
电容触摸传感器设计指南

简介

作者：Microchip Technology Inc.的 Feargal Cleary

设计使用触摸控件的产品是一个复杂的过程，需要做出许多决定，例如在产品结构使用哪种材料以及如何满足机械和电气方面的要求。此过程的关键在于实际传感器（特别是按钮、滑动条、滚轮和触摸屏）的设计，它们构成了与用户交互的接口。

目录

简介.....	1
1. 自电容传感器.....	4
1.1. 自电容测量.....	4
1.2. 传感器设计.....	5
2. 触摸覆盖层效果.....	15
3. 屏蔽.....	16
3.1. 被动屏蔽.....	16
3.2. 主动屏蔽.....	17
3.3. 辐射发射.....	21
4. 互电容传感器.....	23
4.1. 互电容测量.....	23
5. 传感器设计.....	25
5.1. 触摸电容模型.....	25
5.2. 按钮传感器设计.....	26
5.3. 滑动条传感器设计.....	28
5.4. 滚轮传感器设计.....	30
5.5. 表面传感器设计.....	33
6. 触摸覆盖层效果.....	37
7. 屏蔽.....	38
7.1. 被动屏蔽.....	38
7.2. 耐湿性.....	39
8. 附录 A.....	41
9. 附录 B.....	42
10. 附录 C.....	43
Microchip 网站.....	44
变更通知客户服务.....	44
客户支持.....	44
产品标识体系.....	45
Microchip 器件代码保护功能.....	45
法律声明.....	46
商标.....	46
质量管理体系.....	47

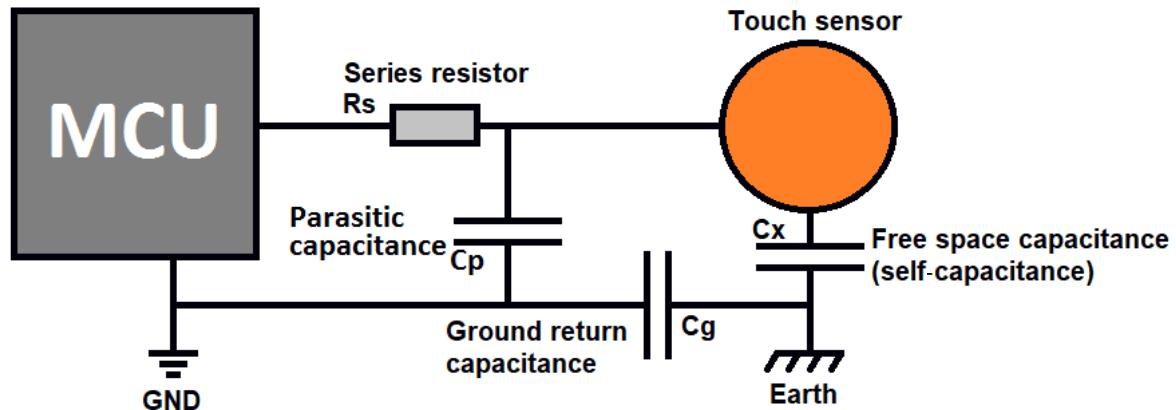
全球销售及服务网点..... 48

1. 自电容传感器

1.1 自电容测量

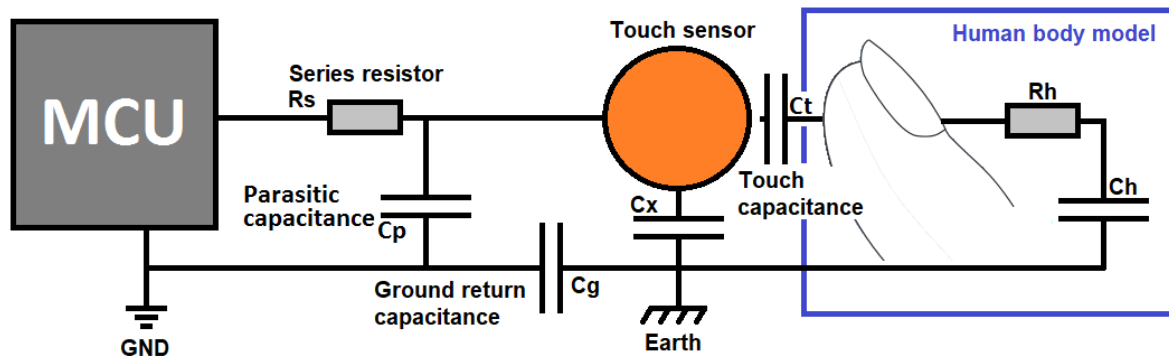
自电容触摸传感器使用单个传感器电极来测量电极与触摸传感器电路的DC地之间的视在电容。

图 1-1. 自电容传感器模型



基极电容由寄生电容、传感器电容和接地返回电容组合而成。这些电容组合形成“未触摸”电容，此电容在校准期间测量，并用作检测电容变化（指示接触点）的参考电容。

图 1-2. 有接触点时的自电容模型



当形成接触点时，将通过“人体模型”引入一条平行于地的路径，从而增加传感器的视在电容。触摸电容 C_t 与 HBM 电容 C_h 和接地电容 C_g 形成串联组合。这种增加称为“触摸增量”。

注：HBM 电阻 R_h 不影响触摸灵敏度。

C_t

- 可以近似为平行极板电容
- 置于固体表面上的用户指尖可以近似为直径在 5-10 mm 之间的圆盘。典型的用户指尖直径估计为 8 mm，本文档的示例中将使用此值。
- 电容极板为触摸传感器电极和用户指尖
- 电解质为触摸覆盖层

- 0.1 pF至5 pF，具体取决于传感器尺寸和触摸覆盖层厚度/材料

Ch

- 人体模型电容
- 人体相对于地的自电容
- 成人为100 pF至200 pF，具体取决于体型

Cg

- 应用直流地与大地之间的耦合电容
- 取决于应用类型和电源系统
- 小型电池供电设备中低至约1 pF
- 当直流地直接连接到大地时，电容无限大/短路

在串联电容中，起主导作用的是最小的电容。

串联电容组合



$$C_t = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Ct比Ch小得多，并且在大多数应用中，Ct也比Cg小得多，因此Ct决定了测量电容的变化。

例如：

Ct = 1 pF, Ch = 100 pF, Cg = 100 pF

→ C_{Total} = 0.98 pF

→ C_{Total} 几乎等于Ct

但是在Cg非常小（例如2 pF）的应用中，灵敏度将显著下降。

Ct = 1 pF, Ch = 100 pF, Cg = 2 pF

→ C_{Total} = 0.662 pF

→ 测量的触摸增量减少约33%

1.2 传感器设计

1.2.1 触摸电容模型

在设计传感器时，可以通过平行极板电容公式得出Ct的简单近似值。

注：当面积尺寸比距离尺寸小一个数量级时，这种近似会损失精度。

平行极板电容

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

其中“*A*”是平行面积，“ ϵ ”是电解质的介电常数，即真空介电常数 ϵ_0 x 相对介电常数 ϵ_r ，“*d*”是覆盖层厚度。

→ 大传感器电极、薄触摸覆盖层和高介电常数的覆盖层材料可实现最大的触摸增量。

例如：

触摸传感器电极：12 mm直径的圆盘

触摸覆盖层：相对介电常数 $\epsilon_r = 2$ 的1 mm塑料

接触点：8 mm直径的圆盘

→ 使用较小极板（用户指尖）的面积来计算电容

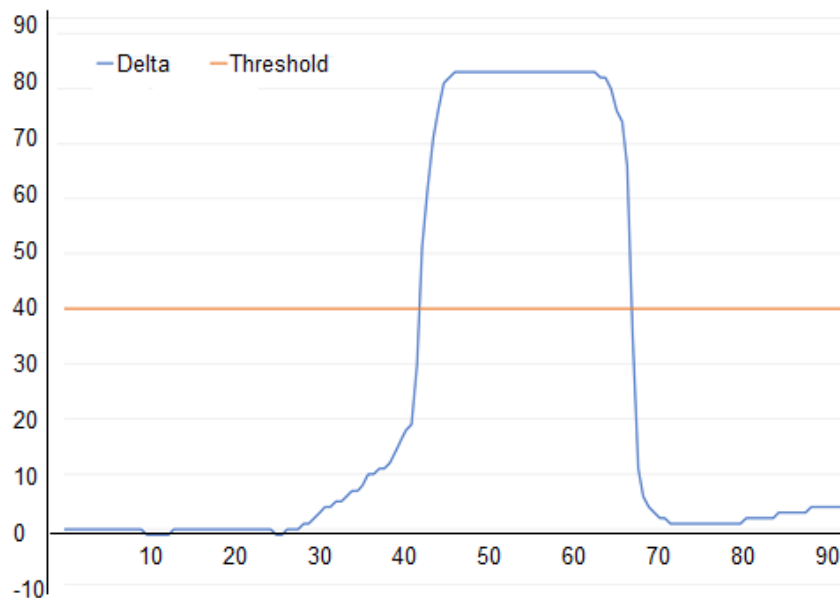
$$C_t = ((8.85E - 12) \times (2) \times (0.00005027)) / (0.001) = .89 \text{ pF}$$

1.2.2 按钮传感器设计

电容传感器的最简单实现是按钮，其中传感器由单个节点组成，并被解析为二进制状态：“检测中”或“退出检测”。当触摸增量（触摸电容 C_t 的数字化测量值）超过触摸阈值时，传感器处于“检测中”。

传感器的实现形式是用户触摸或触摸仿真器，例如通过人体模型电路接地的导电条。阈值设置为最大触摸增量的比例（通常为 50%）。

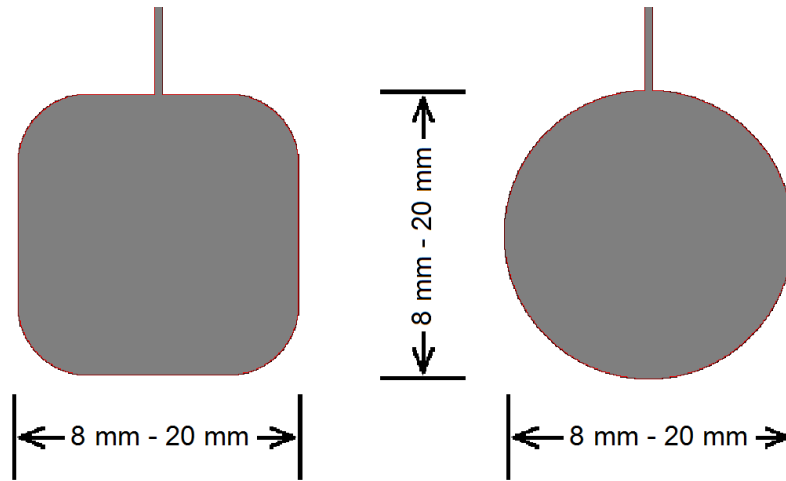
图 1-3. 按钮传感器增量和阈值



电极形状

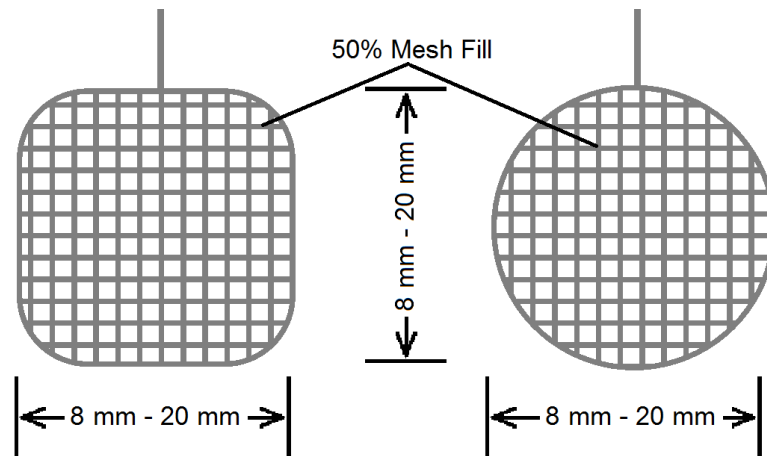
电极即为构成传感器的基板上导电材料的贴片。常见形状是圆形或矩形实心区域，但具有足够接触点面积的任何形状都可以使用。应将拐角处理成圆形以降低电场集中程度，电场集中可能会增加传感器焊盘静电放电（ESD）的发生率。

图 1-4. 标准按钮形状



如果需要，也可以对电极使用排线图案（例如 50% 网格填充）。这往往会减小传感器电极的负载电容，但也会减小与触摸相互作用的区域，导致灵敏度成比例下降。

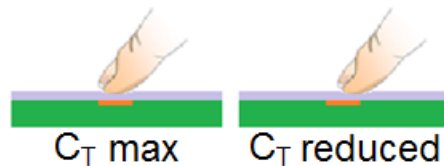
图 1-5. 使用网格填充的标准按钮



触摸目标尺寸

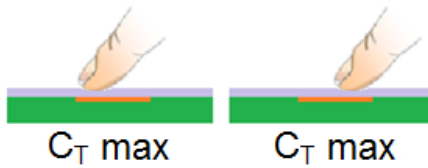
触摸传感器的电极应足够大，以致无需精确形成接触点即可激活传感器。如果传感器电极小于用户的指尖，则灵敏度会因有效面积较小而降低。例如，对于具有 8 mm 接触点的 8 mm 触摸传感器，仅当直接在电极中心形成接触点时，才会产生最大增量。

图 1-6. 8 mm 触摸传感器



增大传感器的尺寸后，用户可以在传感器区域上的任何位置产生接触点，而不会降低灵敏度。接触点的有效平行面积受用户指尖大小的限制，而不受传感器面积的限制。

图 1-7. 12 mm 触摸传感器



手影

过大的传感器电极会在指尖接触之前与正在接近的手形成耦合，从而出现意外的邻近效应。

引脚负载

大型传感器具有较高的自电容，如果传感器靠近包含其他传感器的其他电路放置，效应会相应增强。

负载电容越大，时间常数就越大，传感器也就需要更长的时间来完成充电、放电和测量。这可能导致触摸检测延时延长、功耗提高。

根据测量技术的不同，大电容传感器的灵敏度可能会降低，也可能超出模拟前端补偿电路的范围。

注： 有关最大传感器电容的器件特定信息，请参见 8. 附录 A。

电极间隔

各传感器电极之间应保持足够的间距，以便在触摸一个按键时不会在相邻按键上引起意外的电容变化，因为这种变化可能会被错误识别另一个接触点。传感器电极之间的建议间距为 4 mm + 触摸覆盖层厚度。在许多情况下，要实现密集型 UI，必须在传感器大小和传感器间隔之间做出权衡。

