

RX113 群

R30AN0218CC0100

Rev. 1.00

2016.12.31

CTSU 静电电容式触摸检测基础

要点

RX113 群产品内置了硬件 Capacitive Touch Sensor Unit (简称: CTSU)。通过检测电极与人体间产生的静电电容, 判定人体的触摸动作。

本应用说明介绍了静电电容式触摸检测的原理, 并详细地说明了 RX113 中采用的电流—频率转换方式。

对象 MCU

RX113 群

目录

1.	前言	4
2.	静电电容式触摸开关的基础.....	4
2.1	静电电容的发生	5
2.2	静电电容—电流的转换	6
2.3	电流的数值化	7
2.4	开关的 ON/OFF 判定	8
3.	瑞萨原创的静电电容式触摸检测系统.....	10
3.1	总述	10
3.2	硬件部分	11
3.2.1	概要	11
3.2.2	I/O Driver & Drive Pulse Generator.....	12
3.2.3	Analog Front End	12
3.2.4	Digital Control & CPU Unit.....	14
3.3	软件部分	16
3.3.1	软件整体框图	16
3.3.2	Physical Driver	17
3.3.3	Middleware.....	17
3.3.4	API	17
3.3.5	Application	17
3.3.6	Workbench Module	17
4.	基于 CTSU 的静电电容式触摸键构成方法	18
4.1	概要	18
4.2	触摸基板的设计	18
4.2.1	自电容方式触摸键的设计	18
4.2.2	互电容方式触摸键的设计	21
4.3	CTSU 设定	25
4.3.1	自电容方式的 CTSU 设定	25
4.3.2	互电容方式的 CTSU 设定	30
4.4	软件处理	30
4.4.1	自电容方式的软件处理	30
4.4.2	互电容方式的软件处理	32
5.	抗扰度	32
5.1	概要	32
5.2	基板的抗噪声对策	32
5.2.1	电源电路	32
5.2.2	Touch 电极及其引线	33
5.3	CTSU 的抗扰度	33
5.3.1	SCF 时钟的相移	33
5.3.2	SCF 驱动脉冲的边沿扩散	34
5.4	软件对策	35
5.4.1	漂移校正处理	35
5.4.2	随机噪声的对策	35
5.4.3	抖颤的对策	36

6. 附录	37
6.1 开关电容滤波器 (SCF)	37
公司主页和咨询窗口	39

1. 前言

利用人体和电极之间产生的静电电容进行工作的电容式触摸开关，最初应用于智能手机，进而又被广泛地应用在了家电产品、AV 机器、汽车以及工业设备上。由于触摸开关的组成无需机械部件，因此应用灵活，甚至可以安装在坚硬的曲面上。此外，利用传统开关难以判断手指在一维方向和二维方向的移动，但静电电容式触摸开关使之成为了可能。

本应用说明介绍静电电容式触摸开关的基础知识，并详细说明瑞萨设计的静电电容式触摸开关检测系统在静电触摸开关中的应用实例。

2. 静电电容式触摸开关的基础

和带有电气接点的普通开关不同，静电电容式触摸开关通过捕捉人体与电极之间静电电容（1pF 以下）的微弱变化，判断开关的 ON/OFF 状态。有很多种方法可以将静电电容量转换为开关的 ON/OFF 状态。其中最简单的方法，是利用静电电容和电阻形成低通滤波器(LPF)，通过测量充电/放电常数的变化判断静电电容的变化。这种方式被称为张弛振荡方式，由于其电路简单，无需专用的静电电容测量电路，因此应用广泛。但是这种方法的抗噪声性能偏弱，有时会由于照明灯具或家电产品的逆变噪声发生误判。

瑞萨开发的静电电容式触摸检测方法，利用开关电容滤波器（SCF）将静电电容量转换为电流量，对该信号放大和数字化处理后，用于判定开关的 ON/OFF 状态。这种方法具有灵敏度高，抗噪声性能强的优点。具体的检测流程如图 2.1 所示。

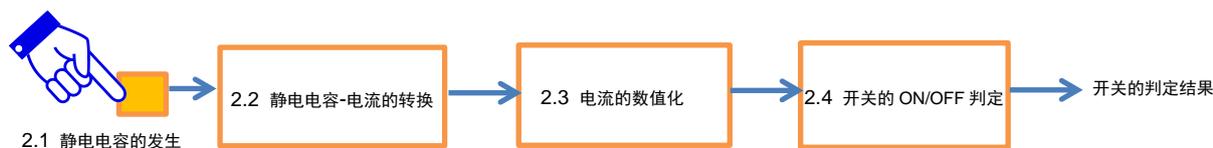


图 2.1 静电电容式触摸开关的检测流程（数字.数字表示章节号）

本章按照图 2.1 的流程，说明静电电容式触摸开关的基础知识。

2.1 静电电容的发生

静电电容发生的机理如图 2.2 所示。电极和其周围的导体（地线、金属框等）之间存在寄生电容（Parasitic Capacity: C_p ）。当人体接近、触摸电极时，人体和电极之间通过手指产生新增的静电电容（Finger Capacity: C_f ），并通过可以导电的人体和大地连接（如下图中红线所示）。

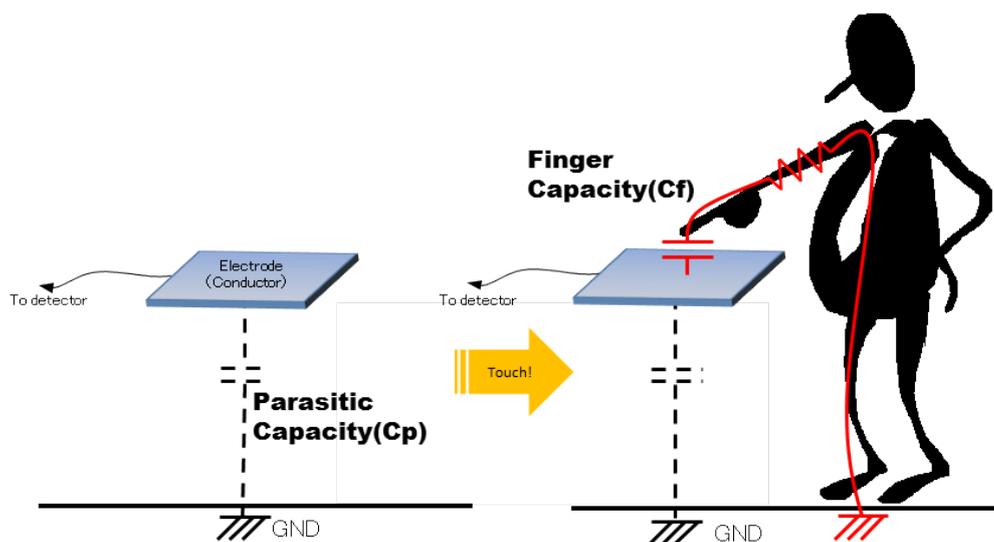


图 2.2 静电电容的发生（自电容方式）

电极上产生的静电电容的总容量（Total Capacity），如下所示：

$$\text{Total Capacity} = C_p + C_f$$

静电电容式触摸开关按照一定周期循环测量电极的静电电容量，并根据人体接触时产生的静电电容的增加量 C_f ，判定触摸开关的 ON 或者 OFF 状态。

以上开关被称为自电容方式的触摸开关。每个开关需要一个电极，且电极的形状简单，因此电路构成简单且容易实现。但是，和寄生电容 C_p 相比，接触产生的电容增加量 C_f 相对较小。为了确保电容测量电路的动态范围，电路构成相对困难，设计电路时需要尽量减小寄生电容量。

与单电极的自电容方式相对，每个触摸开关由 2 个电极构成的测量方式被称为互电容方式。如图 2.3 所示，互电容方式由接收电极、发送电极及脉冲发生器构成。发送电极输出交流脉冲时，和接收电极间产生电场耦合（Field Coupling）。此时，如果人体接近，一部分电场将耦合到人体，导致电极间的电场耦合减少。通过测量接收电极上电场耦合的减少，可以判断人体的接近。

和自电容方式相比，互电容方式的电路相对复杂。但是，影响自电容方式的寄生电容量对互电容方式的影响相对较小。互电容方式主要应用于触摸屏和按键矩阵。

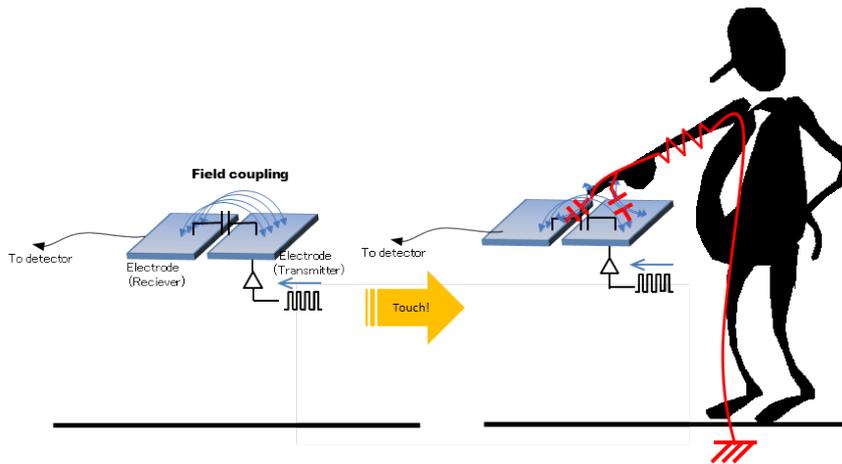


图 2.3 互电容方式

2.2 静电电容—电流的转换

如 2.1 章所述，将人体与电极之间产生的静电电容转换为电流的方法使用了开关电容滤波器（Switched Capacitor Filter: SCF）。如图 2.4 所示，SCF 是由 2 个开关、控制 2 个开关交互 ON/OFF 动作的控制脉冲、电源以及电容组成的。

