21 中标出。

以下四幅图都显示了缓慢移动平均值阈值，该阈值用于确定是否检测到按钮按压操作。

在所有图中，图例中标记为“ChX 按钮按下？”(ChX Button Press?) 的蓝色点指示是否检测到按钮按压操作，数值 1 表示按钮被按压，而数值 0 则表示未检测到按钮按压操作。

这四幅图都显示出，当相邻按钮被按下时，LDC1614 的灵敏度足以记录该变化。然而，LDC1614 器件具备足够的分辨率和灵敏度，能够区分相邻按钮按压操作和实际按钮按压操作。

例如，在显示 LDC1614 Ch0 数据的图 18 中，本 TI 参加设计正确地记录了事件 1 和 2 对应的“向下”按钮按压操作，但并没有记录下其它事件对应的按钮按压操作，因为它们并未超过阈值。参考前文的表 5，可以看出事件 1 和事件 2 表示“向下”按钮的按压操作。

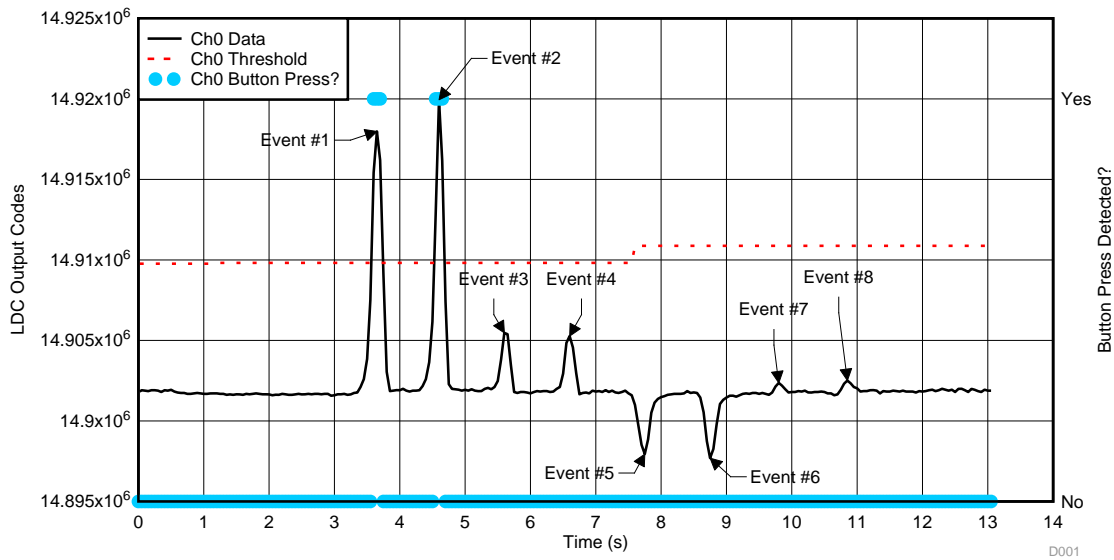


图 18. LDC Ch0 数据 – 向下按钮通道

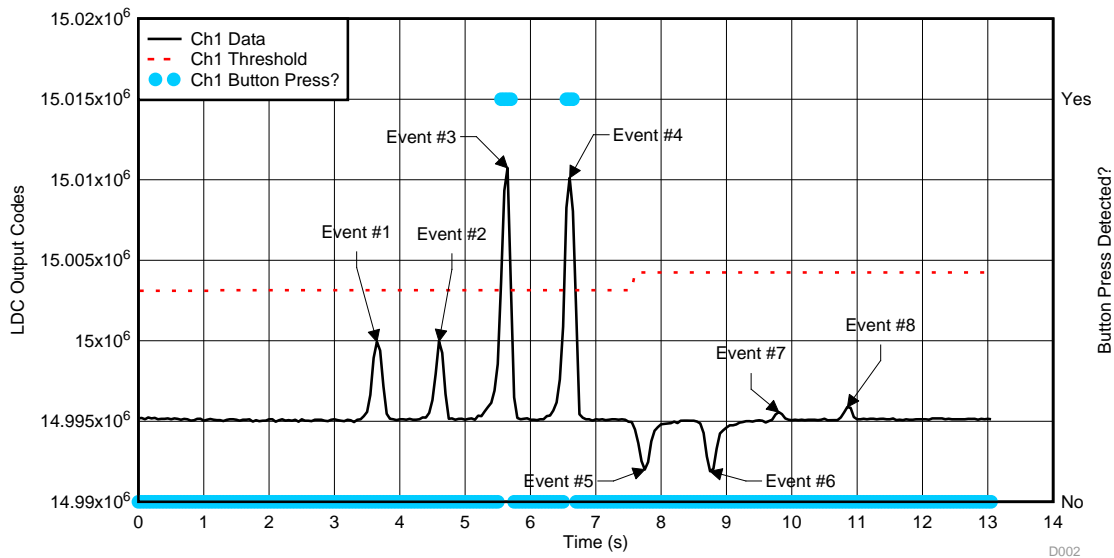


图 19. LDC Ch1 数据—向上按钮通道

外壳的机械设计可以确保“向下”按钮和“向上”按钮存在明显的机械耦合。因此，最坏的情况是这两个按钮之间出现机械串扰。然而，图 18 和图 19 表明，LDC1614 器件的分辨率和灵敏度足以区分“向上”和“向下”按钮的按压操作。

图 20 所示为 LDC1614 器件大按钮通道上仅有细微的机械串扰，这得益于多个因素。第一个因素是，“大”按钮通道中的传感器线圈远远大于另外三个通道，这有助于提高该通道的灵敏度。第二个因素是，“大”按钮传感器线圈处于机械外壳的一端，这有助于减缓实际的机械联动。

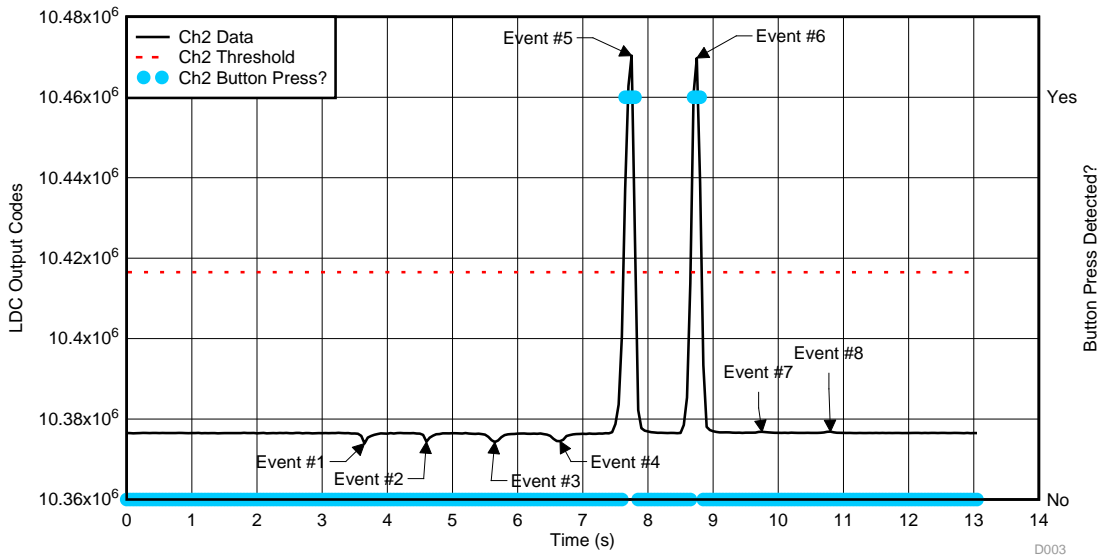


图 20. LDC Ch2 数据—大按钮通道

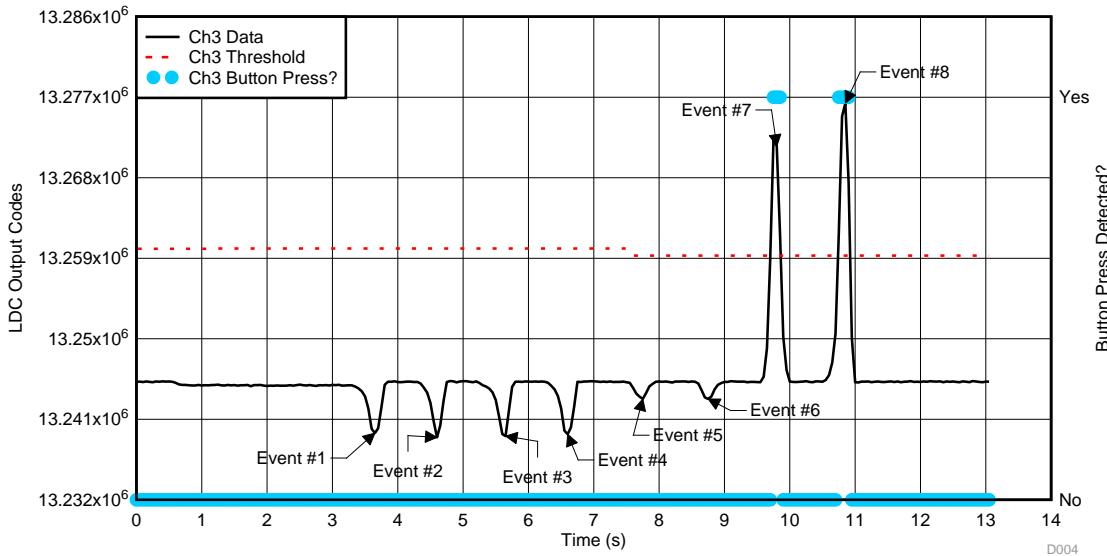


图 21. LDC Ch3 数据—小按钮通道

前文四幅图中，有几幅图显示执行测试序列的过程中 ChX 阈值稍微移动了位置。这种移动是因为实际按钮按压操作对缓慢移动平均值算法产生了影响。正如编程设计，如果按钮保持按压的时间大于缓慢移动平均值阈值的更新率，那么不会记录按钮的按压动作，因为缓慢移动平均值会调整至新的“恒定”值。该功能旨在消除因金属形变（比如，锤击金属表面）而造成按钮“卡住”的情况。如果终端系统无需该功能，可以轻松调整算法和固件逻辑以适应其它情况。

另外，LDC1614 器件的多个数据输出通道在许多事件中呈现出负峰值。这是由于机械外壳朝远离传感器而非朝向传感器的方向发生形变所引起的。与实际的按钮按压事件相比，这些负峰值的幅度并不算大，所以 ChX 阈值并不会大幅移动。

6.2.2 LDC1614 性能基准

LDC1614 器件输出表征 LC 传感器振荡电路振荡频率的数据。为检测金属表面的按钮按压操作，仅需获取此振荡频率的相对变化即可。因此，系统的关键性能参数是，与按钮按下所引起的 LDC1614 输出代码的变化相比的基准噪声水平。此参数实际上是系统的信噪比 (SNR)。表 6 汇总了测得的噪声、因按钮按下而引起的代码变化以及计算所得的信噪比（以分贝为单位）。表 6 中的数据来源于 TI 参考设计中的一个硬件单元。

表 6. 系统信噪比汇总

LDC1614 通道	基准噪声（峰峰值代码）	因按钮按下而产生的代码变化	信噪比 (dB)
0	202	24111	41.5
1	315	21486	36.7
2	276	80119	49.3
3	209	23274	40.9

如表 6 所示，LDC1614 所有四个通道的噪声级别大致相当。信噪比数据的主要差异在于，LDC1614 Ch2 因按钮按下而产生的代码变化大大增加。该数值远高于其它值的原因在于，“大”按钮通道的线圈尺寸远远大于其它三个按钮的传感器线圈尺寸，同时与金属目标的距离与其它三个按钮相同。因此对于“大”按钮来说，间隙与线圈直径之比非常小，从而灵敏度也远远高于其它三个按钮。

在本系统中，LDC1614 的全部四个通道都会按顺序测量。图 22 显示了测量顺序，首先读取 Ch0，然后读取 Ch1、Ch2 和 Ch3。测量全部四个通道后，重复执行此顺序。每次采集全部四个通道的数据大约需要花费 3.1ms，因此整体采样率为 325Hz。

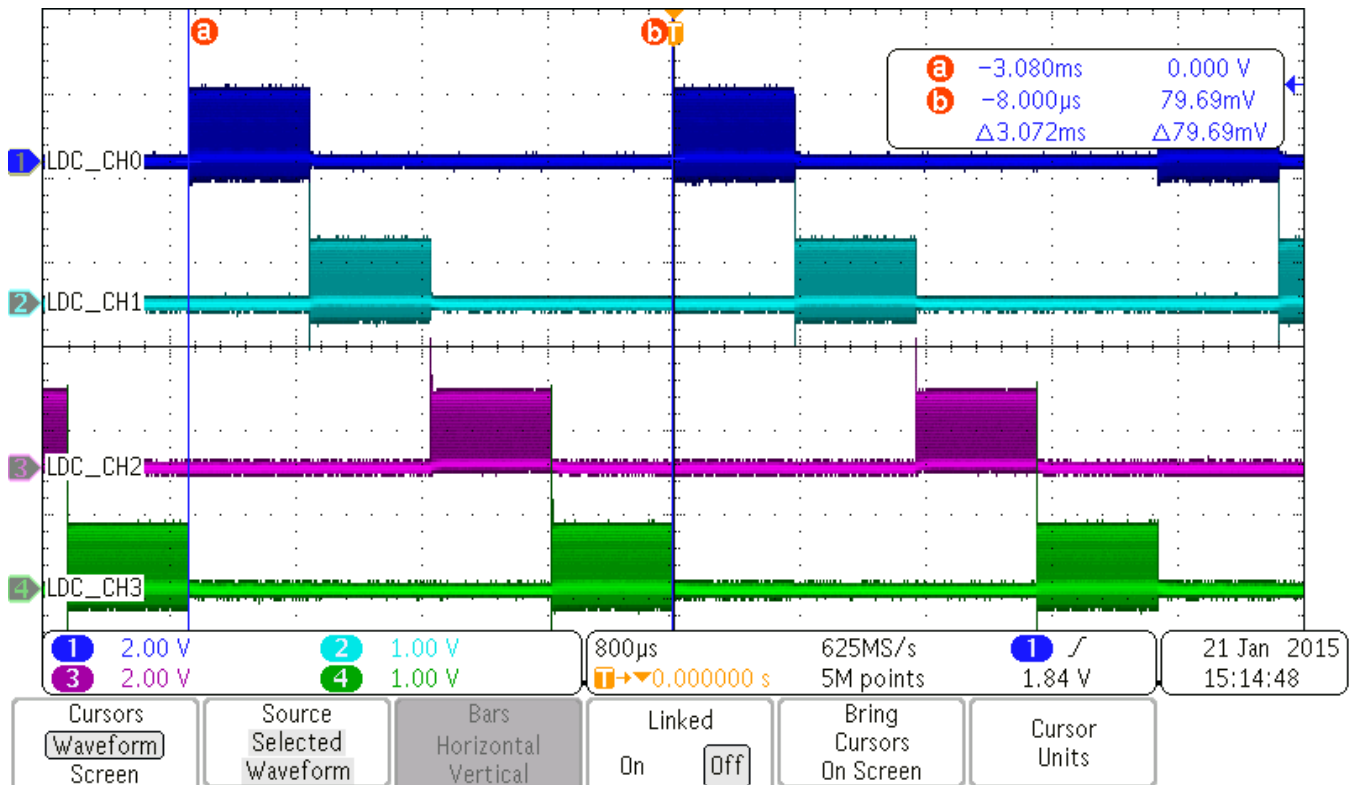


图 22. LDC1614 测量顺序

如 4.1 节 触摸金属按钮按压检测设计注意事项所述，LC 振荡电路的基准谐振频率需要处于 LDC1614 器件运行参数范围内（1kHz 至 10MHz）。表 7 汇总了全部四个传感器线圈的谐振频率。由于“向上”和“向下”按钮线圈尺寸完全相同，测量结果表明谐振频率也相同，不过由于并联电容不同以及传感器线圈本身的制造公差而稍有差异。图 23、图 24、图 25 和图 26 显示了所有四个传感器线圈的波形。

表 7. 传感器线圈谐振频率汇总

LDC1614 通道	对应按钮名称	测得的谐振频率 (MHz)
0	向下按钮	9.8
1	向上按钮	9.9
2	大按钮	1.8
3	小按钮	9.4

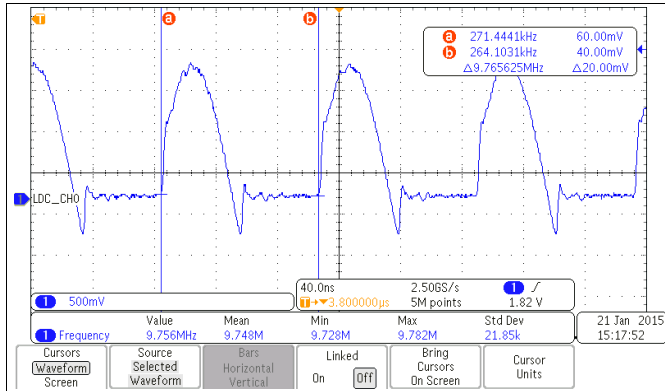


图 23. LC 振荡电路基准谐振频率—Ch0 (向下按钮)

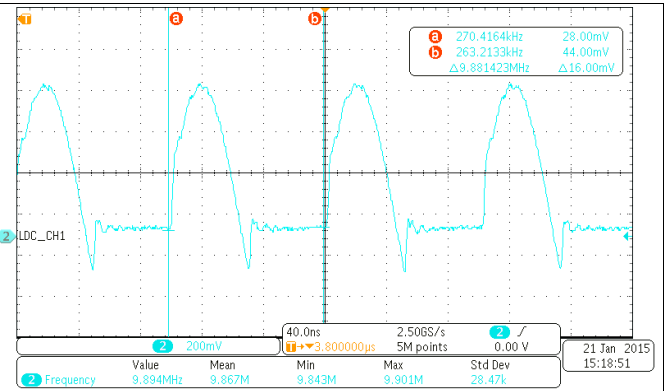


图 24. LC 振荡电路基准谐振频率—Ch1 (向上按钮)

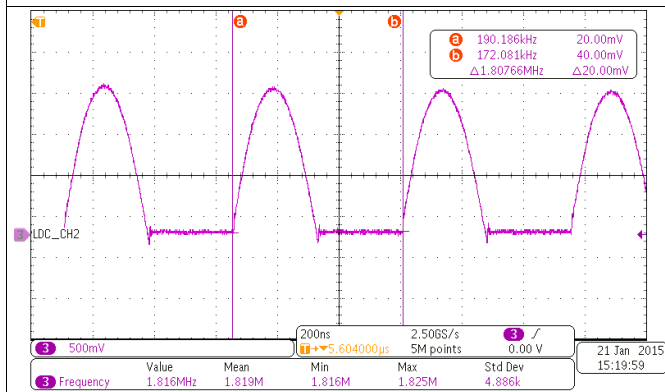


图 25. LC 振荡电路基准谐振频率—Ch2 (大按钮)

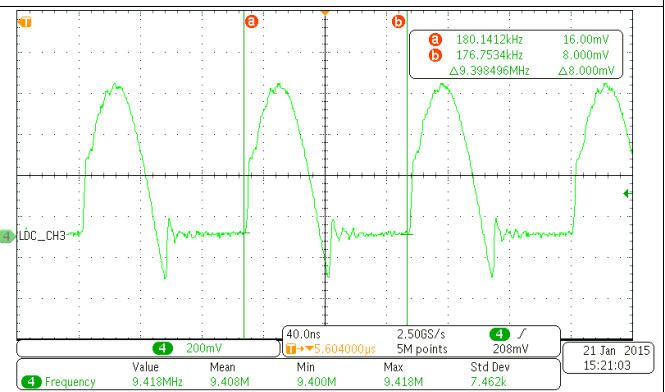


图 26. LC 振荡电路基准谐振频率—Ch3 (小按钮)

6.3 触觉性能

由于 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的主要用途是检测金属表面的按钮按压操作，然后向用户提供触觉反馈，触觉反馈不能对按钮按压操作的判定产生影响，这一点至关重要。因此，在本测试设置中，当分别激活三个可用的触觉致动器时，会记录下 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据。将每种致动器均设置为每秒约工作一次。

