

Application Note

使用位置传感器进行汽车车门把手设计



Jesse Baker and John Miller

摘要

汽车车门把手系统通过整合新功能并对旧功能进行改进，持续增强用户体验、安全性和可靠性。这些功能通过不同的检测技术实现，包括磁传感器（各向异性磁阻 (AMR) 和霍尔效应传感器）、电容式传感器和电感式传感器。

本文档将演示可展开式汽车车门把手实现方案，在车门把手演示设计中利用磁传感器和电容式传感器捕获位置数据。本文档将利用基于硬件和软件的演示以及潜在的误差源和替代检测选项（例如电感式感应），介绍传感器设计和测试方法。本应用手册中介绍的技术包括用于检测车门打开或关闭状态的霍尔效应传感器和用于检测把手位置的 AMR 角度传感器。本应用手册将说明触控按钮电容式感应的使用和设计以及用户是否手握把手。本应用手册（但不包括演示）还将介绍电感式传感器按钮（与电容式触控按钮不同）的使用、设计和实现，因为这种技术也是当今车辆的常见选择。

内容

1 简介.....	2
2 汽车车门把手架构.....	2
3 功能演示设计.....	3
4 车门把手功能的详细设计流程.....	6
4.1 使用磁感应功能进行车门开关检测.....	6
4.1.1 在演示中使用 TMAG5131-Q1 实现车门开/关检测.....	6
4.2 使用磁感应功能进行可展开式车门把手位置检测.....	8
4.2.1 使用 TMAG6180-Q1 实现可展开式车门把手位置检测的演示.....	9
4.3 使用电容式感应功能进行手接近检测.....	11
4.3.1 电容式感应应用概述.....	11
4.3.2 车门把手演示中基于电容式感应的软触控检测示例.....	12
4.4 具有电感式感应功能的按钮.....	16
4.4.1 电感式按钮.....	16
4.4.2 电感式按钮灵敏度.....	17
4.4.3 目标材料.....	17
4.4.4 目标距离和传感器尺寸.....	18
4.4.5 设计示例.....	19
5 总结.....	22
6 参考资料.....	22

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本文档将高度概述汽车车门把手和潜在的功能，以及如何使用磁传感器、电容式传感器和电感式传感器实现这些功能。本文档中介绍的设计示例基于一个演示，演示视频 [使用位置传感器进行设计：汽车车门把手](#) 和 [汽车车门把手系统中的位置感应](#) 应用简报中也介绍了该演示。

该演示旨在用于展示如何使用霍尔传感器来监控车门的打开/关闭位置，并讨论霍尔感应技术在此应用中的设计注意事项和功能。TI 的磁位置传感器在线模拟器 [TI 磁感应模拟器 \(TIMSS\)](#) 对此提供了支持。

该演示还展示了将电容式感应技术用作触控按钮的基础来检测用户手指或手，进而可以展开凹入式车门把手。把手展开后，电容式传感器可检测把手上是否有用户的手，以防止把手上有手时关闭。用户可以使用给出的近似数学计算模型作为设计的起点，然后通过该演示确认近似计算的值。本应用手册通篇引用了其他电容式感应应用手册的内容及支持信息。

此外，本应用手册还介绍了将电感式传感器用于 [按钮](#) 应用（与电容式 [触控按钮](#) 相对）。这项技术未包含在演示中，但当今许多车辆中都采用了这种常用的技术。这部分介绍了与设计 and 实现相关的注意事项，并提供了使用 [电感式感应计算器工具](#) 实现的按钮感应线圈的更详细设计示例。

2 汽车车门把手架构

从驾驶员侧车门和副驾驶侧车门到发动机舱盖和尾门释放系统，汽车车门把手具有多种不同的机械外形。旋转和平行可展开式车门把手通常与把手原位的车门本体齐平。在需要的情况下，执行器向外伸出把手以便向用户展示把手。固定平齐式车门把手不会移动，而是在车门上有嵌入的表面或空腔。发动机舱盖和尾门释放系统通常使用按钮或软触控功能来触发车门打开。上述每个车门把手架构利用不同车门把手系统中常见的一组功能中的一个或多个功能，下文将概述其中的一些功能。

在任何车辆中，一项关键且常见的安全功能是检测车门打开或关闭情况。驾驶员必须在驾驶车辆时确保没有任何车门打开，并在离开车辆时确信车门已正确关闭。

在可展开式车门把手系统中，当车门把手伸出和缩回时，可靠地跟踪把手位置可提供多种优势。通过了解车门把手在其移动弧线上的位置，可确保车门把手每次都能在正确的位置展开和缩回，从而为用户提供流畅的使用体验。该功能还可防止执行器过度驱动车门把手而损坏把手，或者有助于检测把手轨道中是否有东西卡滞。最后，该功能甚至可以检测用户按下或拉动车门把手。



图 2-1. 可展开式车门把手处于伸出位置

软触控或手接近检测功能支持驾驶员的手通过轻按动作，或一出现，就会触发汽车系统内的不同操作。对于可展开式车门把手，该功能可作为触发把手伸出的替代方法。在固定平齐式车门把手中，把手是嵌入车辆的表面或空腔，不会移动。在这种情况下，可对把手进行软触控或手接近检测，进而触发车门打开。



图 2-2. 可展开式车门把手的软触控或手接近检测



图 2-3. 固定齐平式车门把手的嵌入式空腔

某些汽车车门和车门把手整合了按钮按压功能，例如发动机舱盖触控按钮、车门键盘、按钮或尾门释放系统。

3 功能演示设计

图 3-1 所示的功能原型旨在演示如何在车门把手系统中实现上述某些功能：使用 [TMAG6180-Q1](#) 进行可展开式车门把手位置检测，使用 [TMAG5131-Q1](#) 进行车门开/关检测，以及使用 [FDC1004-Q1](#) 进行手接近检测和软触控检测。



图 3-1. 车门把手演示的前视图

该演示的前视图显示了 3D 打印车门框架、车门和铰链、可展开式车门把手、电源开关和底板。最左侧的开关用于控制该演示的 12V 电源。中间的开关用于中断进入电机的电机驱动器输出。最右侧的开关用于将来中断来自 USB 的 5V 线路。

图 3-2 是该演示的后视图，其中显示 [DRV8220EVM](#) 已连接到 227:1 金属减速电机 25Dx56L mm MP 12V，该电机通过电机臂伸出把手。选择 [DRV8220](#) 的原因是其支持相位或使能控制，并有外形尺寸相对较小的 EVM。[DRV8220EVM](#) 旁边原型板上焊接的降压转换器会将 12V 电源降压至 5V，以便为 [TI-SCB](#) 供电。然后，[TI-SCB](#) 使用 LDO 产生 3.3V 电压。降压转换器使该演示可以仅使用 12V 电源运行，无需插入到计算机中。



