

Joe Wang, Sal Ye

摘要

本应用手册介绍了使用电容式触控 MCU 进行液位检测的系统解决方案。本手册首先介绍使用电容式触控检测液位的基本原理，然后使用 MSP430FR2533 电容式触控 MCU 来设计系统、完成软件代码的调试，并使用基准测试来验证解决方案。测试结果表明，该解决方案可以准确测量液体的深度。此外，对四种不同的电极连接方法和两种不同的电容测量方法进行了测试和比较。最后，本手册针对较小液位高度测量时存在的大误差，引入了一项软件优化。

内容

1 引言.....	1
2 自感电容式触控的基本知识和原理.....	2
3 MSP430FR2533 液位测量应用.....	4
3.1 系统设计.....	4
3.2 硬件设计.....	4
3.3 软件设计.....	6
3.4 测试结果.....	7
4 结语.....	12
5 参考文献.....	12
6 修订历史记录.....	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在电容式触控的一些应用场景中，客户可能不想用电容式触控来检测按钮是否被按下，而是想利用电容式触控的原理来检测液体的深度，例如加湿器水箱或扫地机器人水箱中水的深度。为满足客户的需求，本手册设计了一种基于 MSP430FR2533 电容式触控 MCU 的液位检测系统，可以简单、方便、灵活地测量液深，既能实现高精度的水位测量，还能确保较低的系统成本。图 1-1 是液位检测系统的简化原理图。

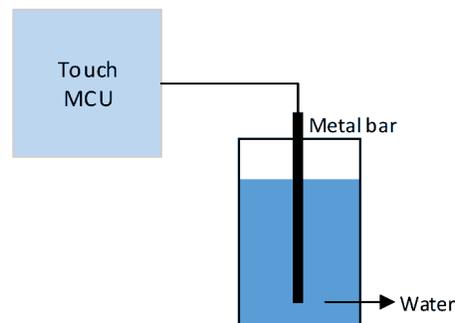


图 1-1. 液位检测系统的简化原理图

2 自感电容式触控的基本知识和原理

以简单的单按钮为例，图 2-1 显示了自感电容，图 2-2 显示了检测模型。自感电容采用通过镀铜形成的单电极（接收电极 Rx）来检测电极对电力线接地的电容变化。按钮到电力线接地的初始电容为 C_p 。用手触摸它时，电路中会产生 C_t 、 C_h 和 C_g ，从而增加按钮对接地的电容。

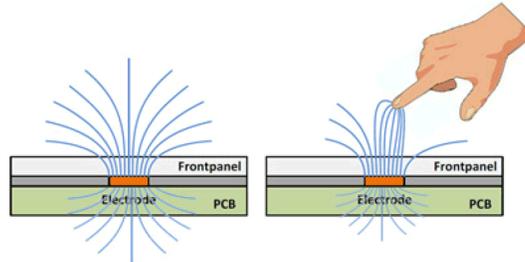


图 2-1. 自电容检测

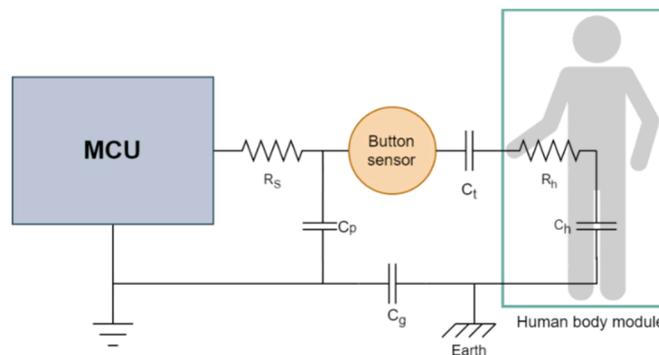


图 2-2. 自电容检测模型

在图 2-2 中，实线表示 PCB 布线，虚线表示与触控相关的布线。灰色元件表示等效电容或电阻。

R_h = 人体电阻。

R_s = 串联电阻。建议值为 $470\ \Omega$ 。

C_p = 按钮和连接线到电力线接地的寄生电容。

C_g = 电力线接地和大地之间的电容。对于电池应用，它约为 1pF 。对于接地应用，它是一个短路。

C_h = 人体与大地之间的串联电容。

C_t = 电平与人指尖形成的电容，其结构类似于平行板电容。

为了便于分析，我们将 R_h 和 R_s 的影响忽略不计。方程式 1 显示了按钮到电力线接地的等效电容。灵敏度可以表征为触摸引起的电容变化与基础电容的比值，如方程式 2 所示。其中， C_h 大于 C_g 和 C_t ，因此可以忽略不计。

$$C_{equal} = C_{touch} + C_{base} = C_t || C_h || C_g + C_p \approx C_t || C_g + C_p \quad (1)$$

$$Sensitivity = \frac{C_{equal} - C_{base}}{C_{base}} = \frac{C_t || C_h || C_g}{C_p} \approx \frac{C_t || C_g}{C_p} \quad (2)$$

平行板电容通过以下公式计算：

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3)$$

其中：

- A = 手指和传感器垫覆盖层之间的接触面积。
- d = 覆盖层的厚度。
- ϵ_0 = 空气介电常数。
- ϵ_r = 覆盖层的介电常数。

从方程式 2 和方程式 3 可以看出，改变灵敏度的方法有：

- 减小覆盖层的厚度以提高灵敏度。
- 减小电网接地的密度，或增加 PCB 厚度以降低灵敏度。
- 将电源接地连接到大地以提高灵敏度。
- 增大手指与传感器垫覆盖层的接触面积 A 以提高灵敏度。

