



David Wang

摘要

电容式感应技术变得越来越流行，并逐步取代光学检测方法和机械设计，其用途包括接近/手势检测、材料分析和液位感应。电容式感应优于其他检测方法的主要优势在于，它可感应不同种类的材料（皮肤、塑料、金属、液体），无需接触，不会磨损，很小的传感器就能够在很远的距离之外进行感应，PCB 传感器成本较低，而且是低功耗解决方案。若要了解系统级设计适用的应用类型及其限制，务必要理解静电和电容计算理论。本应用手册涵盖了平行板和边缘效应，电容式传感器设计，以及在各种应用中采用电容式感应系统的方式。

内容

1 电容测量基础知识.....	2
2 电容式感应 - 工作原理.....	3
3 电容式感应与电容式触控.....	4
4 FDC1004 工作原理.....	4
5 FDC1004 用例.....	5
6 电容式传感器拓扑.....	7
7 入门：设计指南、提示和原则.....	10
8 修订历史记录.....	11

插图清单

图 1-1. 平行板电容器.....	2
图 1-2. 平行板电容器的电场.....	3
图 2-1. 电容式感应的基本实现方式.....	3
图 4-1. FDC1004 电容式感应工作原理.....	4
图 5-1. 独立通道使用案例 - 手势感应应用.....	5
图 5-2. 差动测量或比例式测量示例，液位.....	6
图 5-3. 远程感应示例.....	6
图 5-4. 时变偏移测量示例.....	7
图 5-5. 接近车门示例.....	7
图 6-1. 平行板拓扑用于材料分析.....	8
图 6-2. 平行指（GND-传感器）拓扑.....	8
图 6-3. 中央接地，中央传感器对称.....	9
图 6-4. 梳状传感器设计.....	9
图 6-5. 用于人类识别的单一传感器拓扑.....	10
图 7-1. 屏蔽配置.....	11

表格清单

表 3-1. 电容式触控与电容式感应要求.....	4
---------------------------	---

1 电容测量基础知识

电容是指电容器存储电荷的能力。平行板电容器是一种常见器件，电容的计算公式为 $C = Q / V$ ，其中 C 为存储电荷 Q 在已知电压 V 下的电容。平行板电容器（请参见图 1-1）包含两个导体板，其电容（以法拉为单位）计算方式为：

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times A}{d} \quad (1)$$

方程式 1 的说明：

- A 为两个板的面积（以米为单位）
- ϵ_r 为板间材料的介电常数
- ϵ_0 为自由空间的介电常数 ($8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)
- d 为板间的距离（以米为单位）

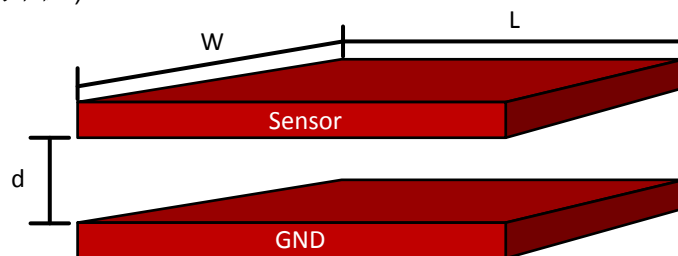


图 1-1. 平行板电容器

荷电平行板电容器两个板的表面，均匀分布着大小相等但极性相反的电荷。电场线始于较高电压电位的荷电板，终止于较低电压电位的荷电板。平行板公式忽略了边缘效应，因为对行为的建模过于复杂，但如果相比板的其他尺寸板间距离 (d) 很小，电容器上大部分区域的场是一致的，这样的估计就与实际情况相当接近。边缘效应在靠近板边缘的位置出现，可影响系统测量的精度，具体取决于应用场景。边缘区域的场线密度低于板的正下方，因为场强与等电位线的密度成正比。这会导致边缘区域的场强较弱，在测量到的总电容中占比也小得多。图 1-2 所示为平行板电容器的电场线路径。