图 3-2. 车门把手演示的后视图

如图 3-3 所示，一对 3D 打印扭转弹簧有助于在按下或拉动把手后将把手恢复到初始位置。使用弹簧将把手向后拉而不是使用电机的方案有助于防止夹伤危险。

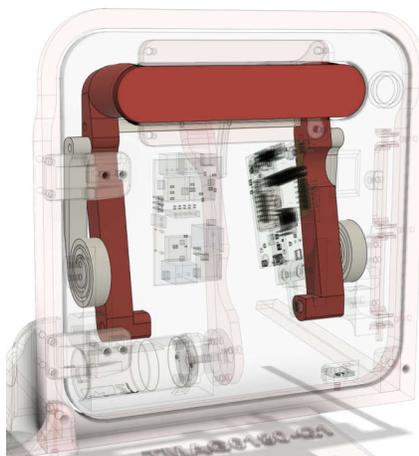


图 3-3. 车门把手和 3D 打印弹簧

图 3-4 显示 TMAG6180-6181EVM 和 TI-SCB 安装在车门的背面，并有一个径向圆柱磁体嵌入在把手中，以便磁体在把手旋转时旋转。

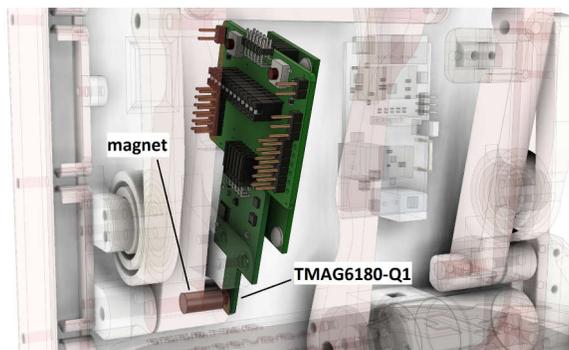


图 3-4. TMAG6180-6181EVM、TI-SCB 和嵌入在车门把手中的磁体

FDC1004EVM 连接到两个由分层铜带制成的电容式传感器，如图 3-5 所示。

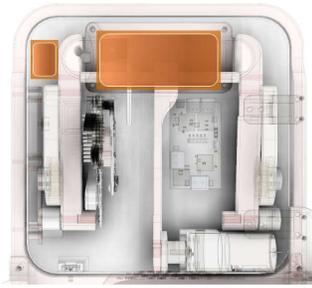


图 3-5. FDC1004-Q1 和电容式传感器

图 3-6 显示了车门底部 HALL-HINGE-EVM 板上安装的 TMAG5131-Q1，并有一个小型轴向圆柱磁体嵌入在车门框架中。

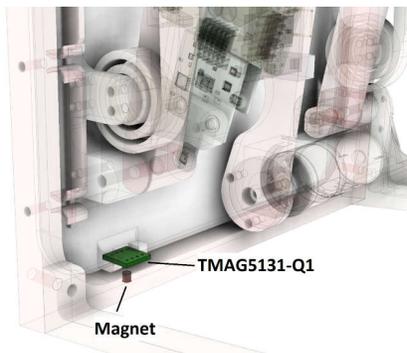


图 3-6. TMAG5131-Q1 和嵌入在车门框架中的磁体

4 车门把手功能的详细设计流程

4.1 使用磁感应功能进行车门开关检测

在转换检测应用中通常使用霍尔效应开关，如图 4-1 所示。车门的打开和关闭与铰链运动最为相似，即磁体朝着传感器的方向或远离传感器的方向摆动。

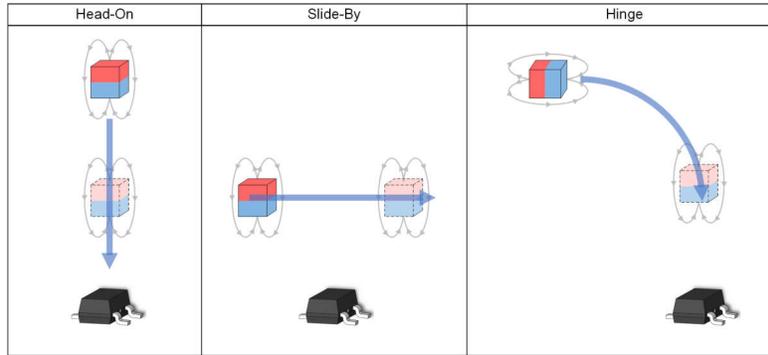


图 4-1. 转换检测设计实现示例

此功能的磁性实现方案需要在车门中嵌入磁体，以便在车门打开和关闭时以铰链运动方式移动磁体。霍尔效应开关安装在车门框架中与磁体相对的位置，用于检测是否存在磁场。诸如 TMAG5131-Q1 等全极开关可以针对南磁场或北磁场触发（如图 4-2 所示），而单极开关只能针对一种极性触发。

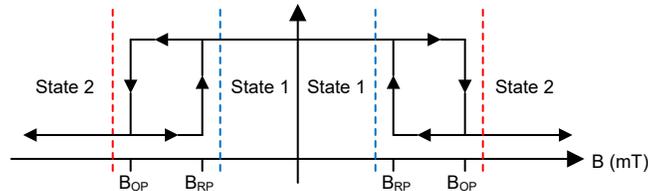


图 4-2. 全极霍尔效应开关运行方式

主要目标是在设计系统时让转换区域空间坐标位于与 B_{OP} 最大值和 B_{RP} 最小值规格相关的空间坐标内。

实现转换检测时需要考虑的重要变量包括磁体尺寸和类型、霍尔效应开关选择以及磁体和开关的位置。TI 磁感应模拟器 (TIMSS) 等磁仿真工具有助于确定这些变量并促进快速设计迭代。

4.1.1 在演示中使用 TMAG5131-Q1 实现车门开/关检测

在该演示中，TMAG5131-Q1 汽车霍尔效应开关可检测车门的打开或关闭状态。TMAG5131-Q1 位于车门底部，如图 4-3 所示。TMAG5131-Q1 可检测车门框架中嵌入的小型磁体的磁场。具体的器件型号是 TMAG5131C1D，其采样频率为 20Hz，在 B_{OP} 典型值为 $\pm 3.0\text{mT}$ 时触发，在 B_{RP} 典型值为 $\pm 1.5\text{mT}$ 时释放，并具有 1.5mT 迟滞。该器件的数字输出将进入 TI-SCB 上的输入引脚。

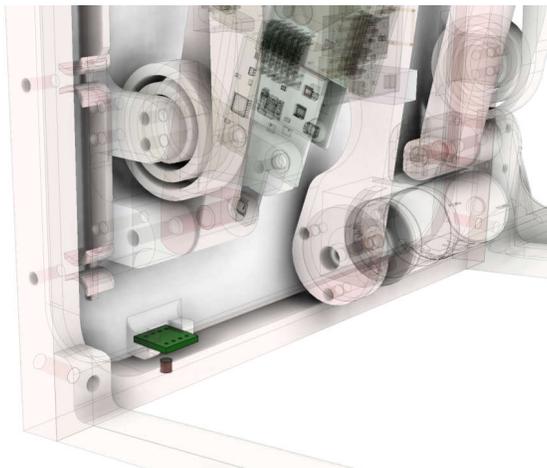


图 4-3. TMAG5131-Q1 位置和嵌入在车门框架中的磁体

TMAG5131-Q1 在磁体上方居中，在传感器封装顶部与磁体表面之间有 4.08mm 的气隙。磁体和传感器都距离铰链原点大约 140mm。磁体的高度为 3.08mm，半径为 1.59mm。

图 4-4 显示了 TI 磁感应模拟器 (TIMSS) 在从关闭到打开的 90 度旋转过程中对于这些磁体和传感器位置的仿真结果。该仿真的配置考虑了 TMAG5131-Q1 B_{OP} 最大值和 B_{RP} 最小值，因此有助于确定器件可能改变状态的最坏情况。结果显示，当车门打开时，TMAG5131-Q1 输出会在旋转 3 度后释放。当车门关闭时，TMAG5131-Q1 输出会在 2 度处激活。这些磁场转换处于车门关闭位置和打开位置的空间范围内，在本例中被认为是 90 度。2 至 3 度的转换区域有助于确保 TMAG5131-Q1 在车门仅轻微打开时也能释放，并且 TMAG5131-Q1 仅在回到关闭位置时才会再次激活。

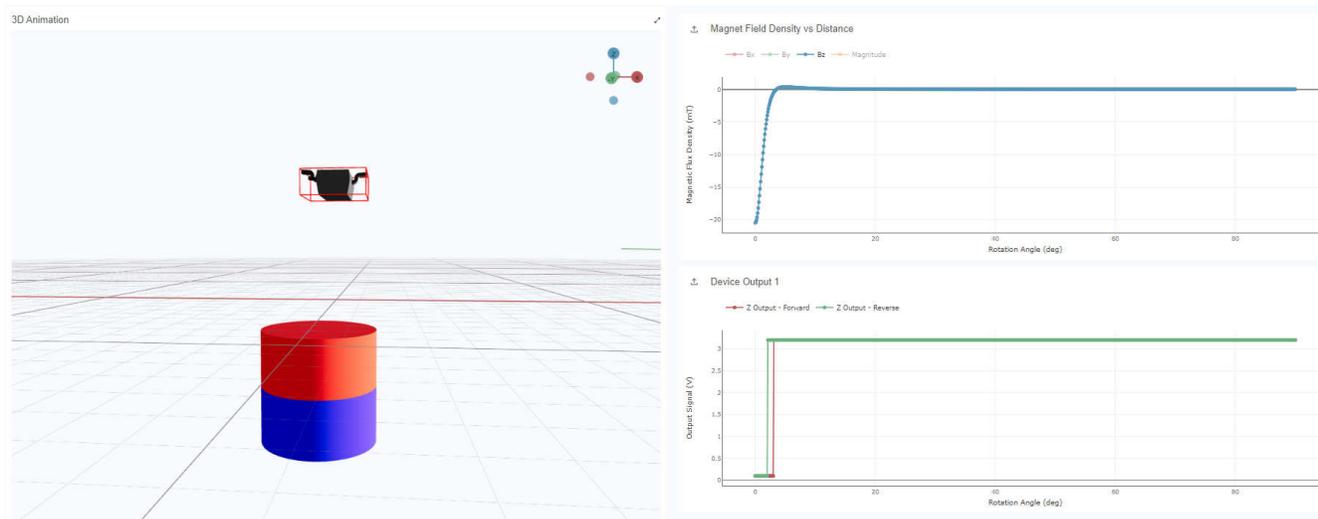


图 4-4. TMAG5131-Q1 车门打开或关闭 TIMSS 仿真结果

在该演示的 GUI 中，TI-SCB 上的 GPIO 会监控 TMAG5131-Q1 的输出以确定车门是打开还是关闭状态，并会使用车门指示灯显示当前状态。在图 4-5 和图 4-6 中，您可以看到当车门关闭时，车门指示灯熄灭，当车门打开时，指示灯亮起。该演示中的车门打开或关闭检测的全部操作均在此[视频](#)中展示。