电极尺寸不能无限增大。主要原因是，平行板电容 C_t 的最大有效面积与手指触摸面积相同。因此， C_t 也会增大，导致灵敏度降低。

TI 的 CapTIvate 电容式触控感应技术是基于电荷转移收集过程实现的。具体操作包括：1) 对传感器输入电容器 C_{equal} 充电；2) 将累积的电荷转移到内部采样电容器 C_{sample} 。

重复该过程，直到 C_{sample} 两侧的电压达到内部比较器的触发电压 V_{trip} 。达到阈值所需的电荷转移次数直接表征了 C_{equal} 的大小。如果用手触摸电容式传感器， C_{equal} 和电荷转移值就会发生变化。MCU 通过比较不同的电荷转移周期数来感知触摸事件的发生。MSP430 MCU 采用电流镜控制 C_{sample} 的输入电流与 C_{equal} 的放电电流之间的比例关系，以便对 C_{sample} 进行等效放大并得到一个更大的范围。对于自电容检测， C_{equal} 等于接地和 RX I/O 端口之间的电容。通过对接地的充电和放电， C_{equal} 中的电荷将转移至内部 C_{sample} 。

上述内容是关于用手触摸按钮时，按钮电容值所发生的变化。同样，如果将按钮换成金属导体棒，将人体换成液态物质（如水），当水接触金属导体棒时，会让整个金属棒对地的电容发生变化。金属棒对地的电容值也会随着水位的变化而变化。通过电容值的变化，我们可以判断被检测物体中是否有水，以及水位的深度。图 2-3 显示了检测模型。

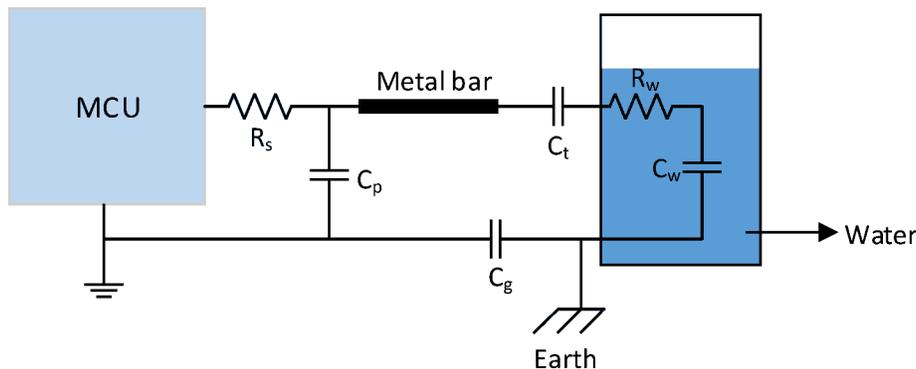


图 2-3. 液位检测模型

3 MSP430FR2533 液位测量应用

本章将使用 CapTIvate 设计中心完成液体检测系统的设计，并在此基础上完成用于液位检测的 MSP430FR2533 硬件平台和系统算法编写。同时，进行了不同电极连接和测量方法的对比测试。最后，针对低高度测量误差较大的问题，引入了一种软件优化方法。

3.1 系统设计

配置 GUI。配置相应的 MCU 和虚拟传感器，并生成程序源代码。有关具体流程，请参阅 CapTIvate 手册。图 3-1 显示了电容式触控工程文件和生成的源代码。

