

# 电容式传感器微控制器

## CTSU 电容式触摸电极设计指南

### 简介

本应用笔记介绍了如何为内置电容式触摸感应单元 (CTSU) 的 MCU 设计电极图案，并提供示例图案以供参考

### 目标器件

内置 CTSU (CTSU 表示 CTSU2、CTSU2L 和 CTSU2SL 等) 的 RX 产品家族、RA 产品家族、RL78 产品家族 MCU 和 Renesas Synergy™ 平台产品

### 目录

1. 概要.....	3
2. 自电容式按键：电极布局图案 .....	3
2.1 设计建议概要 .....	3
2.2 自电容方式概述.....	4
2.3 CTSU 自电容方式检测原理.....	5
2.4 电极图案设计 .....	6
2.4.1 电极焊盘和导线.....	7
2.4.2 导线.....	8
2.5 抗噪布局图案设计 .....	11
2.5.1 屏蔽保护对策 .....	11
2.5.1.1 图案设计.....	11
2.5.1.2 GND 屏蔽.....	12
2.5.1.3 有源屏蔽 (CTSU2 功能) .....	13
2.6 面板厚度的影响.....	15
2.6.1 面板厚度与触摸灵敏度的关系.....	15
2.6.2 面板厚度与串扰的关系.....	16
2.7 电极应用示例 .....	17
2.7.1 滑块电极布局图案设计示例.....	17
2.7.2 轮状布局图案设计示例.....	17
2.7.3 柔性印刷电路板.....	18
2.7.4 LED 导线布局.....	18
2.7.4.1 直接照明示例 .....	18
2.7.4.2 间接照明 (使用导光板) .....	19
2.7.5 面板和按键电极分离的设计.....	19
3. 互电容方式：电极布局图案 .....	20
3.1 概要 .....	20

3.2	设计建议概要 .....	21
3.3	互电容方式概述 .....	22
3.4	CTSU 互电容方式检测原理 .....	22
3.5	电极图案设计 .....	23
3.6	气隙 .....	25
3.7	触摸表面到电极的距离 .....	25
3.8	电极布线设计 .....	26
3.9	抗噪布局图案设计 .....	27
3.9.1	图案设计 .....	27
3.9.2	屏蔽保护抗噪对策 .....	27
3.10	设计应用示例 .....	29
3.10.1	防水电极布局图案设计 .....	29
3.10.2	LED 导线布局 .....	31
3.10.2.1	直接照明示例 .....	31
3.10.2.2	间接照明示例 .....	31
	版本历史 .....	32

## 1. 概要

电容式触摸按键的灵敏度和抗噪性能均受触摸电极焊盘（以下简称“电极”）的形状和尺寸、导线布线方式、电极周围的图案、覆盖面板厚度、是否包含气隙和产品外壳的内部配置等因素的影响。在设计电极及其周围区域时，所有这些因素均应考虑在内。

本应用笔记介绍了在使用瑞萨电容式触摸传感器单元 (CTSU) 时如何设计电极焊盘和导线，以及如何处理相关问题和潜在问题。此外，还提供了建议使用的应用程序。

## 2. 自电容式按键：电极布局图案

### 2.1 设计建议概要

下文提供的信息可供在双面印刷电路板上设计自电容式按键时进行参考。我们建议使用 2 层及以上的电路板，并在电极周围放置具有交叉影线 GND 图案的屏蔽保护，抑制由于周围环境和噪声因素引起的寄生电容波动。此外，我们还建议采用 ESD 对策，具体做法是屏蔽带有 GND 平面图案的电路板的外周。此处列出的编号对应每幅图中的编号，不包括编号 8 和 9。稍后将详细描述每个项目。

- ① 电极形状：方形或圆形
- ② 电极尺寸：10 mm 至 15 mm
- ③ 电极间距：电极间应留有足够的距离，以使其不会同时对目标人机接口（在本文档中指的是“手指”）做出反应；建议间距：至少为按键大小的 0.8 倍
- ④ 线宽：约 0.15 mm 至 0.20 mm，用于印刷电路板
- ⑤ 导线长度：尽量缩短导线。在拐角处形成 45 度角，而非直角。
- ⑥ 导线间距：
  - (A) 尽可能留出较宽的间距，防止相邻电极产生误检测。
  - (B) 1.27 mm 中心距
- ⑦ 交叉影线 GND 图案宽度：5 mm
- ⑧ 交叉影线 GND 图案和按键/导线间距
  - (A) 电极周围区域：5 mm (B) 导线周围区域：至少 3 mm
 使用交叉影线图案覆盖电极区域，以及导线和正对表面。空白区域同样放置交叉影线图案，并通过导孔连接具有交叉影线图案的两个表面。  
有关交叉影线图案尺寸、有源屏蔽（仅限 CTSU2）和其他抗噪对策的信息，请参见“2.5 抗噪布局图案设计”一节。
- ⑨ 电极 + 导线电容：不超过 50 pF
- ⑩ 电极 + 导线电阻：不超过 2 k $\Omega$ （含参考值为 560 $\Omega$  的阻尼电阻）

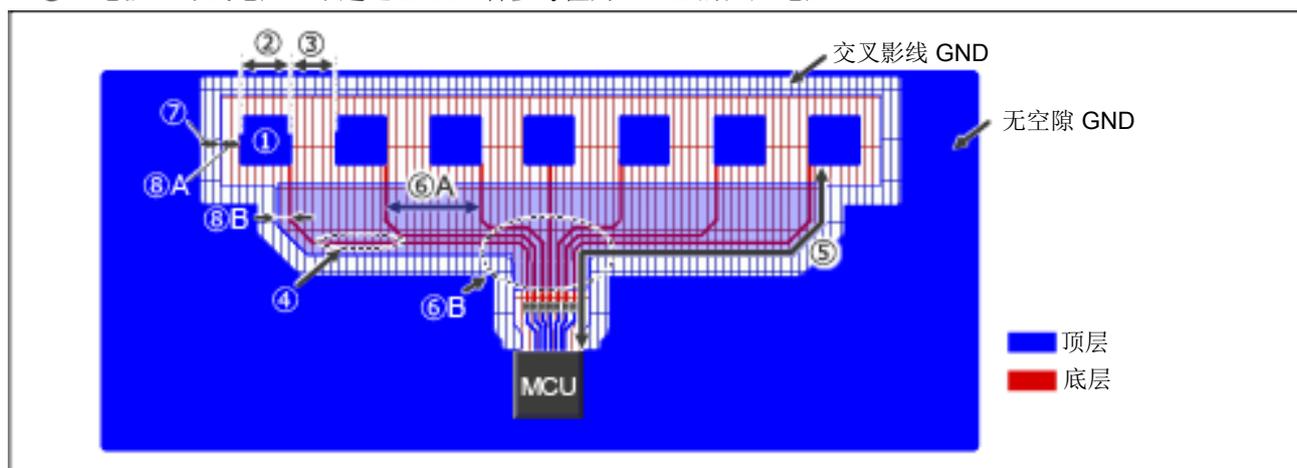


图 2-1. 自电容式按键的抗噪布局图案示例

## 2.2 自电容方式概述

图 2-2 所示为电极中产生的自电容。自电容式按键中连接到电容传感器的单个电极将测量电容量  $C$ 。 $C$  的值是由电极及其周围导体形成的寄生电容  $C_p$  和由电极及手指形成的寄生电容  $C_f$  的复合值。电容的大小可以通过电容方程式  $C = \epsilon \frac{S}{d}$  计算（参见注意部分）。由于周围的器件是静态的，因此  $C_p$  是常量，但  $C_f$  会随着手指的靠近而增加。通过设置  $C_f$  增加量的阈值，可以确定触摸按键是处于“打开”还是“关闭”状态。请注意，如果手指直接接触电极，则会导致电极短路，并且无法再测量电容。通常，电极和手指之间有几毫米厚的覆盖面板。

注意： $C$ ：电容， $\epsilon$ ：相对介电常数， $S$ ：电极的正对面积， $d$ ：电极间距

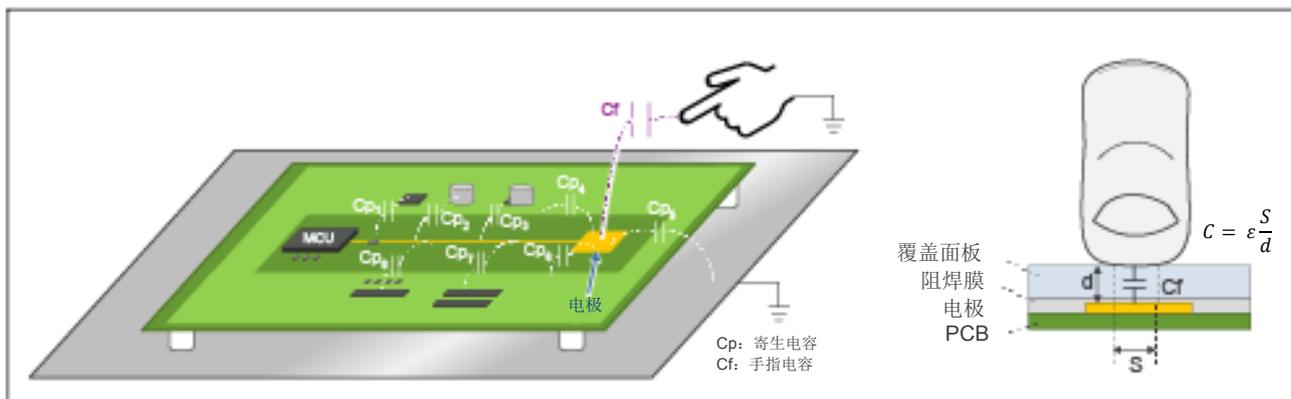


图 2-2. 电极中产生的自电容示意图

### 2.3 CTSU 自电容方式检测原理

图 2-3 所示为自电容方式的 CTSU 内部配置概览。CTSU 输出一个与所连接电极的电容量  $C$  成正比的数字计数值，并通过软件确定触摸按键是处于“打开”还是“关闭”状态。连接到 CTSU 时，电极会充当由传感器驱动脉冲控制的开关电容，并从充放电电流来估测  $C$  的电容。CTSU 测量模块具有电流-频率转换功能，输入与充放电电流等效的电流，并输出与电流量成比例的频率。有关检测原理的详细信息，请参见应用笔记“RX113 系列 CTSU 电容式触摸检测基础”。

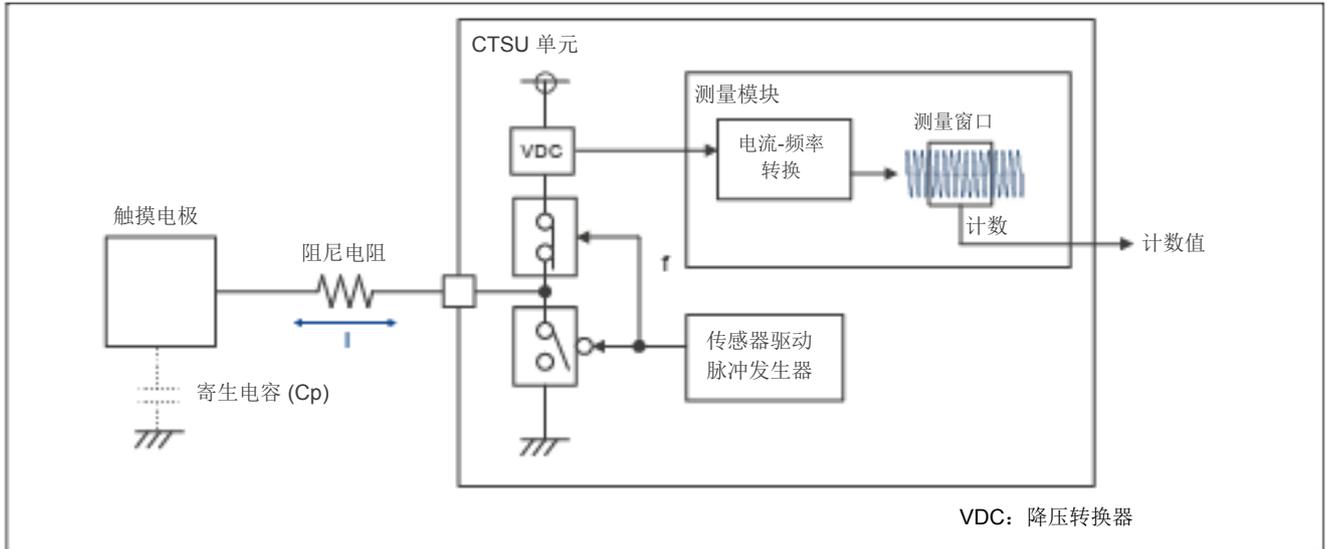


图 2-3. 自电容 CTSU 内部配置概览

图 2-4 所示为 CTSU 测量结果的示意图。当传感器驱动脉冲频率的一个周期比  $C$  充放电时间短且充放电不足时，则没有足够的电流流向  $C$ ，因此计数值小于理想值。当寄生电容很大时，可以通过降低传感器驱动脉冲频率来进行测量。当传感器驱动脉冲频率降低时，CTSU 可测量的最大值为  $50\text{pF}$ 。请注意，当传感器驱动脉冲频率降低时，电流-频率转换功能在单位时间内的测量次数也会减少，电极的灵敏度也可能会降低。可以通过调整 CTSU 中的寄存器设定值来增加单位时间，但完成测量所需的时间也会增加。在设计电容式电极电路时，必须满足按键灵敏度、测量时间和抗噪性等条件。

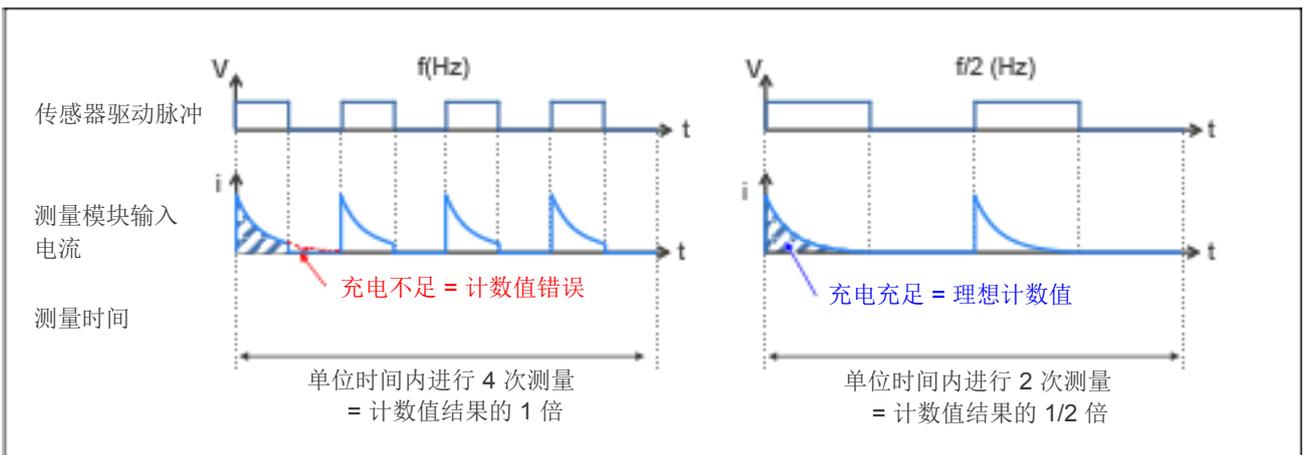


图 2-4. CTSU 测量结果示意图

图 2-5 所示为 GND 图案和寄生电容的示意图。使用印刷电路板时，一般的抗噪对策是在导线图案的正下方放置 GND 平面图案。在自电容按键中，由电极和 GND 平面图案产生的寄生电容  $C_{pGND}$  远大于  $C_f$ ，超出了 CTSU 的测量范围。因此，在设计自电容按键时，切勿在电极正下方放置 GND 平面图案。如果需要抗噪对策，请使用交叉影线 GND 图案以减少寄生电容的增加。

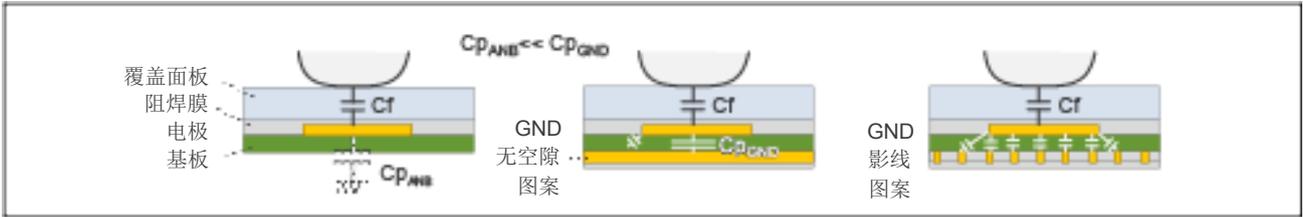


图 2-5. GND 图案和寄生电容的示意图

## 2.4 电极图案设计

在设计自电容式触摸按键电路时，应设计合适的图案并选择合适的材料以满足以下条件。

- 静电容量 C: 不超过 50 pF
- 电阻值 R: 不超过 2 kΩ (含阻尼电阻)