图 4-5. 车门关闭指示灯

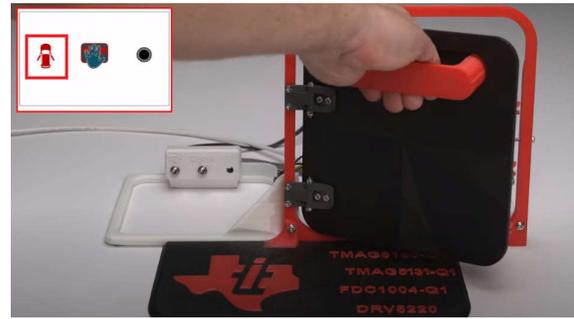


图 4-6. 车门打开指示灯

4.2 使用磁感应功能进行可展开式车门把手位置检测

利用磁感应功能，可以通过多种不同方式在可展开式车门把手伸出和缩回时跟踪车门把手的位置。把手的移动可能被跟踪为线性运动或旋转运动。在本应用手册中，我们考虑的是把手伸出和缩回时在轴上发生的旋转，如图 4-7 所示。

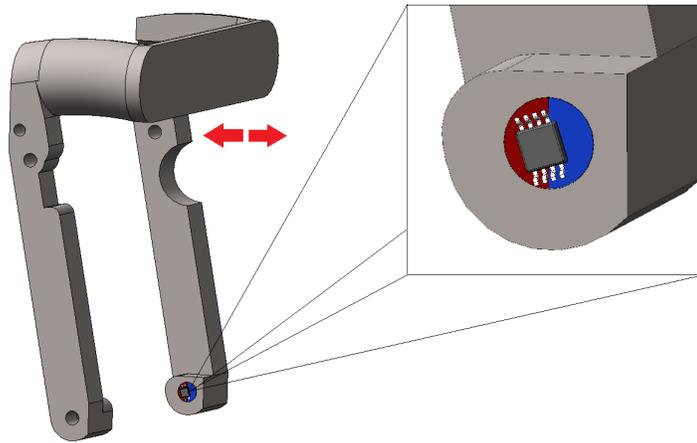


图 4-7. 车门把手旋转运动

有一个径向圆柱磁体可能嵌入在可展开式车门把手中，使该磁体在与把手本身相同的轴上居中并旋转。因此，磁体的角度会随着车门把手的伸出和缩回而变化。AMR 角度传感器或 3D 线性霍尔效应传感器可与磁体同轴放置，也可以离轴放置在一边，如图 4-8 所示。



图 4-8. 传感器同轴与偏轴放置

传感器在磁体旋转时检测磁场的角度。为了准确测量角度，必须对两个轴的振幅进行标准化。同轴放置时，振幅通常匹配良好，如图 4-9 所示。偏轴拓扑通常会导致两个轴之间的振幅不匹配，如图 4-10 所示。TMAG5170-Q1 和 TMAG5173-Q1 等器件可提供片上增益调整选项，以应对振幅不匹配和机械位置错位问题。

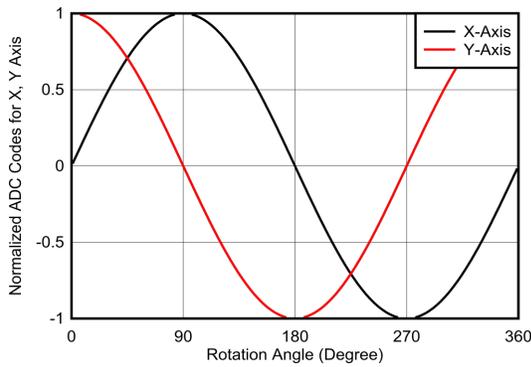


图 4-9. 同轴放置时 360° 旋转的传感器数据

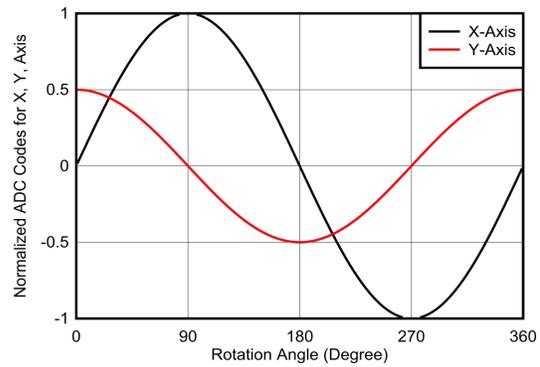


图 4-10. 偏轴放置时 360° 旋转的传感器数据

根据选择的传感器类型，磁性输出信号可以是模拟信号或数字信号。对于两个振幅匹配良好且 90° 异相的信号，可以使用 [方程式 1](#) 中所示的反正切函数来计算角度。

$$\theta = \text{atan2}\left(\frac{B_X}{B_Y}\right) \quad (1)$$

其中：

- θ 表示磁场的角度
- B_X 表示磁场向量的 X 分量的幅度
- B_Y 表示磁场向量的 Y 分量的幅度

本例使用了磁场向量的 X 和 Y 分量。根据传感器放置方式，宜改用 X 和 Z 或 Y 和 Z 磁场分量进行角度计算。

TMAG5170-Q1 和 TMAG5173-Q1 等某些器件具有集成式 CORDIC，可为同轴和偏轴角度测量拓扑提供完整的 360° 角度位置信息。在车门把手展开、缩回、被拉动或推动时，通过从磁体准确可靠地测量角度，角度变化随后会与把手位置关联起来以检测到正确的状态。

4.2.1 使用 TMAG6180-Q1 实现可展开式车门把手位置检测的演示

该演示使用具有 360 度角度范围的 TMAG6180-Q1 汽车级高精度模拟 AMR 角度传感器来监测把手位置。有一个径向磁体嵌入到把手总成中，并以把手的旋转轴为中心，如 [图 4-11](#) 所示。在 TMAG6180-Q1 的安装中，AMR 检测元件以同轴对齐的方式居中，使 TMAG6180-Q1 顶部离磁体表面约 1.5mm。磁体的高度为 12mm，半径为 3.18mm。把手距离旋转轴大约 98.52mm，这意味着每旋转一度，把手移动约 1.72mm。

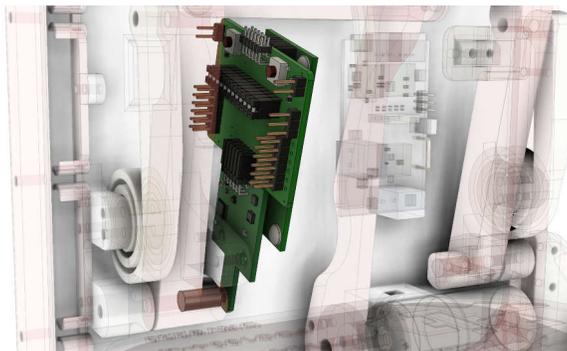


图 4-11. TMAG6180-Q1 位置和嵌入在把手中的磁体

[图 4-12](#) 展示了 TI 磁感应模拟器 (TIMSS) 在 360 度旋转过程中对于这些磁体和传感器位置的仿真结果。第一幅图展示了当磁体旋转时磁场不断变化的 X 和 Y 向量。由于同轴对齐，振幅匹配良好。第二幅图展示了 TMAG6180-Q1 不断变化的差分正弦和余弦模拟输出。请注意，外部磁场每旋转 360 度，AMR 输出就会提供两个周期。这是因为输出的电气范围为 180。如果传感器参考线与磁场方向之间的机械角度为 θ ，则 AMR 输出分别对应于

$\cos(2\theta)$ 和 $\sin(2\theta)$ 。通过利用第三幅图中所示的霍尔传感器的数字输出，AMR 传感器的角度范围可扩展到 360 度。也可以在 TIMSS 中使用参数扫描功能来模拟机械容差，从而了解对角度测量的潜在影响。

