

采用 CapTIvate™ 技术的 MSP430™ MCU 电容式触摸设计流程

Yiding Luo

MSP430 Applications

摘要

本应用报告介绍了如何使用配备 CapTIvate™ 电容式触摸感应技术的 MSP430™ MCU 开发自己的电容式触摸实现的步骤。本文介绍了从电容式触摸感应认识到生产准备的整个开发流程。

内容

1	简介	3
1.1	CapTIvate 技术指南	3
2	设计流程概述	4
3	步骤 1: 了解电容式触摸感应和 CapTIvate 技术的基础知识	5
4	步骤 2: 定义系统要求和产品运行条件	6
5	步骤 3: 概念可行性评估和器件选择	7
5.1	概念评估	7
5.2	器件选择	8
6	第4步: 硬件开发	10
7	步骤 5: 硬件开发和系统调优	18
8	步骤 6: 系统集成和原型设计	27
9	步骤 7: 系统验证和现场测试	27
10	步骤 8: 大规模生产	28
11	参考文献	28

附图目录

1	设计流程概述	4
2	基本电容触摸设计的层叠	5
3	VREG 引脚去耦电容器	10
4	CAP I/O 上的串联电阻	11
5	EMI 噪声滤波电容器	11
6	复位引脚电阻器和电容器	11
7	自动分配功能	12
8	扫描时间周期	12
9	自电容的按钮形状	13
10	互电容的按钮形状	14
11	互电容矩阵	14
12	自电容滑块和滚轮	14
13	互电容滑块和滚轮	15
14	传感器迹线布线	15
15	互电容布线注意事项	16
16	LED 布线	16
17	接地覆铜	17
18	CapTIvate 设计中心	19
19	CapTIvate 调优过程	19

20	传感器参数	20
21	传感器属性窗口	21
22	控制器属性窗口	21
23	启用高级模式	21
24	调优注意事项	21
25	Delta (增量)	22
26	接近阈值	23
27	触摸阈值	23
28	更改触摸阈值	23
29	SNR 测量	24
30	接近和触摸去抖	24
31	扫描时间估计	25
32	响应时间方程式	25
33	更新源代码	26

附表目录

1	自电容与互电容比较	5
2	定义 MCU 要求	6
3	定义传感器要求	6
4	定义机械要求	6
5	定义运行条件要求	6
6	CapTIvate 系列器件	8
7	器件迭代	9
8	第一代和第二代器件特性 比较	9
9	原理图设计检查清单	10
10	PCB 布局设计检查清单	13
11	机械设计检查清单	17
12	灵敏度调优检查清单	22
13	可靠性调优检查清单	23
14	响应时间调优检查清单	24
15	系统验证检查清单	27
16	大规模生产检查清单	28

商标

CapTIvate, MSP430, BoosterPack, LaunchPad, Code Composer Studio are trademarks of Texas Instruments.

适用于 MSP430 IDE 的 IAR Embedded Workbench is a registered trademark of IAR Systems.

All other trademarks are the property of their respective owners.

1 简介

电容式触摸感应是一种独特的人机界面技术，它可以创建差异化的用户界面，为各种产品带来价值。通过电容式感应，机械开关和旋钮可被替换为外观雅致的按钮、滑块和滚轮，无缝集成到产品的外壳中，从而同时改善产品的美观性和功能性。

这些美学和功能改进为产品设计师带来了一系列不同的挑战。例如，与简单的机械开关相比，电容式触摸需要更多地关注 PCB 设计中的细节。它还需要更多固件来确定用户界面的状态。诸如此类的因素可能使电容式触摸看起来像是一项具有挑战性的技术。然而，实际情况是电容式触摸并非极具挑战性 - 它只是一项崭新且与众不同的技术。

与许多其他技术一样，实现电容式触摸设计概念在整个开发和投入生产过程所带来的挑战和风险可以通过已经过验证的开发流程来降低。如果您是一位不熟悉电容式触摸的设计师，或者是一位经验丰富但对 TI 用于电容式感应的 CapTivate 技术很陌生的设计师，那么本文档提供了从初级概念到大规模生产的分步设计流程。此外，本文档还提供了开发流程中特定点的检查清单，以降低开发周期后期出现不可预见问题的风险。

1.1 CapTivate 技术指南

[CapTivate™ 技术指南](#)是采用 CapTivate 技术的电容式触摸设计的综合资源。本设计流程指南包含许多指向 [CapTivate™ 技术指南](#) 的链接，以支持您的设计。

请参阅 [CapTivate MCU](#) 以了解有关 MSP430 电容式触摸感应微控制器的更多信息。

2 设计流程概述

图 1 显示了采用 CapTIvate MCU 的电容式触摸感应产品设计周期的典型流程。

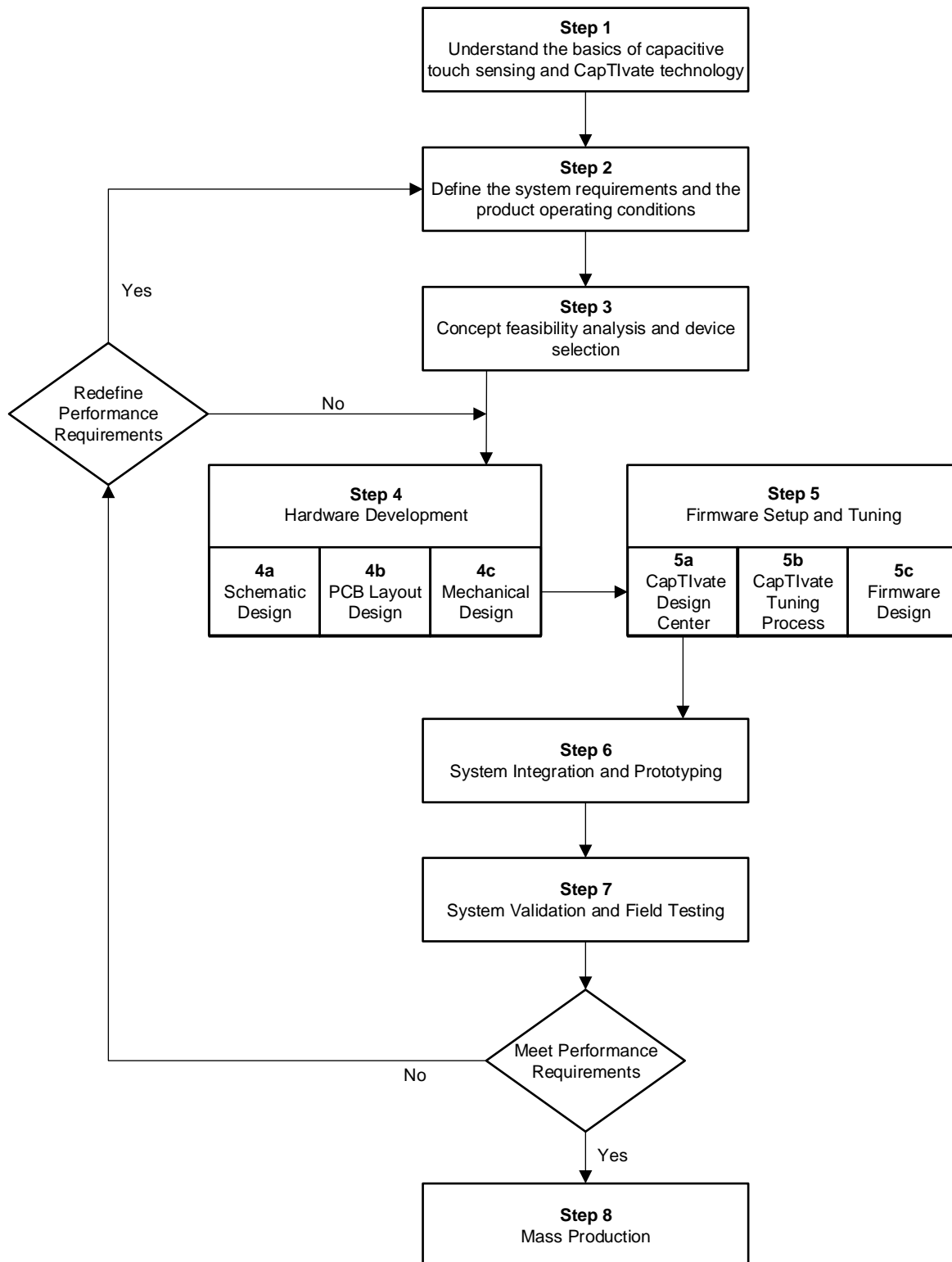


图 1. 设计流程概述

3 步骤 1: 了解电容式触摸感应和 CapTIvate 技术的基础知识

设计成功的电容式触摸感应系统的第一步是理解电容式触摸感应的基本原理。电容式感应执行对传感器元件电容的测量以检测其变化。传感器元件可以是任何导电材料（例如，覆铜 PCB 平面或导线）。电容值的变化可能来自人的交互，例如手指、耳朵或手。这通常称为电容式触摸，图 2 显示了基本电容式触摸设计的层叠。

如需更多信息，请访问：[电容式感应基础知识](#)。

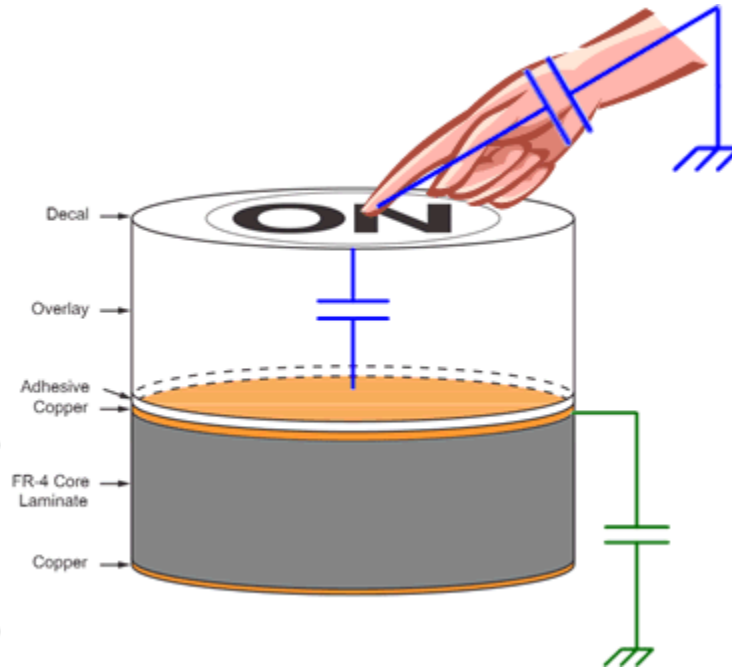


图 2. 基本电容触摸设计的层叠

有两种不同的电容式感应测量方法：自电容和互电容。表 1 比较了这两种感应测量方法。查看这两种感应方法的基本原理，选择最适合应用要求的方法。CapTIvate MCU 可在单一设计中支持两种感应方法。