表 1-1. 触摸按键尺寸

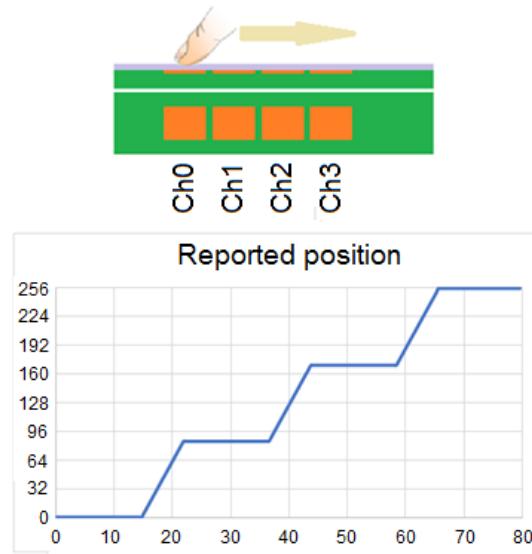
	最小值	典型值	最大值
按键尺寸	8 mm	12 mm	20 mm
间隔	3 mm	6 mm	—

1.2.3 滑动条传感器设计

滑动条由排成一行的两个或多个触摸传感器电极组成，这些电极以单个传感器的形式进行测量。将测量的触摸增量结合起来确定接触点的位置，同时在传感器之间进行插值来提高分辨率。

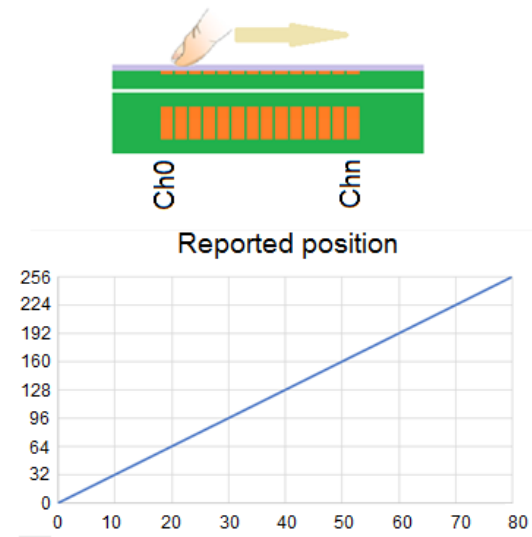
使用大型传感器而不进行空间插值会导致报告的触摸位置与实际位置的一致性变差。当接触点沿滑动条移动时，大多数情况下，四个电极中只有一个上存在接触点。只有当接触点从一个传感器跨越到另一个传感器时，才可以进行位置插值。

图 1-8. 未插值的滑动条位置



这可以通过减小传感器尺寸并增加传感器数量来改善。如果传感器间距减小到接触点宽度的约 $\frac{1}{2}$ （即，传感器间距约为 4 至 5 mm），则只要形成接触点，便始终有 2 至 3 个传感器电极处于接触点下，此时将有多个触摸增量可用于插值。

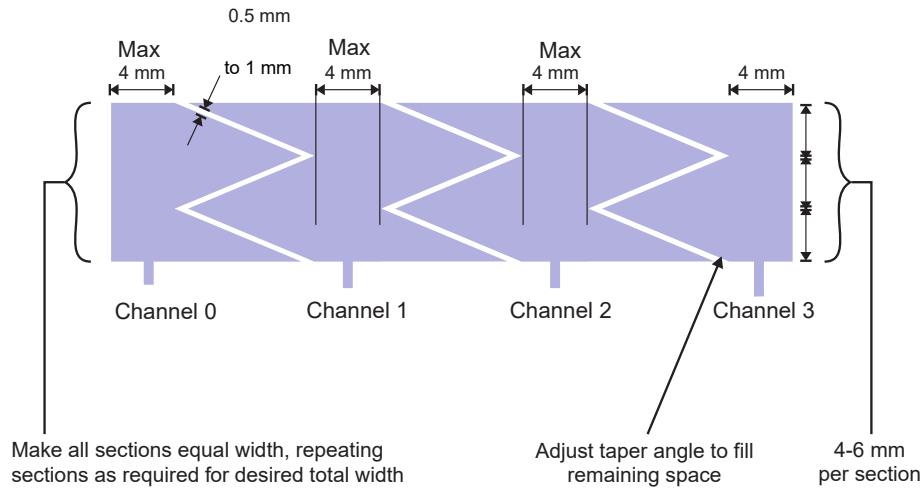
图 1-9. 进行插值的滑动条位置



但是，这并不总是最佳解决方案。对于较长的滑动条，所需的传感器电极数量可能会超过触摸传感器控制器支持的数量，或者需要更长的时间才能完成测量，从而导致触摸延时无法接受。

另一种方法是使用空间插值将跨接位置从一个滑动条电极“延伸”到下一个。下面说明的电极形状便是一个例子。这种设计具有锥形的重叠边缘，可确保沿滑动条长度任何位置的接触点始终与至少两个传感器电极保持接触。

图 1-10. 进行扩展插值的滑动条



滑动条电极的间距

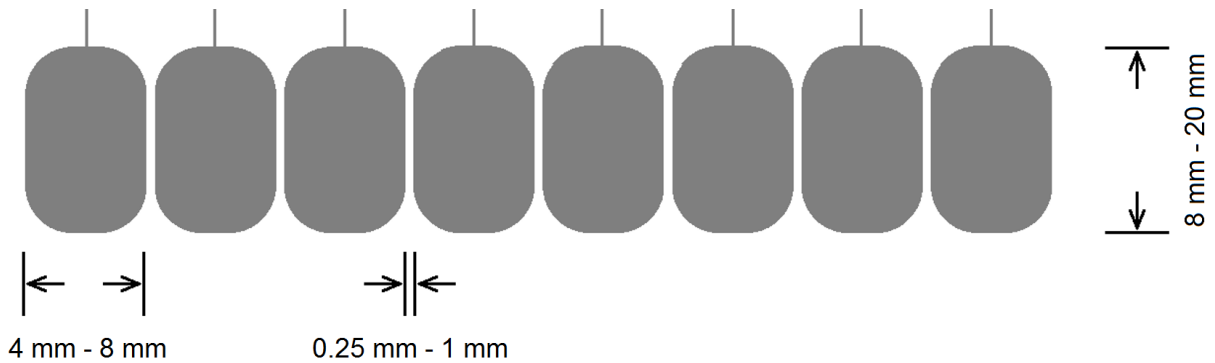
滑动条的每个元件既有自己的自电容，也有与相邻电极之间的互电容，而在测量特定传感器时，其他电极通常驱动为静态直流电压。

注： 例外情况是“增强型驱动屏蔽”的实现。更多详细信息，请参见 3. 屏蔽。

传感器电极之间的建议间隔取决于电极的尺寸及其重叠长度。

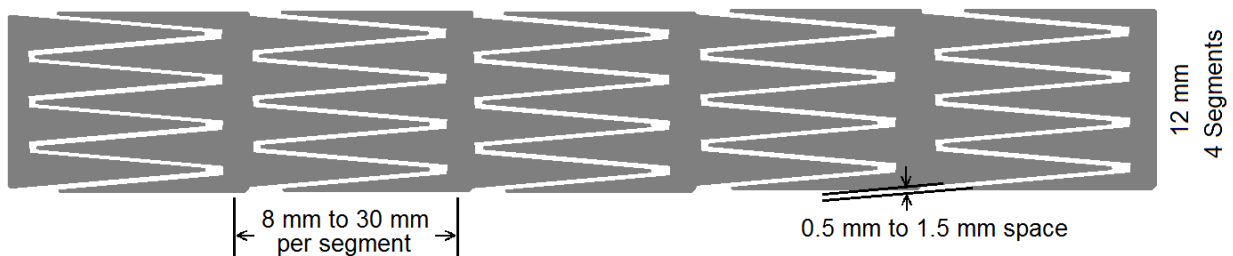
对于由小按键组成且未进行扩展插值的滑动条，电极之间的间隔应为 0.5 mm。当接触位置从一个元件移动到下一个元件时，这将改善触摸增量的一致性，而不会减小两个元件之间的触摸增量。

图 1-11. 八通道滑动条/无插值



对于由重叠长度较长的大电极组成的滑动条，必须增大传感器电极的间隔，以避免传感器负载电容过大。在此类设计中，间隔可以增加至 1 mm 或更大值。

图 1-12. 进行插值的六通道滑动条



与按钮传感器设计一样，应将滑动条电极中的尖角处理成圆形，以最大程度地降低对 ESD 的敏感性。形成插值滑动条的三角形的点应截断为直径约 2 mm 的圆头。

电极必须彼此靠近才能获得连续的灵敏度，但间隔太小会导致负载电容增加，因为每个传感器电极都会对其相邻电极产生寄生负载。如果由于扩展插值而在电极之间形成较长的平行边缘，则间距应增加到最大值 1.5 mm。

表 1-2. 按钮滑动条尺寸

	最小值	典型值	最大值
滑动条宽度	8 mm	12 mm	20 mm
电极长度	4 mm	6 mm	8 mm
电极间隔	0.25 mm	0.5 mm	1 mm

表 1-3. 插值滑动条尺寸

	最小值	典型值	最大值
滑动条宽度	8 mm	12 mm	20 mm
电极长度	8 mm	16 mm	30 mm
电极间隔	0.5 mm	1 mm	1.5 mm

1.2.4 滚轮传感器设计

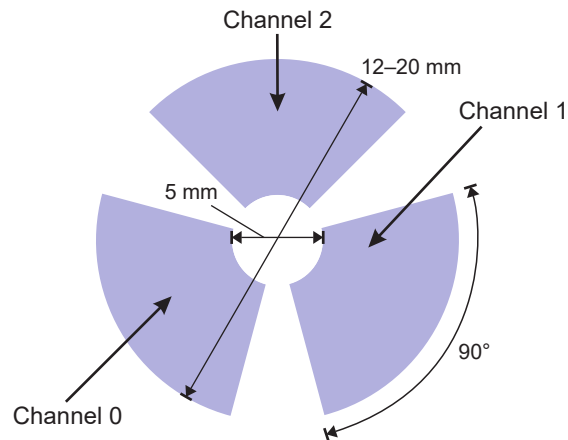
滚轮传感器由排成一圈的两个或更多传感器电极组成。

注： 由于位置计算需要独特的交叉区域，因此至少需要三个电极。

滚轮传感器的工作方式与滑动条传感器相同，惟一的例外是它从通道 n 绕到通道 0，因此在此设计中没有端电极。

与滑动条一样，最简单的实现是将按钮排成一圈。至少使用三个电极。

图 1-13. 简单的三通道滚轮



像滑动条一样，可以通过增加使用的传感器按键数量或通过提高段插值来实现更大的滚轮。

图 1-14. 不进行扩展插值的八电极滚轮

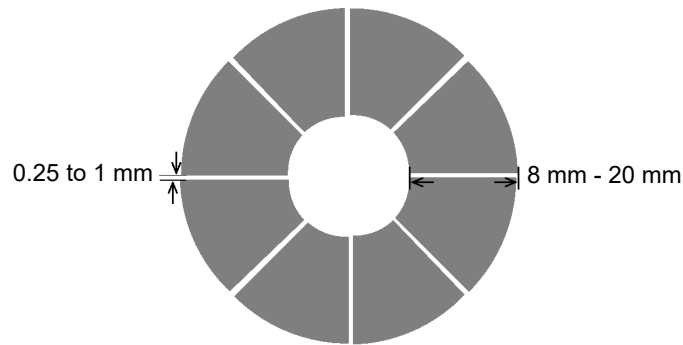
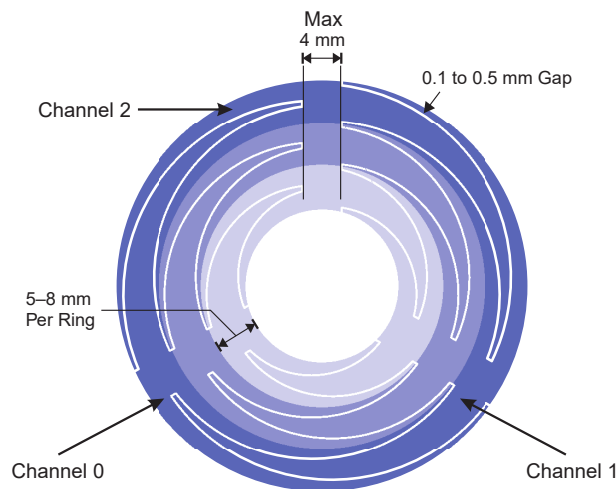


图 1-15. 进行扩展插值的三电极滚轮



与其他传感器一样，需要将电极中的尖角处理成圆形，以最大程度地降低对 ESD 的敏感性。形成插值的三角形的点应截断为直径约 2 mm 的圆头。

滚轮电极必须彼此靠近才能获得连续的灵敏度，但间隔太小会导致负载电容增加，因为每个传感器电极都会对其相邻电极产生寄生负载。如果由于扩展插值而在电极之间形成较长的平行边缘，则间距应增加到最大值 1.5 mm。

表 1-4. 按钮滚轮尺寸

	最小值	典型值	最大值
滚轮宽度	8 mm	12 mm	20 mm
电极长度	4 mm	6 mm	8 mm
电极间隔	0.25 mm	0.5 mm	1 mm

表 1-5. 插值滚轮尺寸

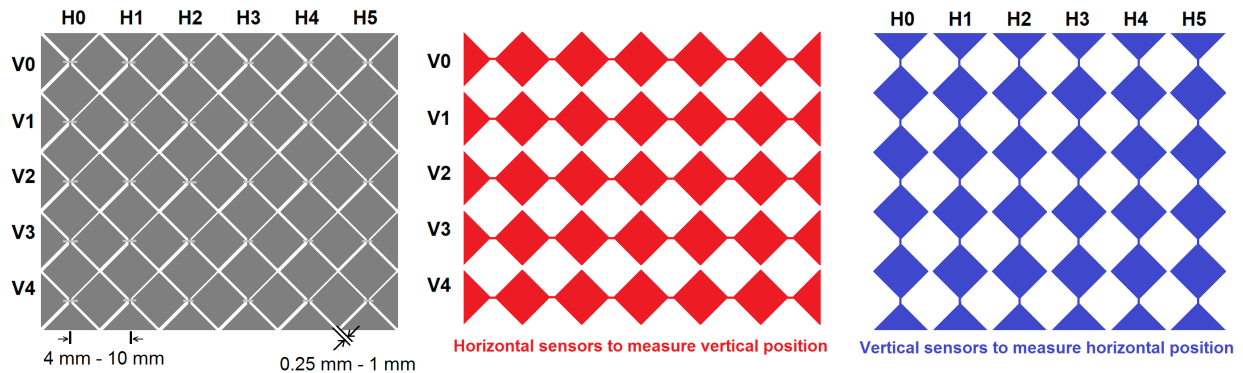
	最小值	典型值	最大值
滑动条宽度	8 mm	12 mm	20 mm
电极长度	8 mm	16 mm	30 mm
电极间隔	0.5 mm	1 mm	1.5 mm