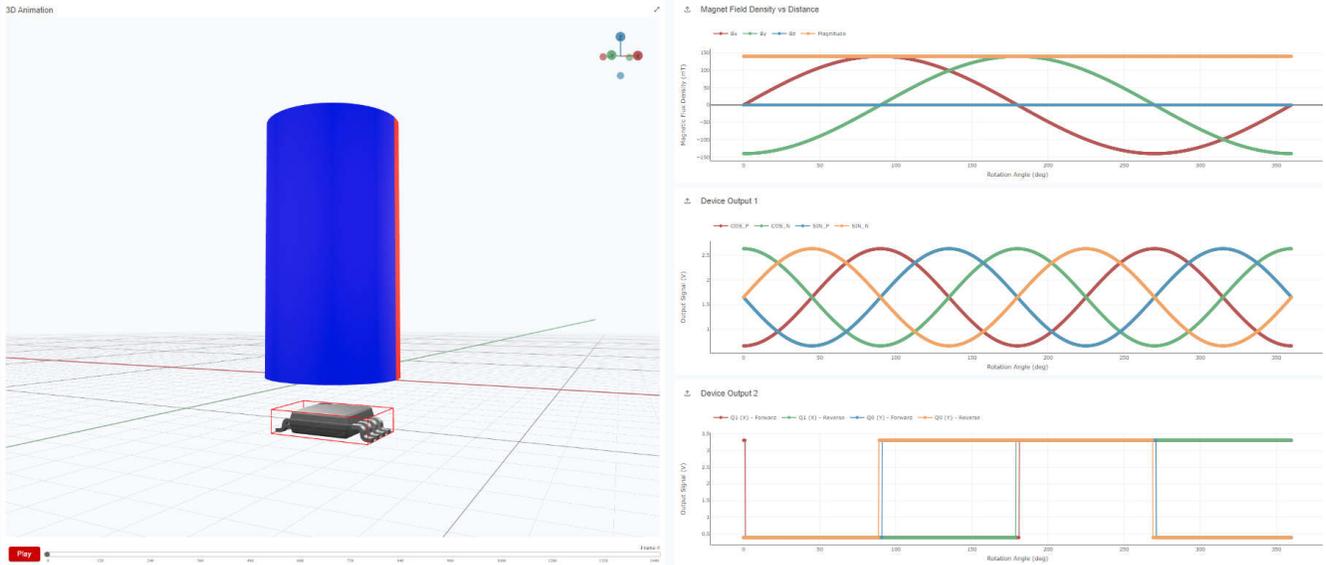


图 4-12. TMAG6180-Q1 TIMSS 仿真结果

该演示的 GUI 在 $\arctan2$ 计算中使用 TMAG6180-Q1 正弦和余弦输出以及 Q0 和 Q1 输出来确定把手的旋转角度。

图 4-13 中的角度图展示了 TMAG6180-Q1 随时间推移测得的把手角度。在该演示中，当把手在车门上处于静止状态时，把手角度测量值约为 56° ，而当 DRV8220 完全推出把手时的测量值约为 46° 。把手从车门向外推出 17.4mm，这种情况下符合先前的计算模式，即每旋转一度把手伸出约 1.72mm。

如果用户希望把手的展开角度更大或更小，可以调整这些角度限制。此外，当用户按下把手时，把手角度测量值约为 59° ，而当用户拉动把手时的测量值约为 45° 或更小。通过这些角度测量值可以轻松实现在按下把手时启动的其他功能，或者确保用户拉动把手时把手不会缩回。此视频展示了该演示中的可展开式车门把手位置检测的完整操作过程。

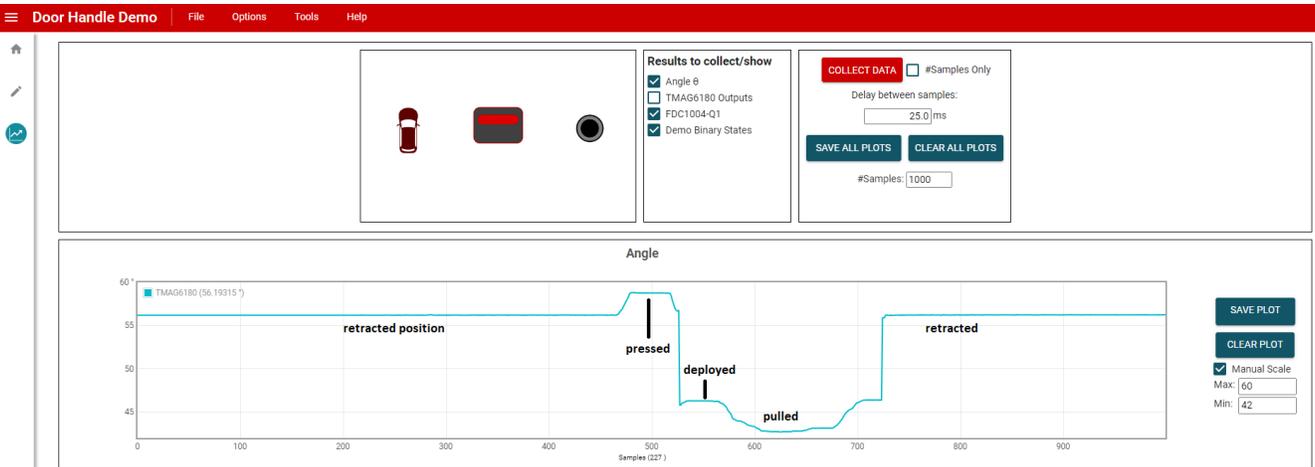


图 4-13. 车门把手旋转角度图

4.3 使用电容式感应功能进行手接近检测

4.3.1 电容式感应应用概述

电容式感应技术可以检测外部目标（待测物体）对传感器电极电场造成的失真。传感器电极通常是一种导电结构（如铜板），可将电场辐射到目标上，从而在传感器电极和目标之间形成互电容。电容式传感器器件（在本例中为 FDC1004）可检测电容变化，并提供反映新电容值的输出数据。

图 4-14 展示了电容式感应如何用于接近检测、液位检测和材料检测。在接近检测（本应用手册将侧重于此应用）中，接地的导电物体（如左图中所示的手指）实际上是一个接地平面，并与传感器形成互电容。当手指朝着传感器移动或远离传感器时，电容会发生变化，随后电容式感应器件便会检测到这一变化情况。在液位检测中，传感器和目标（液体）的位置是固定的，液位的变化会导致传感器或液体电容发生变化，而这一变化便可通过器件检测到。在材料检测中，传感器和目标可以有固定的尺寸和位置，传感器或目标电容可以通过目标材料的介电常数（ $\epsilon_t = \epsilon_r \epsilon_o$ ）和对电容的影响来帮助区分不同的材料。更多详细信息，请参阅 [FDC1004：电容式感应的基础知识和应用](#)。

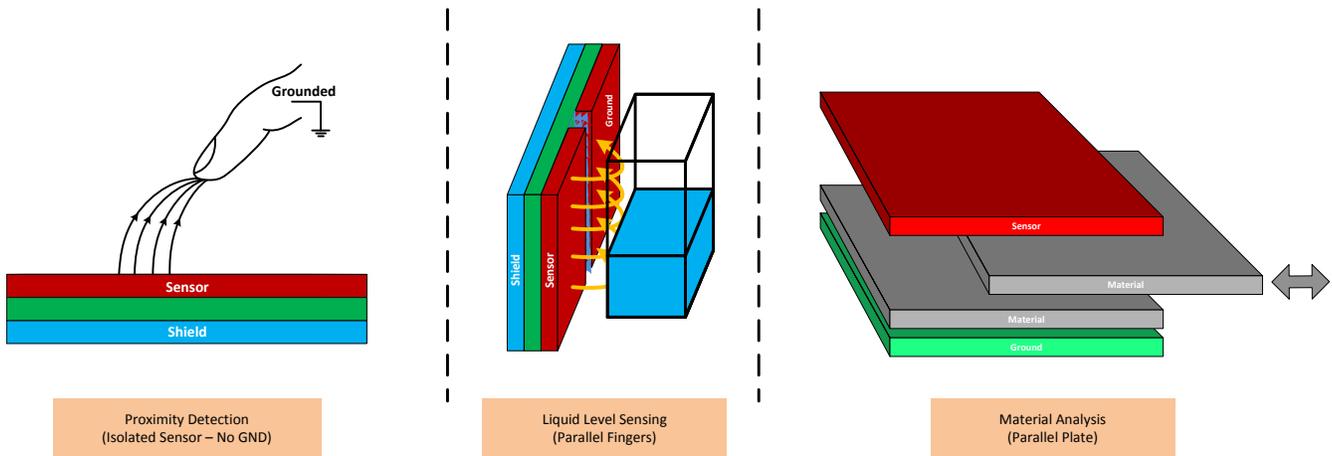


图 4-14. 电容式感测应用

电容式感应面临的两个挑战是来自附近物体的干扰和周围环境中的电磁 (EM) 能量。两者都可以通过良好的机械设计和使用有源屏蔽来管理。与接地屏蔽相比，有源屏蔽的优势在于可以放置在靠近传感器的位置以充分提供保护，而不会给传感器带来不利负载，也不会影响目标电容的测量。与根据定义保持在零电压的接地屏蔽不同，有源屏蔽采用与传感器相同的波形进行驱动，因此传感器电极和有源屏蔽之间没有电压差。传感器波形和屏蔽波形之间的零电压差将避免附近的屏蔽给传感器带来负载。屏蔽驱动器的低输出阻抗将减弱入射到屏蔽层上的外部电磁场，并使传感器与附近的物体隔离。有源屏蔽有助于将检测区域聚焦到传感器的非屏蔽侧。