有关更多信息，请访问以下主题：

- [自电容原理](#)
- [互电容原理](#)

表 1. 自电容与互电容比较

特性	自电容	互电容
传感器布局	较简单	更复杂
支持覆层空隙	是	否
PCB 层数	通常为 1 层或 2 层	通常为 2 层
12 个按钮所需的引脚	12	7

此时，您应该已经充分了解电容式触摸感应的基本原理。请参阅以下主题，了解 TI CapTIvate 技术如何应用这些基本原理：

- [CapTIvate 电荷转移技术](#)
- [CapTIvate 外设](#)

4 步骤 2: 定义系统要求和产品运行条件

设计成功的电容式触摸感应系统的第二步是定义系统要求和最终产品的运行条件。这是确保产品达到预期性能的关键步骤。在许多情况下，公司内部都有自己独特的专长领域，有独立的小组或团队来执行每项职能。有时，这些功能中的一个或多个甚至可以外包给第三方开发人员或合同制造商。因此，强烈建议所有功能团队一起工作。表 2 列出了定义某一采用 CapTIvate 技术的产品时要考虑的几个关键系统要求和运行条件。在设计过程的这一步骤中，您可能无法获得这些要求的所有答案，但尽早定义更多的要求，可使总体设计过程更高效。

表 2. 定义 MCU 要求

要求	说明
存储器配置	根据在 MCU 上实现的功能估算存储器要求。请参阅 存储器配置注意事项 。
引脚数	根据应用估算 GPIO 的数量。CapTIvate 电容式触摸感应 MCU 最多支持 19 个 GPIO。
封装	定义适合应用的封装方式。CapTIvate 电容式触摸感应 MCU 可采用 QFP、TSSOP、QFN 和 DSBGA 封装。
通信接口	定义器件需要支持的通信接口的类型和数量。CapTIvate 电容式触摸感应 MCU 支持 I ² C、UART 和 SPI 接口。
引导加载程序	定义应用在原型设计阶段、最终生产阶段和运行阶段是否需要引导加载程序进行编程。
电源电压范围	确定系统提供的 MSP430 MCU 的电源电压范围。
其他外设	定义应用所需的其他外设，如 ADC、计时器和比较器。
CapTIvate I/O 数量	该数量取决于电容式传感器的要求。请参阅 CapTIvate 器件选择 。
CapTIvate 块的数量	每个 CapTIvate 块具有 2 或 4 个 CapTIvate I/O，具体取决于器件。器件上的 CapTIvate 测量块的数量决定了可以同时测量的感应电极的数量。CapTIvate MCU 具有 1、2 或 4 个 CapTIvate 块，具体取决于器件。如果应用包含许多电容式传感器并且具有严格的功耗和响应时间要求，请选择具有更多块的器件。请参阅 CapTIvate 器件选择 。

表 3. 定义传感器要求

要求	说明
功能	应用中电容式传感器的功能（人体检测、物体检测）
类型	应用中的电容式传感器类型（按钮、滑块、滚轮、接近感应、金属面板触摸）
数量	每种传感器的数量。
尺寸	基于所需触摸面积和空间限制的每种类型传感器的尺寸
分辨率	滑块、滚轮和接近传感器的分辨率
形状	基于所需触摸面积和空间限制的每种类型传感器的形状
材料	传感器材料（PCB、FPC、导线、铜箔、ITO）
传感器方向	电容式触摸传感器的方向（垂直、水平）

表 4. 定义机械要求

要求	说明
覆层属性	电容式触摸传感器顶部覆层的属性，包括材料、厚度、层叠和边界
外壳属性	系统外壳的属性，包括材料、厚度、层叠和边界
PCB 互连	系统中不同 PCB 之间的互连

表 5. 定义运行条件要求

要求	说明
电源	系统电源配置（墙壁电源、电池电源）
室内或室外	应用运行环境
温度变化	CapTIvate MCU 上的温度变化，包括变化率和预期温度条件的范围
EMC 性能	系统必须通过的 EMC 测试的类型和应力等级

表 5. 定义运行条件要求 (continued)

要求	说明
防潮湿和耐液体性能	在应用的典型液体情况下, 电容式触摸传感器的预期响应。
功耗	MSP430 MCU 的目标平均功耗和瞬态功耗
系统噪声	系统中的潜在噪声源
反馈	与检测相关的用户反馈 (LED、蜂鸣器、触觉)

5 步骤 3: 概念可行性评估和器件选择

设计成功的电容式触摸传感系统的第三步是根据系统要求进行可行性研究, 并为应用选择最佳的 CapTlvate 器件。

5.1 概念评估

CapTlvate MCU 提供了一套全面的评估工具, 可帮助加快评估过程。

5.1.1 硬件

- **MSP CapTlvate MCU 开发套件** ([订购](#) | [用户指南](#) | [设计文件](#))

此开发工具包有助于帮您评估采用了 CapTlvate 技术且具有自电容和互电容感应功能的按钮、滑块、滚轮和接近功能。

- 中的评估硬件中添加了 **EVM430-CAPMINIEVM430-CAPMINI** ([订购](#) | [用户指南](#) | [设计文件](#))

EVM430-CAPMINI 是一款用于 MSP430FR2512 电容式触摸感应微控制器的易用型评估板。它演示了 CapTlvate 技术的主要特性, 例如超低功耗和易用性。板载 CapTlvate HID 桥接工具支持通过 CapTlvate 设计中心进行实时调优。该板包括 4 个触摸按钮和 4 个 LED, 用于创建简单的用户界面。它还提供一个用于高级应用的蜂鸣器。该板可以通过 USB 电缆或板载 CR1632 纽扣电池供电, 以实现独立演示。

- **MSP430 CapTlvate 触摸键盘 BoosterPack™ 插件模块** ([订购](#) | [用户指南](#) | [设计文件](#))

BOOSTXL-CAPKEYPAD 允许您通过添加一个带有 LED 背光和接近唤醒的 12 键电容式触摸数字键盘来扩展 LaunchPad™ 开发套件。即使您没有 LaunchPad 开发套件, BOOSTXL-CAPKEYPAD 也可以与 MSP CapTlvate MCU 开发套件中包含的 CAPTIVATE-PGMR 板配合使用, 用作简单的 CapTlvate 技术评估模块。

- 适用于 **CapTlvate** 开发套件的电容式金属面板触摸感应附加电路板 ([订购](#) | [用户指南](#) | [设计文件](#))

这是一个 MSP CapTlvate 开发套件 ([MSP-CAPT-FR2633](#)) 的附加电路板, 可供设计人员和工程师评估金属面板触摸技术。

- 定制硬件

评估应用包括布置一个基本 PCB (并预留传感器连接器占用空间), 或者用铜带布置电极并将它们连接到连接器中。您可以使用 MSP CapTlvate MCU 开发套件中的 CAPTIVATE-FR2633 板来评估您的传感器 PCB (请参阅 [CAPTIVATE-FR2633 电路板引脚排布概述](#))。

5.1.2 软件

- **CapTivate** 设计中心工具 ([下载](#))
 - GUI
 - 文档
 - 示例项目
 - 实时调优
 - 生成源代码

CapTivate 设计中心 GUI 是一个一站式平台, 可提供与 CapTivate 电容式感应技术相关的所有资源。它包括工具、文档和软件示例, 可简化并加快电容式触摸设计工作。首先将电容式感应元件拖放到 GUI 工作区, 然后使用 GUI 配置并实时调优设计。完成调优后, 该 GUI 将会生成所选电容式触控元件需要的源代码。

- **TI Code Composer Studio™ IDE** ([下载](#))
Code Composer Studio 是 TI 的集成开发环境 (IDE), 支持 TI 的微控制器和嵌入式处理器产品组合。
- 适用于 **MSP430 IDE** 的 **IAR Embedded Workbench®** ([下载](#))
IAR Embedded Workbench 是第三方集成开发环境 (IDE), 支持 TI 的微控制器和嵌入式处理器产品组合。

5.2 器件选择

TI 提供各种可编程 CapTivate 微控制器。使用 [步骤 2](#) 中定义的要求为应用选择最佳 CapTivate 器件。

如需了解更多信息, 请访问以下资源:

- [CapTivate 系列器件表](#)
- [CapTivate 系列器件数据表](#)

[表 6](#) 汇总了 CapTivate MCU 支持的传感器和检测数量。[表 7](#) 和 [表 8](#) 比较了两代 CapTivate 技术。

表 6. CapTivate 系列器件

		CapTivate 引脚 (RX 或 TX)			
		4 引脚	8 引脚	16 引脚	
CapTivate	1	MSP430FR2515IRHL MSP430FR2512IPW16			此行中的器件一次测量一个电极
	2		MSP430FR2522IRHL MSP430FR2522IPW16		此行中的器件可以并行测量多达两个电极, 以便在具有多个电极的应用中实现更快地扫描
	4		MSP430FR2633IYQW MSP430FR2632IYQW MSP430FR2632IRGE MSP430FR2532IRGE	MSP430FR2633IRHB MSP430FR2633IDA MSP430FR2533IRHB MSP430FR2533IDA MSP430FR2676TPT MSP430FR2676TRHA MSP430FR2676TRHB MSP430FR2675TPT MSP430FR2675TRHA MSP430FR2675TRHB	此行中的器件可以并行测量多达四个电极, 以便在具有多个电极的应用中实现最快的扫描
		此列中的器件具有 4 个 CapTivate 引脚, 最多可支持 4 个电极	此列中的器件具有 8 个 CapTivate 引脚, 在自电容模式下最多支持 8 个电极或在互电容模式下支持 16 个电极	此列中的器件具有 16 个 CapTivate 引脚, 在自电容模式下最多支持 16 个电极或在互电容模式下支持 64 个电极	