1.2.5 表面传感器设计

自电容触摸表面由“行”和“列”电极组成，可使用这些电极的测量值沿水平方向和垂直方向实现滑动条功能。

最简单的图案是如下所示的“菱形”图案。在本例中，传感器 H0 至 H5 提供接触点的水平位置，而 V0 至 V4 提供垂直位置。

图 1-16. 触摸表面菱形图案



传感器的特点是其间距：

- 水平/垂直传感器间距是列/行电极中心之间的距离。
- 传感器间隔是相邻菱形的平行边缘之间的垂直距离。

每个传感器电极由正方形（对称节点间距）或菱形（不对称间距）链组成，菱形旋转 45°可改善水平方向和垂直方向上的插值效果。

电极间距

对于 8 mm 的用户接触点，理想的电极间距约为 5 mm。这可以确保表面任何位置的接触点所包含的重叠区域在每个方向上都至少有两个传感器电极；因此，这种接触可实现最佳的触摸位置插值效果。

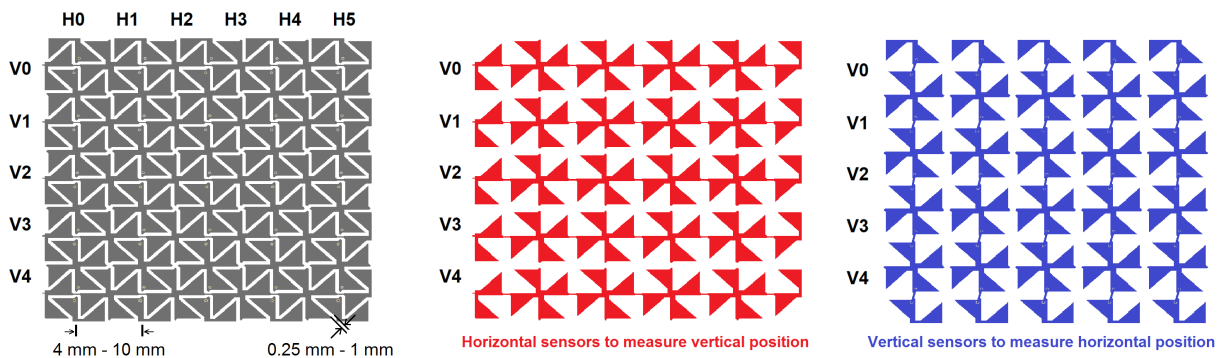
对于较大的触摸表面设计，需要许多传感器电极来保持最佳线性度。传感器越多，所需的测量时间就越长，功耗也越高。在许多情况下，设计人员必须在传感器线性度和传感器数量之间进行折衷。

扩展插值

与滑动条和滚轮一样，也可以设计用于表面传感器的电极，以及提高相邻传感器之间的插值。这允许设计人员在保持线性度的同时增大电极间距。

“花朵”图案就是一个例子，其中传感器阵列的每个元件与相邻元件之间的空间插值均已提高。

图 1-17. 触摸表面菱形图案



与其他传感器一样，需要将电极中的尖角处理成圆形，以最大程度地降低对 ESD 的敏感性。形成插值的三角形的点应截断为直径约 2 mm 的圆头。

注： 两点检测需要接触点中心之间至少隔开 2 倍的传感器间隔。

表 1-6. 菱形图案尺寸

类型	最小值	典型值	最大值
电极间距	4 mm	6 mm	10 mm
电极间隔	0.25 mm	0.5 mm	1 mm

表 1-7. 花朵图案尺寸

类型	最小值	典型值	最大值
电极间距	4 mm	6 mm	10 mm
电极间隔	0.5 mm	1 mm	1.5 mm

2. 触摸覆盖层效果

较厚的触摸覆盖层会增大用户指尖和传感器电极之间的距离。这会导致用户和传感器电极之间的电容减小，并使触摸灵敏度成比例降低。

这种情况可以通过增大电极的尺寸进行补偿。较厚的触摸覆盖层还会扩散指尖和电极之间形成的电场，因此较大的电极可以有效地增大接触面积。

为了获得最高的灵敏度，每个传感器电极都应设计为延伸到接触点范围以外，超出部分至少应达到触摸覆盖层的厚度。

所有类型传感器的宽度都应足以延伸到接触点范围以外，内部和外部超出的部分都应至少达到触摸覆盖层的厚度。请参见以下示例：

- 1 mm 触摸覆盖层/8 mm 接触点：建议宽度 = 10 mm
- 3 mm 触摸覆盖层/8 mm 接触点：建议宽度 = 14 mm
- 6 mm 触摸覆盖层/8 mm 接触点：建议宽度 = 20 mm

在插值传感器（滑动条、滚轮或表面）中，电场的扩散会使相邻电极之间的交叉区域扩大，这有助于提高报告接触位置的准确性。

3. 屏蔽

在许多应用中，必须屏蔽触摸传感器以防止错误激活。这种错误激活可能是由电磁干扰（EMI）引起的，也可能是由非触摸敏感位置的接触点引起的。

自电容传感器可以使用多种屏蔽类型，具体取决于测量技术。

这些屏蔽通常分为“被动”屏蔽（将屏蔽电极驱动至直流电压）和“主动”屏蔽（在测量周期中，将屏蔽电极驱动至一系列不同的电压）。

注： 有关器件具体可用性的信息，请参见 9. 附录 B。

3.1 被动屏蔽

屏蔽电极可放置在传感器电极周围，也可放置在传感器与会影响正常工作的干扰源之间。被动屏蔽的实现方式是在传感器测量期间将屏蔽电极驱动至恒定直流电压。

- 通常接直流地
- 也可以使用 V_{DD} 或任何以地为参考的直流电压
- 后部灌铜可避免来自后面的触摸或 EMI
- 共面灌铜可更好地隔离触摸传感器
- 可通过排线降低容性负载
- 对耐湿性不利

接地负载的影响

直流或接地负载直接增大了传感器的基础电容，进而增大了时间常数。

注： 在这种情况下，地包括靠近传感器或其走线的任何导体（以直流地为参考）。这包括附近的任何电路元件或信号走线。

空闲传感器通常被驱动至直流电压，这些空闲通道的走线表现出与接地时一样的行为。如果通向按键 1 的走线越过按键 2 布线，则按键 2 的行为将像连接到接地走线一样。

在以地为参考的电极或走线靠近触摸传感器时，由于传感器电极发出的电场被引到地平面，因此触摸灵敏度会降低。这降低了用于与用户接触点相互作用的电场的强度。

后部接地屏蔽

有时，需要在电极的后部增加屏蔽，以防止后部移动的物体引起误检，或者开关信号引起干扰，例如背光或驱动器电路引起的干扰。

如果无法使用驱动屏蔽，则可以使用地平面。它应直接连接到电路地的单个点。

后部的地平面可能会显著降低触摸传感器的灵敏度，因为直流地会吸引触摸传感器电极发出的电场。在触摸覆盖层的厚度可能大于电极层和接地层之间间隔的情况下，应特别考虑到这一点。

为缓解此问题，应使电极和地平面尽可能相隔最大距离。例如，在多层 PCB 上，触摸传感器应位于顶层，地应位于底层。

此外，接地屏蔽的排线填充可以减少至 50% 或 25%，这可以降低传感器负载，同时仍然提供良好的屏蔽效果。

如果应用中不存在从传感器板后意外形成接触点的风险，则可以去除传感器按键后的地平面。这可以减少传感器的容性负载，同时实现传感器与其他电路元件或 EMI 的隔离。

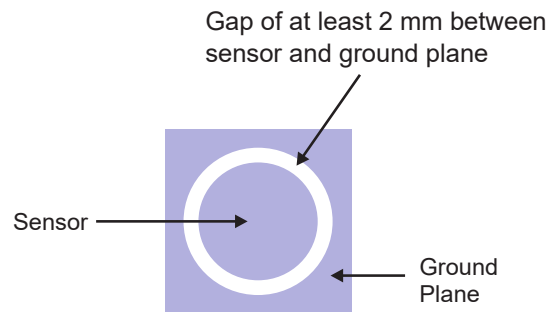
共面接地屏蔽

可通过实现共面接地屏蔽来改善触摸传感器之间的隔离，以减少触摸传感器的 EMI 以及减少形成接触点时由共模噪声引起的干扰。

由于共面屏蔽与触摸传感器的区域不重叠，因此应使用实心灌铜。

为了最大程度地降低灵敏度损失，接地屏蔽层应与任何触摸传感器保持约 2 mm 的距离，而为了实现大型传感器电极，可能需要增加该距离。

图 3-1. 共面地平面间隔



示例布局

图 3-2. 带有前后排线地平面的传感器布局

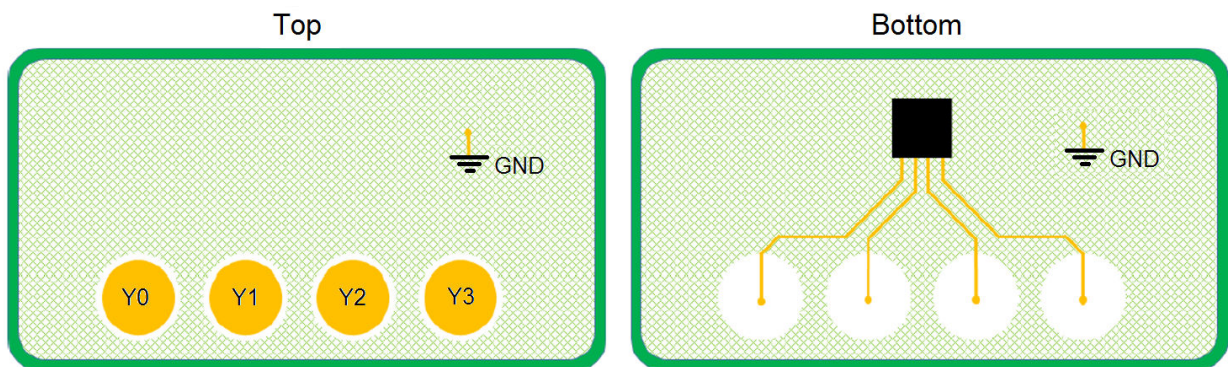


表 3-1. 传感器与地的间隔

最小值	典型值	最大值
1 mm	2 mm	3 mm

较大的电极应增加接地间隔，以避免传感器电极上的负载电容过大。

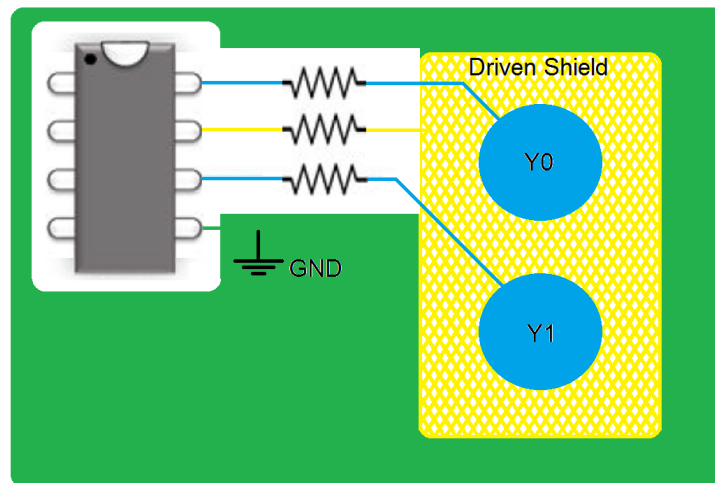
3.2 主动屏蔽

3.2.1 驱动屏蔽

- 使用与传感器测量值同步的一系列直流电压驱动“屏蔽”电极
- 需要专用的屏蔽电极
- 减小或消除由于相邻元件的电容引起的传感器负载
- 后部屏蔽可避免来自后面的触摸
- 更高的耐水性

传感器附近任何以地为参考的走线都会增加传感器的负载，降低传感器的灵敏度，甚至在某些环境条件下（特别是湿润或非常潮湿的环境）还会产生误触摸。

图 3-3. 驱动屏蔽电路



Microchip 触摸传感器提供两种类型的驱动屏蔽：三级屏蔽和两级屏蔽。

三级屏蔽

通过与每个测量阶段的电极电位匹配的一系列电压来驱动屏蔽。这能够有效地将触摸传感器与地解耦，从而减小容性负载，并提供对 EMI 的电气屏蔽，最终提高传感器的信噪比（Signal to Noise Ratio, SNR）。将屏蔽层置于传感器和其他电路元件之间，可以显著改善潮湿环境下的工作情况。

表 3-2. 传感器与屏蔽层的间隔——三级屏蔽

最小值	典型值	最大值
0.2 mm	0.5 mm	3 mm

两级屏蔽

在传感器测量期间驱动电荷脉冲，为传感器屏蔽外部影响，同时进一步提高传感器的灵敏度。

屏蔽电极由与测量值同步的脉冲驱动。这些脉冲可向传感器电容注入额外的电荷，从而增大自电容测量值。由于用户接触点会与屏蔽和传感器之间的电场以及传感器和地之间的电场相互作用，因此可以实现更高的触摸灵敏度。