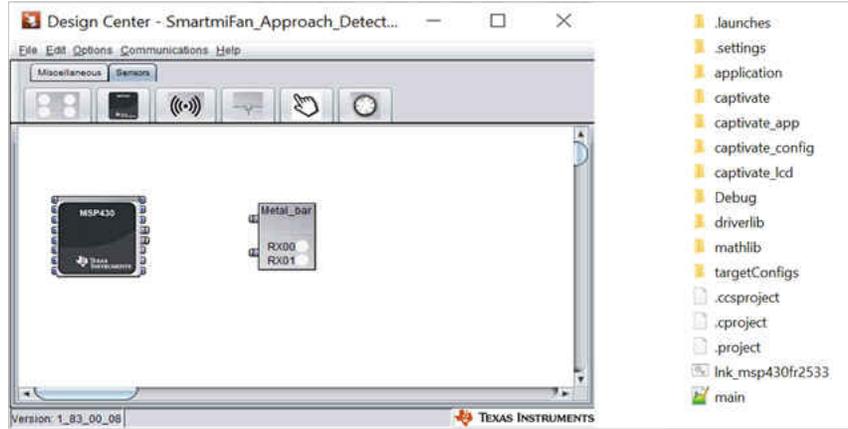


图 3-1. 电容式触控工程文件和生成的源代码

图 3-2 显示了 CapTIvate 中的重要参数关系，其中的参数与液位检测相关。

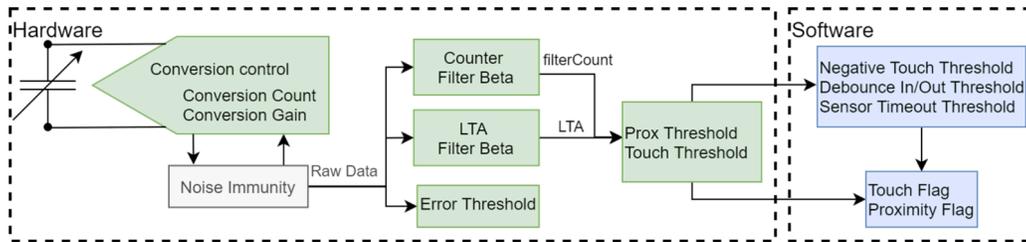


图 3-2. 参数关系

参数分为硬件配置参数和软件配置参数。首先，采样模块通过检测外部电容生成原始数据。“转换计数”和“转换增益”决定了采样模块的增益。然后数据通过可选的抗噪声模块（展频频谱采样、过采样等功能），实现噪声滤除。输出数据首先与“错误阈值”进行比较。随后通过不同强度的 IIR 滤波生成 filterCount，用于表征实时电容变化，并使用 LTA（长期平均值，默认值为 7）来表征环境的基础电容。此处的 filterCount 对应的是 GUI 数据监控模块中的“Count”，LTA 对应的是“LTA”。两者之间的差值 Delta 用于表征触摸产生的电容变化。触摸引起的电容变化百分比与 filterCount 和 LTA 之间的关系如方程式 5 所示。对于自电容检测，Delta 为正值。

$$\Delta = \text{filterCount} - \text{LTA} \quad (4)$$

$$\Delta C_{\text{touch}} = C_{\text{touch}} - C_{\text{base}} = \alpha * \text{Gain} \left(\frac{1}{\text{LTA} + \Delta} - \frac{1}{\text{LTA}} \right) \quad (5)$$

3.2 硬件设计

此设计的硬件主要包括电源、MCU、LCD 显示屏和通信接口。电源可将由 USB 供电的 5V 转换为 3.3V，以供 MCU 使用。图 3-3 显示了 MCU 和外设电路的设计。图 3-4 显示了 LCD 设计。通信协议使用 I2C 和 UART。