表 7. 器件迭代

第一代器件	MSP430FR2512、MSP430FR2522、MSP430FR2632、MSP430FR2633、MSP430FR2532、MSP430FR2533
第二代器件	MSP430FR2675、MSP430FR2676
器件相关特性	FRAM、RAM、电容式触摸 I/O、感应块、封装、功耗、其他外设

表 8. 第一代和第二代器件特性比较

迭代相关特性	第一代器件	第二代器件	第二代之于第一代的优势
感应模式	自电容和互电容	自电容和互电容	—
电极电荷电压	VREG 模式 (1.5V)	VREG 模式 (1.5V) DVCC 模式 (2.7V 至 3.6V)	DVCC 模式提高了信噪比和传导噪声抗扰度
总电极电容	在 4MHz 转换频率下为 300pF	在 4MHz 转换频率下为 300pF	—
输入偏置电流	否	是	提高了传导噪声抗扰度
转换处理 (噪声滤波器、漂移补偿、检测、事件计时)	硬件状态机	硬件状态机	—
噪声抗扰度处理 (跳频、过采样)	软件	硬件状态机	跳频和过采样不再需要 CPU

6 第4步：硬件开发

设计成功的电容式触摸感应系统的第四步是为应用开发硬件。本节提供 CapTIvate MCU 的硬件开发指南。

步骤 4a：原理图设计检查清单

表 9. 原理图设计检查清单

编号	组件	建议
1	VREG 引脚去耦电容器	1 μ F, 低 ESR \leq 200m Ω , 靠近 VREG 引脚放置
2	DVCC 引脚去耦电容器	4.7 μ F 至 10 μ F 储能, 0.1 μ F 旁路, 靠近 MCU 放置
3	CAP I/O 上的串联电阻	470 Ω
4	EMI 噪声滤波电容器	68pF, 如果需要抑制传导噪声, 则需要互电容模式 RX 引脚
5	复位引脚电阻器和电容器	47k Ω 上拉, 1nF 下拉
6	I ² C 通信线路上拉电阻器	2.2k Ω
7	引导加载程序 (BSL)	有关 BSL 引脚要求和功能, 请参阅器件特定的数据表的引导加载程序部分。
8	CAP I/O 引脚分配 (如果可能)	使用 CapTIvate 设计中心自动分配 CAP I/O 引脚。 利用所有 CapTIvate 块。 首先使用专用的 CAP I/O 引脚。 请参阅 CapTIvate 引脚选择指南 。

步骤 4a.1: VREG 引脚去耦电容器

VREG 是 CapTIvate 稳压器的去耦电容。所需去耦电容的建议值为 1 μ F, 最大等效串联电阻 (ESR) \leq 200m Ω 。将 VREG 尽可能靠近 MCU 连接。

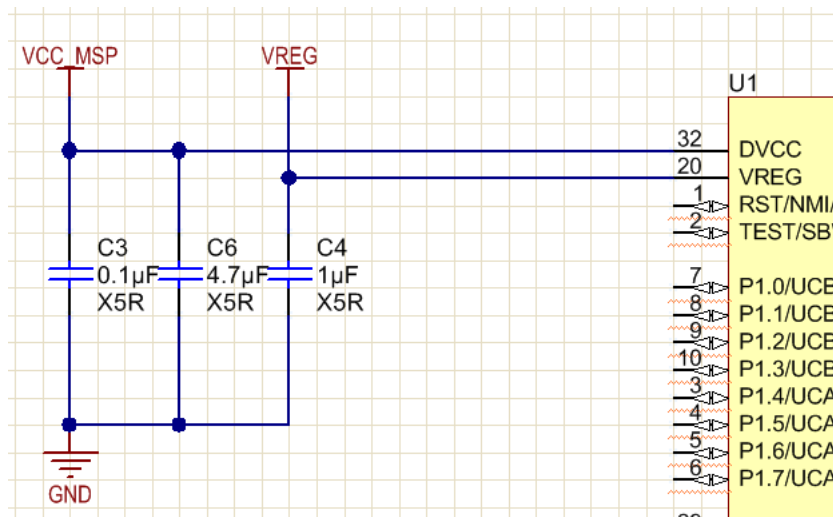


图 3. VREG 引脚去耦电容器

步骤 4a.2: DVCC 引脚去耦电容器

有关详细信息, 请参阅器件特定的数据表。

步骤 4a.3: CAP I/O 上的串联电阻

这些是通用串联电阻，如果系统需要静电放电 (ESD) 保护，可与 TPD1E10B06 瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管配合使用。这些电阻器还有助于降低系统辐射并提高 RF 噪声抗扰度。

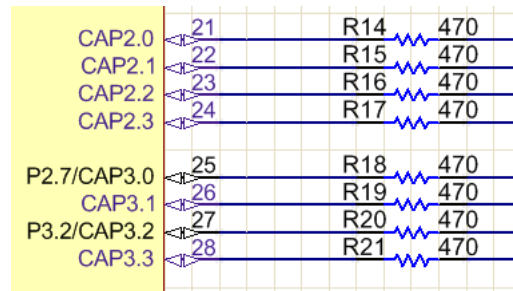


图 4. CAP I/O 上的串联电阻

步骤 4a.4: EMI 噪声滤波电容器

出于抑制传导噪声的考虑，仅在互电容模式 RX 引脚上添加了 68pF 电容。额外的电容有助于最大限度地降低 EMI 的影响。如果启用了 DVCC 模式，该电容也有助于确保 RX 寄生电容 (Cp) 与 RX-TX 互电容 (Cm) 之比在数据表中规定的范围内。

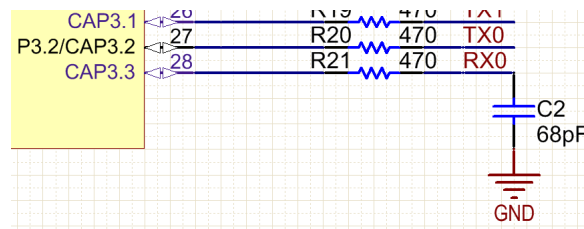


图 5. EMI 噪声滤波电容器

步骤 4a.5: 复位引脚电阻器和电容器

有关详细信息，请参阅器件特定的数据表。

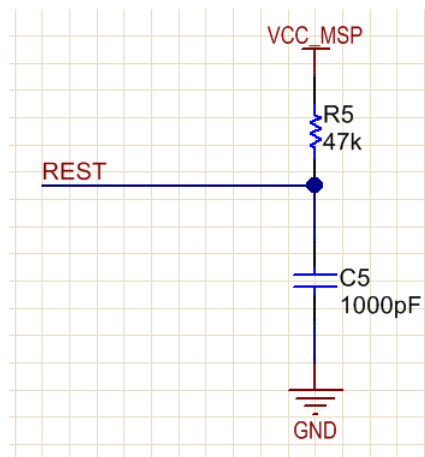


图 6. 复位引脚电阻器和电容器

步骤 4a.6: I²C 通信线路上拉电阻器

有关详细信息，请参阅器件特定的数据表。

步骤 4a.7: 引导加载程序 (BSL)

请参阅器件特定的数据表和 **MSP430 FRAM 器件引导加载程序 (BSL) 用户指南**，了解详细信息。

步骤 4a.8: CAP I/O 引脚分配

每个 CAP I/O 引脚都可以配置为自电容或互电容传感器。要充分利用并行扫描功能，以降低总体功耗并提高响应速率，必须优化 CAP I/O 引脚分配。**CapTivate** 设计中心具有自动分配功能，可在原理图设计之前优化 CAP I/O 引脚分配。您还可以使用 **CapTivate** 设计中心评估现有引脚分配并尝试减少扫描周期数。**图 7** 显示了自动分配功能仅通过 3 个时间周期来优化 12 个按钮。

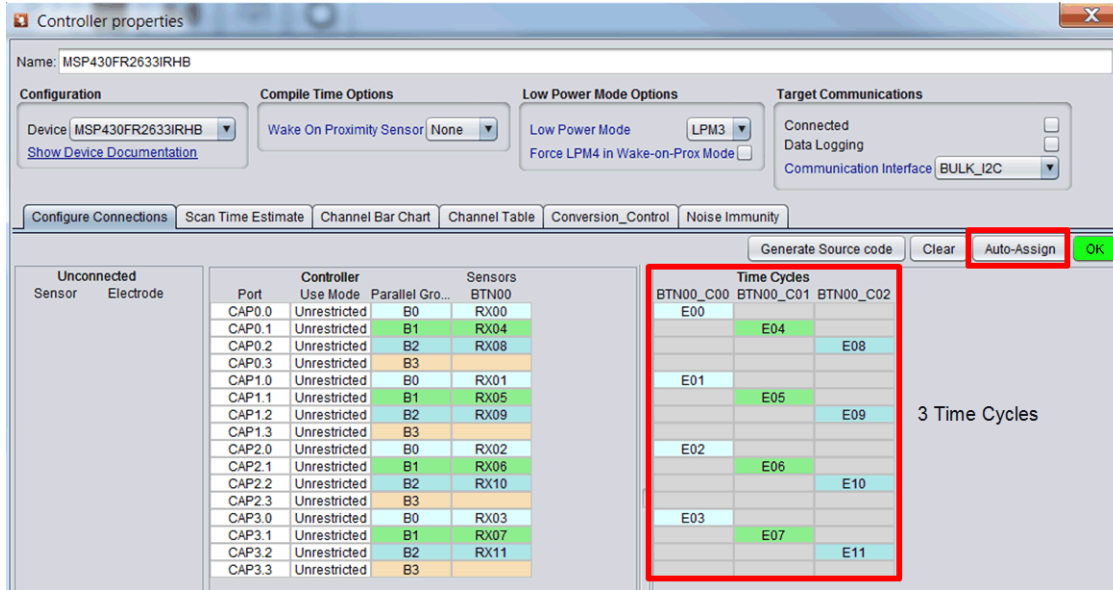


图 7. 自动分配功能

尝试使用所有可用的 **CapTivate** 块来启用并行扫描。器件上的 **CapTivate** 测量块的数量决定了可以同时测量的感应电极的数量。例如，如果在某个设计中器件有 4 个块和 6 个按钮，则 **图 8** 显示了两个不同的引脚分配和所需的扫描周期。