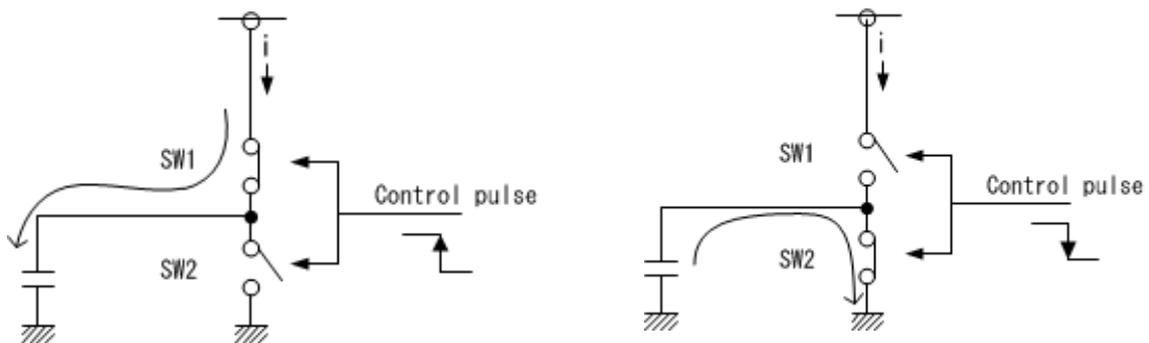


图 2.4 SCF 构成及电容的充放电动作

SW1 和 SW2 在控制脉冲的作用下，一个开关 ON 时，另外一个开关 OFF。如图 2.4 中的左图所示，当 SW1 = ON、SW2 = OFF 时，电容充电。随后，如图 2.4 中的右图所示，切换到 SW1 = OFF、SW2 = ON 的状态，电容放电。

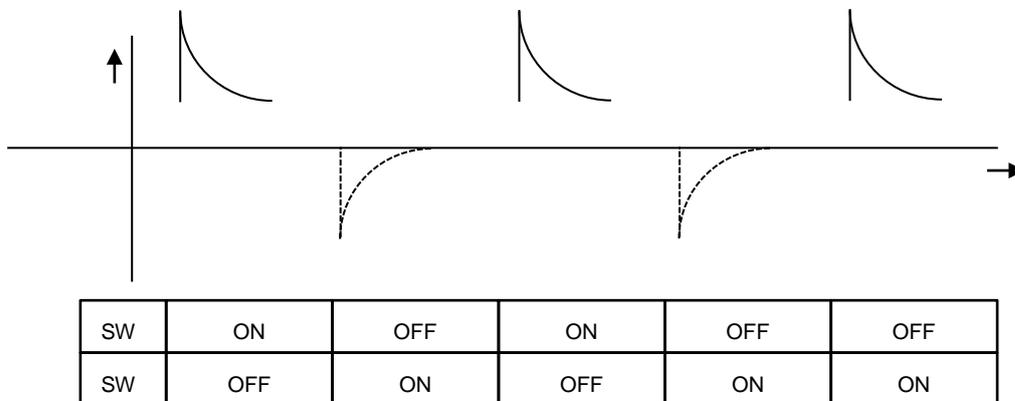


图 2.5 SW1、SW2 的状态和电流 i 的关系

按照一定周期循环切换 2 个开关的 ON/OFF 状态时，开关 SW 的状态和电路中电流 i 的关系如图 2.5 所示。SW1 闭合 (ON) 的瞬间，电容中的电荷为 0，充电电流以峰值向电容充电。随着电容充电的继续，电流下降，直至电容充满，充电电流下降为 0。然后，SW2 闭合 (ON)，电容通过大地放电。由于 SW1 断开 (OFF)，放电电流并不回流到电源 (图 2.5 中的虚线部分)。由此，按照一定周期循环 SW 的 ON/OFF 操作时，电路中会产生断续电流。

SW 的 ON/OFF 周期固定，电容值增加到 2 倍时，电流量也增加到 2 倍，如图 2.6 所示。电容值保持不变，SW 的 ON/OFF 切换频率增加到 2 倍时，电流量也增加到 2 倍，如图 2.7 所示。

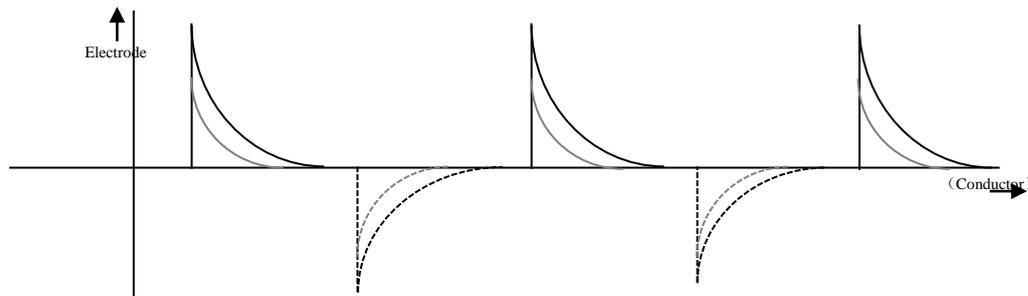


图 2.6 电容量加倍时的充电-放电

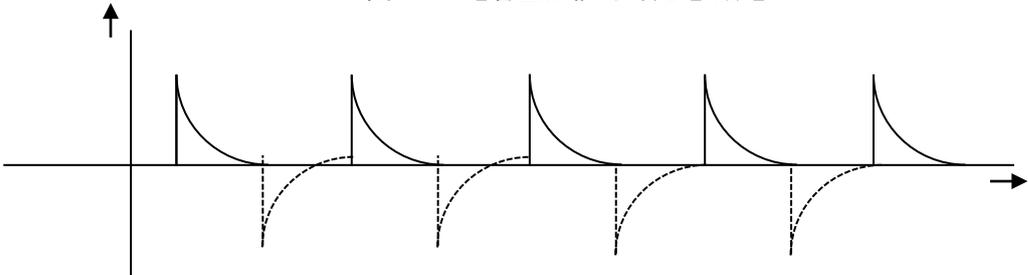


图 2.7 SW 切换频率加倍时的充电-放电

由此可见，流经电容的电流 i 、开关的切换频率 f 、电容值 c 和电路供电电压 v 之间的关系，如下式所示：

$$i = fcv$$

如果 f 和 v 固定不变，电流 i 和电容 c 成正比。因此，可以使用 SCF 将人体接近时产生的静电电容量的变化转换为电流量的变化。通过调整切换频率 f 和供电电压 v ，可以改变静电电容变化量和电流变化量之间的比例系数。

2.3 电流的数值化

电容的容量值转换为成比例的电流量后，经过电流—频率转换电路转换为和电流量成比例的振荡脉冲。然后，计数器对振荡脉冲计数，进而将电流转换为成比例的数字值。

电流的数值化流程，如图 2.8 所示。对 SCF 的电容循环执行充放电操作时，电容中会产生交流电流。后续的电平平滑电路将交流电流转换为直流电流后，电流输入到电流振荡器，转换为频率和输入电流成比例的振荡脉冲。脉冲计数器对一定时间内的脉冲计数，并保持计数结果。如图 2.8 所示，当 SCF 的频率固定，电容量增加到 2 倍时，电流量和电流振荡器的频率也增加到 2 倍，最终计数器的计数结果也相应增加到 2 倍（本例中，电容加倍后，计数结果也相应加倍：6→12）。

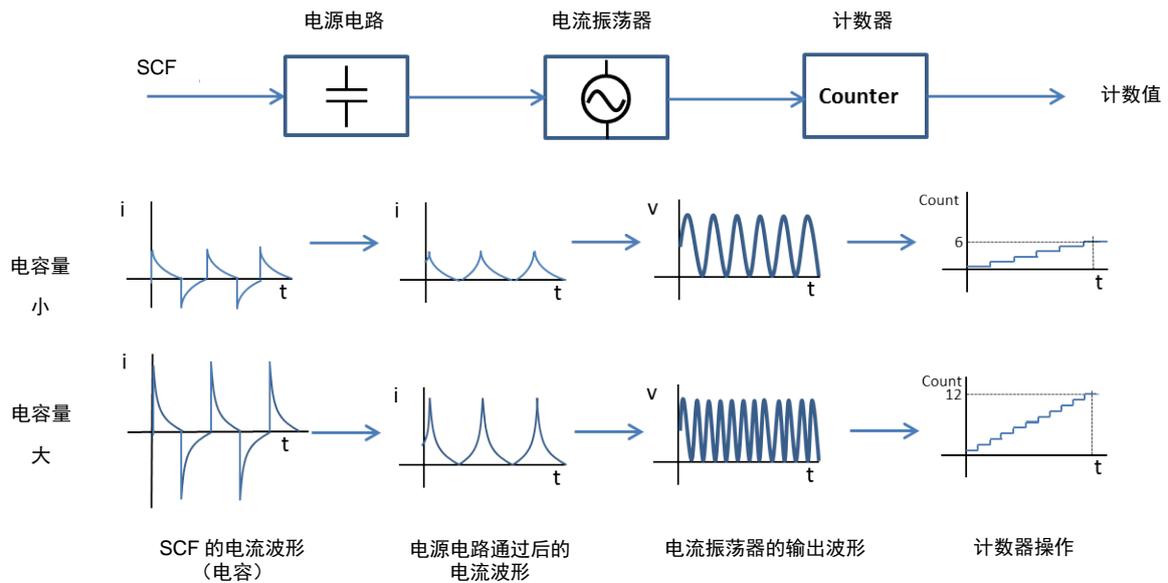


图 2.8 电流数值化的流程

2.4 开关的 ON/OFF 判定

如 2.1 章所述，自电容方式是通过检测静电电容量的增加来判断人体是否接触电极的。按照一定周期循环执行 2.1~2.3 章中介绍的静电电容量的测量，可以根据测量值的变化判定人体是否接触电极。