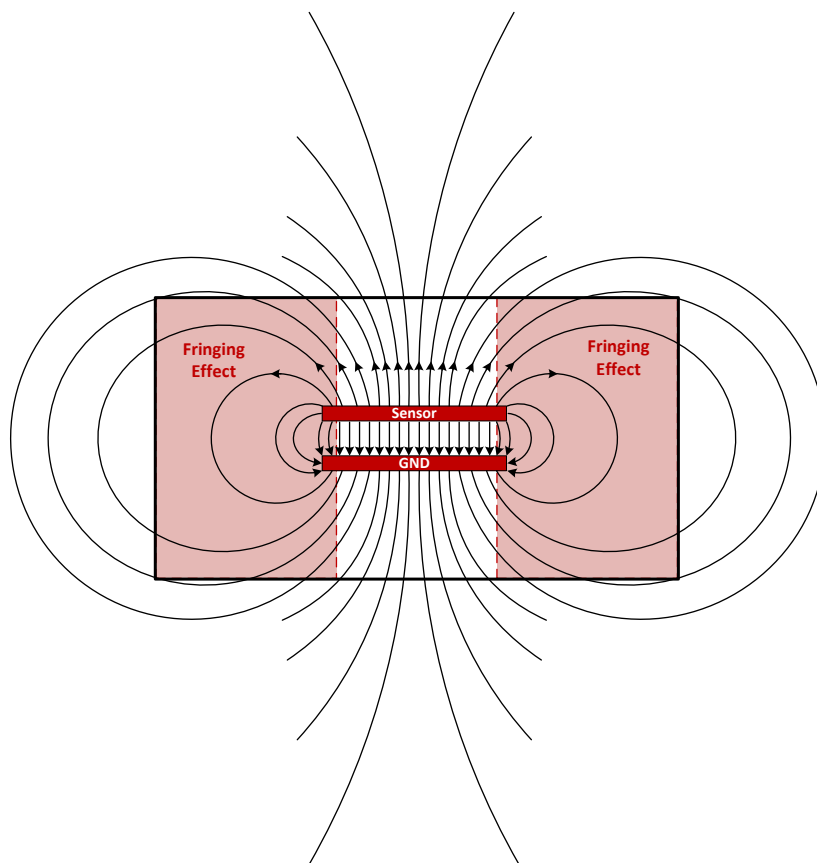


图 1-2. 平行板电容器的电场

2 电容式感应 - 工作原理

电容式感应是一种基于电容耦合的技术，将人体产生的电容作为输入。它有助于实现更可靠的解决方案，用以测量液位、材料成分、机械按钮和人机接口。基本的电容式传感器可以是任何金属物品或导体，可检测任何导电物质，或与空气的介电常数不同的物质。图 2-1 所示为电容式感应的三种基本实现方式：接近/手势识别、液位感应和材料分析。有关传感器拓扑的更多详情，可在[电容式传感器拓扑](#)部分找到。

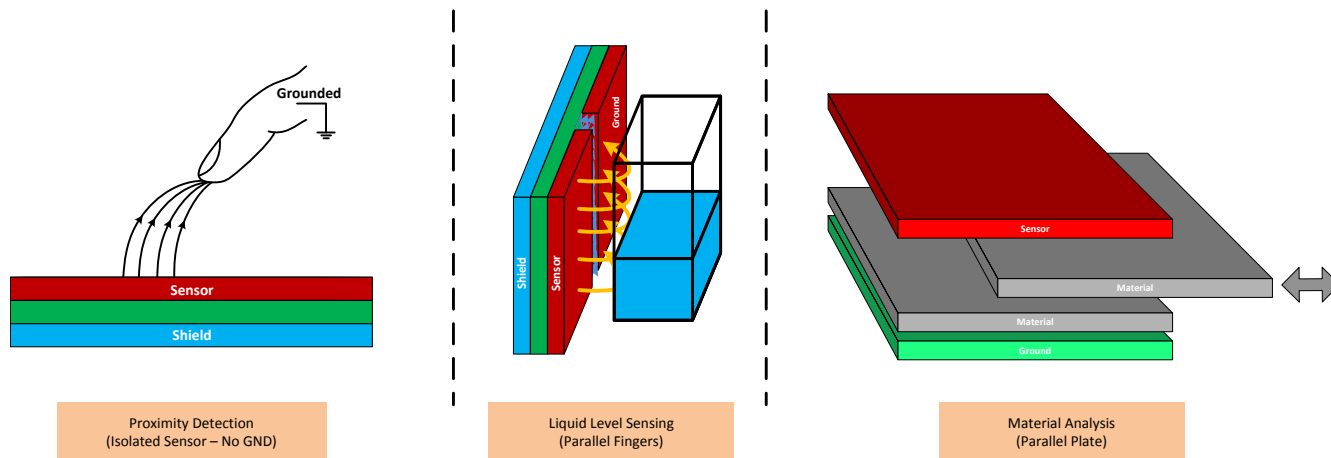


图 2-1. 电容式感应的基本实现方式

3 电容式感应与电容式触控

与电容式触控相比，电容式感应具有类似和部分重叠的概念。电容式感应可用于触控，电容式触控也可应用于电容式感应，但这会误导用户，因为两种应用的器件设计各有优势和局限性。表 3-1 中显示了一些典型要求。一种特定器件可能并不适合触控或感应应用，具体取决于系统要求。