屏蔽电极可通过多种方式与传感器电极配对，如图 4-15 所示。

- 与传感器电极大小相同的屏蔽物直接置于传感器下方。
这种配置代表需要使用的最小屏蔽尺寸。
- 比传感器电极更大的屏蔽物直接置于传感器下方。与相同大小的传感器相比，这种配置可以更好地衰减来自传感器下方侧面的干扰。
- 屏蔽环紧挨并围绕传感器顶部，屏蔽物位于传感器下方。这种配置可对源自传感器下方和侧面的干扰进行最出色的衰减。

为确保对传感器电极的相关干扰进行最出色的衰减，需要尽可能缩短传感器与屏蔽电极之间的距离。

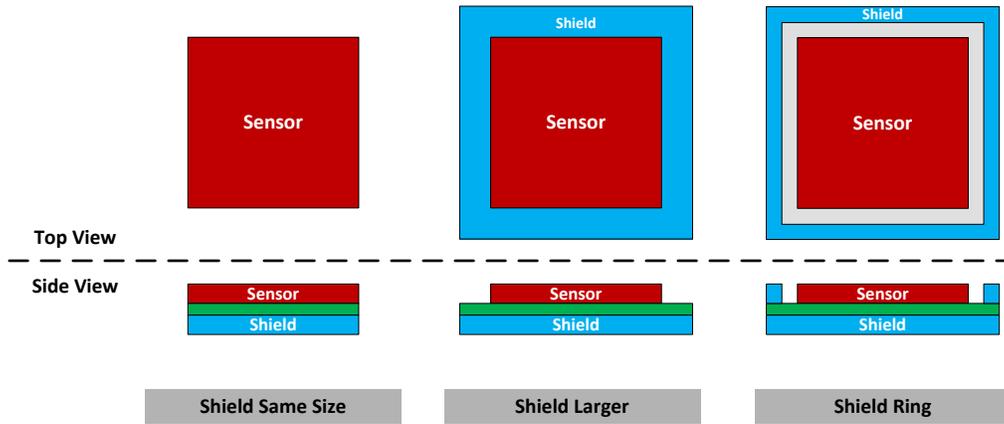


图 4-15. 有源屏蔽配置

请注意，连接到传感器电极的 PCB 布线也可能对干扰敏感。根据设计和 PCB 布局，也许可以屏蔽连接到传感器的 PCB 布线，从而减弱布线上的干扰。更多详细信息，请参阅 [电容式感应：有源屏蔽的来龙去脉](#)。

传感器电极的设计可能差异很大，通常取决于系统的机械限制。很难提供通用指南，最终的传感器设计通常会涉及试错，甚至可能（但并不总是）需要电磁仿真。对于触控检测应用，最好先考虑适用于平行板电容器的众所周知的公式：

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times A}{d} \quad (2)$$

其中：

- A = 两个板的面积（以平方米为单位）
- ϵ_r = 两个板之间材料的相对介电常数
- ϵ_0 = 自由空间的介电常数 (8.85×10^{-12} F/m)
- d = 板间的间隔距离（以米为单位）

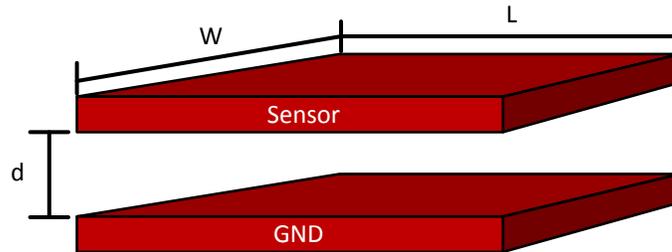


图 4-16. 平行板电容器

最好先根据机械要求考虑可用的传感器面积，并使用 [方程式 2](#) 来估算产生的电容。对于处于静止位置（例如，附近没有手）的车门把手，传感器电极可能有弧度或轮廓，有效接地平面可能包含不同距离的表面，因此很难进行直接计算。再加上传感器和接地电极之间可能会放置具有介电常数 ($\epsilon_T = \epsilon_r \epsilon_0$) 的其他材料，就像水汽和其他污染物一样，所有这些因素都可能影响电容。这种非活动状态确定了传感器的标称 *静息* 电容，因此至关重要。

如果车门把手被激活，则附近的手必须是主要的接地表面，且其面积可能大于或小于传感器。如果手或手指的面积大于传感器面积，则可以通过 [方程式 2](#) 计算合理的近似值。如果手或手指的面积小于传感器面积，则实际传感器电容可能会小于该公式预测的值。

更多详细信息，请参阅 [采用 FDC1004 的电容式接近感应](#) 应用手册。

4.3.2 车门把手演示中基于电容式感应的软触控检测示例

上一节概述了电容式感应，本节可提供 [图 4-17](#) 中使用的电容式传感器设计的一个示例，此设计示例在相关的 [汽车车门把手系统中的位置感应](#) 应用简报中也有相关说明。[图 4-17](#) 显示了车门把手演示的照片，其中使用电容式触控

检测来实现两个功能。一个功能是软触控按钮，允许用户轻触车门上的指定表面，进而解锁和/或打开车门。在车门把手演示中，此触控表面位于弹出式车门把手的右侧。此触控功能与大众更为熟悉的按钮不同，后者需要用少许力来激活按钮功能（在本应用手册的后续部分中介绍）。电容式感应在该演示中的第二个功能是检测是否有手放在弹出式车门把手中，在有手放在把手中时会将车门打开，还可防止车门把手缩回车门表面。



图 4-17. 车门把手演示

如何在我们的车门把手演示中实施电容式传感器？图 4-18 显示了该演示背面的虚拟渲染图：电容式传感器在图像上部四分之一处显示为铜色矩形。左侧的小矩形传感器用于检测因用户手指触摸外侧表面车门把手右侧的指定触控按钮表面而增加的电容值。更大的矩形位于腔体的内表面上，用于容纳缩回的车门把手。大矩形传感器用于检测因弹出式把手内表面上存在用户手指而增加的电容值。该演示的外壳是一种聚碳酸酯树脂，其相对于自由空间的介电常数为 5 ($\epsilon_r = 5$)。

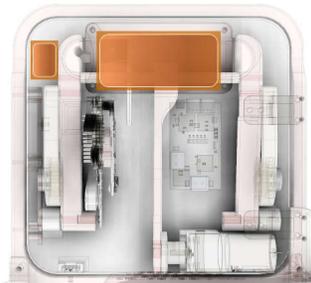


图 4-18. 车门把手演示的背面突出显示了铜色电容式传感器

电容式传感器的开发经过了很少的反复试验，但使用方程式 2 中给出的平行板公式，第一次尝试就能获得接近的结果。

在以下对触控按钮和车门把手的分析中，我们假设用户的手指或手相对于车门内侧表面上的传感器而言是一个接地平面。在方程式 2 所示的电容公式中，手指或手用作辅助板。我们还做了额外的简化假设，即手指或手具有与车门内侧表面上的传感器相同的面积。

4.3.2.1 触控按钮

假设触控按钮位于拉手（内侧左侧）的右侧（外侧）。1.4cm x 2.1cm 矩形传感器位于 5mm 厚聚碳酸酯塑料的内表面上。如果我们假设这种情况可以用理想化的平行板电容器来近似处理，那么当手指按压外表面时，我们可以预计电容约为 $C \approx \epsilon_0 \epsilon_r A/d = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot (0.014) \cdot (0.021) / 0.005 = 2.17 \text{ pF}$ 。这种情况下假设手指按压外表面的面积至少与聚碳酸酯内表面上的传感器一样大。

我们还可以将触控按钮上没有任何手指的情况近似看作平行板电容器的间隔距离远大于传感器尺寸。在此前提下，假设距离 d 为 30mm。因此，可以得到电容 $C \approx \epsilon_0 \epsilon_r A/d = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot (0.014) \cdot (0.021)/0.030 = 0.43\text{pF}$ 。

这两个近似计算结果与该演示中的数值相比如何？图 4-19 显示了该演示的 FDC1004 输出与时间样本的关系图，在第 400 个和第 500 个样本之间时，手指放在触控按钮上。手指放在按钮上之前，FDC1004 报告传感器电容约为 0.5pF 至 0.6pF，这一数值在一定程度上符合我们的粗略计算结果。手指放在按钮上之后，报告的电容会稳定到 2pF 至 2.1pF，这一数值接近于我们上面的近似计算结果值。