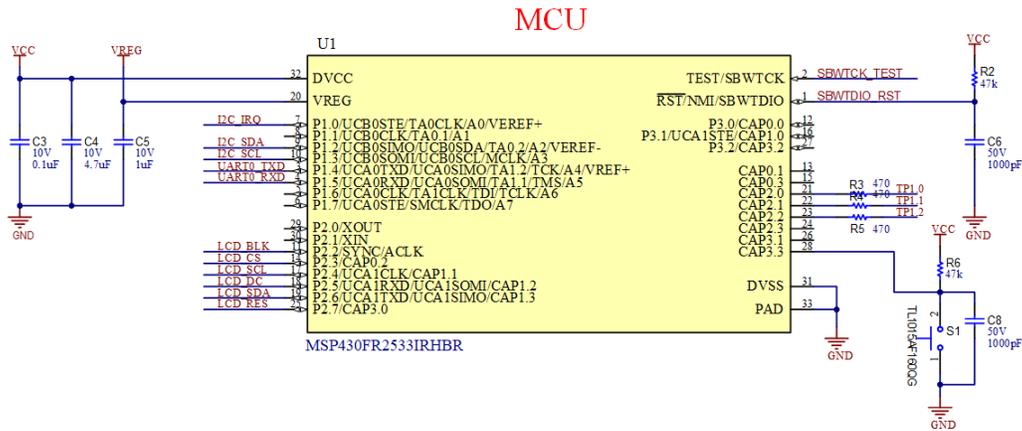


图 3-3. MSP430FR2533 的原理图

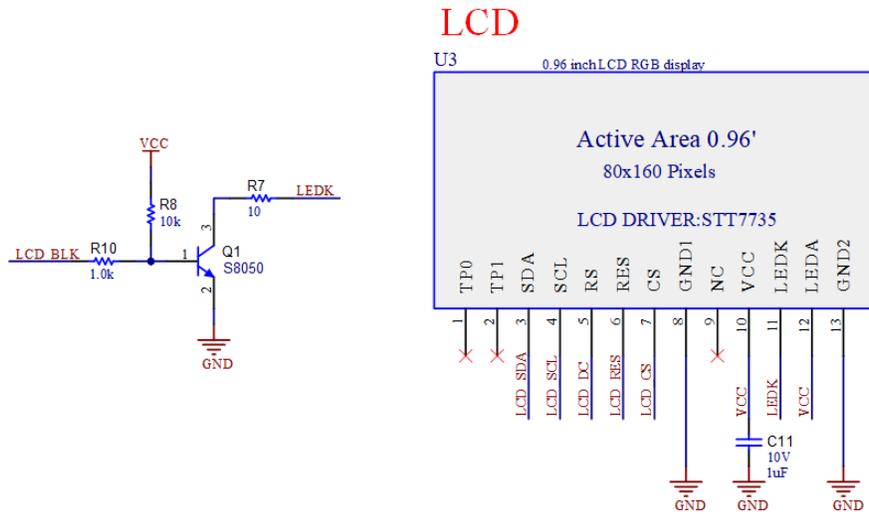


图 3-4. LCD 的原理图

图 3-5 显示了 3D PCB。本电路中设计了三个电极，分别用于环境校准、实际液位测量和液位警报提示。

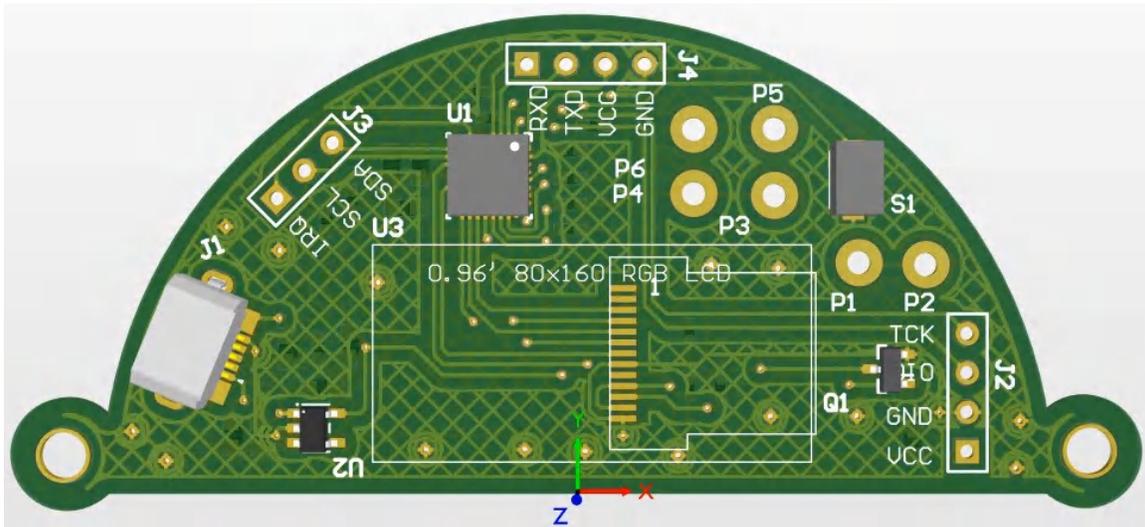


图 3-5. 液位测量应用的 PCB 和电路板

3.3 软件设计

A. 液位高度计算

要在 LCD 上显示液位高度，应用必须测量不同液位高度下的电容值。如方程式 6 所示，测量 LTA 和 COUNT，然后计算 ΔC_{touch} 。

$$\Delta C_{touch} = C_{touch} - C_{base} = \alpha * \text{Gain} \left(\frac{1}{LTA + \text{Delta}} - \frac{1}{LTA} \right) \quad (6)$$

通过测量多组数据，图 3-6 显示了液位高度与电容值变化之间的关系。根据拟合结果，液位高度与 ΔC_{touch} 之间的关系为： $Y = 341.5X - 34.249$ 。

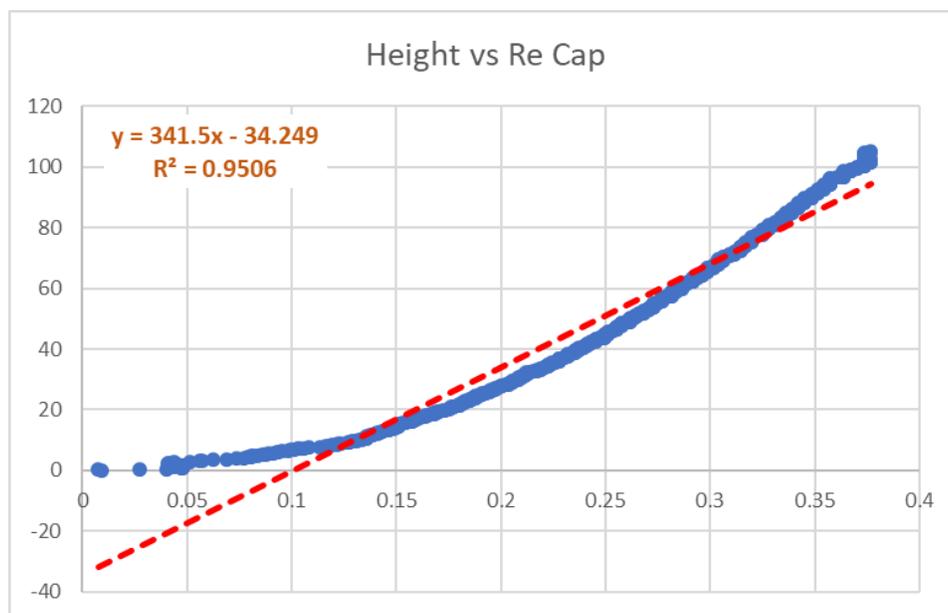


图 3-6. 高度和电容变化之间的对应关系

B. 流程图

该软件设计主要包括三个部分：电容检测、LCD 显示液位高度和 I2C 通信。图 3-7 显示了总体代码设计流程图。

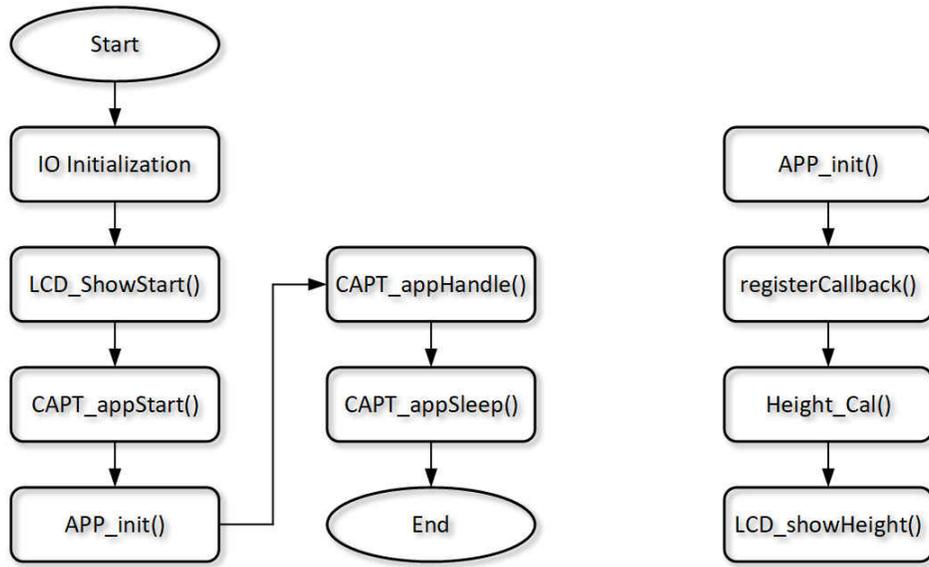


图 3-7. 总体代码设计流程图

程序启动时，MCU 对 IO 端口、时钟等进行初始化，然后 LCD 显示“Start”，表示可以进行测量。在短暂的延迟之后，通过 `CAPT_appStart()` 开始测量，并在 `APP_init()` 中调用测量函数。`APP_init()` 函数包括持续扫描每个通道，根据扫描的数据实时计算高度，并通过 LCD 显示。