表 3-1. 电容式触控与电容式感应要求

要求	电容式触控	电容式感应
通道数量	高 (> 8)	低 (< 4)
分辨率	低	高
典型距离	2 至 3mm	长达 70cm
灵敏度	10s 到 100s fF	< 1 fF
需要接触	是	否
功耗	μA 到 mA 级	μA 级

4 FDC1004 工作原理

FDC1004 电容式感应的基本操作是实现一种开关电容器电路，将电荷从传感器电极传输至 Σ - Δ 模数转换器 (ADC)，如图 4-1 所示。在特定时间段内在传感器线上驱动 25kHz 步进波形，以对电极进行充电。在特定时长后，传感器上的电荷会传输到采样-保持电路。 Σ - Δ ADC 可将模拟电压转换为数字信号。ADC 完成转换后，产生的结果会经过数字滤波和纠正，具体取决于增益和偏移校准。

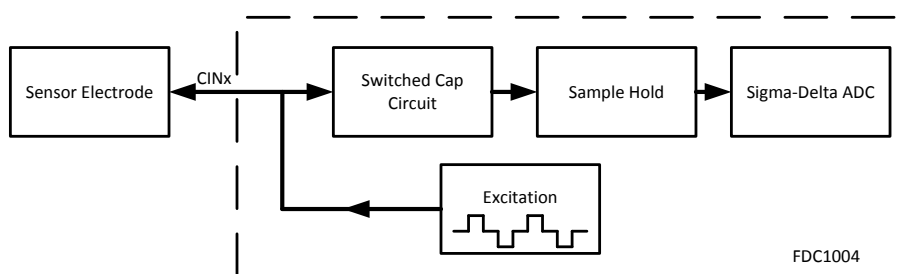


图 4-1. FDC1004 电容式感应工作原理

5 FDC1004 用例

在若干用例中，FDC1004 由于其器件规格和设计功能而具有显著优势。四种重要的用例包括：

1. 独立通道
2. 差动测量与比例式测量
3. 远程感应
4. 时变偏移测量

5.1 独立通道

FDC1004 具有 4 个独立通道，以时分多路复用的方式依次采样。使用独立通道可使每个通道的测量值不受其他通道的寄生电容和噪声影响。它还使系统能够分别补偿电容变化和偏移。每个通道的输入电容范围 C_{IN} 为 $\pm 15\text{pF}$ ，偏移电容范围 C_{OFFSET} 最高为 100pF （用户使用 CAPDAC 功能编程）。典型应用包括雨水感应、接近/手势检测和水/冰/雪检测。

