

Design Guide: TIDA-060039

电感式触控和磁旋钮无接触式用户界面参考设计



说明

此参考设计使用电感式感应和霍尔效应感应技术来提供人机界面。电感式感应器件在无缝表面上提供八个不同的触控按钮，而霍尔效应传感器用于提供可以旋转并用作额外按钮的磁旋钮。通过电感式感应触控按钮，可提供使用按压力来确定按钮按压的强大解决方案。这能够让触控按钮支持戴手套操作，同时无需顾及按钮表面的灰尘或损坏等环境因素。霍尔传感器旋钮提供非接触式旋转，减少了传统接触式实现（如电位器或旋转编码器）中的磨损。

资源

TIDA-060039	设计文件夹
SCB	设计文件夹
LDC3114-Q1 、 TMAG5273 、 DRV2605	产品文件夹
TLV755P 、 TCA9534 、 PCA9543A	产品文件夹

特性

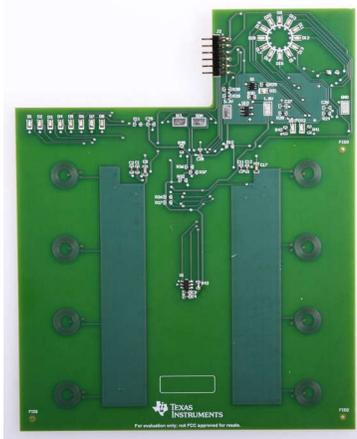
- 无缝触控表面
- 压感触控按钮
- 磁旋钮
- 在一个设备上安装按压和旋转旋钮
- 集成式 CORDIC 算法

应用

- [汽车中心信息显示屏](#)
- [电器用户界面和连接模块](#)
- [油烟机](#)
- [洗碗机](#)
- [烤箱](#)
- [入侵 HMI 面板](#)
- [ATM \(自动柜员机\)](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

人机界面是许多应用中的常见部分，通常需要机电元件来实现按钮和旋钮。许多按钮使用具有电触点的机械开关，按下按钮后将连接电触点。这种交互将产生磨损点，它会随时间而损坏。对于在恶劣环境（如工业或汽车应用）下工作的应用，若要实现具有此类开关的按钮，必须将按钮表面密封。否则，灰尘或污垢会进入机械按钮内部，使产品寿命进一步减少。

旋钮等其他 HMI 元件也会受到磨损。旋钮通常使用编码器或电位器来确定输入的旋转变化。与按钮相同，这些元件中的机械部件会随时间而损坏。

此参考设计使用电感式感应来实现无缝触控按钮，在提供无接触实现的同时，启用了各种力触控功能。此外，还使用霍尔效应感应来实现无接触旋钮，以减少电位器和旋转编码器等器件带来的磨损。此设计包括 3D 打印外壳，它提供按钮表面和旋转式按压旋钮。

按钮和旋钮是许多人机界面的常见元件，这些技术可用于各种应用。对于汽车应用，电感式触控按钮提供的力敏感响应支持佩戴手套操作。此外，能够通过不同表面上的按钮进行设计，这为总体设计带来了灵活性。这些相同优点也适用于工业 HMI 和电器等其他实现。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 所示为本参考设计的方框图。

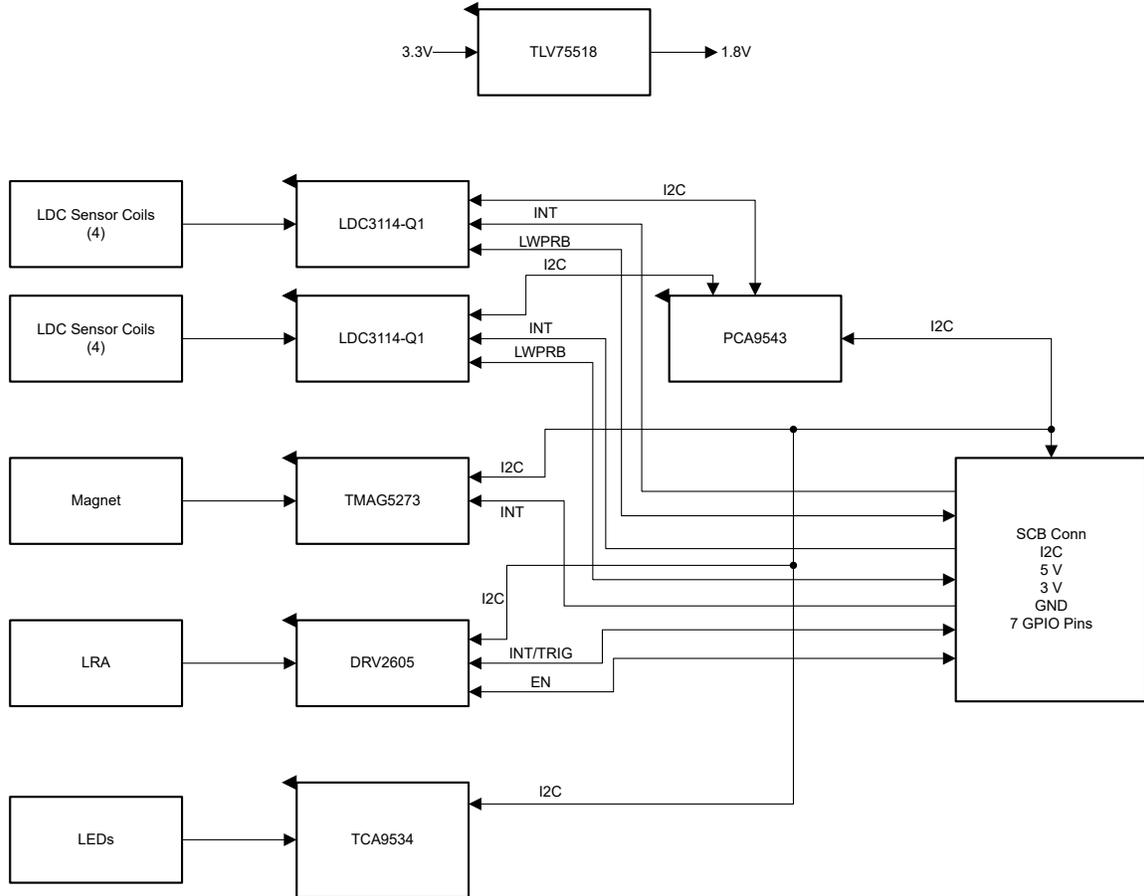


图 2-1. TIDA-060039 方框图

传感器控制板 (SCB) 控制此参考设计并为它供电。SCB 从 USB 电缆获得电源，并向参考设计板提供 5V 和 3.3V 电压。参考设计上的外壳提供八个电感式触控按钮和一个磁推旋钮。触控按钮具有三种不同的工作模式，可通过按下旋钮来更改。在默认模式下，按钮将在与按下的按钮相对应的 LED 上提供数字输出。在第二种模式下，LED 将显示任何给定按钮被按下的力度，亮起的 LED 越多，按下的力度越大。第三种模式连接到 PC，并将一半按钮的数据流化至 GUI。在所有工作模式期间，将读取磁旋钮的角度并将角度显示在 LED 的圆环上。