图 2-6 所示为自电容式电极电路。该触摸按键电路配置由触摸电极、电极导线和阻尼电阻构成。CTSU 阻尼电阻的参考值为 560Ω。请注意，触摸按键电路 C 也受电路板周围物体（例如 GND 图案、覆盖面板和主体外壳）的寄生电容的影响。使用上述设计值以外的值时，可能无法获得正常的测量值。可以使用瑞萨的 QE for Capacitive Touch 软件工具来确认每个电极的总容量值。

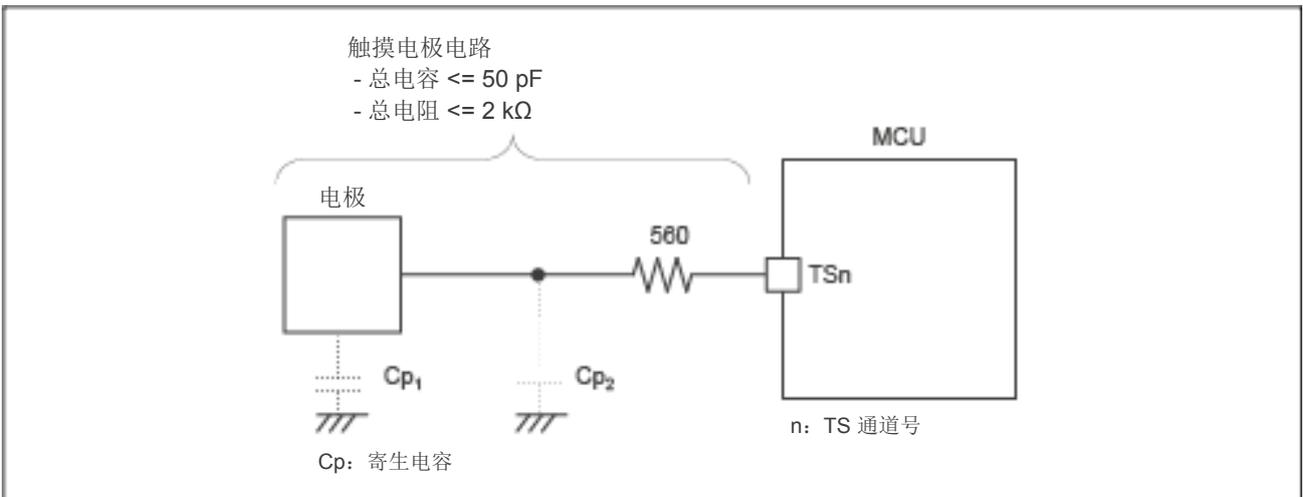


图 2-6. 自电容式电极电路

### 2.4.1 电极焊盘和导线

下文提供了建议的按键电极形状和布线条件。

- 形状：方形或圆形平面图案
- 尺寸：10 x 10 mm 至 15 x 15 mm
- 电极间距：为避免串扰，请留出足够宽的间距以防止相邻电极同时对手指或其他触摸接口做出响应  
目标间隔尺寸：至少为电极按键大小的 0.8 倍
- 电极和 GND 图案之间的间隔：至少 5 mm
- 请勿直接在电极下方放置用于其他功能的导线或图案，也不要放置 GND 平面图案。如果需要使用 GND 图案作为抗噪对策，请放置交叉影线 GND 图案。

串扰是指当目标电极被触摸时，相邻电极之间发生电容耦合或手指与相邻电极之间发生电容耦合。有关更多详细信息，请参见“2.6 面板厚度的影响。”

图 2-7 所示为建议采用的电极形状和尺寸。尺寸和形状十分灵活，可以根据最终产品面板的按键设计来确定。确保相对于将操作产品的人体部位（手指等）而言，尺寸不会过大或过小。如果焊盘是方形的，则将电极的拐角处理成半径为 0.5 至 1.0 mm 的圆角来减少噪声的影响。

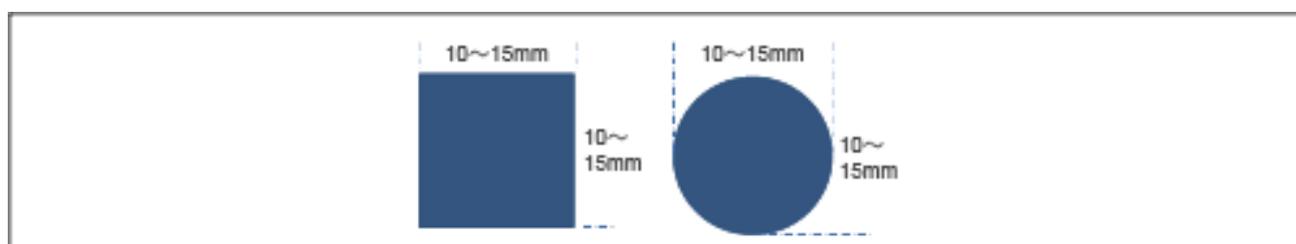


图 2-7. 建议采用的电极形状和尺寸

图 2-8 所示为不建议采用的电极形状 - 直角或锐角三角形和线宽较窄且总长度较长的 E 形。这些形状容易产生天线效应，并会降低射频抗噪性能，因此不建议使用。



图 2-8. 不合适的电极形状

## 2.4.2 导线

电极的导线部分寄生电容很小，容易受到外界噪声的影响。适当的导线间距和 GND 图案可以提高抗噪性。此外，CTSU 还起到屏蔽的作用，因为除了在测量期间外，TS 端子和导线固定在 GND 电平。由于耦合电容随导线的宽度和长度而变化，因此需调整导线间距和导线与 GND 图案之间的间距，以满足总寄生电容的条件。

下方列出了建议采用的导线布局和尺寸。

- 线宽：0.15 mm（可量产的最细导线）
- 导线间距：1.27 mm 中心距  
但是，在电极焊盘周围（大约是电极焊盘长度的两倍）之间至少留出 5 mm 导线间距，如果可能的话，留出更大的距离
- 导线和交叉影线 GND 图案间距：1.27mm（1.27mm 中心距）
- 导线和 GND 图案间距：至少 3 mm

同时，确保设计满足以下布线要求。

- 尽可能缩短导线。
- 尽量减少布线中的拐角；使拐角成 45 度或圆角。
- 在电极焊盘边缘打孔，并在背面布线。这有助于在接触导线时减少故障。但是，应尽量减少过孔的数量，因为它们往往会增加寄生电容。
- 作为抗噪对策，可在电极和导线的正下方放置交叉影线 GND 图案。
- 从电极延伸出来的导线容易受到噪声的影响，因为导线正下方没有交叉影线 GND 图案。交叉影线 GND 与该部分的最短距离为 0.5 mm。
- 请勿将其他不用于触摸功能的导线直接放置在电极导线的正下方。如果必须这样做，请使用正交交叉走线并减少正对面积。

图 2-9 所示为双层板布局示例的导线区域示例。

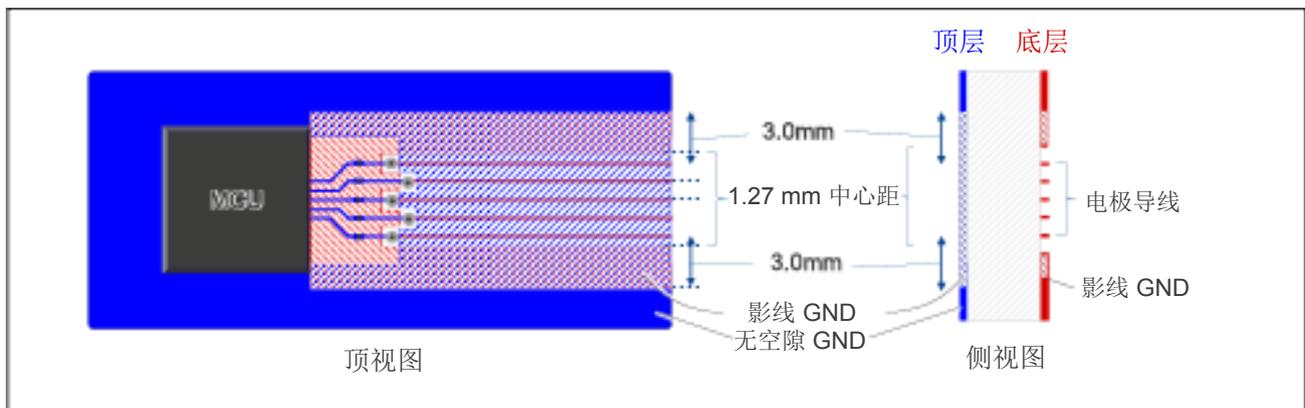


图 2-9. 双层板布局示例（导线区域）

图 2-10 所示为采用双层板布局的电极区域示例。

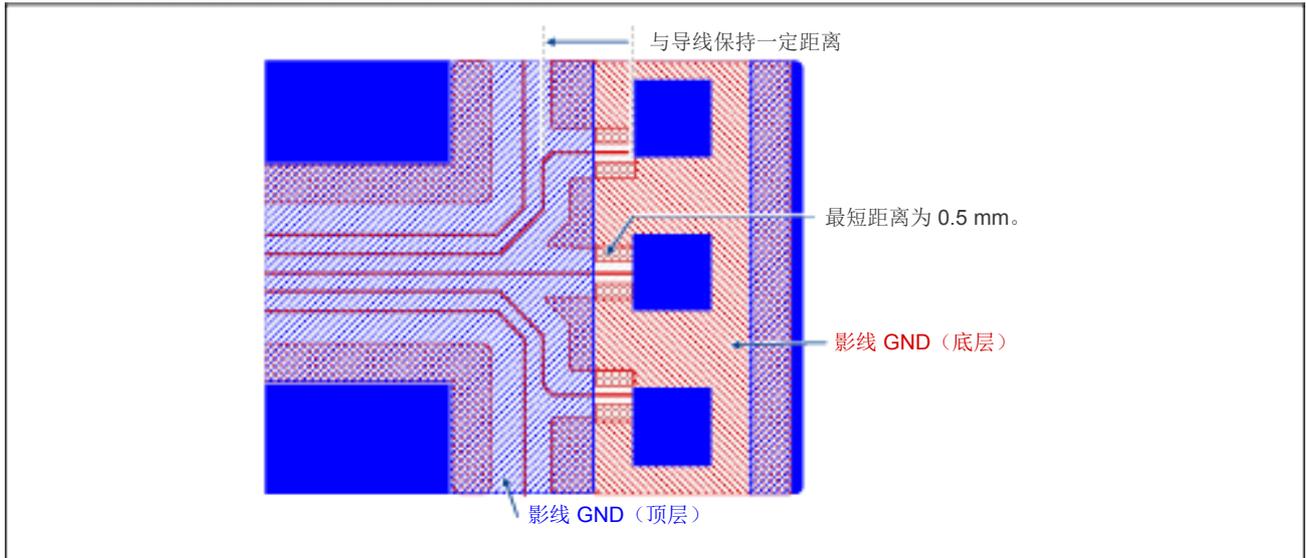


图 2-10. 双层板布局示例（电极区域）

图 2-11 和图 2-12 所示为每层的布局示例。

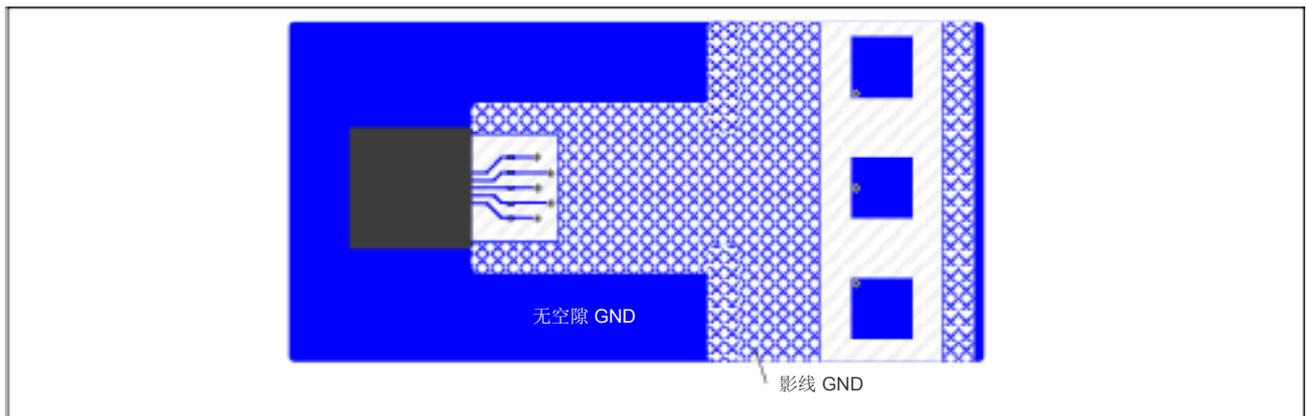


图 2-11. 顶层布局示例

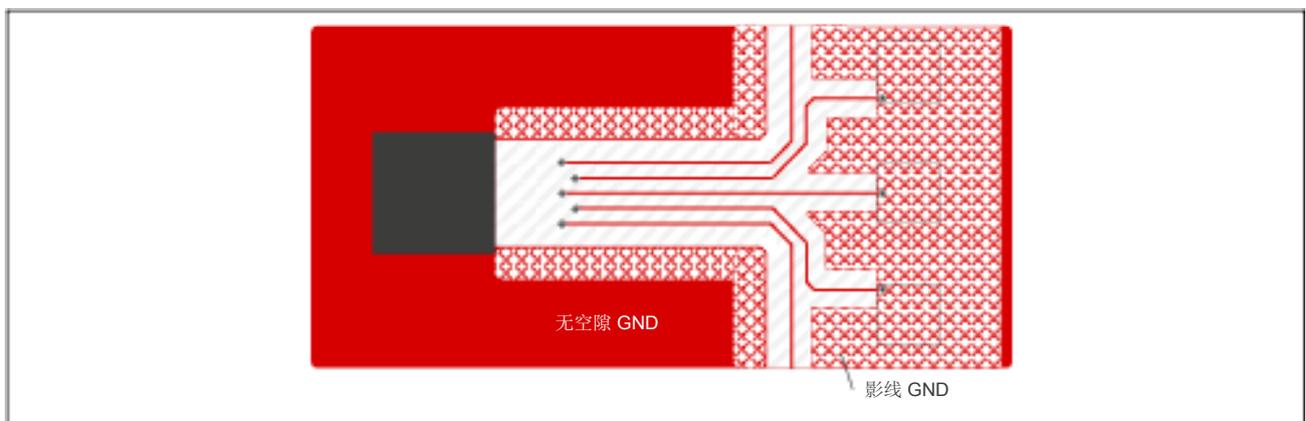


图 2-12. 底层布局示例

图 2-13 所示为高密度布线的示例。当电路板大小有限且需要增加布线密度时，请将导线移动一半的中心距，并在电路板的两面进行布线。对于 4 层板，确保在内层上放置交叉影线 GND。

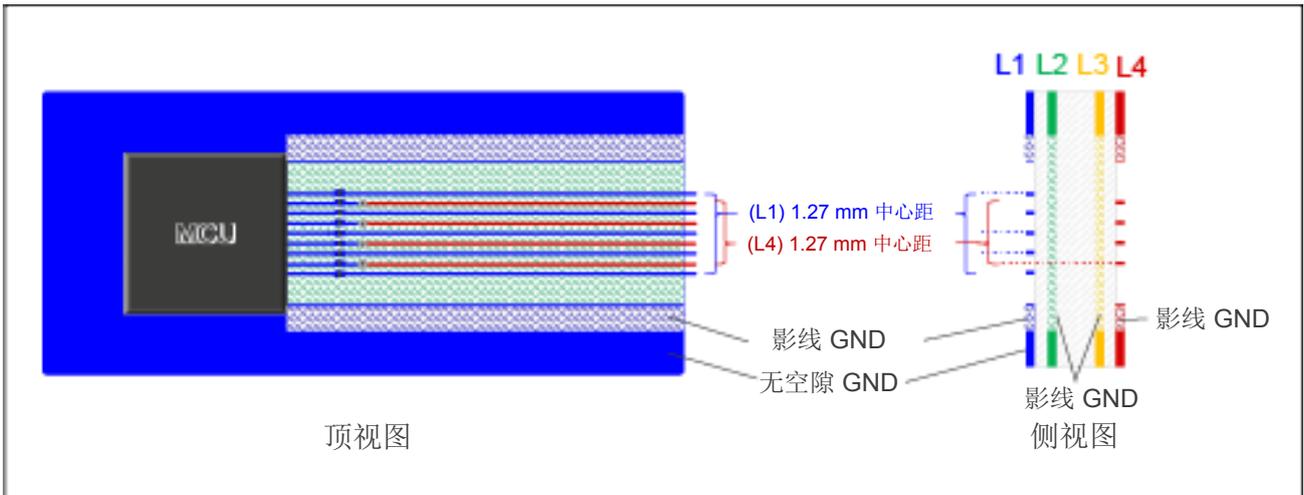


图 2-13. 高密度布线

## 2.5 抗噪布局图案设计

电极电路配置会使电路产生天线效应（MCU 引脚仅在电容耦合时处于开路状态），并使其容易受到电磁场噪声的影响。瑞萨触摸 MCU 采用多种抗噪对策来确保高抗噪性。然而，仅靠 MCU 并不能防止所有噪声的影响。在噪声严重的环境中使用 MCU 时，硬件对策必不可少。以下几个示例说明了如何保护系统免受外部噪声的影响。