C. 校准和通信

使用提供的 UART 和 I2C 库函数进行开发时，建议与主机 MCU 通信。首先，GUI 生成的默认代码将完成 `BSP_configureMCU()` 函数中 UART (eUSCI_A0) 和 I2C (eUSCI_B0) 的 IO 配置和时钟配置。因此，只需配置通信模块并编写通信协议。此设计使用 I2C 与主机通信，主机可以发送命令以执行校准并从从器件接收数据。具体操作步骤如下：

1. 直接修改 `CapTlvate_config`→`CAPT_UserConfig.h`→`CAPT_INTERFACE` 的定义，默认为 UART，更改为 I2C 通信
2. 编写自定义帧处理函数，因为 I2C 发送和接收在这里共享一个 32 字节缓冲区，并且该缓冲区中的接收和发送数据段具有 3 字节的偏移量。因此，缓冲区的第四个字节对应于所接收或发送数据的第一个字节。表 3-1 显示了通信协议。

表 3-1. I²C 通信协议

主器件	主机
pBuffer[0]-[3]	无关
pBuffer[4] = 01	需要校准
pBuffer[5] = 01	将高度数据保存到 pBuffer[6]
pBuffer[7] = 01	将代码版本保存到 pBuffer[8]
pBuffer[9] = 01	引导加载程序，软件更新

当 MCU 接收到主机发送的数据时，如果数据的第四位为 0x01，则 MCU 进行校准。如果数据的第五位为 0x01，则高度数据将存储在 `pBuffer[6]` 中，主机可以读取它。如果第 7 位为 0x01，主机可以从 `pBuffer[8]` 中读取版本号。如果第 9 位为 0x01，即引导加载程序，则可以更新软件。