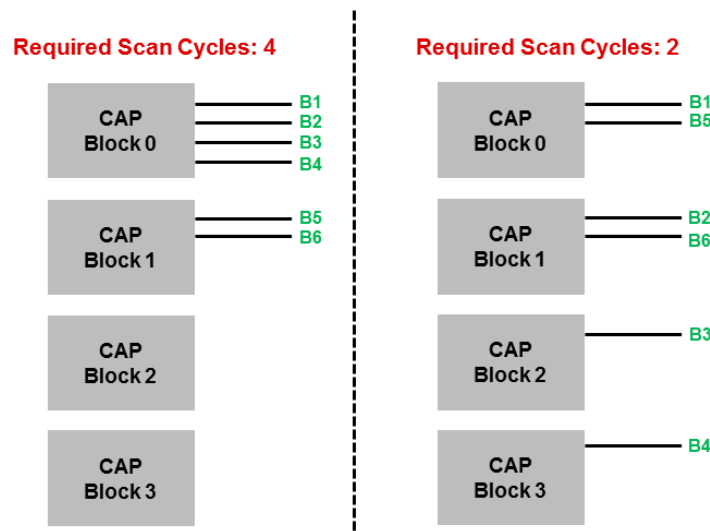


图 8. 扫描时间周期

如果器件支持专用 CAP I/O 引脚，请先将传感器分配给这些 CAP I/O。这可以保存 GPIO 以在应用中用作其他用途。

有关详细信息，请参阅 [CapTivate™ 技术指南](#) 的 [CapTivate 引脚选择](#) 部分。

步骤 4b: PCB 布局设计检查清单

表 10. PCB 布局设计检查清单

编号	组件		建议
1	按钮（自电容）	尺寸	10mm 和 12mm（方形按钮边长，圆形按钮直径），相当于交互区域
		形状	各式各样，通常是圆形或方形
		与周围的间距	0.5 倍覆层最小厚度
2	按钮（互电容）	尺寸	10mm 和 12mm（方形按钮边长，圆形按钮直径），相当于交互区域
		形状	各式各样，推荐方形或带角的形状
		RX 厚度	0.5mm（典型值）
		TX 厚度	1mm（典型值）
		RX 到 TX 间距	0.5mm（典型值）
3	滑块和滚轮	形状	滑块：线性形状。滚轮：圆形。 请参阅 使用 OpenSCAD 脚本自动化电容式触摸滑块和滚轮 PCB 设计 。
		尺寸	取决于所需的触摸面积
		电极数量	3 或 4 个电极
4	接近		因设计而异
5	传感器迹线	宽度	8 密耳或 PCB 制造商允许的最小厚度
		长度	尽量减小从传感器到控制器的长度
6	LED		LED 信号距离传感器信号 4mm
7	接地覆铜		使用网格状覆铜而不是实心覆铜。 网格状覆铜：25%（典型值） 45°，8 密耳线宽，64 密耳网格尺寸
8	防潮湿和耐液体性		请参阅 防潮湿设计考虑因素 和 耐液体性电容式触摸键盘参考设计
9	金属面板触摸		请参阅 通过采用 CapTivate™ 技术的 MSP430™ MCU 实现电容式金属面板触摸感应
10	噪声抗扰度		有关详细信息，请参阅 抗噪硬件 。

步骤 4b.1: 按钮（自电容）

- 自电容按钮传感器为单电极器件。自电容按钮布局简单，每个按钮仅分配给 MCU 上的一个引脚。
- 按钮尺寸范围为 3mm 至 15mm（方形按钮的边长，圆形按钮的直径），具体取决于所需的触摸面积。
- 自电容按钮的典型形状为矩形或圆形。

有关详细信息，请参阅 [自电容按钮设计](#)。



图 9. 自电容的按钮形状

步骤 4b.2: 按钮（互电容）

- 互电容按钮传感器需要两个电极，一个作为 TX，另一个作为 RX。TX 在外部，RX 在内部。
- 按钮尺寸范围为 3mm 至 15mm（方形按钮的边长，圆形按钮的直径），具体取决于所需的触摸面积。

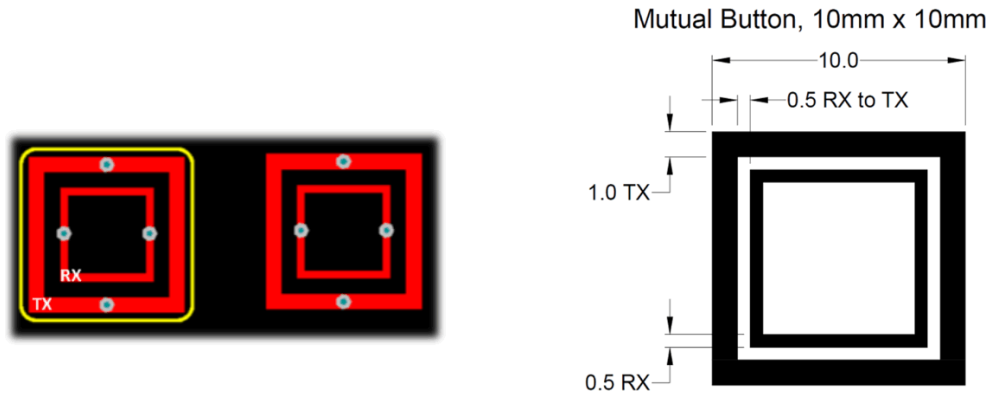


图 10. 互电容的按钮形状

- 图 11 显示了一个优化布局，用于在具有 12 个互电容按钮的应用中选择 TX 和 RX 引脚。此布局经过优化，可减少引脚数和扫描周期。

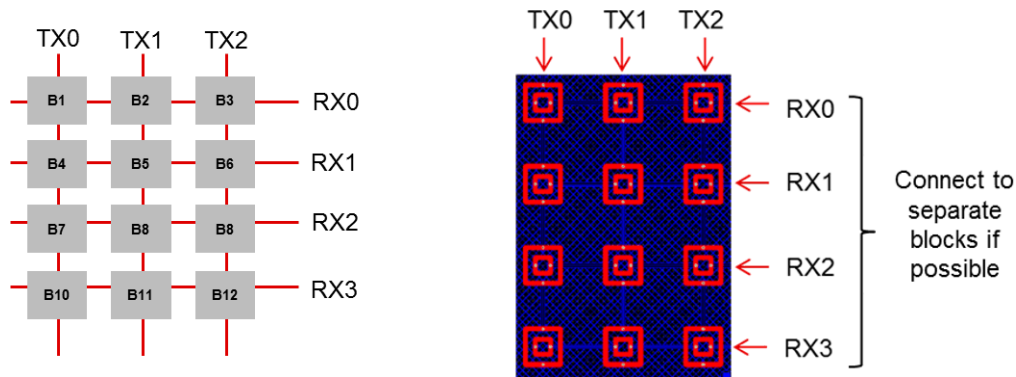


图 11. 互电容矩阵

有关详细信息，请参阅[互电容按钮设计](#)。

步骤 4b.3: 滑块和滚轮

- 当滑块和滚轮在所有电极上具有均衡的灵敏度时，其性能最佳。
- 电极的面积不如跨多个电极的覆盖百分比那么重要。交叉滑块和滚轮设计提供最有效和最佳的耦合，但创建起来可能很复杂。创建更简单的设计可以实现，但需要实验。
- 自电容滑块和滚轮

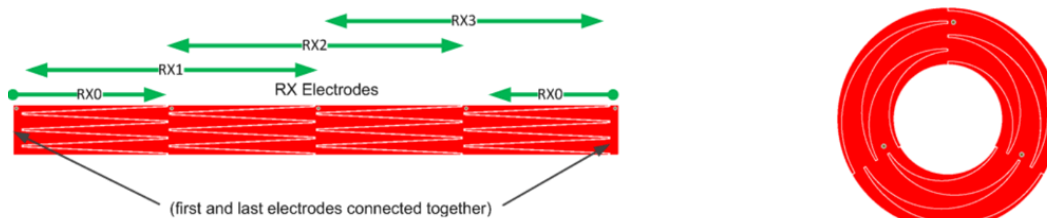


图 12. 自电容滑块和滚轮

- 互电容滑块和滚轮



图 13. 互电容滑块和滚轮

有关详细信息，请参阅[滑块和滚轮设计](#)。

步骤 4b.4: 接近感应

接近传感器的感应范围取决于以下几个因素：

- 接近传感器的大小和形状
- 传感器配置调优值
- 周围导体
- 系统周围环境

有关详细信息，请参阅[接近感应设计](#)。

步骤 4b.5: 传感器迹线

- 保持传感器迹线的宽度小于 8 密耳或 PCB 制造商允许的最小厚度
- 尽量减少传感器电极到控制器的传感器迹线长度
- 不要有 90° 转弯，因为急转弯可能会拾取噪声。
- 传感器迹线布线注意事项：
 - 尝试将传感器迹线布置到 PCB 的底层，以防用户干扰传感器迹线。
 - 不要在传感器迹线附近运行数字信号（如 PWM 信号）或布置通信线路（如 I²C 或 SPI）。建议将这些类型的信号与传感器迹线保持至少 4mm 的距离。如果数字信号和电容式触摸迹线必须交叉，则建议将交叉点保持 90 度角。

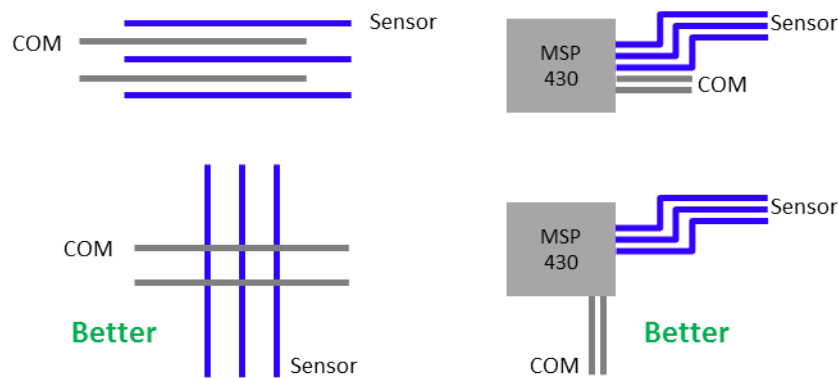


图 14. 传感器迹线布线

- 互电容布线注意事项：
 - 尽可能避免在 RX 线附近布置 TX 线。如果无法避免在同一层上布置 TX 和 RX，请在 TX 和 RX 之间放置接地迹线。如果 TX 需要穿过 RX，则将迹线的走线布置到它们彼此垂直的方向。
 - 将 TX 线连接到其他 TX 线旁边。将 RX 线连接到其他 RX 线旁边。
 - 保持接地与 TX 和 RX 迹线的距离为面板厚度的一半。