手指接近和离开电极时，开关的 ON/OFF 判定流程如图 2.9 所示。静电电容量的测量按图中所示的时序每隔一定时间执行一次。计测值如图中蓝线所示，当手指远离电极时，保持为一定的计数值；当手指接近电极时，静电电容量和计数值逐渐增加。当手指再次远离时，计数值逐渐下降并保持为一定的数值。把手指远离电极时的计数值作为基准值（图中绿色虚线）。在基准值基础上叠加一个阈值，作为临界值。当计测值超出临界值时，判定开关为 ON。当计测值低于临界值时，判定开关为 OFF。由此，可以实现静电触摸开关的 ON/OFF 切换。

此外，改变阈值的大小可以调整触摸开关的灵敏度。改变计测周期和计算多个计数值的平均值，可以抑制开关的抖颤，调整开关的反应速度。详细说明请见后续内容。

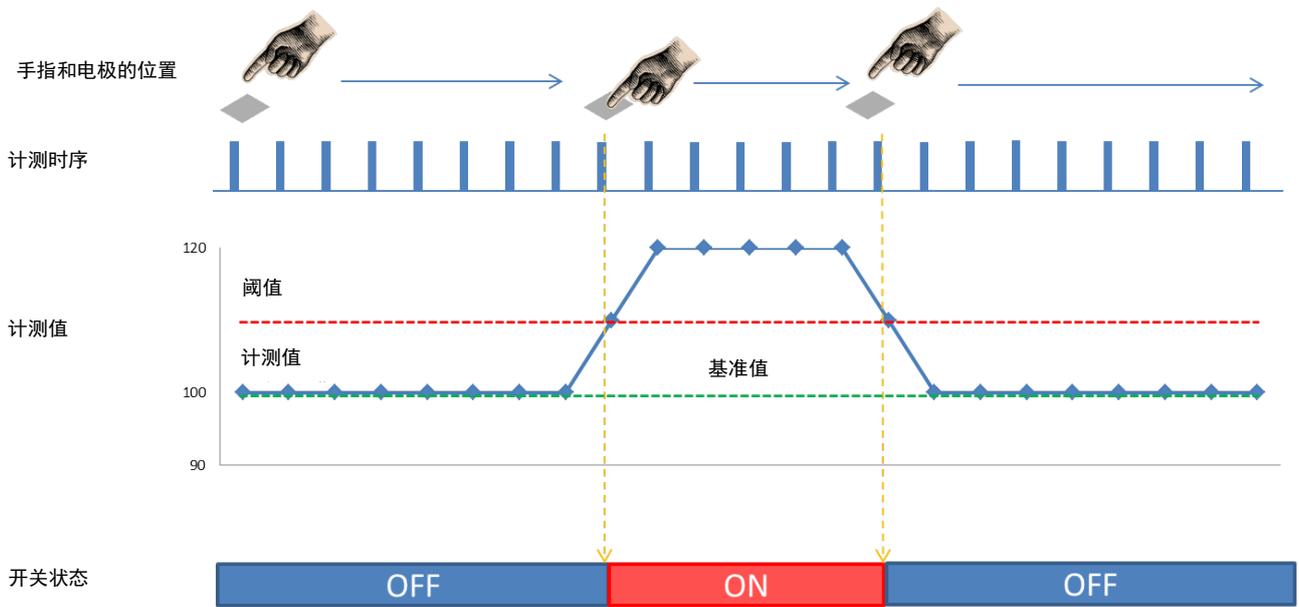


图 2.9 开关的 ON/OFF 判定

3. 瑞萨原创的静电电容式触摸检测系统

在瑞萨设计的静电电容式触摸检测系统中,其核心器件 CTSU 内置了低阻抗、高灵敏的电容测量模拟电路,和温漂低、线性范围宽的模拟—数字转换电路,因此具有灵敏度高、抗扰度强的优点。并且,瑞萨还提供了面向 32 位 CPU 的 Touch API (Application Program Interface),使开发者无需深入了解硬件即可轻松开发静电电容式触摸系统。本章对这些硬件和软件进行说明。

3.1 总述

如图 3.1 所示,瑞萨静电电容式触摸检测系统由硬件和软件两部分构成。硬件部分与触摸电极直接相连,由以下 3 个单元组成。即,用于转换电容—电流的 I/O Driver、用于转换电流—频率的 Analog Front End,和控制这些硬件单元并将电容测量值传送到软件层的 Digital Control。软件部分则由控制硬件的 Physical Driver、基于电容测量值判断各触摸键的 ON/OFF 以及判断手指接触滑条 (Slider)、滑轮 (Wheel)、键盘矩阵 (Matrix) 位置的 Middleware、API 和用户应用程序 (User Application) 组成。

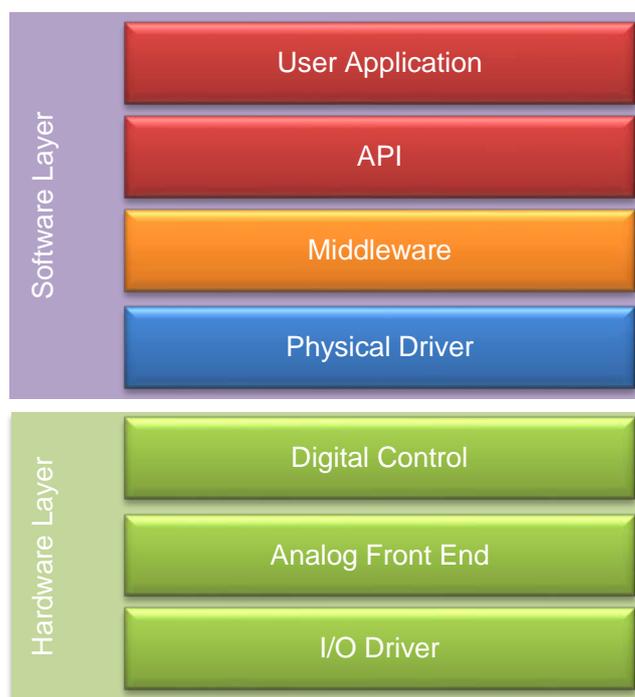


图 3.1 瑞萨静电电容式触摸系统的层级结构

3.2 硬件部分

3.2.1 概要

如图 3.2 所示，硬件部分的构成大致可以分为 I/O Driver 单元、Analog Front End 单元、Digital Control 单元和 CPU 单元。各个单元的功能概要，如下所述。

- 1) 手指接近与 I/O Driver 相连接的电极时，I/O Driver 输出的电流量发生变化。通过开关切换矩阵逐次连通各 I/O Driver 和相应电极，可以实现多电极的测量。
- 2) I/O Driver 的输出电流经外接的 LPF 平滑处理后，输入电流振荡电路 (ICO)，进行电流—频率的转换。
- 3) Digital Control 单元计数一定时间内 ICO 输出的脉冲数。电极上发生的静电电容量被转换为计数值，并被保存到寄存器。
- 4) 计数值由数据传送电路自动传送到 RAM，同时产生测量结束的中断请求。软件根据计数值的变化判断手指是否接近。