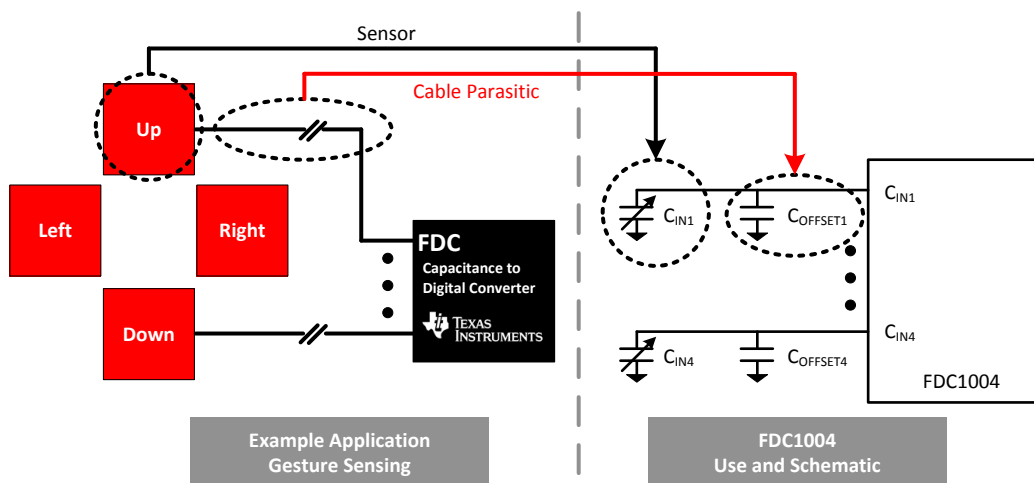


图 5-1. 独立通道使用案例 - 手势感应应用

5.2 差动测量与比例式测量

执行差动测量可获得两个传感器间精确的电容测量差。这适用于可造成电容变化的环境因素。由于温度、湿度、材料类型和材料所受压力等因素导致至少一个通道（环境传感器）监测到电介质的改变，而第二个和第三个通道分别为液位和参考传感器。对于液位感应而言，比例式测量是液位传感器和参考传感器之间的比例或差值，因为液位电容与液位高度成正比。液位必须高于参考传感器的高度，才能形成独立的液位和温度测量系统。

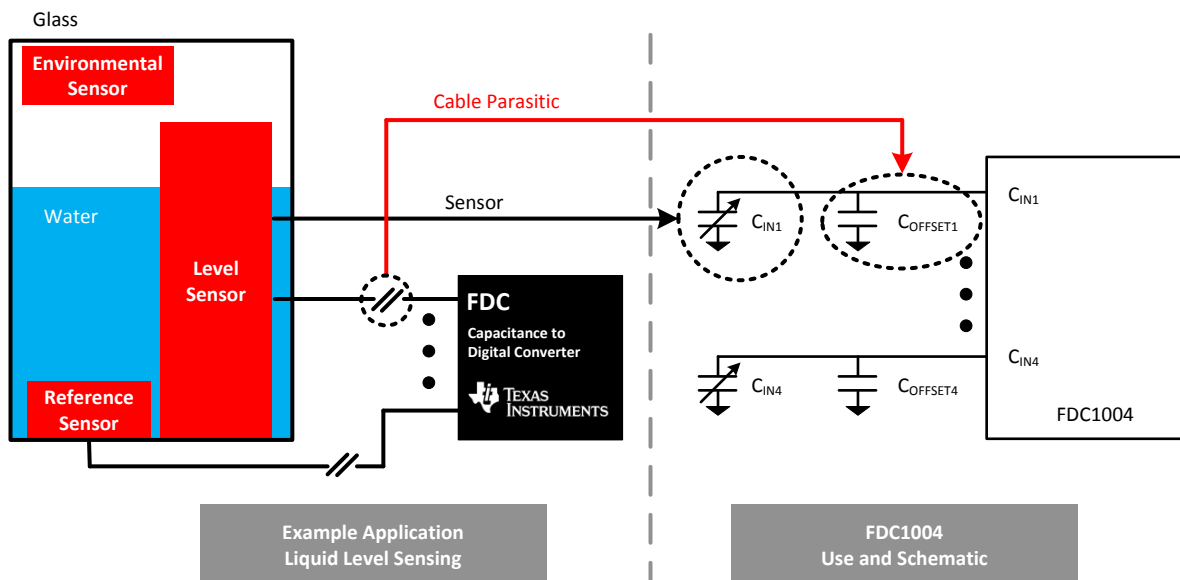


图 5-2. 差动测量或比例式测量示例，液位

5.3 远程感应

FDC1004 可用于需要远程感应的系统设计。传感器和 FDC1004 之间的距离约为 1 到 100 米，如果需要精确测量电容，这会是一个主要问题。电缆线路会拾取沿线的外部干扰，因此传感器和 FDC1004 之间的信号路径距离应尽可能短。为了补偿长信号路径，FDC1004 允许最高 100pF 的寄生电容补偿。这 100pF 的补偿使 FDC1004 能够使用最长 1600m (60fF/m) 的双绞线，或最长 1.5m (66pF/m) 的同轴电缆。如果需要较大的偏移，可在输入 CIN 引脚上使用外部电容器进行接地，使 FDC1004 输入电容范围中的电容稳定。