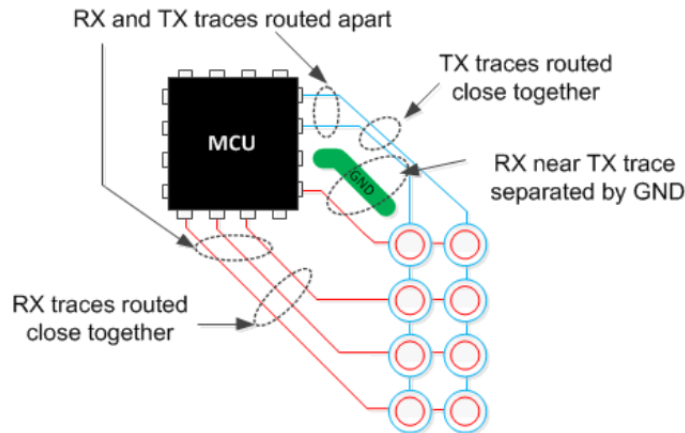


图 15. 互电容布线注意事项

步骤 4b.6: LED

驱动 LED 的信号（除非 LED 需要高强度驱动器）与其他数字信号类似。与数字信号一样，避免将 LED 信号放在传感器迹线附近。TI 建议 S_{LED} 的距离至少为 4mm（参见图 16）。

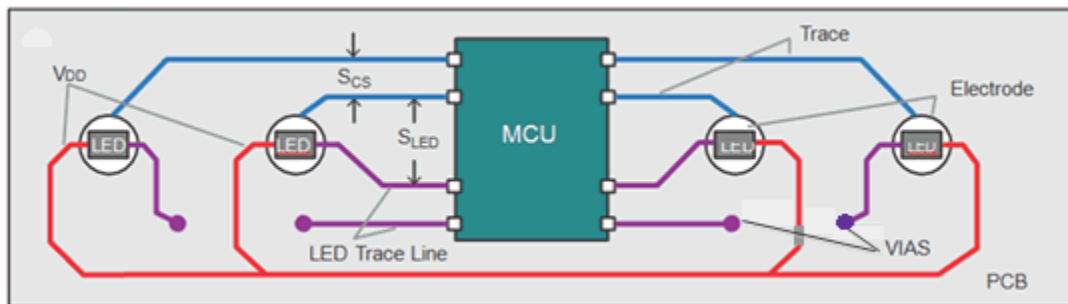


图 16. LED 布线

有关详细信息，请参阅 [LED/LED 背光](#)。

步骤 4b.7: 接地覆铜

- 在传感器电极附近添加接地覆铜时，需要在保持高传感器灵敏度和提高系统的噪声抗扰度之间进行权衡。
- 使用网格状覆铜而不是实心接地覆铜是一种很好的设计实践。网格状覆铜减少了来自接地覆铜的寄生电容。通常，25% 的填充网格就足够了，但这个百分比可以增加或减少，以分别提高噪声抗扰度或灵敏度。
- 在设计任何尺寸或形状的按钮、滑块或滚轮时，控制任何传感器与接地覆铜之间距离的灵活方法是在传感器周围提供多边形切口区域（参见图 17）。从传感器到周围接地的间隙可以是 0.5mm 到 2mm，并且通常等于覆层厚度的一半。

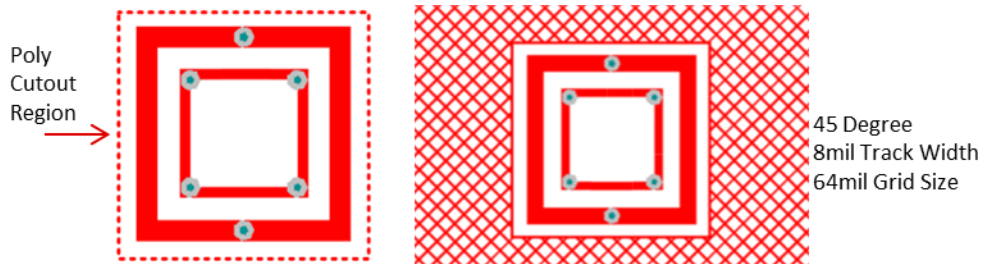


图 17. 接地覆铜

有关详细信息，请参阅[接地平面](#)。

步骤 4b.8: 防潮湿和耐液体性

- 防潮湿和耐液体性：系统设计为在检测到湿气或液体时阻止传感器检测。请参阅[防潮湿设计注意事项](#)。
- 防潮湿和耐液体性：系统设计为在暴露于湿气或液体时能够正常工作，但传感器间距和传感器放置方向会受限制。请参阅[耐液体电容式触摸键盘参考设计](#)。

步骤 4c: 机械设计

表 11 是机械设计检查清单。

表 11. 机械设计检查清单

编号	组件	建议
1	材料	典型：玻璃、聚碳酸酯、丙烯酸、ABS。避免使用导电材料和导电涂料。
	厚度	10mm 或更薄，取决于材料和传感器尺寸
	层叠	自电容：避免空隙 互电容：不能有空隙 可以使用弹簧夹之类的材料缩小间隙。
	边界	典型：光学透明粘合剂、螺钉
2	外壳	因设计而异
3	连接器	最大程度地减小从传感器到 MCU 的迹线长度。确保连接器在运行期间机械稳定。
4	传感器材料	典型：PCB、FPC、铜带、导线、ITO
5	噪声抗扰度	请参阅 抗噪硬件 。
6	金属面板触摸	请参阅金属面板触摸应用设计指南， 电容式金属面板触摸感应 。

步骤 4c.1: 覆层

材料和厚度

- 覆层材料的介电常数 (ϵ_r) 和厚度在确定传感器表面的电场强度方面起着重要作用。
- 介电常数决定了电场在材料中的传播效率，覆层与传感器之间的距离决定了电场到达目标接触区域的程度。例如，如果所有其他因素相同， ϵ_r 为 4 的 5mm 覆层与 ϵ_r 为 2.5mm 覆层具有相似的灵敏度。
- 导电材料会干扰电场。我们建议不要使用导电材料（包括导电涂料）的覆层。

层叠和边界

- 确保覆层和传感器电极之间有良好的接触，以确保良好的灵敏度和可靠的性能。始终避免传感器电极和覆层之间的空隙，特别是在互电容设计中。如果机械叠层需要间隙，请使用填充材料。压敏胶带可填充狭窄的间隙，机械弹簧可填充较大的间隙。

互电容设计中不允许有空隙。

- 最常见的边界方法是使用不导电的光学透明粘合膜，这可以通过消除空隙来提高灵敏度。使用的典型粘

合剂是 3M™ 200MP、467MP 和 468MP。

有关详细信息，请参阅[覆层设计](#)和[间隙注意事项](#)。

步骤 4c.2: 外壳

外壳的选择取决于产品工业设计以及电容式触摸子系统的要求。例如，在耐潮湿电容式触摸设计中，如果可能，应使用非导电外壳。但是，可以连接到地面的金属外壳更适合 ESD 放电。

步骤 4c.3: 连接器

- 如果可能，请勿在传感器和 MCU 之间使用连接器，因为寄生电容与连接器 PCB 的占用空间和结构有关。
- 如果可能，将 MCU 放在触摸传感器 PCB 上，并将电源和通信线路通过连接器连接到主 PCB。
- 柔性 PCB 或 FPC 可用作 PCB 之间的互连，但要确保产品运行期间的机械稳定性。

有关详细信息，请参阅[连接器注意事项](#)。

步骤 4c.4: 传感器材料

- 常见的传感器电极材料包括 PCB、FPC、铜带、导线和 ITO。
- 当使用铜带或导线作为传感器电极时，不要使其靠近金属外壳或系统中的其他噪声信号。

有关详细信息，请参阅[电极和迹线材料](#)。

7 步骤 5: 硬件开发和系统调优

设计成功的电容式触摸感应系统的第 5 步是根据[步骤 2](#)中定义的系统要求和[步骤 4](#)中开发的硬件，开发具有最佳调优配置的固件。

TI 提供两种软件开发工具，可以减少固件开发工作量和时间。下载最新版本的工具。

- CapTivate 设计中心工具 ([下载](#))
 - Code Composer Studio IDE ([下载](#))
- 或
- 适用于 MSP430 IDE 的 IAR Embedded Workbench ([下载](#))

步骤 5a: CapTivate 设计中心

CapTivate 设计中心是一款快速开发工具，可加速 CapTivate 技术支持的 MSP430 器件的电容式触摸设计。通过帮助指导您完成电容式触摸开发过程，CapTivate 设计中心可以通过使用创新的用户图形界面、向导和控件来简化和加速任何触摸设计。此 GUI 工具可以生成源代码，执行实时调优并提供示例项目。