2.2 设计注意事项

2.2.1 电感式触控按钮

LDC3114-Q1 是用于为此参考设计实现触控按钮的电感式感应 IC。在板上实现了两个此类器件，每个器件运行四个按钮。LDC3114-Q1 使用电感线圈来确定金属目标的变化。金属目标上的按压力会在按钮中产生偏转，这一变形由 IC 测量以确定按钮按压力。此外，LDC3114-Q1 包括基线跟踪算法，用于监控按钮表面并可适应各种环境因素，如温度变化或表面损坏。此器件还包括在按钮数据交叉点高于给定阈值时触发的数字输出。LDC3114-Q1 没有可变 I2C 地址，因此使用 I2C 开关 (PCA9543) 与两个器件进行通信。这能够让每个器件持续运行基线算法以监控按钮表面。

若要实现电感式触控按钮，需要用到与传感器线圈保持固定距离的金属目标。除了电感式传感器的通用设计理论之外，在设计电感式触控按钮时，需考虑几个重要的设计注意事项。对于某些按钮设计，所需的触控表面可能并非金属。在此情况下，可以在非导电表面（如塑料）后面添加一个薄金属平面，用作设计的金属目标。传感器线圈和金属目标之间的距离是获得应用所需的按钮灵敏度的重要因素。相应的通用指南是，距离应保持在线圈直径的 3% 到 20% 之间。这可确保金属目标在偏转时不会碰到传感器线圈，但又足够接近传感器线圈以获取较高的力灵敏度。如果金属目标距离传感器线圈较远，则按钮灵敏度会降低，可能需要更多按压力才能获得正确的按钮输出。目标距离是设计的重要部分，因此线圈直径也是重要的设计参数。很多时候，此参数受 PCB 上实现的传感器线圈可用空间的限制。此外，匝数、迹线宽度、迹线间距和层数等其他因素都会影响总体线圈设计。迹线宽度和间距受到 PCB 制造工艺的限制，但它对于更改电感线圈的串联电阻或允许包含更多匝数会很有用。通常，建议使用匝数将电感线圈的内径设置在 20% 到 80% 之间，因为内侧匝数不会对磁场产生太大影响。不过在按钮应用中，目标足够接近，因而内侧线圈仍可提供额外益处，所以在设计时可以考虑通过增加匝数来减少内径。有关按钮设计的详细信息，请参阅[适用于 HMI 按钮应用电感式触控系统设计指南](#)。

对于此参考设计，按钮的机械结构包括 3D 打印外壳、PCB 和提供目标表面的金属带。按钮的 PCB 空间在此设计中不构成问题，因此为线圈设计选择了 8mm 直径。[LDC 计算器工具电子表格](#)用于确定剩余的线圈参数。使用了 5mils 的迹线宽度和间距，每层匝数为 8。这使线圈内径略小于 4mm。换言之，线圈填充比（内径除以外径）约为 50%。对于大部分按钮设计，更大限度地降低线圈填充比能够提高灵敏度，但这需要目标表面非常接近于线圈才能从中获益。在其他情况下，最好将填充比保持在 20% 到 80% 之间，以更大限度地提高设计的 Q 系数。这是一块双层板，所以线圈设计中的层数设置为二。为此传感器设计选择的电容值为 220pF，因此使频率为 8.396MHz。

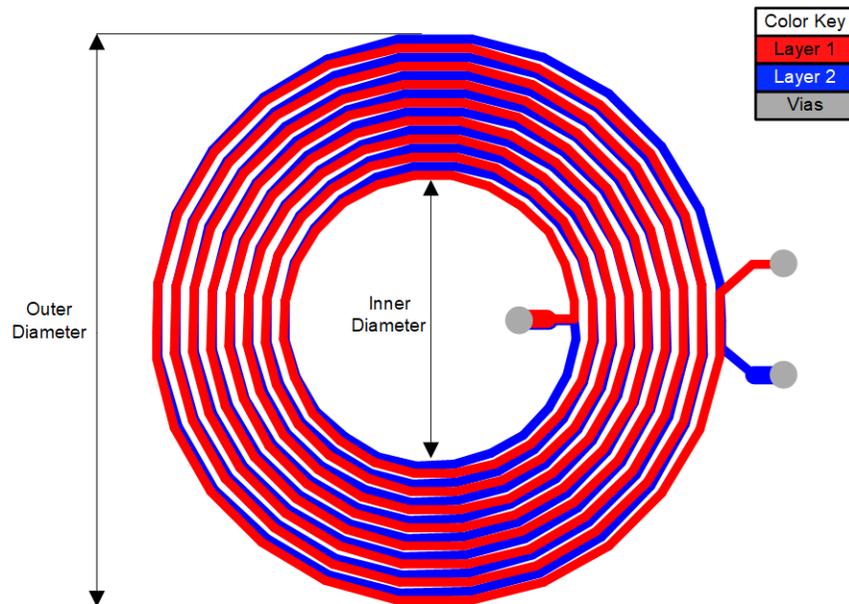


图 2-2. TIDA-060039 LDC 传感器线圈布局

根据线圈直径，目标距离确定为距离线圈 0.8mm。因此，目标完全处于线圈直径 3% 到 20% 的建议范围内，这可提供对按钮表面上的按压力的高灵敏度。返回计算器电子表格，可以输入目标距离以再次检查设计选择。目标

距离为 0.8mm 时，传感器频率现在为 11.081MHz，Q 系数为 0f 26。如果有任何最终参数超出器件范围，电子表格将发出警告，但在本例中未显示警告。

表 2-1. LDC 线圈计算器输出

说明	位号	值	单位
总电感 (无目标)	L_{TOTAL}	1.604	μH
传感器工作频率 (无目标)	f_{RES}	8.396	MHz
R_P (无目标)	R_P	3.19	$k\Omega$
Q 系数	Q	37.00	
自谐振频率 (估算值)	SRF	62.831	MHz
目标距离	D	0.800	mm
传感器电感 (目标交互)	L'	0.921	μH
传感器频率 (目标交互)	f_{RES}'	11.081	MHz
R_P (目标交互)	R_P'	1.68	$k\Omega$
Q 系数 (有目标)	Q'	26.0	

按钮表面采用 3D 打印技术，因此它还包括按钮设计所需的垫圈，而无需使用单独的垫圈材料。支架和按钮表面均为 1mm 厚，因此表面带有一点弹性，并可根据需要设置目标高度。金属带放置在支架之间的按钮表面内部，以便在按钮表面受力时，它可在所需区域发生偏转。金属带的厚度使目标距传感器线圈约 0.8mm。

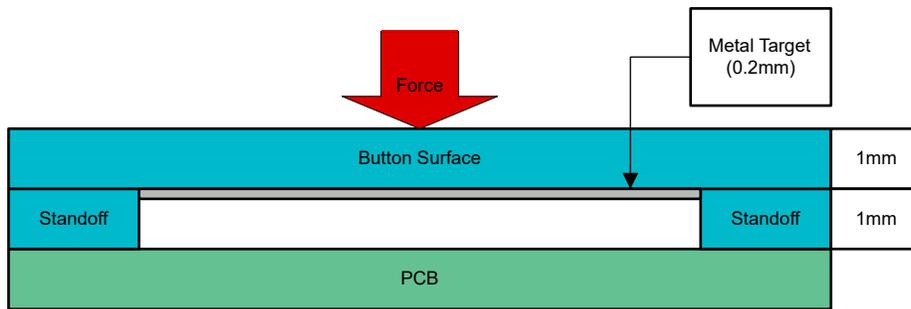


图 2-3. 电感式触控按钮层叠

按钮表面的材料会影响金属目标的偏转程度。更加坚硬的材料或能够吸收按压力的材料会使偏转减少，因此需要更大的力才能检测到按钮按压力。在考虑按钮表面厚度时，也要将这一点考虑在内。LDC 计算器工具电子表格包含一个选项卡，用于在已知材料的杨氏模量和泊松比时，确定材料的偏转度。此设计使用尼龙 12 进行 3D 打印，因此表面若受力 2N，预计偏转约为 20 μm 。这一偏转量对于此按钮设计来说是足够的，因为目标非常靠近第一个传感器。