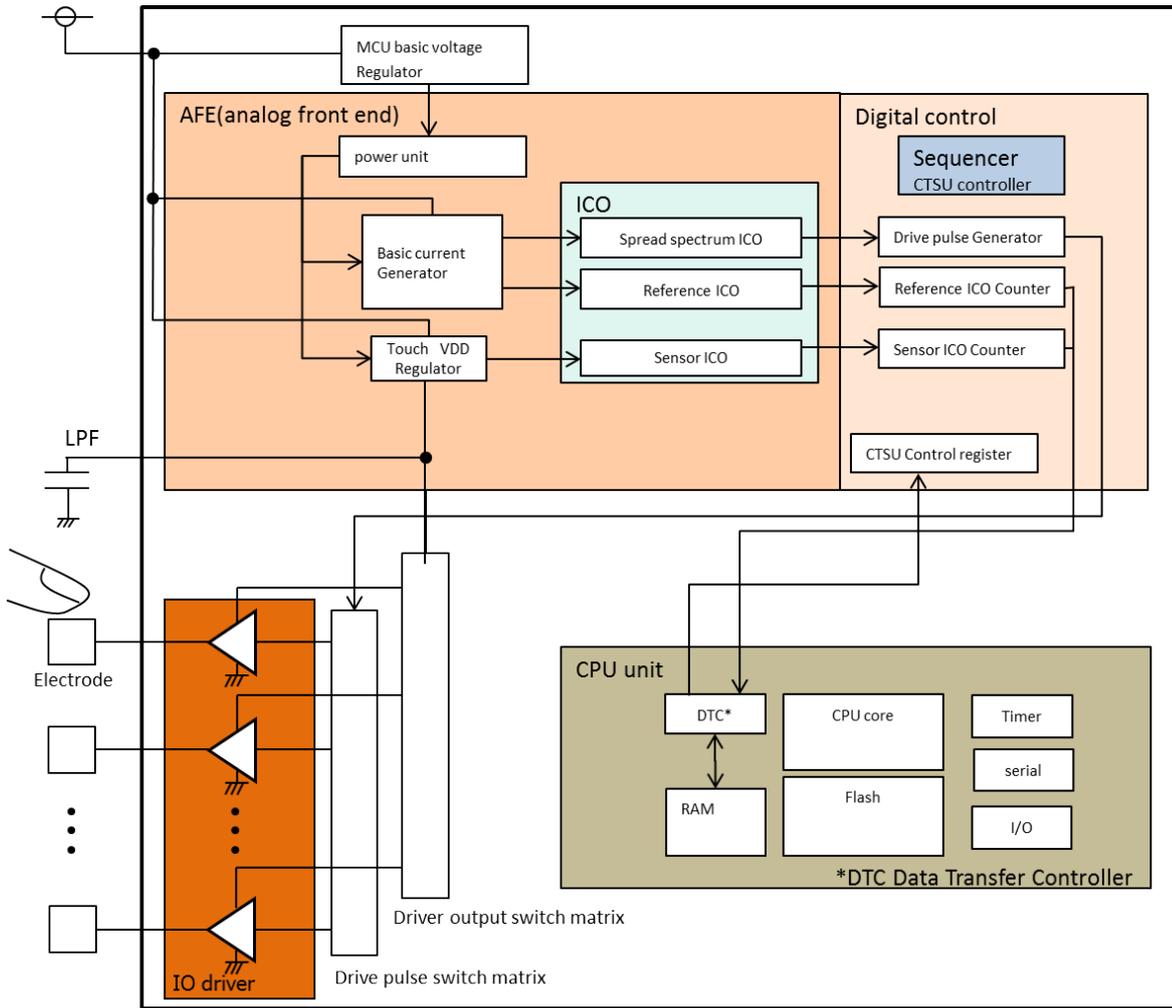


图 3.2 硬件整体框图

3.2.2 I/O Driver & Drive Pulse Generator

如图 3.3 所示，I/O Driver 由开关电容滤波器构成，利用来自 Digital 单元的驱动脉冲控制 2 个开关的反相动作（一个开关 ON，另一个开关 OFF）。根据前面的公式 ($i = fcv$)，电流 i 的变化取决于来自 Touch VDD regulator 的固定供电电压 v 、电极上的静电电容量 c 和驱动脉冲的频率 f 。电流经 LPF 平滑处理后，输入 Analog Front End 单元的 ICO。

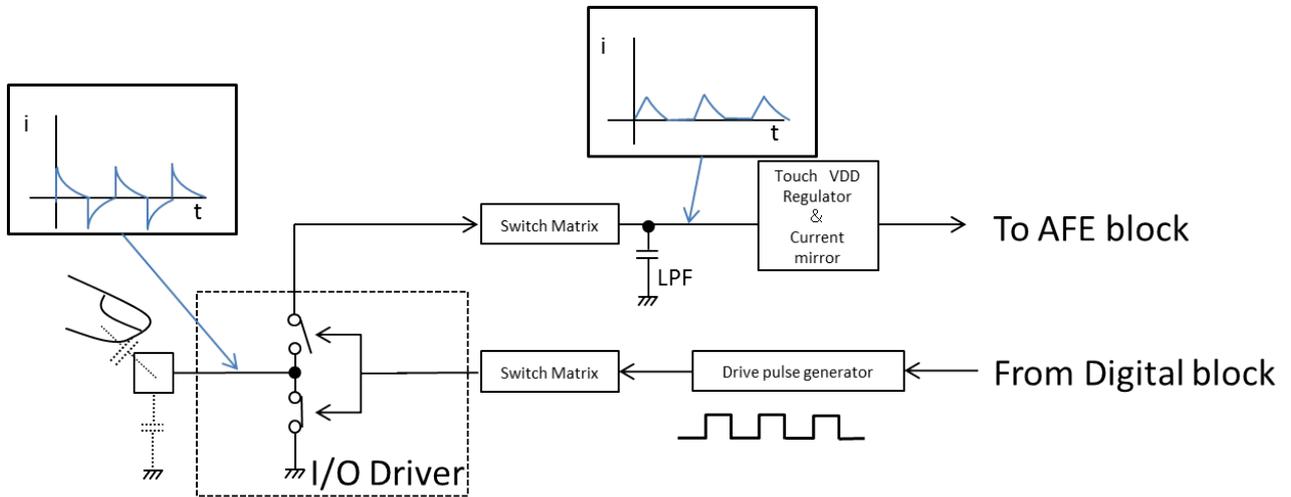


图 3.3 I/O Driver 的构成

3.2.3 Analog Front End

如图 3.4 所示，AFE 单元主要包括电源单元和 ICO 单元。静电电容量经 I/O Driver 单元转换为电流后，再由 AFE 单元转换为一定频率的振荡脉冲，然后送入 Digital control 单元。

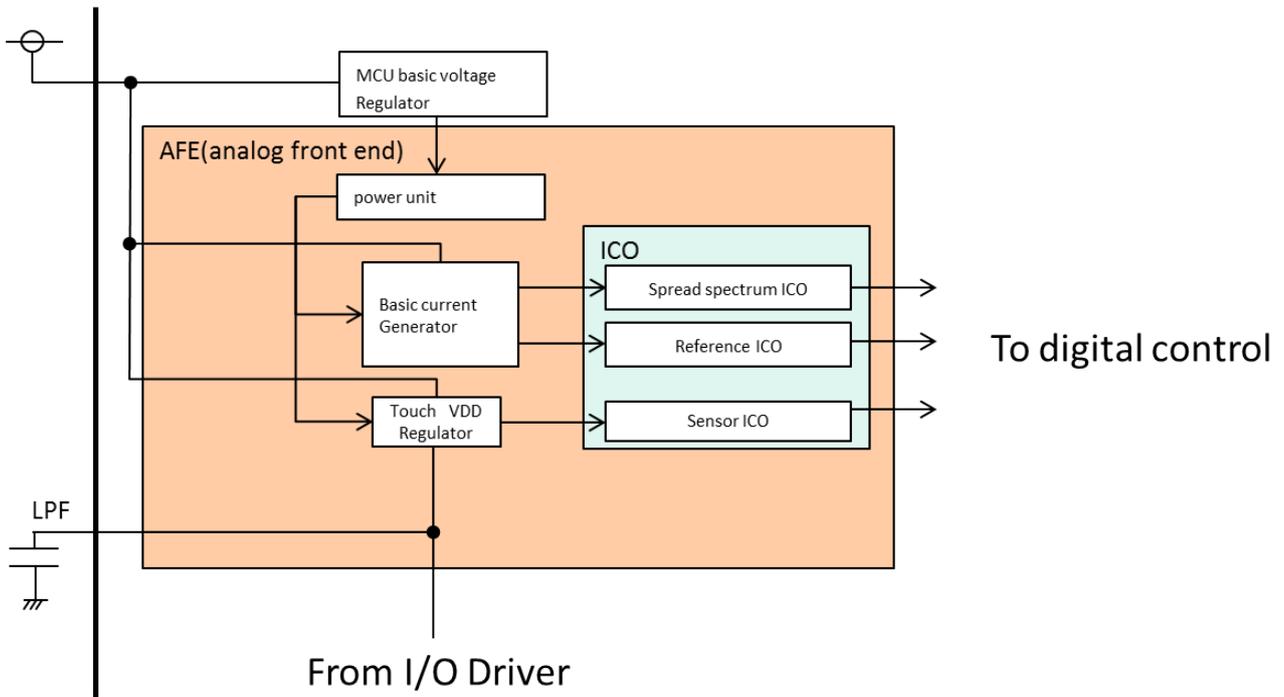


图 3.4 Analog Front End

(1) Touch VDD regulator & ICO for measurement

Touch VDD Regulator 的构成如图 3.5 所示，包括向 I/O Driver 供电的 Voltage Regulator，对测得电流做补偿处理的 Current offset，以及将电流输送到 ICO 单元的 Current mirror。ICO 是一种振荡频率随输入电流变化而变化的振荡器，输入电流增加，则输出脉冲的频率也成正比增加。

Current offset 是为了减少电流中的寄生电容产生的电流分量的影响，而设计的补偿电路。详细说明请见后续内容。

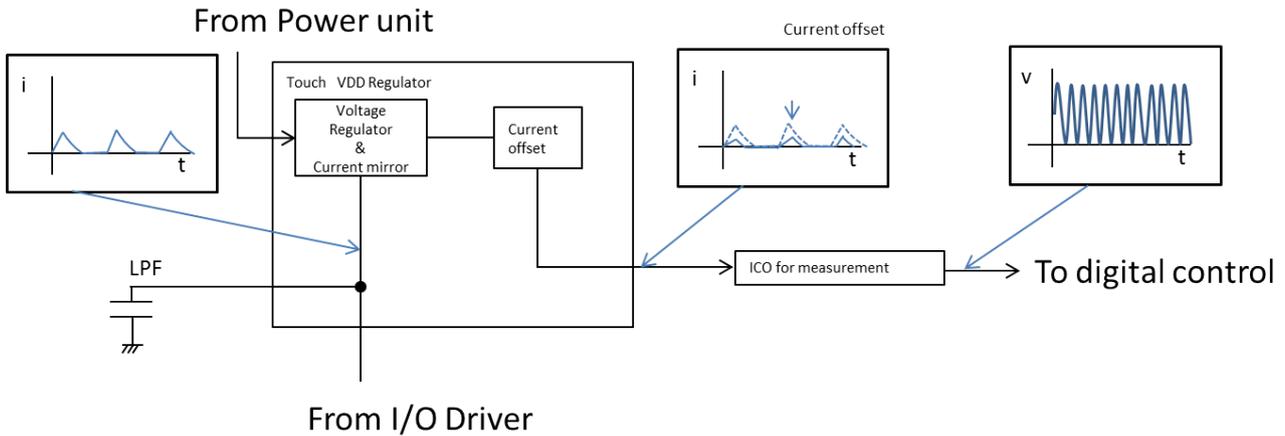


图 3.5 Touch VDD Regulator & ICO for measurement

(2) Basic current generator, ICO for reference & ICO for spread spectrum

Basic current generator、ICO for reference 以及 ICO for spread spectrum 的构成如图 3.6 所示。2 个 ICO 的作用各不相同，ICO for spread spectrum 产生的脉冲最终供给 I/O Driver，用于 SCF 驱动脉冲的频率扩散。而 ICO for reference 则用来和前面介绍的 ICO for measurement 比较。各部分的详细用法，请见后续内容。