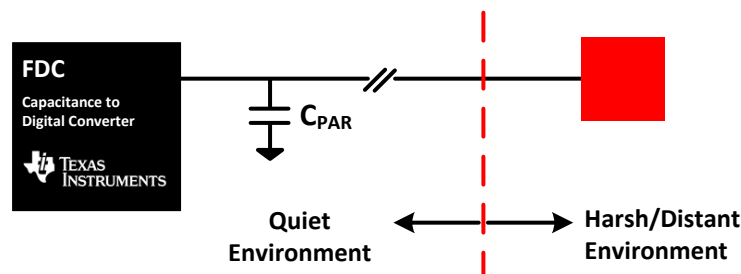


图 5-3. 远程感应示例

5.4 时变偏移测量

与差动测量相比，FDC1004 可用于需要监控时变偏移测量的情况。副本传感器可调节湿度、环境和水/冰/雪等因素的偏移变化。此外偏移可自动调节，支持 CIN 在 0 到 115pF 之间变化。包含时变偏移的应用示例包括车门把手上有水/冰/雪时的接近/手势检测，如图 5-5 所示。单一接近/手势传感器在有雨/雪/冰时无法检测，由于偏移值可变，使系统错误触发。添加与主传感器大小相同的环境传感器，只跟踪雨/雪/冰，则可根据环境变化自动调节。然后可使用差动测量法仅确定预期目标（用户的手）的电容。