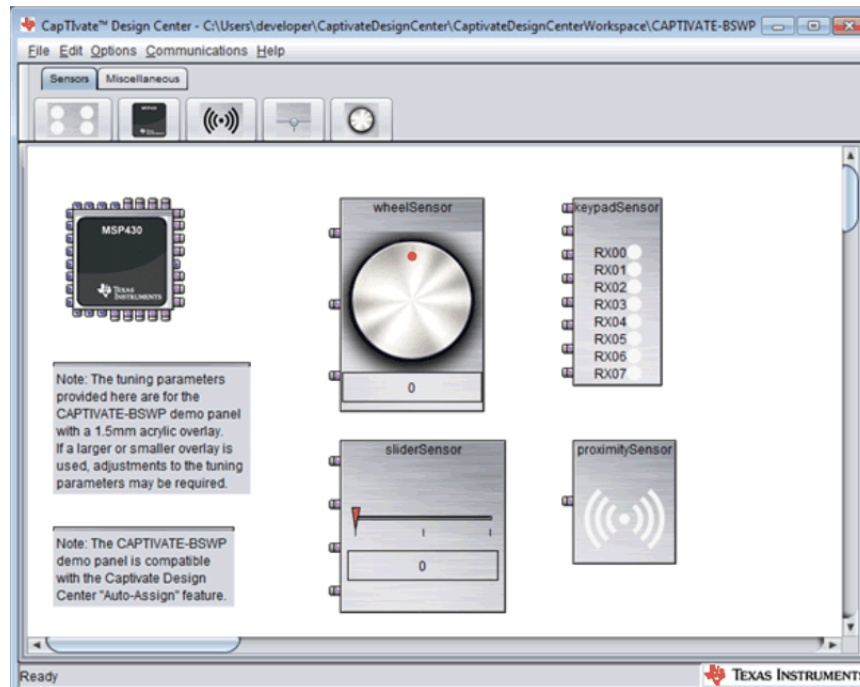


图 18. CapTIvate 设计中心

步骤 5b: CapTIvate 调优过程

首先要了解如何利用软件开发工具来调优传感器，然后是如何逐步实际调优传感器性能，这一点非常重要。

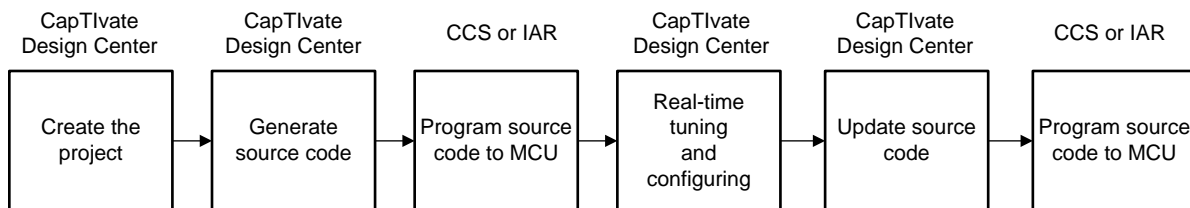


图 19. CapTIvate 调优过程

步骤 5b.1: 创建项目

- 根据硬件设计，使用 CapTIvate 设计中心将电容式感应元件拖放到 GUI 工作区。
- 根据原理图和布局，使用自动分配或手动分配将传感器连接分配给 MSP430 电容式触摸 I/O 引脚。
- 选择主机 PC 的 I²C 或 UART 通信接口。

有关详细信息，请参阅[创建新项目](#)。

步骤 5b.2: 生成源代码

有关更多详情，请参考[生成源代码](#)。

步骤 5b.3: 将源代码编程到 MCU

有关详细信息，请参阅[加载和运行生成的项目](#)。

步骤 5b.4: 实时调优和配置

将目标 MCU 连接到 CapTivate 设计中心 GUI 工具后，您应该能够显示实时传感器数据，并且能够读取和修改传感器的配置和调优参数。

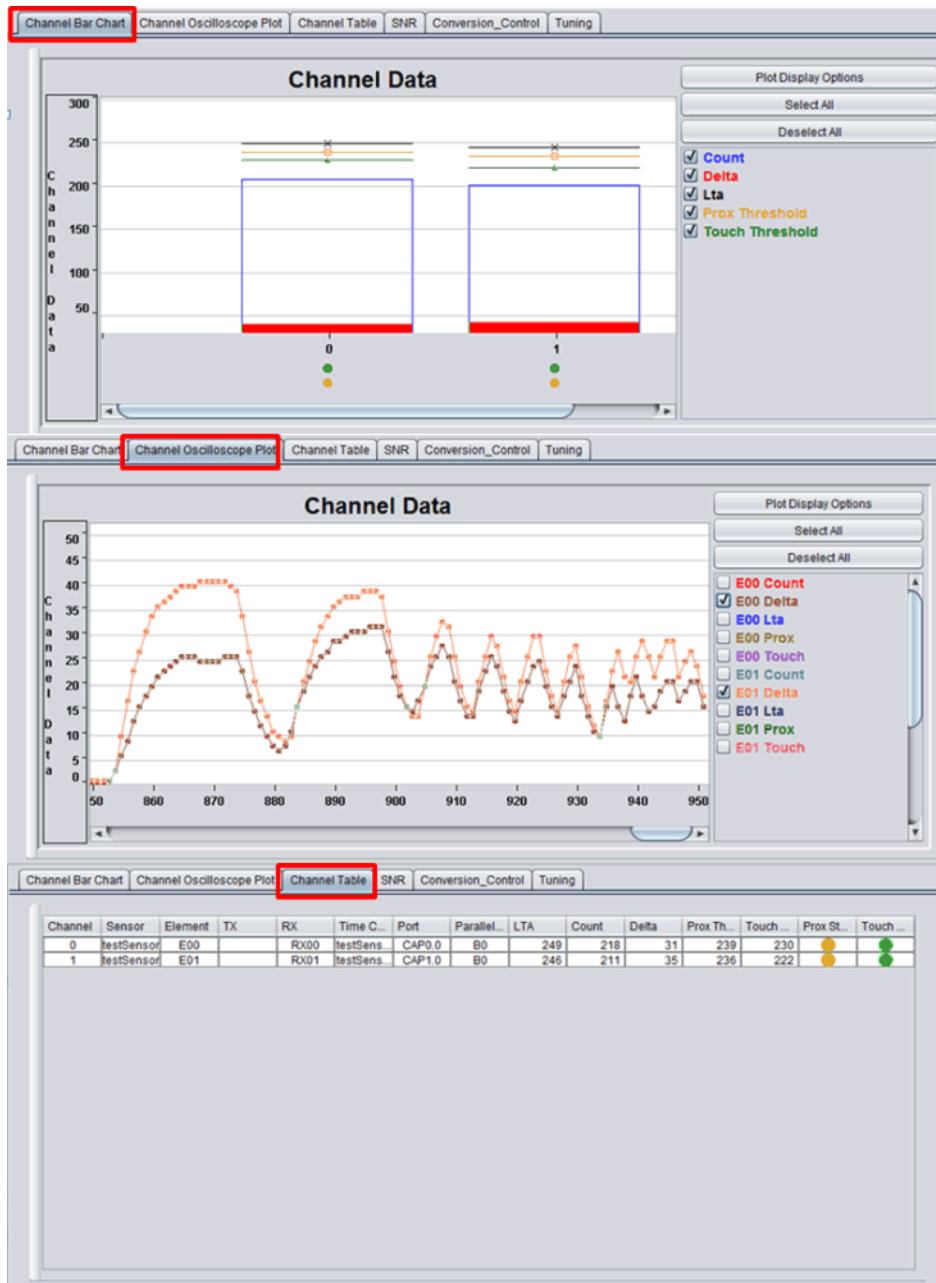


图 20. 传感器参数

双击传感器元件打开“传感器属性”窗口。

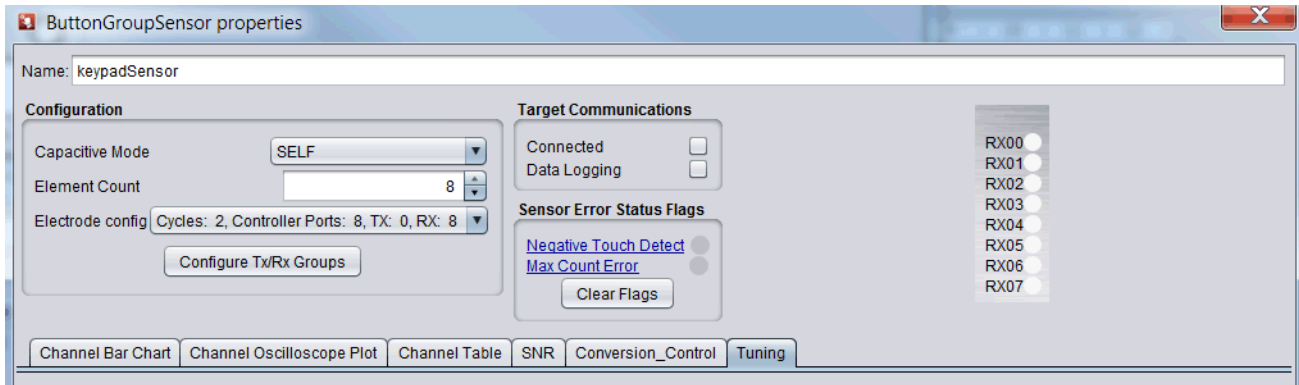


图 21. 传感器属性窗口

双击控制器元件打开“控制器属性”窗口。

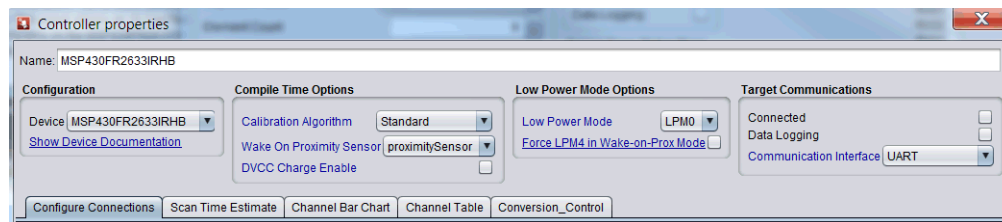


图 22. 控制器属性窗口

注: 确保启用高级模式以查看本文档中列出的所有调优参数。在 CapTIvate 设计中心, 单击选项 → 特性 → 高级 → 确定 (参阅 图 23)。

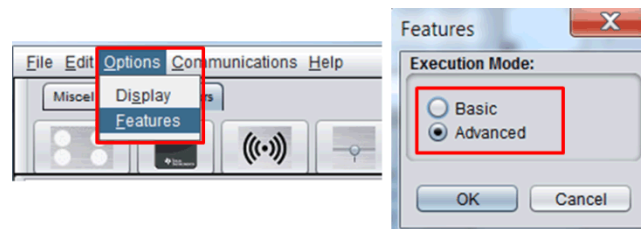


图 23. 启用高级模式

三个关键方面决定了电容式触摸性能。调优过程的目的是平衡这三个方面的性能权衡。

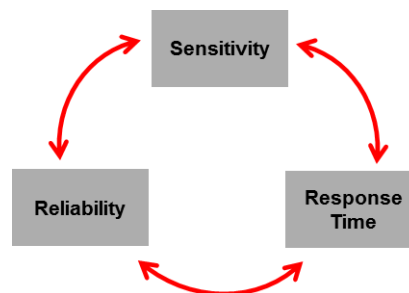


图 24. 调优注意事项

灵敏度调优检查清单

表 12. 灵敏度调优检查清单

编号	参数	位置	建议
1	转换增益	传感器属性 → Conversion_Control	100
2	转换计数	传感器属性 → Conversion_Control	取决于传感器和机械设计。从较小的数字开始并逐渐增加，直至达到所需的触摸增量。
3	分频器	传感器属性 → Conversion_Control	自电容: f/4 互电容: f/2
4	Delta (增量)	传感器属性 → 通道表	所需的触摸增量取决于应用