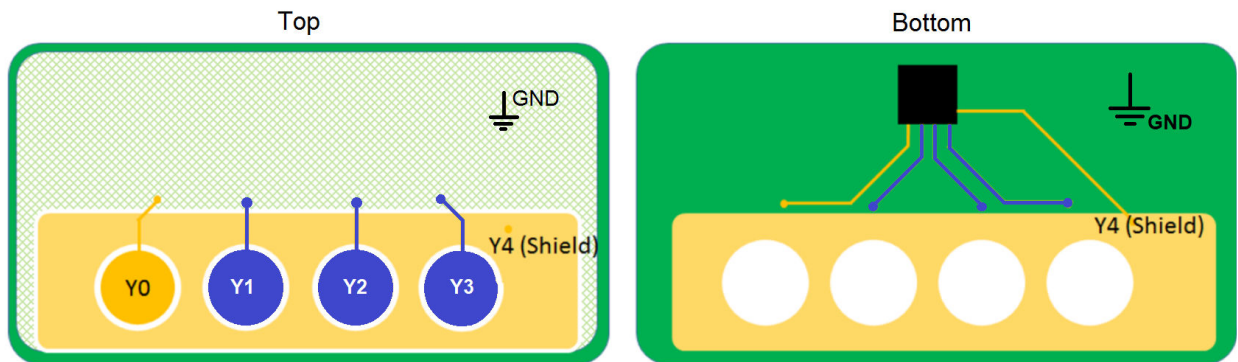
由于屏蔽层将传感器与以地为参考的相邻电路元件隔离，因此会降低传感器的负载电容。

表 3-3. 传感器和屏蔽电极之间的间隔

最小值	典型值	最大值
1 mm	2 mm	3 mm

驱动屏蔽示例

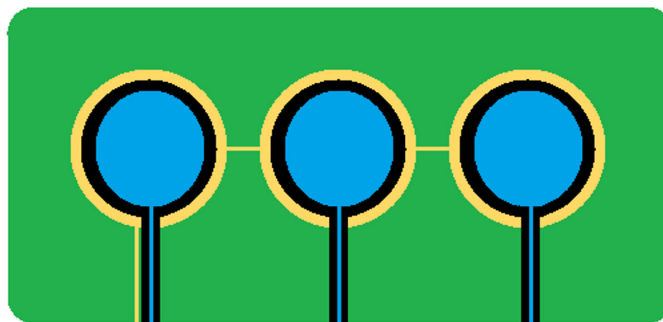
图 3-4. 驱动屏蔽布局



或者，也可以使用“环形屏蔽”将各个传感器电极彼此隔离并与地平面隔离。环形屏蔽由环绕在每个触摸传感器周围的屏蔽电极组成。电极应至少为 2 mm 宽，与触摸传感器的间隔约 2 mm。

注：屏蔽层不得在传感器电极周围形成完整的环，因为这可能导致 RF 噪声问题。断开环还可以简化布线并能够实现单层传感器设计。

图 3-5. 环形屏蔽布局



3.2.2 增强型驱动屏蔽

一些器件可以将“屏蔽”信号（三级或两级）驱动到专用屏蔽电极上或者 UI 的其他触摸传感器电极上。

即使在所有引脚都用作触摸传感器而没有任何引脚可用于屏蔽的情况下，增强型驱动屏蔽也可用于驱动其他传感器作为屏蔽。在图 3-6 所示的应用示例中，Y0 是处于工作状态的传感器，所有其他电极被驱动为屏蔽。

图 3-6. 增强型驱动屏蔽示例

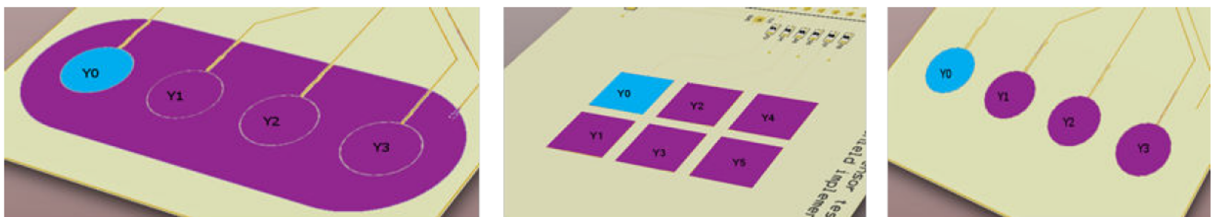
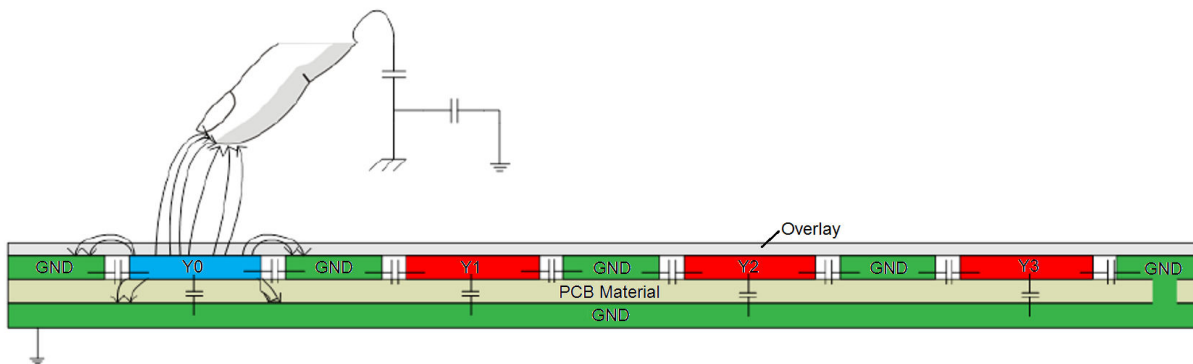
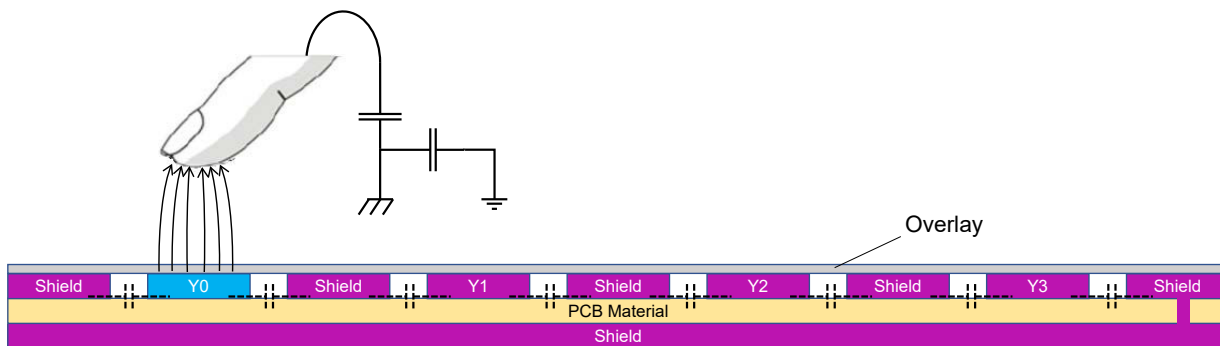


图 3-7. 带地的传感器（靠近时）



在图 3-7 中，将测量传感器 Y0，而所有其他传感器一直保持 V_{DD} 不变。传感器附近也有接地灌铜区或信号。在这种情况下，Y0 和地之间存在额外的电容。驱动进入 Y0 的电荷将与地共用，这将减弱触摸表面的电场，从而降低触摸灵敏度。如 3.1 被动屏蔽一节所述，可通过增大传感器和接地屏蔽之间的空间来缓解这种情况，但此方法并非始终适用于传感器密度较高的 UI 设计。

图 3-8. 带增强型驱动屏蔽的传感器



使用增强型驱动屏蔽时，Y0 和其他电极被驱动到相同的电位，因此它们之间的电容负载极小。传感器和用户之间存在较强的电场，这有助于增加灵敏度和 SNR。

在接近传感器应用中使用增强型驱动屏蔽可增大场投影并提高性能。

耐湿性

使用增强型驱动屏蔽时，传感器和屏蔽层之间的水耦合不会产生触摸增量，因为屏蔽层和传感器被驱动到相同电位。在使用驱动屏蔽但未屏蔽相邻按键的情况下，可能会因水与相邻按键耦合而导致误检测到触摸信号。

在设计可能使触摸传感器暴露于有水环境下的系统时，应格外注意。如果水跨过屏蔽信号到达地，则触摸传感器的部分场将通过水耦合到地，从而导致误检测到触摸信号。

图 3-9. 水对触摸传感器的影响

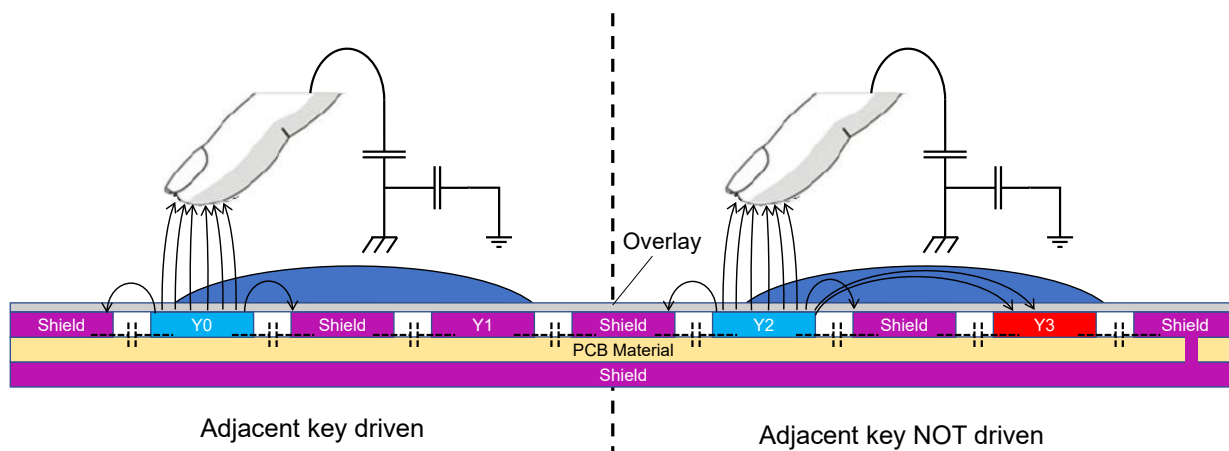
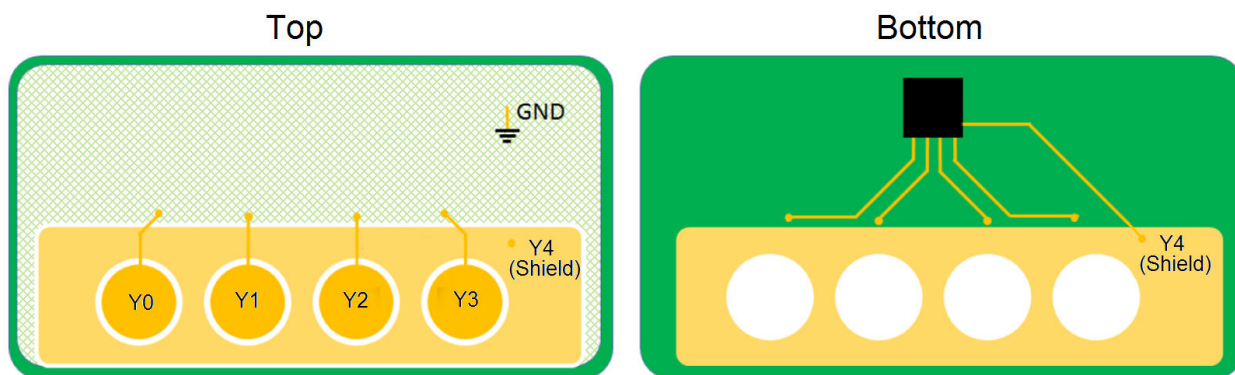


图 3-10. 增强型驱动屏蔽布局示例



3.3 辐射发射

根据不同的应用及其环境，使用主动屏蔽可能导致射频发射过多。这是由大面积电极的高速开关引起的，可能导致产品无法达到所需的 RFI 标准。

高发射不仅在触摸传感器的开关频率下普遍存在，在更高频率下也十分常见，具体取决于 MCU 内核速度和 I/O 引脚压摆率。

缓解

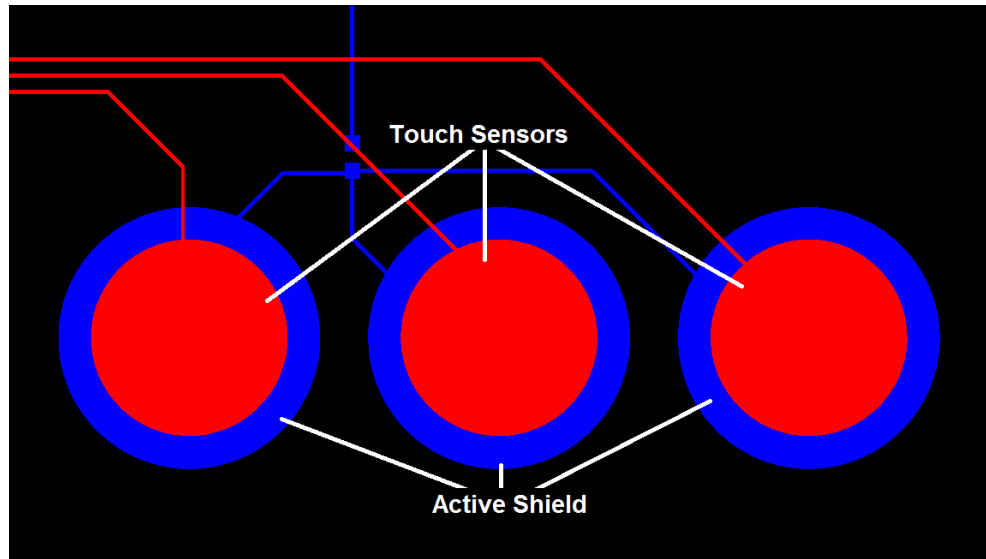
向屏蔽电极增加串联电阻：

- 通过增加串联电阻，可以提高 RC 屏蔽的时间常数，并减少高频下的可用能量。
注：电阻器封装具有寄生电容，此电容在 RF 频率下的阻抗可能低于电阻本身的阻抗。

减小主动屏蔽的面积：

- 可以考虑在每个触摸传感器后面使用屏蔽电极贴片（而不是完全灌铜），仅向每个传感器边缘外延伸 2-5 mm。
- 这些贴片必须一起连接到一个物理点，并以“星形”形式与电阻相连。