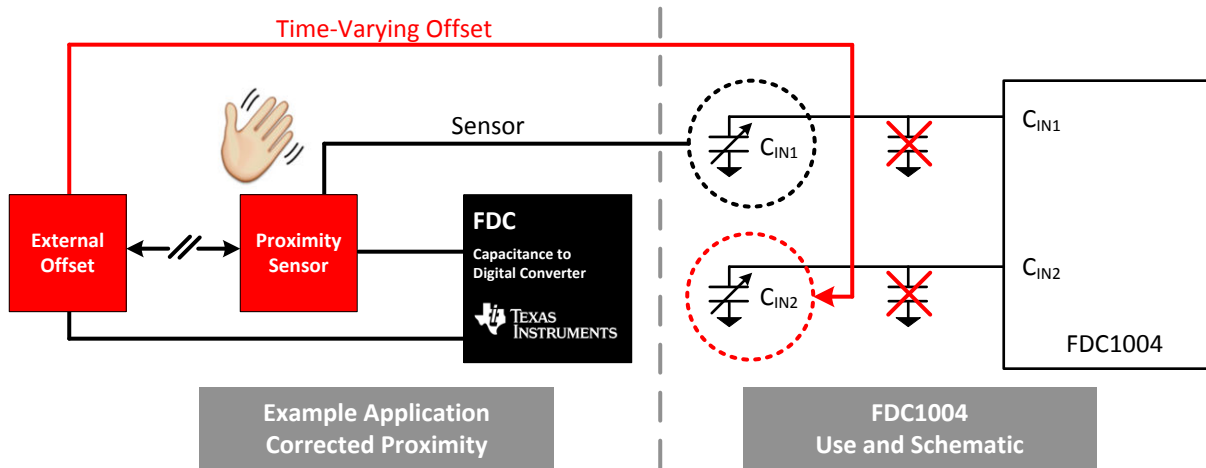


图 5-4. 时变偏移测量示例

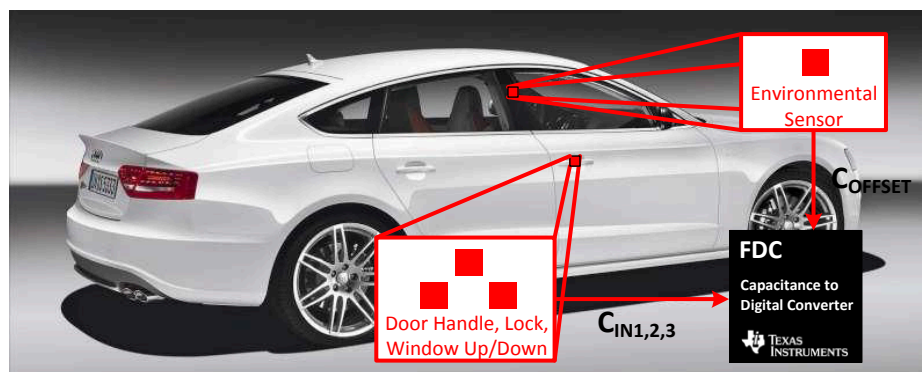


图 5-5. 接近车门示例

6 电容式传感器拓扑

有若干种常用的电容式传感器拓扑，具体取决于应用场景。传感器拓扑取决于：

- 传感器到目标的距离
- 目标的介电常数
- 所需的灵敏度

基本拓扑包括：

- 平行板
- 平行指
- 用于人类识别的单一传感器

6.1 平行板

平行板拓扑的工作原理与平行板电容器公式介绍的完全相同。两个板之间电场的高密度带来了高灵敏度。此拓扑的应用示例为材料分析和纸张叠放高度感应。对于材料分析，板之间的电容将根据材料之间介电常数的差异而改变。FDC1004 的分辨率较高，其灵敏度范围可检测电介质中非常微小的变化。对于纸张叠放高度感应，随着板间插入的纸页数量的增加，电容将增加。根据空气间隔和纸张间隔之间的差异（由于电介质改变和纸及空气间隔的已知高度）可计算出电容。

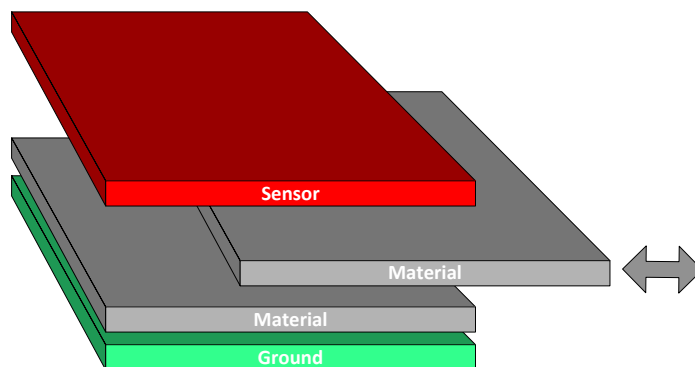


图 6-1. 平行板拓扑用于材料分析

6.2 平行指

平行指 (GND-传感器) 拓扑符合边缘电容原则。此拓扑传感器 Z 轴灵敏度很高 (请参阅 图 6-2) , 可应用于液位感应。在传感器和接地板之间靠近边缘的部分, 电场线更加明显。电容计算不像简单的平行板形式那样直接, 但传感器的灵敏度会随着传感器大小的增加而增加 (非线性) 。在主传感器和 GND 电极的后侧进行了屏蔽, 具有朝向目标的方向性。

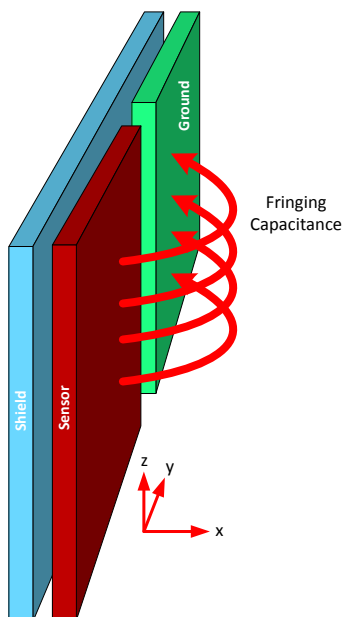


图 6-2. 平行指 (GND-传感器) 拓扑

可通过平行指设计若干种配置变化。图 6-2 显示了 GND-传感器配置。多个传感器和接地电极可交错放置，实现中央接地或传感器对称，如图 6-3 所示。若要实现沿电极宽度的宽方向性需要中央接地，可提供最广泛的响应。若要实现沿电极宽度的高方向性需要中央传感器电极，还可提供最灵敏的响应。梳型配置如图 6-4 所示，由这两种变体组成，宽和高方向性均非常有效。梳型配置通常用于雨水传感器应用，以及需要较大感应区域和高灵敏度/分辨率的应用。