触觉功能对 LDC1614 器件测量结果造成影响的唯一情况是压电致动器。压电致动器在物理布局上靠近“大”按钮传感器线圈，而且“大”按钮传感器线圈是所有四个传感器线圈中尺寸最大的线圈（因此灵敏度最高），所以会对 LDC1614 Ch2 的读数产生一些影响。不过，如图 29 所示，由于压电致动器激活而导致的偏移仅为 2000 个代码，而远远低于大按钮传感器通道 40000 个代码的阈值。图 29 中标出的各事件都表示激活压电致动器。显而易见，与触发按钮按压操作相比，激活压电致动器的影响非常明显。此外，激活压电致动器会导致 LDC1614 器件输出朝负方向移动，从而远离按钮按压检测阈值。

在显示激活 ERM 或 LRA 致动器期间工作情况的图中，未标记任何事件，因为在 LDC1614 输出数据中未产生可识别的影响。

所有其它通道都基本不会受到压电致动器的影响，且所有通道都基本不会受到 ERM 和 LRA 致动器的影响。

表 8 汇总了所有三个触觉致动器工作过程中的噪声级别。

表 8. 触觉致动器工作期间的 LDC1614 噪声汇总

通道	压电致动器激活期间的噪声（峰峰值代码）	ERM 致动器激活期间的噪声（峰峰值代码）	LRA 致动器激活期间的噪声（峰峰值代码）	因按钮按下而产生的代码变化
0	256	114	256	24111
1	310	252	176	21486
2	2407	218	222	80119
3	229	260	190	23274