图 3-11. 最小驱动屏蔽区域

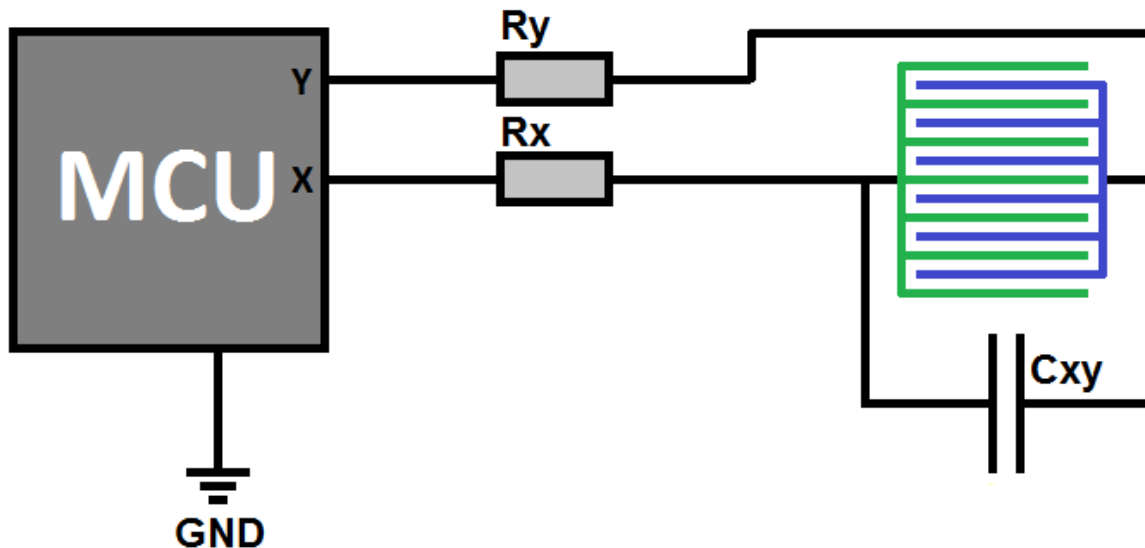


4. 互电容传感器

4.1 互电容测量

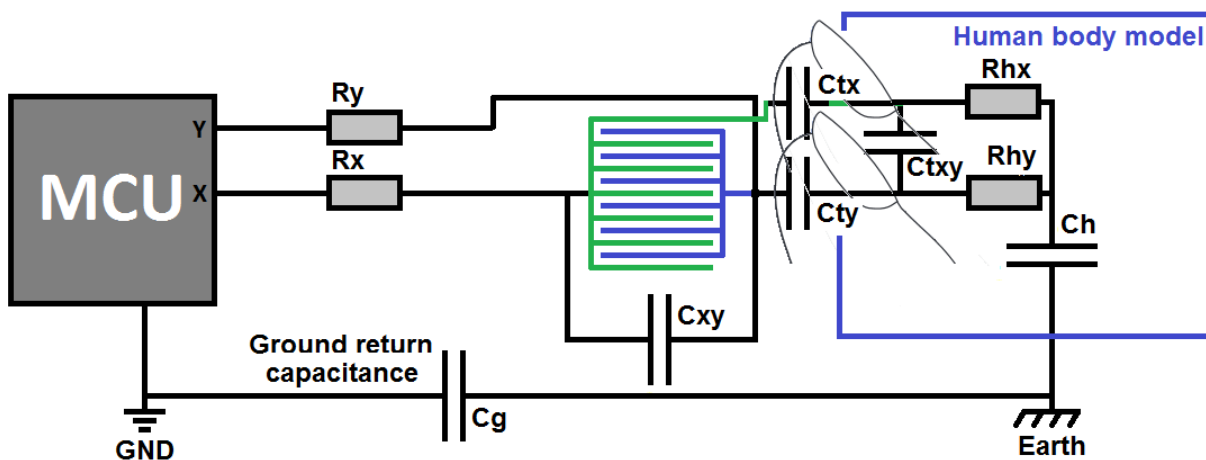
互电容触摸传感器为每个传感器节点使用一对电极并测量电极之间的电容。此传感器是在电极对靠近放置的位置形成的，通常使用叉指段来优化形成传感器节点基础电容的平行导体的长度。

图 4-1. 互电容传感器



当在传感器上形成接触点时，用户的指尖将与 X（发射）和 Y（接收）电极之间的电场相互作用。

图 4-2. 形成接触点的互电容传感器



两种竞争效应会发生复杂的相互作用：

- XY 电容中形成一个额外“极板”会以平行方式加入串联组合 C_{tx} 和 C_{ty} ，从而增强 X 与 Y 之间的耦合。
- 通过 C_h （人体模型电容）和 C_g （大地到地的电容）提供接地返回路径可减少从 X 转移到 Y 的电荷量，从而使 X-Y 电容明显减小。

注：HBM 电阻 R_h （此处显示为 R_{hx} 和 R_{hy} ）不影响触摸灵敏度。

C_t

- 因接触点导致 XY 电容减小的总电容值
- 0.1 pF 至 2 pF，具体取决于传感器设计和触摸覆盖层的厚度/材料

C_h

- 人体模型
- 100 pF 至 200 pF

C_g

- 应用直流地与大地之间的耦合电容
- 取决于应用类型和电源系统
- 小型电池供电设备中低至约 1 pF
- 当直流地直接连接到大地时，电容无限大/短路

与自电容传感器中一样，对于大多数应用， C_t 比 C_h 或 C_g 小得多； C_t 由传感器设计控制，决定了测得的触摸增量。

5. 传感器设计

5.1 触摸电容模型

与自电容测量不同，对于给定的互电容传感器布局，无法轻松计算出预计触摸电容的近似值。平行极板近似方法是不适用的，因为这种情况下的“极板”是比触摸覆盖层小得多的 X 和 Y 电极段。用户的接触点由电极对和指尖之间边缘和点构成的场决定。

在设计互电容传感器时，可以优化节点布局以满足应用需求。

例如：

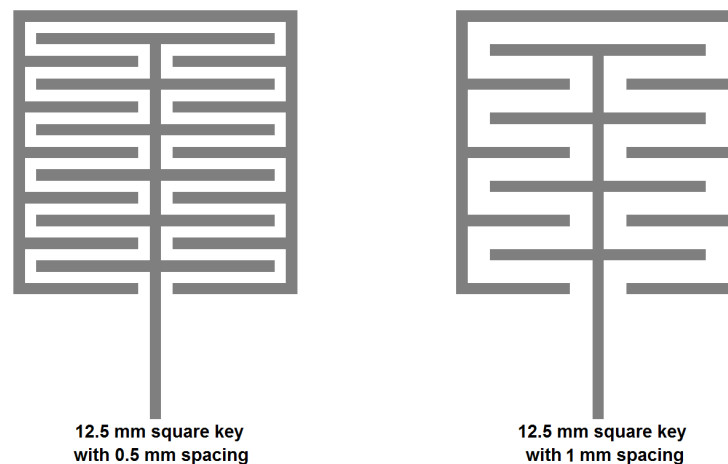
- 最大的触摸增量
- 最佳的抗噪性
- 最佳抑水性
- 最小的传感器电容
- 最低功耗
- 最短的触摸延时

在许多应用中，必须在不同需求之间折衷。

例如，最大触摸增量是通过电极的高度交错实现的，但最小传感器电容则需要通过增大 X 和 Y 的间距来实现。

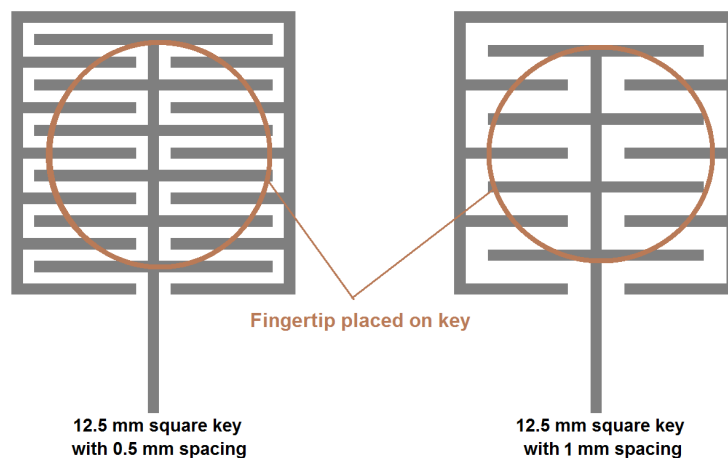
增大 XY 间隔会减小 XY 电容，但也会缩短电极之间平行段的长度。

图 5-1. 0.5 mm 与 1 mm XY 间距



当用户形成接触点时，所覆盖平行段的总长度要短得多。由于这些长度是用户与 XY 场交互的位置，因此长度缩短会导致触摸灵敏度成比例地降低。

图 5-2. 12 mm 按键接触点



5.2 按钮传感器设计

电容传感器的最简单实现是按钮，其中传感器由单个 XY 节点组成，并被解析为二进制状态：“检测中”或“退出检测”当触摸增量（触摸电容 CT 的数字化测量值）超过触摸阈值时，传感器处于“检测中”。

注： 在互电容传感器的情况下，Ct 为负，但在许多实现中，信号数据会被翻转，因此会在接触时观察到信号标准化增大。

电极形状

在传感器节点中，电极在 X 和 Y 之间形成的一个耦合区域。常见按钮为圆形或矩形，但平行段耦合有 X 和 Y 电极的任何形状都可以使用。

叉指按键

最简单的传感器布局是共面叉指按键。请参见下图。

图 5-3. 标准共面布局

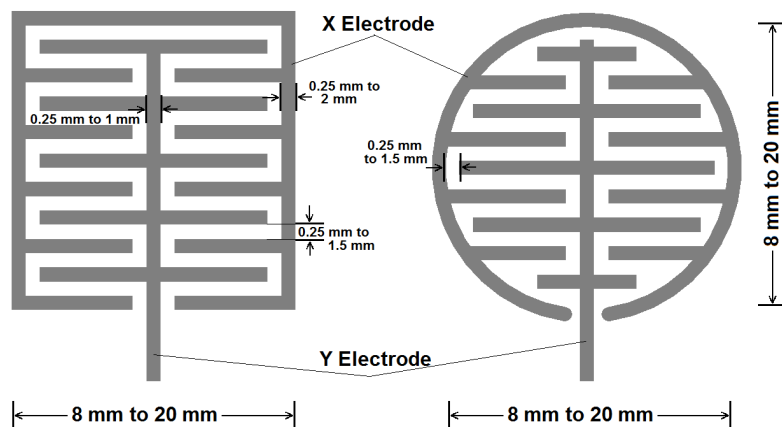


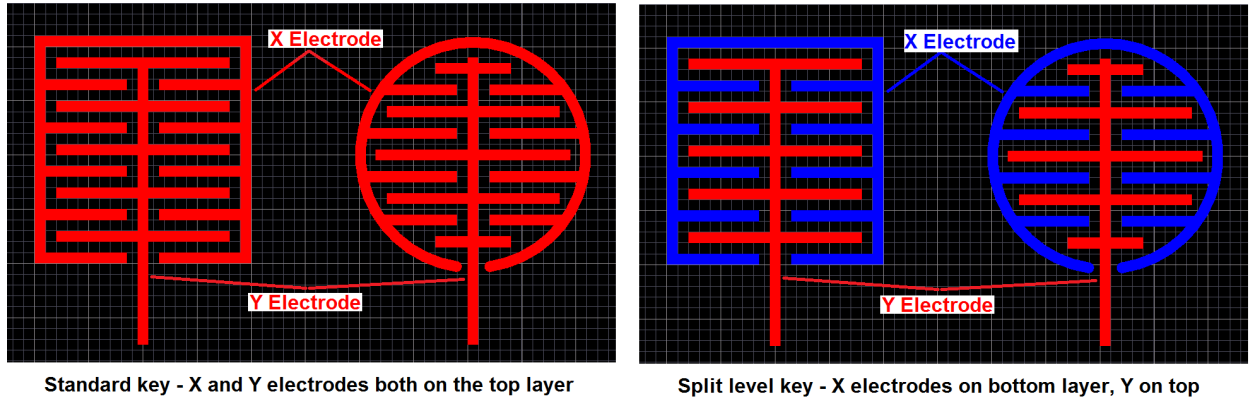
表 5-1. 叉指按键尺寸

	最小值	典型值	最大值
按键尺寸	8 mm	12 mm	20 mm

..... (续)			
	最小值	典型值	最大值
X 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	2 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
XY 间距	0.25 mm	0.5 mm	1.5 mm

叉指按键通常在单个 PCB 层上实现，但也可以拆分为两层，其中 X 电极位于距离触摸表面最远的一层上。这种设计的优点是可在形成接触点时确保平行段实现最大长度，同时增大 XY 间隔并因此减小传感器电容。

图 5-4. 分层布局



灌铜 X 按键

另一种布局是“灌铜 X”，其中 X 电极是分段 Y 电极后面的实心区域。X 区域的每一侧应超过延伸至超出 Y 电极至少 2 mm。

图 5-5. 灌铜 X 布局

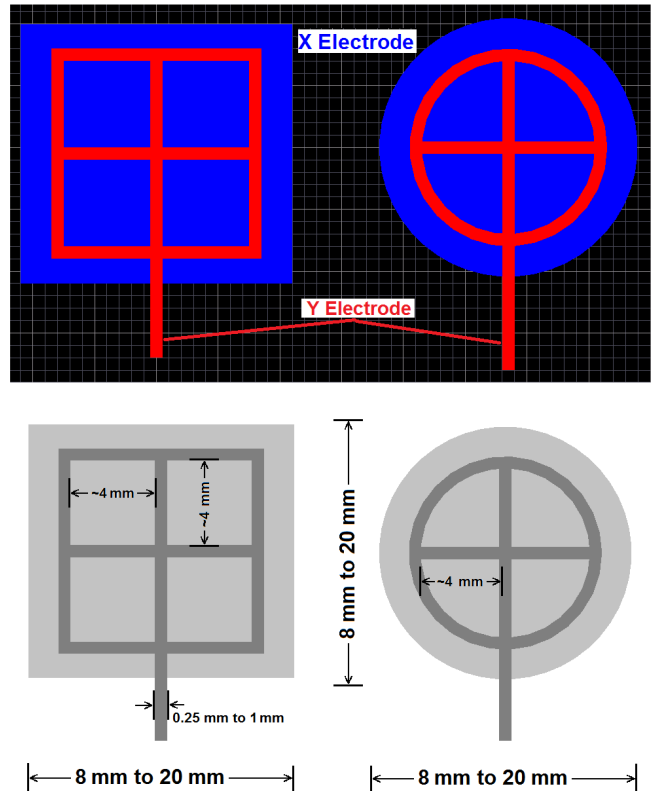


表 5-2. 灌铜 X 按键尺寸

	最小值	典型值	最大值
按键尺寸	8 mm	12 mm	20 mm
X 电极宽度	8 mm	12 mm	20 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
Y 网格中的间隙	4 mm	4 mm	4 mm