一般来说，导线越长，噪声与许多噪声频率同步和混合的可能性就越大。确保按键电极和触摸 MCU 之间的导线尽可能短。

防止因外部噪声而导致故障的最佳方法是对触摸按键周围进行屏蔽保护。CTSU2 支持有源屏蔽。

### 2.5.1 屏蔽保护对策

#### 2.5.1.1 图案设计

图 2-14 所示为交叉影线图案的尺寸。屏蔽电极和电极导线是一种有效的抗 EMS 噪声对策。屏蔽保护层可以放置在多层板上的电极或电极导线的正下方，但 GND 平面图案具有很大的耦合容量，这将使电极在受到触摸时无法检测到电容波动。因此，应使用具有交叉影线图案的屏蔽保护层。瑞萨电容式触摸评估系统采用了下图尺寸的交叉影线图案。此外，交叉影线图案根据导线方向倾斜 45 度，以减少与电极导线的电容耦合。

- 中心距：1.5 mm
- 线宽：0.15 mm
- 线路间距：1.35 mm

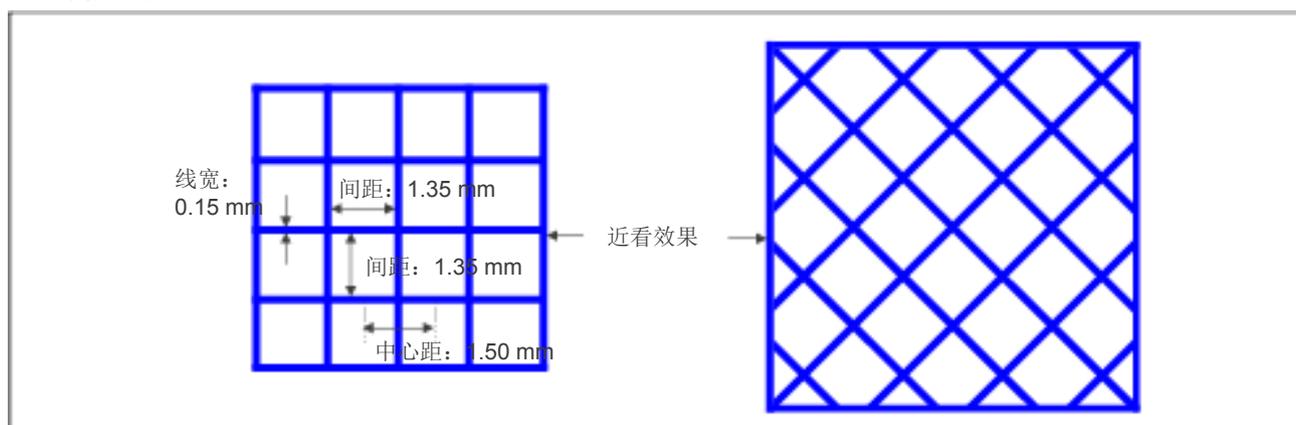


图 2-14. 交叉影线图案尺寸

### 2.5.1.2 GND 屏蔽

在电极和电极导线周围放置 GND 图案会产生电容耦合，这会抑制由于外部噪声影响引起的电位波动。请注意，如果 GND 屏蔽离电极太近，则会导致寄生电容增加过多，这可能会阻碍触摸检测。当由于环境噪声严重而需要靠近屏蔽时，我们建议使用可减少电容耦合的影线形状。此外，必须平行走线的线路越长，寄生电容增加得越多。因此，可能需要调整导线和屏蔽之间的距离。

下面是顶层建议采用的形状和布线条件。这些建议假设电极焊盘放置在顶层。

- 电极与交叉影线 GND 屏蔽之间的距离：5 mm
- 交叉影线 GND 屏蔽的宽度：不超过 5 mm
- 确保连接交叉影线 GND 图案和 GND 平面。
- 用交叉影线 GND 图案覆盖电极和导线正下方的区域。

图 2-15 和图 2-16 所示为多层板的 GND 屏蔽图案示例。

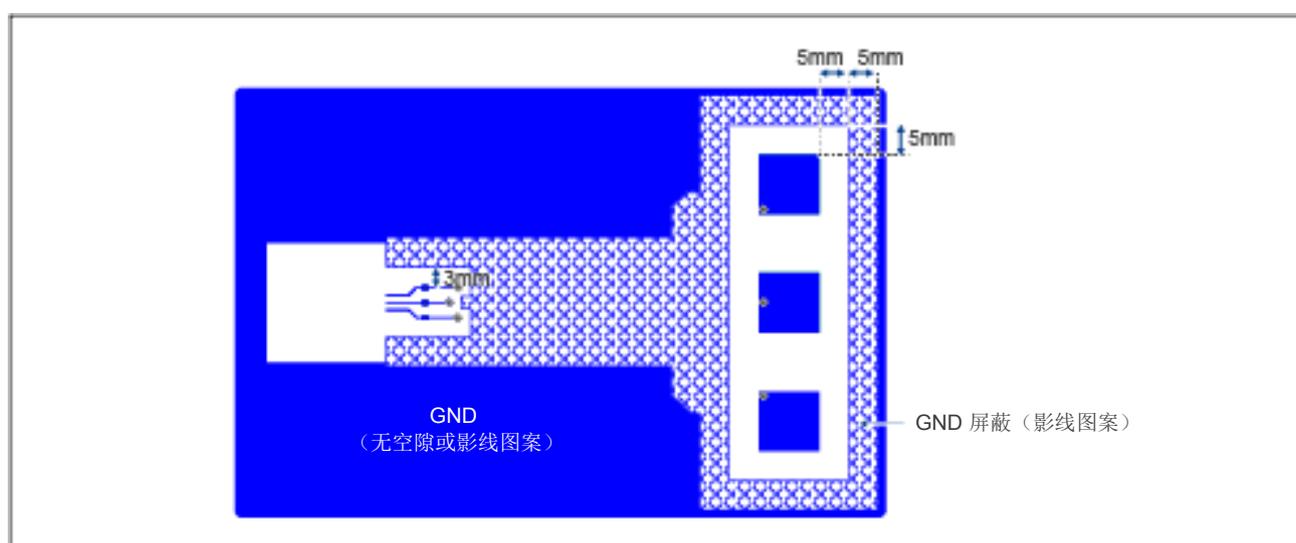


图 2-15. 多层板（顶层）的 GND 屏蔽图案示例

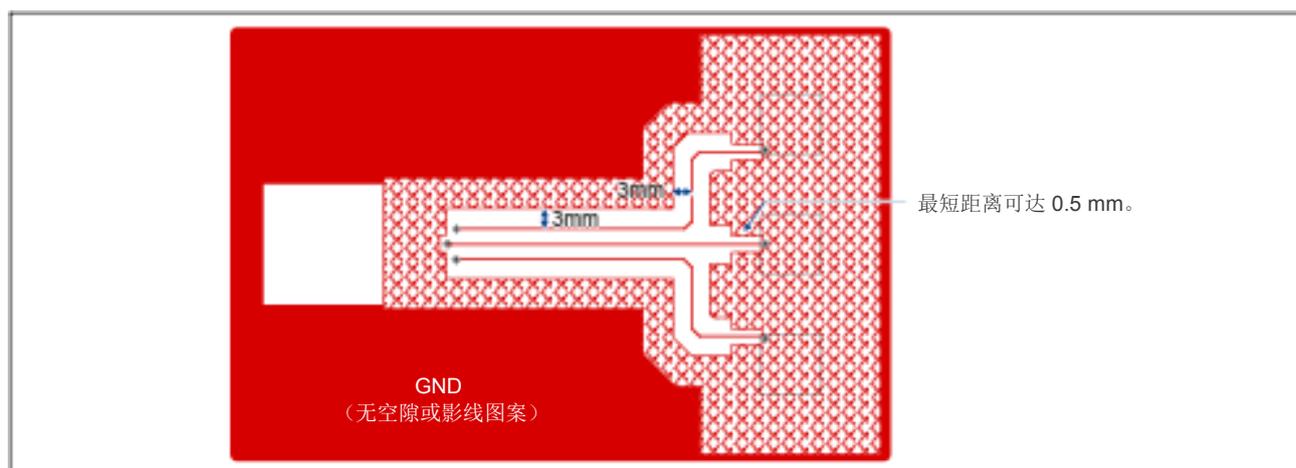


图 2-16. 多层板（底层）的 GND 屏蔽图案示例

### 2.5.1.3 有源屏蔽（CTS U2 功能）

此功能仅面向内置 CTSU2 的 MCU。

有源屏蔽功能使用与电极具有相同电位和相位的信号来驱动屏蔽保护层。使用有源屏蔽将会减少电极和屏蔽保护层之间的电容耦合，并减少噪声干扰。有源屏蔽由开关电容驱动，驱动方式与普通电极相同。需要注意的是，若寄生电容较大，则无法驱动有源屏蔽，因为这会导致与电极发生相移，从而无法获得有效的结果。

图 2-17 所示为屏蔽电极电路的示例。有源屏蔽可以看作是连接到 TS 端子的按键电极。屏蔽电极电路的设计方式与普通电极相同，但必须格外注意尺寸和图案设计。由于该屏蔽是用来覆盖电极的，因此电极数量越多，屏蔽电极的寄生电容就越大，从而导致开关电容充放电不足。降低阻尼电阻值可能有助于改善这个问题。如果电极和有源屏蔽的电容差异很大，还可以考虑细分按键和有源屏蔽分组。QE for Capacitive Touch 工具最多支持 8 个分组（配置）。有关配置的详细信息，请参见 QE for Capacitive Touch 帮助文件。

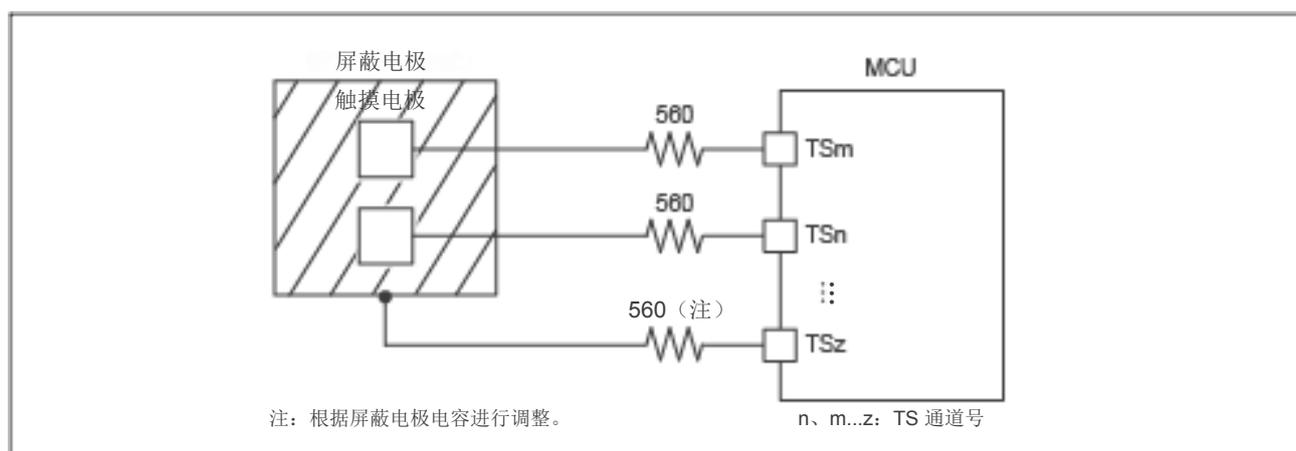


图 2-17. 屏蔽电极电路

下面是建议采用的有源屏蔽形状和布线条件。这些建议假设电极焊盘放置在顶层。

- 触摸电极与有源屏蔽电极之间的距离：3 mm
- 有源屏蔽电极的宽度：3 mm
- 有源屏蔽电极与 GND 平面图案之间的距离：至少 3 mm
- 使用有源屏蔽电极覆盖电极和导线正下方的所有区域。

图 2-18 和图 2-19 所示为多层板的有源屏蔽图案示例。

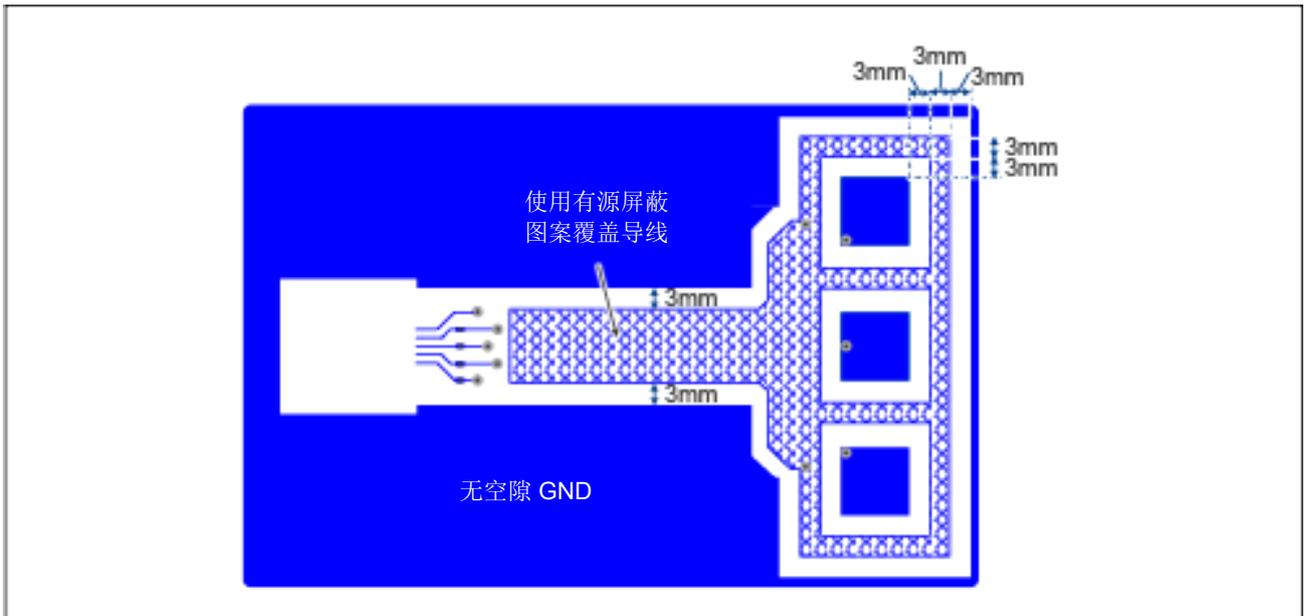


图 2-18. 多层板（顶层）的有源屏蔽图案示例

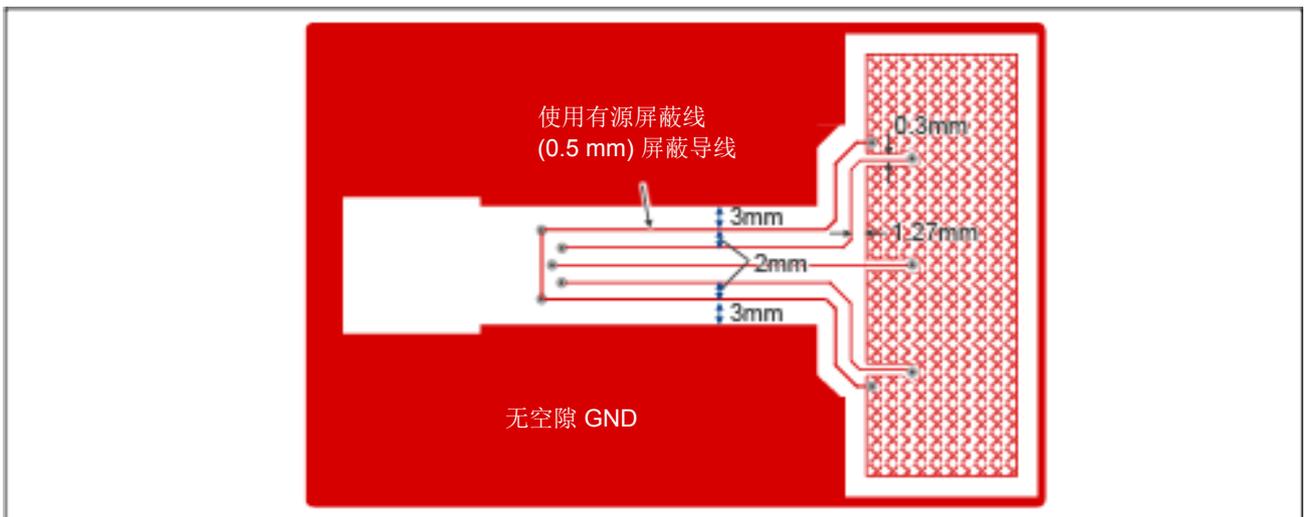


图 2-19. 多层板（底层）的有源屏蔽图案示例

## 2.6 面板厚度的影响

自电容方式可检测人体与按键电极接触时产生的电容。因此，在这种触摸检测中，按键电极的触摸面积越大，手指或身体其他部位与电极的距离越长，灵敏度越高。由于按键电极触摸表面的最大尺寸是有限的（10 mm 到 15 mm），因此距离或面板厚度是调节灵敏度的关键因素。