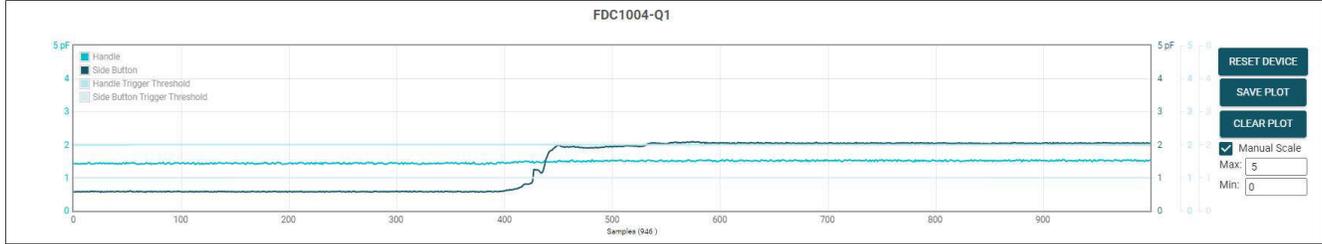


图 4-19. 演示触控按钮：FDC1004 在按压手指之前和之后报告的电容

4.3.2.2 车门把手

由于传感器、外表面和用户手之间存在空气间隙和塑料，即使是对位于缩回和伸出位置的车门把手进行近似分析也会更加复杂一些。一些简单的计算（类似于触控按钮，但考虑了塑料和空气间隙的介电效应）再结合方程式 2 中的平行板电容器公式，可以得出非常接近我们使用演示时获得的实验结果。为此，我们可以针对有手在伸出的把手上的情况，指定塑料厚度和空气间隙宽度。

机械堆叠（显示空气间隙宽度和塑料厚度）如表 4-1 和图 4-20 所示。

表 4-1. 车门把手和电容式传感器之间的机械堆叠

把手传感器尺寸	宽度 = 8cm, 高度 = 5cm
1. 车门把手传感器与容纳缩回把手的腔室之间的塑料厚度	2mm
2. 腔室外表面与车门把手外表面之间的距离（空气间隙）	10mm

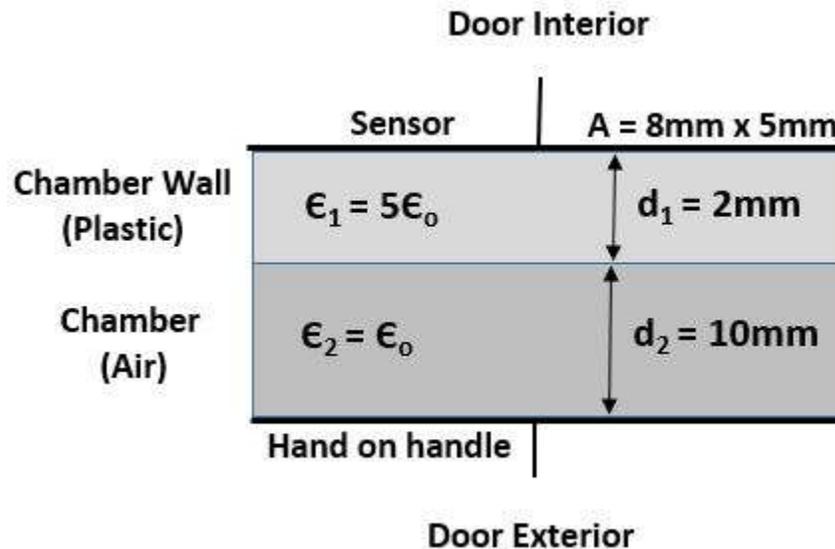


图 4-20. 车门把手机械堆叠用于计算电容

使用先前给出的并联电容器公式，在前面的堆叠中，我们可以预期的近似电容是多少？假设用手抓住伸出的把手，如图 4-21 所示。

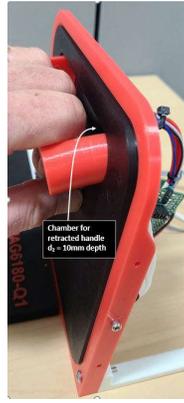


图 4-21. 用手抓住伸出的把手

假设表 4-1 中的项目 (1) 和 (2) 实际上是我们需要在电容器公式中考虑的唯一距离。首先，项目 (1) 是 8cm x 5cm 车门把手传感器与容纳缩回车门把手的腔室之间的 2mm 厚塑料 ($\epsilon_r = 5$)。第二个项目 (2) 是 2mm 厚塑料外表面与车门外表面之间的 1cm 空气间隙 ($\epsilon_r = 1$)。用手抓住伸出的把手时，用户的手指可以形成一个接地平面，这个平面距离腔室外表面约 1cm (根据上面的项目 2)。

因此，对于电容器，一个平行板可以是传感器，另一个平行板可以由抓住车门把手的用户手指形成的接地平面。如果我们做简化假设，两个平面的表面相等，那么我们的总电容可以通过具有两个不同介电常数的区域进行近似计算，如图 4-20 所示。

传感器和用户手指之间的总电容可以近似为两个串联的电容器，这两个电容器具有相同的板面积，但间隙长度和介电常数不同。基于上述堆叠的数量基于塑料厚度 [$d_1 = 2\text{mm}$, $\epsilon_{r1} = 5$] 以及腔室表面与用户手指之间的空气间隙 [$d_2 = 1\text{cm}$, $\epsilon_{r2} = 1$]，如以下公式所示。

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{d_1}{\epsilon_{r1} A} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2} A} \quad (3)$$

$$C_T = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 A}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_{r2} \epsilon_0^2 A}{\epsilon_{r2} \epsilon_0 d_1 + \epsilon_{r1} \epsilon_0 d_2}$$

$$C_T = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} A}{\epsilon_0 d_1 + \epsilon_{r1} d_2} = \frac{5 \epsilon_0 (0.08 \times 0.05)}{(0.002) + 5(0.01)}$$

$$C_T = 3.4\text{pF}$$

这种简单计算的结果与该演示的结果相比如何？图 4-22 显示了该演示的 FDC1004 输出与时间样本的关系图，在第 400 个和第 500 个时间样本之间时，手抓住展开的把手。手抓住把手之前，FDC1004 报告传感器电容约为 1.5pF，这一数值在一定程度上符合我们粗略计算的 1pF 结果。手抓住把手之后，报告的电容稳定在大约 2.9pF。虽然这不是计算得出的值，但它确实反映了一个事实，即最靠近传感器的手表面约为 12mm 至 13mm，而不是我们在计算中使用的 10mm。

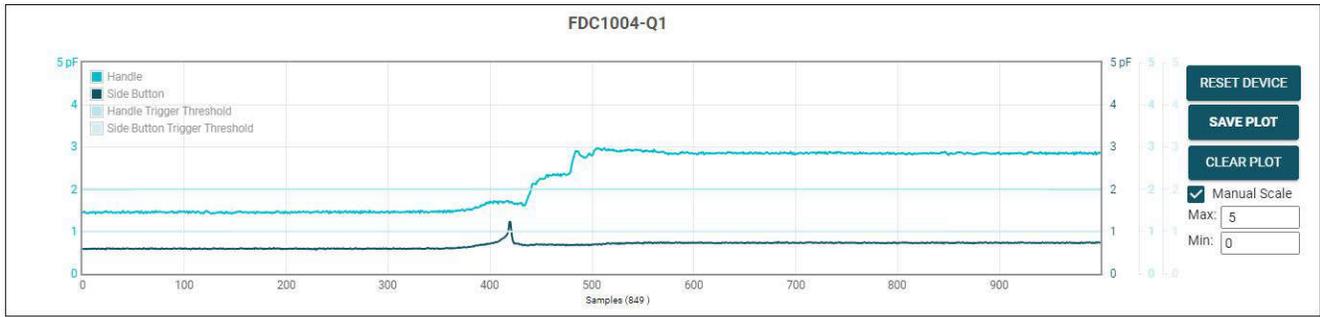


图 4-22. 演示车门把手：FDC1004 在抓住把手之前和之后报告的电容

4.4 具有电感式感应功能的按钮

4.4.1 电感式按钮

电感式传感器的运行基于感应线圈形式的可变电感器和固定集总元件 (PCB) 电容器之间的谐振原理，如下图所示。固定电容器和电感线圈构成 LDC 运行所需的外部 LC 振荡电路。振荡电路的谐振频率取决于感应线圈电感和固定电容：

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

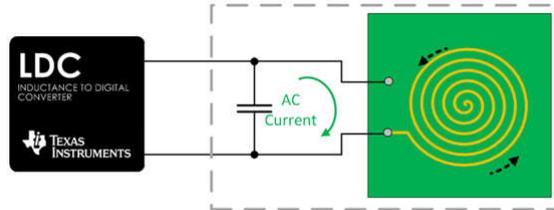


图 4-23. 电感式传感器工作原理

感应线圈的电感会因附近的导电物体而改变，而这会导致 LC 震荡电路谐振频率发生变化，电感式感应器件 (LDC) 随后会检测到这一变化。更多有关电感式传感器的信息，请参阅[电感式感应概述](#)视频或[常见的电感式和电容式感应应用](#)应用手册。