在按钮表面内部使用金属带或较小的金属目标能够让非金属材料用于按钮制造。性能根据用于目标的金属而有所不同。使用具有高导电性的金属可更大限度地提高按钮灵敏度。因此，铜和铝带是理想选择，因为它们具有高导电性，并可轻松切割以适应按钮设计中的垫圈。替代方法是，将金属层附加到按钮表面，并在金属层和 PCB 传感器之间放置垫圈，如图 2-4 所示。有关按钮设计的详细信息，请参阅适用于 HMI 按钮应用的电感式触控系统设计指南应用手册。

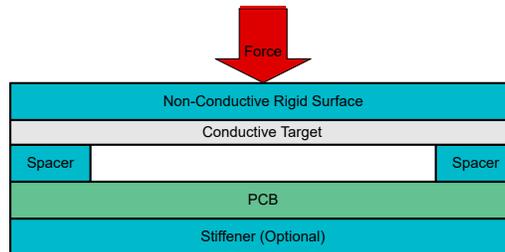


图 2-4. 非导电式触控按钮替代层叠示例

2.2.2 传感器线圈放置

由于添加了 COM 引脚，并将传感器电容器放置在了器件旁而非线圈旁，LDC3114 允许在远离 IC 的位置放置传感器线圈，而非放在 IC 旁。这能够改进线圈的 EMI 响应，并且在大多数情况下无需额外滤波。传感器线圈的位置与 IC 的距离不同，因此它们的布线长度有所不同，这会导致每个线圈的串联电阻值略有不同。这还会导致不同传感器的谐振频率略有不同，但由于按钮应用使用基线跟踪算法，它不需要精确测量每个通道，与初始数据值相比，数据变化更加重要。

2.2.3 从多个 LDC 收集数据

LDC3114 使用相同的 I2C 地址，因此使用 I2C 多路复用器与每个器件单独进行通信。每个 LDC3114 在默认 40SPS 上驱动四个传感器线圈。触控按钮不需要高速运行，因此无需增加采样速率，轮询每个器件以获得其数据也不会导致触控按钮的延迟问题。对于电池供电应用，可以降低采样速率，并可监控 LDC3114 的数字输出而无需使用 I2C 数据。在此设计中，与主控制器相连的连接器上的 GPIO 端口有限，因此将从每个器件的 OUT 寄存器读取数字输出。

2.2.4 磁旋钮的实现

TMAG5273 是用于在此设计中实现旋钮的 3D 霍尔效应传感器。它是 3D 器件，可以检测磁体的角度和幅度，磁体可在旋钮上启用按钮功能。此器件的集成式 CORDIC 引擎能够在此应用中轻松实施角度位置感测。磁体角度通过器件寄存器报告，因此无需从 MCU 进行计算。可在此应用中使用的两个类似替代产品是 TMAG5170-Q1 和 TMAG5173-Q1。这两款器件在提供类似功能的同时，还提供通过汽车认证的选项。这些器件具有内置 CORDIC 引擎，并通过寄存器报告磁体角度和幅度。这三个器件略有不同，TMAG5170-Q1 和 TMAG5173-Q1 是分别使用 SPI 和 I2C 进行通信的高精度器件，而 TMAG5273 是通用低功耗器件并使用 I2C 进行通信。此参考设计不需要高分辨率来显示角度，并使用 I2C 作为主通信协议，因此选择了 TMAG5273。如果需要汽车认证，可以改用 TMAG5170-Q1 或 TMAG5173-Q1。

此器件中使用的磁体是 N42 径向圆柱磁体，直径为 1/4 英寸，厚度为 1/8 英寸。选择此磁体是因为它提供的输入使用满量程输出范围中的很大一部分。当在设计中的适当距离下使用时，它能为器件提供更好的 SNR 性能，同时尺寸小且易于获取。

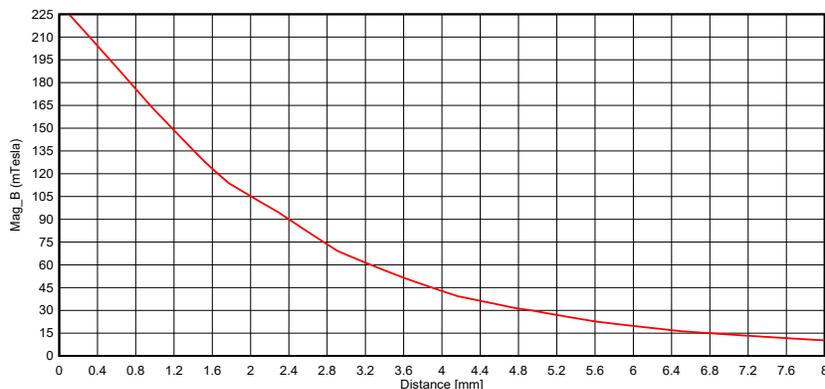


图 2-5. 远距离磁场强度

旋钮的按压功能通过向设计添加弹簧来实现。大部分弹簧为铁磁材料并会与磁场相互作用，但为此设计选择的磁体具有很强的磁场，可以实现此类弹簧，无需找到特定的非铁磁弹簧。不过，在此设计中，磁场强度的减弱也会使 SNR 降低。可通过在磁测量中求取平均值来解决这一问题。TMAG5273 的寄存器设置可用于更改传感器数据的平均值。此应用不需要高速测量，因此选择了最大平均值以获得一致结果。也可以将平均值降低至所需值，并使用器件中的睡眠计时器，在低功耗应用的采样之间将器件置于低功耗模式。

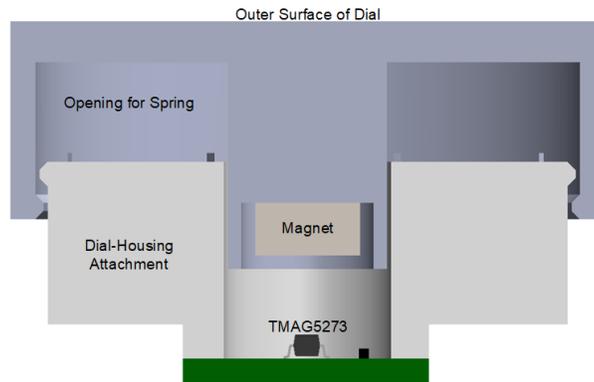


图 2-6. 磁旋钮层叠

了解磁体与传感器之间的距离以及磁体属性后，可使用[角度误差计算工具](#)来估算角度误差。不过，由于此应用不需要快速采样速率，应用了高采样平均值的 CORDIC 算法将提供足够精确的旋钮位置信息。

2.2.5 CORDIC 算法

内置 CORDIC 算法使用两个磁轴来确定角度数据。也可以使用线性磁轴数据通过外部算法来计算角度。若要使用内部 CORDIC 算法，需使用器件中 `SENSOR_CONFIG_2` 寄存器的 `ANGLE_EN` 位来选择所需磁轴。此设计使用 X 和 Y 轴来确定磁体角度，因此将位设置为 `0x1`。除此以外，还必须基于预期磁场强度来设置磁感应范围。配置完成后，可以直接读取 `ANGLE_RESULT_MSB` 和 `ANGLE_RESULT_LSB` 寄存器，以通过 CORDIC 算法获得磁体角度。最后，通过更改 `CONV_AVG` 寄存器设置，向器件采样应用平均值。这可提高器件的 SNR 性能，并使 CORDIC 输出的角度信息更加精确。