这种布局的优点是 X 区域可为 Y 传感器屏蔽电路噪声。但是，在需要较厚触摸覆盖层的应用中，灌铜 X 传感器的灵敏度较差。

通常，只能在触摸覆盖层比基板薄的位置使用灌铜 X 传感器。对于标准的 1.6 mm FR4，不应考虑厚度 > 1.6 mm 的触摸覆盖层。

注：灌铜 X 传感器通常不适合在柔性 PCB 上使用，因为薄基板需要同样薄的触摸覆盖层。灌铜 X 传感器不适合与某些器件一起使用。有关器件特定信息，请参见 10. 附录 C。

5.3 滑动条传感器设计

可基于放置在一排的两个或多个传感器实现滑动条。将传感器组的测量结果结合起来确定接触点的位置，同时在传感器之间进行插值来提高分辨率。

如上一章所述，使用大型传感器但不进行插值会导致计算出的接触位置与实际位置之间的匹配度不佳。可通过增加传感器数量来改善插值，但代价是总测量时间会延长。

叉指滑动条

可以使用叉指布局来应用空间插值，其中传感器节点由交替的 X 电极和 Y 电极形成。通常，一条 Y 线路与多条 X 线路配合使用，因为这样可以实现最简单的传感器布局。

图 5-6. 叉指滑动条布局

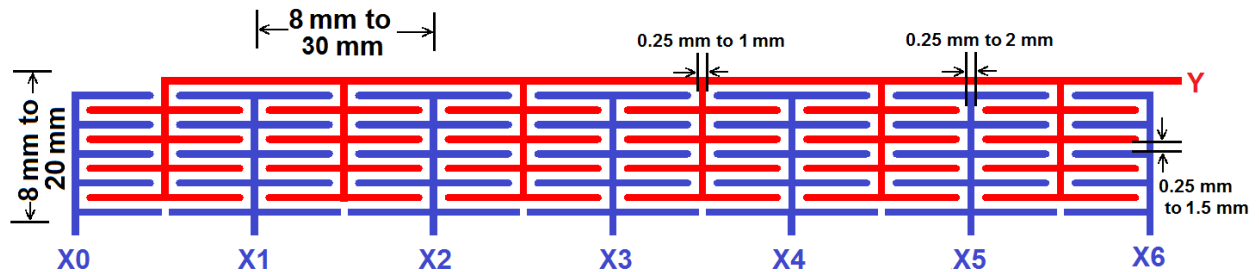


表 5-3. 叉指滑动条尺寸

	最小值	典型值	最大值
滑动条宽度	8 mm	12 mm	20 mm
段宽度	8 mm	12 mm	30 mm
X 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	2 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
XY 间距	0.25 mm	0.5 mm	1.5 mm

叉指滑动条可以形成共面传感器，其中 X 电极和 Y 电极可位于同一层，也可拆分到不同的层上，X 电极位于距离触摸表面较远的一层上。

灌铜 X 滑动条

当 X 电极位于单独的 PCB 层上时，灌铜 X 滑动条可提供更高的线性度。可以扩展空间插值，而无需在 Y 电极周围进行复杂的布线。灌铜 X 滑动条的 X 层图案与上一章中介绍的插值自电容滑动条相同。

图 5-7. 灌铜 X 滑动条布局

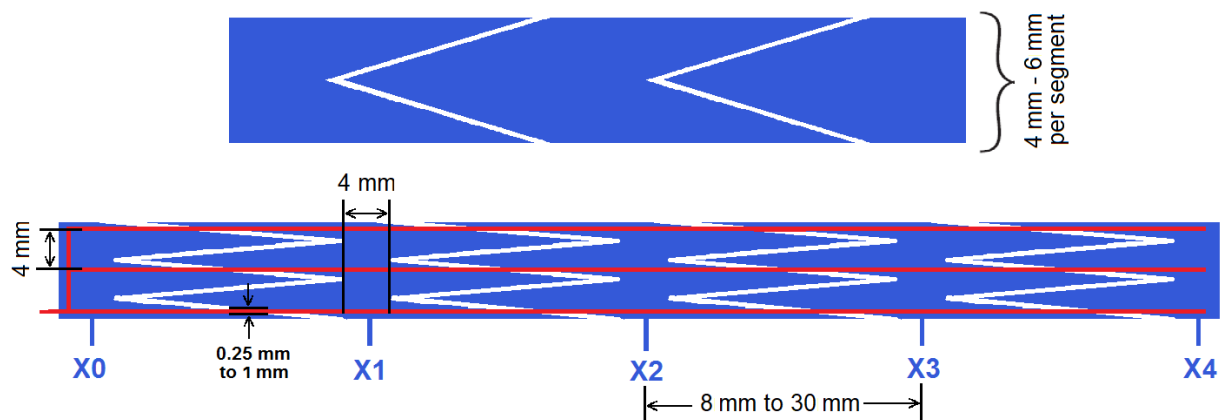


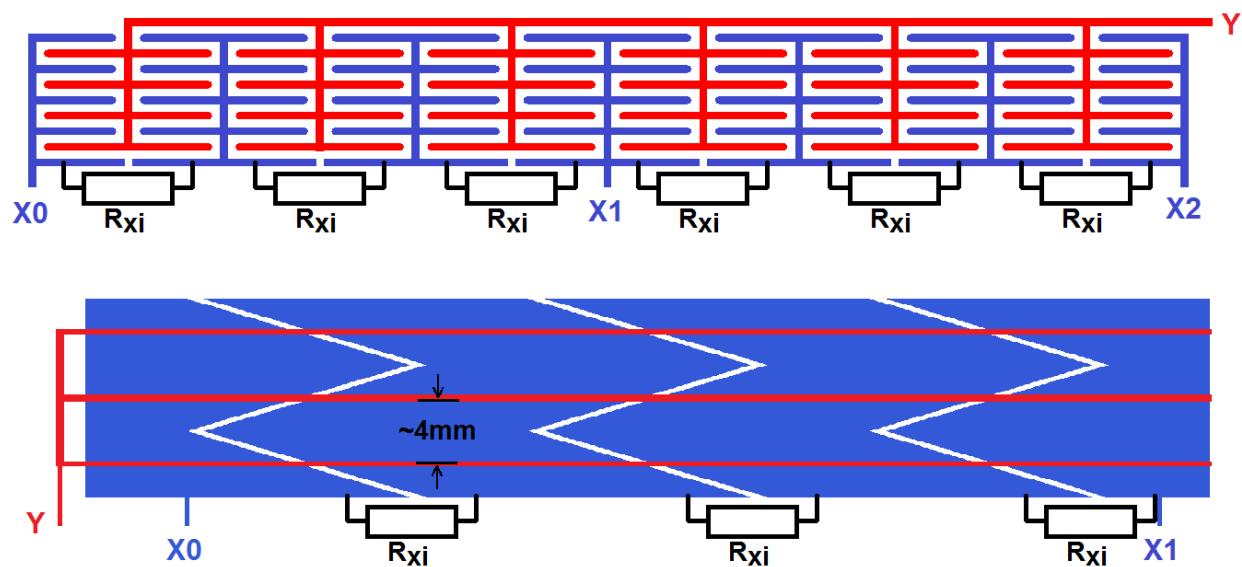
表 5-4. 灌铜 X 滑动条尺寸

	最小值	典型值	最大值
滑动条宽度	8 mm	12 mm	20 mm
X 电极宽度	8 mm	15 mm	30 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
Y 段之间的间隙	3 mm	4 mm	5 mm

电阻插值

在叉指和灌铜 X 滑动条设计中，均可以通过一些传感器节点的电阻插值来减少传感器节点的测量次数，同时保持线性度。

图 5-8. 进行电阻插值的滑动条



至少需要将两个直接布线的 X 电极放置在滑动条的两端。中间节点与一系列电阻相连，形成一个电阻分压器，以 X 线路驱动电压的一定百分比驱动每个中间节点。中间节点上的接触点会在每个直接节点上产生成比例的触摸增量，从而有助于沿滑动条的长度进行插值。

选择段插值电阻 R_{xi} 时应满足如下要求：每对直连 X 线路之间的总串联组合值大约在 10-20 k Ω 之间。

5.4 滚轮传感器设计

滚轮传感器由排成一圈的三个或更多传感器节点组成。

注： 由于位置计算需要独特的交叉区域，因此至少需要三个电极。

滚轮传感器的工作方式与滑动条传感器相同，惟一的例外是它从通道 n 绕到通道 0，因此在此设计中没有端电极。

叉指滚轮

像叉指滑动条一样，最简单的实现是共面叉指滚轮。X 电极和 Y 电极在同一 PCB 层上形成。此设计还可以拆分为两个 PCB 层以减小传感器电容，其中 X 电极位于远离触摸覆盖层的层上。

图 5-9. 叉指滚轮布局

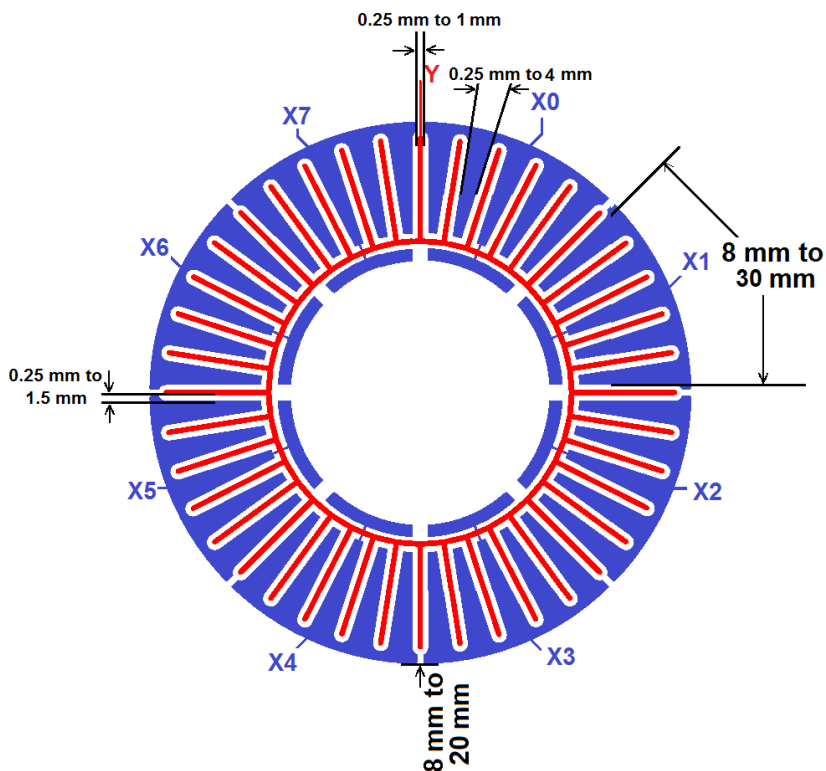


表 5-5. 叉指滚轮尺寸

	最小值	典型值	最大值
滚轮宽度	8 mm	12 mm	20 mm
段宽度	8 mm	12 mm	30 mm
X 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	4 mm*
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
XY 间距	0.25 mm	0.5 mm	1.5 mm

注：*两端的锥度必须在此范围内。

灌铜 X 滚轮

由于 X 电极位于单独的 PCB 层上，因此可以扩展空间插值，而无需围绕 Y 电极进行复杂布线。这允许灌铜 X 设计改善叉指布局的线性度。灌铜 X 滑动条的 X 层图案与上一章中介绍的插值自电容滚轮相同。

图 5-10. 灌铜 X 滚轮布局

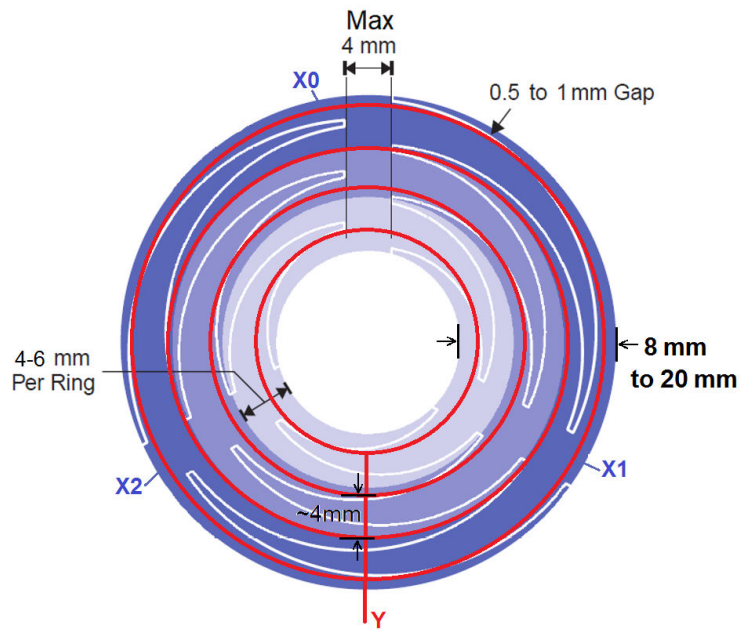


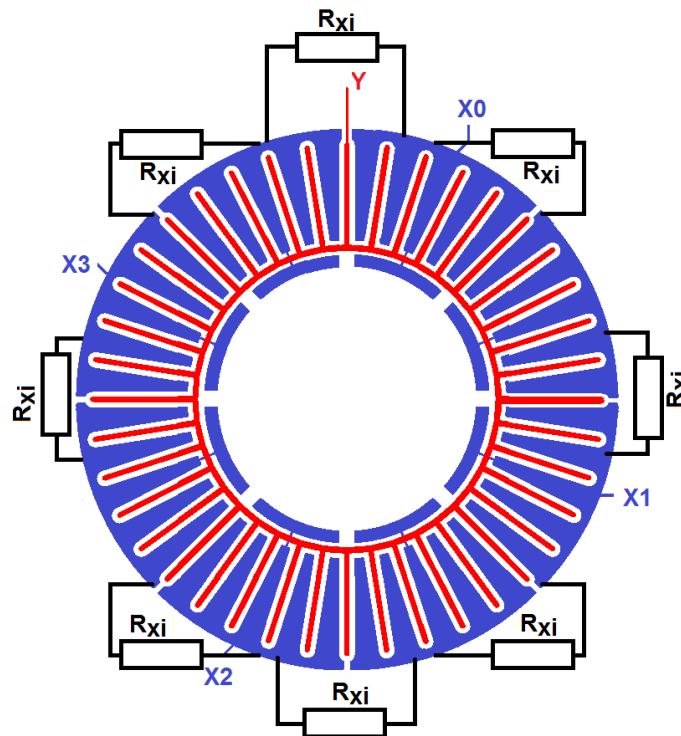
表 5-6. 灌铜 X 滚轮尺寸

	最小值	典型值	最大值
滚轮宽度	8 mm	12 mm	20 mm
X 电极宽度	8 mm	15 mm	30 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
Y 段之间的间隙	3 mm	4 mm	5 mm