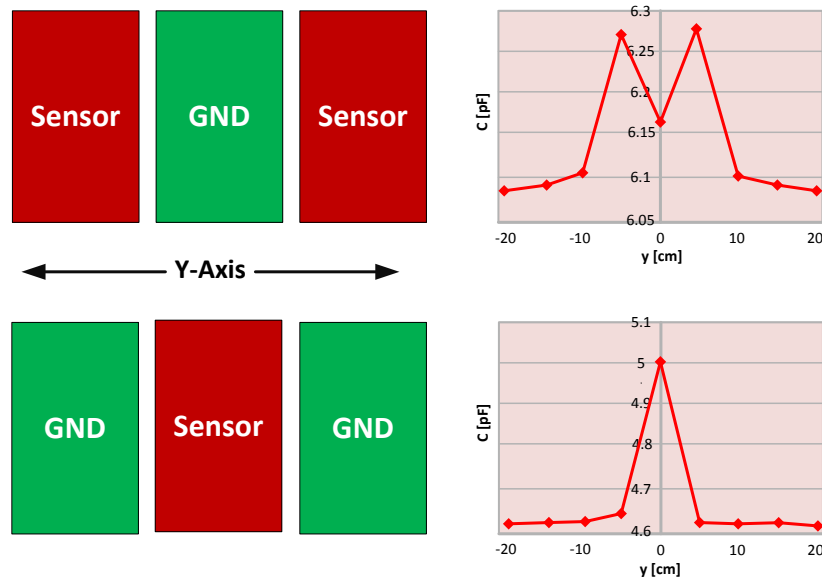


图 6-3. 中央接地，中央传感器对称

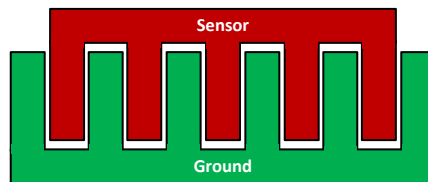


图 6-4. 梳状传感器设计

6.3 用于人类识别的单一传感器

用于人类识别的单一传感器设计使用与平行指拓扑相同的边缘电容原则，只是用人手或手指代替了接地电极。由于人体是接地的，当手接近传感器时，从传感器到手之间的边缘电场线会发生杂散。此技术的作用原理与平行板公式类似，因为传感器与 GND (手) 电极之间的距离是唯一的可变参数。手靠近传感器后，电容会增加，但由于边缘效应，会以非线性的方式增加。在传感器电极下如有屏蔽电极，可帮助减少 EMI 和寄生电容效应 (如图 6-5 所示)，并且也适用于传感器侧面。

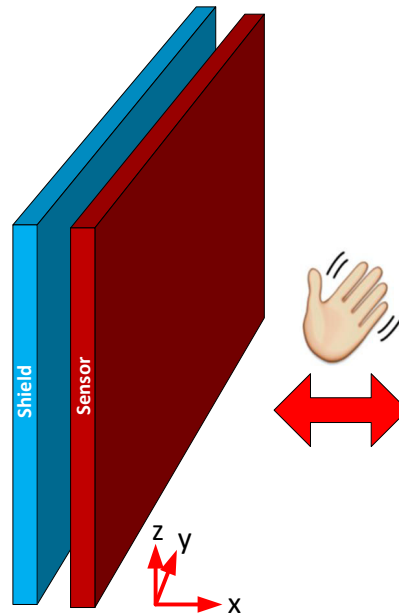


图 6-5. 用于人类识别的单一传感器拓扑

7 入门：设计指南、提示和原则

有许多系统级因素会导致电容测量不一致和不准确。以下各节介绍了 FDC1004 和传感器/屏蔽的设计指南，旨在实现卓越的感应性能和质量。

7.1 FDC1004 布局

FDC1004 测量 CINx (CIN1 到 CIN4) 引脚和 GND 之间连接的电容。若要获得最佳效果，请将 FDC1004 置于尽可能靠近电容式传感器的位置。尽量缩短传感器与 FDC1004 CINx 引脚的连接长度，以及传感器接地端与 FDC1004 GND 引脚的连接长度。如果使用屏蔽电缆进行传感器远程连接，应根据配置的测量方式将屏蔽物连接到 SHLDx (SHLD1 或 SHLD2) 引脚。接地层应远离通道布线。接地层是强制要求，应位于 I2C 引脚周围或之下。

7.1.1 可接受和不可接受的做法

将传感器连接到 FDC1004 时避免长布线。布线和电缆会拾取沿线的寄生电容和噪声。短布线会降低屏蔽物与输入通道之间的寄生电容，以及输入通道与 GND 以及屏蔽物与 GND 之间的寄生电容。布线还应用适当的屏蔽输出进行屏蔽，具体取决于测量值是单端还是差分。