2.3 重点产品

2.3.1 LDC3114-Q1

LDC3114-Q1 是一款可在各种材料上实现人机界面 (HMI) 触控按钮设计的电感式感应器件，该器件在面板内的小型印刷电路板 (PCB) 上安装有线圈，可测量导电目标的小幅偏移。这种技术允许访问表示电感值的原始数据，因此可用于针对汽车、消费和工业应用中金属目标的精密线性位置感测。电感式传感解决方案不受湿度或油污和灰尘等非导电污染物的干扰。

LDC3114-Q1 的按钮模式可自动校正导电目标出现的任何变形。LDC3114-Q1 提供匹配良好的通道，可实现差分 and 比例式测量，从而对温度和机械漂移等环境和老化条件提供补偿。LDC3114-Q1 还提供了超低功耗模式，适用于电池供电应用中的开/关按钮或位置传感器。

2.3.2 TMAG5273

TMAG5273 是一款低功耗线性 3D 霍尔效应传感器，适用于各种工业和个人电子产品应用。此器件在 X、Y 和 Z 轴集成三个独立的霍尔效应传感器。精密模拟信号链和集成的 12 位 ADC 使测量的模拟磁场值数字化。在支持多个工作 VCC 范围的同时，I2C 接口可实现与低电压微控制器的无缝数据通信。该器件集成了温度传感器，可用于多种系统功能，例如给定磁场的热预算检查或温度补偿计算。

可以通过 I2C 接口来配置 TMAG5273，以实现磁轴和温度测量的任意组合。此外，该器件可以配置为各种电源选项（包括唤醒和睡眠模式），从而支持设计人员根据其系统级需求优化系统功耗。多个传感器转换方案和 I2C 读取帧有助于优化吞吐量和准确性。专用的 INT 引脚可以在低功耗唤醒和睡眠模式期间充当系统中断，也可以被微控制器用来触发新的传感器转换。

集成角度计算引擎 (CORDIC) 为同轴和离轴角度测量拓扑提供完整的 360° 角度位置信息。使用用户选择的两个磁轴执行角度计算。此器件具有磁增益和偏差校正功能，可减轻系统机械误差源带来的影响。

2.3.3 DRV2605

DRV2605 器件设计为通过一条共用 I2C 兼容总线对 ERM 和 LRA 传动器进行极其灵活的触觉控制。此控制机制使主机处理器无需再生成脉宽调制 (PWM) 驱动信号，从而无需使用成本高昂的计时器中断和硬件引脚。

DRV2605 器件具有内容丰富的集成库，可提供来自 ERM 和 LRA Immersion 的 100 多种已获许可的效果，从而不再需要设计触控波形。DRV2605 器件可提供许可版 Immersion TouchSense 2200 软件，其中包含 2200 效果库且具有 2200 “audio-to-vibe” 功能。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 I2C 从主机直接播放波形。DRV2605 器件还包含一个智能环路架构，此架构可轻松实现 LRA 自动谐振驱动以及优化反馈的 ERM 驱动。这种反馈提供了自动过驱和制动，从而生成了一个简化的输入波形图并实现了可靠的电机控制和稳定的电机性能。此功能用于控制此参考设计中的 LRA。

2.3.4 TLV75518

TLV755P 是一款超小型低静态电流、低压差稳压器 (LDO)，可提供 500mA 拉电流，具有良好的线路和负载瞬态性能。TLV755P 经过优化，支持 1.45V 至 5.5V 的输入电压范围，从而适用于各种应用。为尽可能降低成本和缩小解决方案尺寸，此器件可在 0.6V 至 5V 范围内提供固定输出电压，以支持现代微控制器 (MCU) 更低的内核电压。此外，TLV755P 具备带有使能功能的低 IQ，从而能够更大幅度地降低待机功耗。此器件具有内部软启动功能，旨在降低浪涌电流，因此可为负载提供受控电压并在启动过程中更大幅度地降低输入电压压降。关断时，该器件可主动下拉输出以使输出快速放电并实现已知的启动状态。

此参考设计使用此器件的 1.8V 输出选项为 LDC3114 器件和电平转换器供电。

2.3.5 TCA9534

TCA9534 是一款 16 引脚器件，可为两线双向 I2C 总线 (或 SMBus) 协议提供 8 位通用并行输入和输出 (I/O) 扩展。该器件可在 1.65V 至 5.5V 的电源电压范围内运行，从而允许使用各种器件。该器件支持 100kHz (标准模式) 和 400kHz (快速模式) 时钟频率。当开关、传感器、按钮、LED、风扇和其它类似器件需要额外的 I/O 时，I/O 扩展器 (如 TCA9534) 可提供简单解决方案。在此参考设计中，使用了多个此类器件来控制板上的 LED。

2.3.6 PCA9543

PCA9543A 是一款由 I2C 总线控制的双路双向转换开关。SCL/SDA 上行对扩展到两个下行对或者通道。根据可编程控制寄存器的内容，可选择任一单独的 SCn/SDn 通道或者这两个通道。提供两个中断输入 (INT1-INT0)，每个中断输入针对一个下行对。一个中断输出 (INT) 是两个中断输入的与 (AND) 运算结果。一个低电平有效复位 (RESET) 输入使得 PCA9543A 能够在其中一个下行 I2C 总线长时间处于低电平的情况下恢复。将 RESET 下拉为低电平会使 I2C 状态机复位，并且使这两个通道取消选中，这一功能与内部上电复位功能的作用一样。此器件在该参考设计中用于允许与两个 LDC3114-Q1 器件通信，因为它们共用同一个 I2C 地址。

2.3.7 传感器控制板

传感器控制板 (SCB) 是使用 MSP432™ MCU 来控制参考设计的 MCU 板。此控制板处理设计的固件和 USB 接口。SCB 可轻松断开，并用于所支持的不同 EVM。有关 SCB 的详细信息，请访问[评估模块的 TI 传感器控制板 \(SCB\) 网站](#)。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 固件和编程

此参考设计使用 SCB 来控制板上的不同 IC。此设计中的固件使用 Code Composer Studio™ 进行开发。采用适当固件刷写 SCB 后，可将其用于此参考设计。SCB 可用于多个 EVM，因此可使用 GUI 上传适当固件来轻松刷写 SCB。

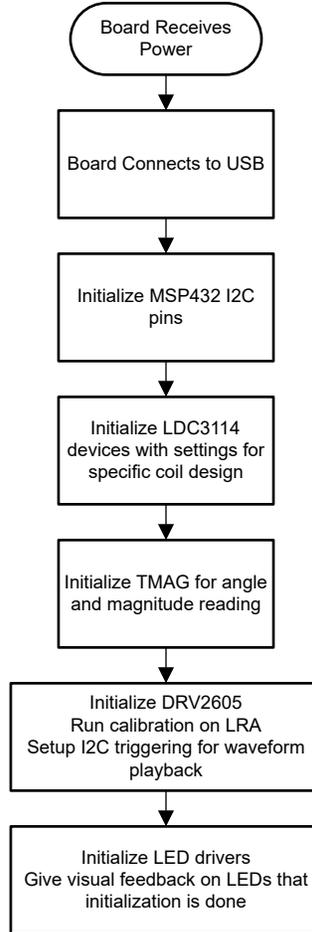


图 3-1. 初始化流程图

此设计中的固件从初始化板上的不同 IC 开始。LDC3114 针对按钮应用设置，并根据上面讨论的线圈设计设置寄存器。DRV2605 触觉驱动器经过设置，以在接收到 I2C 命令时执行触觉反馈。此器件还针对附加到板的特定 LRA 进行设置，并在每次初始化时运行校准检查。TMAG5273 经过设置，以使磁场的 X 和 Y 分量用于旋转计算。还可以配置此器件以在特定条件下发送中断，但此设计未使用此配置。此外，此设计中的每种模式均使用 TMAG5273 的角度以确定对旋钮位置启用的 LED。它的行为类似于 12 位置选择器，所以向旋钮角度输出添加了迟滞。这可防止以下情况：角度正好位于两个 LED 输出之间的线路上，导致两个 LED 来回闪烁。它的作用相当于对 12 个 LED 中每个 LED 之间的位置使用物理隔离方法。

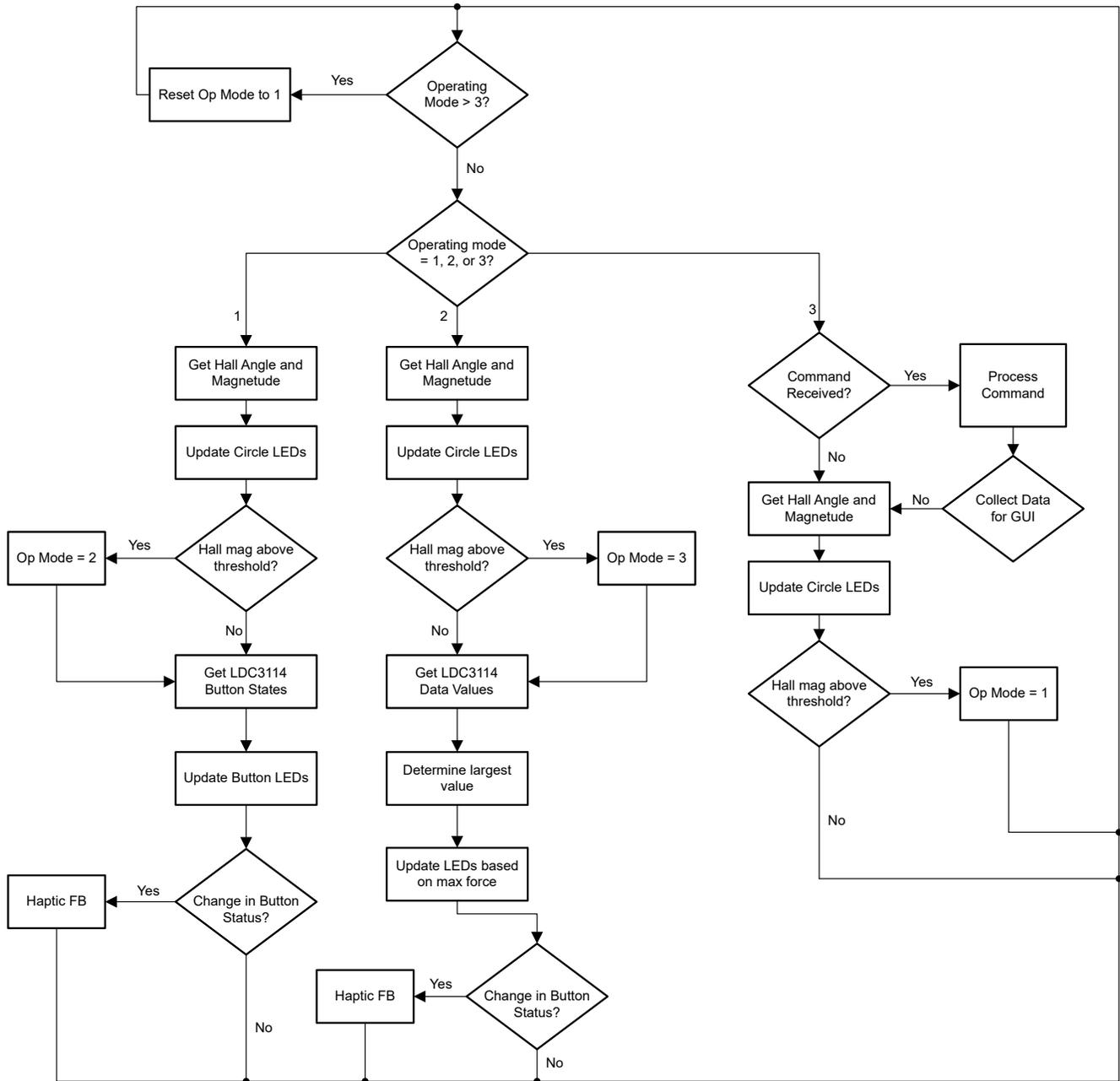


图 3-2. 工作模式流程图

在正常工作期间，此参考设计具有三种不同的工作模式，可改变电感式触控按钮的功能。

3.1.1 工作模式 1

此参考设计在启动时默认进入工作模式 1。此模式使用 LDC3114 的基线跟踪算法来实现八个不同的触控按钮。按下每个按钮时，LDC3114 的数字输出将受到监控，并与板上的 LED 相关联。LDC3114 的数字输出会在基线算法数据高于按钮阈值时触发。触发发生后，根据器件的极性设置，器件上的引脚和 OUT 寄存器都会将按钮状态显示为高电平。在板的每一侧按下按钮时，用于显示按钮反馈的 LED 将仅亮起一个 LED。这是因为 LDC3114 的 MAXWIN 功能可防止发生同一侧的两个按钮被按下的情形，即由于用力按下一个按钮而触发旁边的按钮。这通过 LDC3114 进行应用，因此每个器件的按钮按下操作可同时显示在 LED 上。有关 LDC3114 内部算法的详细信息，请参阅 [LDC211x 和 LDC3114 内部算法功能](#) 应用手册。在模式 1 中，按下磁旋钮会使工作模式进入模式 2。

3.1.2 工作模式 2

此参考设计的第二个工作模式与第一个非常相似。LDC3114 仍在基线跟踪模式下进行设置，但 LED 报告的方式不同。此模式查看在所有按钮上采用的基线跟踪算法中的数据值，并确定哪个按钮具有最高的按压力。然后，LED 将根据按钮所受的按压力亮起，力越大，亮起的 LED 越多。每次进入此模式时，最大力将重置为标准值。如果用足力气按下按钮，将保存新的最大力值以与其他按钮压力比较。例如，如果起始最大值为 200，则数据值为 100 时前四个 LED 将亮起。如果按钮算法报告结果为 400，则新的最大值将设置为 400，并亮起所有 LED。然后，下一次数据值为 100 时，只有两个 LED 亮起。在按下磁旋钮后，工作模式将更改为模式 3。

3.1.3 工作模式 3

此参考设计的工作模式 3 会在一个 LDC3114 中禁用按钮算法，并且从中可访问按钮的原始数据响应。按钮 LED 将进入固定状态以表明工作模式 3 处于活动状态。固件等待 GUI 的命令以收集数据。在收到流化命令时，固件会将所有四个通道的原始数据结果从 LDC 流化到 GUI。这可用于像 BOOST-LDC3114EVM 在原始数据模式中的工作方式一样，获取图中数据。

3.2 测试设置

此参考设计上的按钮按照相同的参数进行设计，但由于存在机械容差，它们在性能上可能略有不同。由于设计将进行 3D 打印，因此不同的打印机或打印技术会产生不同的精度和容差。此外，如果将其他材料用于 3D 打印，则按钮表面的偏转会更改，可能需要更大的按压力才能触发按钮输出。即使单一打印中的按钮全部使用相同的打印机和材料，按钮所需的按压力仍可能出现差异，在设计为手动装配的情况下尤其如此。用于保持机械容差的胶带如果在各单元之间存在不一致或差异，就会对按钮产生影响。为了展示这一点，使用了模拟测力计向按钮表面施加力。随后记录触发每个按钮阈值所需的按压力，以及不同按压力下的原始数据响应。此外，测试针对两种不同的材料类型并使用不同的 3D 打印流程来执行，同时保持相同的机械设计。

3.3 测试结果

按压每个按钮所需的力表明了机械结构的差异，如果使用的材料并非完全一致，或设计容差大到足以影响性能，就会出现此情况。此外，使用两种不同材料进行的测试也表明了它们之间的差异。

表 3-1. 需要的按钮按压力

按钮位置	ABS 左 (牛顿)	ABS 右 (牛顿)	尼龙左 (牛顿)	尼龙右 (牛顿)
1	7	5	2	3.75
2	20	3.5	3	0.75
3	16	1.5	1	1.5
4	3	1	3	1

3.3.1 ABS 力响应

按钮之间显示的差异不仅仅是材料差异所致。测试单元为手动装配，因此在机械对齐和产生机械隔离的粘附方面存在差异。此差异会导致一些按钮的响应不佳，可以通过可重复的受控装配流程来减轻此差异。可以通过向每个按钮应用不同的增益系数来补偿力响应，以便它们最终在相同的力下提供按钮输出。为更好地展示这一点，对每个按钮施加不同的力以收集原始数据。图 3-3 显示了 ABS 按钮表面的力响应。

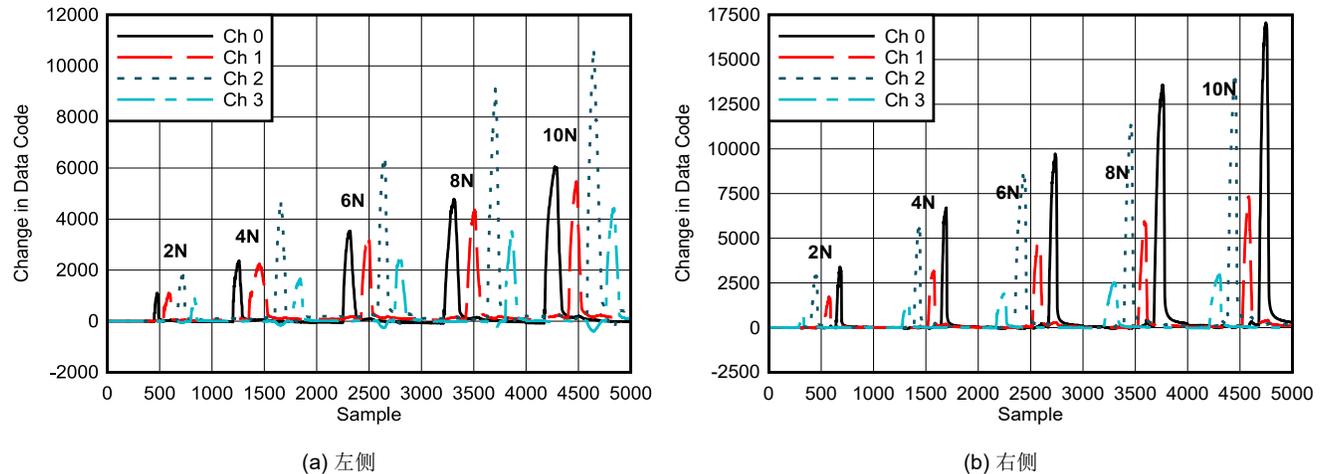


图 3-3. ABS 力响应

3.3.2 ABS 增益校正

ABS 力响应表明了按钮的不同灵敏度。即使按钮的设计相同，但由于 3D 打印中存在的差异，每种情况下的机械功能有所不同。若要达到更加均匀的响应，可以向每个通道应用增益。应用各个增益后，可以在图 3-4 中查看力响应。

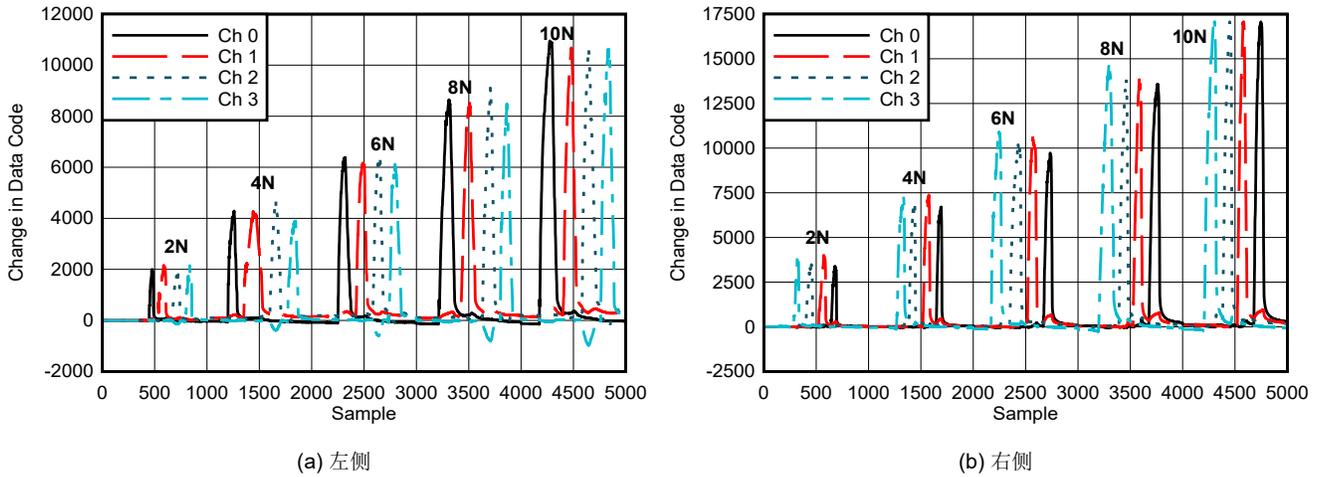


图 3-4. ABS 增益校正

3.3.3 尼龙力响应

同样，将收集和比较尼龙 12 力响应。

表 3-2.

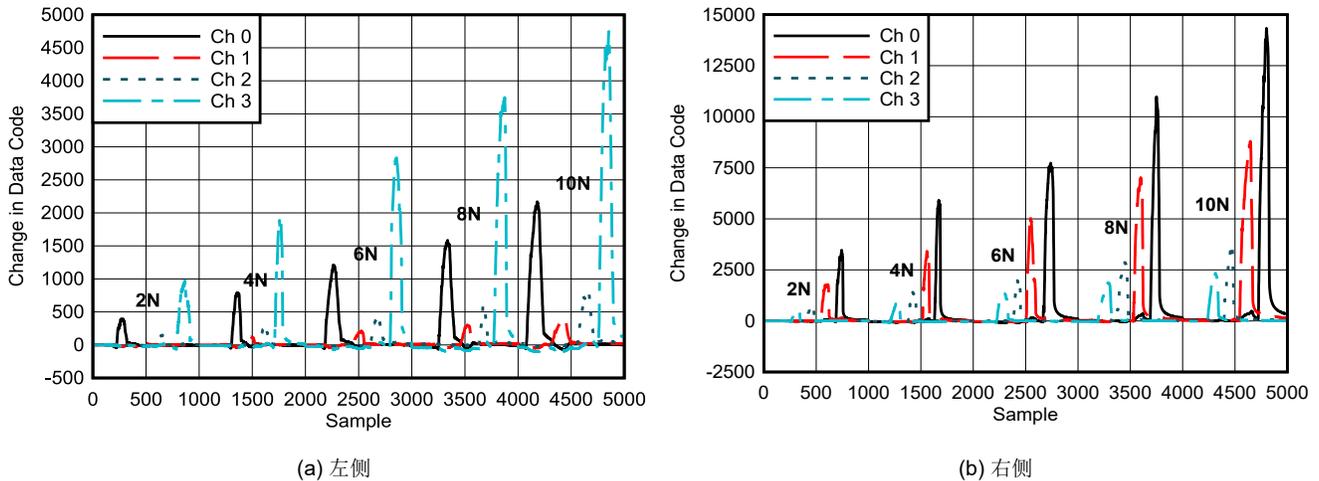


图 3-5. 尼龙力响应

3.3.4 尼龙增益校正

尼龙在需要的按钮压力方面范围更大，因此增益校正需要比 ABS 更大的值才能获得均匀的反应。

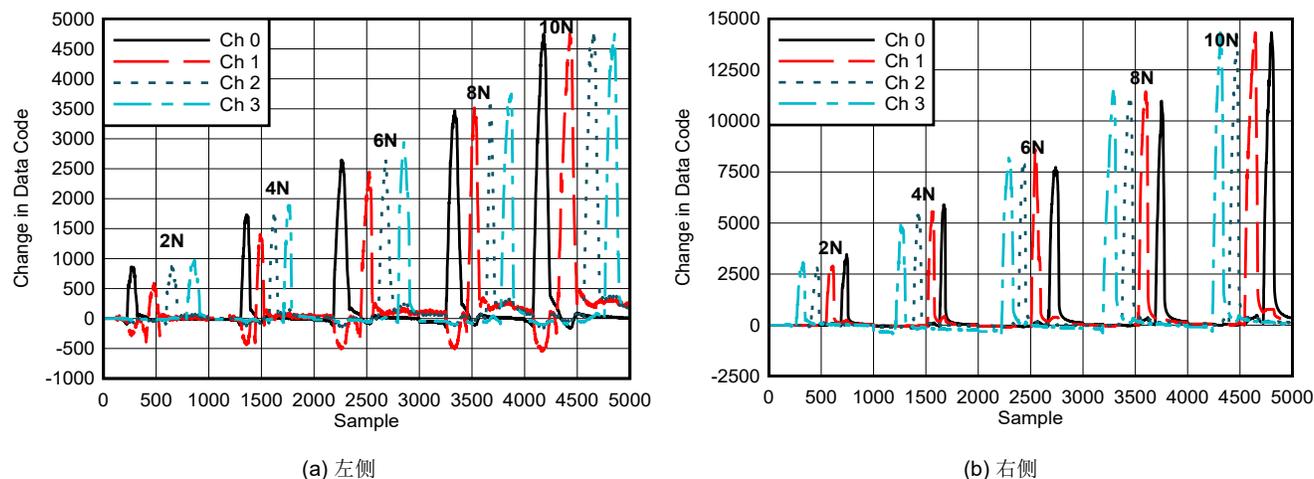


图 3-6. 尼龙增益校正

增加增益校正的缺点是，对于某些按钮通道，在按下旁边的其他按钮时，这些按钮通道会出现反向响应。这是按钮设计的机械性质所致，按下一个按钮会导致另一按钮表面轻微弹离传感器线圈。数据沿与按钮按压相反的方向移动，因此可以在应用中忽略此效应，并且器件中的基线算法具有额外工具来处理此效应，因此这不会成为问题。尽管如此，可通过尽可能隔离机械运动来更大限度地减少此类情况。

最后，在对两种材料进行增益校正之后，可以发现两者之间的差异。可以从图中看到，与尼龙相比，ABS 对施加的各个压力的响应更大。这在一部分上是由于材料差异，但也与外壳装配有关。在测试单元上，PCB 与按钮表面之间的粘合通过手动完成，这会在设计中造成缺陷。这说明了通过严格的装配流程在单元之间获得一致结果的重要性。

4 硬件元件

3D 打印外壳分为不同元件，并装配到一个最终外壳之中。这些元件针对选择性激光烧结工艺设计，此工艺使用尼龙 12 作为材料。这可使按钮表面具有点弯曲弹性，并能让此旋钮平稳旋转。此设计从外壳底座开始，外壳底座为 PCB 提供刚性放置表面，并提供用于 USB 电缆的一个孔和用于螺栓的多个孔以确保合上外壳。

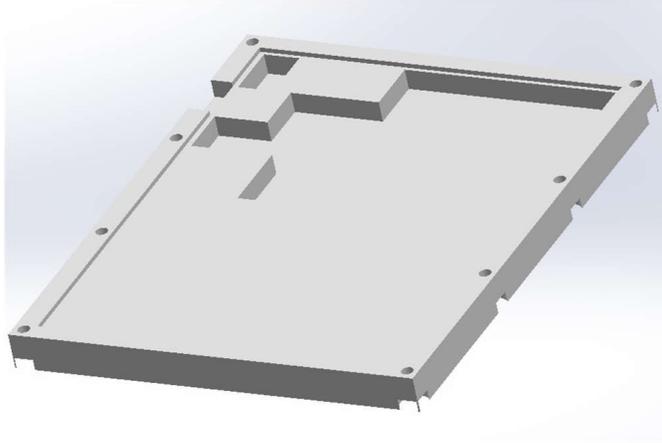


图 4-1. 外壳底座

PCB 和附加的 SCB 位于围绕底座外侧的坡口内。

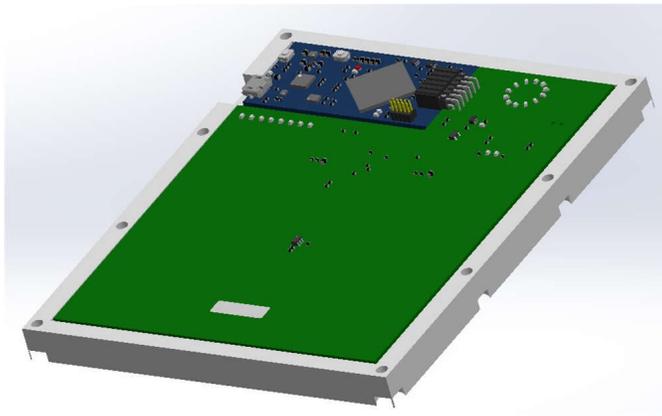


图 4-2. 包含 PCB 的外壳底座

顶盖分为多个部分，因此可以更轻松地使用某些 3D 打印技术进行打印。这些不同部分包括按钮表面、旋钮附件、旋钮和用于 PCB 顶部的小顶盖。按钮表面在顶部具有坡口，表明按钮按压的位置，中间有一个孔用于放置旋钮附件。背面的矩形切口用于放置金属目标。为达到更好的机械隔离，按钮盖被粘附到 PCB 并栓接到外壳底座。此设计部分旨在与先前提及的按钮层叠设计相匹配。

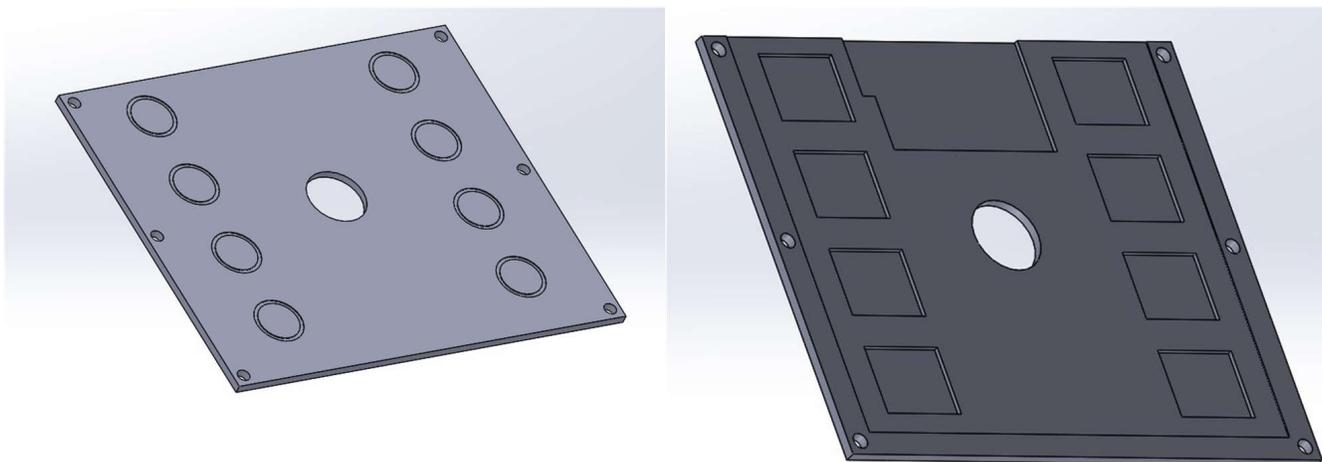


图 4-3. 外壳按钮盖

旋钮附件是一个小圆片，位于按钮表面的孔中。它的主要用途是为旋钮提供一个卡入位置。必须用胶水将旋钮附件固定到按钮表面，以确保它不会在按钮使用时移动。

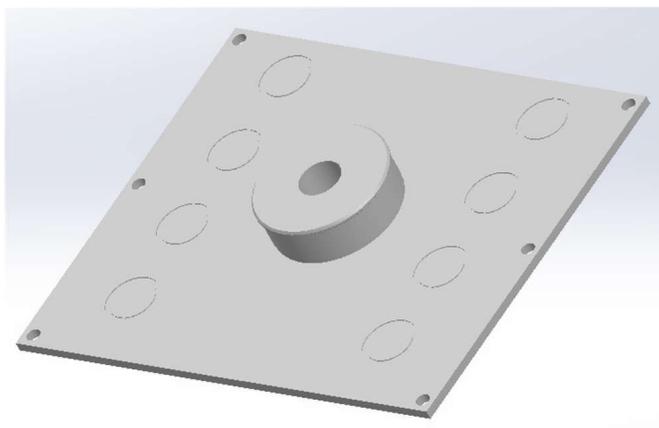


图 4-4. 带旋钮附件的按钮盖

旋钮通过它与旋钮附件之间的弹簧卡入旋钮附件。旋钮也有一个小孔，用于粘合磁体。这能让磁体位于 TMAG5273 正上方，以执行更好的旋转感应测量。

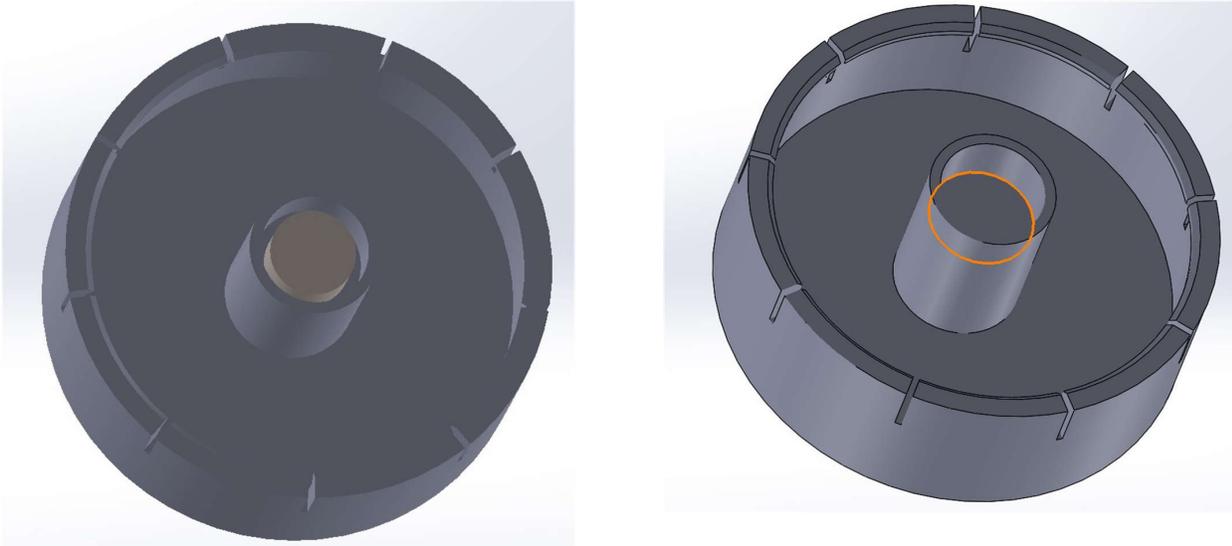


图 4-5. 磁旋钮

小顶盖上有一些切口，用于在盖打开时查看 LED，还有一个切口用于将 USB 电缆连接到 SCB。顶盖的主要用途是盖上底座并将 SCB 固定到位。

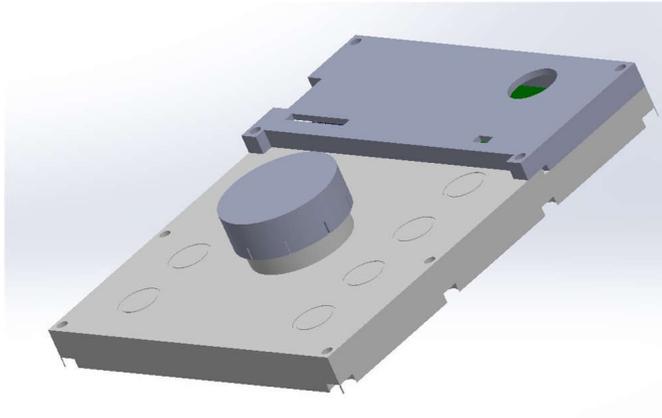


图 4-6. 完整装配

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-060039](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-060039](#) 的设计文件。

5.2 工具与软件

工具

电感式感应设计计算器	有助于进行电感线圈传感器设计的 Excel 电子表格
角度误差计算器	TMAG5170 和 TMAG5273 的磁传感器角度误差计算器

5.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[适用于 HMI 按钮应用的电感触控系统设计指南](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI)，[人机接口电感式触摸按钮的设计注意事项](#) 应用简报
- 德州仪器 (TI)，[LDC211x 和 LDC3114 内部算法功能](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI)，[电感式触控 - 配置 LDC2114 和 LDC3114 触控按钮灵敏度](#) 应用报告

5.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

5.5 商标

TI E2E™, MSP432™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (April 2022) to Revision A (April 2024)	Page
• 添加了 TMAG5173-Q1 作为附加器件替代产品.....	6

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司