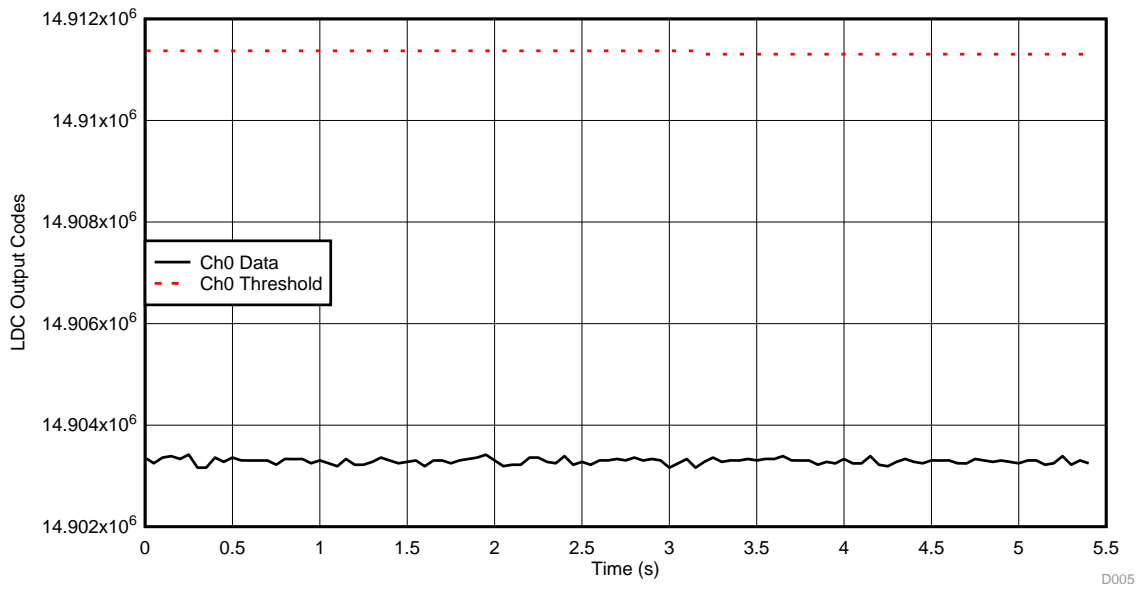


图 27. 压电致动器激活期间的 LDC Ch0 数据—向下按钮通道

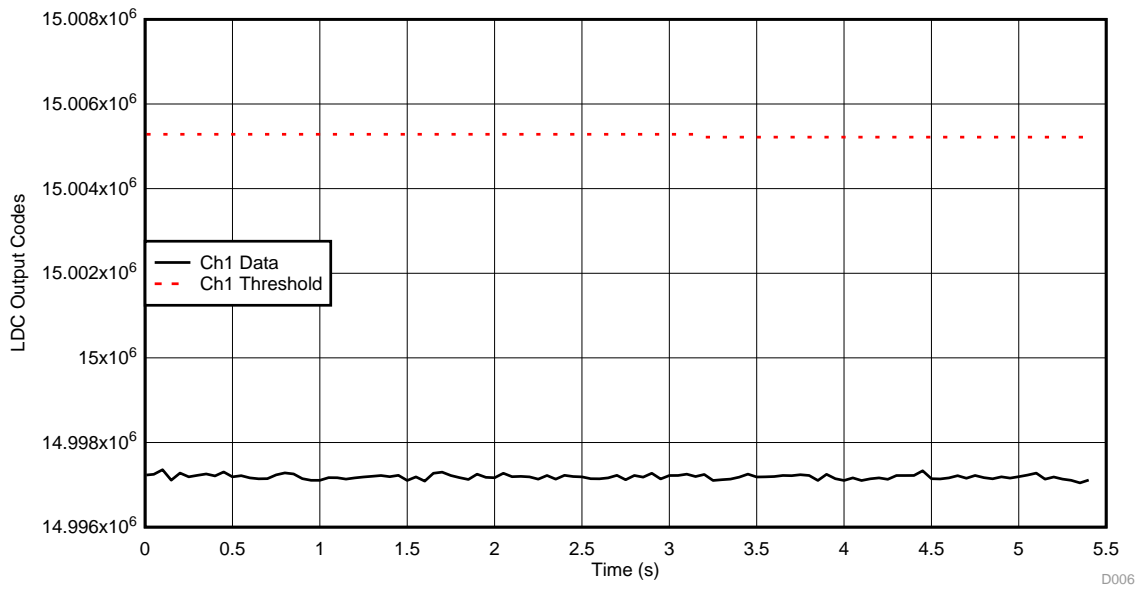


图 28. 压电致动器激活期间的 LDC Ch1 数据—向上按钮通道

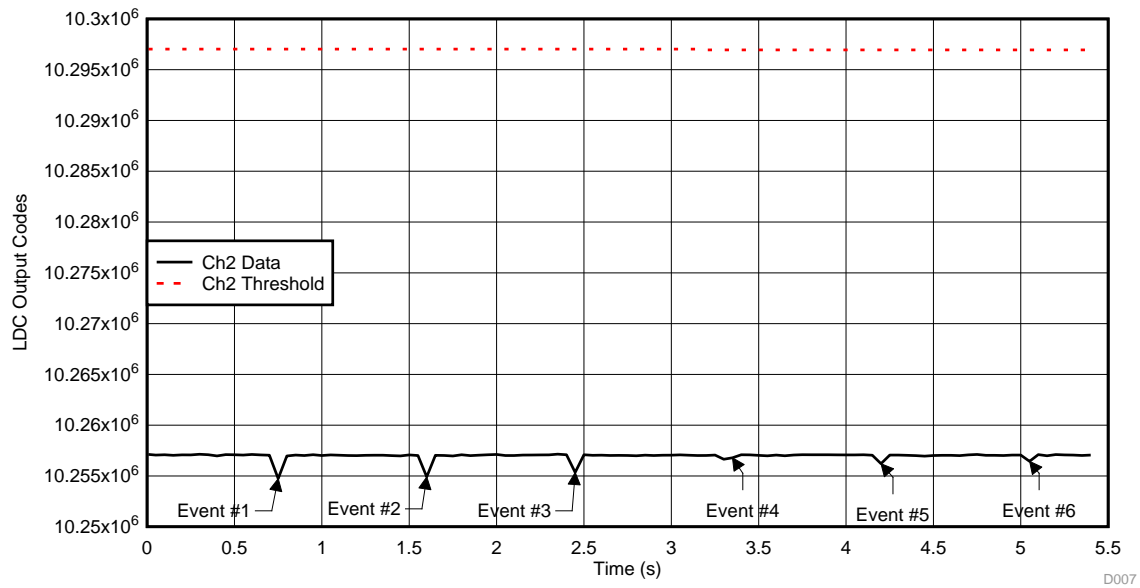


图 29. 压电致动器激活期间的 LDC Ch2 数据—大按钮通道

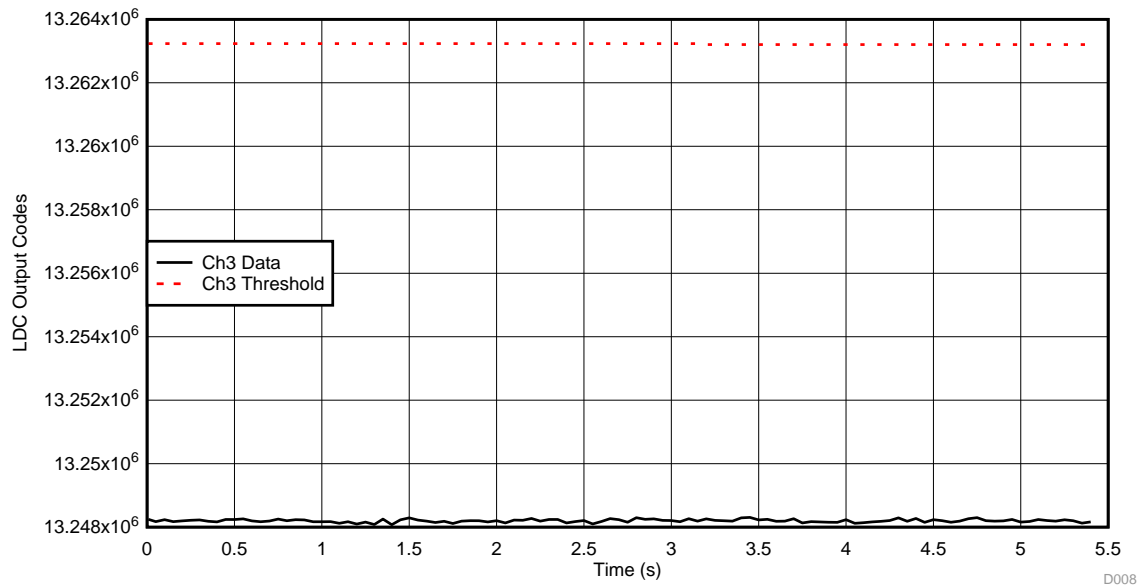


图 30. 压电致动器激活期间的 LDC Ch3 数据—小按钮通道

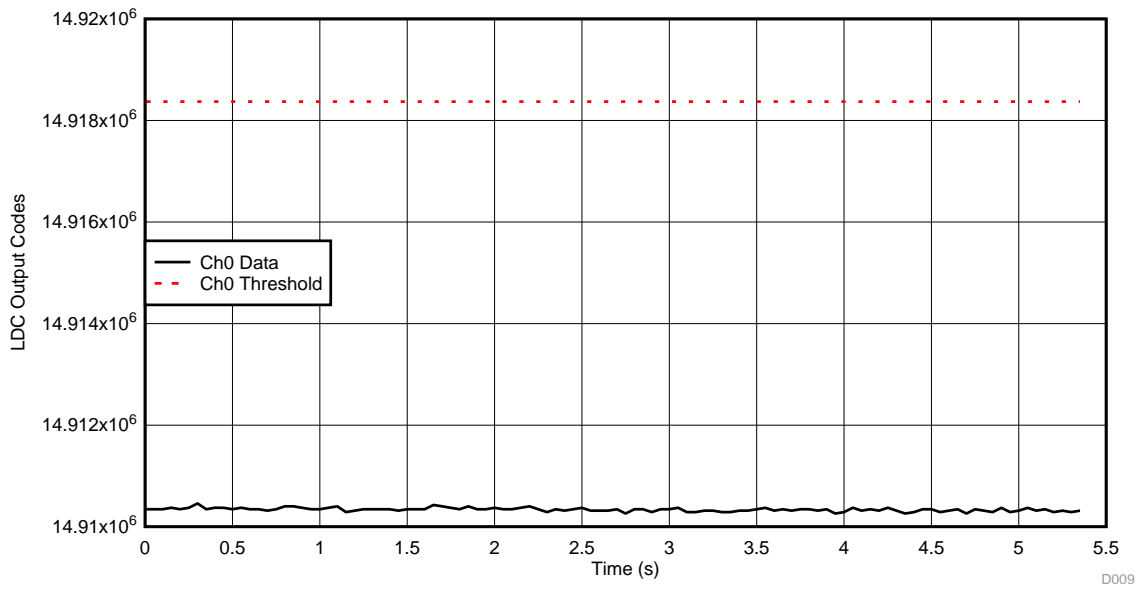


图 31. ERM 致动器激活期间的 LDC Ch0 数据—向下按钮通道

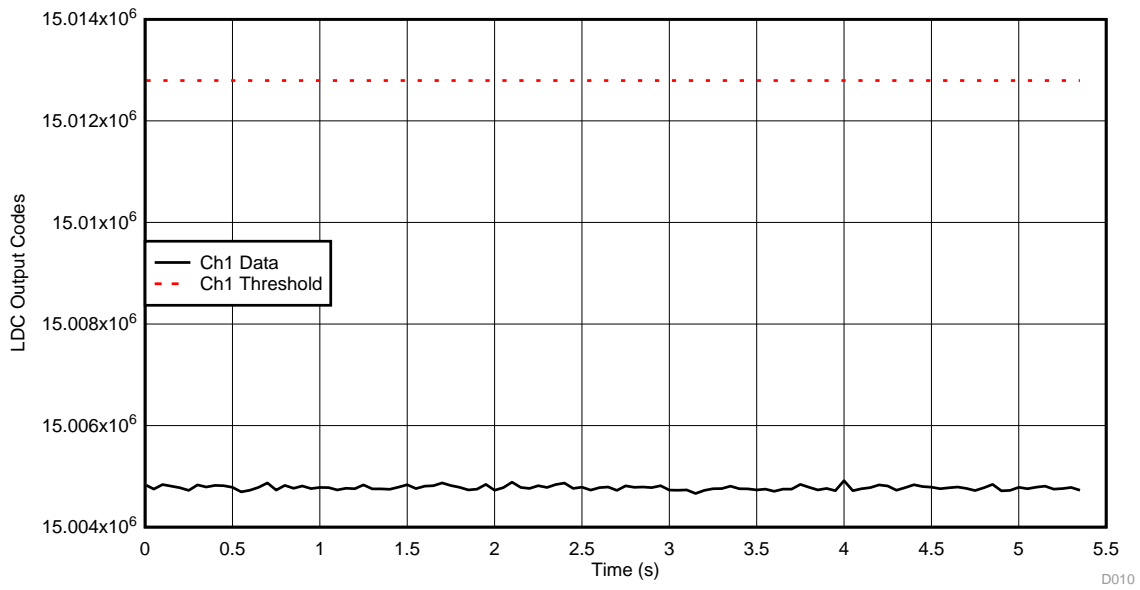


图 32. ERM 致动器激活期间的 LDC Ch1 数据—向上按钮通道

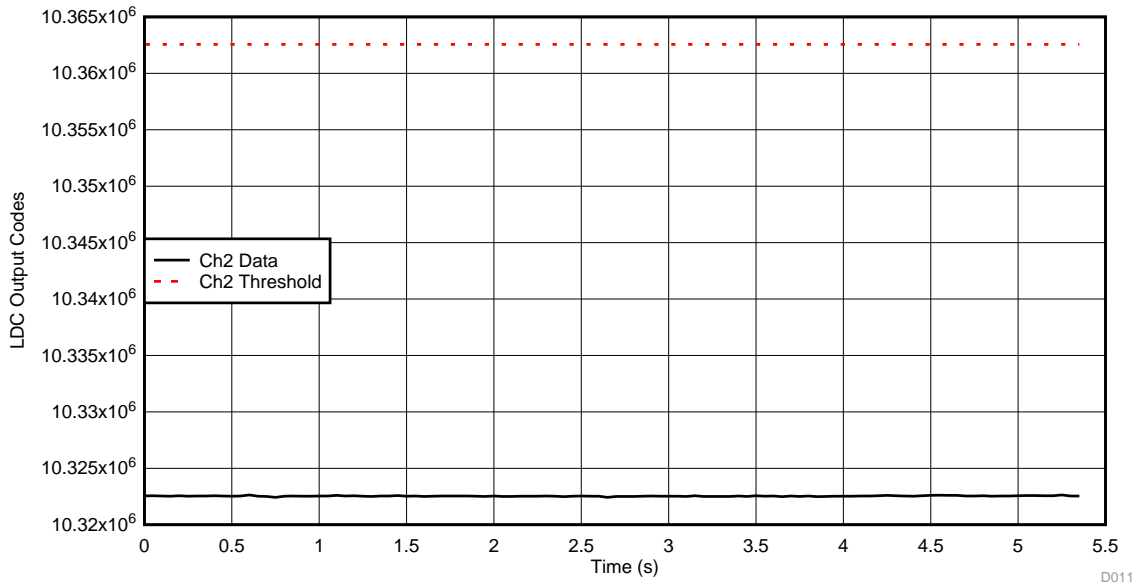


图 33. ERM 致动器激活期间的 LDC Ch2 数据—大按钮通道

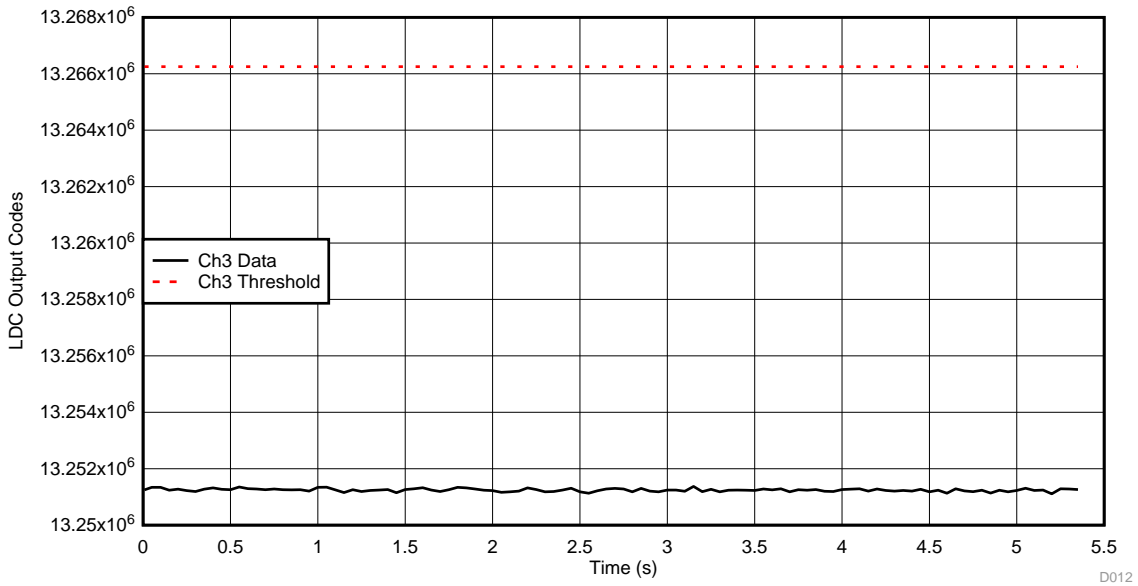


图 34. ERM 致动器激活期间的 LDC Ch3 数据—小按钮通道

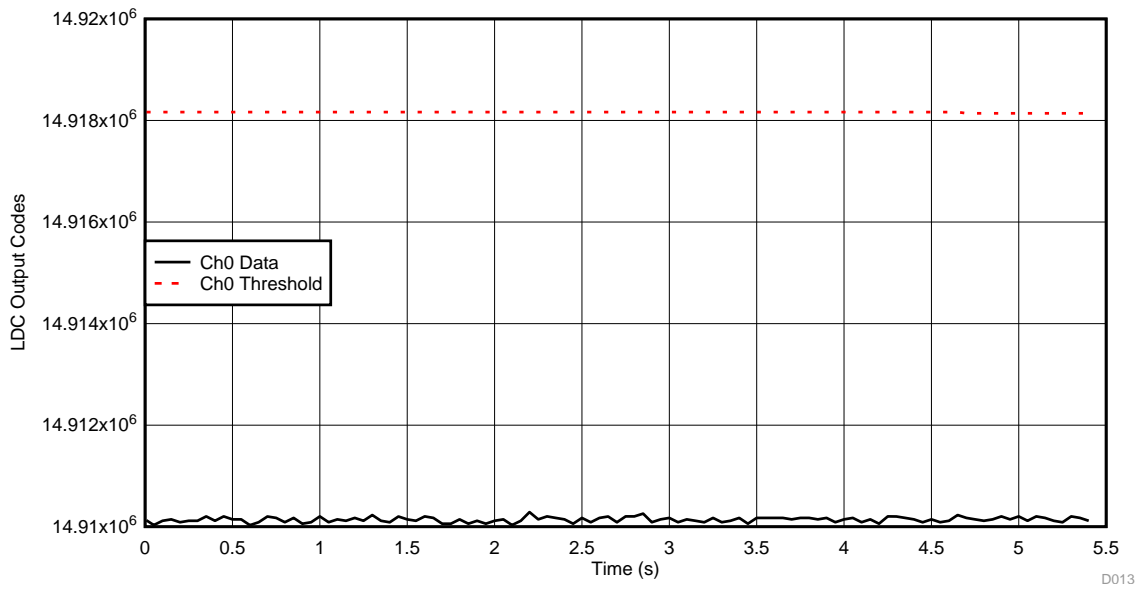


图 35. LRA 致动器激活期间的 LDC Ch0 数据—向下按钮通道

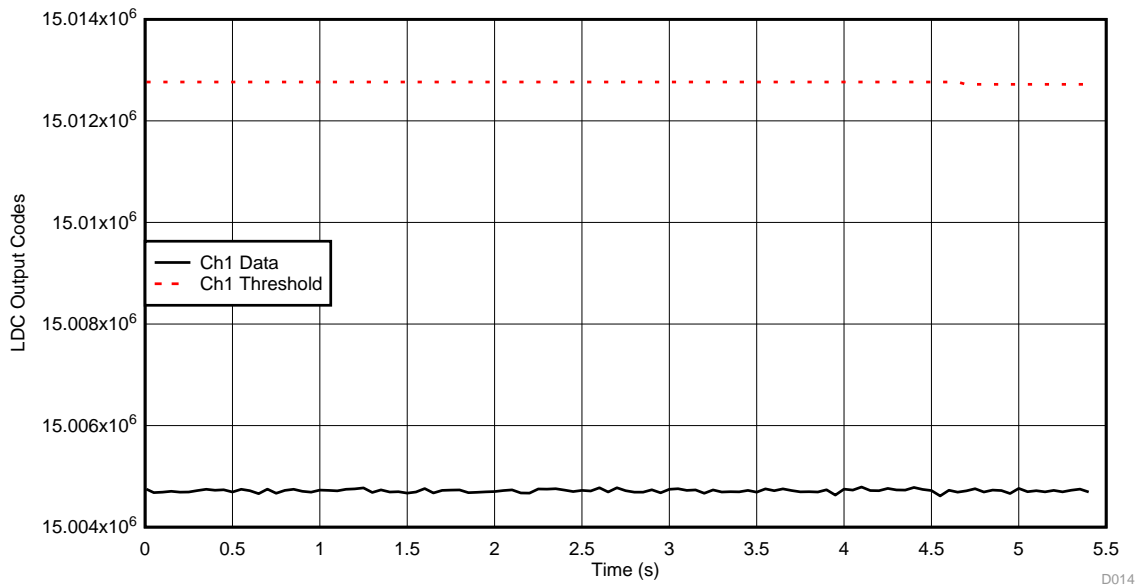


图 36. LRA 致动器激活期间的 LDC Ch1 数据—向上按钮通道

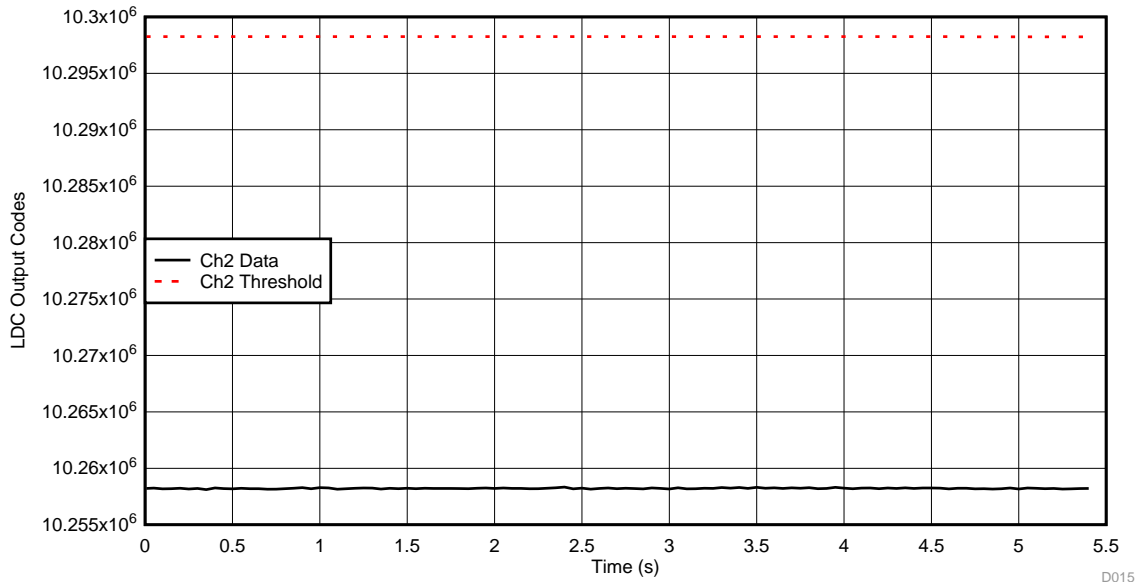


图 37. LRA 致动器激活期间的 LDC Ch2 数据—大按钮通道

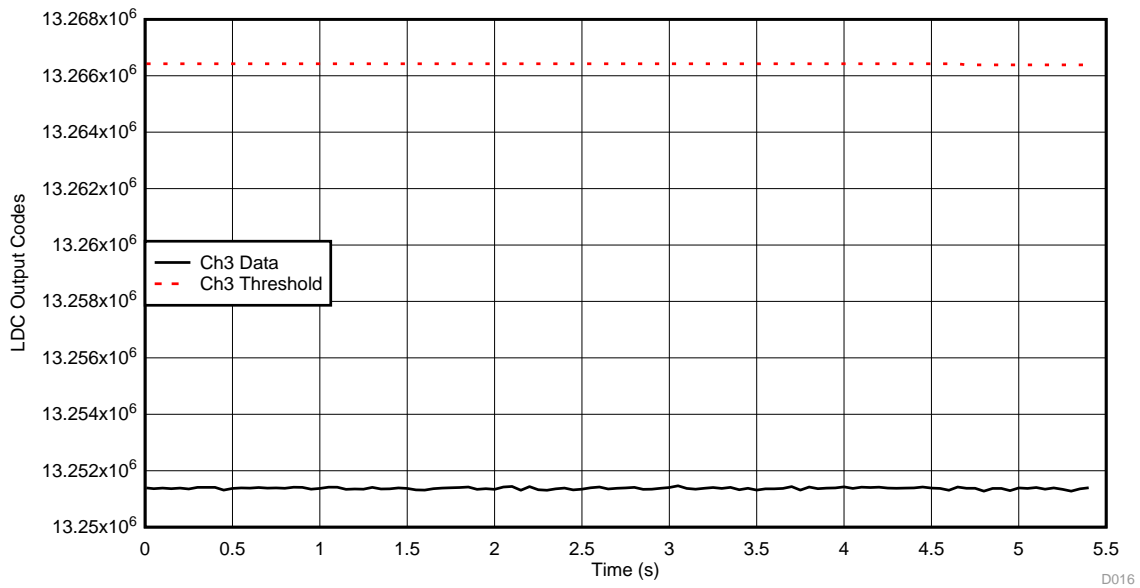


图 38. LRA 致动器激活期间的 LDC Ch3 数据—小按钮通道

6.4 电流消耗

在最终用户系统中集成 IT 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮时，其中一项主要设计注意事项为系统整体的电流消耗。由于存在多种不同的工作模式，已采集测试数据，以显示以各个模式工作期间系统整体的电流消耗。

工作模式包括 LDC1614 测量（默认模式，通常连续发生）模式、压电致动器工作模式、ERM 致动器工作模式以及 LRA 致动器工作模式。图 39、图 40、图 41 和图 42 显示了相应工作模式期间 VBUS 输入（来自 USB 的 5V）、VBUS_FLT（EMI 保护电路后的 5V）、

3V3（LP5907 器件的 3.3V 输出）以及 I_VBUS（系统输入端的电流）。表 9 汇总了这四种工作模式所消耗的电流。绝大多数的情况下，系统都以 LDC1614 测量模式运行，这是一种连续运行模式。触觉致动器的其它三种工作模式仅在检测到按钮按压操作时才会运行。此时，系统平均功耗取决于电量曲线，而这根据最终用户系统的预期而有所不同。

HDC1000 器件工作期间的电流与 LDC1614 器件以测量模式工作相比并不大。这是由于 HDC1000 器件已设置为每秒仅测量一次，以此速率测量时，平均电源电流约为 1.2 μA ，远远低于 IT 设计系统中的其它器件。

表 9. 各工作模式期间系统总体电流消耗汇总

工作模式	I_VBUS 电流消耗 (mA)
LDC1614 测量（默认模式）	8.4（峰值）
压电致动器工作	408（峰值）
ERM 致动器工作	580（峰值）
LRA 致动器工作	216（峰值）

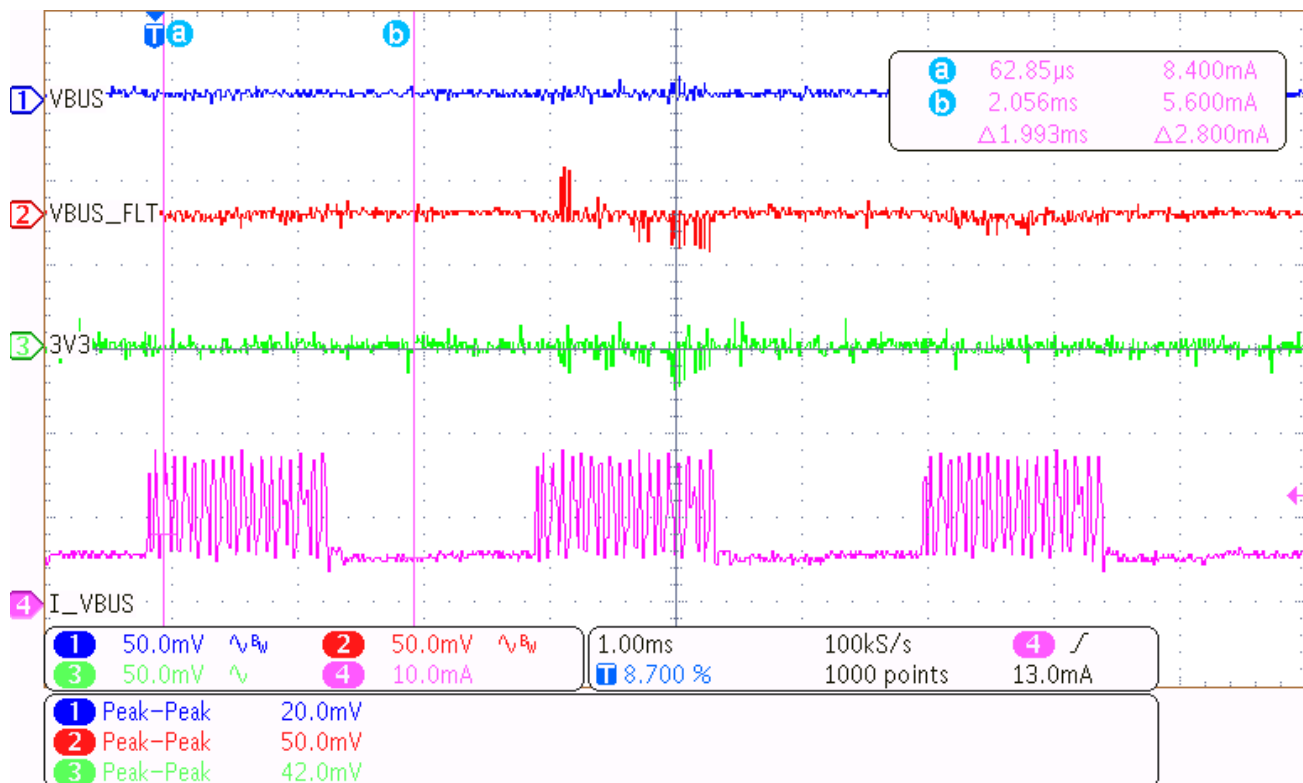


图 39. LDC 测量模式期间的功耗数据

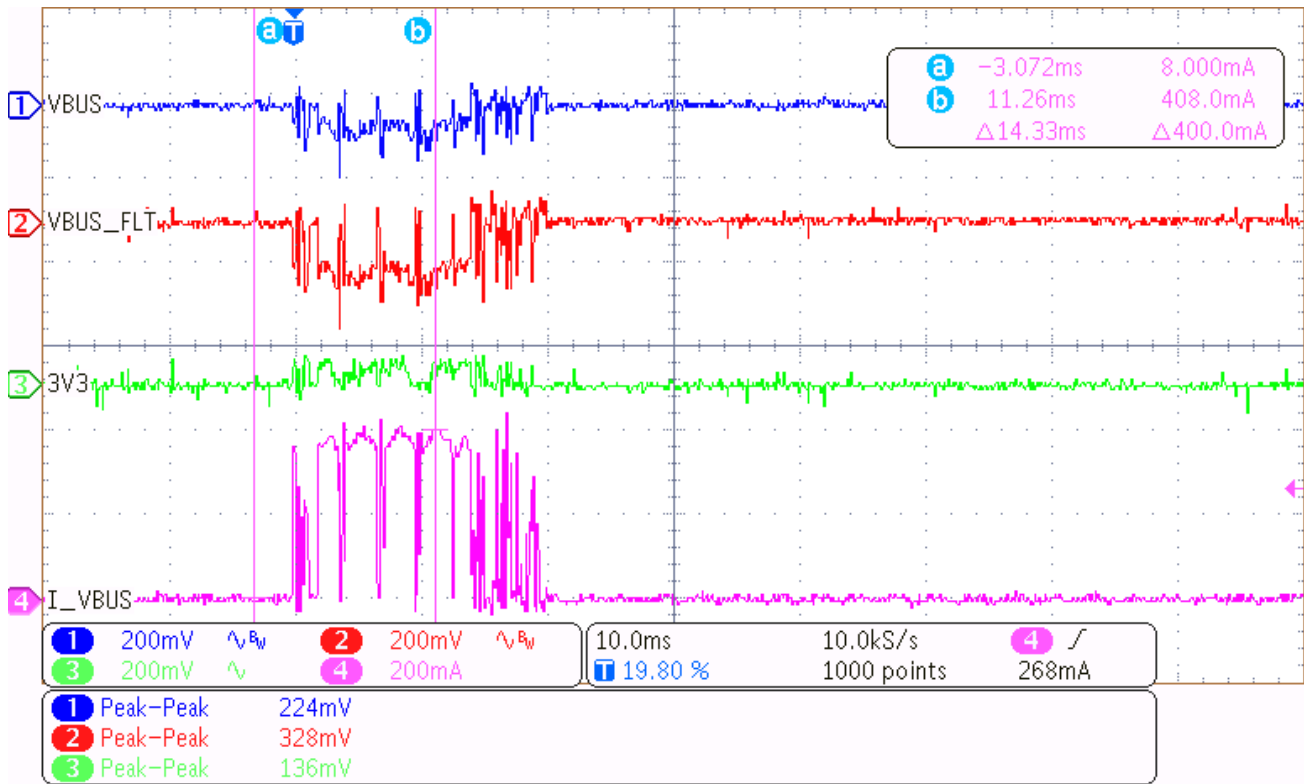


图 40. 压电致动器工作期间的功耗数据

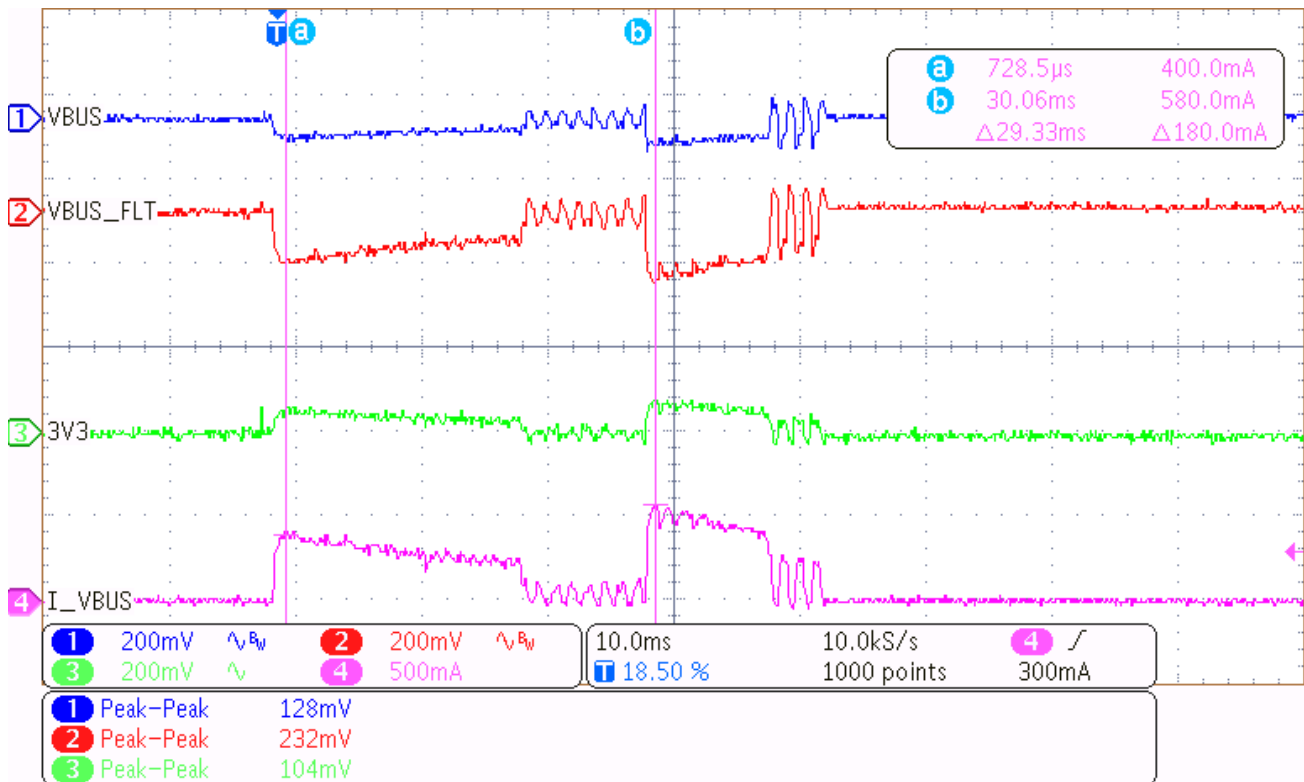


图 41. ERM 致动器工作期间的功耗数据

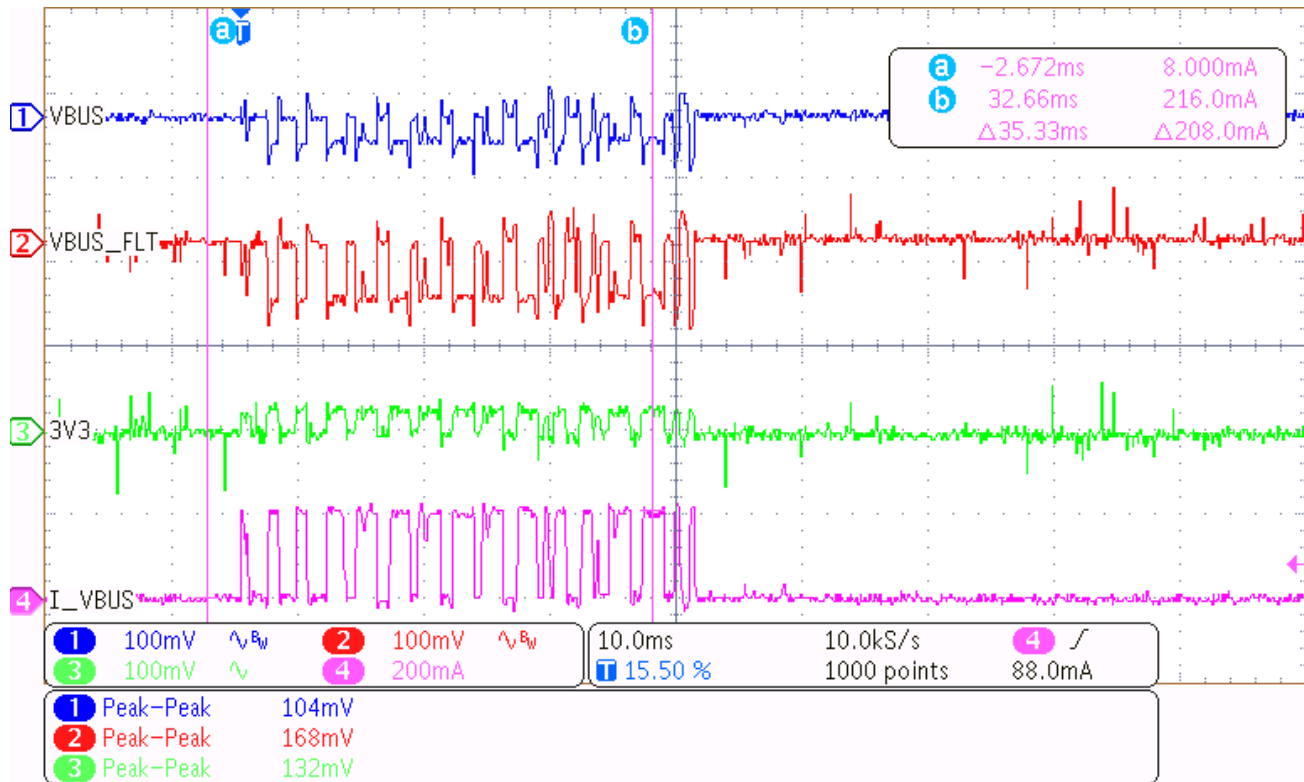


图 42. LRA 致动器工作期间的功耗数据

6.5 水滴特性

确定水滴特性旨在测试 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮在外壳表面覆盖有环境污染物时的性能。