1 和 2. 转换增益和转换计数

- 转换增益和转换计数是用于确定传感器灵敏度的基本参数。它们用于调整传感器的分辨率和灵敏度。
- 对于大多数应用，转换增益应设置为 100（最小值）。
- 应从较小的数字开始调整转换计数，并逐渐增加，直至达到所需的触摸增量。
- 按钮的典型触摸增量为 50，滑块和滚轮的触摸增量为 50 到 100。
- 这两个参数适用于此传感器组中的所有传感器元件。

3. 分频器

- 转换分频器允许转换时钟从 16MHz 的基本速率分频。转换时钟周期必须足够长，以确保完整的电荷转移阶段。
- 在典型设计中，自电容分频器应设置为 f/4，互电容分频器应设置为 f/2。

4. Delta (增量)

- Delta (增量) 通常是指由于接近或触摸条件引起的电极电容变化引起的测量变化。
Delta (增量) = 信号计数 - 长期平均值 (LTA)
- 长期平均值 (LTA) 是感应信号的基线计数。

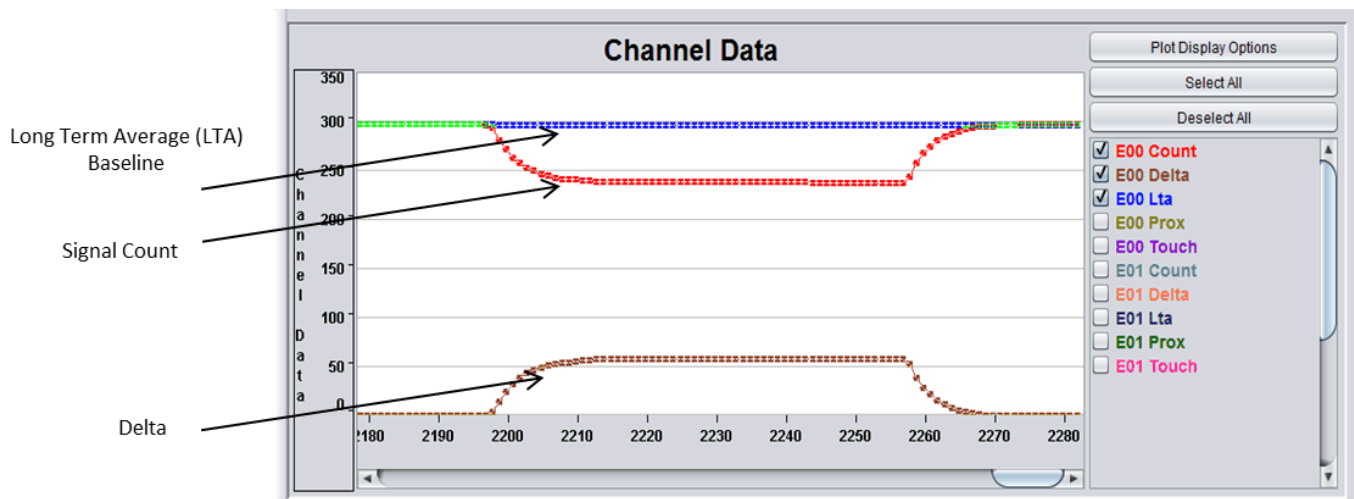


图 25. Delta (增量)

表 13 是可靠性调优检查清单。

表 13. 可靠性调优检查清单

编号	参数	位置	建议
1	接近阈值	传感器属性 → 调优	该接近阈值是计数的绝对值而不是百分比。该值因应用而异。
2	触摸阈值	传感器属性 → 调优	该触摸阈值是 LTA 的百分比值。该值取决于 PCB 和覆层设计。
3	信噪比测量	传感器属性 → SNR	向前移动前，运行 SNR 测量 确保建议值 = GOOD
4	接近去抖	传感器属性 → 调优	去抖进 = 1 去抖出 = 1
5	触摸去抖	传感器属性 → 调优	去抖进 = 2 去抖出 = 2
6	噪声抗扰度	控制器属性 → 编译时间选项	如果环境和系统有噪声 → 启用噪声抗扰度
7	误差阈值	传感器属性 → 调优	长期平均值 (LTA) x 2
8	传感器超时阈值	传感器属性 → 调优	65535 (关闭) 或取决于应用
9	计数滤波器 β	传感器属性 → 调优	1 或 2
10	LTA 滤波器 β	传感器属性 → 调优	7

1. 接近阈值

- 该值用于设置用户进行接近检测所需的交互级别。

$$\text{Sensor State} = \begin{cases} \text{Proximity On} & \text{if Delta} > \text{Prox Threshold} \\ \text{Proximity Off} & \text{if Delta} < \text{Prox Threshold} \end{cases}$$

图 26. 接近阈值

- 如果应用是接近检测，请将手放在应能触发接近检测的距离处。记录该传感器的增量并将接近阈值设置为增量。还要确保接近阈值大于噪声引起的增量。
- 如果应用仅为触摸检测，则只需确保接近阈值大于噪声引起的增量并且还大于触摸阈值增量。

2. 触摸阈值

- 该值用于设置用户进行触摸检测所需的交互级别。
- 它是长期平均 (LTA) 基线值的百分比。它取决于 PCB 和覆层设计。

$$\text{Sensor State} = \begin{cases} \text{Touch On} & \text{if Delta} > \text{LTA} * (\text{Touch Threshold} / 128) \\ \text{Touch Off} & \text{if Delta} < \text{LTA} * (\text{Touch Threshold} / 128) \end{cases}$$

图 27. 触摸阈值

- 您可以为传感器组中的各个元件选择“触摸阈值”。

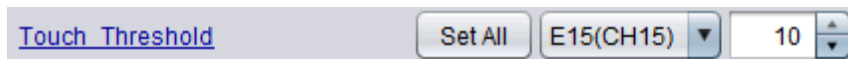


图 28. 更改触摸阈值

3. SNR 测量

- 完成灵敏度调优检查清单并设置接近阈值和触摸阈值后。根据调优参数，使用 SNR 测量工具检查系统可靠性。这是调优过程的关键步骤。
- 确保该工具的建议为 **GOOD**，然后继续进行调优过程。否则，请返回调整调优参数或更改硬件设计。有关详细信息，请参阅 [电容式触摸应用中的灵敏度、SNR 和设计裕度](#)。

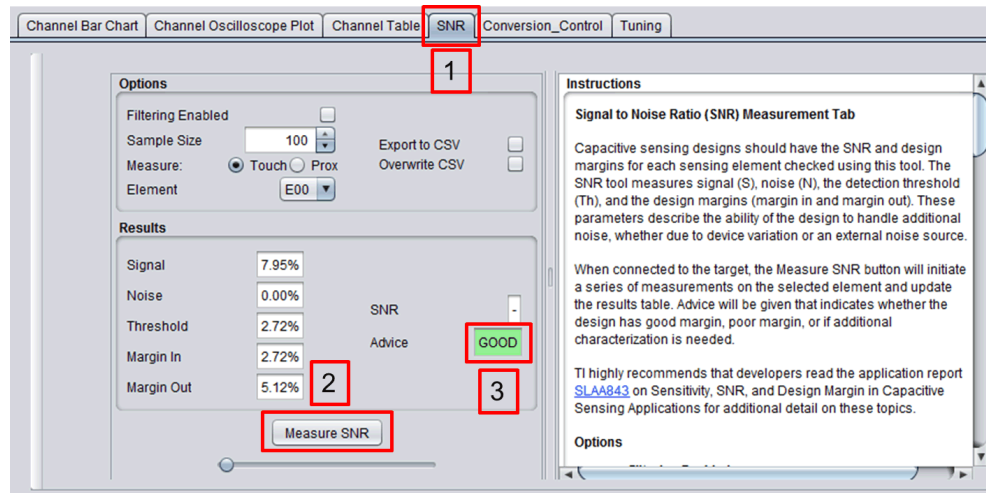


图 29. SNR 测量

4 和 5. 接近去抖和触摸去抖

- 它们用于选择传感器必须处于检测状态的连续样本数，以便生成系统的检测状态。这是为了防止瞬态噪声信号导致误触检测。

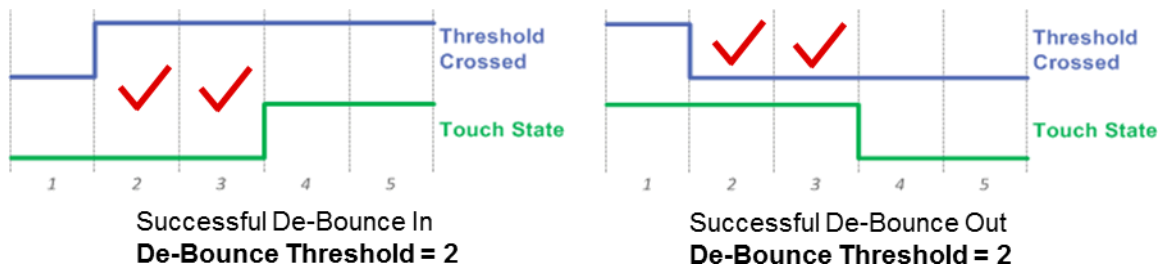


图 30. 接近和触摸去抖

- 触摸去抖参数通常设置为 2，以便进行可靠的传感器状态检测。可以根据系统的噪声方面提高或降低该值。

6. 噪声抗扰度

根据步骤 2 中定义的工作条件，如果应用需要抗噪功能，您可以在 CapTivate 设计中心中启用软件抗噪功能。有关详细信息，请参阅抗噪调优检查清单。

表 14 是响应时间调优检查清单。

表 14. 响应时间调优检查清单

编号	参数	位置	建议
1	活动模式扫描速率 (ms)	控制器属性 → 转换控制	典型 HMI 应用, 33ms (30Hz)
2	扫描时间估计	控制器属性 → 扫描时间估计	
3	触摸去抖	传感器属性 → 调优	去抖进 = 2 去抖出 = 1

1. 活动模式扫描速率

- 活动模式扫描速率指定在活动模式下刷新用户界面的周期（以毫秒为单位）。
- 要转换为每秒采样数 (sps)，请用 1000 除以指定的扫描速率周期。例如，50ms 的扫描速率相当于 20sps。
- 扫描速率周期越短，应用响应速率越高，但功耗越高。典型 HMI 应用 使用 33ms (30Hz) 的扫描周期。