3.4 测试结果

A. 测试环境

图 3-8 显示了测试环境，其中需要水槽、泵、PCB 和电极（金属棒）。PCB 设计成半圆形，便于将杯子装满水。

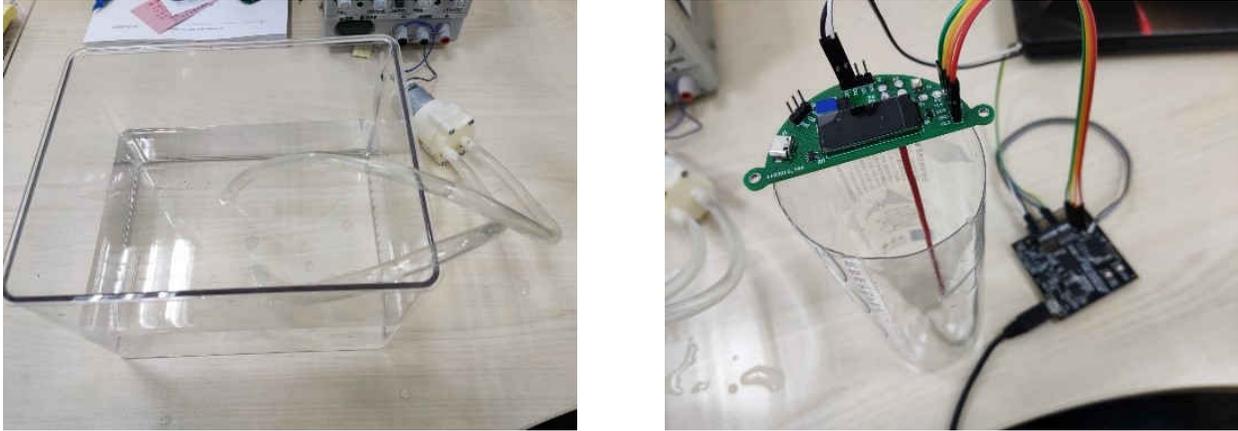


图 3-8. 液位检测的测试环境

B. 电极连接测试

为了探索不同电极连接对测量结果的影响，对不同电极连接进行了相对电容变化和高度测量。执行了四种不同的电极连接测试（请参阅图 3-9）。

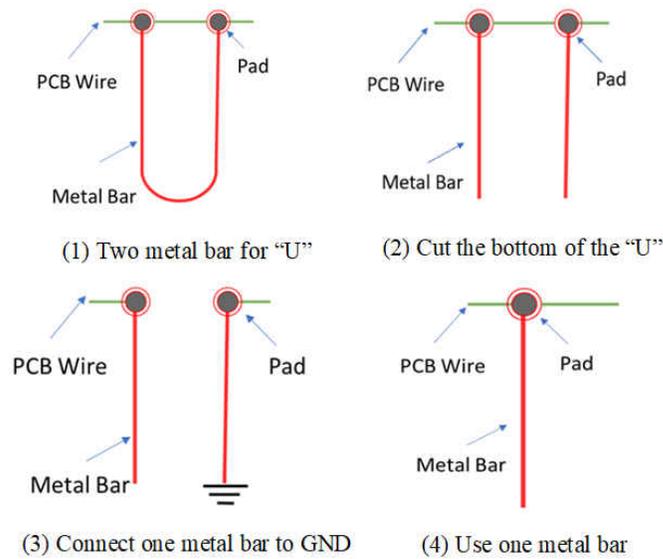
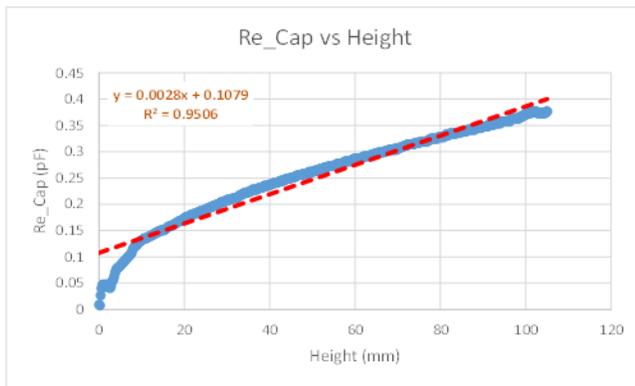
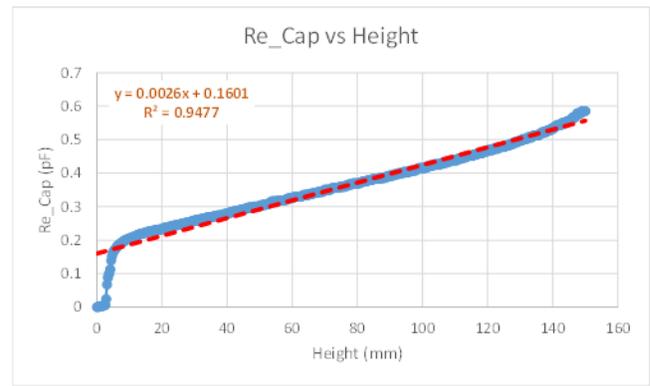


图 3-9. 四种不同的电极连接测试

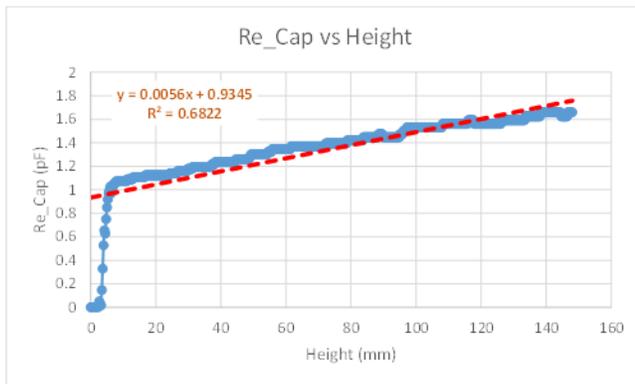
根据四种不同的电极连接方法，图 3-10 显示了相应的测试结果。



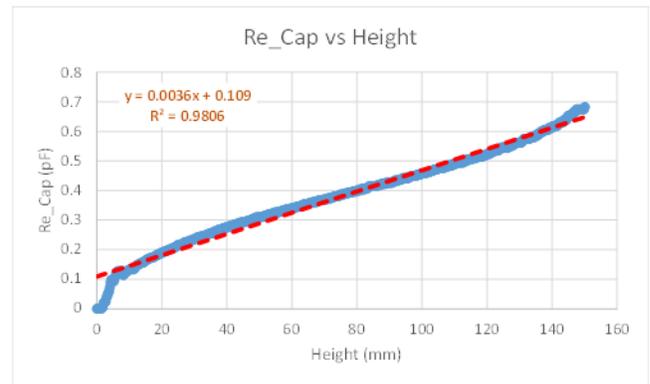
(1) Electrode Connections Test 1



(2) Electrode Connections Test 2



(3) Electrode Connections Test 3



(4) Electrode Connections Test 4

图 3-10. 四种连接下相对电容变化与高度之间的关系曲线

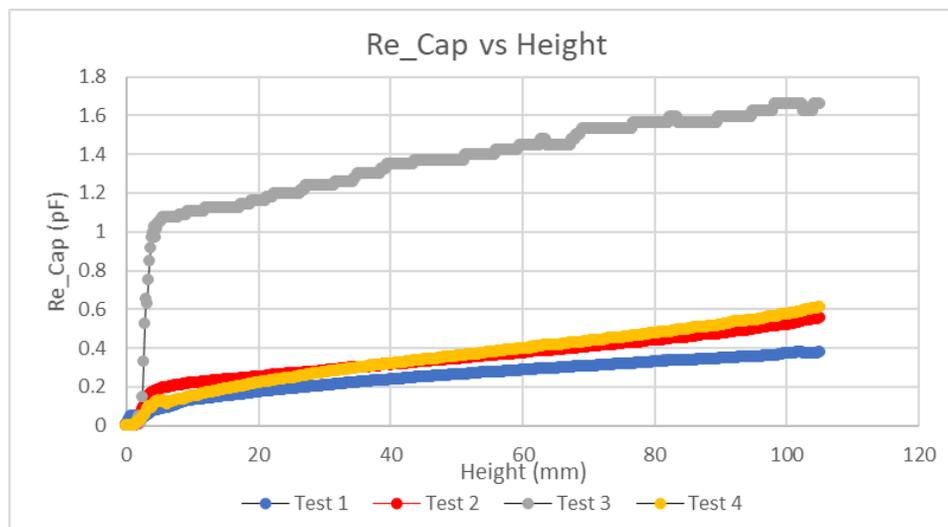


图 3-11. 测试 1 到测试 4 的结果比较

根据测试结果，当高度 < 10mm 时，由于曲线拟合不佳，所有测试的误差都很大。此外，图 3-11 显示测试 3 的结果较差，因为两个电极的底部铜线通过水连接在一起，形成短路。对于其余的三组测试，曲线的走势基本相同。表 3-2 仔细比较了每个测试的结果。