使用滴管在外壳上滴几滴水，同时通过连接至 PC 的 UART 采集调试数据。在水滴测试前、测试过程中或测试后，输出数据未发生任何变化。

这种测试结果很容易解释，因为 LDC1614 的工作方式是生成磁场，且磁场仅穿透铝外壳至特定趋肤深度。
公式 2 的趋肤深度计算如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times f \times \mu}}$$

其中

- δ = 趋肤深度，单位为 m
- ρ = 电阻率，单位为 $\Omega \times m$
- μ = 金属的磁导率，单位为 H/m。

由于外壳由铝制成，公式 3 中的磁导率等于：

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \times 1.000022 = 1.256665 \times 10^{-6} \text{ H/m} \tag{3}$$

此外，20°C 时铝的电阻率等于 28.2 n $\Omega \times m$ 。

由于趋肤深度在工作频率最低时最大，大按钮 L-C 振荡电路的谐振频率（1.8 MHz，请参见表 7）会产生最大的趋肤深度。

因此，此系统中最大趋肤深度为：

$$\delta = \sqrt{\frac{28.2 \times 10^{-9}}{\pi \times 1.8 \times 10^6 \times 1.256665 \times 10^{-6}}} = 629.95\mu\text{m} \quad (4)$$

由于铝外壳厚 1 mm，即使大按钮通道的磁场也无法完全穿透顶部外壳。因此，水滴、灰尘、油脂或任何其它污染物都不会对 LDC1614 测量产生影响，除非污染物的重量足以使铝外壳发生物理形变。

6.6 温度特性

由于 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮依赖 LDC1614 器件输出来确定按钮是否已被按下，必须确定 LDC1614 器件输出在预期工作温度范围内的特性。

为更好地了解 TI 参考设计系统如何响应温度变化，将硬件放在 TestEquity 1007H 温度/湿度试验箱中 (<http://www.testequity.com/products/1104/>)，且电源和 UART 连接端在试验箱外部连接至 PC 以便采集数据，如图 43 所示。将温度设为 25°C 并进行加湿，直到 HDC1000 读数稳定。然后，持续记录 LDC1614 器件输出数据一分钟。将温度以一定增量逐渐升至 70°C，并逐渐降至 -20°C，最终逐渐升至原来的 25°C。



图 43. 温度和相对湿度测试装置

图 44 显示了 LDC1614 器件所有四个通道的输出在测试温度范围内的变化情况。尽管输出确实会随温度发生变化，但变化为线性变化，且在整个测试温度范围内变化小于 $\pm 1\%$ 。

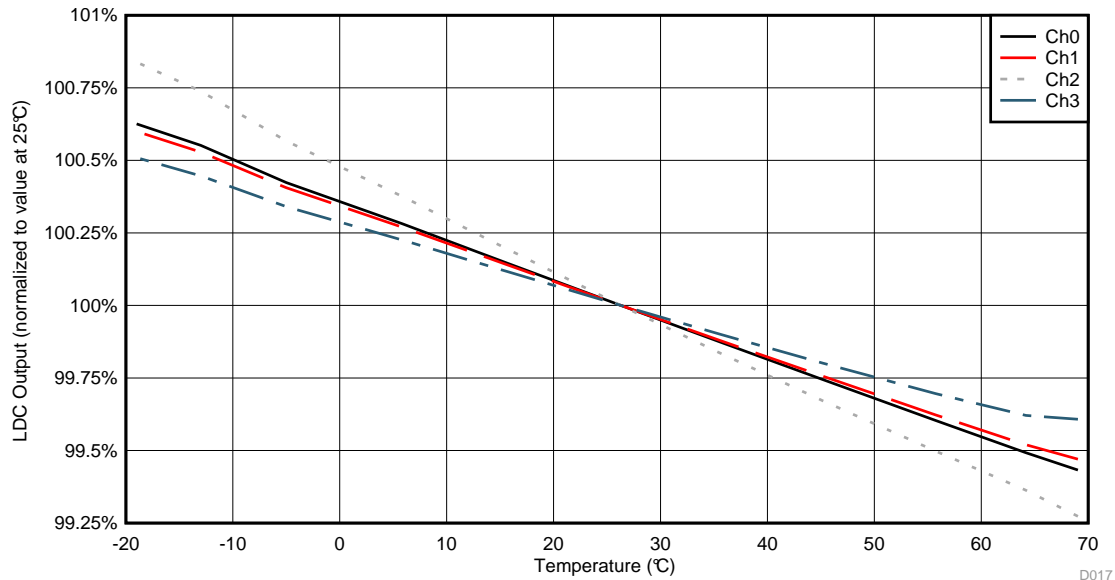


图 44. LDC1614 数据随温度变化曲线 — 所有通道

如 4.3 节 利用固件技术实现环境补偿所述，此 TI 参考设计系统不会实现任何单独的温度补偿，这是因为基于 IIR 滤波器的缓慢移动平均值会应对任何因温度变化而产生的漂移。如果 LDC1614 器件输出的绝对值对最终用户应用至关重要，则需要对温度进行单独补偿，可以通过增益和偏移线性补偿算法补偿，也可以通过查询表算法进行补偿。

为验证基于 IIR 滤波器的缓慢移动平均值固件技术的稳定性，对本 TI 参考设计系统执行了“热冲击”测试。将系统置于 TestEquity 1007H 温度/湿度试验箱中，并将温度设为 -20°C 。系统在此温度下稳定后，尽快将试验箱温度斜升至 70°C ，之后再尽快降回至 -20°C 。图 45、图 46、图 47 和图 48 显示了 LDC1614 器件所有四个通道的以下信息：试验箱温度随时间变化情况、LDC1614 器件输出数据、缓慢移动平均值阈值以及指示是否检测到按钮按压操作的变量。未检测到任何按钮按压操作时，按钮按压检测标志等于 0；检测到按钮按压操作时，检测标志等于 1。仅在 LDC1614 器件输出数据超过缓慢移动平均值阈值时，才会将此检测标志设为 1。

图 45、图 46、图 47 和图 48 显示 LDC1614 器件所有四个通道在整个测试温度范围内均未检测到任何按钮按压操作，证明缓慢移动平均值算法可以成功补偿温度变化。此算法的性能由 ChX 按钮按下？(ChX Button Press?) (蓝点) 数据迹线显示，此线在整个测试过程中均等于 0，表明未检测到错误的按钮按压操作。

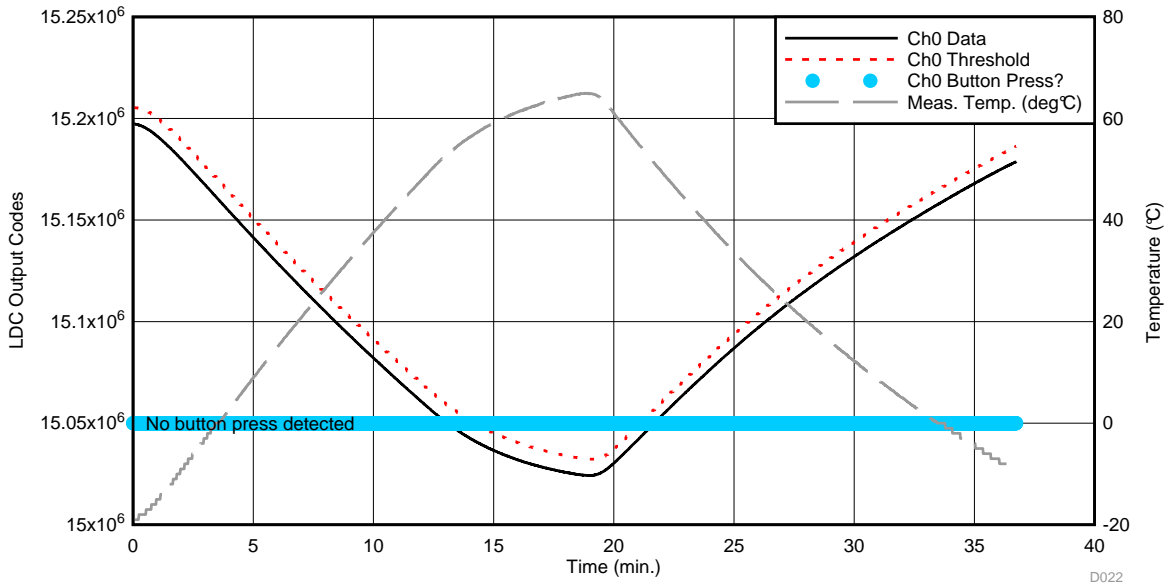


图 45. 热“冲击”测试期间的 LDC Ch0 数据—向下按钮通道

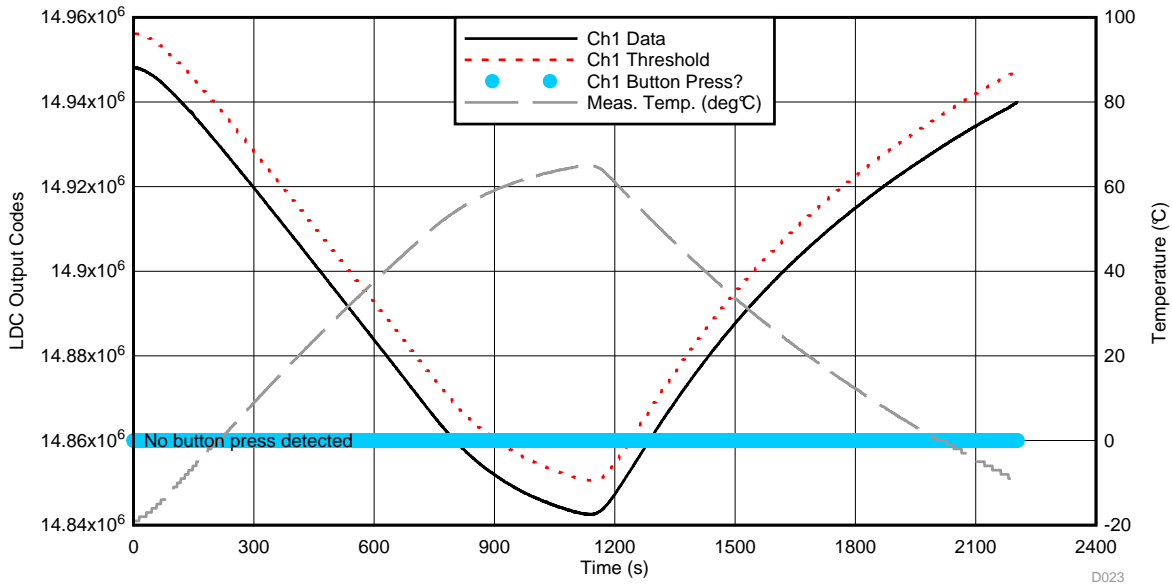


图 46. 热“冲击”测试期间的 LDC Ch1 数据—向上按钮通道

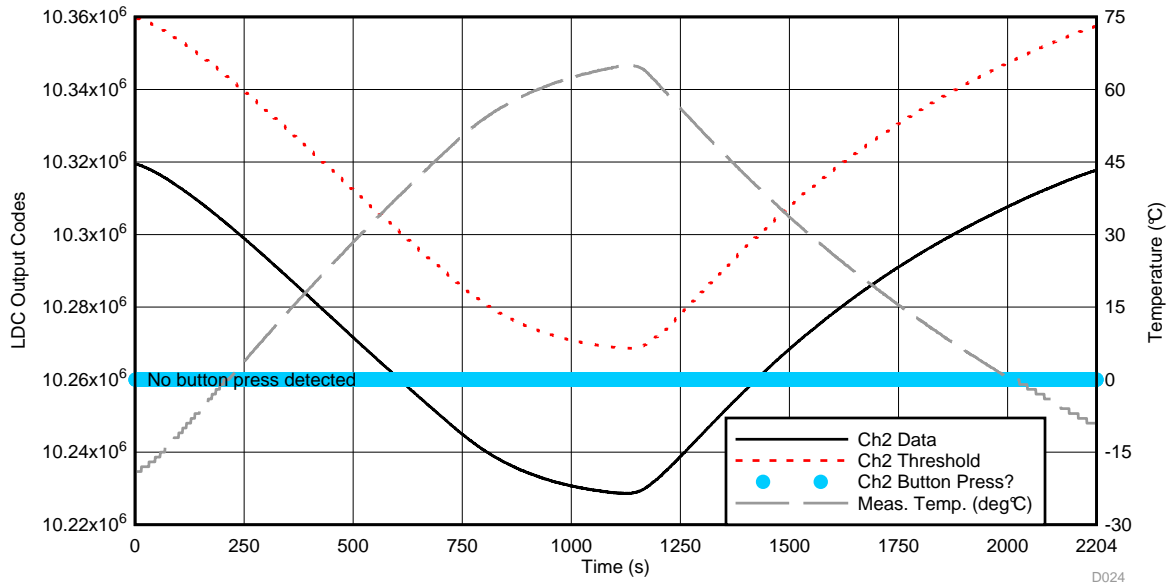


图 47. 热“冲击”测试期间的 LDC Ch2 数据—大按钮通道

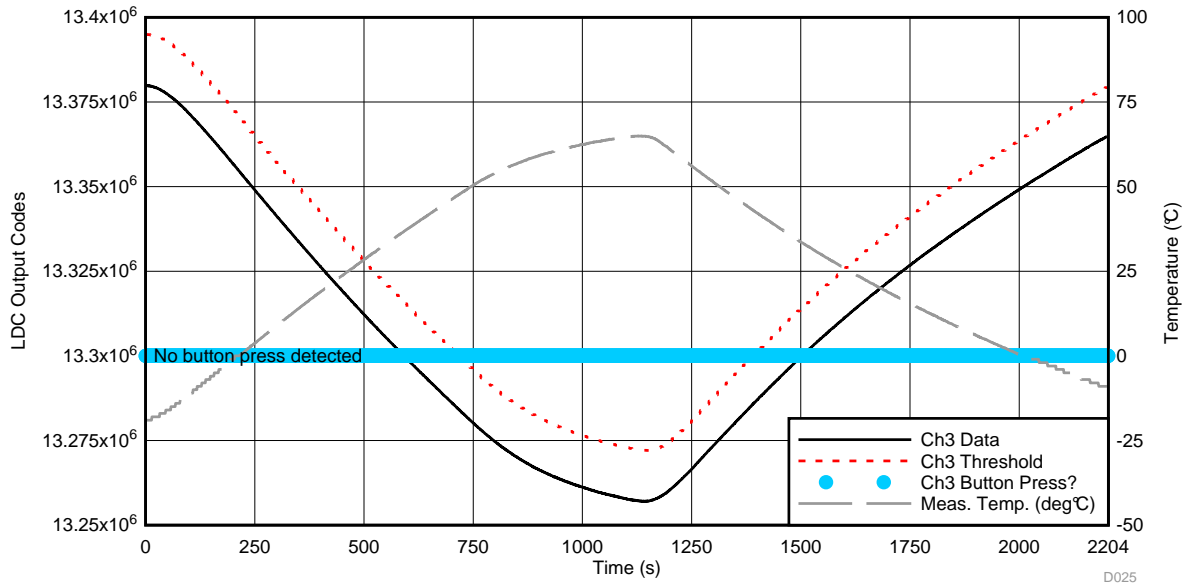


图 48. 热“冲击”测试期间的 LDC Ch3 数据—小按钮通道

6.7 湿度特性

由于 TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮依赖 LDC1614 器件输出来确定按钮是否已被按下，必须确定 LDC1614 器件输出在预期相对湿度范围内的特性。

为更好地了解 TI 参考设计系统如何响应相对湿度变化，将硬件放在 TestEquity 1007H 温度/湿度试验箱中，且电源和 UART 连接端在试验箱外部连接至 PC 以便采集数据，如图 43 所示。将相对湿度设为 20% 并进行加湿，直到 HDC1000 读数稳定。然后，持续记录 LDC1614 器件输出数据一分钟。将相对湿度逐步递增至 80%，然后逐步递减至 20%。

图 49 显示了 LDC1614 器件所有四个通道的输出在测试相对湿度范围内的变化情况。尽管输出确实会随相对湿度发生变化，但变化极小，在整个测试相对湿度范围内变化小于 $\pm 0.05\%$ 。如果 LDC1614 输出数据的绝对值对终端设备系统至关重要，则可以实现增益和偏移线性补偿算法补偿或查询表算法，以此在固件中轻松校正数据随湿度的变化。

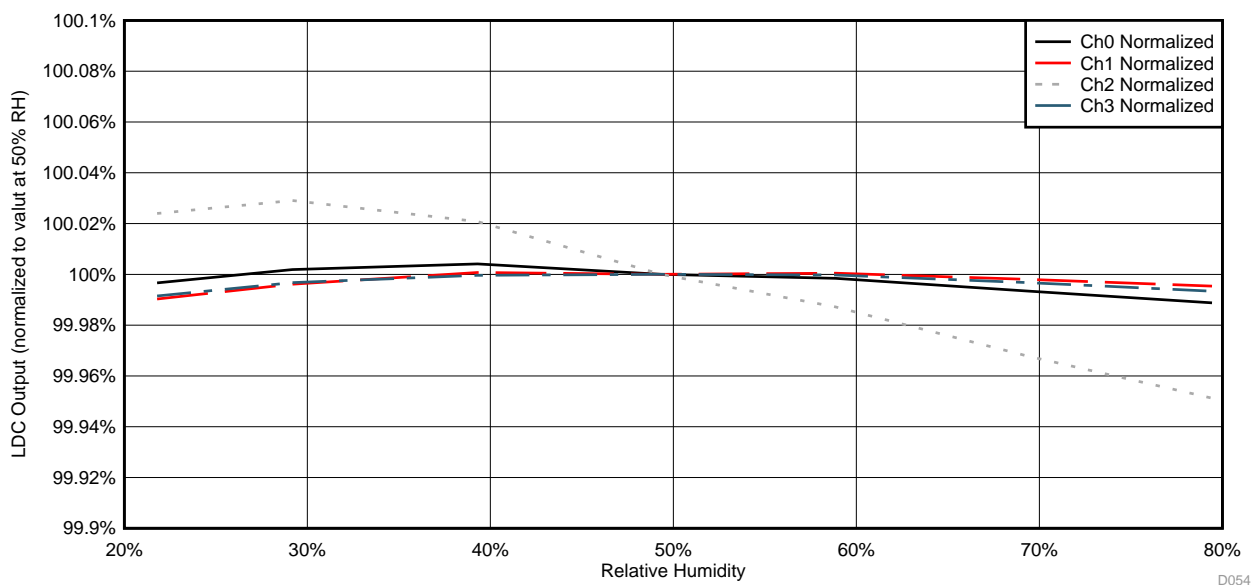


图 49. LDC1614 数据随相对湿度变化曲线—所有通道

为验证基于 IIR 滤波器的缓慢移动平均值固件技术的稳定性，对本 TI 参考设计系统执行了“相对湿度冲击”测试。将系统置于 TestEquity 1007H 温度/湿度试验箱中，并将相对湿度设为 20%。系统在此相对湿度下稳定后，尽快将试验箱湿度斜升至 80%，之后再尽快降回至 20%。图 50、图 51、图 52 和图 53 显示了 LDC1614 器件所有四个通道的以下信息：试验箱相对湿度随时间变化情况、LDC1614 器件输出数据、缓慢移动平均值阈值以及指示是否检测到按钮按压操作的变量。未检测到任何按钮按压操作时，按钮按压检测标志等于 0；检测到按钮按压操作时，检测标志等于 1。仅在 LDC1614 器件输出数据超过缓慢移动平均值阈值时，才会将此检测标志设为 1。