2. 扫描时间估计

确保扫描速率周期比扫描所有传感器所需的时间长。此窗口显示估计值：

- 扫描每个传感器所需的时间
- 扫描所有传感器所需的时间
- 扫描速率周期

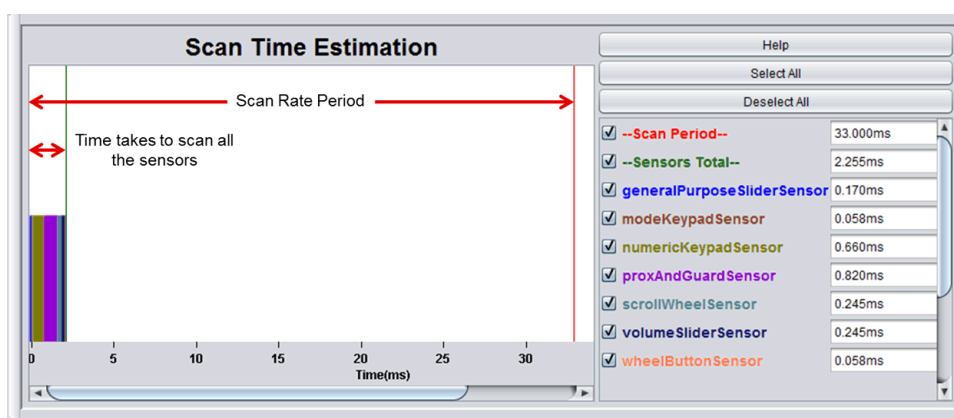


图 31. 扫描时间估计

3. 触摸去抖

- 此参数在可靠性检查清单中设置，也会影响响应时间。
- 系统在检测到传感器触摸后报告触摸信号所需的时间可以计算出来，如图 32 所示。

$$\text{Sensor Response Time} = \frac{\text{Debounce In}}{\text{Sample per Second}}$$

图 32. 响应时间方程式

步骤 5b.5: 更新源代码

在实时调优和配置之后，您可以使用 CapTlvate 设计中心用最新的调整参数更新源代码。输出目录必须是 IDE 源代码项目目录。

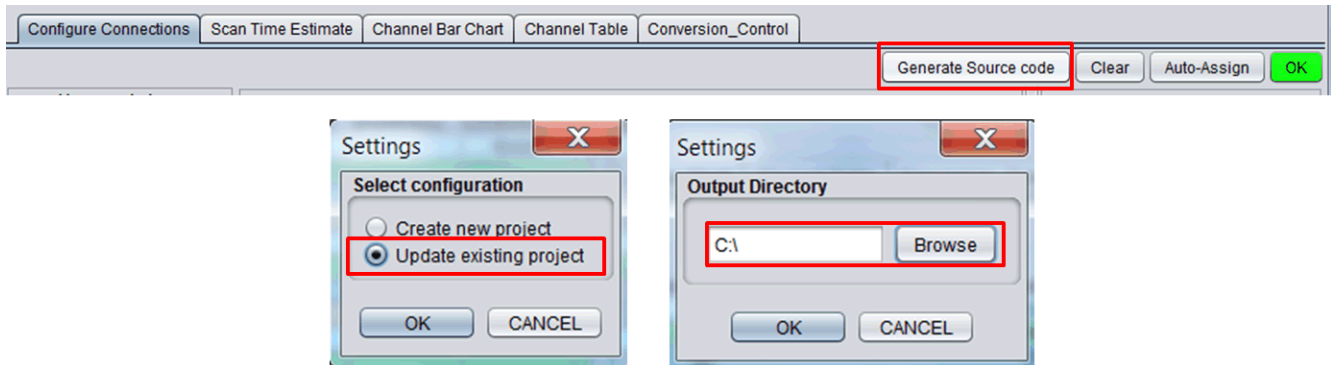


图 33. 更新源代码

步骤 5c: 固件开发

在完成基本的 CapTlvate 调优过程之后，下一步是根据特定的应用要求完成固件开发。

步骤 5c.1: 访问传感器数据

- 通常，CapTlvate 软件库的工作原理是刷新对象中的数据，而不是直接通过函数调用返回结果。
- 应用负责在适当的对象数据结构中访问测量结果。回调函数可以注册到任何传感器，每当刷新传感器数据时必须调用该传感器。
- 以下链接是有关如何访问传感器数据的示例：
 - [注册回调函数](#)
 - [访问元件状态数据](#)
 - [访问元件测量数据](#)
 - [访问主导按钮](#)
 - [访问滑块或滚轮位置](#)

步骤 5c.2: 自定义通信代码

- 许多应用需要一个接口将电容式触摸状态传达给系统中的主机或驱动器（例如，另一个 MCU、LED 驱动器或电机驱动器）。
- 该接口可以是 I²C、SPI、UART 或 GPIO。
- CapTlvate 库包括一个通信模块，用于通过 UART 或 I²C 串行接口将 CapTlvate MCU 连接到外部组件。有关详细信息，请参阅[通信模块](#)。

步骤 5c.3: 优化低功耗

- 如果应用是电池供电并且需要极低的功耗以延长电池寿命和产品货架期，则优化系统功耗至关重要。
- MSP430 MCU 上的 CapTlvate 外设可实现极低功耗的用户界面设计。低功耗是可以实现的，因为 CapTlvate 外设包括一个处理状态机，当 MCU 处于 LPM3 状态而没有任何 CPU 交互时，它执行基本功能。

有关详细信息，请参阅[超低功耗优化](#)。

8 步骤 6: 系统集成和原型设计

设计成功的电容式触摸感应系统的第六步是将所有系统组件集成在一起，并构建原型设备以进行验证和现场测试。这些组件包括 PCB、覆层、外壳、固件和电源。

TI 建议尽可能像最终生产设备一样构建原型设备，以准确验证系统设计的性能和可靠性。

9 步骤 7: 系统验证和现场测试

设计成功的电容式触摸感应系统的第七步是在所有预期的运行条件下使用原型设备执行系统验证。TI 建议构建 20 到 50 个设备进行现场测试。

如果系统满足性能要求，设计可以转向大规模生产。如果系统不符合性能要求，您可以调整性能预期或重新访问系统设计。

表 15 是系统验证检查清单。

表 15. 系统验证检查清单

编号	用于测试的设计	建议
1	CapTIvate 设计中心通信接口	在电路板上放置一个 UART 或 I ² C 通信接口，用于连接 CapTIvate。可以在生产设备上删除此接口。
2	功能测试	使用设计中启用的所有功能测试设备。
3	EMC 测试	定义 EMC 测试标准和通过标准。
4	环境漂移测试	定义环境漂移测试标准和通过标准。
5	信噪比裕度分析	在设计中启用所有噪声源的情况下，使用 CapTIvate 设计中心进行 SNR 测量。确保建议值 = GOOD

1. CapTIvate 设计中心通信接口

- 通过使用 CapTIvate 设计中心实时调优功能，可以更轻松、更可靠地监控电容式触摸性能。
- 强烈建议在原型设备和现场测试设备上为 CapTIvate 设计中心保留 UART 或 I²C 通信接口连接。可以在生产设备上禁用或删除它们。

2. 功能测试

为确保产品的可靠性，确保使用设计中启用的其他功能并在打开和关闭这些功能条件下测试电容式触摸性能。其他功能可能包括：LED 驱动器、电机驱动器、无线通信、近场通信 (NFC)、电池电源。

3. EMC 测试

- 定义 EMC 测试标准和应力水平以及通过标准。
- 示例：基于受试设备 (EUT) IEC 61000-4 标准的 A 类通过/失败标准
 - 在测试过程中测试完成后，EUT 均不得出现任何触摸检测错误
 - 在测试过程中和测试完成后，EUT 必须始终能够检测到有效的触摸。
 - 如果 EUT 包含滑块或滚轮传感器，则必须在测试过程中和测试完成后准确报告位置，并在可接受的范围内。
 - 测试过程中，EUT 不得出现处理器复位情况。

请参阅[抗噪电容式触摸人机界面设计指南](#)，了解有关 EMC 测试的完整详细信息。

4. 温度漂移测试

- 定义产品工作温度范围、最快预期变化率和通过标准。
- 定义产品工作湿度百分比范围和通过标准。

5. 信噪比裕度分析

使用 CapTlvate 设计中心在系统中启用所有噪声源的情况下执行 SNR 测量，并确保获得 GOOD 建议。有关详细信息，请参阅[电容式触摸应用中的灵敏度、SNR 和设计裕度](#)。

10 步骤 8: 大规模生产

设计成功的电容式触摸感应系统的最后一步是准备大规模生产。

表 16 大规模生产检查清单。

表 16. 大规模生产检查清单

编号	项目	建议
1	生产测试计划	与制造商合作制定生产测试计划，特别是电容式触摸性能通过标准。
2	生产固件	删除开发软件。

1. 生产测试计划

- TI 强烈建议您在生产测试计划中与制造商密切合作。确保生产线的工艺在所有设备上保持一致，以确保性能可靠。
- 电容式触摸生产测试计划包括电容式触摸测试装置和系统通过/失败标准。

2. 生产固件

删除所有开发软件，如 CapTlvate 设计中心通信接口代码。如有必要，添加生产线系统诊断代码。

11 参考文献

1. [CapTlvate™ 技术指南](#)
2. [MSP430™ 电容式触摸感应微控制器](#)

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from December 10, 2018 to May 1, 2019	Page
• 在 节 5.1.1	7
• 更新了表 6, <i>CapTIvate</i> 系列器件.....	8
• 添加了表 7: 器件迭代.....	9
• 添加了表 8: 第一代和第二代器件特性 比较.....	9
• 在6节步骤 4: 硬件开发 的步骤 4a.4 中添加了以“如果启用了 DVCC模式...”开头的句子.....	11
• 在表 10 <i>PCB</i> 布局设计检查清单 中添加了第 8 条“防潮湿和耐液体性”和第 10 条“噪声抗扰度”两行.....	13
• 在6节的步骤 4: 硬件开发 中添加了“步骤 4b.8: 防潮湿和耐液体性”.....	17
• 在表 11 机械设计检查清单 中添加了第 5 行“噪声抗扰度”.....	17
• 删除了6节, 第 4 步: 硬件开发中的前一节“步骤 4d: 抗噪硬件注意事项”.....	18
• 更改了7节中第 5 步: 固件开发和系统调优的“6. 噪声抗扰度”第一段“噪声抗扰度调优检查清单”的连接。.....	24

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司