### 2.6.1 面板厚度与触摸灵敏度的关系

图 2-20 所示为自电容方式中电容变化量和灵敏度距离的关系。在这种方式中，电容随着手指和电极之间距离的变化增加或减少，从而支持在较大的范围（距离）内进行触摸检测。然而，这也意味着如果阈值的余量与电容相比范围较大，则触摸检测可能在手指实际接触面板之前发生。触摸时电容可能会增加或减少，具体取决于面板材料的相对介电常数。即使在相同的触摸距离下，相对介电常数高的材料也可能超出 CTSU 测量范围，请务必牢记这一点。

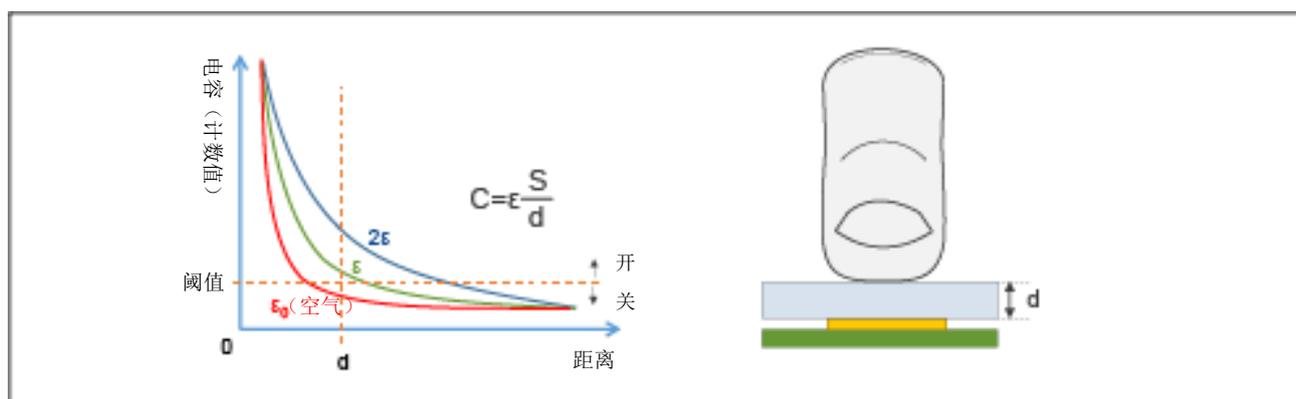


图 2-20. 电容变化与灵敏度距离的关系

表 2-1. 每种材料的相对介电常数

介电材料	$\epsilon$
亚克力	2.4-4.5
玻璃	4.5-7.5
尼龙塑料	3.0-5.0
柔性乙烯基薄膜	3.2
空气	1.0
水	80

### 2.6.2 面板厚度与串扰的关系

图 2-21 所示为自电容方式中电极间距和面板厚度的关系。如果按键电极放置得太近，则可能会导致相邻按键电极错误地动作（图中左侧）。为防止误检测（串扰），在相邻按键电极之间，建议的按键电极之间的距离为按键尺寸的 0.8 倍。

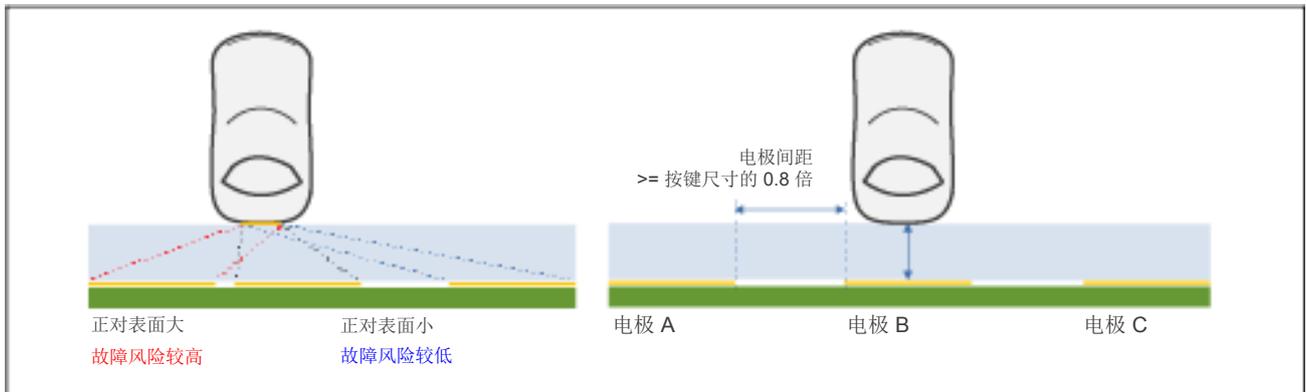


图 2-21. 自电容方式中电极间距和覆盖面板厚度的关系

## 2.7 电极应用示例

### 2.7.1 滑块电极布局图案设计示例

图 2-22 所示为建议用于自电容方式的滑块电极图案。此图案专为手指触摸而设计，可确保当触摸到滑块两端以外的任何位置时，3 个电极均会响应。要更改滑块的大小，必须通过添加或移除电极而不是扩大或缩小图案来进行调整。

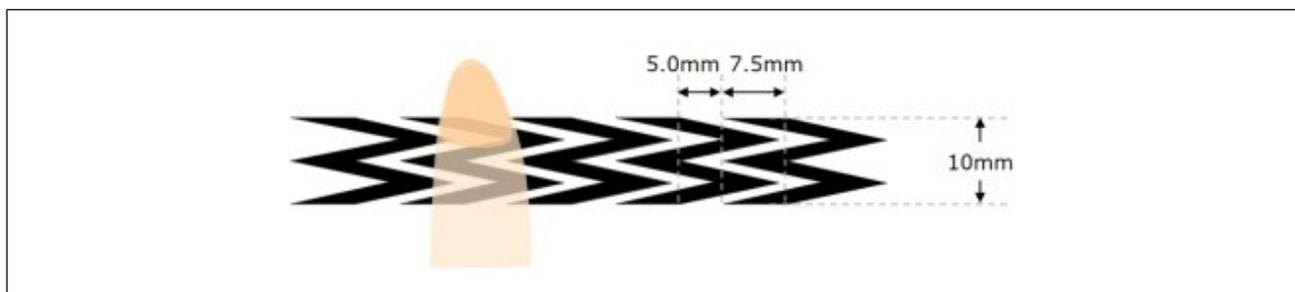


图 2-22. 建议用于自电容方式的滑块电极图案

### 2.7.2 轮状布局图案设计示例

图 2-23 所示为建议用于自电容方式的电极图案。此图案专为手指触摸而设计，可确保无论触摸轮的哪个位置，3 个电极均会响应。要更改轮的大小，必须通过添加或移除电极而不是扩大或缩小图案来进行调整。

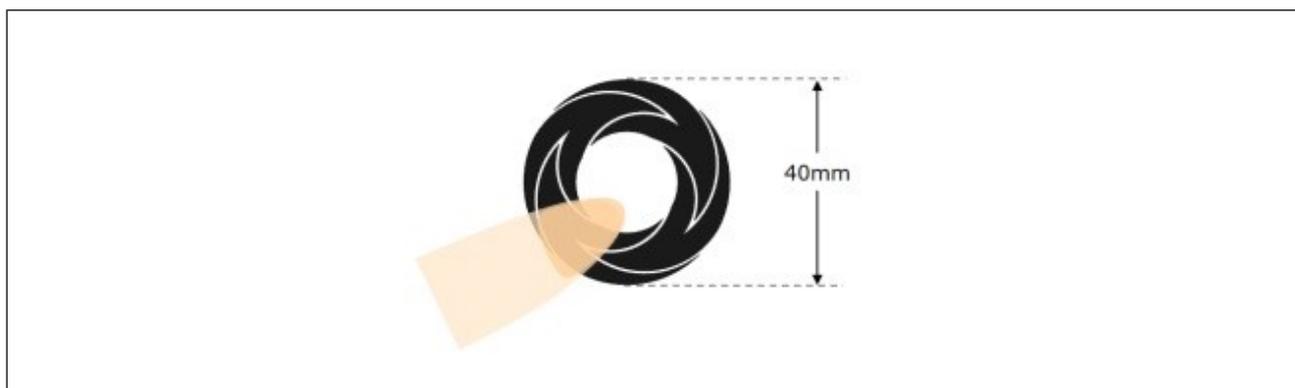


图 2-23. 建议用于自电容方式的轮状电极图案

### 2.7.3 柔性印刷电路板

尽管任何导电材料均可用于电极，但请注意，表面电阻高的材料（如碳）可能会降低触摸灵敏度。此外，表面电阻高的材料可能不会一直灵敏，具体取决于手指放置的位置。如果必须使用这类材料，请按图 2-24: (b) 或 (c) 所示的布局进行布线，前者使导线尽可能靠近电极的中心，后者用表面电阻低材料包围整个电极，因此无论触摸表面的哪个位置，电阻值都是恒定的。当使用铜或其他表面电阻足够低的材料时，甚至可以从按键电极本身的任何点进行布线，如示例 (a) 所示。

与印刷电路板相比，柔性印刷电路 (FPC) 板上的导线往往更粗，而导线之间的间距更宽。虽然较窄的线宽有助于抑制寄生电容，但电阻值会增加。我们建议基于大约 1.0 mm 的线宽和大约 1.0 mm 的导线间距来设计。

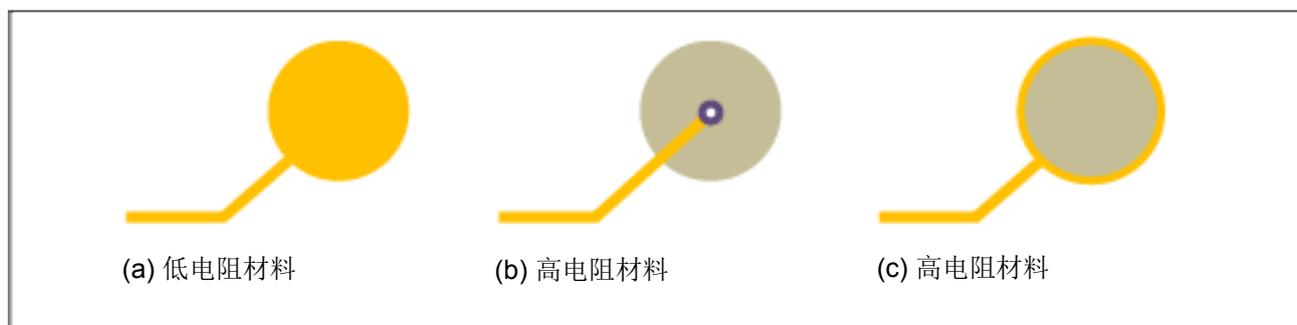


图 2-24. 按键电极布线方式

### 2.7.4 LED 导线布局

#### 2.7.4.1 直接照明示例

图 2-25 所示为自电容方式的电极焊盘和 LED 导线。我们建议在电极焊盘的外边缘周围进行 LED 布线，如图中右侧所示。为减少 LED 电路辐射的噪声，使用 GND 屏蔽覆盖 LED 导线，对于多层板，同样使用 GND 屏蔽覆盖正对表面。

请注意，要在电极焊盘中连接 LED 导线，需要在电极上打孔，从而减少触摸表面积并使 LED 导线靠近电极。由于寄生电容增加，这会增加灵敏度变弱的风险。

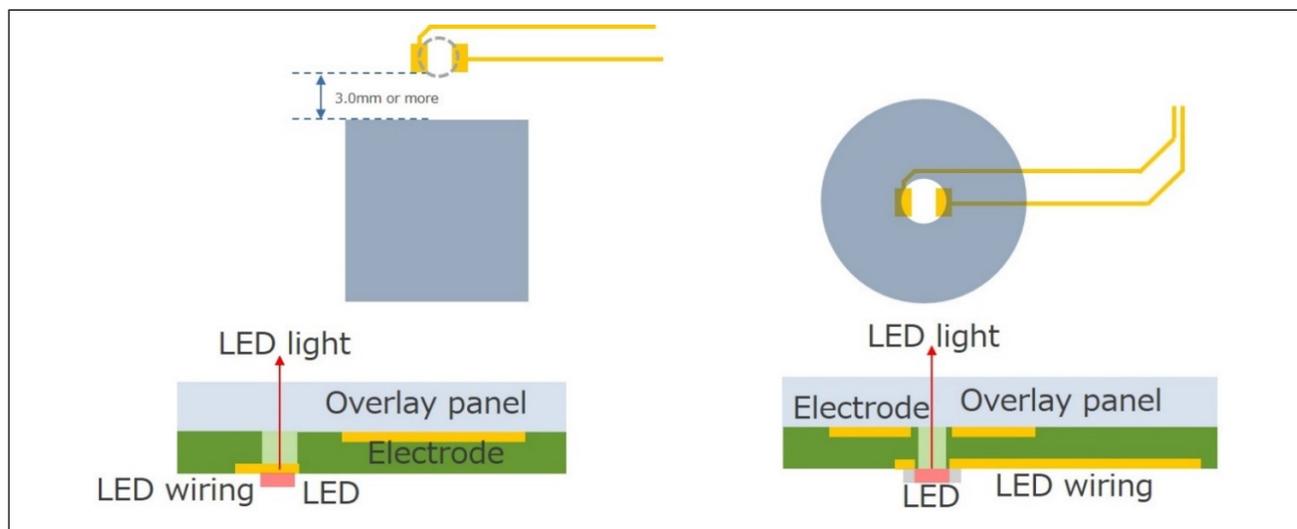


图 2-25. 自电容方式中的电极焊盘和 LED 布线示例

### 2.7.4.2 间接照明（使用导光板）

图 2-26 所示为自电容方式中使用电极焊盘和导光板的 LED 布线示例。LED（光源）必须与发光表面保持一定距离，以确保照明均匀。在正对位置放置多个 LED（光源）有助于消除照明不均匀问题。