图 50、图 51、图 52 和图 53 显示 LDC1614 器件所有四个通道在整个测试相对湿度范围内均未检测到任何按钮按压操作，证明缓慢移动平均值算法可以成功补偿湿度变化。此算法的性能由 ChX 按钮按下？(ChX Button Press?) (蓝点) 数据迹线显示，此线在整个测试过程中均等于 0，表明未检测到错误的按钮按压操作。

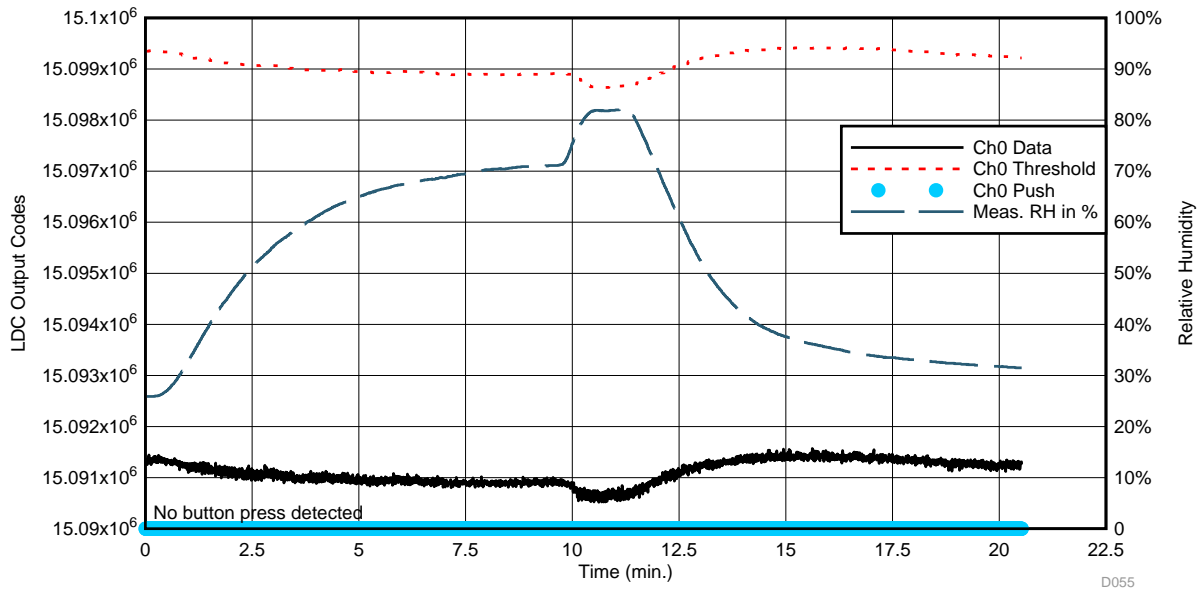


图 50. 相对湿度“冲击”测试期间的 LDC Ch0 数据—向下按钮通道

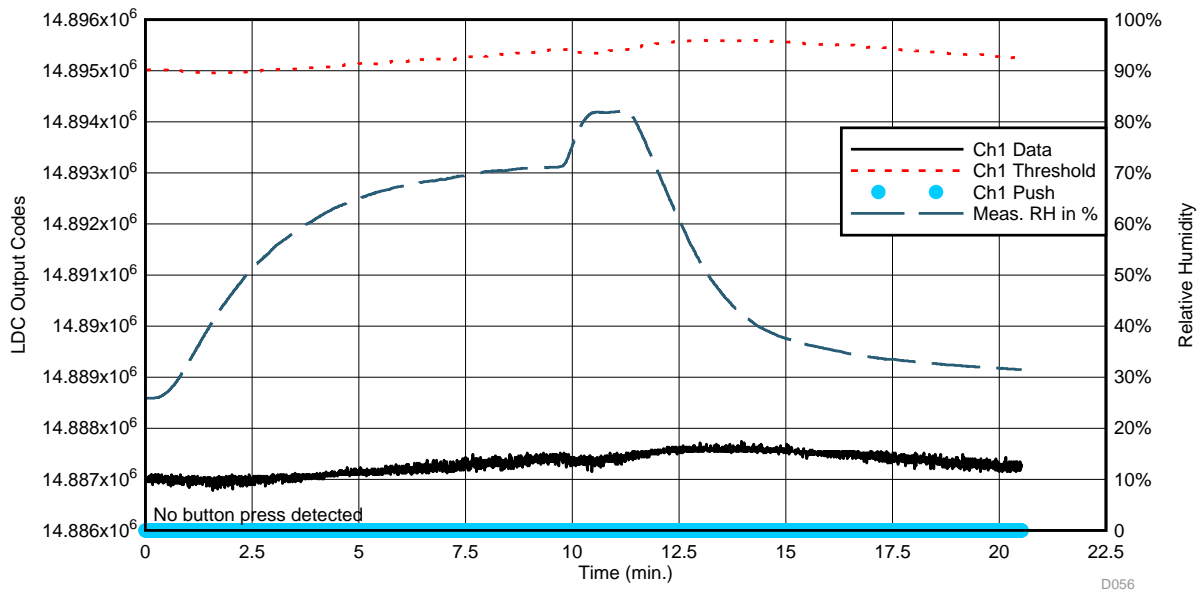


图 51. 相对湿度“冲击”测试期间的 LDC Ch1 数据—向上按钮通道

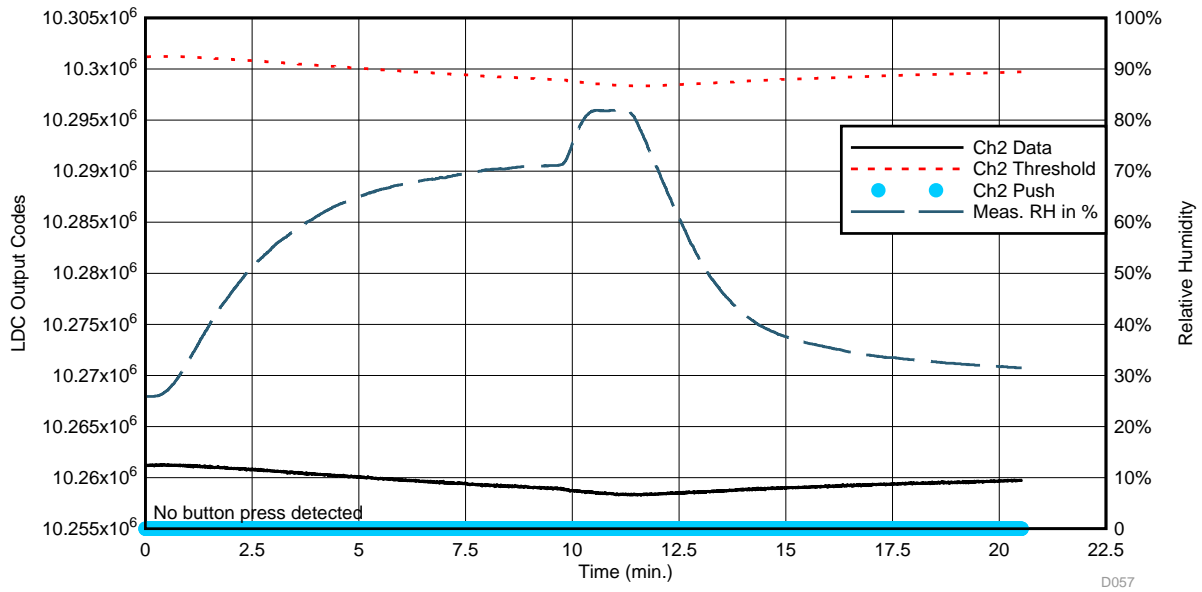


图 52. 相对湿度“冲击”测试期间的 LDC Ch2 数据—大按钮通道

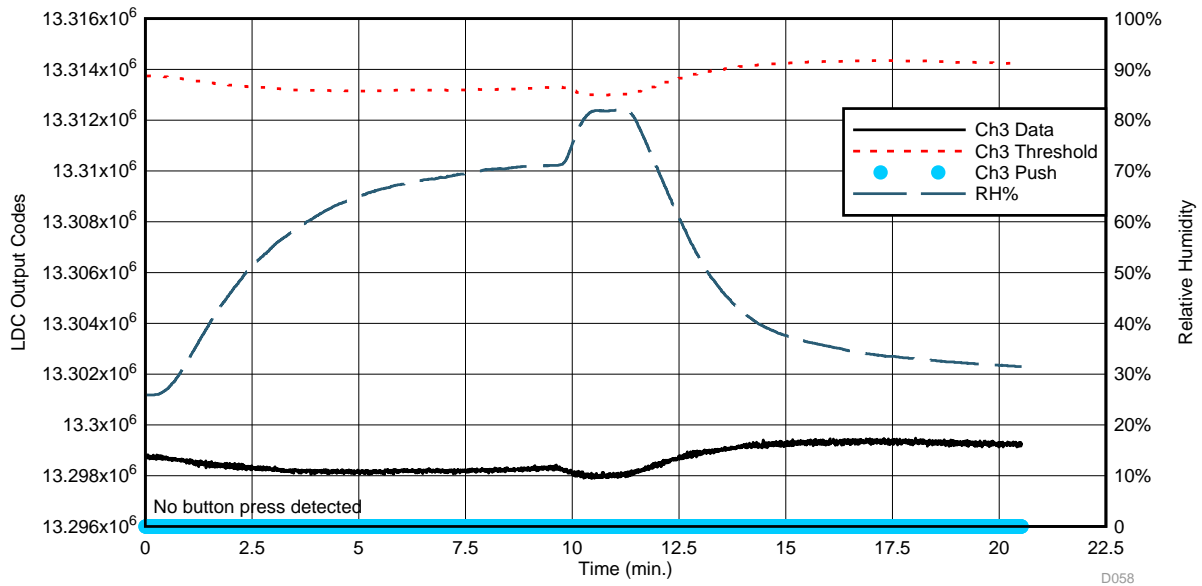


图 53. 相对湿度“冲击”测试期间的 LDC Ch3 数据—小按钮通道

6.8 EMI 保护性能

通过认证前测试和工程测试，确定了TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮的抗 ESD 干扰、抗辐射干扰、抗 EFT 干扰、抗浪涌干扰以及抗传导干扰性能。每种测试都要符合表 10 中定义的通过标准等级。

表 10. IEC61131-2 规定的标准和性能

标准	性能（通过）标准
A	系统按预期继续运行，无任何功能或性能损失，测试过程中也是如此。
B	允许性能暂时下降。测试完成后，系统在无人工干预的情况下应能够按预期继续运行。
C	允许测试期间存在功能损失，但硬件或软件不得损坏。测试完成后，系统经手动重启或者掉电/上电后必须能够自动按预期继续运行。

6.8.1 IEC 61000-4-2 (ESD) 性能

对于 IEC 61000-4-2 认证前测试，接通系统电源并通过 UART 流记录测试前、测试过程中以及测试后 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据、缓慢移动平均值阈值、按钮按压检测标志以及温度和湿度数据。

图 54 显示了 ESD 测试装置。



图 54. IEC 61000-4-2 ESD 测试装置

TI 参考设计系统按预期工作，对于所有 ESD 测试都达到 A 类通过标准，如下文表 11 所示。

表 11. IEC 61000-4-2 (ESD) 测试结果

IEC 61000-4-2 (ESD) 测试条件	结果 ⁽¹⁾
±4kV 垂直耦合板	A
±4kV 水平耦合板	A
在铝外壳上进行 ±4kV 接触放电	A
在铝外壳上方进行 ±8kV 空气放电	A

⁽¹⁾ 详细信息请参见表 10。

6.8.2 IEC 61000-4-3 (抗辐射干扰) 性能

对于 IEC 61000-4-3 认证前测试，接通系统电源并通过 UART 流记录测试前、测试过程中以及测试后 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据、缓慢移动平均值阈值、按钮按压检测标志以及温度和湿度数据。

图 55 和图 56 显示用于抗辐射干扰测试的装置。

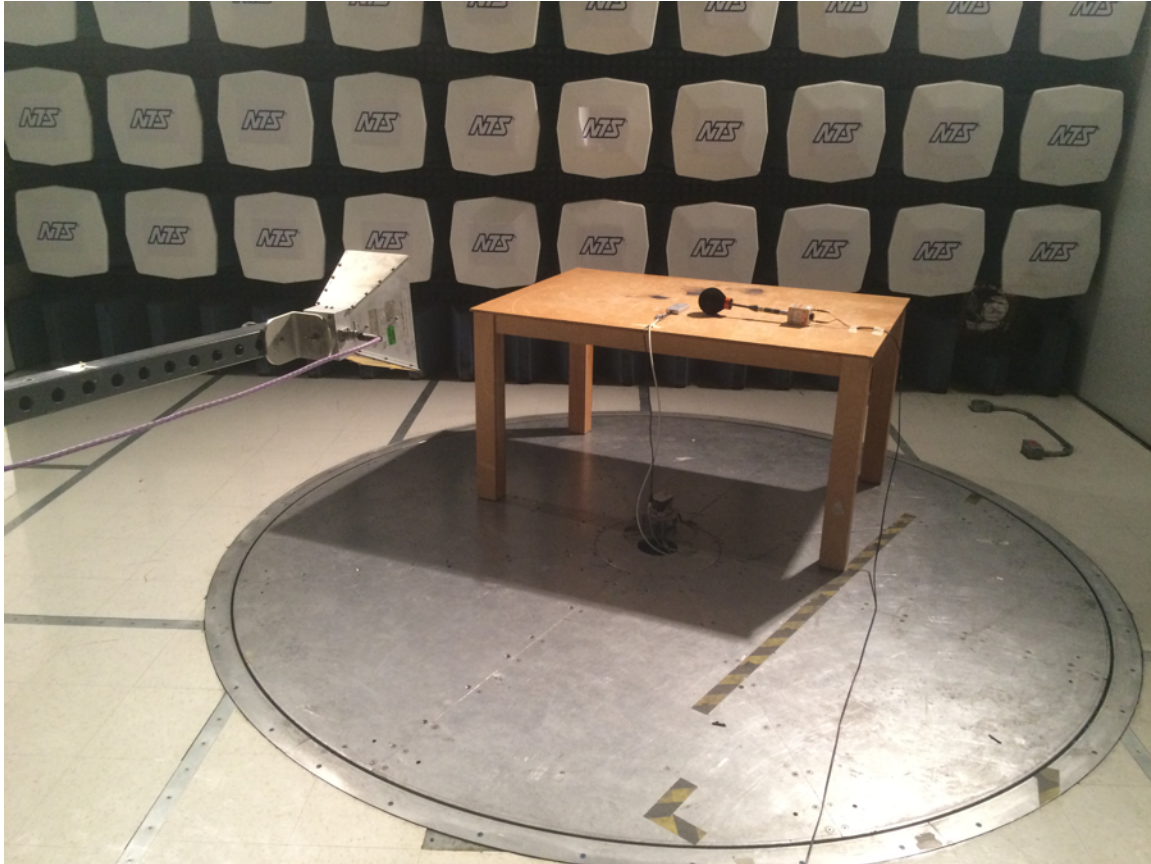


图 55. IEC 61000-4-3 抗辐射干扰测试装置

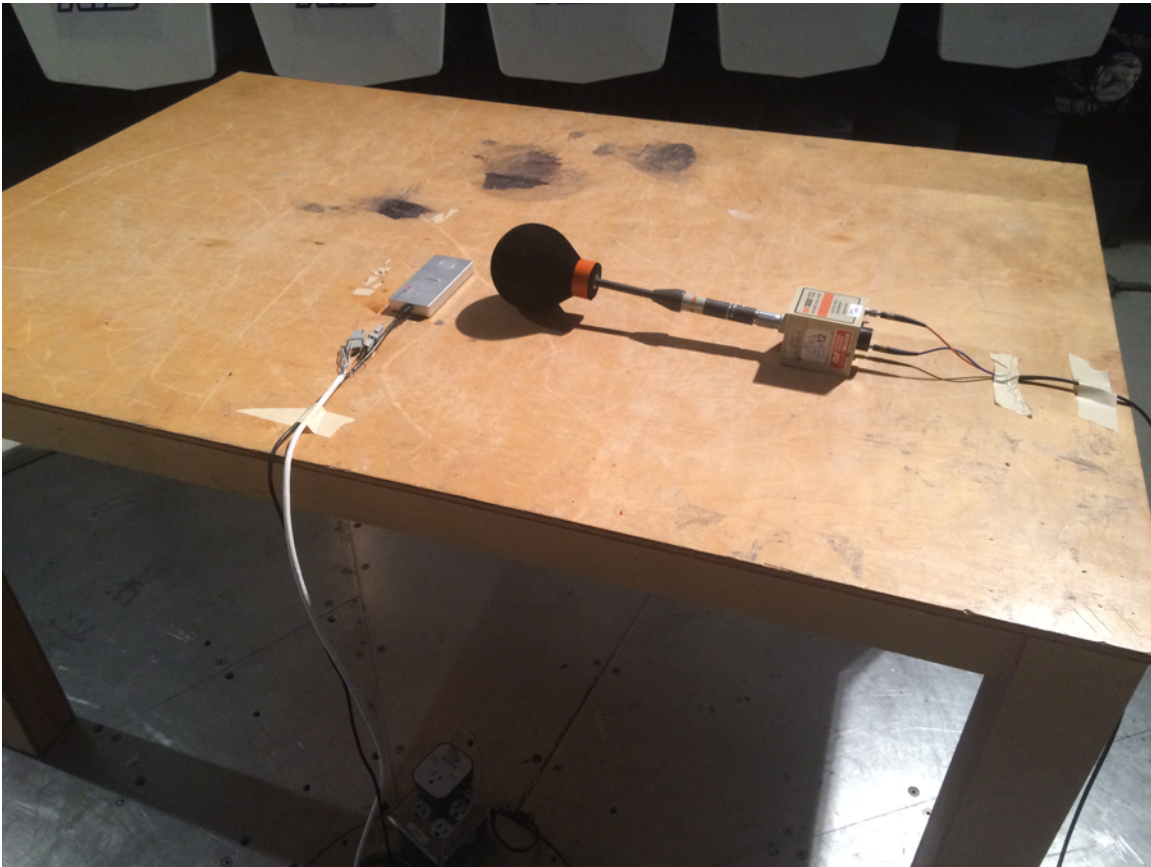


图 56. IEC 61000-4-3 抗辐射干扰测试装置

以 3V/m 的场强在 80MHz 至 2.7GHz 的标准高频范围内对系统进行测试。测试过程中的系统输出数据在表 12 所列的各图中显示。

在 2.7 GHz 至 80MHz 的噪声频率范围内，数据中的缓慢漂移以及一些噪声显示在一些图中。然而，此 TI 参考设计基于 IIR 滤波器的缓慢移动平均值特性会消除任何系统的虚假触发。如下文各图所示，LDC1614 器件输出从未超过缓慢移动平均值阈值，因此未检测到任何错误的按钮按压操作，证明了系统的抗辐射干扰性能。