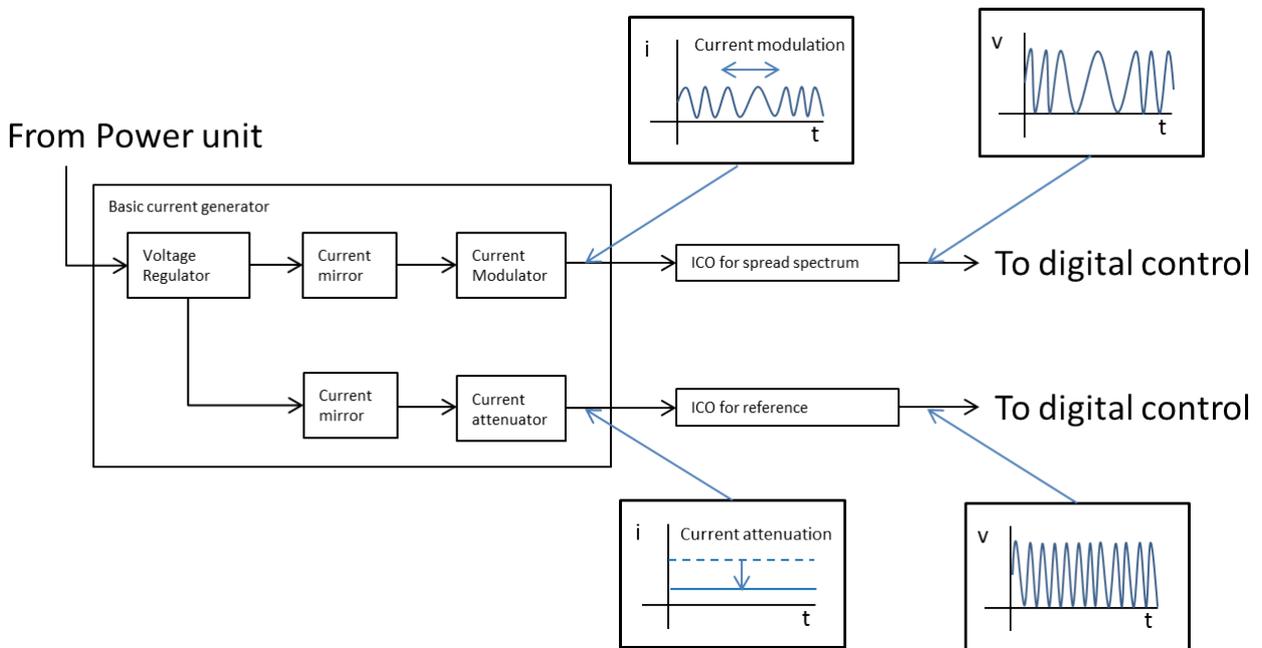


图 3.6 Basic Current Generator, ICO for Reference & for Spread Spectrum

Basic current generator 由提供电流的恒压源 Voltage regulator、将受控于 Current mirror 的电流供给 ICO 的 Current modulator 和 Current offset 构成。Voltage regulator 和 Touch VDD regulator 中的 Voltage regulator 相同，通过 Current mirror 向后续的电路提供恒定电压。Current modulator 调制 Voltage regulator 输出的电流信号，用于后续 ICO for spread spectrum 的频率扩散。如图 3.6 所示，ICO for spread spectrum 输出的信号经频率调制后，输入到 Digital control 单元的 Drive pulse generator 中。Current offset 通过限制 Voltage regulator 的输出电流控制后续 ICO for reference 的输出脉冲频率。

3.2.4 Digital Control & CPU Unit

如图 3.7 所示，Digital control 是由计数 ICO 输出脉冲数的 counter、基于 ICO 的调频脉冲产生 I/O Driver 驱动脉冲的 Drive pulse generator、与 CPU 进行数据交换的 Register，和控制 CTSU 全体时序的 Sequencer 构成的。CPU unit 利用 DTC（Data Transfer Controller）或 Register 与 CTSU 交换数据，遵循软件的一定算法执行触摸开关的相关处理。

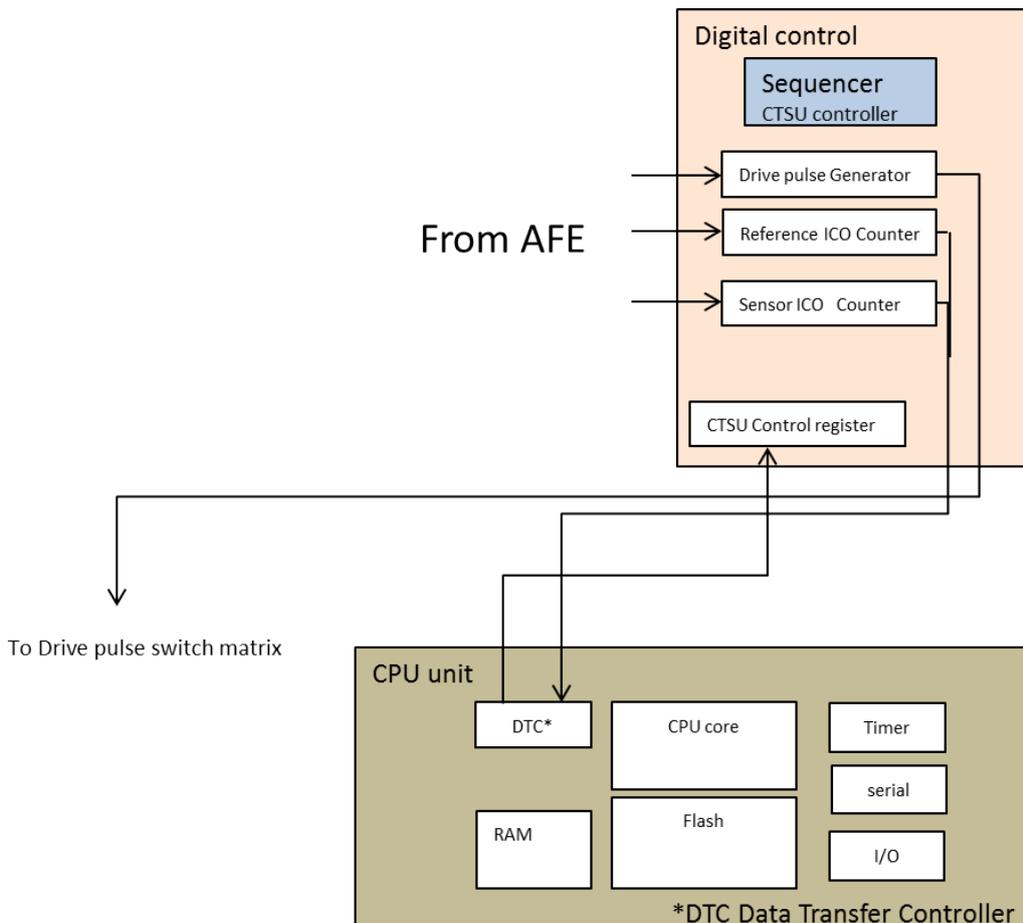


图 3.7 Digital Control & CPU Unit

(1) Drive pulse generator

如图 3.8 所示，Drive pulse generator 由 Clock pulse generator、Phase shifter、Polynomial counter、Mixer 构成。来自 CPU oscillator 的振荡信号经 Clock pulse generator 适当分频后，输入到 Phase shifter 中。Phase shifter 根据 Polynomial counter 的计算结果，判定是否对输入信号做反相处理。Polynomial counter 根据模拟随机数和生成多项式，对 Phase shifter 输出脉冲的相位进行随机化处理。Phase shifter 的输出通过 ICO for spread spectrum 的调频输出实现归一化和周期随机化。相位和周期都随机化了的驱动脉冲输出到 I/O Driver，控制 IO Driver 中的开关按照随机化的时序动作（闭合或断开）。如此设计 Drive pulse generator 的目的，是为了扩散 I/O Driver 中 SCF 开关时序的周期和相位，从而避免外部噪声和开关时序的同步，防止噪声对测量结果的影响。详细说明请见后续内容。