表 3-2. 所有测试的结果比较

测试	电容变化 (H = 10mm)	线性度 (R ²)	灵敏度 (每 10mm)
1	14%	0.9506	2.5%
2	20%	0.9477	2.88%
3	110%	0.6822	4.75%
4	15%	0.9806	3.25%

根据该表，综合比较电容变化 (H=10mm)、线性度和电容灵敏度，测试 4 结果最好。同时，测试 4 结构最简单，可轻松实现和应用。

C. 绝对电容测试

通常，电容测试有两种测量方法。第一种是测试相对电容变化，另一种是测试绝对电容变化。为了比较这两种方法之间的差异，在进行上述测量的同时测量了绝对电容。此处仅以测试 1 为例，测量结果如图 3-12 所示。

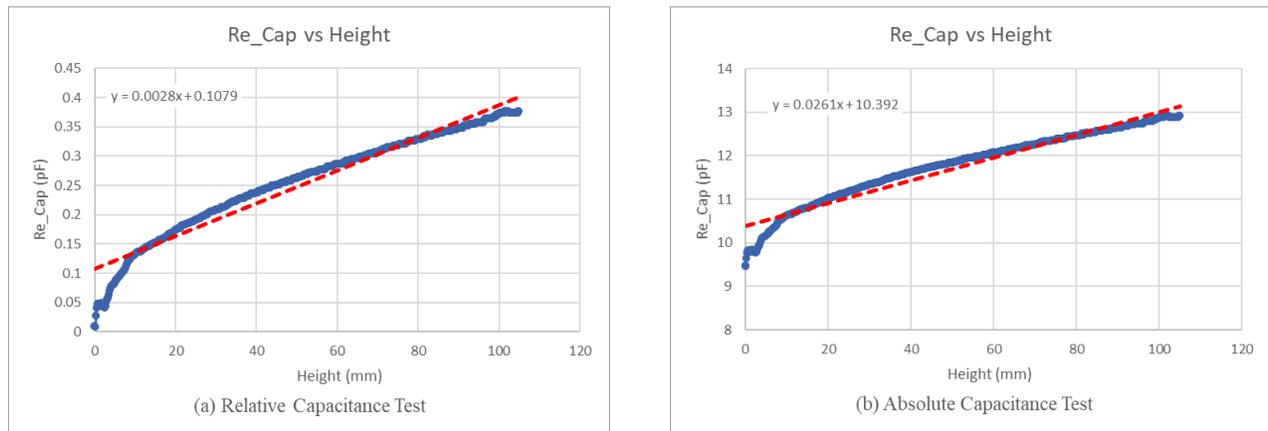


图 3-12. 相对电容和绝对电容测试的比较

通过比较上述结果，可以发现绝对电容测量可以读取电容的实际值，该值介于 9.5pF 和 13pF 之间。其变化趋势与相对电容的变化趋势相同。

比较这两者的分辨率，由于相对电容的基础电容较小，测量期间的分辨率较高，但绝对电容可以抑制温度漂移对测量结果的影响。因此，在不同的应用中，可以选择相应的测量方法进行测量。

D. 软件优化

根据前面的测试，当高度较小 (小于 20mm) 时，曲线拟合不好 (以测试 4 为例)，如图 3-13 所示，拟合函数可表示为： $Y = 248.5X - 21.604$ 。

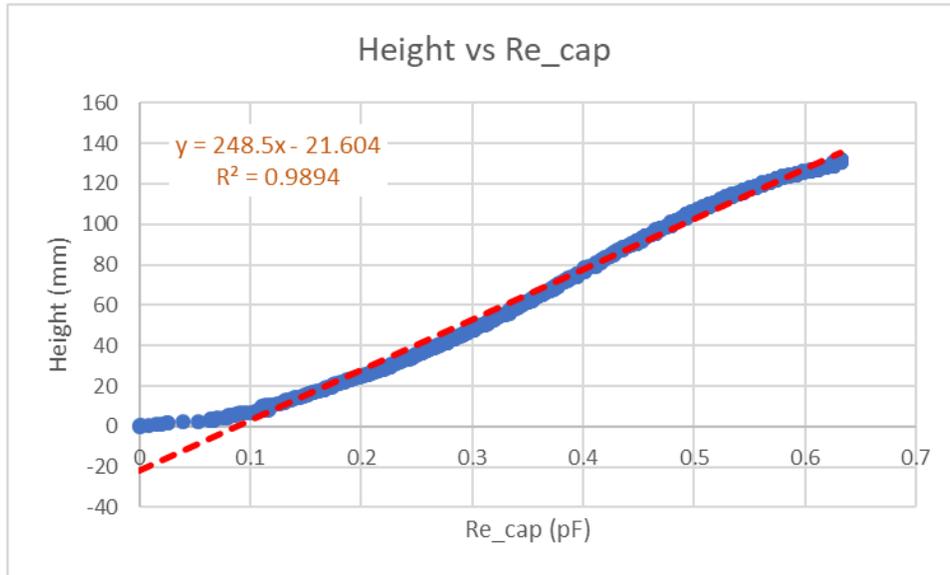


图 3-13. 高度与相对电容变化之间的关系曲线拟合

为了更直观地表达测量误差，该软件针对测量进行了优化。当高度小于 20mm 时，使用二次函数拟合；当高度大于 20mm 时，使用线性函数拟合，如图 3-14 所示。