电阻插值

在滚轮设计中，可以通过一些传感器节点的电阻插值来减少传感器节点的测量次数，同时保持线性度。

图 5-11. 进行电阻插值的滚轮



至少需要三个直接布线的 X 电极，并且需要围绕滚轮对称放置。中间节点与一系列电阻相连，形成一个电阻分压器，以 X 线路驱动电压的一定百分比驱动每个中间节点。中间节点上的接触点会在每个直接节点上产生成比例的触摸增量，从而有助于沿滚轮的周长进行插值。

选择段插值电阻 R_{xi} 时应满足如下要求：每对直连 X 线路之间的总串联组合值大约在 10-20 k Ω 之间。

5.5 表面传感器设计

互电容触摸表面由“行”和“列”电极组成，这些电极分别以 X 和 Y 来实现。将每一行或每一列的测量数据组合起来即可沿水平和垂直方向实现滑动条功能。

注： 两点检测需要接触点中心之间至少隔开 2 倍的传感器间隔。

叉指表面

叉指滑动条图案可沿两个方向延伸，形成叉指表面传感器。这种表面图案需要两个电极层才能实现交叉，因为每一行必须从左到右连接，每一列必须从上到下连接。

传感器可以采用仅在第二层上进行连接的单层形式，也可以采用分层设计，其中 X 电极位于距触摸覆盖层较远的一层，Y 电极位于较近的一层。

图 5-12. 叉指表面布局

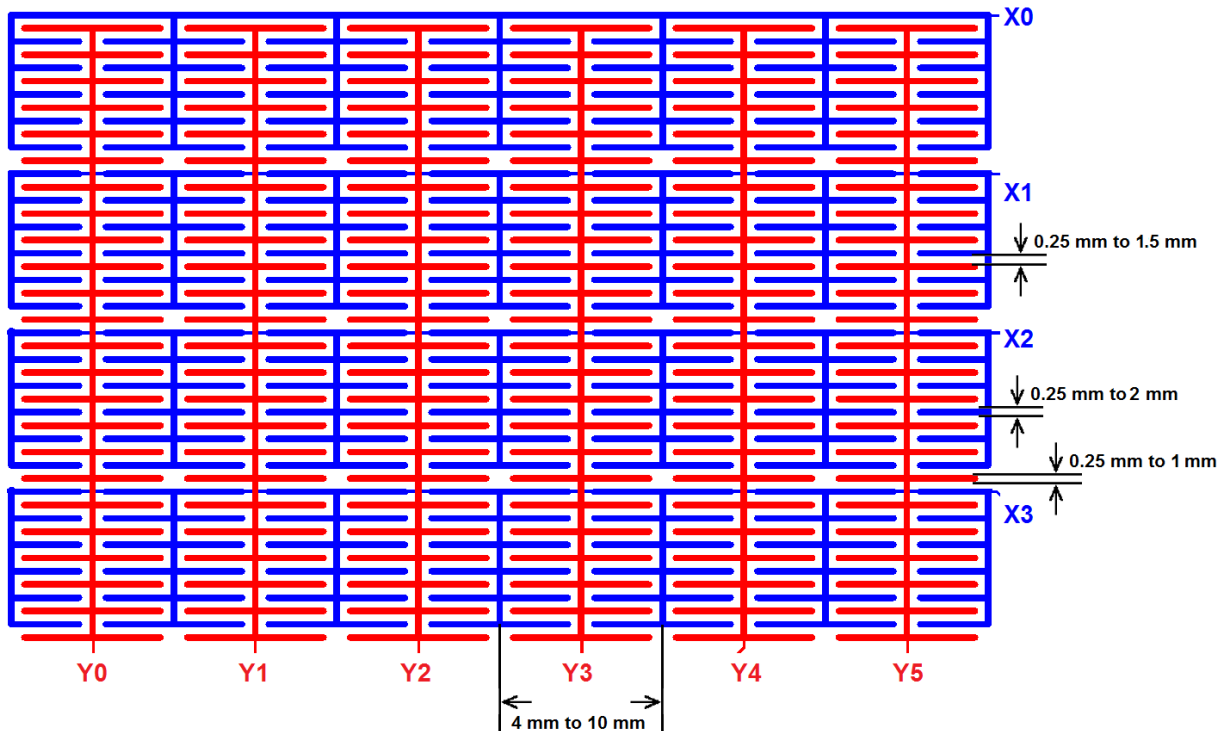


表 5-7. 叉指表面参数

	最小值	典型值	最大值
行/列间距	4 mm	6 mm	10 mm
X 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	2 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
XY 间距	0.25 mm	0.5 mm	1.5 mm

菱形图案

5.5 表面传感器设计中所示的菱形图案用于自电容表面，也可以实现为互电容传感器。

可以将水平传感器节点驱动为 X 线路，将垂直节点作为 Y 线路测量，反之亦然。X 电极和 Y 电极可以共面放置，也可以分层放置，其中 X 位于背面（如上面针对按钮、滑动条和滚轮所述）。

注： 使用可逆 XY 电极的实现应位于单层上。

图 5-13. 互表面菱形图案

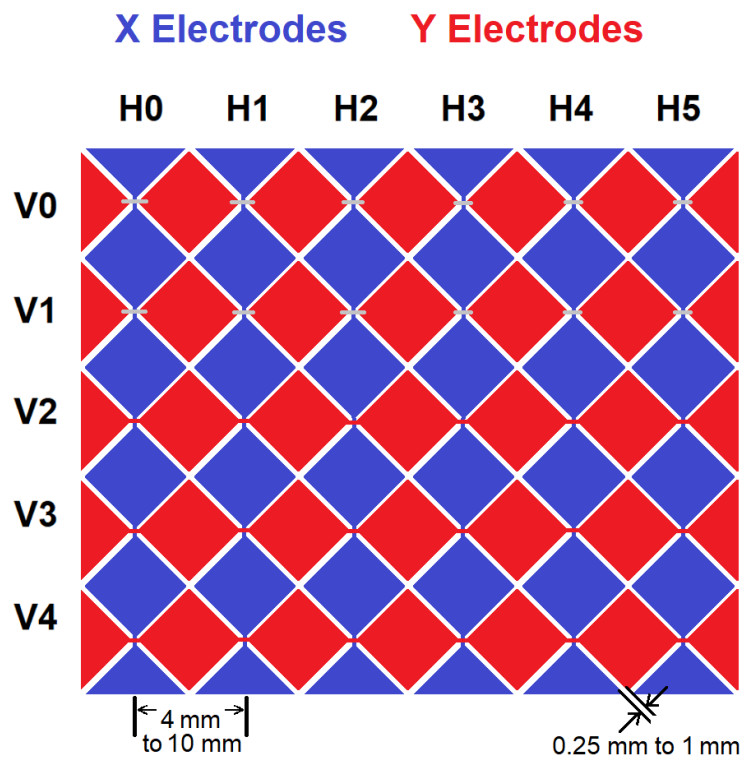


表 5-8. 表面菱形图案尺寸

	最小值	典型值	最大值
行/列间距	4 mm	6 mm	10 mm
XY 间隔	0.25 mm	0.5 mm	1 mm

类似地，花朵图案表面可用于互电容表面。

灌铜 X 表面

传感器的 X 电极是位于背面的竖条，Y 电极是在顶层以一定间隔水平放置的窄走线。沿 Y 节点插值提供的是垂直位置，沿 X 节点插值提供的是水平位置。

图 5-14. 灌铜 X 图案

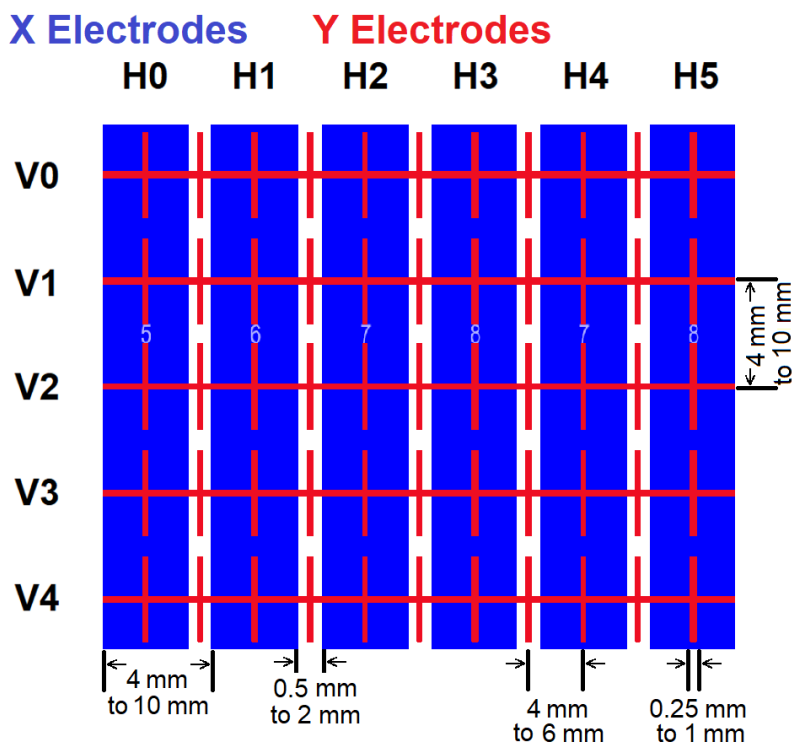


表 5-9. 灌铜 X 图案参数

	最小值	典型值	最大值
行/列间距	4 mm	6 mm	10 mm
XX 间隔	0.5 mm	1 mm	2 mm
Y 电极宽度	0.25 mm	0.5 mm	1 mm
Y 电极间距	3 mm	4 mm	5 mm

6. 触摸覆盖层效果

较厚的触摸覆盖层会增大用户指尖和传感器电极之间的距离，并产生扩散二者之间形成的电场的效果。接触点的电容会减小，但是可以通过增大电极的尺寸和数字化量来补偿。

为了获得最高的灵敏度，每个传感器都应设计为延伸到接触点范围以外，超出部分至少应达到触摸覆盖层的厚度。

对于 1 mm 的触摸覆盖层，最小的触摸按钮或最窄的滑动条/滚轮应为 $(8\text{ mm} + (2 \times 1\text{ mm})) = 10\text{ mm}$ 。

对于 3 mm 的触摸覆盖层，该值增加为 $(8\text{ mm} + (2 \times 3\text{ mm})) = 14\text{ mm}$ 。

在插值传感器（滑动条、滚轮或表面）中，相邻电极之间交叉区域扩大对较厚的触摸覆盖层十分有利，有助于提高报告接触位置的准确性。

对于灌铜 X 传感器，较厚的触摸覆盖层会导致灵敏度明显降低。建议不要使用厚度大于 XY 层间隔的触摸覆盖层。

7. 屏蔽

在许多应用中，必须屏蔽触摸传感器以防止错误激活。这种错误激活可能是由 EMI 引起的，也可能是由非触摸敏感位置的接触点引起的。

互电容传感器可使用被动屏蔽隔离。

7.1 被动屏蔽

- 通常接直流地
- 也可以使用 V_{DD} 或任何以地为参考的直流电压
- 后部灌铜可避免来自后面的触摸或 EMI
- 共面灌铜可更好地隔离触摸传感器
- 可通过排线降低容性负载
- 对耐湿性不利

后部接地屏蔽

有时，需要在电极的后部增加屏蔽，以防止后部引起误检，或者开关信号引起干扰，例如背光或驱动器电路引起的干扰。

可使用地平面。它应直接连接到电路地的单个点。

对于互电容传感器，传感器节点后面接地区域的影响是减小传感器节点的总电容。这在某些应用中可能十分有利，因为它允许将更多的按键集总在一起。不过，受 Y 线路电极负载的影响，传感器的时间常数可能增大。

后部的地平面可能会显著降低触摸传感器的灵敏度，因为直流地会吸引 X 电极发出的电场。在触摸覆盖层的厚度可能大于传感器层和接地层之间间隔的情况下，应特别考虑到这一点。

应使电极和地平面尽可能相隔最大距离。例如，在多层 PCB 上，触摸传感器应位于顶层，地应位于底层。

此外，接地屏蔽的排线填充可以减少至 50% 或 25%，这可以缓解灵敏度降低的情况，同时仍然提供良好的屏蔽效果。

如果应用中不存在从传感器板后意外形成接触点的风险，则可以去除传感器后的地平面。这可以避免传感器灵敏度降低的情况，同时实现与其他电路元件或 EMI 的隔离。

共面接地屏蔽

可通过实现共面接地屏蔽来改善触摸传感器之间的隔离，以降低 EMI 和共模噪声效应。

由于共面屏蔽与触摸传感器的区域不重叠，因此可以使用实心灌铜。

为了最大程度地降低灵敏度损失，接地屏蔽层应与任何触摸传感器保持约 2 mm 的距离，而为了实现大型传感器电极或更好的耐湿性，可能需要增加该距离。

图 7-1. 共面地平面间隔

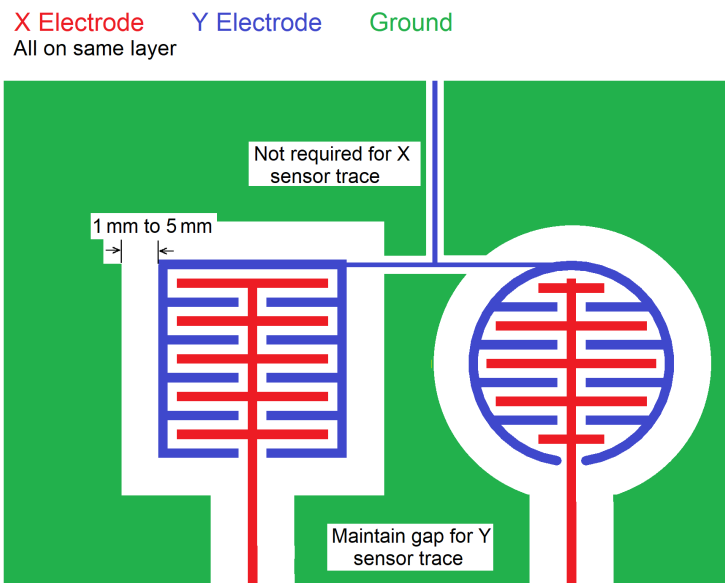


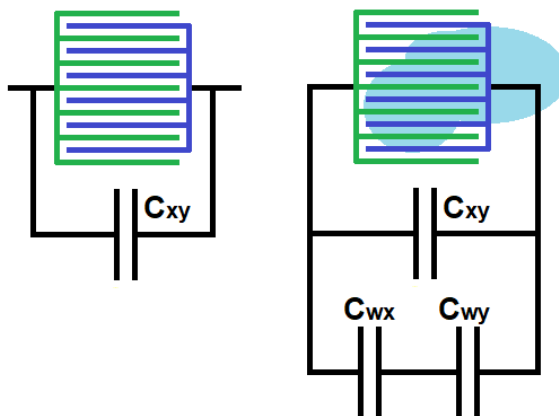
表 7-1. 传感器与地的间隔

最小值	典型值	最大值
1 mm	2 mm	5 mm

7.2 耐湿性

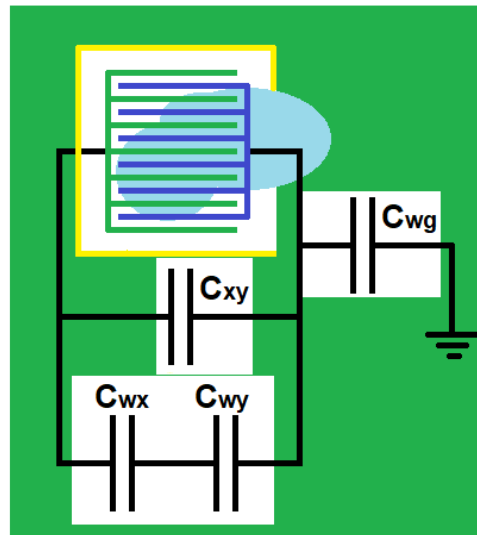
使用互电容传感器时，隔离传感器节点上的水滴不会导致误检测到触摸信号。实际上，传感器将显示“远离触摸”增量，因为水滴会通过水和 X 线路之间形成的电容 C_{wx} 以及水和 Y 线路之间形成的电容 C_{wy} 增强 XY 耦合，但不提供有效的接地返回路径。