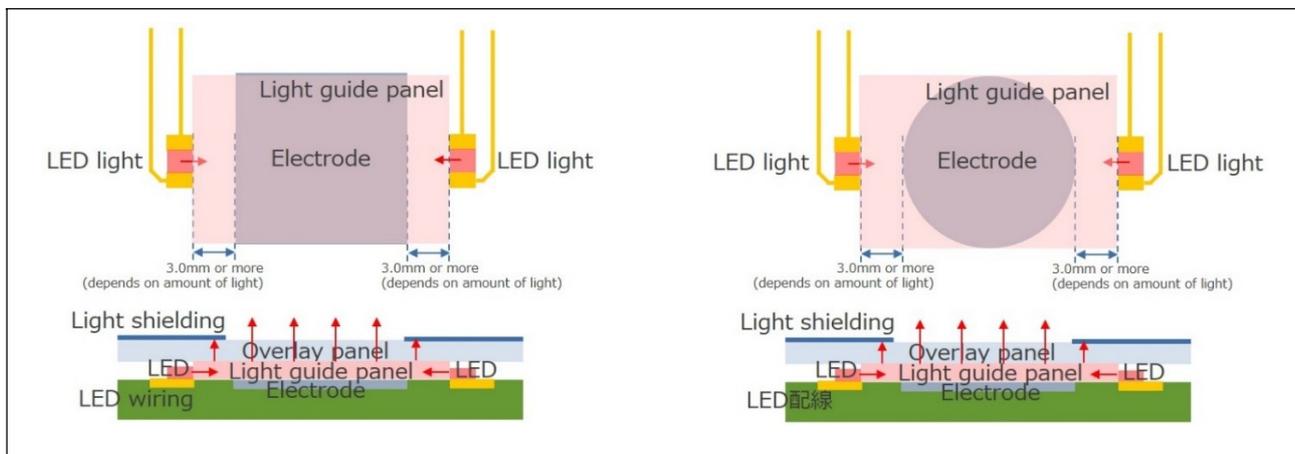


图 2-26. 自电容方式中使用电极焊盘和导光板的 LED 布线示例

### 2.7.5 面板和按键电极分开时

图 2-27 所示为面板和按键电极之间具有一定空间的配置示例。虽然配置取决于按键电极的大小、寄生电容等因素，但如果所有条件均合适，即使面板和电极之间有 2 mm 的气隙，也可以检测到触摸。但是，在处理严格的抗噪要求时，如果气隙大于 2 mm，并且由于其他条件导致触摸检测难以进行，则可能需要将按键电极延伸到面板，如图中右侧所示。

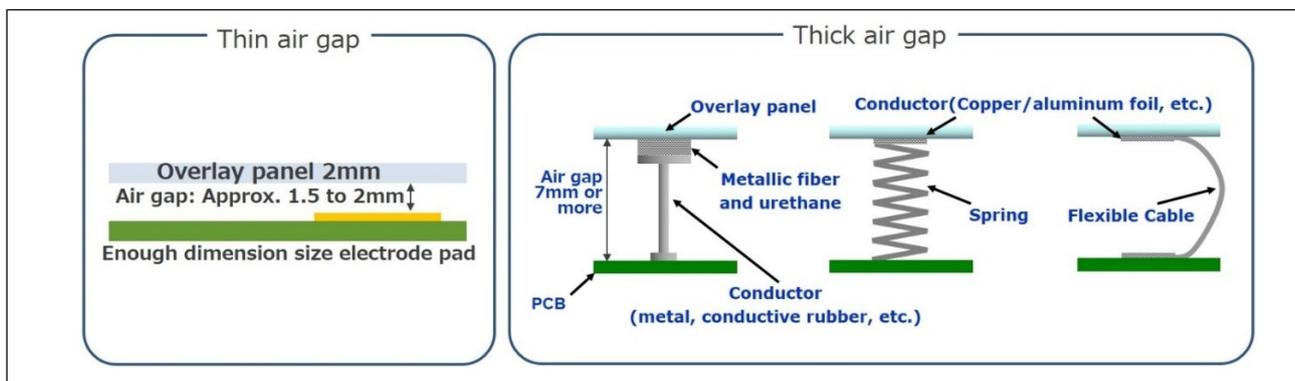


图 2-27. 自电容方式中的气隙测量示例

### 3. 互电容方式：电极布局图案

#### 3.1 概要

互电容方式中的按键电极具有优异的防水性能、支持矩阵结构，以及许多其他自电容所不具备的功能。然而，互电容需要复杂的按键电极配置和布线，使得灵敏度调节难以实现。设计布局图案时，必须考虑每种方式的优缺点。此外，与自电容方式不同，当面板厚度低于指定水平时，灵敏度会降低。在确定面板厚度时，设计人员必须仔细考虑按键电极配置。

对于互电容方式，必须使用至少具有两层的多层板。本章以双层板为例。

### 3.2 设计建议概要

本节提供了关于在印刷电路板上创建互电容式按键的参考设计信息。我们建议在电极周围放置具有交叉影线图案的 GND 屏蔽保护层。此外，我们还建议采用 ESD 对策，具体做法是屏蔽带有 GND 平面图案的电路板的外周。此处列出的编号对应每幅图中的编号，不包括编号 8 和 9。稍后将详细描述每个项目。

- ① 电极形状：方形（发射器电极 TX 和接收器电极 RX 组合）
- ② 电极尺寸：至少 10 mm
- ③ 电极间距：电极间应留有足够的距离，以使其不会同时对触摸物体（手指等）做出反应（建议间距：至少为按键大小的 0.8 倍）
- ④ 线宽：可量产的最细导线；约 0.15 mm 至 0.20 mm，用于印刷电路板
- ⑤ 导线长度：尽量缩短导线。在拐角处形成 45 度角，而非直角。
- ⑥ 导线间距：
  - (A) 尽可能留出较宽的间距，防止相邻电极产生误检测。
  - (B) 电极分离时：1.27 mm 中心距
  - (C) 留出至少 20 mm 的距离以防止在 Tx 和 Rx 之间产生耦合电容。
- ⑦ 交叉影线 GND 图案（屏蔽保护层）距离

由于建议采用的按键图案中的引脚寄生电容相对较小，因此引脚越靠近 GND，寄生电容越大。

A: 电极周围至少 4 mm

我们还建议在电极之间使用约 2 mm 宽的交叉影线 GND 平面图案。

B: 导线周围至少 1.27 mm

- ⑧ Tx、Rx 寄生电容：不超过 20 pF
- ⑨ 电极 + 导线电阻：不超过 2 k $\Omega$ （含参考值为 560 $\Omega$  的阻尼电阻）
- ⑩ 请勿将 GND 图案直接放置在电极或导线下方。

有源屏蔽功能不能用于互电容方式。

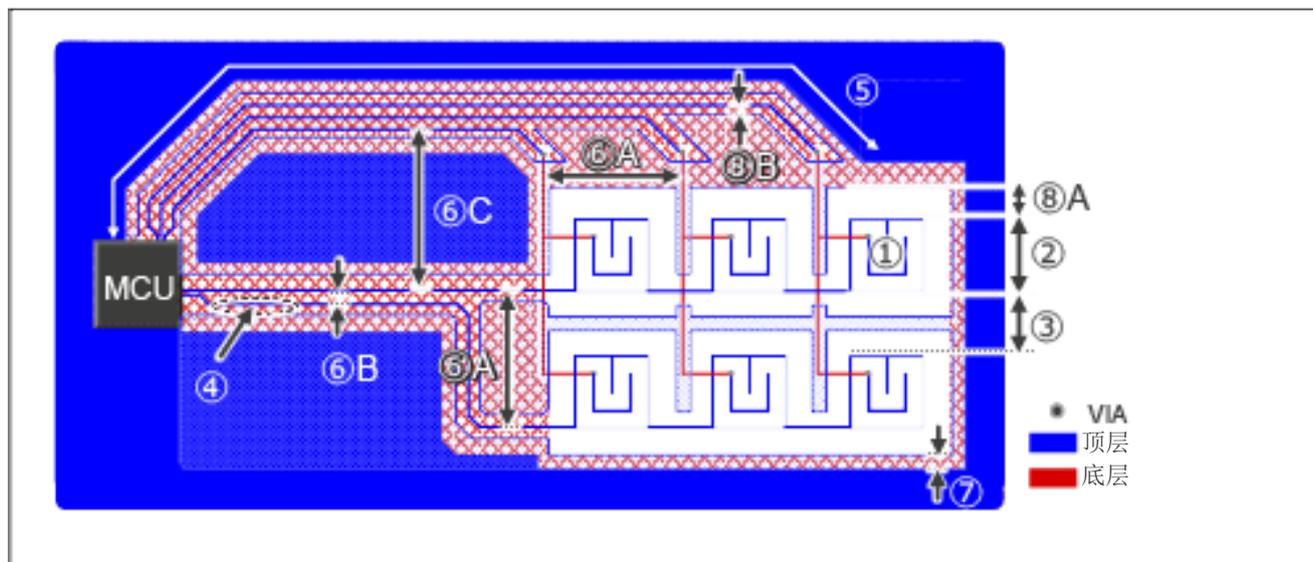


图 3-1. 互电容方式中的按键图案示例

### 3.3 互电容方式概述

图 3-2 所示为电极中产生的互电容。互电容方式的特性是两个不同导体之间会产生寄生电容  $C_m$ 。互电容式按键包括连接到电容传感器的两个电极，即接收器电极 RX 和发射器电极 TX。Tx 受到脉冲驱动时会产生电场，电荷也在  $C_m$  中积累。当手指接近电极时，手指与电极之间会产生寄生电容  $C_f$ ， $C_m$  和  $C_f$  并联。由于 Tx 的驱动能量是恒定的，因此电荷量不会改变。因此， $C_m$  和  $C_f$  上的电荷消除后， $C_m$  电荷也会减少。通过设置  $C_f$  增加量的阈值，可以确定触摸按键是处于“打开”还是“关闭”状态。请注意，如果手指直接接触电极，则会导致电极短路，并且无法再测量电容。通常，电极和手指之间有几毫米厚的覆盖面板。

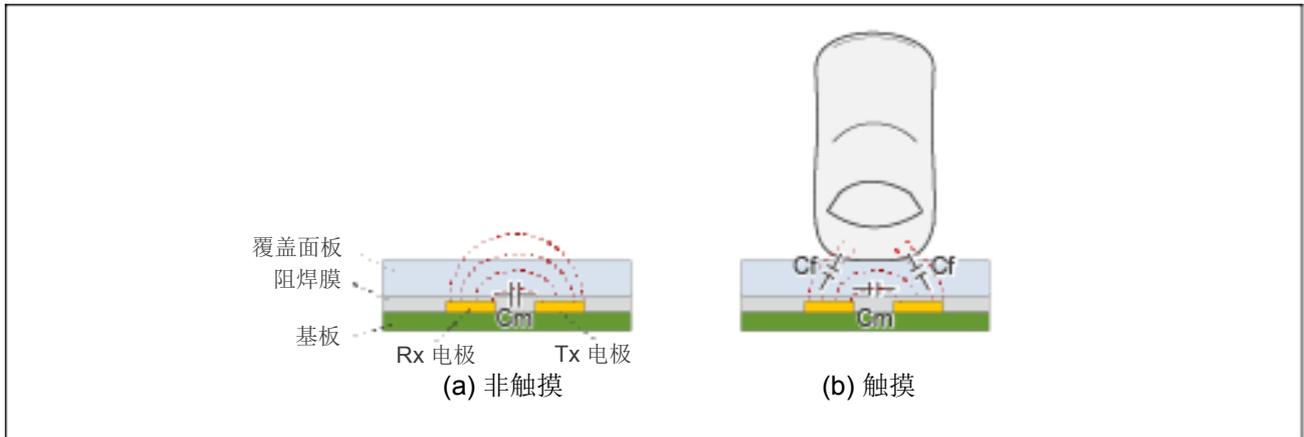


图 3-2. 互电容电极示意图

### 3.4 CTSU 互电容方式检测原理

图 3-3 所示为互电容方式的 CTSU 内部配置概览。CTSU 输出与连接到电极的 Rx 和 Tx 的互电容成反比的数字计数，并通过软件判断触摸按键是处于“打开”还是“关闭”状态。

为测量所连接的两个电极上存在的电容  $C_m$ ，CTSU 通过反转脉冲输出和开关电容之间的相位关系来获得  $C_m$ ，同时测量两次自电容，然后通过软件计算两个值的差值。有关互电容检测原理的更多详细信息，请参见应用笔记“RX113 系列 CTSU 电容式触摸检测基础”。

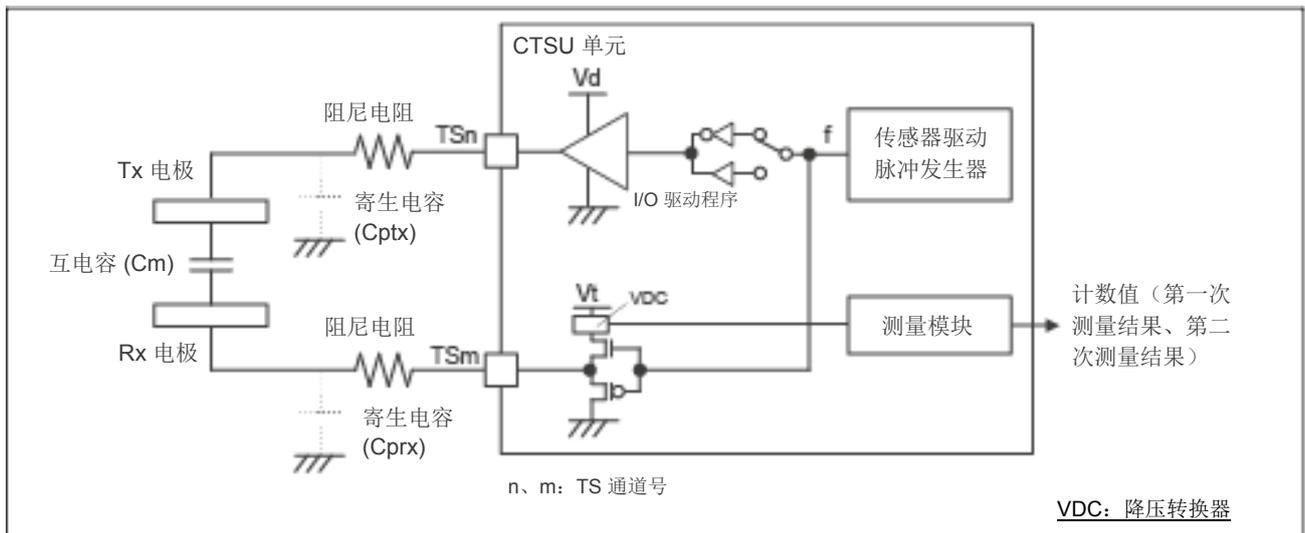


图 3-3. 互电容方式的内部配置概览

### 3.5 电极图案设计

图 3-4 所示为互电容方式的电极电路。互电容式按键电极的配置包括接收电极 (Rx) 和发射电极 (Tx)。在互电容方式中，1 个电极的总电容值应不超过 20 pF，总电阻（包括阻尼电阻）值应不超过 2 kΩ。可以使用 QE for Capacitive Touch 确认每个电极的总容量值。

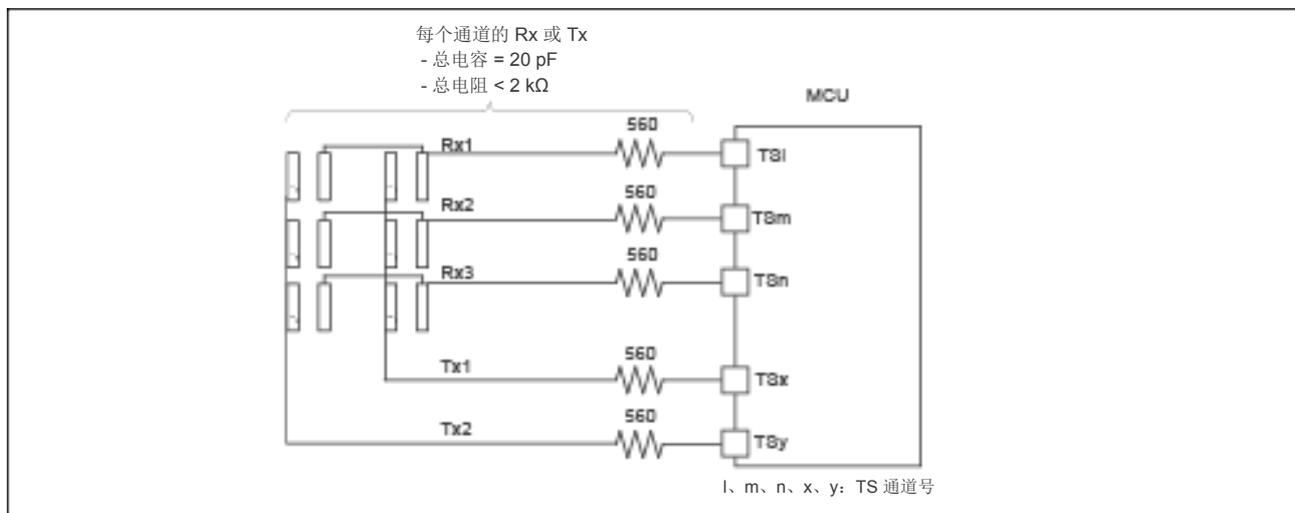


图 3-4. 互电容方式的电极电路

图 3-5 所示为建议用于互电容方式的电极图案。接收电极更容易受到噪声的影响，可通过将 Rx 的侧面与 Tx 的侧面包围来对其进行保护。这种配置会增加 Tx 和 Rx 相对侧之间的距离（在此称为“正对距离”）以及与手指接触的表面积。该图案支持 2 mm 至 3 mm 的覆盖面板厚度。