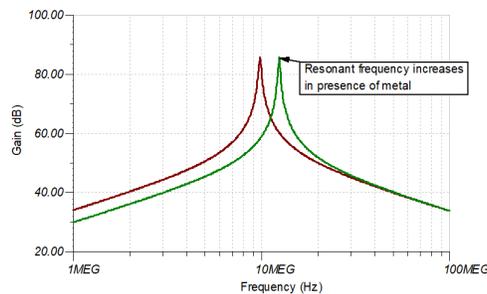


图 4-24. 电感式传感器因目标移动而发生的谐振频率变化

长期以来，按钮应用一直采用机械开关来实现；机械开关通过使电触头碰到一起，（有望）建立低阻抗连接。尽管机械开关历史悠久，但容易出现由环境导致的故障以及磨损。恶劣的环境会导致开关遭到入侵和污染（通过污垢、油、水等形式），因此可能需要特殊外壳、垫圈和其他接头来避免开关过早失效。虽然可以实现抗污染且稳定可靠的密封型机械开关，但是成本会更高。

基于电感式感应 (LDC) 的按钮开关基本没有这些缺点。这类开关稳定可靠，不会因为重复性运动磨损而不可避免地出现与活动零件及触点磨损相关的故障。这类开关可以轻松应对污染的影响，即使在潮湿环境中也能保持可靠性。这类开关可以适应宽大的外形尺寸（以支持用户佩戴手套操作），也适合空间受限的较小外形尺寸。

一些设备和设计还能支持多级按钮，另一些拥有内部算法，可管理多种按钮按压操作以及机械变形，从而无需由微控制器管理这些功能。

电感式触摸按钮可以采用以下三个主要组件来轻松实施：电感式传感器、目标表面以及电感数字转换器 (LDC)。传感器通常可以采用基于 PCB 或柔性电路的线圈来实现。目标表面可以是柔性导电材料，例如厚度足以支持趋肤效应涡流的薄金属。

如图 4-25 所示，当目标表面受力时，材料会稍稍偏转，导致电感式传感器和目标表面之间的距离 (D_{TARGET}) 缩短。导体发生偏转会导致传感器电感值 $L(d)$ 减小，进而导致传感器谐振频率增加，而这由 LDC 进行检测。以目标偏转为例，在施加 1 牛顿力的情况下，如果目标材料为 1mm 厚度的 430 不锈钢，直径为 20mm 的按钮会发生约 $0.1\ \mu\text{m}$ 的偏转。当力撤除后，该按钮表面会恢复原始形状。

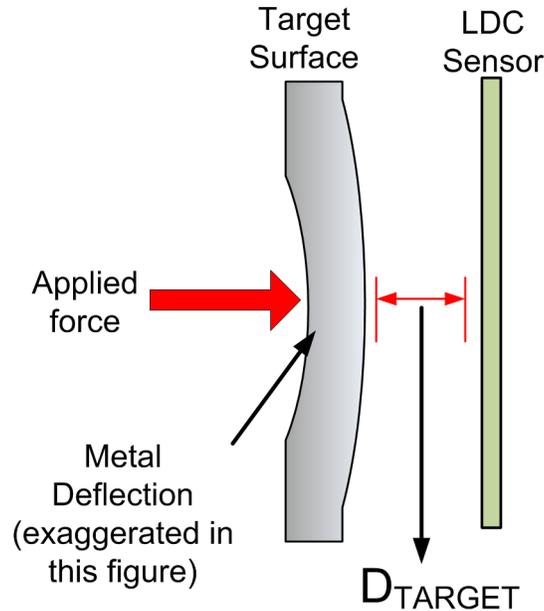


图 4-25. 电感式触控按钮元件

4.4.2 电感式按钮灵敏度

影响电感式触控按钮灵敏度的主要因素包括 [目标材料与厚度](#)、[目标距离](#) (图 4-25 中的 D_{TARGET}) 以及 [LDC 传感器尺寸](#)。按钮灵敏度由需施加到目标导电表面以触发所需 LDC 响应的力来定义。

4.4.3 目标材料

电导率 (σ) 越高的材料 (例如铜、铝或银) 越适合作为电感式感应技术的目标材料，因为目标上产生的涡流大小与目标材料的电导率 (σ) 直接相关。可以在塑料等非导电材料上增加薄薄一层导电材料，来为按钮应用制作有效的目标表面。图 4-26 通过传感器移频 (由 LDC 检测) 对目标材料和传感器频率 (影响趋肤效应) 的依赖关系，展示了 LDC 对材料导电性的灵敏度。请注意，铜导体和铝导体这两种最出色的导体在所有传感器频率下具有最大幅度的频移。[LDC 目标设计](#) 应用手册提供了额外的详细信息，而通过基于电子表格的 [LDC 检测设计计算器工具](#)，您可以计算目标电导率和厚度的影响并进行建模。

与较厚或刚性较高的目标材料相比，较薄或刚性较低的材料所需的力较小。在 [电子表格工具](#) 中还可以计算对目标表面施加一定的力所产生的偏转，此偏转与材料的抗拉强度和厚度成反比。如果我们将前一个示例 (目标：20mm 直径，1mm 厚) 修改为 0.5mm 厚，施加 1 牛顿的力所产生的目标偏转将从 $0.1\ \mu\text{m}$ 增加到 $0.880\ \mu\text{m}$ 。请务必通过工具的 [SkinDepth](#) 选项卡对照涡流深度检查所需的目标厚度。如果目标太薄而无法支持大约 3 种趋肤深度，则可能会降低按钮灵敏度。

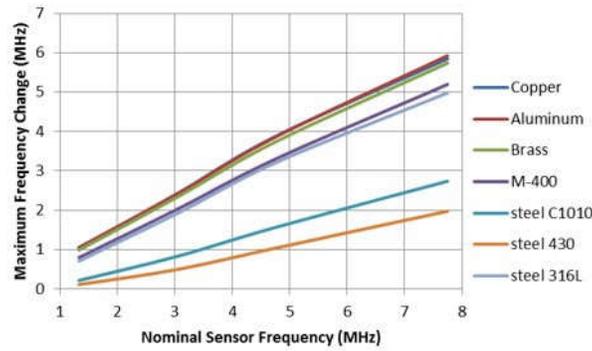


图 4-26. 以目标材料为参数时目标感应移频与标称传感器频率间的关系

4.4.4 目标距离和传感器尺寸

电感式感应依靠的是电感式传感器产生的电磁场与导电物体表面感应涡流之间的相互作用。随着 D_{TARGET} 增加，目标表面上感应的涡流会变小，因为目标导电表面现在只能捕获电感式传感器产生的一小部分电磁场。反过来，电感式感应线圈生成的电磁场线大小与传感器的直径成正比。图 4-27 显示了如何以电感式触控线圈直径百分比的形式设置 D_{TARGET} 。如图 4-27 所示，当 D_{TARGET} 位于传感器线圈直径的 20% 范围内时，开关灵敏度最出色。因此，可以支持目标偏转 $> 1\mu m$ 的按钮。

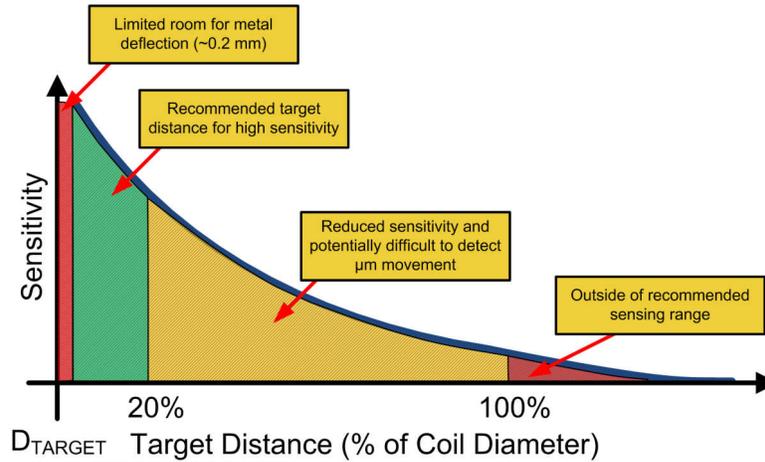


图 4-27. 按钮灵敏度与目标到传感器距离 (D_{TARGET} ，占传感器线圈直径的百分比) 的函数关系

4.4.5 设计示例

对于此设计示例，我们可以假设按钮包含在专用塑料外壳中，并以 PCB 和金属带提供目标表面。电感式感应计算器工具用于帮助确定此示例中的线圈参数。图 4-28 展示了用于后续条目的 *Spiral_Inductor_Designer* 选项卡的图像。本节中的数字 (#) 用于跟踪步骤，并与图 4-28 左侧蓝色字体 (#) 中的数字相对应。