TI 参考设计系统按预期工作，对于所有抗辐射干扰测试都达到 A 类通过标准，如下文表 12 所示。

表 12. IEC 61000-4-3（抗辐射干扰）测试结果

IEC 61000-4-3（抗辐射干扰）测试条件	结果 ⁽¹⁾
80MHz 至 1GHz（水平极化）	A（请参见图 57、图 58、图 59 和图 60）
80MHz 至 1GHz（垂直极化）	A（请参见图 60、图 62、图 63 和图 64）
1GHz 至 2.7GHz（水平极化）	A（请参见图 64、图 66、图 67 和图 68）
1GHz 至 2.7GHz（垂直极化）	A（请参见图 69、图 70、图 71 和图 72）

⁽¹⁾ 详细信息请参见表 10。

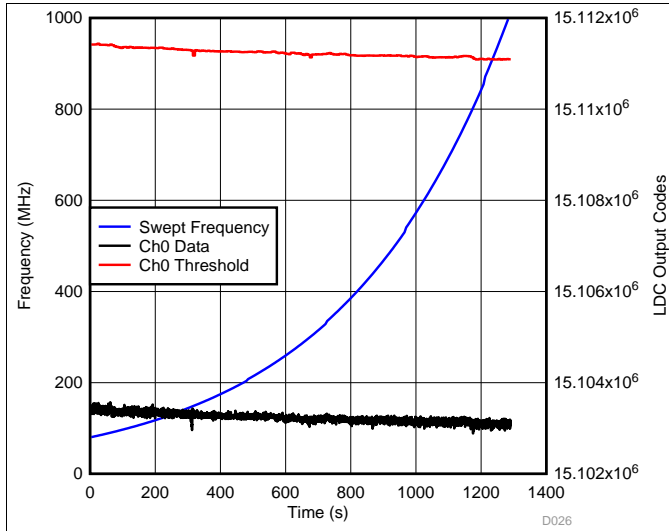


图 57. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch0 数据 (80MHz – 1GHz, 水平极化) 一向下按钮通道

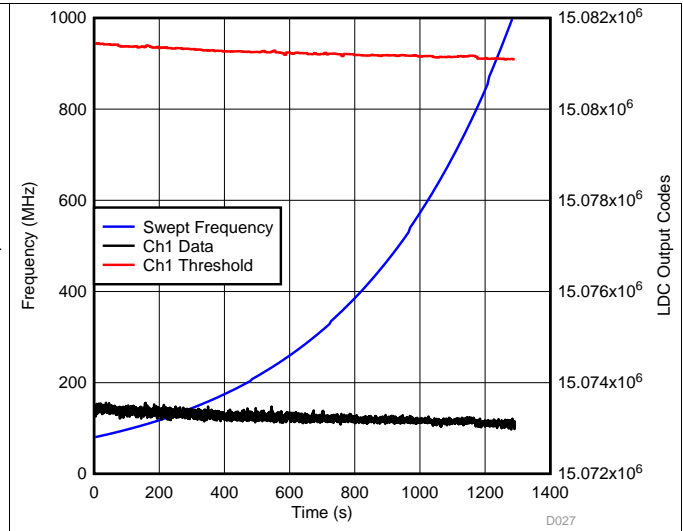


图 58. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch1 数据 (80MHz – 1GHz, 水平极化) 一向上按钮通道

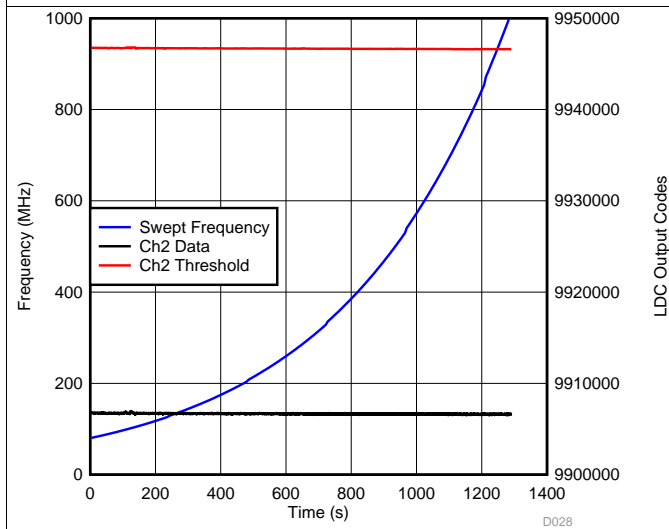


图 59. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch2 数据 (80MHz – 1GHz, 水平极化) 一大按钮通道

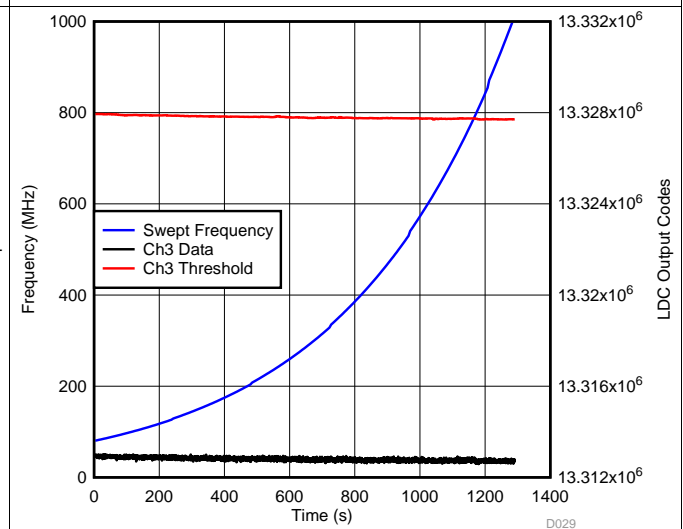


图 60. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch3 数据 (80MHz – 1GHz, 水平极化) 一小按钮通道

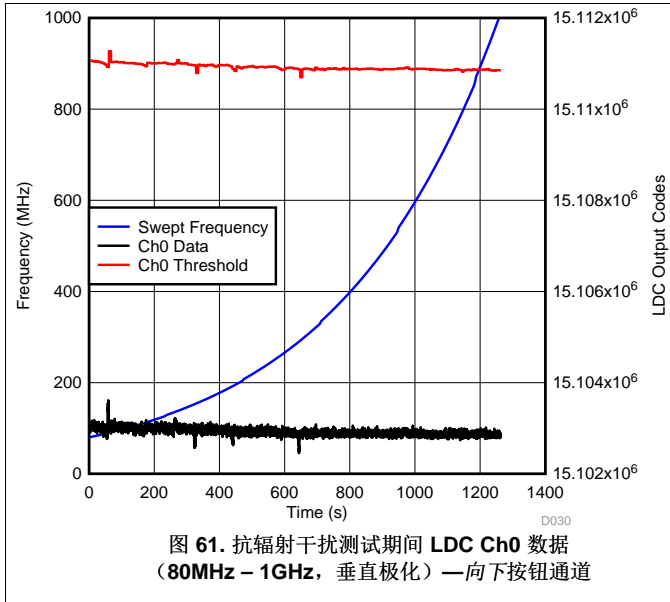


图 61. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch0 数据 (80MHz – 1GHz, 垂直极化) 一向下按钮通道

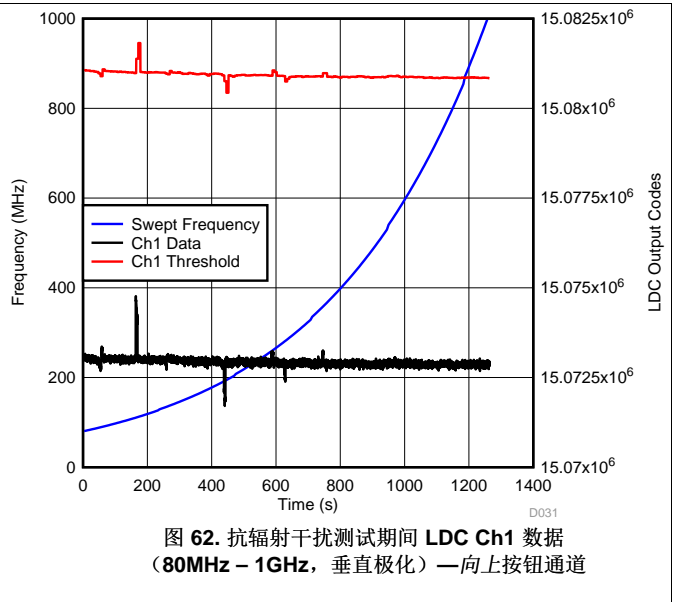


图 62. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch1 数据 (80MHz – 1GHz, 垂直极化) 一向上按钮通道

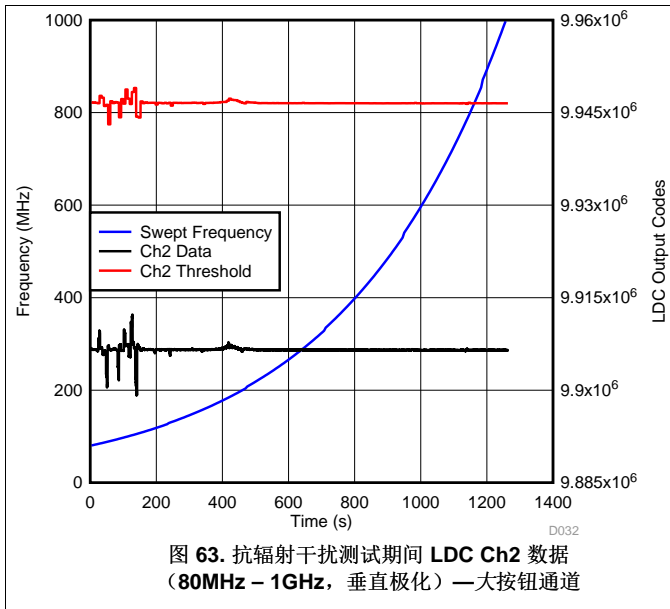


图 63. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch2 数据 (80MHz – 1GHz, 垂直极化) 一大按钮通道

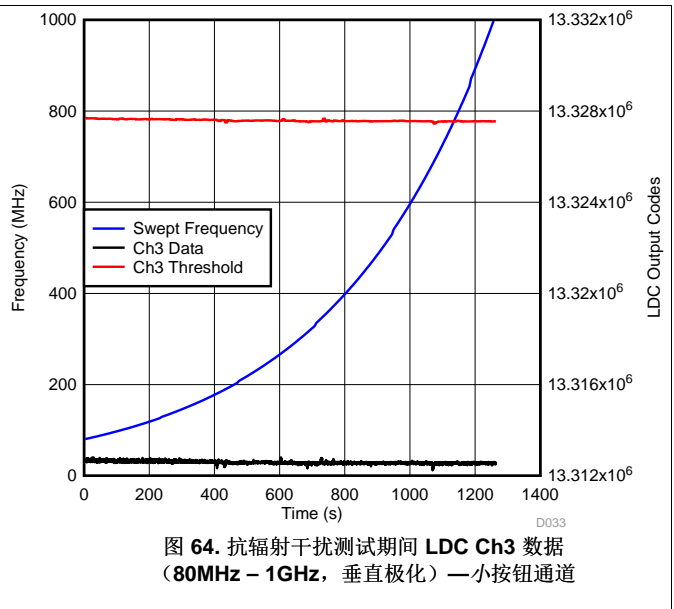


图 64. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch3 数据 (80MHz – 1GHz, 垂直极化) 一小按钮通道

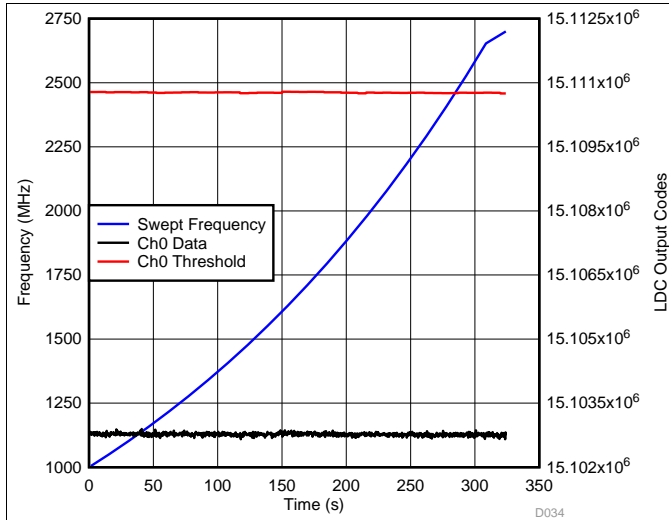


图 65. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch0 数据 (1GHz – 2.7GHz, 水平极化) — 向下按钮通道

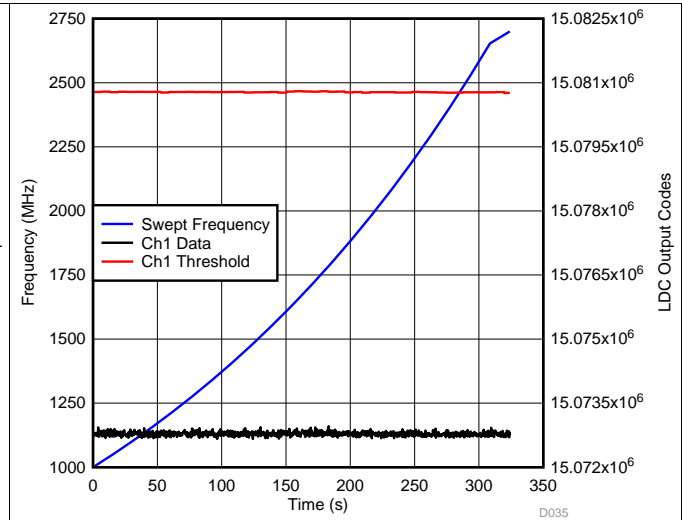


图 66. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch1 数据 (1GHz – 2.7GHz, 水平极化) — 向上按钮通道

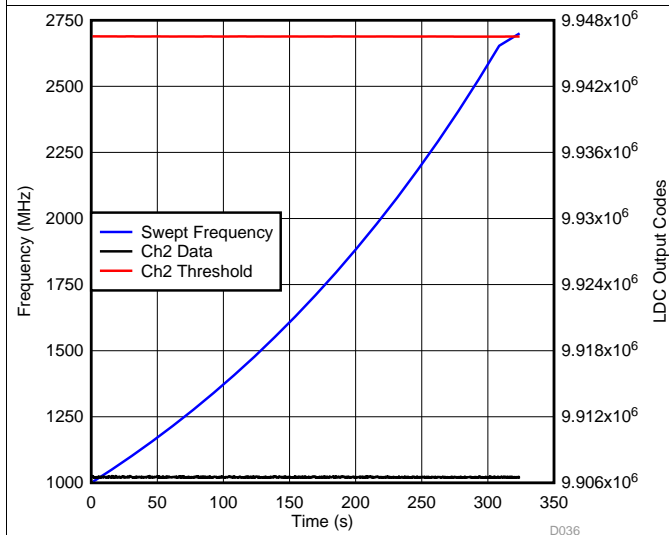


图 67. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch2 数据 (1GHz – 2.7GHz, 水平极化) — 大按钮通道

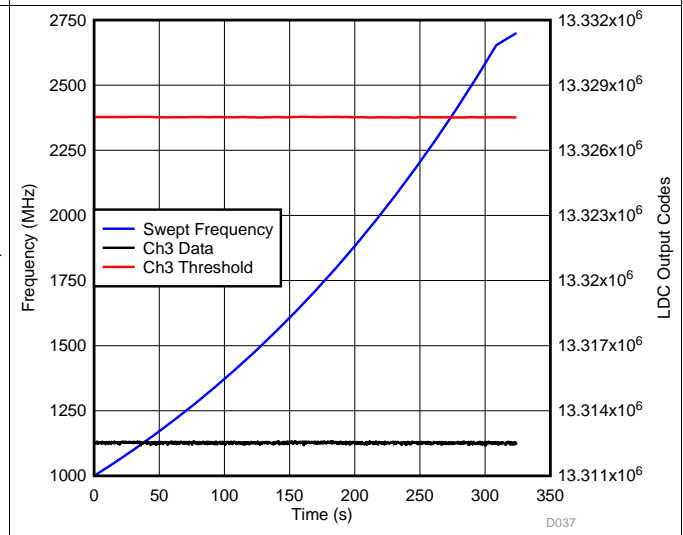


图 68. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch3 数据 (1GHz – 2.7GHz, 水平极化) — 小按钮通道

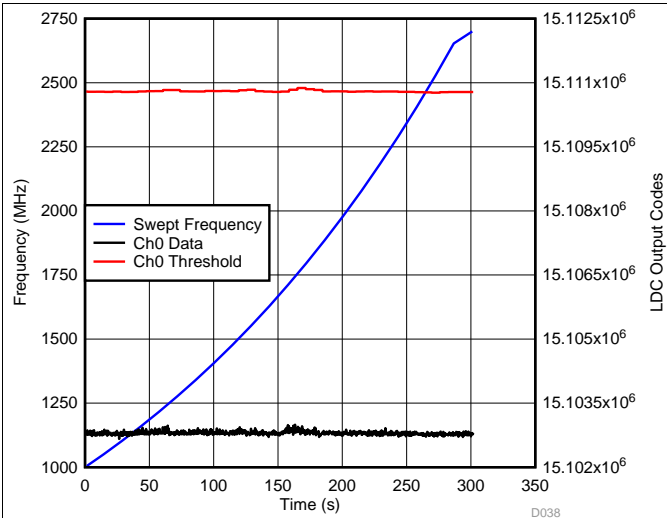


图 69. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch0 数据 (1GHz – 2.7GHz, 垂直极化) — 向下按钮通道

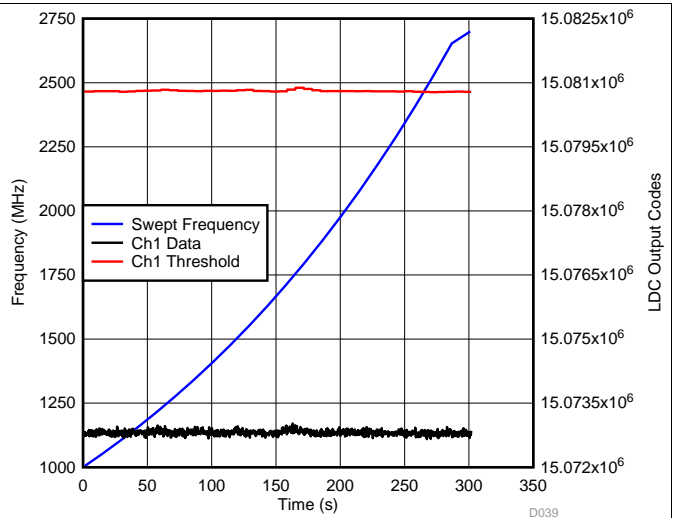


图 70. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch1 数据 (1GHz – 2.7GHz, 垂直极化) — 向上按钮通道

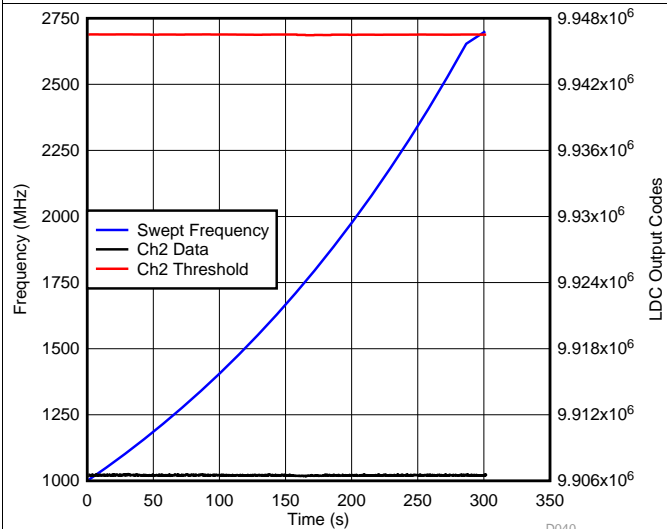


图 71. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch2 数据 (1GHz – 2.7GHz, 垂直极化) — 大按钮通道