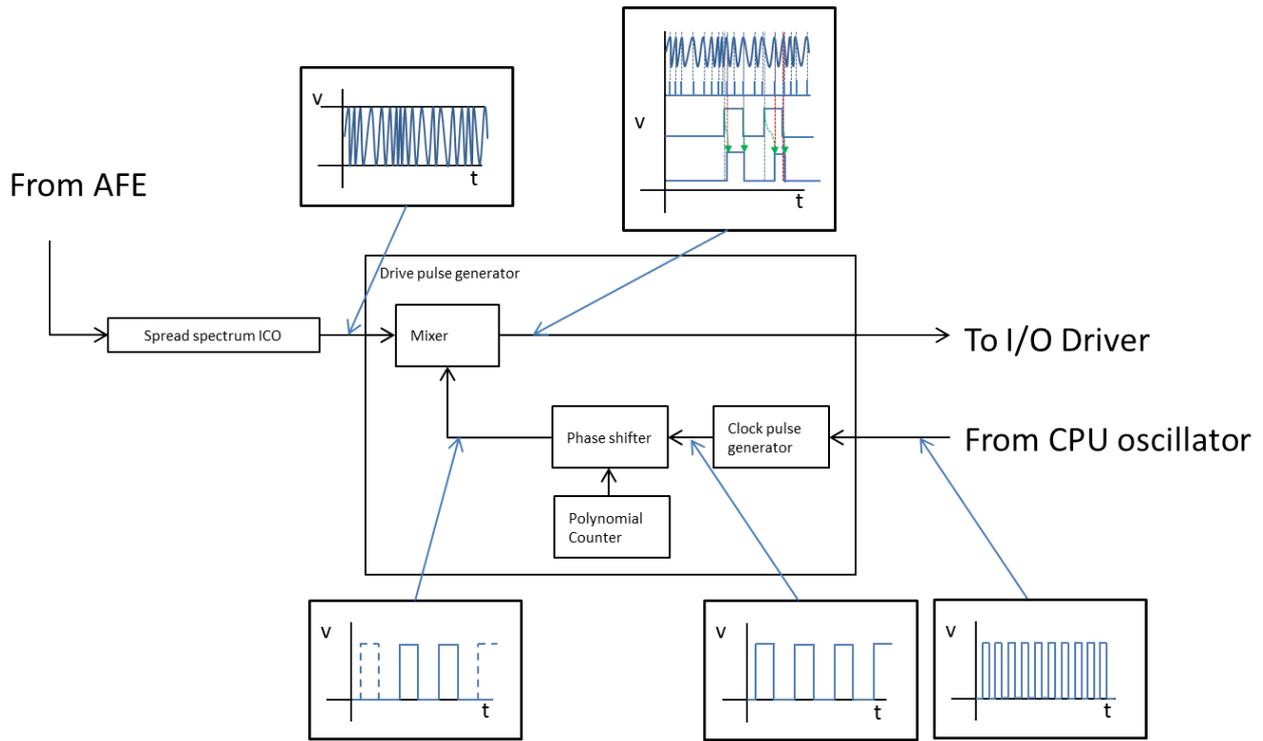


图 3.8 Drive Pulse Generator

(2) Reference counter & Sensor counter

Reference counter 和 Sensor counter 的构成如图 3.9 所示。2 个 Counter 均由 Sequencer 控制，计数一定时间内的 ICO 的输出脉冲数，并通过 DTC 将计数结果传送到 CPU unit 的 RAM 区。最后，软件处理传送到 RAM 区的计数值，并根据处理结果判断静电电容的变化以及人体接触与否。

From AFE

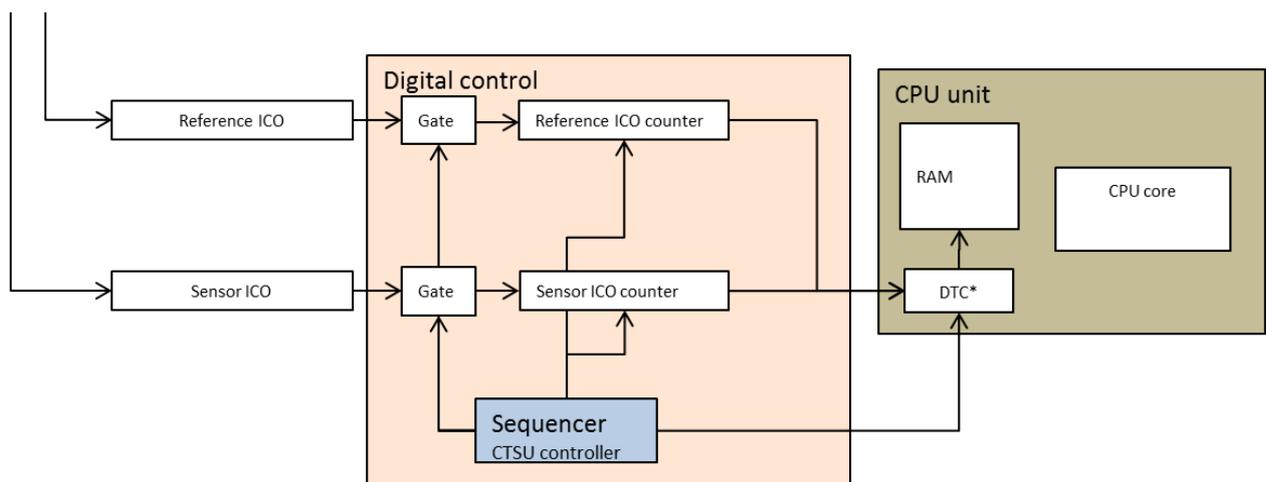


图 3.9 Reference Counter & Sensor Counter

3.3 软件部分

3.3.1 软件整体框图

如图 3.10 所示，软件部分由 Physical Driver、Middleware、API、Application 构成。Physical Driver 直接访问 Hardware Layer 的 CTSU，并和上一层软件进行数据交互。Middleware 将来自 Physical Driver 的 ICO 计数值加工后传递至 API 层，也可将上一层设定的命令传递到 Physical Driver。API 实现 Application 层和 Middleware 层之间的数据交互。Application 是实现 Touch Key、Slider、Wheel 功能的主体软件，根据 User Application 的要求，返回 Key 的 ON/OFF 状态和 Wheel、Slider 上的手指接触位置。此外，软件还包括连接静电触摸综合开发环境 Workbench6 的调试接口和 USB 接口。

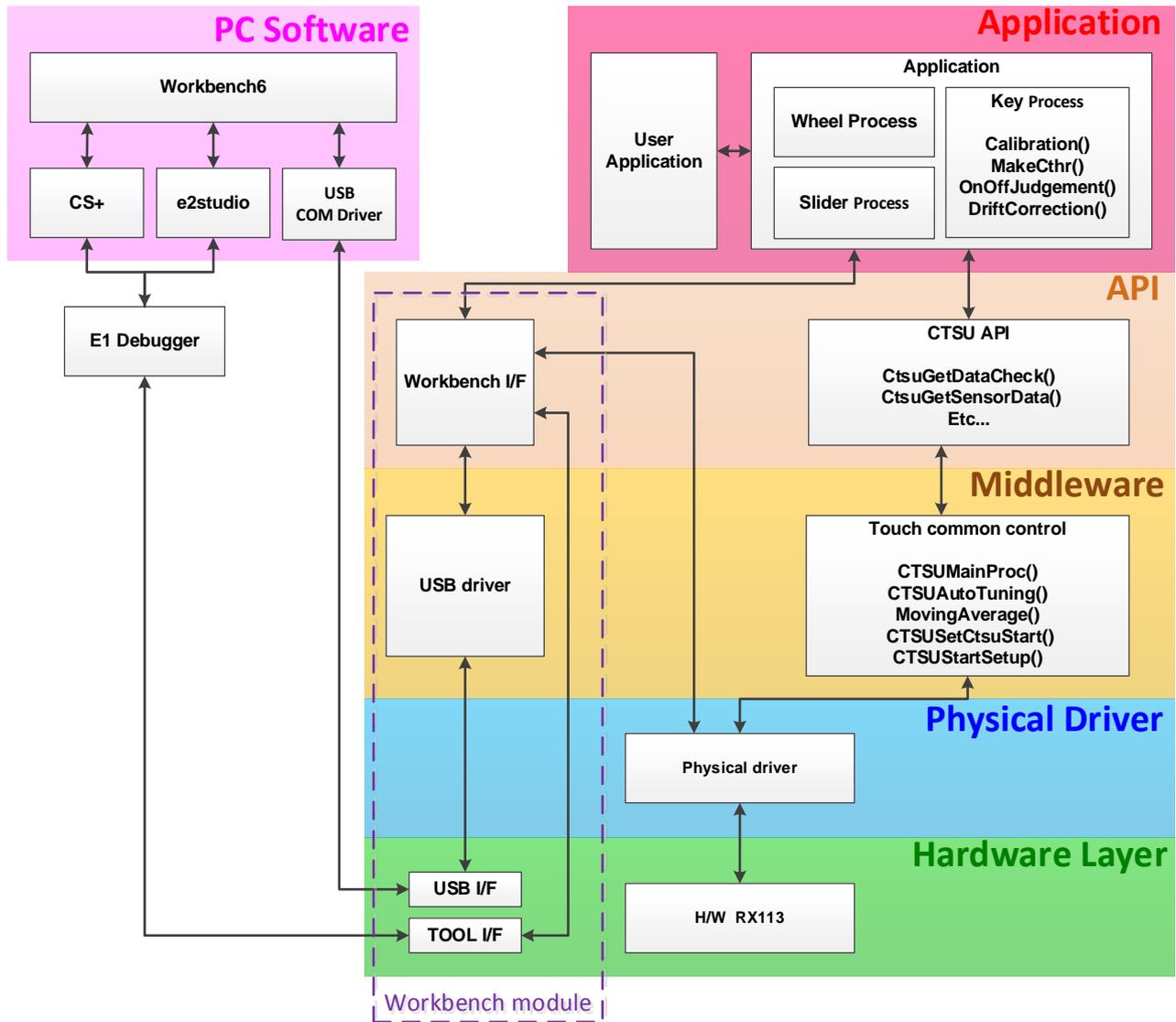


图 3.10 软件整体框图

3.3.2 Physical Driver

Physical Driver 提供了访问 CTSU 全部寄存器的内部函数集合。根据上一层软件的读出或写入要求，读取寄存器内的数值并传回到上一层，或者将来自上一层的设定数值写入寄存器。