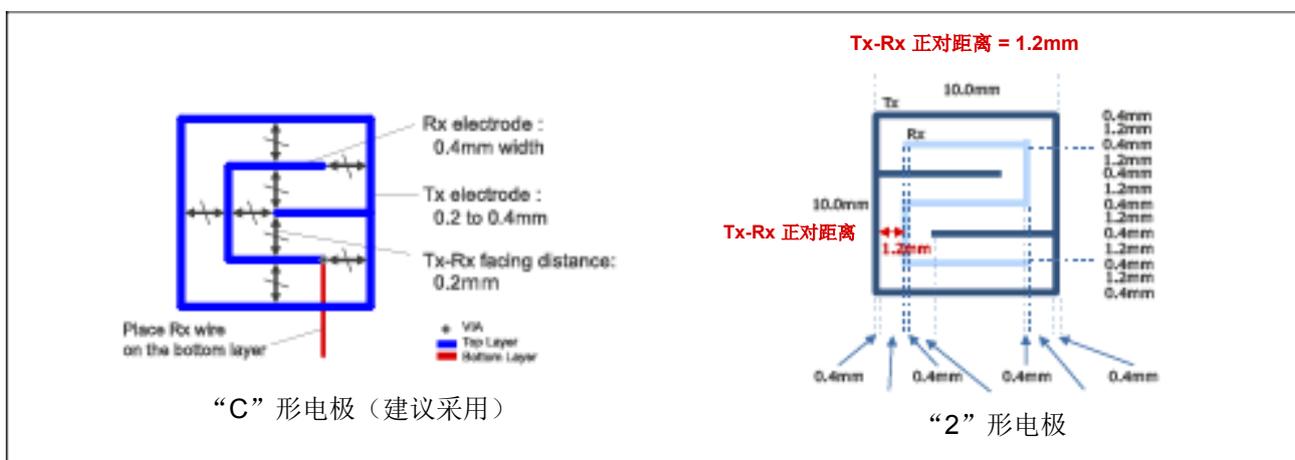


图 3-5. 互电容方式：建议采用的电极图案

互电容式触摸测量可测量 Tx 和 Rx 之间的电磁场（电容耦合），并捕捉电容耦合减小的现象，因为靠近的指尖（即人体的一部分）会吸引部分电磁场。因此，布局图案必须设计为 (1) 尽量增加 Rx 和 Tx 之间的电容耦合，以及 (2) 尽量提高手指靠近时电容耦合降低的速率

图 3-6 所示为互电容式电极的 Tx/Rx 耦合电容电磁场的示意图。使用厚覆盖面板时，需要加大 Tx/Rx 的正对距离。但是，由于大多数产品会限制电极尺寸，因此通常很难增加 Tx/Rx 距离。如图 3-5 所示，可能需要使用 Tx/Rx 距离更短的电极，如 C 形电极，但与 2 形电极相比，C 形电极的 Tx/Rx 距离更短意味着测量值也可能更小。

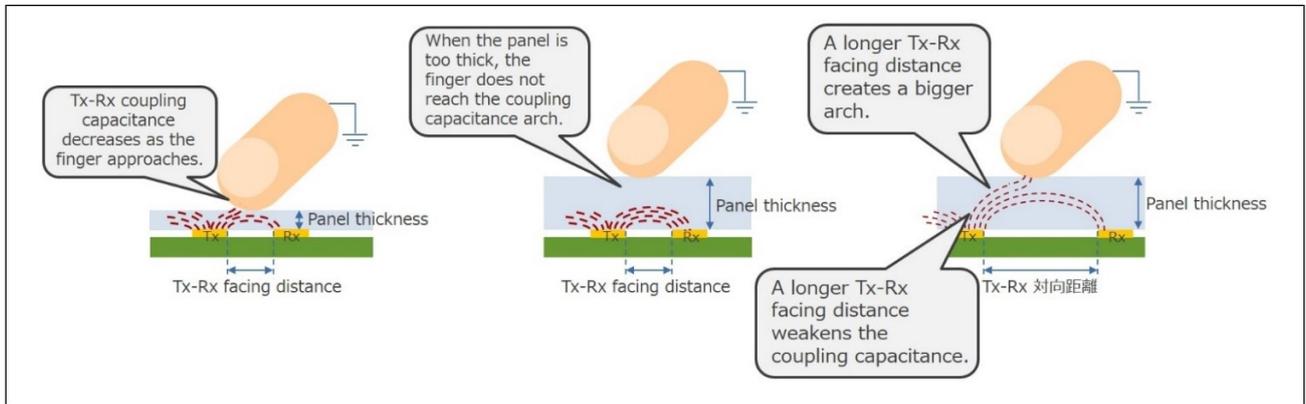


图 3-6. 互电容方式中的电极 Tx-Rx 电容耦合示意图

图 3-7 所示为互电容方式中基于电极焊盘 Tx/Rx 平行走线距离和 Tx/Rx 正对距离的电容耦合示意图。发射电极 Tx 和接收电极 Rx 的平行走线距离越长，Tx/Rx 耦合电容越大，进而导致检测到触摸时测量值的变化越大。当电极焊盘尺寸相同时，Tx/Rx 平行走线距离越长，布局就越复杂。此外，Tx/Rx 正对距离越长，支持的覆盖面板和气隙厚度越大，但会产生更密集的电磁场，从而导致传感器计数减少。

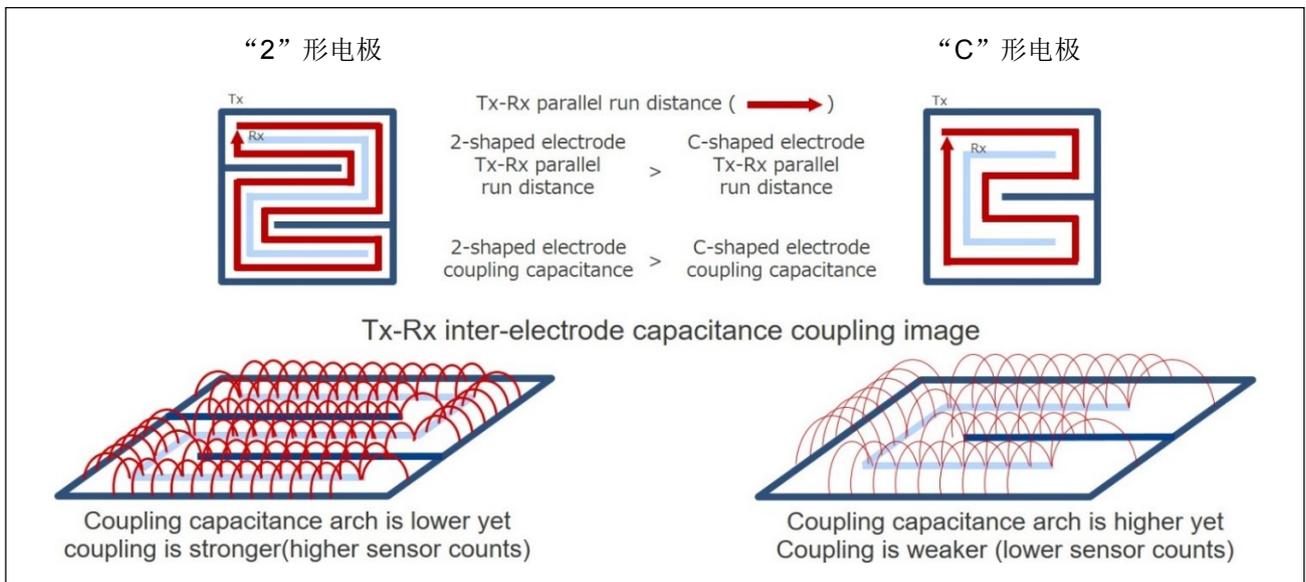


图 3-7. 互电容方式中基于电极 Tx/Rx 平行走线距离和正对距离的电容耦合示意图

### 3.6 气隙

图 3-8 所示为互电容方式中的电极 Tx/Rx 耦合电容电磁场和气隙（包括面板厚度）。在这种方式中，当布局设计包括电极和覆盖面板之间的气隙时，Tx/Rx 正对距离必须尽可能长，与使用厚面板时的方式相同。发射器电极 Tx 和接收器电极 Rx 之间的正对距离取决于面板厚度。建议的 Tx/Rx 正对距离约为面板和气隙厚度的 0.6 倍。

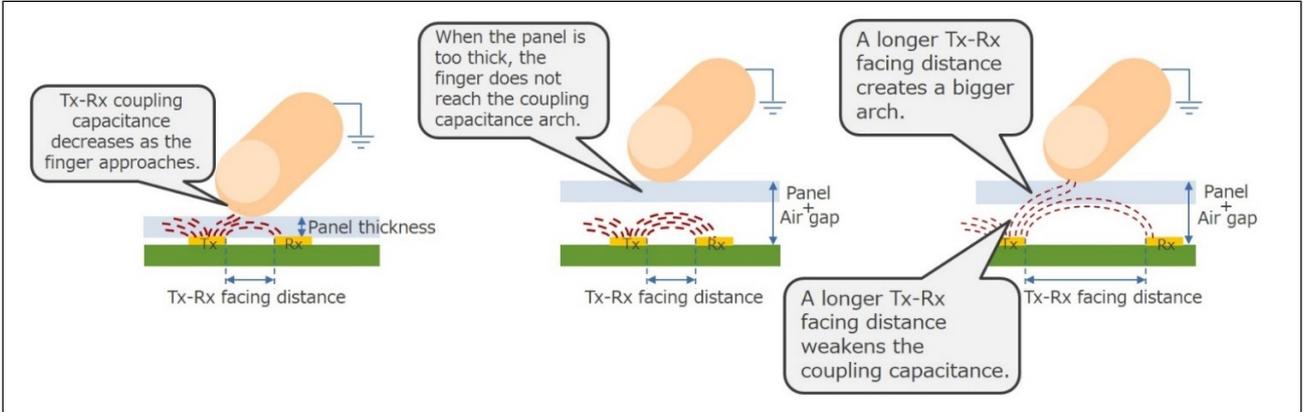


图 3-8. 互电容方式中的 Tx/Rx 耦合电容电磁场和气隙（包括面板厚度）

### 3.7 触摸表面到电极的距离

图 3-9 所示为电容变化量与电极灵敏度之间的关系。在互电容方式中，无论手指（人体）与电极的距离多近或多远，Tx/Rx 耦合电容的减少速率都会降低，因此面板厚度和气隙厚度是设计阶段要牢记的因素。如前文所述，理想的面板厚度（包括气隙）是 Tx/Rx 电极之间距离的 1.7 倍。

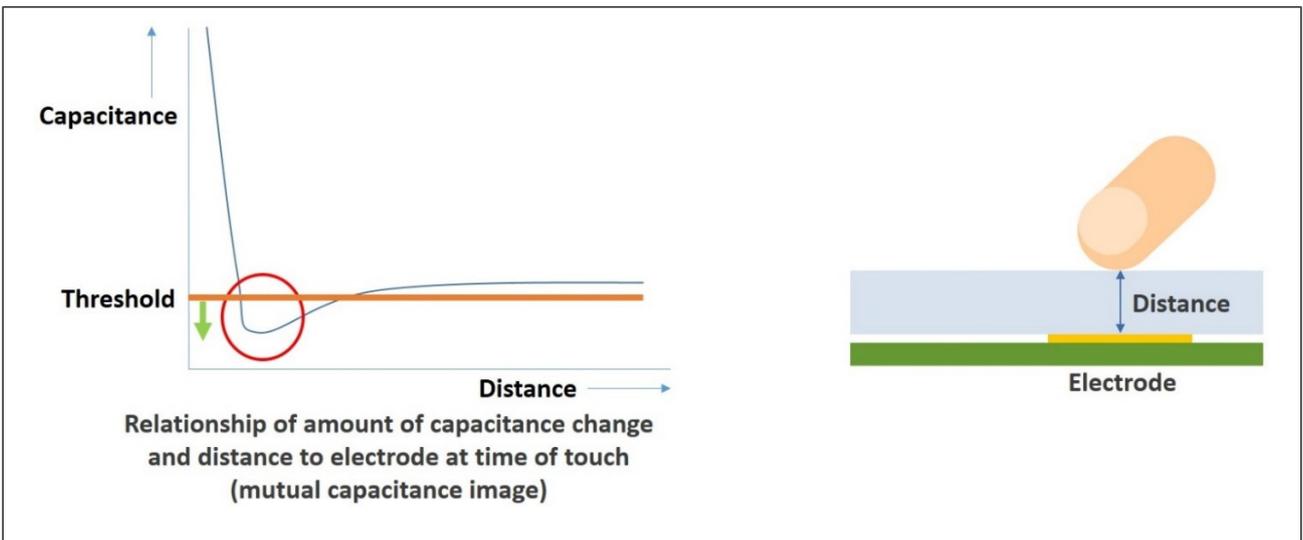


图 3-9. 互电容方式中电容变化与灵敏度距离的关系

图 3-10 所示为互电容方式中电极间距和面板厚度之间的关系。为避免相邻电极之间的错误检测（串扰），建议的电极间距至少为面板厚度（包括气隙）的 2 倍。

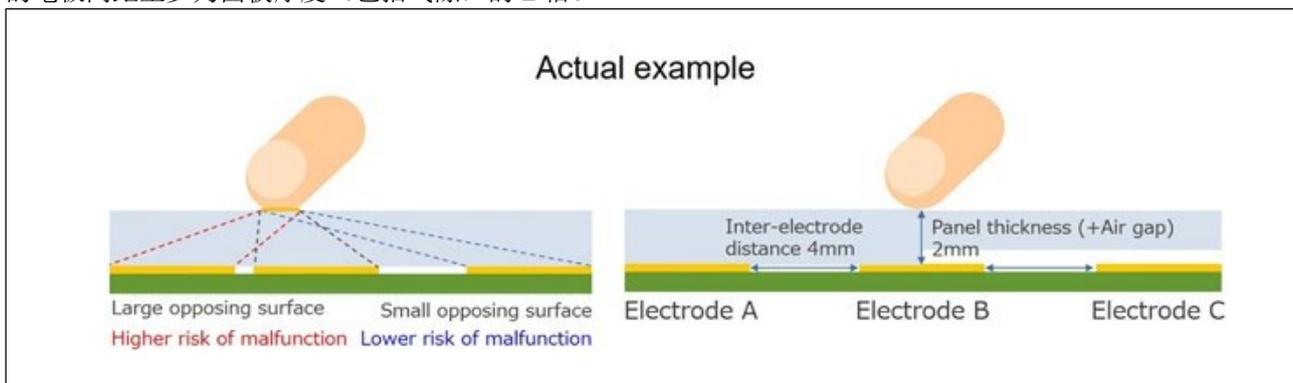


图 3-10. 互电容方式中电极间距和覆盖面板的关系

### 3.8 电极布线设计

图 3-11 所示为互电容方式的电极布线示例。Tx 和 Rx 电极导线必须与相邻的按键电极和预计手指触摸的其他区域保持足够的距离。此间隙距离将降低由于触摸非电极焊盘区域时可能发生的不准确触摸而导致误检测的风险。必须将 Tx 和 Rx 电极导线，这可使两条走线不会同时发生意外触摸。同样，如果设置为 Rx 和 Tx 的触摸测量端子 (TS) 相邻，则两个端子之间可能会产生耦合电容，这会降低电容减少的相对速率，从而导致灵敏度下降。为防止电容串扰，应将 Rx 和 Tx 线路分开分组，并尽可能互相远离

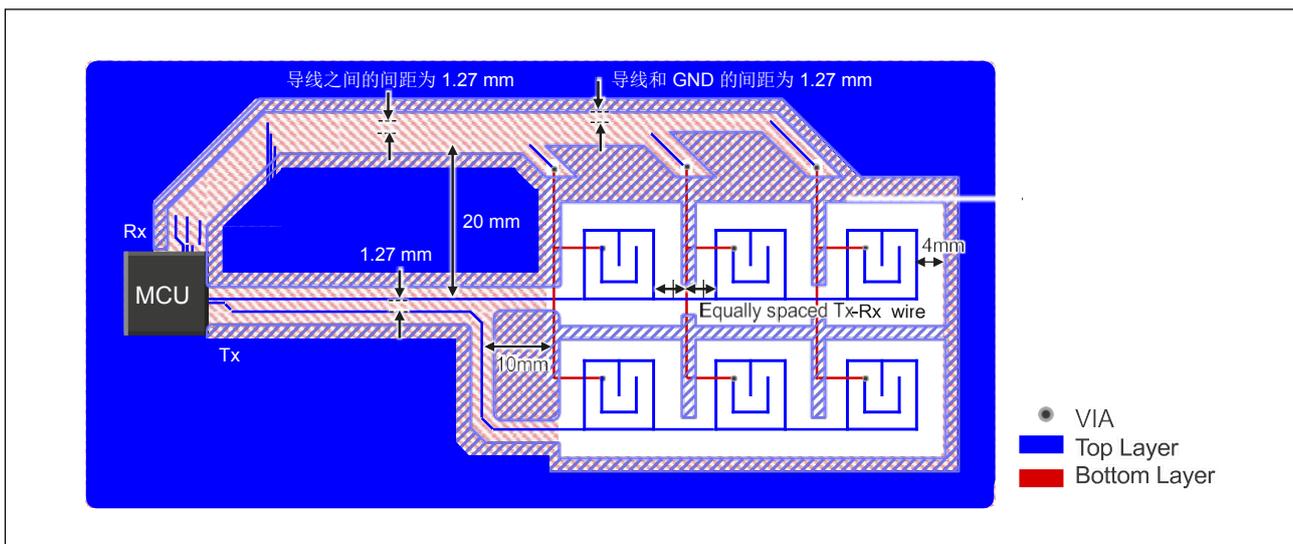


图 3-11. 互电容方式中的电极布线示例

图 3-12 所示为适用于互电容方式的电极布线限制。在布线区域内，Tx 和 Rx 电极导线不应该在相距较近的情况下平行走线，它们必须保持尽可能远的距离。如果由于电路板限制而导致导线必须交叉，请在尽可能远离电极的位置以 90° 角交叉，然后立即分开。