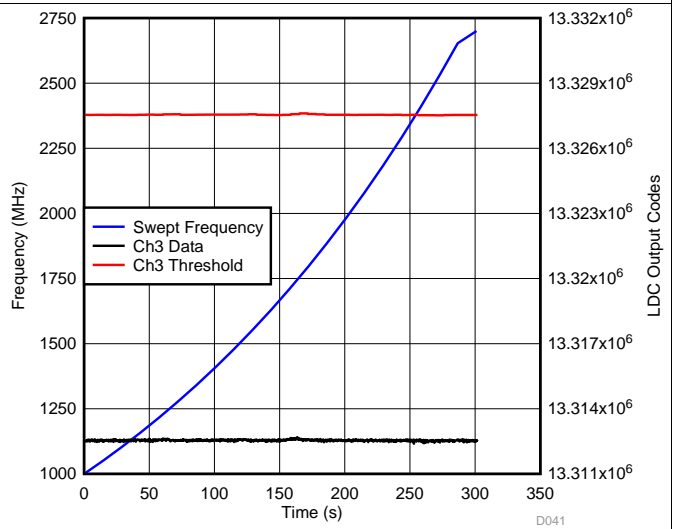


图 72. 抗辐射干扰测试期间 LDC Ch3 数据 (1GHz – 2.7GHz, 垂直极化) — 小按钮通道

6.8.3 IEC 61000-4-4 (EFT) 性能

对于 IEC 61000-4-4 认证前测试，接通系统电源并通过 UART 流记录测试前、测试过程中以及测试后 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据、缓慢移动平均值阈值、按钮按压检测标志以及温度和湿度数据。

图 73 显示了 EFT 测试装置。

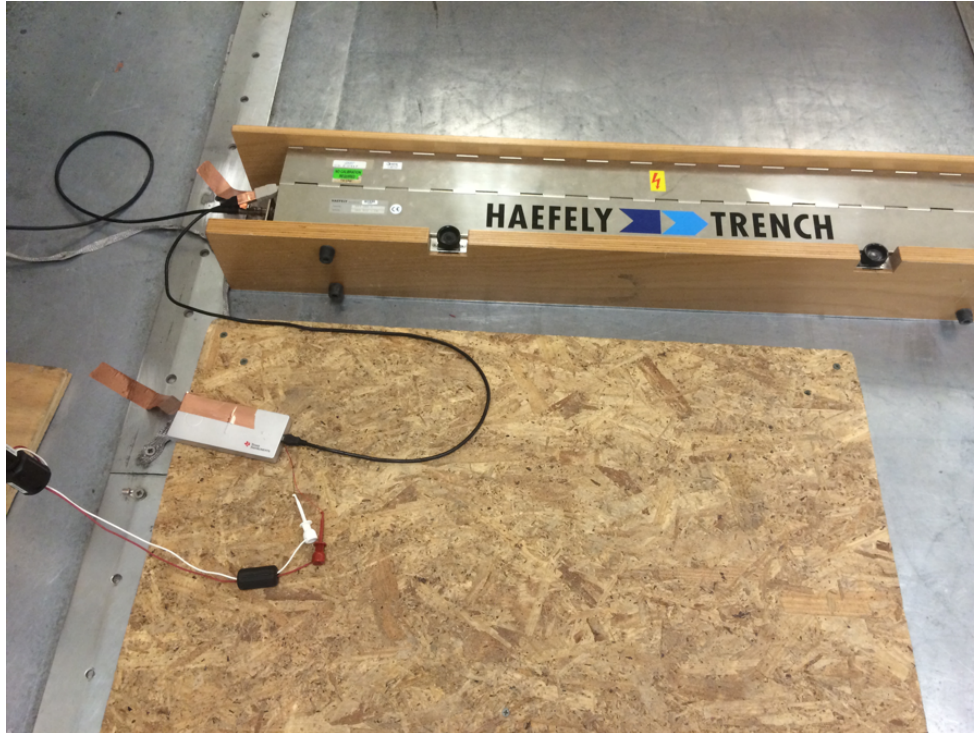


图 73. IEC 61000-4-4 EFT 测试装置

在标准测试电压 $\pm 0.5\text{kV}$ 、 $\pm 1.0\text{kV}$ 和 $\pm 2.0\text{kV}$ 下对系统进行测试。将 TI 参考设计系统的铝外壳通过铜带接地。使用铁氧体磁珠保护 UART 调试数据免受损坏。

TI 参考设计系统按预期工作，对于所有 EFT 测试都达到 A 类通过标准，如下文表 13 所示。由于未测得任何明显的噪声伪影，为简便起见，未给出输出数据图。

表 13. IEC 61000-4-4 (EFT) 测试结果

IEC 61000-4-4 (EFT) 测试条件	结果 ⁽¹⁾
$\pm 0.5\text{kV}$ (USB 电源电缆上)	A
$\pm 1.0\text{kV}$ (USB 电源电缆上)	A
$\pm 2.0\text{kV}$ (USB 电源电缆上)	A

⁽¹⁾ 详细信息请参见表 10。

6.8.4 EC 61000-4-5 (浪涌) 性能

对于 IEC 61000-4-5 认证前测试，接通系统电源并通过 UART 流记录测试前、测试过程中以及测试后 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据、缓慢移动平均值阈值、按钮按压检测标志以及温度和湿度数据。

图 74 显示了浪涌测试装置。



图 74. IEC 61000-4-5 浪涌测试装置

在标准测试电压 $\pm 0.5\text{kV}$ 下对系统进行测试。将 TI 参考设计系统的铝外壳通过铜带接地。使用铁氧体磁珠保护 UART 调试数据免受损坏。

TI 参考设计系统按预期工作，对于所有浪涌测试都达到 A 类通过标准，如下文表 14 所示。为简便起见，而且由于 VBUS 到 GND 的测试条件代表最坏的情况，所以仅给出此测试条件下的输出数据图。

表 14. IEC 61000-4-5 (浪涌) 测试结果

IEC 61000-4-5 (浪涌) 测试条件	结果 ⁽¹⁾
+0.5kV (从 GND 到地)	A
-0.5kV (从 GND 到地)	A
+0.5kV (从 VBUS 到地)	A
-0.5kV (从 VBUS 到地)	A
+0.5kV (从 VBUS 到 GND)	A (请参见图 75、图 76、图 77 和图 78)
-0.5 kV (从 VBUS 到 GND)	A (请参见图 79、图 80、图 81 和图 82)

⁽¹⁾ 详细信息请参见表 10。

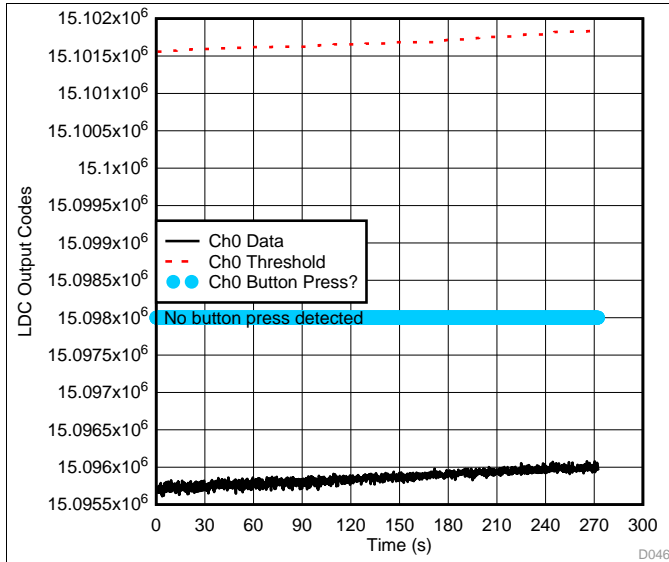


图 75. 浪涌测试期间 LDC Ch0 数据 (+0.5kV, 从 VBUS 到 GND) —向下按钮通道

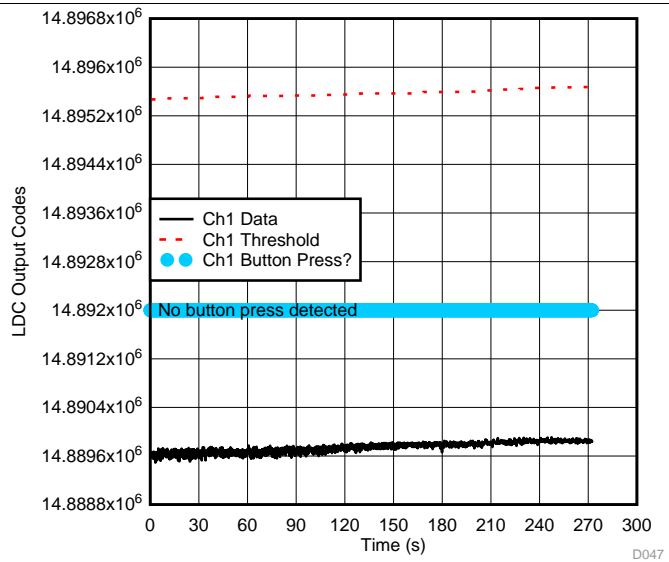


图 76. 浪涌测试期间 LDC Ch1 数据 (+0.5kV, 从 VBUS 到 GND) —向上按钮通道

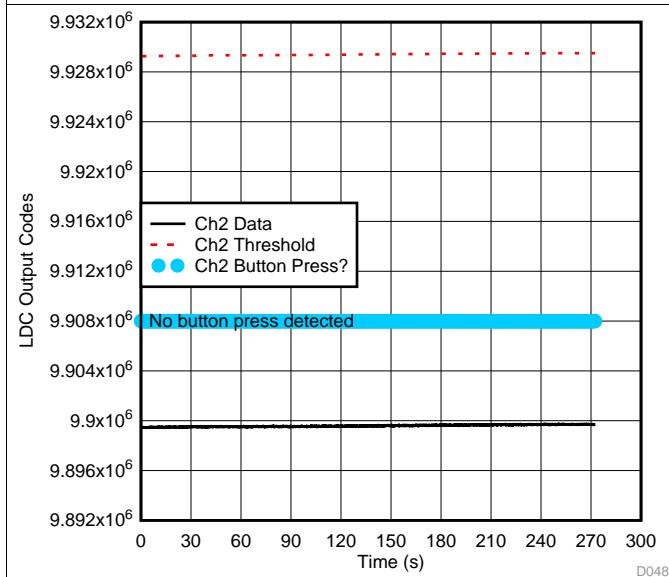


图 77. 浪涌测试期间 LDC Ch2 数据 (+0.5kV, 从 VBUS 到 GND) —大按钮通道

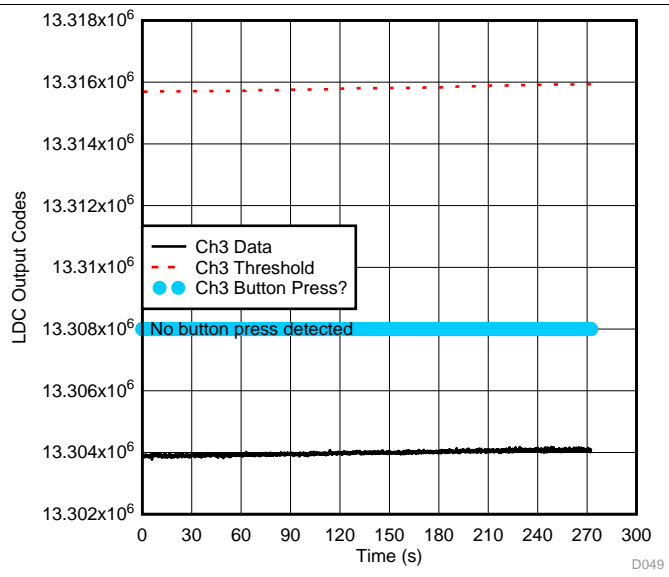


图 78. 浪涌测试期间 LDC Ch3 数据 (+0.5kV, 从 VBUS 到 GND) —小按钮通道

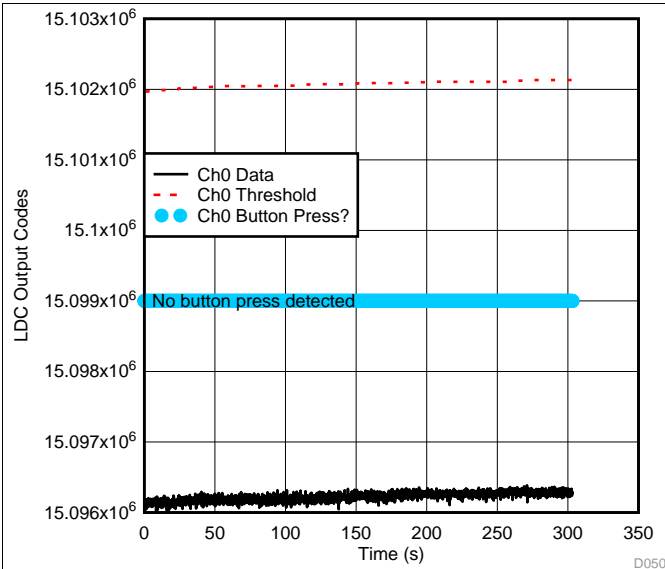


图 79. 浪涌测试期间 LDC Ch0 数据 (-0.5kV, 从 VBUS 到 GND) — 向下按钮通道

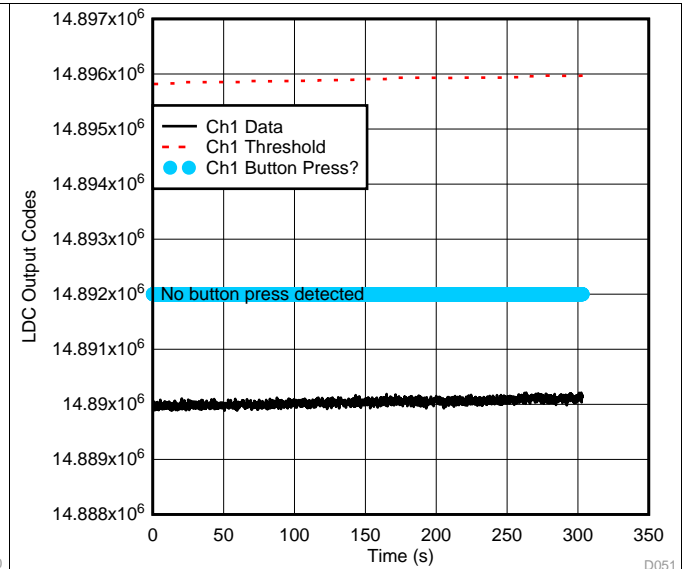


图 80. 浪涌测试期间 LDC Ch1 数据 (-0.5kV, 从 VBUS 到 GND) — 向上按钮通道

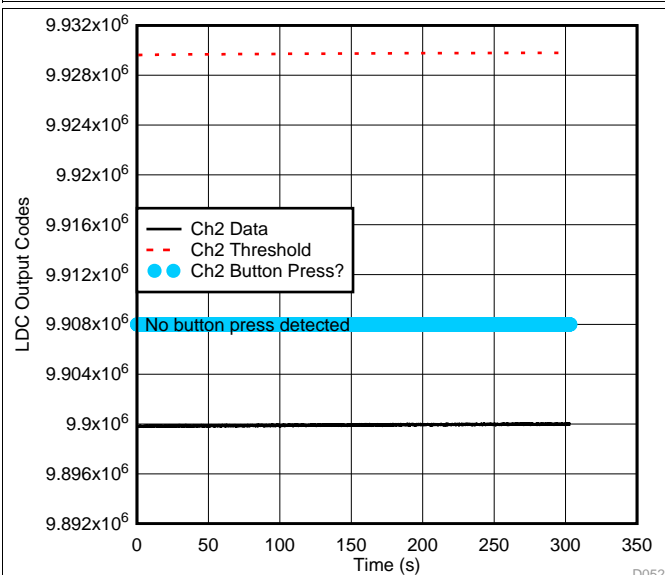


图 81. 浪涌测试期间 LDC Ch2 数据 (-0.5kV, 从 VBUS 到 GND) — 大按钮通道

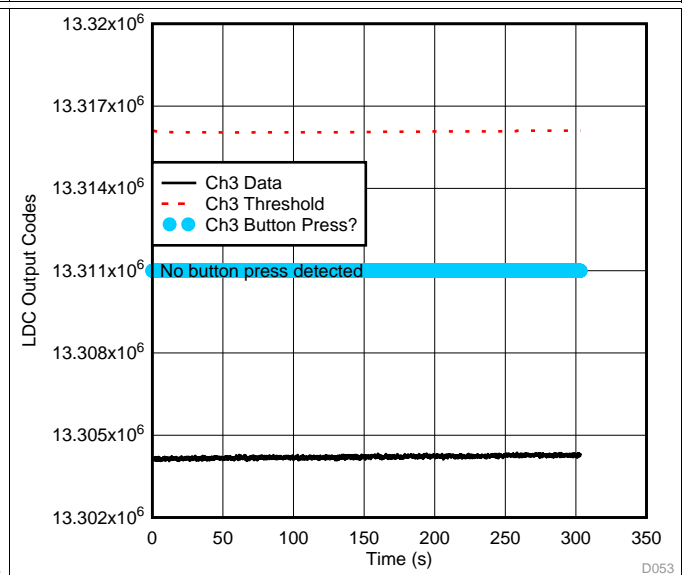


图 82. 浪涌测试期间 LDC Ch3 数据 (-0.5kV, 从 VBUS 到 GND) — 小按钮通道

6.8.5 IEC 61000-4-6 (抗传导干扰) 性能

对于 IEC 61000-4-6 认证前测试，接通系统电源并通过 UART 流记录测试前、测试过程中以及测试后 LDC1614 器件所有四个通道的输出数据、缓慢移动平均值阈值、按钮按压检测标志以及温度和湿度数据。

图 83 显示了抗传导干扰测试装置。

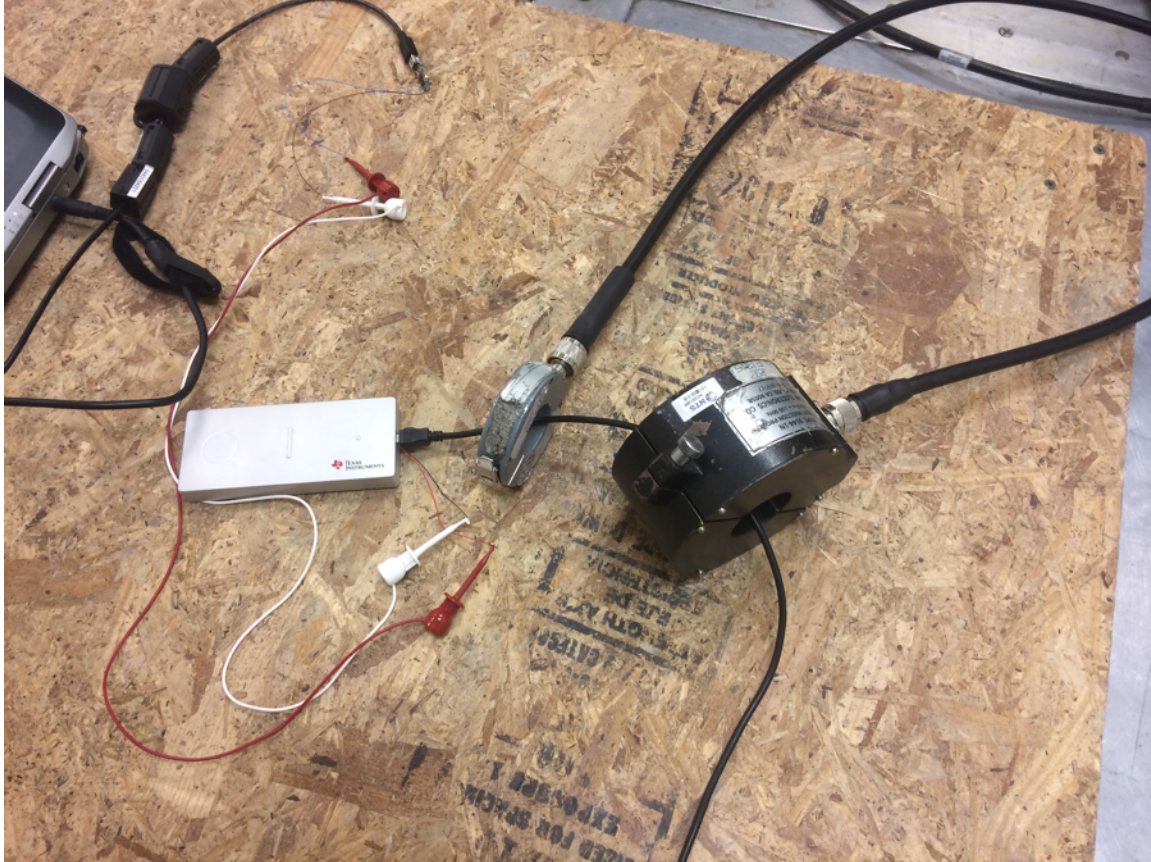


图 83. IEC 61000-4-6 抗传导干扰测试设置

以 3 VRMS 的场强在 150 kHz 至 80MHz 的标准频率范围内对系统进行测试。

测试过程中的系统输出数据在表 15 所列的各图中显示。使用铁氧体磁珠保护 UART 调试数据以免在测试过程中损坏。

在 150kHz 至 80MHz 的噪声频率范围内，数据中的缓慢漂移以及一些噪声显示在一些图中。然而，此 TI 参考设计基于 IIR 滤波器的缓慢移动平均值特性会消除任何系统的虚假触发。如下文各图所示，LDC1614 器件输出从未超过缓慢移动平均值阈值，因此未检测到任何错误的按钮按压操作，证明了系统的抗传导干扰性能。