3.3.3 Middleware

Middleware 根据上一层软件的要求，执行 CTSU 的初始化（包括传送 CTSU 寄存器值的 DTC 的初始化）、ICO 计数值的平均化处理以及寄存器的设定。

3.3.4 API

API 提供应用层软件（Application）和中间层软件（Middleware）之间数据交换的函数集合，主要实现以下功能：

- CTSU 测量模式的设定
- CTSU 测量正确与否的确认
- CTSU Sensor ICO 测量结果的获取

关于其他 API 及各个 API 的详细内容，请参考应用说明：CTSU API 参考指南（r30an0215jj_rx113）。

3.3.5 Application

Application 是实现 Touch Key、Slider、Wheel 功能的主体软件，根据来自 API 层的数据，执行以下处理。

- 校准处理
- 适应环境变化的数据补偿处理
- 触摸键的 ON/OFF 处理
- Slider、Wheel 的位置检测处理
- 产品的系统控制、LED 和 LCD 显示等用户应用程序

3.3.6 Workbench Module

Workbench 模块实现和 Touch 综合开发环境 Workbench 的通信。该模块支持 2 种通信方法：

- 1) 通过 E1 连接 CS+ or e2studio，然后和 Workbench 连接；
- 2) 通过 USB 和 Workbench 连接；

更多 Workbench 的内容，请参考用户手册。

4. 基于 CTSU 的静电电容式触摸键构成方法

4.1 概要

本章介绍利用 CTSU 构成触摸键的步骤。大致的步骤，如下所述。

- 设计触摸键基板（PCB）
- 开发软件
- 调整触摸键的灵敏度
- 功能验证

4.2 触摸基板的设计

4.2.1 自电容方式触摸键的设计

(1) 关于静电电容

静电电容的模型，如图 4.1 的左侧所示。其电容量 C ，如计算公式所示，具有以下特性。

- 与电极面积 A 成正比
- 与电极间介质的介电常数 K 成正比
- 与电极间的距离成反比

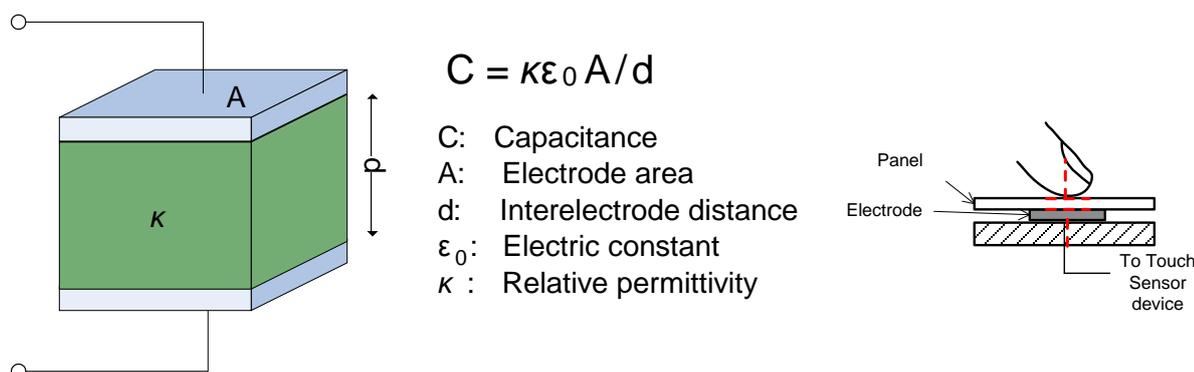


图 4.1 静电电容模型

如图 4.1 中右图所示，手指接近触摸面板时，手指和电极之间产生静电电容。利用这一性能以及上述电容量的特性，静电电容式触摸键可以实现对人体接触的检测。手指接触面板时的静电电容量和非接触时的静电电容量之间的容量差越大，触摸键的灵敏度越高，越有利于抗干扰性能的改善。由于手指的大小是有限的，即手指和电极的有效接触面积 A 是有限的，因此，面板材料的介电常数越大，厚度越薄，触摸键的性能越好。介电常数因材质不同而各不相同。常用的面板材质的介电常数，如表 4.1 所示。一般来说，需要耐热性高的应用使用玻璃面板，其他应用使用塑料面板。

表 4.1 面板常用材质的介电常数

Dielectric Material	K
亚克力	2.4-4.5
玻璃	4.5-7.5
尼龙塑料	3.0-5.0
柔性乙烯树脂膜	3.2
空气	1.0
水	80

(2) 电极

用于检测手指接触的电极，使用面积为 10×10mm~15×15mm 左右的圆形●或正方形■是比较理想的。三角形电极▲以及字母 E 形状的电极，由于其尖角部分具有天线效应，容易引入噪声，因此不建议使用。对于需要通透 LED 光的电极，可以使用环状电极或网状电极。但是，由于其有效接触面积减小会造成灵敏度下降，并且驱动 LED 的 PWM 信号同时也是噪声源，所以设计时需要注意。在考虑噪声的最终裕度的基础上，要尽可能地提高触摸的灵敏度。

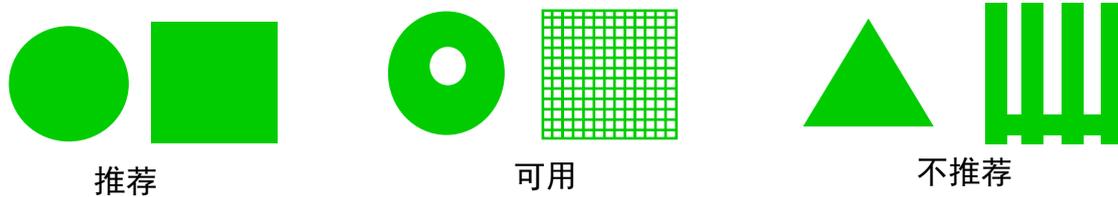
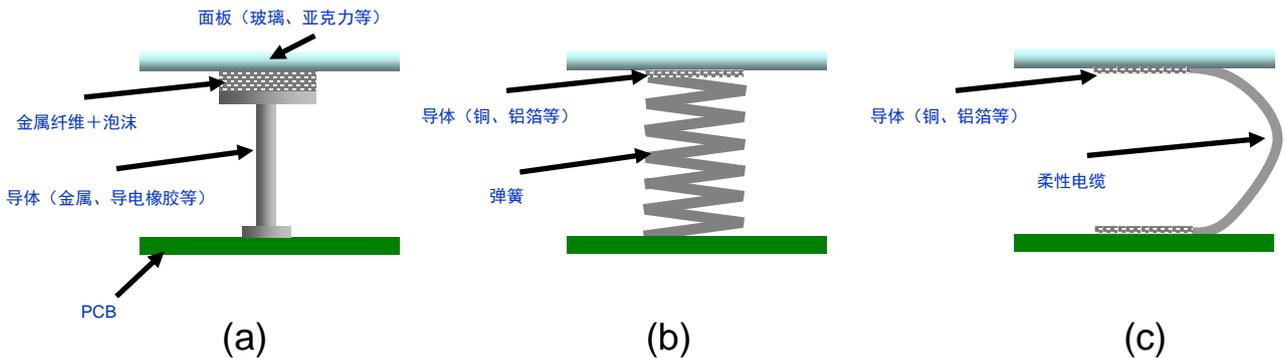


图 4.2 触摸用电极的形状

将电极和 MCU 以尽量短的引线连接，并配置在同一基板上是最为理想的。但是由于面板形状的原因，无法实现电极和 MCU 置于同一基板时，可以使用图 4.3 的配置方法。



- (a) 基板上装配金属棒，其前端和金属纤维包裹的泡沫粘贴在一起。泡沫的厚度等效于面板和 PCB 的间距。
- (b) 基板上装配弹簧，面板内侧粘贴导体。弹簧和面板内侧的导体紧连。弹簧收缩后的长度等效于面板和 PCB 的间距。
- (c) 使用柔性电缆连接电极和面板。柔性电缆的长度等效于面板和 PCB 的间距。

图 4.3 基板和电极分离时的处理方法

(3) 电极的引线

建议使用尽量短的引线来连接 Touch 电极和 MCU 端子。另外，电极引线和 PWM 信号线、串行通信线之间的间距要保证有足够宽的距离，以避免由于电容耦合而在电极引线上导入噪声。如果电极引线和信号线的交叉不可避免，需采用图 4.5 所示的双面正交布线。图 4.4 是触摸键基板上寄生电容和电阻的示例。如图所示，地线 GND、金属底盘—电极、信号线—电极、电极引线、连接线之间等，均存在寄生电容。CTSU 可以测量的最大电容值为 50pF。因此，使用 CTSU 测量电容时，人体非接触时的寄生电容和接触时产生的静电电容的电容总量不可超过 50pF。另一方面，如果寄生电容量非常小（10pF 以下），抗干扰性能会降低，此时需要调整地线 GND 的布线方法来增加寄生电容。