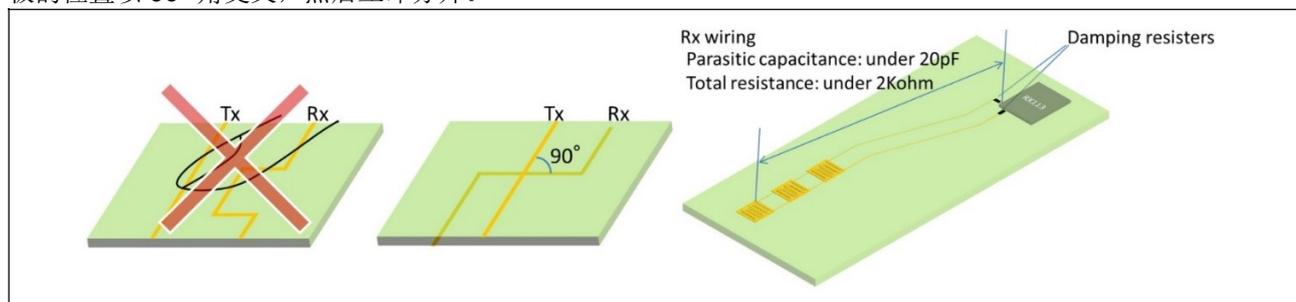


图 3-12. 互电容方式中的电极布线限制

### 3.9 抗噪布局图案设计

电极电路配置会使电极产生天线效应（MCU 引脚仅在电容耦合时处于开路状态），并使其容易受到电磁场噪声的影响。瑞萨触摸 MCU 采用多种抗噪对策来确保高抗噪性。然而，仅靠 MCU 并不能防止所有噪声的影响。在噪声严重的环境中使用 MCU 时，硬件对策必不可少。本节包括几个设计示例。

一般来说，导线越长，噪声与许多噪声频率同步和混合的可能性就越大。确保按键电极和 MCU 之间的导线尽可能短。

有源屏蔽不能用于互电容方式。

#### 3.9.1 图案设计

#### 3.9.2 屏蔽保护抗噪对策

在电极和导线周围放置 GND 图案以产生电容耦合，并抑制由于外部噪声影响引起的电位波动。GND 屏蔽离电极太近可能会导致寄生电容增加过多，从而阻碍触摸检测。如果环境噪声严重且需要将屏蔽靠得更近，我们建议使用交叉影线配置作为接地图案，以最大限度地减少电容耦合。瑞萨电容式触摸评估系统采用了下图列出尺寸的交叉影线图案。此外，交叉影线图案根据导线方向倾斜 45 度，以减少与电极导线的电容耦合。此外，必须平行走线的线路越长，寄生电容增加得越多。因此，可能需要调整导线和屏蔽之间的距离。

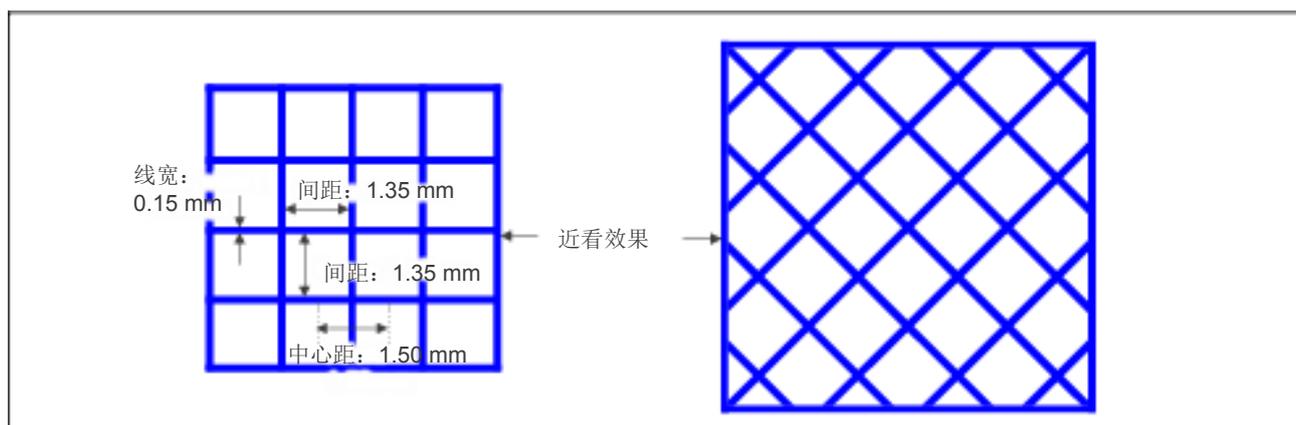


图 3-13. 交叉影线图案尺寸

图 3-14 和图 3-15 所示为互电容方式的抗噪布局图案示例。我们建议使用交叉影线接地图案来覆盖电极导线周围的区域。当由于布局限制无法覆盖整个布线区域时，优先使用交叉影线 GND 图案覆盖 Rx 电极导线周围的区域。确保电极导线与交叉影线 GND 之间的距离至少为 4 mm。

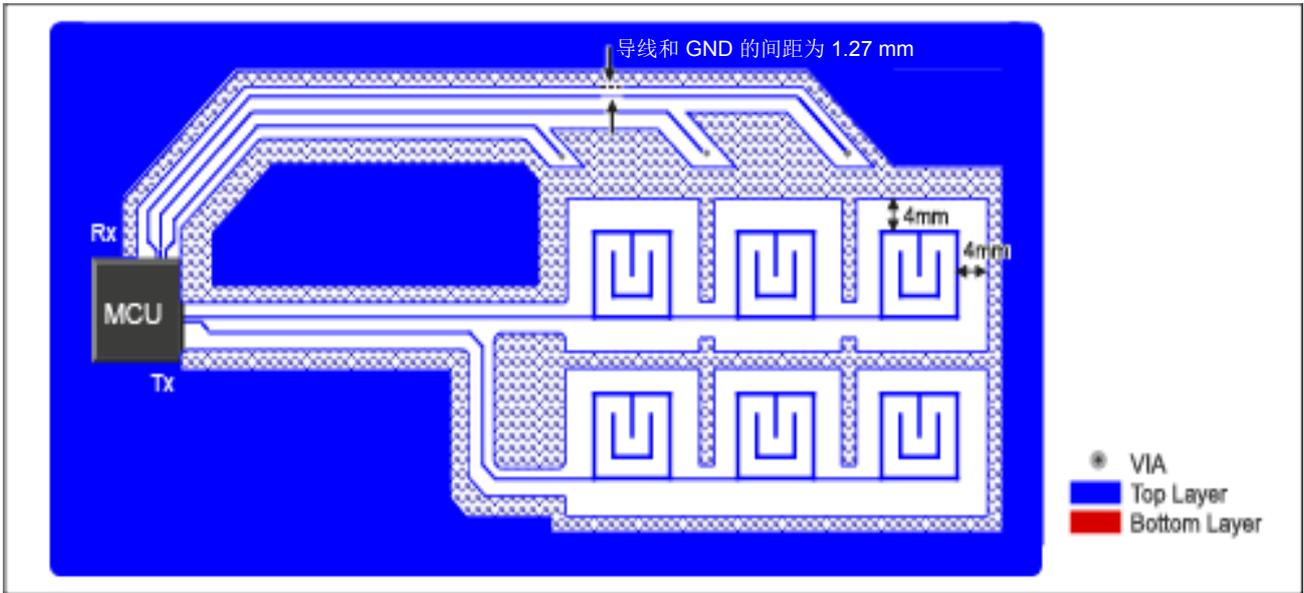


图 3-14. 抗噪对策布局图案示例（顶层）

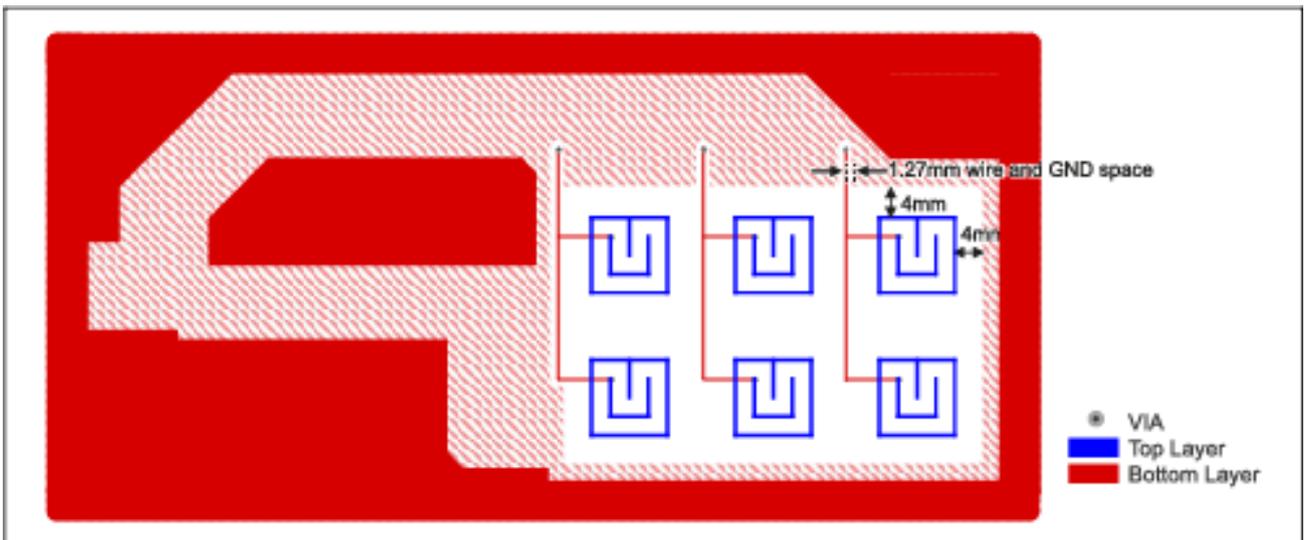


图 3-15. 抗噪对策布局图案示例（底层）

### 3.10 设计应用示例

#### 3.10.1 防水电极布局图案设计

图 3-16 所示为关于互电容方式的防水电极布局图案的注意事项。如果设备在流动的水下使用且电极表面形成了水膜，当指尖接触水膜时，效果几乎就像水膜下的所有电极都被接触到一样。这种状态大幅增加了相邻电极之间误检测（串扰）的风险，与流水的电阻值成反比。在海洋或其他含有电解质的水中使用传感设备会使静电触摸的运行条件恶化。由于水膜厚度不断增加且水具有高介电常数（电解质会进一步增加水的介电常数），因此水膜的电阻值会降低。

需要防水的产品必须在电极焊盘之间设计有较宽的空间，以防止相邻电极之间的错误检测。

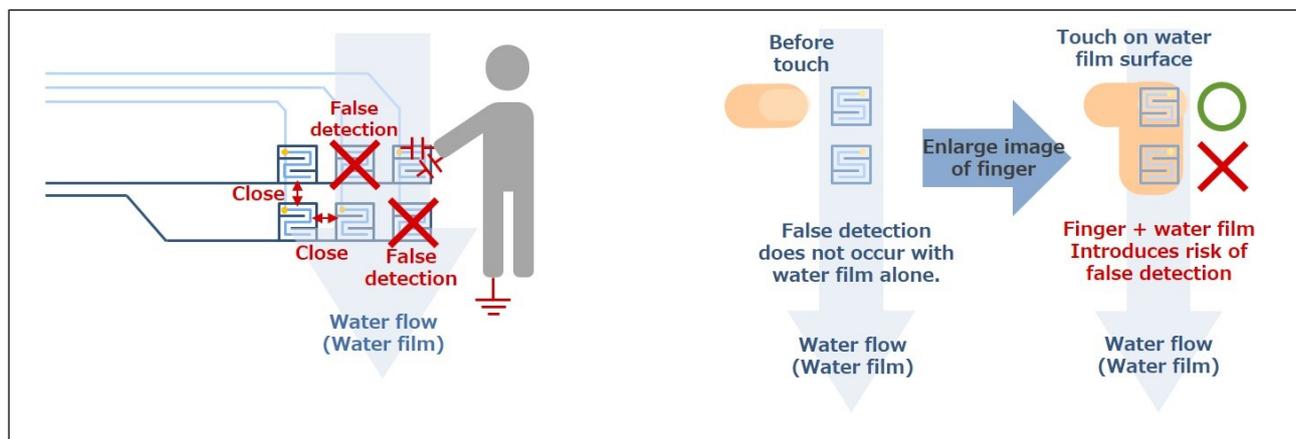


图 3-16. 互电容方式中防水电极布局图案的注意事项

图 3-17 所示为建议用于互电容方式的防水电极布局。鉴于水是自上而下流动的，理想的防水布局是将所有电极放置在一条水平线上。

由于测量过程中电极不使用的 Tx 导线输出低电平，因此所有 Tx 可以合并成一条线以实现防水设计。这将使不活动的 Tx 导线输出的 L 电平能够通过水膜与其他电极桥接，从而防止误检测。

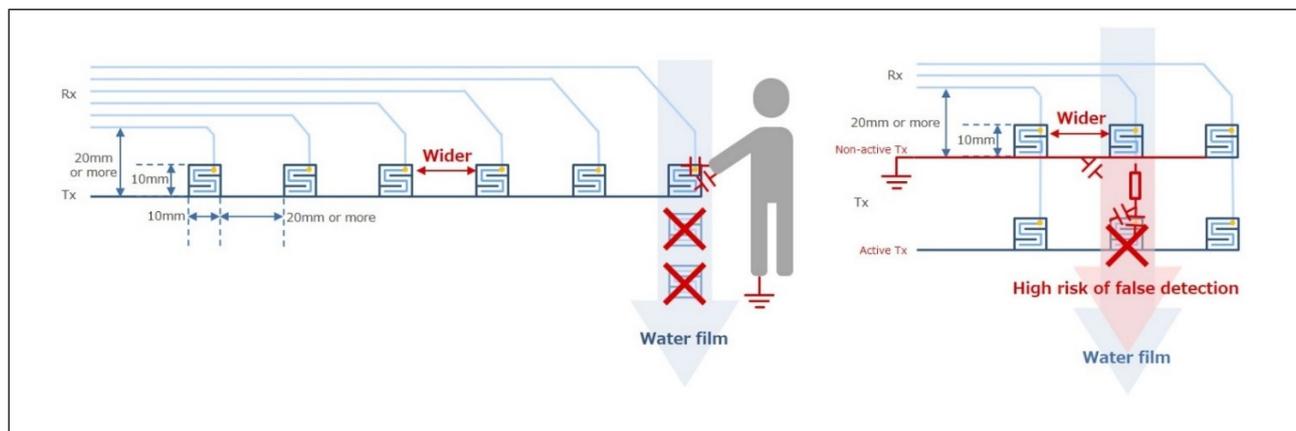


图 3-17. 建议用于互电容方式的防水电极布局

图 3-18 所示为互电容方式中电极间距和面板厚度之间的关系。为防止相邻电极之间的错误检测（串扰），建议的电极间距离至少为覆盖面板厚度（包括气隙）的 2 倍。

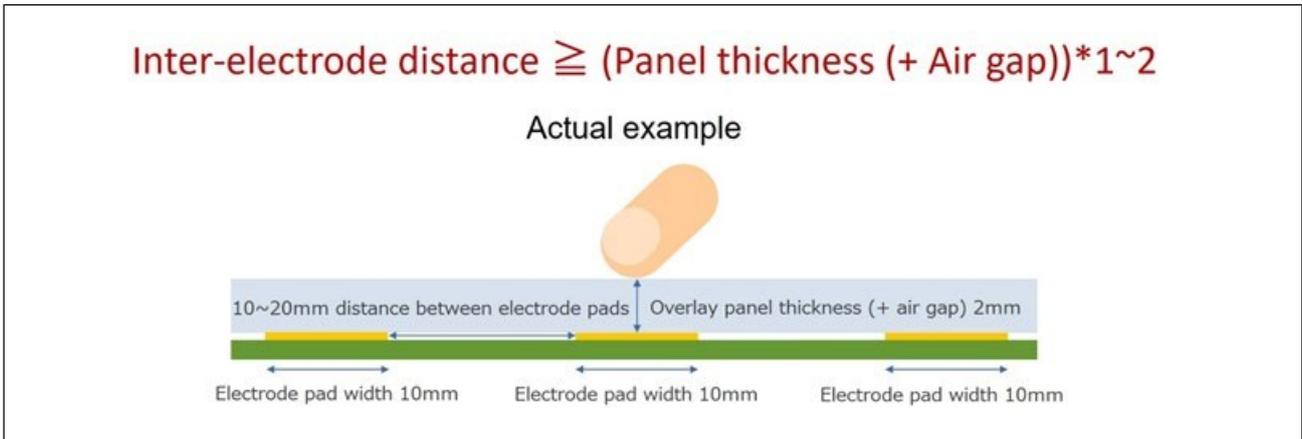


图 3-18. 互电容方式中防水电极间距和覆盖面板的关系

### 3.10.2 LED 导线布局

#### 3.10.2.1 直接照明示例

图 3-19 所示为互电容方式中的电极焊盘和 LED 导线示例。理想的布线方式是将 LED 放置在电极焊盘的外边缘周围，如图中右侧所示。在互电容方式中，可以增加 Tx/Rx 正对面积以提高检测灵敏度。然而，这会导致难以定位进入 Tx 和 Rx 电极的电极焊盘的 LED 导线。Tx/Rx 平行走线距离较短，并可能会导致相同尺寸的电极焊盘的灵敏度下降。