在许多情况下，传感器只是 PCB 上的一个金属表面，因此它需要用焊接电阻进行保护，以避免短路并抑制任何腐蚀。传感器中的任何变化均可能导致系统性能发生改变。

7.2 传感器和屏蔽设计布局

传感器和屏蔽设计布局是两个重要概念，决定了电容测量值的灵敏度、范围和信号质量。电容式感应的两种主要应用是液位感应和接近/手势检测。2D 和 3D 有限元分析模拟可帮助确定适用传感器的大小。如果无法使用此功能，可以此节的建议作为指导原则。

7.2.1 液位感应

液位应用的主要拓扑是并行指，如图 6-2 所示。以下提示介绍了改变传感器大小属性后对不同参数有何影响：

- 较大的传感器面积可增加测量值的灵敏度和动态范围。
- 尽量减少传感器和水面之间的差距，可提供足够的灵敏度或增加传感器面积。
- 增加传感器和 GND 电极之间的间隔，可略微增加灵敏度和动态范围。仅当电极到水面之间的间隔最小时才有效。
- 使用异相技术减轻来自接地物体（例如人手）的干扰，不致对电容测量值造成严重影响。

7.2.2 接近/手势检测

接近和手势检测的主要拓扑是隔离传感器，如图 7-1 所示。以下提示介绍了改变传感器大小属性后对不同参数有何影响：

- 较大的传感器面积可增加测量值的灵敏度和动态范围，但传感器也有更高的几率会受到周围环境中任何噪声或干扰的影响。
- 尽量减少传感器与屏蔽电极之间的距离，可确保更好的耦合和有效性，但灵敏度和动态范围会降低。
- 如果目标未接地，用于液位感应的平行指方法的效果最好。
- 如果目标接地，隔离传感器方法的效果最好。

7.2.3 有源屏蔽

有源屏蔽物与传感器相耦合，有助于减轻从电极到 FDC1004 的输入之间的传感器信号路径中出现的干扰与寄生电容。它还有助于聚焦特定区域中的目标方向。屏蔽电极可通过多种方式与传感器电极配对，与没有屏蔽电极情形相比，能以不同方式影响计量参数：

- 与传感器电极大小相同的屏蔽物可直接置于传感器下方。
- 比传感器电极大的屏蔽物可直接置于传感器下方。
- 有一个紧挨并围绕传感器顶部的屏蔽环，还有一个屏蔽物位于传感器下方。

屏蔽物可阻止来自传感器底部和临近侧面的干扰。随着屏蔽大小的增加，干扰的影响会减弱，但在顶部、侧面和底部附近电容值测量的灵敏度和动态范围也会变小。尽量减少传感器与屏蔽电极之间的距离，可确保更好的耦合和有效性。屏蔽的大小必须适合传感器，具体取决于将多少裕度分配给干扰和寄生。

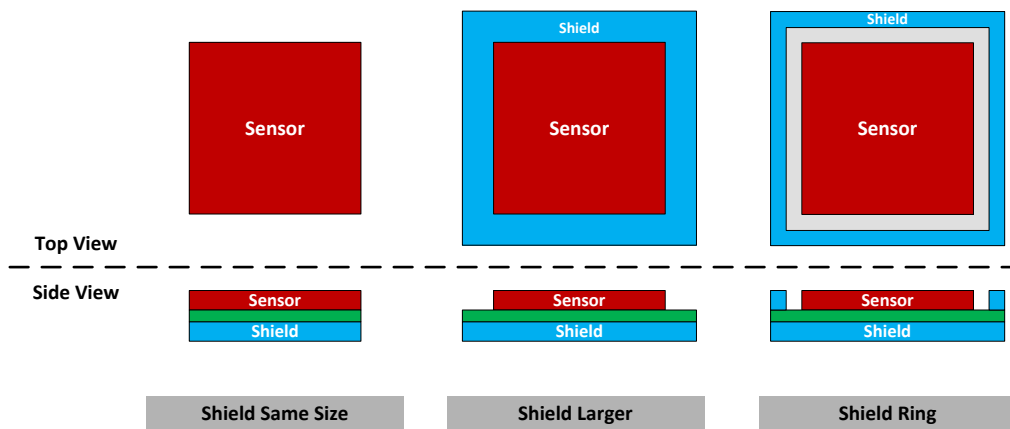


图 7-1. 屏蔽配置

8 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 * (December 2014) to Revision A (June 2021)	Page
更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	2

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

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

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 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。

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 © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司