图 7-2. 隔离传感器上的水滴



通常，传感器是一组紧密靠近的传感器中的一个，与许多元件和信号共用 PCB。在这种情况下，从传感器节点跨越至任何其他电路元件的水滴都将增强接地返回耦合。这样一来，最终结果可能是出现触摸增量和误检测到触摸信号。

图 7-3. 跨越至接地灌铜区的水滴



8. 附录 A

器件系列	最大自电容传感器电容 (pF)	最大互电容传感器电容 (pF)
ATtiny81X/161X/321X	53	32
ATmega324PB/ATmega328PB	32	32
ATSAML10/L11	63	32
ATSAML22	32	32
ATSAMC20/C21	32	32
ATSAMD10/D11	32	32
ATSAMD20/D21/DA1/ATSAMHA1	32	32
ATSAML21	32	32
ATSAMD51/ATSAME51/ATSAME53/ ATSAME54	63	32

9. 附录 B

器件系列	主动屏蔽电路
ATtiny81X/161X/321X	增强型驱动屏蔽（三级）
ATSAML1X	
ATSAMD2X/ATSAMDA1/ATSAMHA1	驱动屏蔽（两级）
ATSAMC2X/ATSAML2X	
ATSAME5X/ATSAMD5X	
不带 HCVD 的 PIC® MCU	
ATmega328PB/ATmega324PB	不支持主动屏蔽
带双 ADC 的 PIC MCU	增强型驱动屏蔽（两级）
带 ADCC 的 PIC MCU	增强型驱动屏蔽（两级）

10. 附录 C

器件系列	适用于灌铜 X 设计 ⁽¹⁾
ATtiny81X/161X/321X	是
ATmega324PB/ATmega328PB	否
ATSAML10/L11	是
ATSAML22	否
ATSAMC20/C21	否
ATSAMD10/D11	否
ATSAMD20/D21/DA1/ATSAMHA1	否
ATSAML21	否
ATSAMD51/ATSAME51/E53/E54	是

注： 1.是 = 器件支持 X 线路的 I/O 驱动

Microchip 网站

Microchip 网站 <http://www.microchip.com/> 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。只要使用常用的互联网浏览器即可访问，网站提供以下信息：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题（FAQ）、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 顾问计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

变更通知客户服务

Microchip 的变更通知客户服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请登录 Microchip 网站 <http://www.microchip.com/>。在“支持”（Support）下，点击“变更通知客户”（Customer Change Notification）服务后按照注册说明完成注册。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

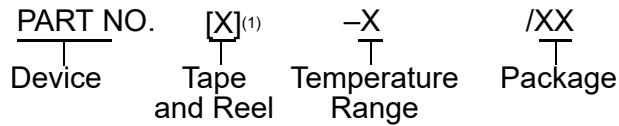
- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师（FAE）
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或应用工程师（FAE）寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过以下网站获得技术支持：<http://www.microchip.com/support>

产品标识体系

欲订货或获取价格、交货等信息，请与我公司生产厂或各销售办事处联系。



器件：	器件 A 和器件 B 等	
卷带式选项：	空白	= 标准封装（料管或托盘）
	T	= 卷带式 ⁽¹⁾
温度范围：	I	= -40°C 至+85°C（工业级）
	E	= -40°C 至+125°C（扩展级）
封装： ⁽²⁾	JQ	= UQFN
	P	= PDIP
	ST	= TSSOP
	SL	= SOIC-14
	SN	= SOIC-8
	RF	= UDFN
定制信息：	QTP、SQTP SM （带序列号的快速批量编程能力）、代码或特殊要求（否则空白）	

- 器件 A——I/P 工业级温度，PDIP 封装
- 器件 B——E/SS 扩展级温度，SSOP 封装

注：

1. 卷带式标识符仅出现在产品目录的部件编号描述中。该标识符用于订货目的，不会印刷在器件封装上。关于包装是否提供卷带式选项的信息，请咨询当地的 Microchip 销售办事处。
2. 可提供小型封装选项。有关小型封装可用性的信息，请访问 <http://www.microchip.com/packaging> 或联系您当地的销售办事处。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿意与关心代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 **Microchip** 产品性能和使用情况的有用信息。**Microchip Technology Inc.**及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 **Microchip Technology Inc.**的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。**Microchip** 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。**Microchip** 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 **Microchip** 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 **Microchip** 免于承担法律责任，并加以赔偿。除非另外声明，否则在 **Microchip** 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、**Microchip** 徽标、**Adaptec**、**AnyRate**、**AVR**、**AVR** 徽标、**AVR Freaks**、**BesTime**、**BitCloud**、**chipKIT**、**chipKIT** 徽标、**CryptoMemory**、**CryptoRF**、**dsPIC**、**FlashFlex**、**flexPWR**、**HELDO**、**IGLOO**、**JukeBlox**、**KeeLoq**、**Kleer**、**LANCheck**、**LinkMD**、**maXStylus**、**maXTouch**、**MediaLB**、**megaAVR**、**Microsemi**、**Microsemi** 徽标、**MOST**、**MOST** 徽标、**MPLAB**、**OptoLyzer**、**PackeTime**、**PIC**、**picoPower**、**PICSTART**、**PIC32** 徽标、**PolarFire**、**Prochip Designer**、**QTouch**、**SAM-BA**、**SenGenuity**、**SpyNIC**、**SST**、**SST** 徽标、**SuperFlash**、**Symmetricom**、**SyncServer**、**Tachyon**、**TempTrackr**、**TimeSource**、**tinyAVR**、**UNI/O**、**Vectron** 及 **XMEGA** 均为 **Microchip Technology Inc.**在美国和其他国家或地区的注册商标。

APT、**ClockWorks**、**The Embedded Control Solutions Company**、**EtherSynch**、**FlashTec**、**Hyper Speed Control**、**HyperLight Load**、**IntelliMOS**、**Libero**、**motorBench**、**mTouch**、**Powermite 3**、**PrecisionEdge**、**ProASIC**、**ProASIC Plus**、**ProASIC Plus** 徽标、**Quiet-Wire**、**SmartFusion**、**SyncWorld**、**Temux**、**TimeCesium**、**TimeHub**、**TimePictra**、**TimeProvider**、**Vite**、**WinPath** 和 **ZL** 均为 **Microchip Technology Inc.**在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、**AKS**、**Analog-for-the-Digital Age**、**Any Capacitor**、**AnyIn**、**AnyOut**、**BlueSky**、**BodyCom**、**CodeGuard**、**CryptoAuthentication**、**CryptoAutomotive**、**CryptoCompanion**、**CryptoController**、**dsPICDEM**、**dsPICDEM.net**、**Dynamic Average Matching**、**DAM**、**ECAN**、**EtherGREEN**、**In-Circuit Serial Programming**、**ICSP**、**INICnet**、**Inter-Chip Connectivity**、**JitterBlocker**、**KleerNet**、**KleerNet** 徽标、**memBrain**、**Mindi**、**MiWi**、**MPASM**、**MPF**、**MPLAB Certified** 徽标、**MPLIB**、**MPLINK**、**MultiTRAK**、**NetDetach**、**Omniscient Code Generation**、**PICDEM**、**PICDEM.net**、**PICKit**、**PICtail**、**PowerSmart**、**PureSilicon**、**QMatrix**、**REAL ICE**、**Ripple Blocker**、**SAM-ICE**、**Serial Quad I/O**、**SMART-I.S.**、**SQI**、**SuperSwitcher**、**SuperSwitcher II**、**Total Endurance**、**TSHARC**、**USBCheck**、**VariSense**、**ViewSpan**、**WiperLock**、**Wireless DNA** 和 **ZENA** 均为 **Microchip Technology Inc.**在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 **Microchip Technology Incorporated** 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、**Frequency on Demand**、**Silicon Storage Technology** 和 **Symmcom** 为 **Microchip Technology Inc.**在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 **Microchip Technology Inc.**的子公司 **Microchip Technology Germany II GmbH & Co. & KG** 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2019, **Microchip Technology Incorporated** 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-5297-3

AMBA、**Arm**、**Arm7**、**Arm7TDMI**、**Arm9**、**Arm11**、**Artisan**、**big.LITTLE**、**Cordio**、**CoreLink**、**CoreSight**、**Cortex**、**DesignStart**、**DynamiQ**、**Jazelle**、**Keil**、**Mali**、**Mbed**、**Mbed Enabled**、**NEON**、**POP**、**RealView**、**SecurCore**、**Socrates**、**Thumb**、**TrustZone**、**ULINK**、**ULINK2**、**ULINK-ME**、**ULINK-PLUS**、**ULINKpro**、**µVision** 和 **Versatile** 是 **Arm Limited**（或其子公司）在美国和/或其他国家/地区的商标或注册商标。

质量管理体系

有关 **Microchip** 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务中心

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. 钱德勒, 亚利桑那州 85224-6199 电话: 480-792-7200 传真: 480-792-7277 技术支持: http://www.microchip.com/support 网址: www.microchip.com	澳大利亚 - 悉尼 电话: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 电话: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 电话: 86-28-8665-5511 中国 - 重庆 电话: 86-23-8980-9588 中国 - 东莞 电话: 86-769-8702-9880 中国 - 广州 电话: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 电话: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特别行政区 电话: 852-2943-5100 中国 - 南京 电话: 86-25-8473-2460 中国 - 青岛 电话: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 电话: 86-21-3326-8000 中国 - 沈阳 电话: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 电话: 86-755-8864-2200 中国 - 苏州 电话: 86-186-6233-1526 中国 - 武汉 电话: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 电话: 86-29-8833-7252 中国 - 厦门 电话: 86-592-2388138 中国 - 珠海 电话: 86-756-3210040	印度 - 班加罗尔 电话: 91-80-3090-4444 印度 - 新德里 电话: 91-11-4160-8631 印度 - 浦那 电话: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 电话: 81-6-6152-7160 日本 - 东京 电话: 81-3-6880-3770 韩国 - 大邱 电话: 82-53-744-4301 韩国 - 首尔 电话: 82-2-554-7200 马来西亚 - 吉隆坡 电话: 60-3-7651-7906 马来西亚 - 槟榔屿 电话: 60-4-227-8870 菲律宾 - 马尼拉 电话: 63-2-634-9065 新加坡 电话: 65-6334-8870 台湾地区 - 新竹 电话: 886-3-577-8366 台湾地区 - 高雄 电话: 886-7-213-7830 台湾地区 - 台北 电话: 886-2-2508-8600 泰国 - 曼谷 电话: 66-2-694-1351 越南 - 胡志明市 电话: 84-28-5448-2100	奥地利 - 韦尔斯 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 丹麦 - 哥本哈根 电话: 45-4450-2828 传真: 45-4485-2829 芬兰 - 埃斯波 电话: 358-9-4520-820 法国 - 巴黎 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 德国 - 加兴 电话: 49-8931-9700 德国 - 哈恩 电话: 49-2129-3766400 德国 - 海尔布隆 电话: 49-7131-72400 德国 - 卡尔斯鲁厄 电话: 49-721-625370 德国 - 慕尼黑 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 德国 - 罗森海姆 电话: 49-8031-354-560 以色列 - 若那那市 电话: 972-9-744-7705 意大利 - 米兰 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 意大利 - 帕多瓦 电话: 39-049-7625286 荷兰 - 德卢内市 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 挪威 - 特隆赫姆 电话: 47-72884388 波兰 - 华沙 电话: 48-22-3325737 罗马尼亚 - 布加勒斯特 电话: 40-21-407-87-50 西班牙 - 马德里 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 瑞典 - 哥德堡 电话: 46-31-704-60-40 瑞典 - 斯德哥尔摩 电话: 46-8-5090-4654 英国 - 沃金厄姆 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820
亚特兰大 德卢斯, 佐治亚州 电话: 678-957-9614 传真: 678-957-1455 奥斯汀, 德克萨斯州 电话: 512-257-3370 波士顿 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 774-760-0087 传真: 774-760-0088 芝加哥 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 630-285-0071 传真: 630-285-0075 达拉斯 阿迪森, 德克萨斯州 电话: 972-818-7423 传真: 972-818-2924 底特律 诺维, 密歇根州 电话: 248-848-4000 休斯顿, 德克萨斯州 电话: 281-894-5983 印第安纳波利斯 诺布尔斯维尔, 印第安纳州 电话: 317-773-8323 传真: 317-773-5453 电话: 317-536-2380 洛杉矶 米镇维荷, 加利福尼亚州 电话: 949-462-9523 传真: 949-462-9608 电话: 951-273-7800 罗利, 北卡罗来纳州 电话: 919-844-7510 纽约, 纽约州 电话: 631-435-6000 圣何塞, 加利福尼亚州 电话: 408-735-9110 电话: 408-436-4270 加拿大 - 多伦多 电话: 905-695-1980 传真: 905-695-2078			