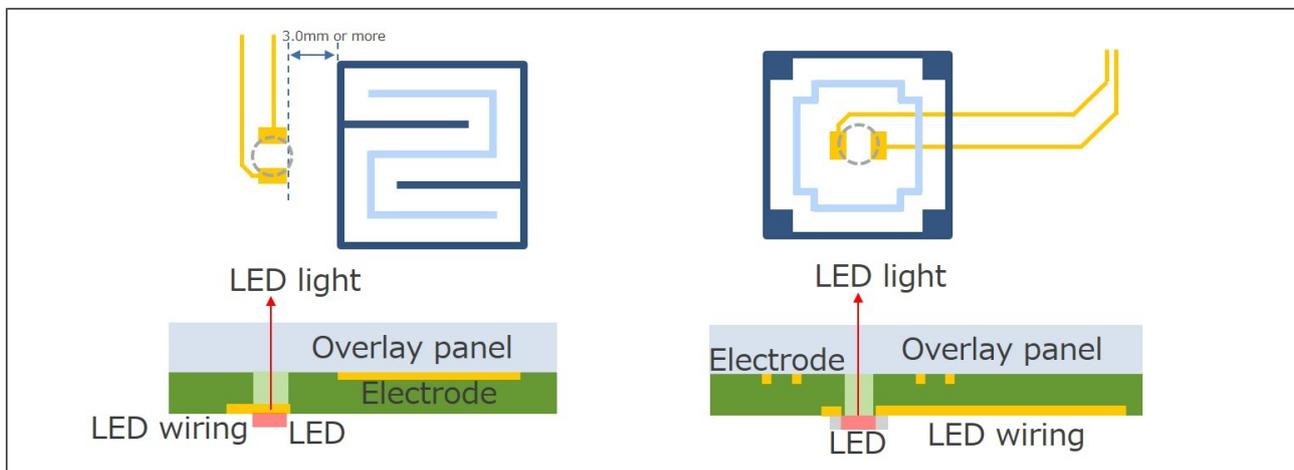


图 3-19 互电容方式中的电极焊盘和 LED 布线

#### 3.10.2.2 间接照明示例

图 3-20 所示为互电容方式中使用电极焊盘和导光板的 LED 布线示例。LED（光源）必须与发光表面保持一定距离，以确保照明均匀。

在正对位置放置多个 LED（光源）有助于消除照明不均匀问题。

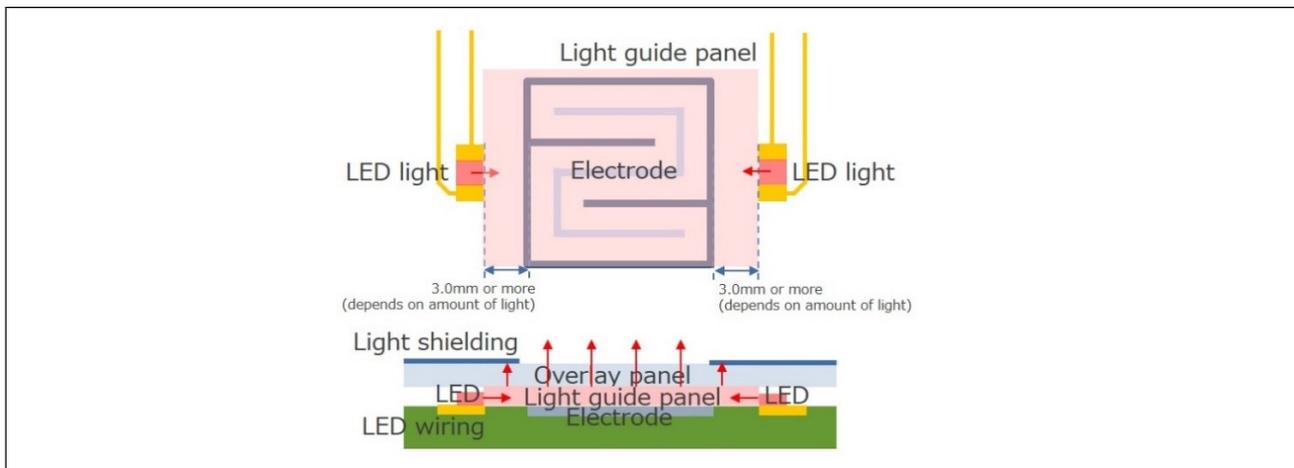


图 3-20 互电容方式中使用电极焊盘和导光板的 LED 布线

## 版本历史记录

版本	日期	说明	
		页码	摘要
1.0	2021 年 4 月 12 日	-	发行的第一版

# 有关微处理器和微控制器产品处理的一般预防措施

下方的使用说明适用于 **Renesas** 的所有微处理器和微控制器产品。有关本文档所述产品的详细使用说明，请参见本文档的相关章节以及针对相应产品发布的各项技术更新。

## 1. 防静电 (ESD) 措施

当暴露于 **CMOS** 器件时，强电场会导致栅极氧化物损坏，并最终使器件的工作性能下降。必须采取措施来尽可能地阻止静电的产生，并在发生静电时将其迅速消除。必须充分进行环境控制。如果环境干燥，应使用加湿器。建议避免使用容易产生静电的绝缘体。半导体器件必须在防静电电容器、静电屏蔽袋或导电材料中存储和运输。所有测试和测量工具（包括工作台和地板）都必须接地。操作人员还必须使用腕带接地。禁止徒手触摸半导体器件。对于装有半导体器件的印刷电路板，必须采取类似的预防措施。

## 2. 上电时的处理

产品在上电时仍处于未定义状态。在上电时，**LSI** 内部电路状态未定，寄存器设置和引脚的状态都未定义。对于复位信号已施加到外部复位引脚的成品，从上电开始到复位过程完成之前，引脚的状态并不能确定。同样地，对于以片上上电复位功能复位的产品，从上电开始到达到指定的复位电位之前，都无法确保引脚的状态。

## 3. 断电状态下的信号输入

器件断电时，请勿输入信号或 **I/O** 上拉电源。输入此类信号或 **I/O** 上拉电源导致的电流注入可能导致故障，此时流经器件的异常电流可能导致内部元件性能下降。请遵循产品文档中所述的电源关闭状态下输入信号的准则。

## 4. 未用引脚的处理

未使用的引脚应根据本手册“未用引脚的处理”部分给出的说明处理。**CMOS** 产品的输入引脚通常为高阻抗状态。在与开路状态下的未用引脚配合使用时，将在 **LSI** 周围产生额外的电磁噪声，内部将产生相关的直通电流，从而可能因为错误地将引脚状态识别为输入信号而产生故障。

## 5. 时钟信号

在应用复位后，只有在作业时时钟信号稳定后再释放复位线。当在程序执行过程中切换时钟信号时，等待目标时钟信号稳定。如在复位时外部谐振器（或外部振荡器）生成时钟信号，确保在时钟信号完全稳定后再释放复位线。此外，如在程序执行过程中切换到外部谐振器（或外部振荡器）生成的时钟信号，也需要等待目标时钟信号稳定。

## 6. 输入引脚上的电压施加波形

输入噪声或反射波引起的波形失真可能会导致故障。例如，如果由于噪声而使 **CMOS** 器件的输入处于  $V_{L}$ （最大值）和  $V_{H}$ （最小值）之间，则器件可能会发生故障。当输入电平固定时，以及在输入电平通过  $V_{L}$ （最大值）和  $V_{H}$ （最小值）之间的过渡期间，请注意防止颤动噪声进入器件。

## 7. 禁止访问保留地址

禁止访问保留地址。保留地址用于未来可能的功能扩展。请勿访问此类地址，否则将无法保证 **LSI** 能正确运行。

## 8. 产品差异

在从一个产品切换到另一个前（例如，切换到具有不同零件号的产品），确认切换不会引起问题。对于同在一个系列但零件号不同的微处理器单元或单片机产品，其内部存储能力、布局图案和其他特性因素可能有所差异，进而可能会影响特性值、运行裕量、抗干扰性和噪声辐射量等电气特征的范围。在更换为部件编号不同的产品时，应针对给定产品执行系统评估测试。

## 注意

1. 本文档中电路、软件和其他相关信息的描述仅用于说明半导体产品的操作和应用示例。用户应对产品或系统设计中电路、软件和信息纳入或任何其他用途承担全部责任。对于您或第三方因使用这些电路、软件或信息而引起的任何损失和损害，Renesas Electronics 不承担任何责任。
2. Renesas Electronics 特此声明，对于因使用本文档中所述的 Renesas Electronics 产品或技术信息（包括但不限于产品数据、图纸、图表、程序、算法和应用示例）而引起的侵权或与第三方有关的专利、版权或其他知识产权的任何其他索赔，概不承担任何责任和赔偿。
3. 对 Renesas Electronics 或其他公司的任何专利、版权或其他知识产权均不授予任何明示、暗示或其他形式的许可。
4. 您应负责确定需要从任何第三方获得哪些许可，并在需要时为合法进口、出口、制造、销售、使用、分销或以其他方式处置包含 Renesas Electronics 产品的任何产品获得此类许可。
5. 不得对 Renesas Electronics 产品的全部或部分进行更改、修改、复制或逆向工程。对于因更改、修改、复制或逆向工程而导致您或第三方蒙受的任何损失或损害，Renesas Electronics 不承担任何责任。
6. Renesas Electronics 产品根据以下两个质量等级进行分类：“标准”和“优质”。Renesas Electronics 每种产品的预期应用取决于产品的质量等级，具体如下所示。  
“标准”：计算机、办公设备、通信设备、测试和测量设备、视听设备、家用电器、机械工具、个人电子设备、工业机器人等  
“优质”：运输设备（汽车、火车、轮船等）；交通管制（交通信号灯）；大型通信设备；关键金融终端系统；安全控制设备等  
除非在 Renesas Electronics 数据手册或 Renesas Electronics 其他文档中明确指定为高可靠性产品或用于恶劣环境的产品，否则 Renesas Electronics 产品不适合或不授权用于可能对人类生命构成直接威胁或造成人身伤害（人造生命支持设备或系统；手术植入物等），或者可能造成严重的财产损失（空间系统、海底中继器、核动力控制系统、飞机控制系统、关键设备系统、军事装备等）的产品或系统。对于因使用任何与 Renesas Electronics 数据手册、用户手册或其他 Renesas Electronics 文档不一致的 Renesas Electronics 产品而引起的您或任何第三方所造成的任何损坏或损失，Renesas Electronics 不承担任何责任。
7. 没有任何半导体产品是绝对安全的。尽管 Renesas Electronics 的硬件或软件产品中可能实施了任何安全措施或功能，Renesas Electronics 对因任何漏洞或侵扰（包括但不限于以任何未经授权的方式访问或使用 Renesas Electronics 产品或使用 Renesas Electronics 产品的系统）而产生的任何后果概不负责。RENESAS ELECTRONICS 不担保或保证 RENESAS ELECTRONICS 产品或使用 RENESAS ELECTRONICS 产品创建的任何系统不会被破坏，或者可免于数据损坏、攻击、病毒、干扰、黑客攻击、数据丢失或失窃或其他安全入侵（“漏洞问题”）。RENESAS ELECTRONICS 不承担由任何漏洞问题引起的或与之相关的任何和所有责任或义务。此外，在适用法律允许的范围内，RENESAS ELECTRONICS 不对本文件和任何相关或附带的软件或硬件提供任何和所有明示或暗示的保证，包括但不限于对适用性或特定用途的适用性的暗示保证。
8. 使用 Renesas Electronics 产品时，请参见最新的产品信息（数据手册、用户手册、应用笔记、可靠性手册中的“处理和使用半导体器件的一般说明”等），并确保使用条件符合 Renesas Electronics 在最大额定值、工作电源电压范围、散热特性和安装等方面的规定。对于因在超出上述规定范围的条件范围内使用 Renesas Electronics 产品而引起的任何失常、故障或事故，Renesas Electronics 不承担任何责任。
9. 尽管 Renesas Electronics 致力于提高 Renesas Electronics 产品的质量和可靠性，但半导体产品具有特定的特性，例如在特定速率下发生故障以及在某些使用条件下出现故障。除非在 Renesas Electronics 数据手册或 Renesas Electronics 其他文档中指定为高可靠性产品或用于恶劣环境的产品，否则 Renesas Electronics 的产品将不受抗辐射设计的约束。用户应负责采取安全措施，以防止人身伤害、火灾造成的伤害，和/或因 Renesas Electronics 产品发生故障或失常而对公众造成的危险，例如硬件和设备的安全设计，包括但不限于冗余、火控和故障预防、针对老化退化的适当处理或任何其他适当的措施。由于对微型计算机软件进行评估非常困难且无实操性，因此用户有责任评估自己生产的最终产品或系统的安全性。
10. 请联系 Renesas Electronics 销售办事处，以获取有关环境事宜的详细信息，例如每个 Renesas Electronics 产品的环境相容性。用户有责任认真、充分地研究有关纳入或使用受控物质的适用法律和法规（包括但不限于欧盟 RoHS 指令），并按照所有适用法律和法规使用 Renesas Electronics 产品。对于因您未遵守适用的法律和法规而造成的损坏或损失，Renesas Electronics 不承担任何责任。
11. Renesas Electronics 产品和技术不得被用于或纳入为任何适用的本国或外国法律、法规所禁止制造、使用或销售的产品或系统范围内。用户应遵守由对当事方或交易拥有管辖权的任何国家/地区的政府颁布和管理的任何可适用的出口控制法律和法规。
12. 应由 Renesas Electronics 产品的购买方或分销商，或者对产品进行分发、处置或以其他方式出售或转让给第三方的任何其他当事方，负责将本文件中阐明的内容和条件提前通知前述第三方。
13. 未经 Renesas Electronics 事先书面同意，不得以任何形式全部或部分重印、再现或复制本文件。
14. 如果对本文件中包含的信息或 Renesas Electronics 产品有任何疑问，请联系 Renesas Electronics 销售办事处。

（注 1）本文件中的“Renesas Electronics”是指 Renesas Electronics Corporation，也包括其直接或间接控制的子公司。

（注 2）“Renesas Electronics 产品”是指 Renesas Electronics 开发或制造的任意产品。

（版本 5.0-1 2020 年 10 月）

## 公司总部

TOYOSU FORESIA, 3-2-24 Toyosu,  
Koto-ku, Tokyo 135-0061, Japan  
[www.renesas.com](http://www.renesas.com)

## 商标

Renesas 和 Renesas 徽标是 Renesas Electronics Corporation 的商标。  
所有商标和注册商标都是各自所有者的财产。

## 联系信息

有关产品、技术、文档最新版本或离您最近的销售办事处的更多信息，  
请访问：[www.renesas.com/contact/](http://www.renesas.com/contact/)。