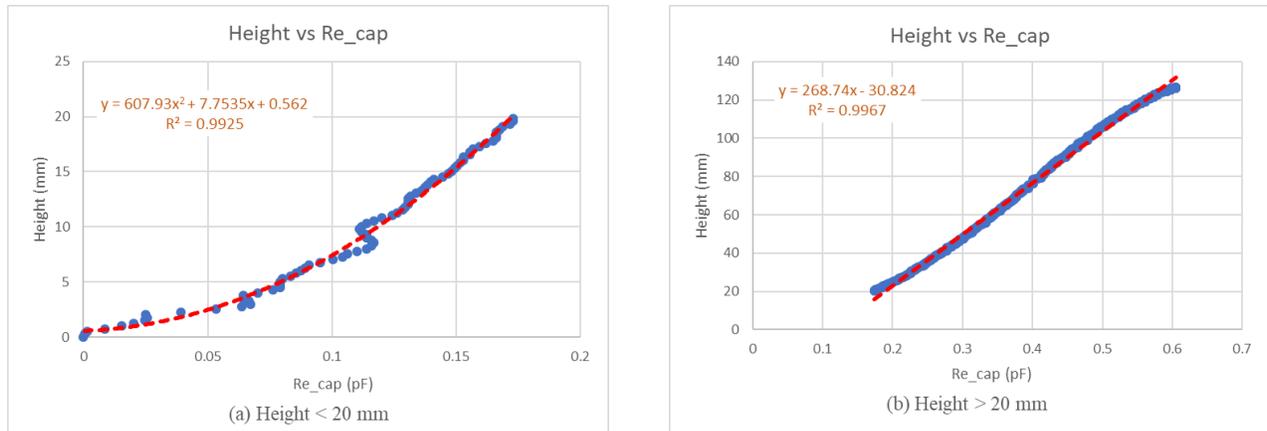


图 3-14. 高度与相对电容变化之间的关系曲线拟合 (软件优化)

对于两种拟合方法，每隔 10mm 进行一次测量，表 3-3 列出了产生的误差。

表 3-3. 软件优化测试的结果

实际高度 (mm)	LTA	数量	Delta (增量)	模拟 1 高度 (mm)	误差 1 (%)	模拟 2 高度 (mm)	误差 2 (%)
10	496	319	0.111867	6.194880069	-38.051199	8.96200886	-10.379911
20	496	266	0.174327	21.71624618	8.581230	20.206227	1.031135
30	496	234	0.225738	34.49177474	14.972582	29.8407022	-0.530992
40	496	212	0.267871	44.96186022	12.404650	41.1635625	2.908906
50	496	19	0.308591	55.08090783	10.161815	52.1067933	4.213586
60	496	183	0.344835	64.08754328	6.812572	61.8470074	3.078345
70	496	173	0.376422	71.93681205	2.766874	70.3355889	0.479412
80	496	163	0.411884	80.74918128	0.936476	79.865714	-0.167857
90	496	155	0.443548	88.61777419	-1.535806	88.3751936	-1.805340

表 3-3. 软件优化测试的结果 (continued)

实际高度 (mm)	LTA	数量	Delta (增量)	模拟 1 高度 (mm)	误差 1 (%)	模拟 2 高度 (mm)	误差 2 (%)
100	496	147	0.478659	97.3428126	-2.657187	97.8108749	-2.189125

图 3-15 显示了这两种方法的测试误差。


图 3-15. 测试误差比较

显然，第一种方法在高度小于 20mm 时误差非常大，第二种方法在高度小于 20mm 时使用二次函数进行拟合，总体误差在 10.4% 以内，显著减小了测量误差。

综上所述，根据以上测量结果，在本实验中，使用单电极（测试 4）、相对电容和软件优化可以得到更好的测量结果。当然，根据不同的应用，可以选择其他测量方式或电极连接方式。

4 结语

本应用手册提供了一种基于 MSP430FR2533 电容式触控 MCU 的简单液位深度测量系统，并通过 LCD 显示液位高度。本手册主要介绍了电容式触控的工作原理以及相应的软件和硬件设计。根据该设计进行了多项测试，包括不同的电极连接测试、绝对电容和相对电容测试以及软件优化测试。测试结果表明，在此应用中采用**软件优化、单电极连接和相对电容测量方法**可以获得更好的测量结果。

MSP430 系列提供其他类型的 MCU 来实现液位检测。MSP430FR2512 可满足对更少 I/O 端口的需求，同时实现所需的功能。此外，针对特定应用，客户需要选择合适的系统设计、电极连接和测量方法。

5 参考文献

1. [CapTIvate™ Touch MCU 入门指南](#)
2. [MSP430FR263x、MSP430FR253x 电容式触控感应混合信号微控制器数据表](#)
3. [MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 系列用户指南](#)
4. [液位检测系统参考代码和 PCB 设计](#)

6 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 * (January 2022) to Revision A (October 2022)	Page
• 更改了本应用手册的标题；通篇进行了主要更新，将应用更改为使用 MSP430FR2533.....	1
• 将应用的全部内容更改为基于 MSP430FR2533 的新应用.....	4

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