- 假设线圈 PCB 层数为 2，因此，该工具的 *Layers* 字段 (1) 设置为 2 (如图 4-28 所示)。
- *Sensor Shape* (2) 选择为 *Circular*。
- *Outer diameter of the inductor* (3) 设置为 8mm。
- *Spacing between traces* (4) 和
- *Width of trace* (5) 设置为 5mil。
- *Turns per layer* (6) 设置为 8。
- 这些设置使 *Inductor inner diameter* (7) 略小于 4mm，得到的 *Coil Fill Ratio* (8) (内径除以外径) 约为 50%。对于大部分按钮设计，充分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，最好将线圈填充比保持在 20% 到 80% 之间，以充分提高设计的 Q 系数。
- 对于此设计，在没有目标的情况下 (例如，不存在按钮表面)，得到的 *Q factor* (9) 等于 37。
- 此传感器设计的 *Sensor capacitance* (10) 选择为 220pF，使得 *Sensor Operating Frequency no target* (11) 在 8.396MHz 频率下交互。
- 根据线圈直径，选择的 (按下按钮) *Target Distance* (12) 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。
- 如电子表格所示，0.8mm 的 *Target Distance* 对应的 *Sensor Frequency with Target Interaction* (13) 为 11.081MHz，*Q factor* (14) 为 26。

如果有任何最终参数超出器件范围，电子表格会发出警告，但在本例中未显示警告。

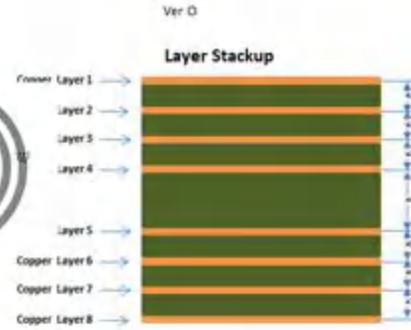
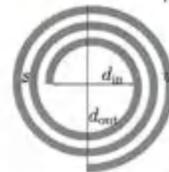
请注意，该工具支持多个电感式传感器，可通过 *LDC Device* 字段的下拉菜单来选择传感器。该工具会根据每个器件的参数以及规格和功能来定制通知和警告。

TI LDC Inductance Calculator

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

[Take a look at this blog post for additional information](#)

[Return to Main page](#)



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



←Double-Click For Instructions

LC Sensor calculations			
LDC Device		LDC3114	
Operating temperature	T	25 °C	Enter operating temperature
(10) Sensor capacitance	C	220.0 pF	Select LC tank capacitance
(1) Layers	M	2 Layers	Number of layers on PCB board (1≤M≤8)
(6) Turns (per layer)	N	8 Turns	Number of turns per layer
(3) Outer diameter of the inductor	d _{OUT}	8.00 mm	Outer Diameter of the spiral inductor
(2) Sensor Shape		Circular	
Long side of inductor	d _i	20.00 mm	
(4) spacing between traces	S	5.000 mil	Space between traces (mm or mil)
(5) width of trace	w	5.000 mil	Width of the trace (mm or mil)
PCB thickness between 1st layer and 2nd layer	h12	8.000 mil	Space between layer 1 and 2 (mm or mil)
PCB thickness between 2nd layer and 3rd layer	h23	30.000 mil	Space between layer 2 and 3 (mm or mil)
PCB thickness between 3rd layer and 4th layer	h34	8.000 mil	Space between layer 3 and 4 (mm or mil)
PCB thickness between 4th layer and 5th layer	h45	8.000 mil	Space between layer 4 and 5 (mm or mil)
PCB thickness between 5th layer and 6th layer	h56	8.000 mil	Space between layer 5 and 6 (mm or mil)
PCB thickness between 6th layer and 7th layer	h67	1.575 mil	Space between layer 6 and 7 (mm or mil)
PCB thickness between 7th layer and 8th layer	h78	1.575 mil	Space between layer 7 and 8 (mm or mil)
Copper thickness	t	1.000 oz-Cu	Copper layer thickness (mm,oz-Cu, or mil)
Conductor Resistivity (at 20°C)	pr	1.68E-08 Ωm	Use 1.68E-08 for Copper
Conductor Resistivity temperature coef	pr_tc	0.393 %/°C	Use 0.393 for Copper
Conductor relative permeability	μ	1.00	Use 1.0 for Copper
Parasitic capacitance	C _{par}	4.0 pF	Estimate - generally in the rage of 1 to 5 pf
Copper resistivity at operating temperature	pr_t	1.713E-08 Ωm	
(8) Coil Fill Ratio	d _{in} /d _{out}	0.49	0.2> d _{in} /d _{out} >0.8 is recommended for highest Q
(7) inductor inner diameter	d _{in}	3.936 mm	Inner diameter of the spiral inductor (mm or mil)
Self inductance per layer	L	0.480 μH	
Total Inductance with no target	L _{TOTAL}	1.604 μH	
(11) Sensor Operating Frequency no target	f _{RES}	8.396 MHz	
Rp with no Target	R _p	3.19 kΩ	
(9) Q factor	Q	37.00	
Self resonant frequency (estimated)	SRF	62.831 MHz	SRF should be >1.25*F _{sensor}
(12) Target Distance	D	0.800 mm	For aluminum target of at least 5 skin depths
Sensor inductance from Target Interaction	L'	0.921 μH	
(13) Sensor Frequency with Target Interaction	f _{RES'}	11.081 MHz	
Rp with Target Interaction	R _{p'}	1.68 kΩ	
(14) Q Factor with target	Q'	26.0	

图 4-28. 电感式感应计算器工具 - “Spiral Inductor Designer” 选项卡

表 4-2 总结了该工具的结果。

表 4-2. LDC 线圈计算器输出

说明	指示符	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	

由于此设计的原型按钮设计可以进行 3D 打印，因此原型还可以包括按钮设计所需的垫圈，而不必使用如图 4-29 所示的单独垫圈材料。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，按钮表面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。

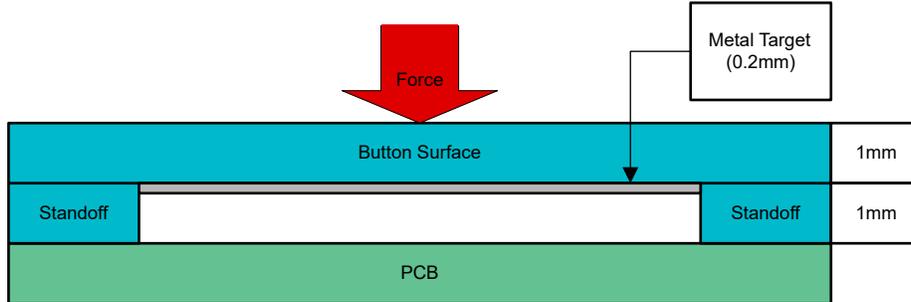


图 4-29. 电感式触控按钮层叠

按钮表面的材料会影响金属目标的可偏转程度。更加坚硬的材料或能够吸收按压力的材料可能会使偏转减少，因此可能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](#) 有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 $20 \mu\text{m}$ 。这一偏转量对于此按钮设计来说可能是足够的，因为目标非常靠近第一个传感器。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。

5 总结

位置传感器可用于在汽车车门把手设计中可靠地实现各种功能。AMR 角度传感器或 3D 霍尔效应传感器可以通过测量旋转磁体的角度来检测可展开式车门把手的位置。霍尔效应开关可以通过检测是否存在磁体来检测车门开/关状态。电容式感应可实现手接近检测和/或软触控检测。最后，可以使用电感式传感器实现软触控和/或按钮检测。本文档中介绍的设计示例基于一个演示，演示视频 [使用位置传感器进行设计：汽车车门把手](#) 和 [汽车车门把手系统中的位置感应](#) 应用简报中也介绍了该演示。

6 参考资料

- [使用位置传感器进行设计：汽车车门把手](#) 视频。
- 德州仪器 (TI), [汽车车门把手系统中的位置感应](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [TI 磁感应模拟器 \(TIMSS\)](#) 仿真工具。
- 德州仪器 (TI), [采用 FDC1004 的电容式接近感应](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [电感式感应概述](#) 视频。
- 德州仪器 (TI), [常见的电感式和电容式感应应用](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [LDC 目标设计](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [适用于 HMI 按钮应用电感式触控系统设计指南](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [采用 LDC、用于电感式感应应用的传感器设计](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [LDC 感应设计计算器工具](#) 仿真工具。

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