TI 参考设计系统按预期工作，对于所有抗传导干扰测试都达到 A 类通过标准，如下文表 15 所示。

表 15. IEC 61000-4-6 (抗传导干扰) 测试结果

IEC 61000-4-6 (抗传导干扰) 测试条件	结果 ⁽¹⁾
150kHz 至 80MHz (在 3 V _{RMS} 下)	A (请参见图 84、图 85、图 86 和图 87)

⁽¹⁾ 详细信息请参见表 10。

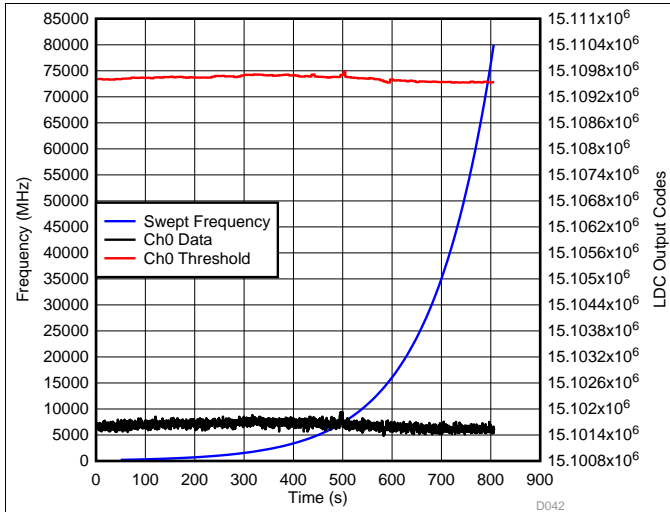


图 84. 抗传导干扰测试期间的 LDC Ch0 数据—向下按钮通道

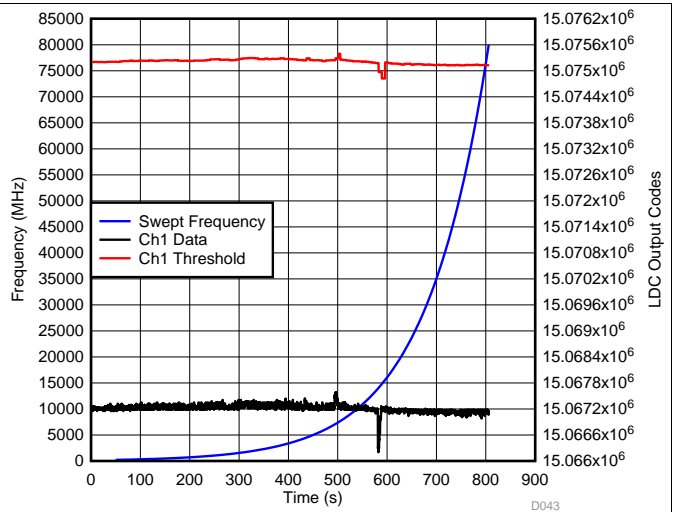


图 85. 抗传导干扰测试期间的 LDC Ch1 数据—向上按钮通道

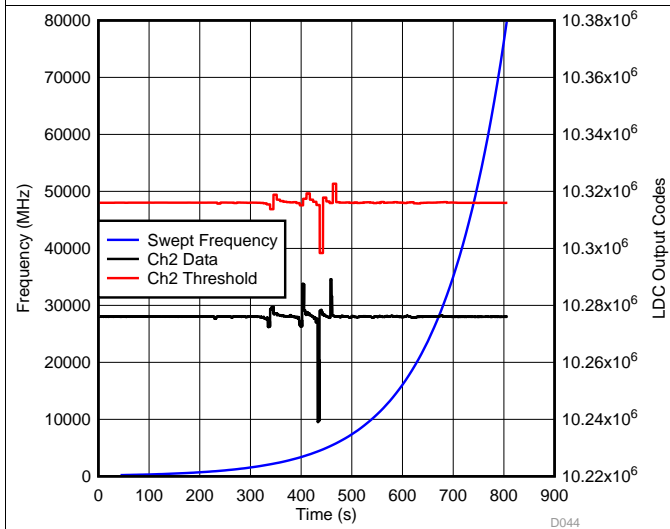


图 86. 抗传导干扰测试期间的 LDC Ch2 数据—大按钮通道

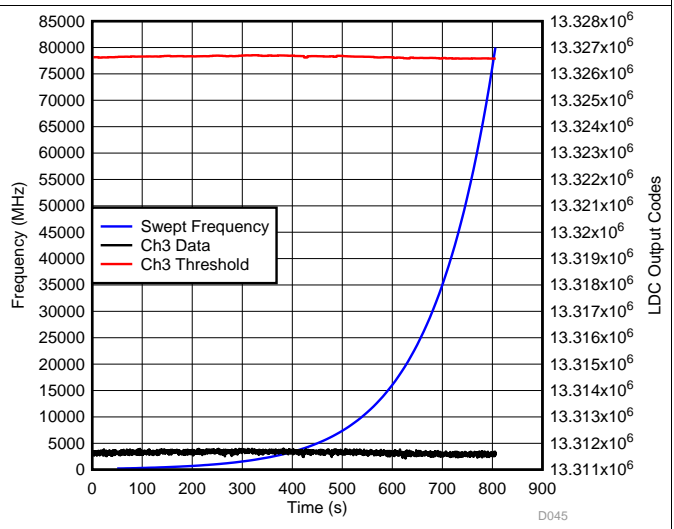


图 87. 抗传导干扰测试期间的 LDC Ch3 数据—小按钮通道

7 设计文件

7.1 电路原理图

要下载电路原理图，请参见 [TIDA-00314 电路原理图](#) 的设计文件。

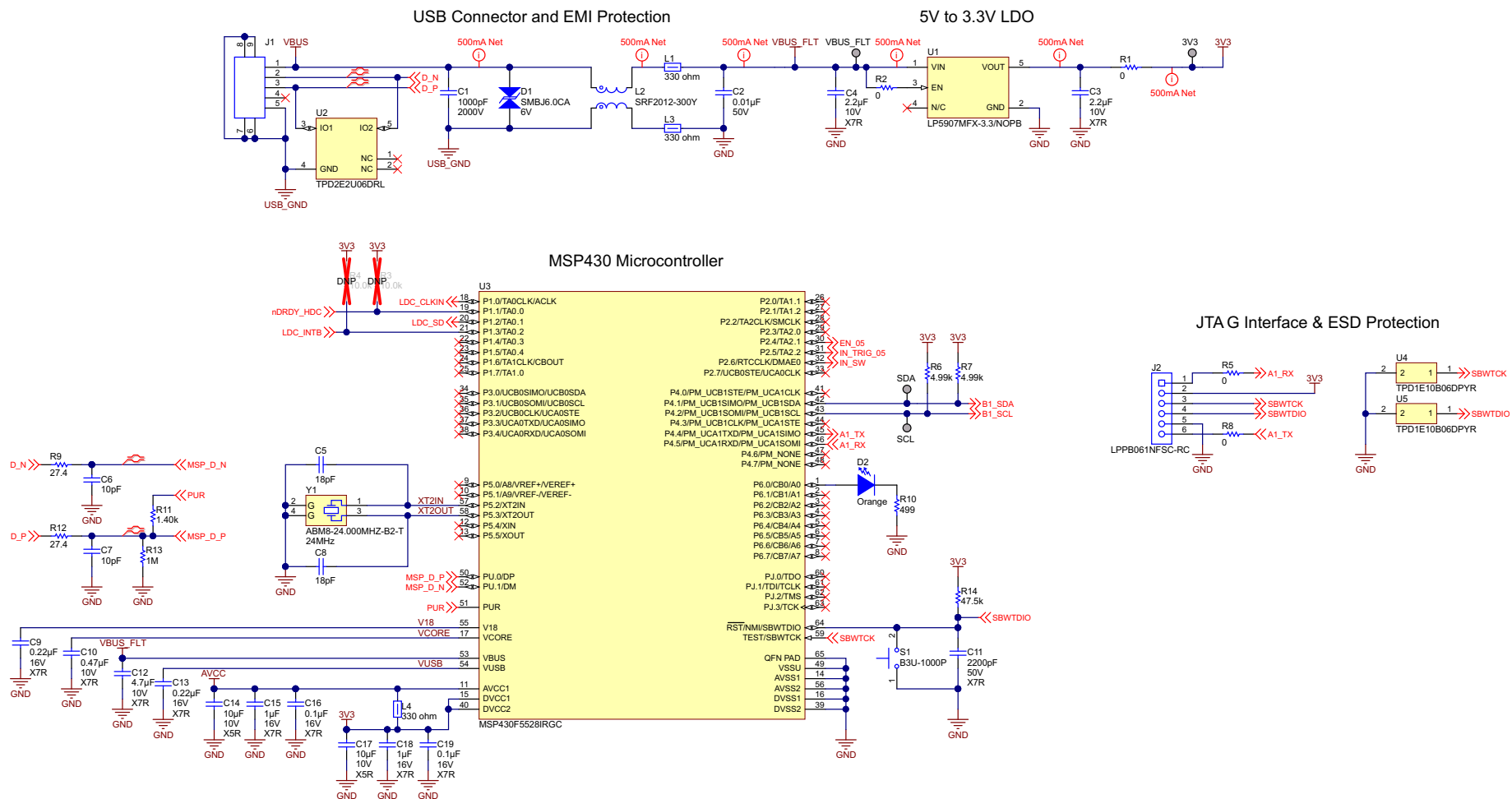
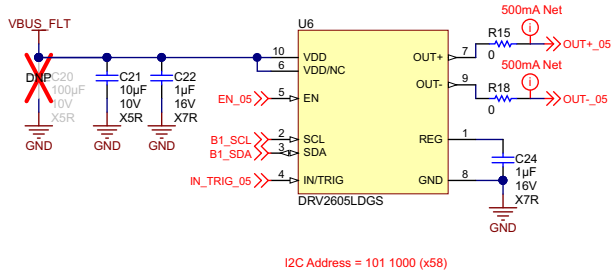
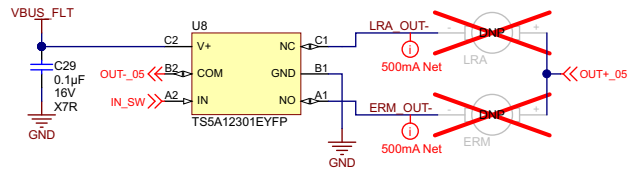


图 88. 集成触觉反馈的触摸金属按钮电路图 - 第 1 页

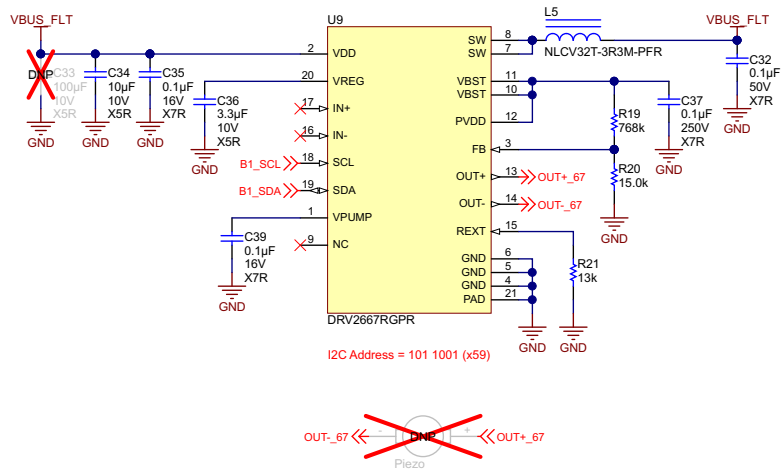
Haptic Driver for ERM and LRA



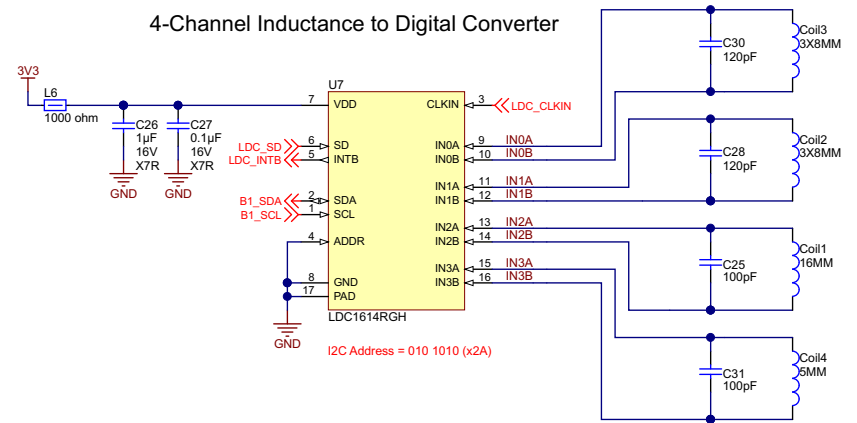
Analog Switch for ERM and LRA



Piezo Haptic Driver



4-Channel Inductance to Digital Converter



Humidity to Digital Converter

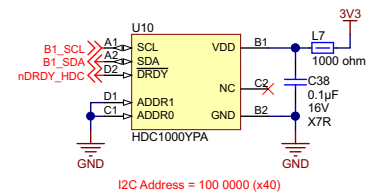


图 89. 集成触觉反馈的触摸金属按钮电路图 - 第 2 页

7.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM), 请参见 [TIDA-00374 BOM](#) 的设计文件。

7.3 板层图

要下载板层图, 请参见 [TIDA-00314 板层图](#) 的设计文件。

7.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件, 请参见 [TIDA-00314 Altium](#) 的设计文件。

7.5 布局指南

为确保高性能, TI 参考设计集成触觉反馈的触摸金属按钮使用四层 PCB 布局。第二层为固态接地层, 第三层用于电源轨布线, GND 填充分布在未使用区域。顶层和底层用于一般信号布线, GND 填充也分布在未使用区域。

所有四个按钮的传感器线圈都需要在所有四层上将 GND 填充拉出至少一个半径长度。对于矩形传感线圈, 主要是较短的一侧。如果可能, 最好将 GND 拉出一个直径长度。从各个传感器线圈返回 LDC1614 器件的走线置于第三层, 埋在接地层之间。无其它任何走线或网络与传感器线圈走线相交叉。采用过孔阵列技术在 LDC1614 器件与传感器线圈之间的每条走线周围的“篱笆”中创建至 GND 的低阻抗路径。以这种方式走线可以降低 EMI 敏感性。

在终端设备设计中放置任何触觉致动器时, 都必须确保在工作过程中能够产生最优位移。通常, 此位置处于 PCB 的角落, 但可使用加速计 (例如 <http://www.ti.com/tool/drv-acc16-evm>) 确定致动器的最佳位置。

在 PCB 底部外边缘四周存在一圈裸露的 GND。这是为了确保将 PCB GND 短接至铝外壳并确保外壳与 GND 处于同一电位。所有过孔都在 PCB 底部通过焊接掩膜遮盖或覆盖。使用焊接掩膜旨在防止 PCB 安装在铝外壳顶部时出现任何信号短路。

对于此设计中使用的全部 TI 产品, 确保严格遵照相应数据表给出的布线指南操作。

7.6 光绘文件

要下载光绘文件, 请参见 [TIDA-00314 Gerber](#) 的设计文件。

7.7 装配图

要下载装配文件, 请参见 [TIDA-00314 装配图](#) 的设计文件。

7.8 软件文件

要下载软件文件, 请参见 [TIDA-00314 固件](#) 的设计文件。

8 参考资料

如需更多参考信息，请参见以下文档：

1. 德州仪器 (TI) LDC1614 数据表《用于电感感测的 LDC1612、LDC1614 多通道 28 位电感数字转换器 (LDC)》(文献编号: [SNOSCY9](#))。
2. 德州仪器 (TI) DRV2605L 数据表《具有效果库和智能环路架构的 LRA 和 ERM DRV2605L 2V 至 5.2V 触觉驱动器》(文献编号: [SLOS854](#))。
3. 德州仪器 (TI) DRV2667 数据表《具有升压、数字前端和内部波形存储器的压电式触觉驱动器》(文献编号: [SLOS751](#))。
4. 德州仪器 (TI) HDC1000 数据表《HDC1000 带温度传感器的低功耗高精度数字湿度传感器》(文献编号: [SNAS643](#))。
5. 德州仪器 (TI) MSP430F5528 数据表《混合信号微控制器》(文献编号: [SLAS590](#))。
6. 德州仪器 (TI) LP5907 数据表《LP5907 用于 RF 和模拟电路的超低噪声、250mA 线性稳压器 - 无需旁路电容》(文献编号: [SNVS798](#))。
7. 德州仪器 (TI) TS5A12301E 数据表《具备 IEC 4 级 ESD 保护，带 1.8V 兼容输入逻辑的 0.75 欧姆单刀双掷 (SPDT) 模拟开关》(文献编号: [SCES707](#))。
8. 德州仪器 (TI) TPD2E2U06 数据表《双通道高速 ESD 保护器件》(文献编号: [SLLSEG9](#))。
9. 德州仪器 (TI) TPD1E10B06 数据表《采用 0402 封装的单通道 ESD 保护器件》(文献编号: [SLLSEB1](#))。
10. 德州仪器 (TI) 应用报告《触觉能耗》(文献编号: [SLOA194](#))。
11. 德州仪器 (TI) 应用报告《用于移动和可穿戴设备的触觉实现方案注意事项》(文献编号: [SLOA207](#))。

9 关于作者

EVAN D. CORNELL 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。Evan 在系统级模拟、混合信号和电源管理设计方面具有丰富经验。Evan 拥有印第安纳州泰瑞豪特罗斯霍曼理工学院的电气和计算机工程硕士 (ME) 学位和电气工程理学学士 (BS) 学位。Evan 是电气电子工程师协会 (IEEE) 的成员。

RODNEY MIRANDA 是德州仪器 (TI) 的触觉和压电式应用工程师，负责开发面向汽车和工业领域的应用、EVM 和参考设计，并对该领域客户提供支持。Rodney 在使用各种各样的器件（包括定制专用集成电路 (ASIC)、开关模式电源 (SMPS)、AD/DA 转换、传感器产品及更多其它器件）进行汽车质量和汽车产品/测试工程设计方面拥有丰富的经验。Rodney 拥有德克萨斯大学达拉斯分校的 RF 和模拟电路设计专业电子工程硕士学位 (MSEE) 以及电子工程学士学位 (BSEE)。

MURALI SRINIVASA 是德州仪器 (TI) 的电感感测应用工程师，主要负责开发面向汽车市场的应用和参考设计。Murali 在传感器、传感器信号调节领域拥有丰富的经验，并在工业和消费品领域具有深厚的系统级专业知识。Murali 拥有印度班加罗尔 RV 工程学院工程学士学位。

修订版本 A 历史记录

Changes from Original (January 2015) to B Revision	Page
• 已更改 UART 模块为 USB 模块。	24
• 已添加 第 4.5 节 图形用户界面。	25
• 已添加 5.2 至 5.3.7 节。	28
• 已删除 第 5.4 节.....	31

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

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此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。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 要求的组件, 这些组件主要用于汽车。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 © 2015 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间接版权限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, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 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, 并且由客户独自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	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated