

适用于 HMI 按钮应用的 电感式触控系统设计指南



Yibo Yu, Chris Oberhauser

摘要

“电感式触控系统设计指南”概述了适用于人机界面 (HMI) 按钮应用的典型传感器机械结构和传感器电气设计。“机械设计”一章讨论了影响按钮灵敏度的几个因素，包括金属选择、传感器几何形状、目标到线圈距离对灵敏度的影响以及机械隔离，还提供了两个用于电感式触控按钮的通用层堆叠选项。“传感器设计”一章重点介绍了柔性 PCB 传感器的电气要求和实现出色灵敏度的注意事项。

内容

1 机械设计	2
1.1 工作原理.....	2
1.2 按钮结构.....	2
1.3 机械偏转.....	3
1.4 影响灵敏度的机械因素.....	4
1.5 触控按钮层堆叠.....	5
1.6 传感器安装参考.....	6
1.7 传感器安装技术.....	7
1.8 机械隔离.....	10
2 传感器设计	11
2.1 概述.....	11
2.2 电感式触控.....	13
2.3 LDC211x/LDC3114 设计边界条件.....	13
2.4 传感器物理结构.....	14
2.5 示例传感器.....	19
3 总结	23
4 修订历史记录	23

1 机械设计

实现有效的电感式触控解决方案需要适当的系统机械设计和匹配的传感器设计。机械设计应考虑材料属性、按钮几何形状以及传感器结构和安装方式。以下各节将分别讨论这些主题。

1.1 工作原理

要与电感式线圈传感器保持固定距离，可考虑扁平金属板，如图 1-1 所示。如果对金属板施加力，金属会略微变形。例如，对 $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的铝板施加 1N （大约为计算机鼠标的重量）的力时，会发生大概 $0.2\mu\text{m}$ 的变形。这样的变形会使板的另一侧更靠近 LDC 传感器。在撤除作用力后，该按钮表面会恢复至原始形状。

当导电材料靠近电感器时，磁场会在导体表面感应出循环涡流。涡流是导体的距离、尺寸和成分的函数。如果导体向电感器偏转（如图 1-1 所示），将产生更多涡流。

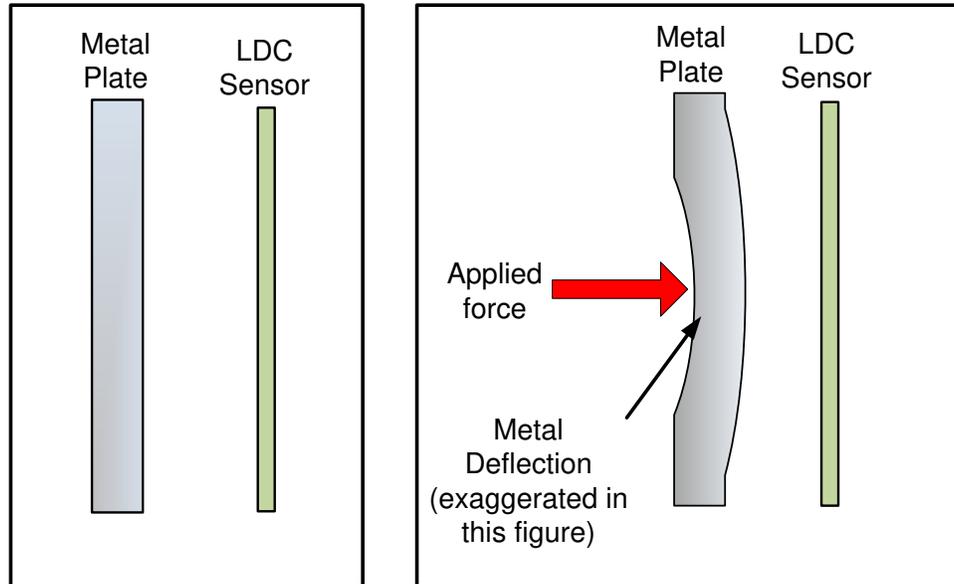


图 1-1. 金属偏转

涡流会产生自己的磁场，这与电感器产生的原始磁场相反。这种效应会降低系统的电感，从而增加传感器频率。当导电目标靠近传感器时，它们之间的电磁耦合会变得更强大。因此，传感器频率的变化也更加显著。

1.2 按钮结构

基于上述原理，我们能够构建可用作按钮的金属板和传感器组合。传感器的灵敏度会随目标的靠近而增加，导电板应放置在非常靠近传感器的位置（通常距离为传感器直径的 10%）。在如此近的距离下，LDC 能可靠地测量 $0.2\mu\text{m}$ 的偏转。对于小幅偏转，偏转量与施加的力大致成正比。

为了实现稳健的接口，有必要控制传感器和目标之间的距离，这样不会将随机移动当成是按钮按压操作。图 1-2 显示了如何将传感器固定到内表面，这样只有触控力产生朝向传感器的偏转，而任何其他力不会产生朝向传感器的有效偏转。

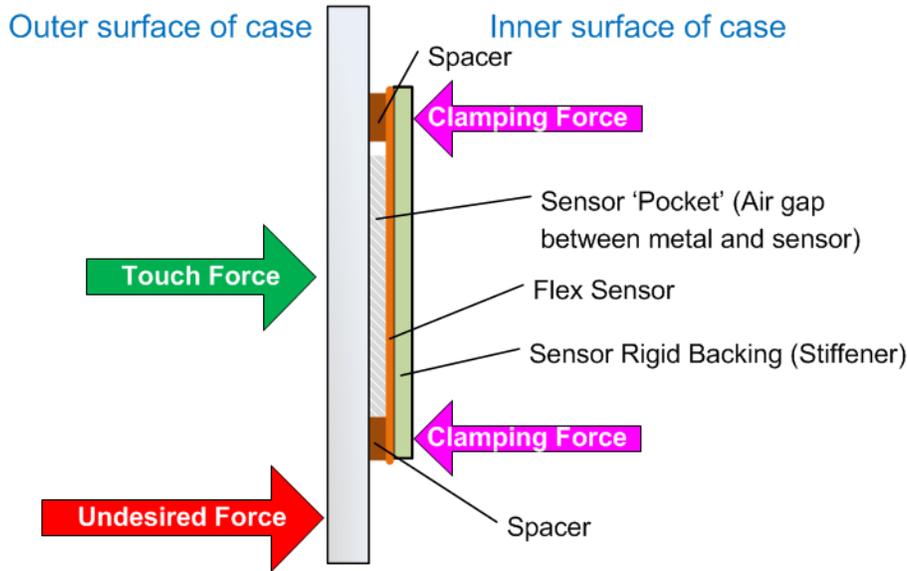


图 1-2. 具有金属目标和 PCB 传感器的按钮结构

如果传感器由 FR4 等刚性 PCB 材料制成，则不需要刚性背衬。

1.3 机械偏转

LDC211x 和 LDC3114 器件测量 LC 谐振器传感器的频率变化。图 1-3 显示了示例柔性 PCB 传感器的频率变化与金属偏转间的关系。金属目标和传感器之间的标称间距为 $150\mu\text{m}$ 。如图所示，频率变化与金属小幅偏转近似呈线性关系。

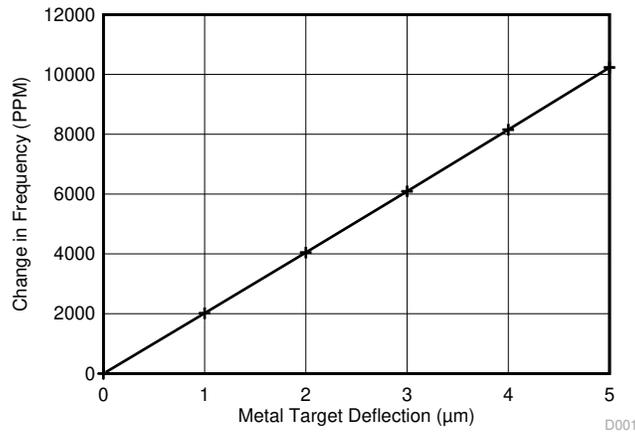


图 1-3. 示例传感器的仿真传感器频率变化 (PPM) 与偏转 (μm) 间的关系

要设计电感式触控按钮系统，TI 建议了解按钮表面的偏转与力特性间的关系。使用机械建模和仿真通常更容易确定这一点。这是为了确保有足够的偏转来实现所需的力阈值。LDC 计算工具的“Metal Deflection”选项卡提供了指定按钮材料和几何形状的金属偏转估算值。

1.4 影响灵敏度的机械因素

按钮性能取决于层堆叠的机械特性以及 LC 传感器的电气参数。下面列出了较为重要的机械因素。

1.4.1 目标材料选择

如节 1.1 所述，电感式按钮基于线圈传感器与金属目标之间的电磁耦合运行。金属目标的机械和电气特性会显著影响按钮的灵敏度。

1.4.1.1 材料刚度

材料选择对在给定金属厚度下实现目标偏转所需力的大小有很大影响。关键材料参数是杨氏模量，它是对金属弹性的度量，测量单位为帕斯卡 (Pa)。具有较低杨氏模量的材料通常柔韧性更强。例如，铝 (AL6061-T6) 的杨氏模量为 68.9GPa，而不锈钢 (例如 SS304) 的杨氏模量约为 200GPa，这使得不锈钢的刚度约为铝的三倍。图 1-4 显示了分别使用这两种材料的给定圆形传感器的偏转与力之间的差异。

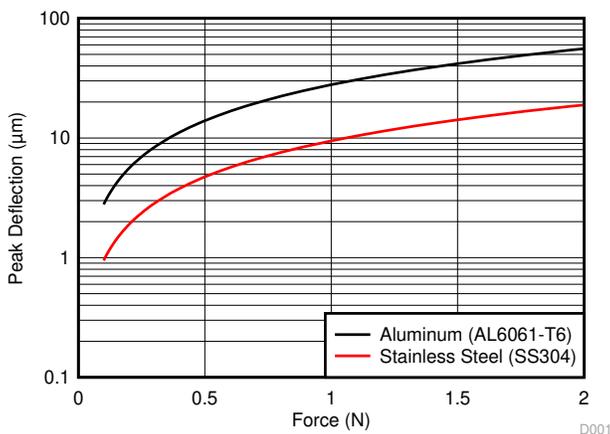


图 1-4. 铝和钢目标的偏转与力，圆形按钮，直径 = 20mm，厚度 = 0.25mm

1.4.1.2 材料导电性

目标材料的导电性越高，表面产生的涡流越多。这会使得与传感器的电磁相互作用更强。因此，材料的导电性应尽可能高，因为这会在给定的目标偏转情况下产生尽可能大的电感变化。SS304 的导电性为 $1.37 \times 10^6 \text{S/m}$ ，而铝的导电性更高，为 $36.9 \times 10^6 \text{S/m}$ 。

一般来说，铝是电感式感应的理想材料选择，因为它既柔韧，又能在感应线圈上产生较大的电感变化。SS304 等材料虽然不像铝那样是理想的材料选择，但也可以使用并提供可靠的结果。

1.4.2 按钮几何形状

电感式触控按钮可采用多种形状，例如圆形、椭圆形或矩形。在设计按钮尺寸和几何形状时，必须考虑给定材料、金属厚度、所需力等可实现的偏转量。对于圆形按钮，假设所有其他参数保持不变的情况下，按钮的直径决定了其刚度或可实现的偏转量。例如，如果以 1N 的力均匀按压 0.6mm 厚的圆形铝制按钮，则直径为 10mm 的按钮的峰值偏转约为 90nm，而直径为 20mm 的按钮的峰值偏转约为 350nm。LDC 计算工具的“Metal Deflection”选项卡提供了指定按钮材料和几何形状的金属偏转估算值。可以通过机械仿真工具获得精确的偏转曲线。

1.4.3 目标和传感器之间的间距

出于电气和机械方面的考虑，金属目标和 PCB 传感器之间的间距非常重要。当金属目标接近线圈传感器时，它可以与更大的电磁场相互作用。因此，对于在更近的标称距离处的相同偏转（例如， $1 \mu\text{m}$ ），电感变化增强会导致频率变化增大（请参阅图 1-5）。也就是说，如果目标更接近传感器，则系统灵敏度更高。

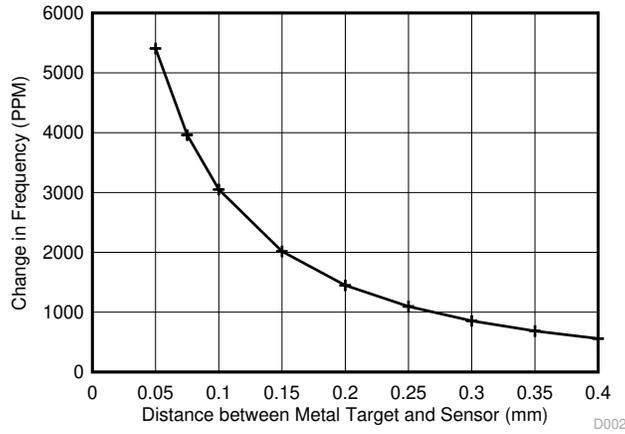


图 1-5. 1 μ m 偏转时的频率仿真变化 (PPM) 与目标距离 (mm) 之间的关系

但是，为了确保有足够的偏转空间，且考虑到制造容差，TI 建议将目标到传感器的标称距离设置为 0.1mm 至 0.2mm。可以通过在金属中为 PCB 与金属齐平的系统创建面向传感器的凹陷区域来实现这种间距，或者在金属和带有切口的 PCB 传感器之间使用一个小垫片，使金属发生偏转，如图 1-6 所示。

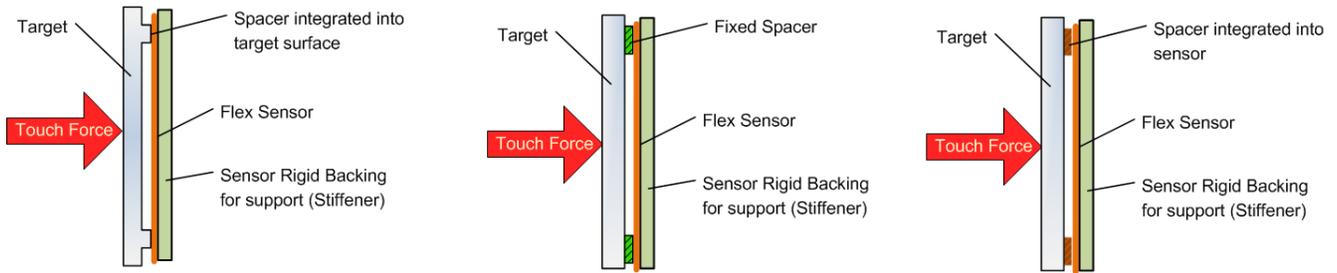


图 1-6. 垫片选项

在传感器和目标之间保持一致的间隔对于确保有效传感至关重要。如果使用垫片，其材料应该是不可压缩的并且具有低温度系数，这样厚度就不会随时间或环境条件而变化。

1.5 触控按钮层堆叠

按钮层堆叠通常包括导电目标、垫片（目标和传感器之间的分隔物）、PCB 线圈传感器和可选的加固基板（柔性 PCB 传感器的支持结构）。有两种常见的方法来实现堆叠，具体取决于表面是否导电。

1.5.1 导电表面

如果在铝或不锈钢等导电表面上实现触控按钮，则可以将该表面用作检测目标。在此配置中，金属目标位于整个堆叠的顶部。用户直接按压金属目标，会使金属本身出现小幅偏转。金属偏转会导致传感器线圈的电感发生变化。

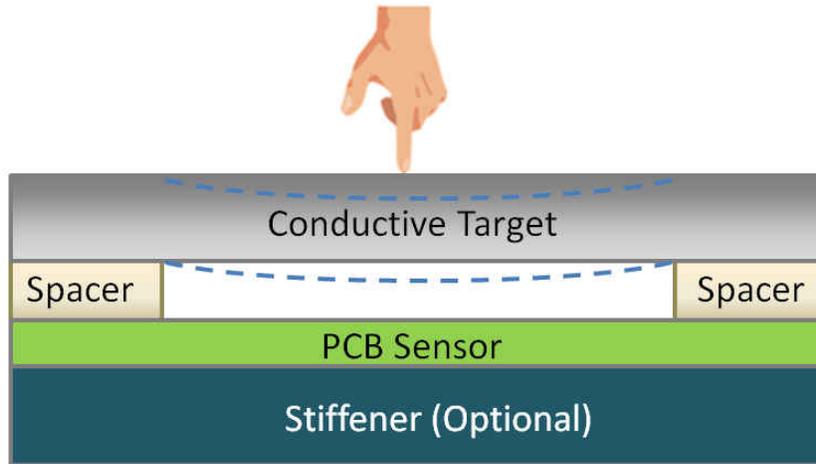


图 1-7. 具有导电表面的层堆叠示例

1.5.2 非导电表面

对于玻璃或塑料等非导电表面，应在该表面下方嵌入一层薄的导电层，如铝或铜层。当用户按压堆叠顶部的刚性表面时，导电层会产生较小偏转，从而更靠近 PCB 传感器。这种替代方法可将电感式触控应用扩展到几乎任何材料的表面。

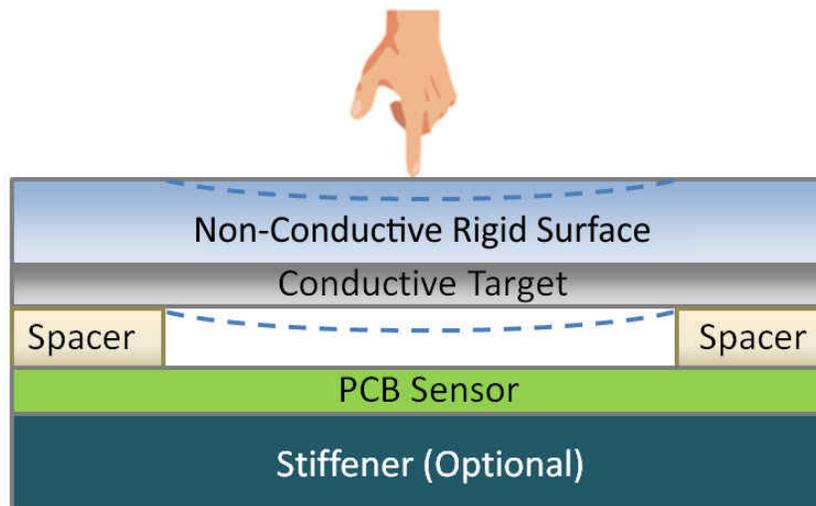


图 1-8. 具有非导电表面的层堆叠示例

1.6 传感器安装参考

通常，线圈传感器应直接连接到金属目标，而不是其他相邻结构，避免支撑结构发生机械运动，从而导致传感器意外移动。当传感器安装到会相对于目标移动的其他一些相邻结构时，这样的移动可能会被误解为按压按钮。

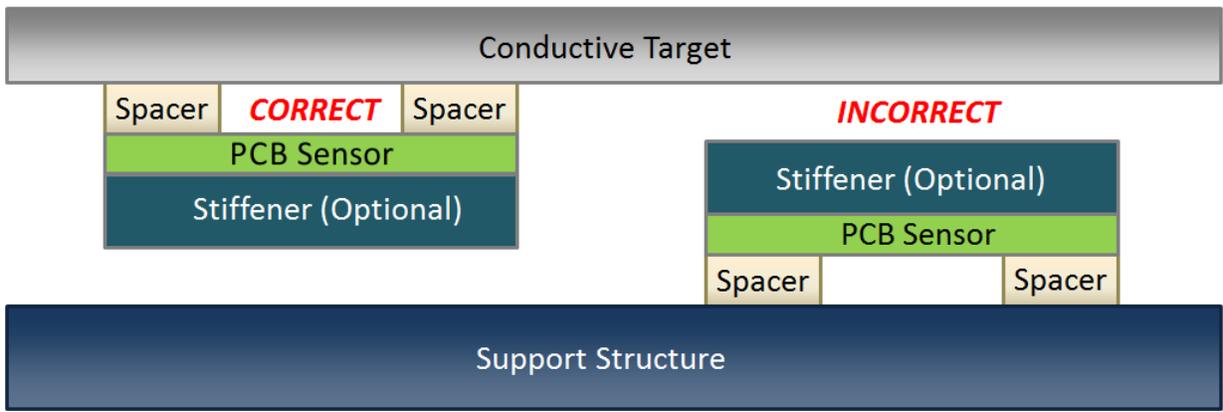


图 1-9. 安装在金属目标 (正确) 和支撑结构 (错误) 上的传感器

1.7 传感器安装技术

传感器线圈可以通过多种方式安装到金属目标上。传感器安装技术必须提供一致的性能，同时尽可能减少相邻按钮之间的串扰。也就是说，需要确保按钮区域外的力不会在按钮位置引起较大的局部金属偏转。为了实现这一目标，可以在金属和线圈之间采用垫片使连接变得更牢固。此外，就成本和安装工作量而言，传感器应该更易量产。

下面介绍了三种不同的安装技术，即基于粘合剂、基于弹簧和基于插槽。

1.7.1 基于粘合剂

安装传感器的最简单方法是在垫片上涂抹粘合剂，然后将其粘接到金属目标上。基于粘合剂的系统不需要额外的机械元件，适用于进行快速原型设计。这种方式的缺点是粘接流程的可重复性较低。

图 1-10 显示了手机外壳原型上两个侧按钮的图像。每个按钮线圈的尺寸为 $8\text{mm} \times 2.7\text{mm}$ 。外壳内部凹陷，用来放置线圈。这不仅能够减小线圈使用的电路板面积，还可降低金属侧壁的刚度并提高灵敏度。

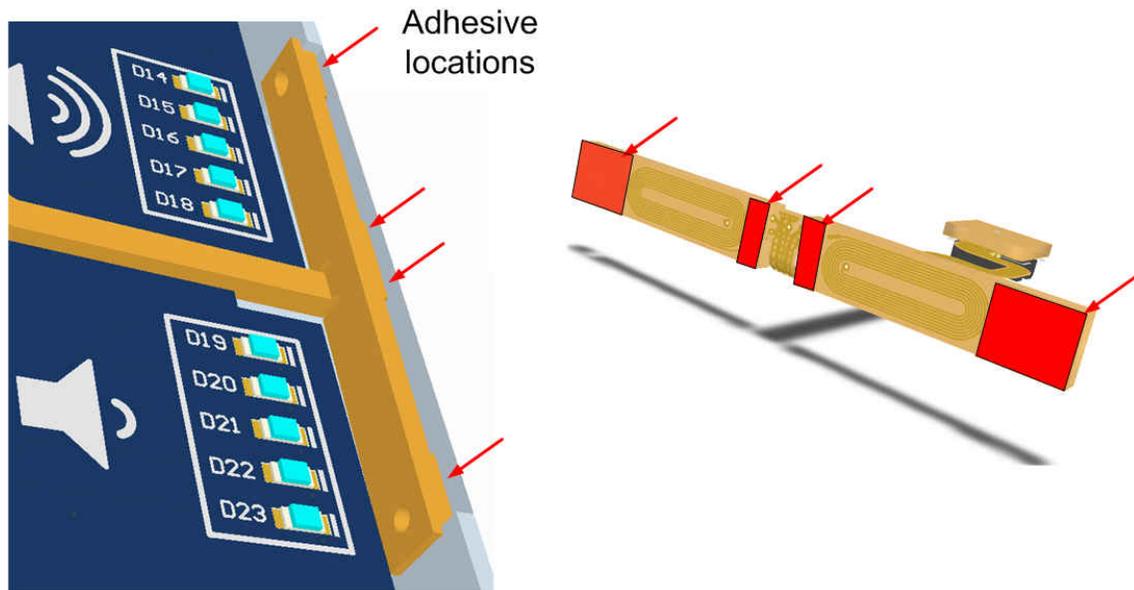


图 1-10. 基于粘合剂的传感器结构

1.7.2 基于弹簧

另一种方法是使用基于弹簧的结构将传感器推向金属目标。弹簧臂有助于吸收垂直轴中不必要的运动势能，因此系统不易因扭转而受到机械干扰。这种系统比基于粘合剂的系统更易于组装。缺点是，如果弹簧连接到 PCB 或外

壳底部，在刚性较低的外壳中，挤压接触位置可能会导致干扰。由于存在额外的机械元件，传感器结构也会占用更多空间。

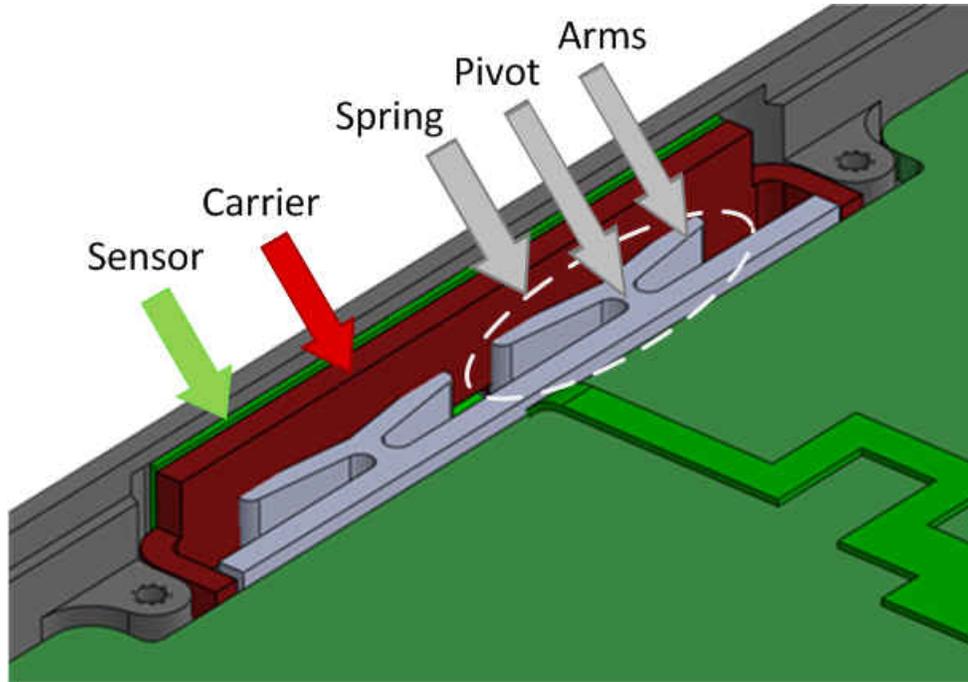


图 1-11. 基于弹簧的传感器结构

1.7.3 基于插槽

第三种传感器集成技术是将线圈插入插槽。插入传感器线圈之前，请将记忆泡沫垫粘在线圈的两侧。此步骤可集成到 PCB 制造过程中。记忆泡沫垫经过挤压，比插槽的宽度更薄，因此可以轻松插入。将泡沫垫插入插槽后，它们会在几秒钟内恢复，填充到整个插槽中，并用作目标和线圈之间的“垫片”。线圈将放置在插槽的中间。与以前的解决方案相比，独特的传感器外壳是一种更刚性的结构。这种方法可提供出色的抗扭曲和挤压等不良机械干扰能力。

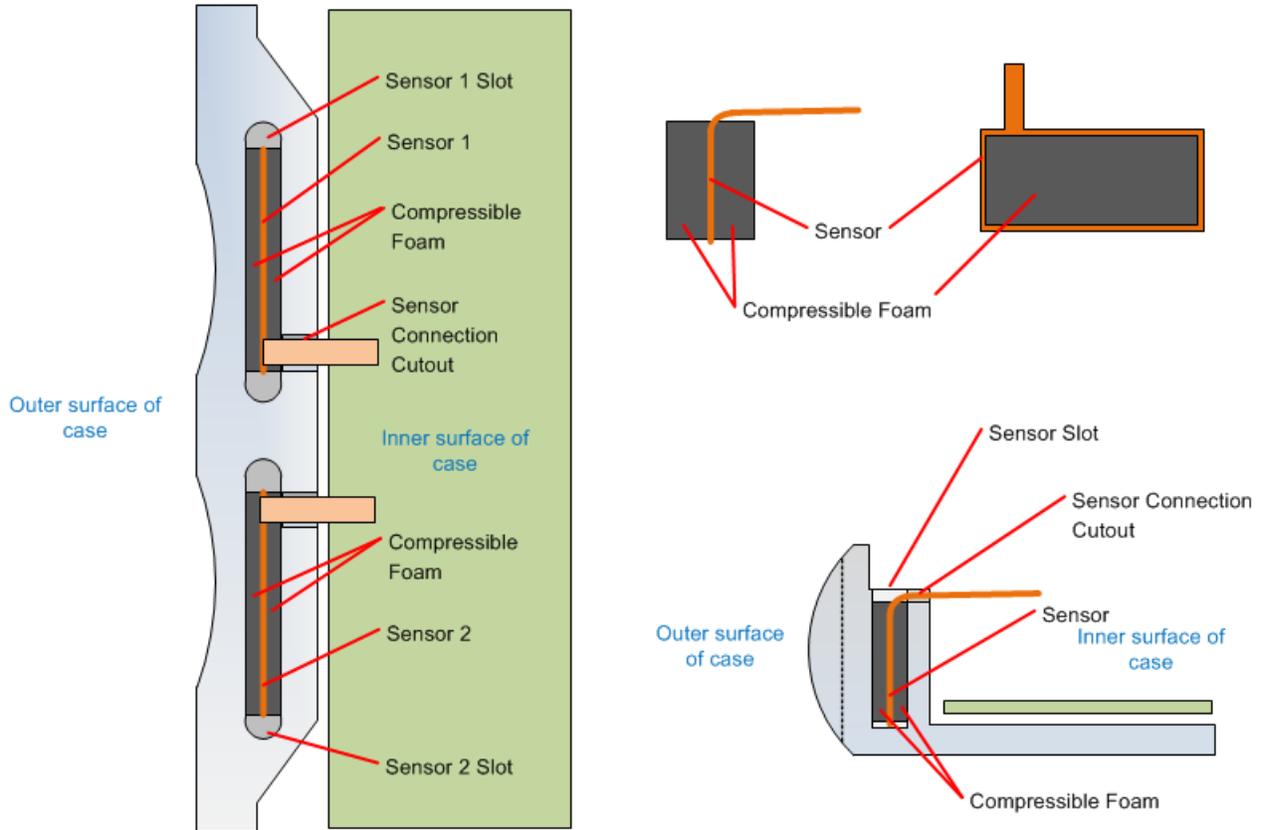


图 1-12. 基于插槽的传感器结构

可以用铜箔制作“法拉第盒”，在无线充电等强 EMI 环境下完全屏蔽传感器。



图 1-13. 铜箔屏蔽“法拉第盒”

1.8 机械隔离

当系统中存在多个按钮时，不同按钮之间可能会发生不良的机械交互。LDC2112、LDC2114、LDC3114 和 LDC3114-Q1 均具有内置算法，可处理大多数此类串扰。但是，仍应采用良好的机械设计原理，以便更最大限度地减少相邻按钮之间的串扰。以下原理可用于减少主动按压过程中相邻按钮之间的机械串扰：

1. 按钮之间的物理支撑可以使按钮在被按下后产生更大的金属变形。
2. 确保指定按钮具有较大的物理偏转。从电气角度来看，偏转越大，信号越强。使用较薄的金属或杨氏模量较低的金属有利于按钮表面变形并减少对相邻按钮的影响。
3. 增加相邻按钮之间的距离或添加凹槽可改善机械隔离。为了更最大限度地减少串扰，按钮到按钮的间隔也应大于一个线圈直径。

2 传感器设计

2.1 概述

电感式触控系统使用一个传感器，在该传感器中，电感器与电容器并联组成了 LC 谐振器。

谐振器可产生与附近导电材料交互的磁场。产生的磁场是一种近场效应，因此传感器设计的首要原则是确保磁场到达所需的导电材料，我们将该导电材料称为目标。

TI 应用手册 [LDC 传感器设计](#) 提供了有关传感器结构的大量详细信息。该应用手册中的许多概念和建议适用于电感式触控应用的传感器设计。

2.1.1 传感器电气参数

电感式传感器的主要电气参数包括：

- 传感器谐振频率 f_{SENSOR}
- 传感器电阻 (表示为 R_P 或 R_S)
- 传感器电感 L
- 传感器电容 C
- 传感器品质因数 Q

2.1.2 传感器频率

[方程式 1](#) 中列出的电感和电容决定了传感器频率。

$$f_{\text{SENSOR}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

通常，当传感器的磁场与导电目标相互作用时，传感器的有效电感会发生变化，从而导致传感器的谐振频率发生变化。

2.1.3 传感器 R_P 和 R_S

R_P 表示振荡器的并联谐振阻抗， R_S 表示串联谐振阻抗。这些电阻是相同寄生损耗的不同表示形式。

随着导电材料靠近传感器，涡流的强度会增加，传感器中的损耗也会增大。传感器 R_S 基于串联电气模型，而 R_P 基于并联电气模型，如 [图 2-1](#) 所示。请务必记住，这些电阻是交流电阻，而不是直流电阻。

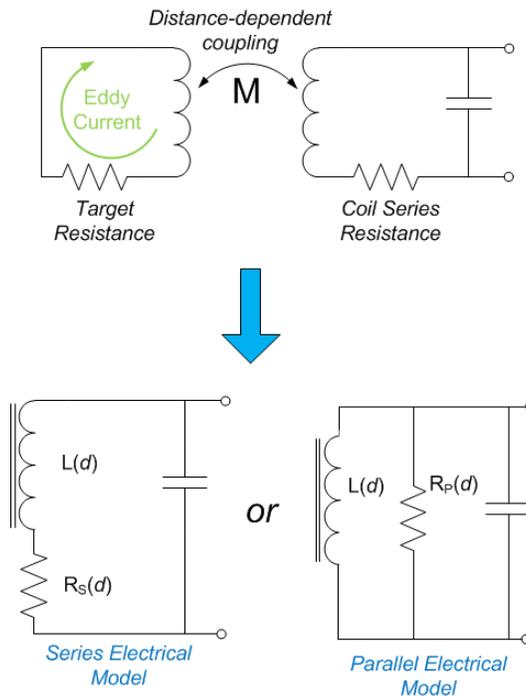


图 2-1. 传感器模型

可以使用 [方程式 2](#)，根据 R_S 来计算 R_P 。

$$R_P = \frac{L}{R_S \times C} \tag{2}$$

当导电材料靠近传感器表面时，传感器 R_P 会显著降低，如 [图 2-2](#) 所示。[图 2-2](#) 中所所示的传感器响应示例的 R_P 变化在 $2k\Omega$ 至 $8k\Omega$ 之间。这种变化可以是归一化响应，适用于大多数传感器。如果直径为 $4mm$ 的传感器的自由空间 R_P 是 $3k\Omega$ ，且传感器与导电材料之间的距离是 $0.5mm$ ，则传感器的 R_P 大概为 $2.2k\Omega$ 。

如果目标离传感器太近，传感器 R_P 可能会降低到太低的水平。必须避免这种情况来确保正常工作。有关更多详细信息，请参阅 [节 2.3](#)。

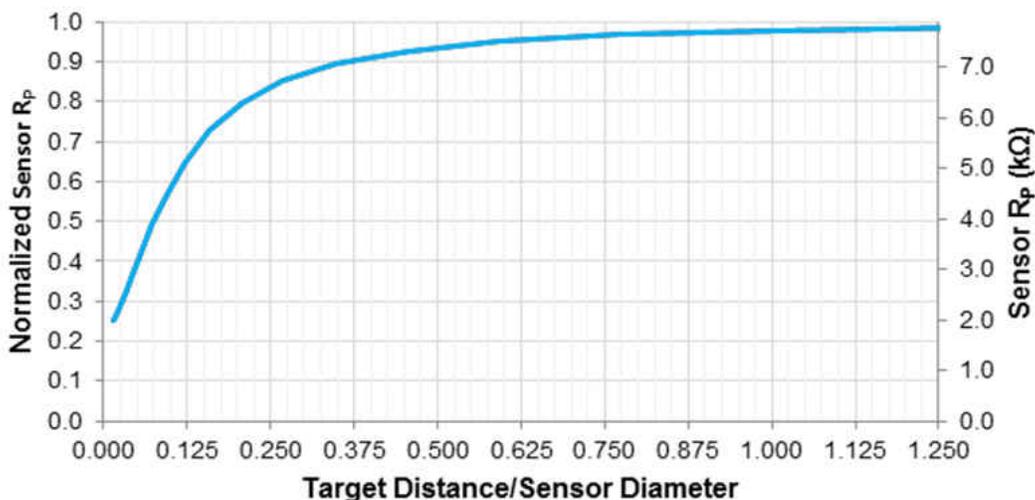


图 2-2. 示例传感器 R_P 与目标距离之间的关系

2.1.4 传感器电感

传感器电感是电感器几何形状的函数，即电感器面积、绕组数以及与导电材料的相互作用。通常，电感值越大，越容易驱动。电感器的感应范围主要取决于电感器的物理尺寸，而不是电感，其中电感器越大，感应范围越远。

2.1.5 传感器电容

通常，在电感器设计完成后，可以选择传感器电容来设置传感器频率。应避免使用较小的传感器电容，确保寄生电容变化不会影响运行。作为通用指南，应避免使用小于 22pF 的传感器电容。

2.1.6 传感器品质因数

传感器品质因数 Q 测量的是传感器电感与传感器交流电阻之比。通常，由于传感器需要更少的能量来维持振荡，因此需要较高的 Q 值。使用 [方程式 3](#) 计算传感器品质因数 Q。

$$Q = \frac{1}{R_S} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

R_S 是传感器在工作频率下的串联交流电阻。通过增加传感器电感、减小传感器 R_S 或减小电容，可以增大传感器品质因数 Q。

2.2 电感式触控

可通过使用 LDC 技术检测金属偏转来对按钮进行仿真。此功能具有许多优势，例如无缝操作、金属板接地、在潮湿环境中操作、防止错误触控事件以及即使用户佩戴手套也能可靠操作。TI 应用手册 [电感式感应触控金属按钮设计指南](#) 中介绍了该应用。

2.3 LDC211x/LDC3114 设计边界条件

LDC2112 和 LDC2114 是高分辨率电感数字转换器 (LDC)，其内部算法可检测与金属或其他表面按钮按压相对应的电感变化。这些器件要求所连接的传感器满足以下参数：

- $1\text{MHz} \leq f_{\text{SENSOR}} \leq 30\text{MHz}$
- $350\ \Omega \leq R_P \leq 10\text{k}\ \Omega$
- $5 \leq Q \leq 30$

LDC3114 和 LDC3114-Q1 是相似的器件，但要求传感器频率介于 5MHz 和 30MHz 之间，并提供略有不同的功能，例如在需要时能够在内部算法之前访问原始数据。如果传感器参数不在这些规格范围内，LDC 可能无法测量电感变化，因此不会指示电感式触控事件。[图 2-3](#) 显示了这些限制，它们由 [方程式 1](#) 计算出。

LDC2112/LDC2114 Operating region

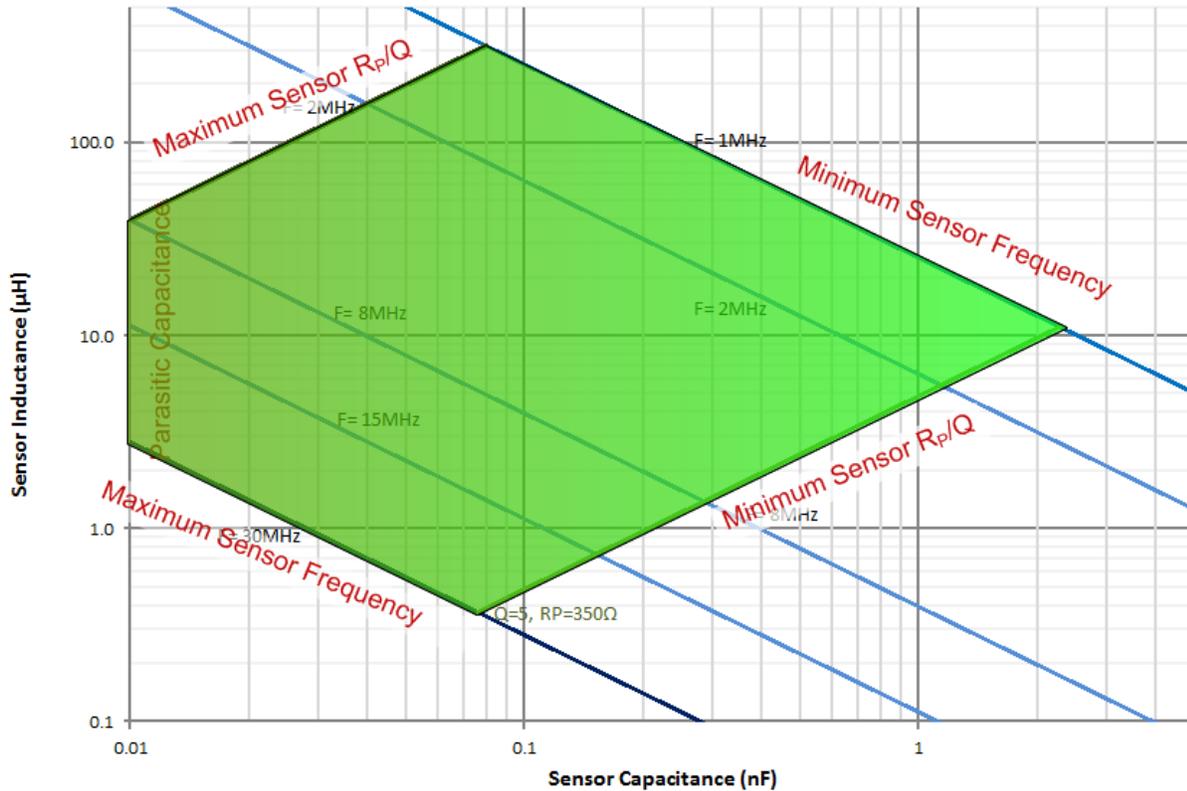


图 2-3. LDC2112/LDC2114 工作区域

根据方程式 4 来计算右上边界上的最小传感器频率：

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 1\text{MHz})^2 C} \tag{4}$$

根据方程式 5 来计算左下边界上的最大传感器频率：

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 30\text{MHz})^2 C} \tag{5}$$

在左侧，如果传感器电容太小，则寄生电容效应可能会降低传感器运行性能。虽然此边界显示为 10pF，但某些系统即使具有更大的传感器电容也可能会遇到问题。通常，TI 建议使用大于 22pF 的传感器电容。

2.4 传感器物理结构

2.4.1 传感器物理尺寸

电感式触控功能基于传感器与金属表面相互作用的磁场。因此，磁场必须能够到达金属表面。磁场“大小”取决于电感器的尺寸，电感器尺寸越大，产生的磁场就越大。

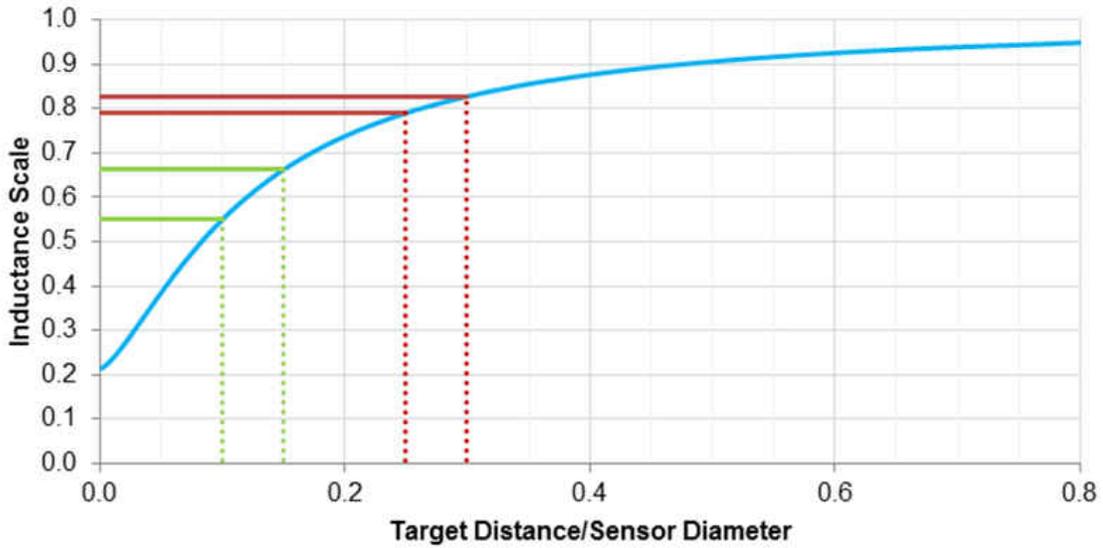


图 2-4. 电感变化与目标距离之间的关系

对于圆形电感器，电感器的尺寸就是直径。对于非圆形电感器，传感器直径实际上是最小轴尺寸。

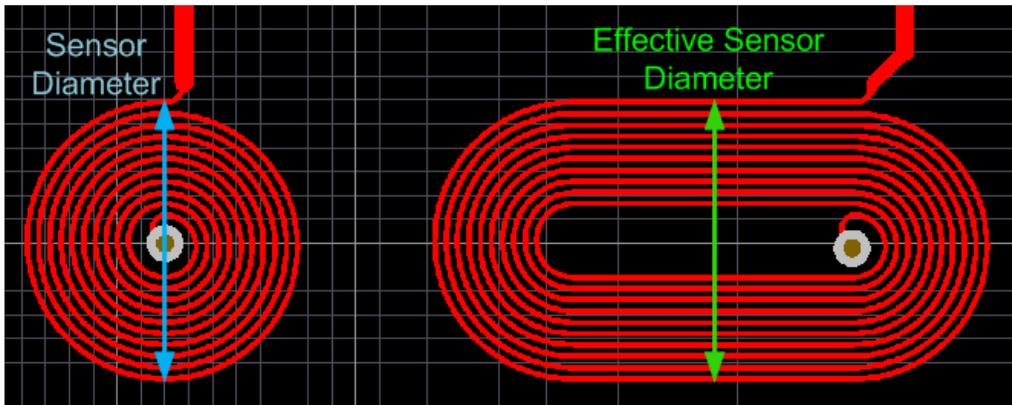


图 2-5. 圆形和跑道式传感器线圈的传感器直径

2.4.2 传感器电容器位置

TI 建议将传感器电容器放置在靠近 INn 引脚的位置，而不是靠近传感器的位置。这种放置方式可避免在使用较高频率的传感器时产生线路传输影响。

2.4.3 屏蔽 INn 走线

对于可靠的电感式触控应用， INn 走线不应具有显著的时变电容变化。如果 INn 走线未屏蔽，寄生电容变化可能会导致错误的按钮按压事件。TI 建议在 INn 走线周围使用由 COM 引脚驱动的屏蔽层（请参阅图 2-6）。

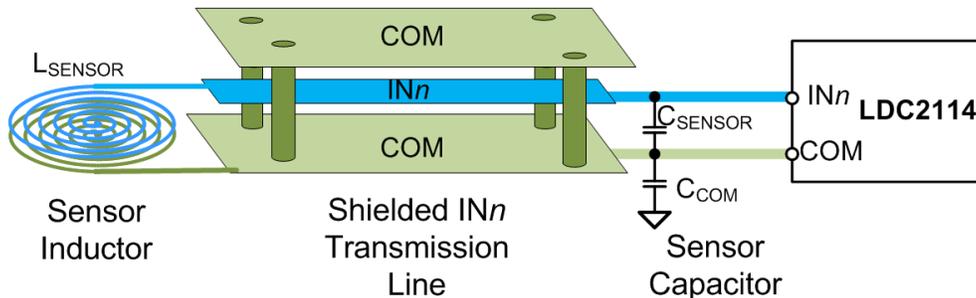


图 2-6. 使用 COM 实现 INn 屏蔽

2.4.4 屏蔽电容

LC 谐振器传感器可以响应电感和电容变化。为了防止电容效应导致意外的信号响应，金属目标应具有固定的恒定电势。因此，在构建传感器-目标系统时，应将导电目标交流接地，从而屏蔽外部电容。

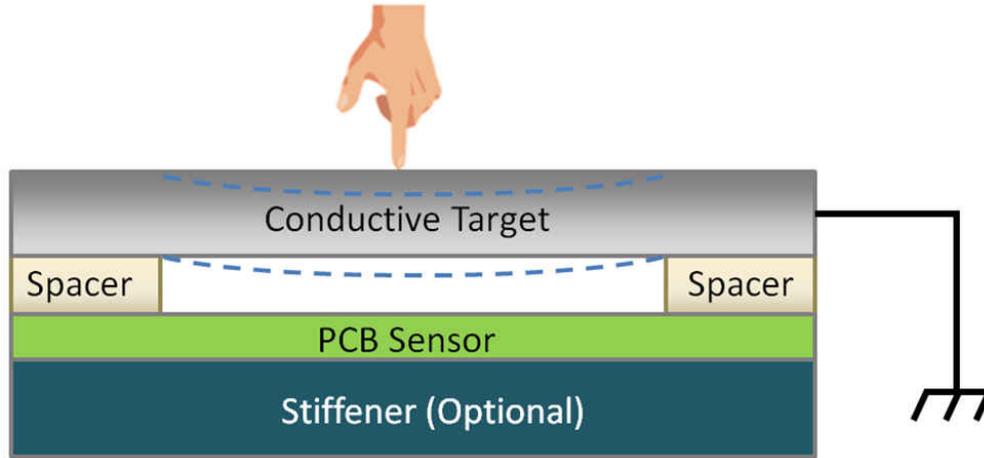


图 2-7. 用于屏蔽电容效应的交流接地目标

2.4.5 C_{COM} 容值调整

COM 引脚可驱动高达 20nF 的负载接地。应调整 C_{COM} 的容值，确保所有通道都满足以下关系。

$$100 \times C_{SENSOR}/Q_{SENSOR} < C_{COM} < 1250 \times C_{SENSOR}/Q_{SENSOR} \quad (6)$$

即使所有通道的 C_{SENSOR} 容值有所不同，仍需满足此项要求。

2.4.6 多层设计

传感器的电感是面积、绕组数量和目标距离的函数。对于许多电感式触控应用，按钮的物理尺寸需要为直径 3mm 或更小。较小传感器的总电感较低，可能导致传感器频率超出 LDC 的设计范围。使用多层交替旋转传感器时，由于各层之间存在额外的互感，因此总电感明显高于单层设计。

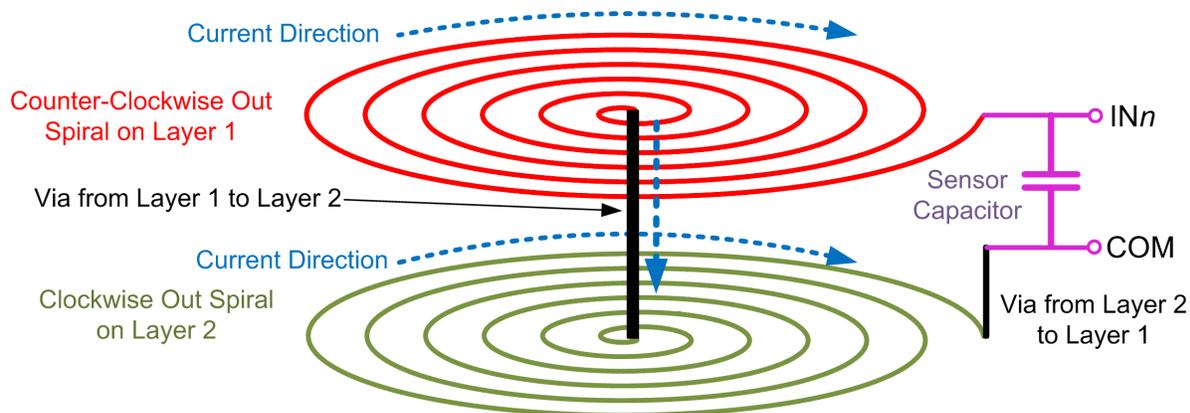


图 2-8. 2 层传感器设计

对于大多数应用而言，2 层或 4 层设计就已足够。虽然与几何形状类似的 2 层传感器相比，4 层传感器更复杂且成本更高，但 LDC211x 和 LDC3114 可以有效地驱动物理尺寸更小的 4 层传感器，如表 2-1 所示。

使用单层传感器通常效果不佳，因为多层传感器中各层之间的相互耦合会显著增加传感器电感。此外，需要通过第二条布线将传感器电流从传感器中心引回 LDC。

表 2-1. 近似最小传感器宽度与制造限制

各匝之间的可用间距	层数	最小过孔尺寸	最小传感器宽度
4mil (0.1016mm)	2	15mil (0.4mm)	2.85mm
4mil (0.1016mm)	4	15mil (0.4mm)	2.30mm
3mil (0.076mm)	2	15mil (0.4mm)	2.05mm
3mil (0.076mm)	4	15mil (0.4mm)	1.91mm
2mil (0.051mm)	2	15mil (0.4mm)	1.65mm
2mil (0.051mm)	4	15mil (0.4mm)	1.53mm
2mil (0.051mm)	4	12mil (0.305mm)	1.38mm

目标距离为 0.2mm 时固定 8mm 传感器长度的最小传感器宽度。尚未对这些传感器进行性能评估。这些传感器假设各层之间的电介质厚度为 1mil (25 μm)。

2.4.6.1 传感器寄生电容

电感器的各匝具有一定的物理面积并由电介质隔开；这在每匝中会表现为很小的寄生电容。为了实现出色的传感器性能，应尽可能减小这些寄生电容。减小多层传感器寄生电容的一种简单、有效的技术是避免层之间的平行走线，如图 2-9 所示。

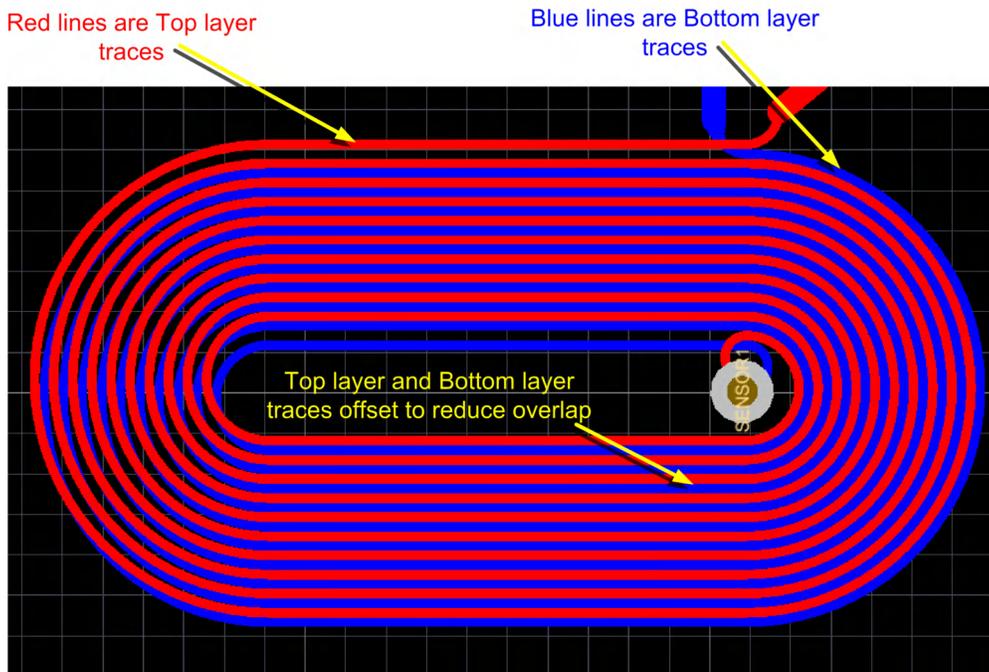


图 2-9. 避免平行走线以减小寄生电容

2.4.7 传感器垫片

在传感器和目标之间保持一致的间隔（间隙）对于确保有效传感至关重要。垫片可以提供此系统设计特性。

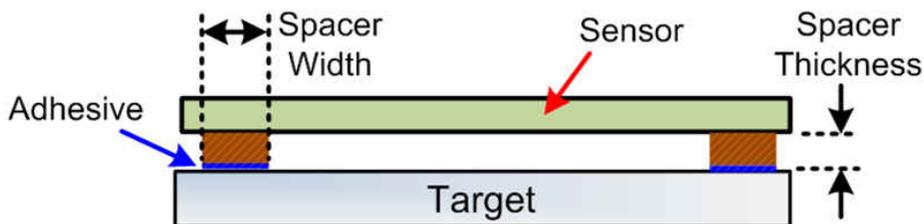


图 2-10. 垫片厚度和宽度

垫片厚度范围通常为 0.1mm 至 0.5mm，具体取决于传感器的几何形状和电气参数。一般情况下，如果传感器电气特性处于 LDC211x/LDC3114 边界条件下，更薄的垫片可提供更好的性能。将垫片厚度设置为线圈直径的 10% 以下（对于矩形或椭圆形传感器，是指短边的 10%），通常可提供出色的性能。

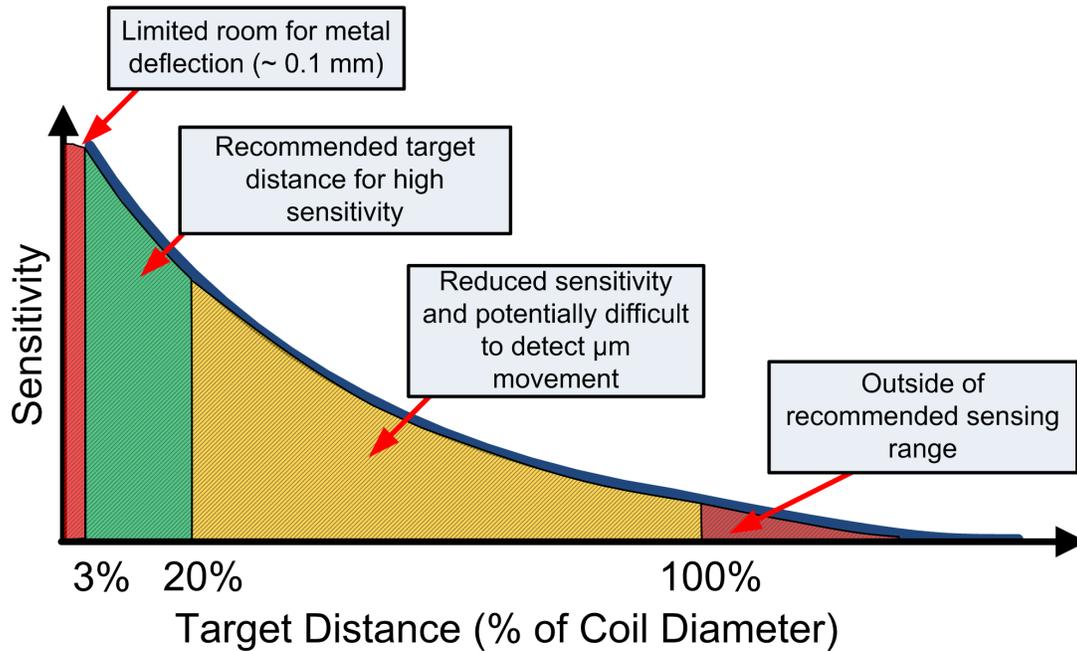


图 2-11. 测量灵敏度与目标距离之间的关系

当使用粘合剂将传感器连接到目标表面时，可能需要更宽的垫片来更好地连接目标。

2.4.8 传感器加固基板

如果传感器使用柔性 PCB，则必须使用加固基板支撑传感器。如果不支撑柔性传感器，则可能会因移动变形，从而导致错误检测事件。支撑应是一个均匀的表面，在温度、湿度和加速度发生变化时，产生的翘曲非常小。支持结构通常被称为 LDC 应用的加固基板，不应导电；否则，传感器 Q 和 R_p 可能会降低到 LDC211x/LDC3114 可支持的最低水平以下。采用 FR4 背板是柔性 PCB 的常见技术，适合 LDC 传感器使用。对于较薄的传感器，可以使用基于环氧树脂的加固基板。

加固基板应是非导电材料，否则传感器 R_p 可能过低，导致 LDC211x/LDC3114 无法驱动；因此，应避免使用 SUS 和 AL 加固基板。

如果在单个柔性 PCB 上构建了多个传感器，则应为每个传感器部分单独使用加固基板；否则会显著发生更多的机械串扰。

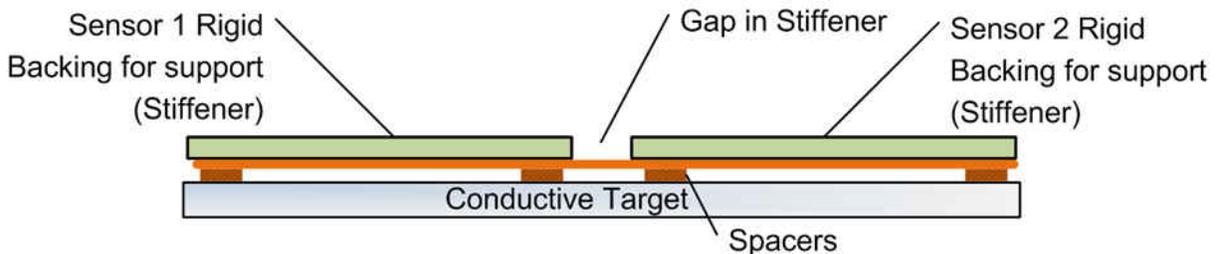


图 2-12. 为每个传感器单独使用加固基板

对于某些应用，加固基板可以是系统中已经存在的元件（例如玻璃表面），也可以是在 FR4 等刚性材料上制造的传感器。

由 FR4 或其他刚性材料制成的正常 PCB 不需要专用加固基板。

2.4.9 跑道式电感器形状

对于某些需要较小传感器的电感式触控应用，圆形或方形传感器的电感太低。如图 2-13 所示，矩形或跑道形等较长形状 of 传感器将具有更大的电感。这种形状对于移动应用中的侧按钮非常有效。

2.5 示例传感器

本示例介绍了双传感器设计。图 2-13 所示传感器尺寸为 $2.85\text{mm} \times 8\text{mm}$ ，共八匝。布线厚度为 0.25oz 铜 ($9\mu\text{m}$)，宽为 $75\mu\text{m}$ ，间距为 $50\mu\text{m}$ 。传感器自由空间电感约为 $1.3\mu\text{H}$ ，并具有 47pF 的传感器电容器。安装后，传感器电感会因与导电目标的相互作用而降低。

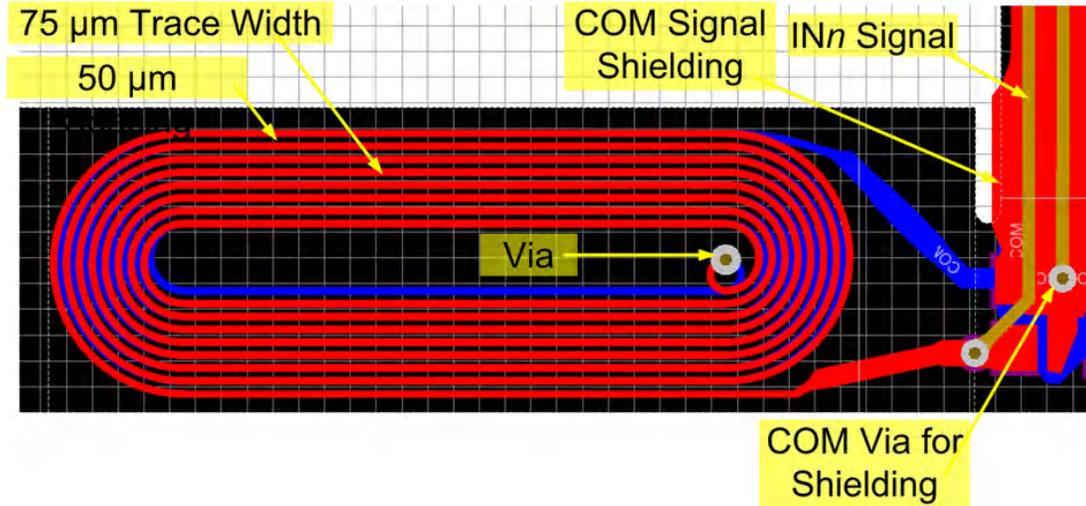


图 2-13. 传感器跑道式布线

此传感器的参数使用 [LDC 计算工具](#) 的“Racetrack Inductor Designer”选项卡进行估算。图 2-14 是用于设计此处所述传感器的工具条目示例。请注意，该工具基于 [方程式 1](#)、[方程式 2](#) 和 [方程式 3](#) 提供了 R_S 、 R_P 、 Q 、 L 和频率等传感器参数的估算值。

TI LDC Inductance Calculator

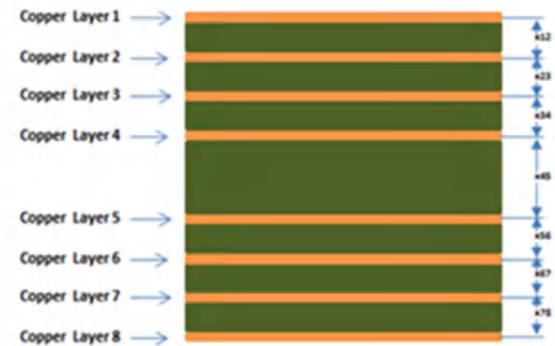
Estimator tool for racetrack spiral coils. This tool is provided without warranty or support. User assumes all liability.

[Return to Main page](#)

Ver N



Layer Stackup



Enter only in Yellow Fields (pull-down for mm or mil)
Results in Orange Fields

LC Sensor calculations			
Operating temperature	T	25 °C	Enter operating temperature
Sensor capacitance	C	47.0 pF	Select LC tank capacitance
Layers	M	2 Layers	Number of layers on PCB board (1≤M≤8)
Turns	N	8 Turns	Number of turns per layer
Outer diameter of the inductor (short side)	d _{OUT}	2.85 mm	Outer Diameter of the spiral inductor
ratio of long edge to short edge (>=1)		2.80	racetrack design if >1
Long side of inductor	d _L	7.980 mm	
spacing between traces	S	2.000 mil	Space between traces (mm or mil)
width of trace	w	3.000 mil	Width of the trace (mm or mil)
PCB thickness between 1st layer and 2nd layer	h12	1.000 mil	Space between layer 1 and 2 (mm or mil)
Copper thickness	t	0.250 oz-Cu	Copper layer thickness (mm, Oz-Cu, or mil)
Coil Fill Ratio	d _{in} /d _{out}	0.28	0.2 > 0.8 is recommended
Inductor inner diameter	d _{in}	31.205 mil	Inner diameter of the spiral inductor (mm or mil)
Self inductance per layer	L	0.370 μH	
Total Inductance	L _{TOTAL}	1.316 μH	
Sensor Operating Frequency	F _{res}	19.426 MHz	
Resonance impedance estimate	R _p	7297.3 Ω	
Q factor	Q	41.86	
Target Distance	D	0.10 mm	
Sensor Inductance from Target Interaction	L'	0.756 μH	
Sensor Frequency with Target Interaction	F _{res'}	26.692 MHz	
R_p with Target Interaction	R _{p'}	1.40 kΩ	For aluminum target of at least 5 skin depths
Q Factor with target	Q'	11.0	

图 2-14. LDC 计算工具的跑道式电感器设计选项卡

工具输出包括自由空间参数（不存在目标）的估算值以及当传感器安装在系统中且附近有目标时的参数值。如表 2-2 所示，安装传感器后，传感器参数在 LDC211x/LDC3114 工作范围内。

表 2-2. 传感器参数

传感器参数	自由空间内的传感器	安装后的传感器	LDC211x/LDC3114 工作范围
传感器电感	1.3μH	0.76μH	
传感器电容	47pF	47pF	
传感器频率	19.4MHz	26.7MHz	1MHz 至 30MHz (LDC211x) 5MHz 至 30MHz (LDC3114)
传感器 R _p	7.3kΩ	1.4kΩ	350 Ω ≤ R _p ≤ 10k Ω
传感器 Q	41	11	5 ≤ Q ≤ 30

传感器和连接器之间的布线由 COM 信号驱动的顶层和底层屏蔽。固定间隔的过孔用于连接顶部和底部屏蔽。

屏蔽布线中的折弯用于消除应力。

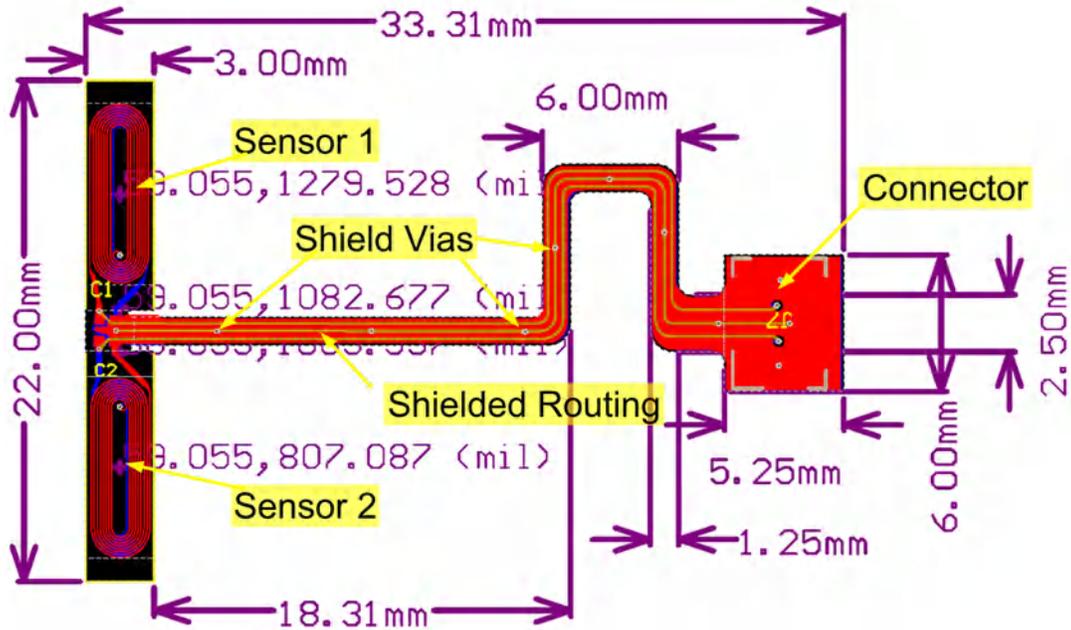


图 2-15. 双传感器设计示例

在此示例中，加固基板和垫片集成在传感器中。图 2-16 显示了垫片和加固基板的排列方式。

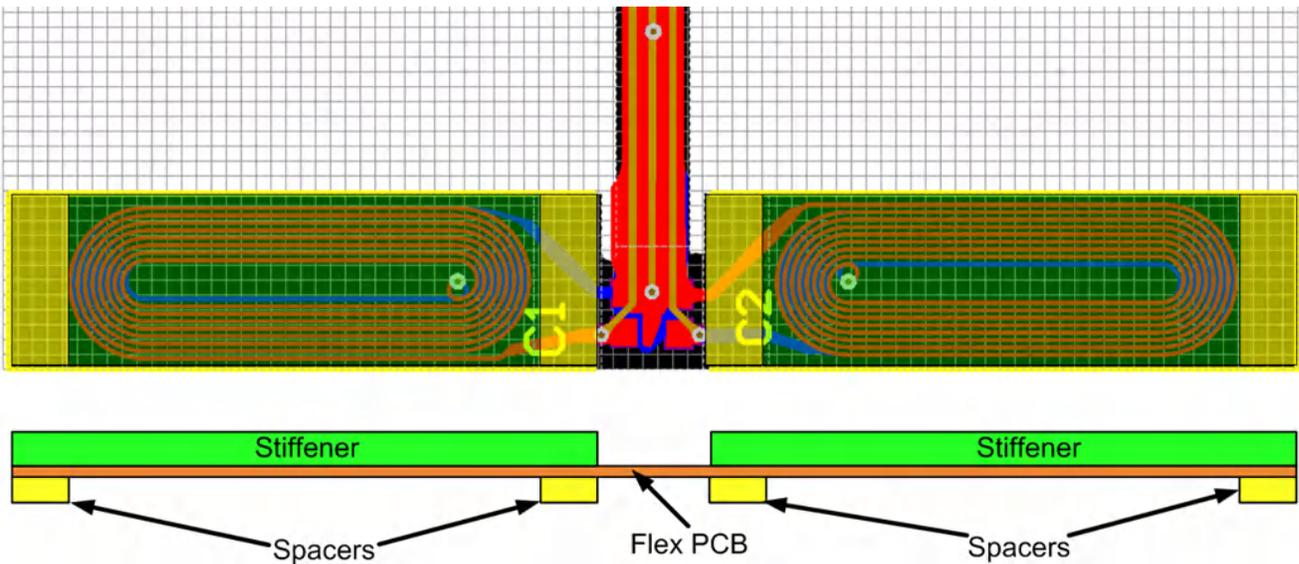


图 2-16. 传感器区域结构

每个传感器区域都有一个专用的加固基板和两个垫片。两个传感器之间的柔性传感器区域可在两个传感器之间提供机械隔离。

表 2-3 显示了传感器堆叠。根据机械考量，可以改变加固基板的厚度。一般而言，在传感器制造中加入垫片，通常比在外壳上加工垫片能提供更严格的垫片厚度公差。

表 2-3. 传感器堆叠

层	类型	材料	厚度 (mil)	厚度 (mm)	电介质材料
加固基板	电介质	内核	32	0.813	FR4
顶部覆盖层	覆盖层				
柔性顶部覆盖层	焊接掩模/覆盖层	表面材料	0.4	0.010	覆盖层

表 2-3. 传感器堆叠 (continued)

层	类型	材料	厚度 (mil)	厚度 (mm)	电介质材料
顶层	信号	铜	0.46	0.012	
Flex1	电介质	薄膜	0.47	0.012	聚酰亚胺
信号层	信号	铜	0.46	0.012	
Flex2	电介质	薄膜	1	0.025	聚酰亚胺
底层	信号	铜	0.46	0.012	
柔性底部覆盖层	焊接掩模/覆盖层	表面材料	0.4	0.010	覆盖层 (PI)
底部阻焊层 1	焊接掩模/覆盖层	表面材料	0.4	0.010	阻焊剂
底部覆盖层	覆盖层				
垫片	电介质	薄膜	5	0.127	聚酰亚胺
总厚度			41.05	1.043	

垫片和加固基板仅适用于部分传感器设计，如图 2-17 所示。仅在按钮位置的末端需要垫片。传感器和任何连接器上都需要加固基板。如果特定应用需要，可以使用更薄的材料制造加固基板。

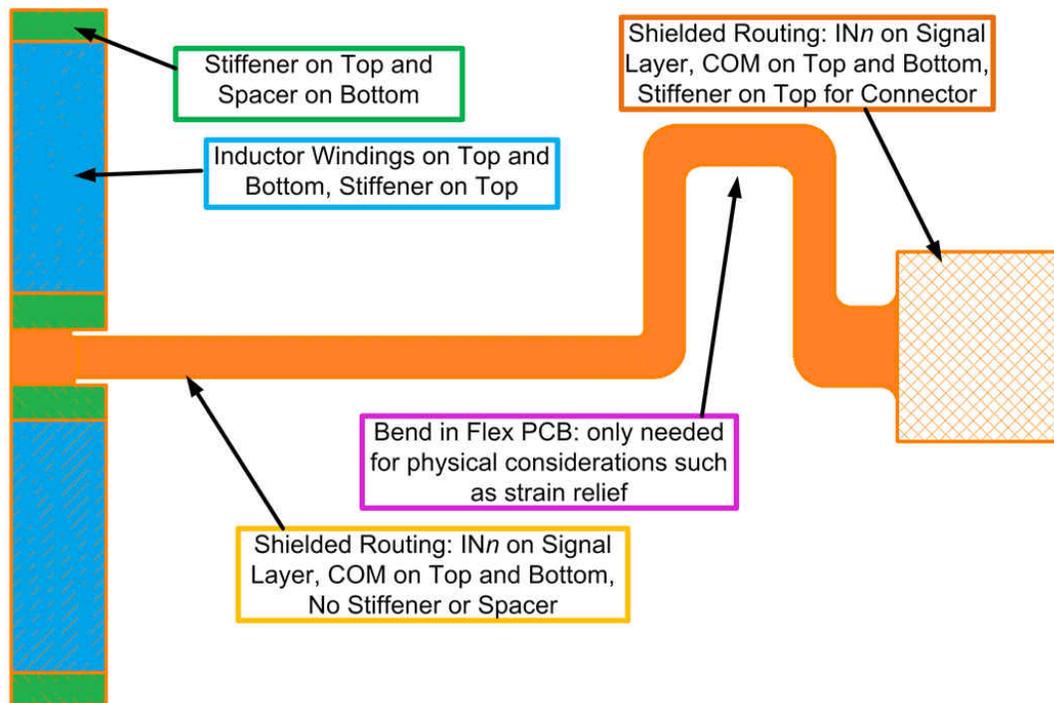


图 2-17. 跨区域传感器堆叠

3 总结

在本设计指南中，我们回顾了利用电感式传感技术提高灵敏度和可靠性的电感式触控按钮设计的机械注意事项，包括电气设计的机械堆栈和基本工艺流程。设计适用于 LDC211x/LDC3114 电感式触摸应用的传感器的过程包括：

1. 确定传感器的可用物理尺寸
2. 使用设计工具设计在 LDC211x/LDC3114 工作范围内的传感器
3. 使用屏蔽结构进行 INn 布线
4. 构建所需的垫片或加固基板。

LDC211x/LDC3114 器件采用低功耗架构，适用于驱动按钮传感器。机械外壳不需要在按钮位置进行开孔。这有助于降低制造成本，并增强外壳的防潮和防尘能力。与目前市面上的传统机械按钮相比，此类器件具有巨大的优势。

4 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 * (February 2017) to Revision A (February 2023)	Page
• 向文档添加了 LDC3114 和 LDC3114-Q1 信息.....	10
• 更改了表 2-2 中的传感器频率参数.....	19

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司