此外，建议在电极和 MCU 端子之间串入阻尼电阻，以提高抗干扰性能和避免被电涌损坏。阻尼电阻的配置应尽可能靠近 MCU 的端子。电极和 MCU 端子之间的阻抗会影响测量电容用的 SCF 频率，进而影响灵敏度，因此电极—端子之间包含阻尼电阻的总电阻值，建议低于 2K Ω （SCF 频率：0.5MHz~4MHz）。

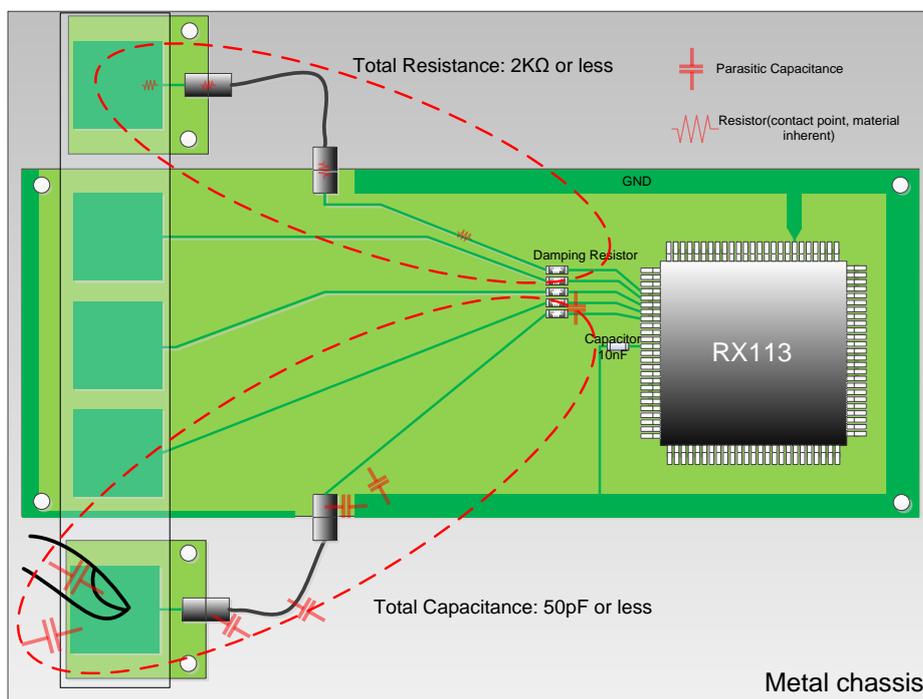


图 4.4 触摸键基板上的寄生电容和电阻

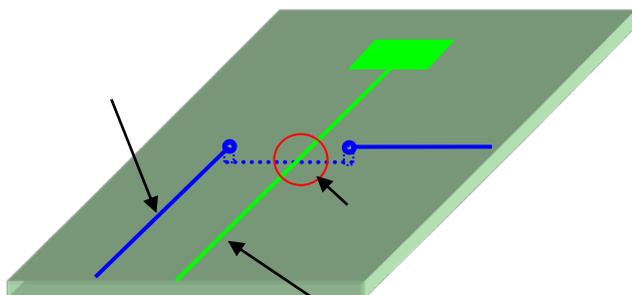


图 4.5 电极引线和信号线的交叉示例

(4) 电极和电极布线的地线屏蔽

如果应用产品的使用环境存在高强度 RF 噪声，或者产品内部产生高强度 RF 噪声，可以使用地线 GND 屏蔽电极及电极布线，使其免受噪声干扰。此时，为了降低地线的寄生电容，建议使用网状地线。

(5) TSCAP 端子

TSCAP 端子和 GND 之间接入 10nF 的电容作为低通滤波器 LPF。电容应配置在紧邻 TSCAP 端子的位置，并使连线最短化。

4.2.2 互电容方式触摸键的设计

(1) 关于静电电容

互电容方式的原理，如图 4.6 所示。

互电容方式需要两个电极，一个电极用于发送，另一个电极用于接收。发送电极输出脉冲，与接收电极之间通过电容耦合形成电磁场。当手指接近两个电极的间隙时，由于人体是导体，一部分电磁场会耦合到人体。通过周期性地监测这个电磁场的变化，可以检测到人体的接近。

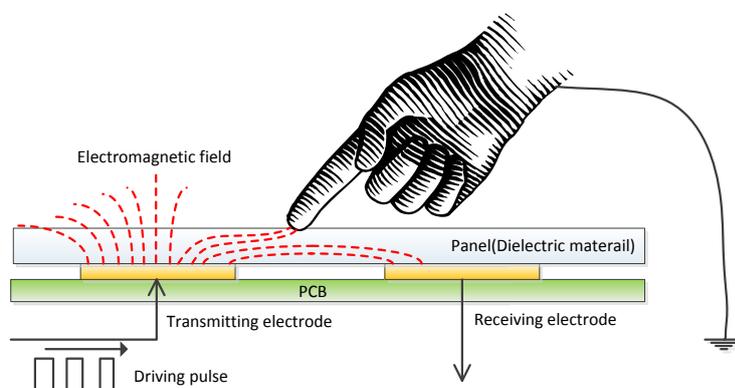


图 4.6 互电容方式的原理

瑞萨开发的互电容方式的触摸键原理，如图 4.7 所示。CTSU (Capacitive Touch Sensing Unit) 由基于开关电容滤波器 (SCF) 的电容-电流转换器和电流检测器构成，可以将连接到 MCU 的外部电容量转换为相应的数值。此外，CTSU 还内置了脉冲发生器，可以受 SCF 同步输出脉冲信号。在 SCF 和内置脉冲发生器的输出之间安装两个电极，即可实现互电容方式的电容检测。

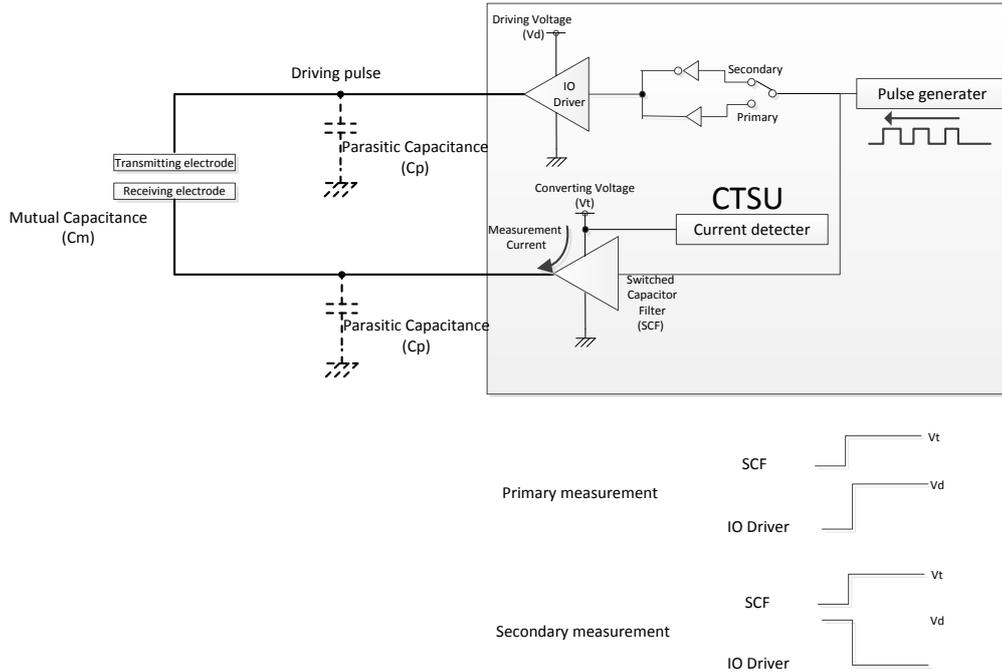


图 4.7 瑞萨互电容方式的原理

为了测量电极之间的电容 C_m ，CTSU 对同一电极执行两次测量操作。首次测量时，脉冲发生器输出和 SCF 同相的脉冲；第二次测量时输出反相脉冲。计算两次测量的差值（第二次测量值 - 第一次测量值），可以获得 C_m 的值。

基本公式：

$$I_c = VFC$$

其中

I_c = 流经电容的电流

F = SCF 的开关频率

C = 电容值

V = SCF 的开关电压

$$I_{pri} = fC_pV_t + fC_m(V_t - V_d) \quad \dots\dots\dots\text{公式 4-1}$$

$$I_{sec} = fC_pV_t + fC_m(V_t + V_d) \quad \dots\dots\dots\text{公式 4-2}$$

公式 4-2 - 公式 4-1

$$= I_{sec} - I_{pri}$$

$$= fC_pV_t + fC_m(V_t + V_d) - [fC_pV_t + fC_m(V_t - V_d)]$$

$$= 2fC_mV_d \quad \dots\dots\dots\text{公式 4-3}$$

I_{pri} ：首次测量的电流值

I_{sec} ：二次测量的电流值

f ：SCF 及驱动脉冲的频率

V_d ：脉冲发生器的驱动电压

- Vt: SCF 的驱动电压
- Cm: 电极间发生的静电电容
- Cp: 电极、引线等的寄生电容

公式 4-1、公式 4-2 分别是首次测量和二次测量所得的测量电流值。在作为计算结果的公式 4-3 中， f 和 V_d 都是固定的常数。因此，利用首次和二次的测量结果及公式 4-3，可以获得 C_m 的值。

(2) 电极

互电容方式的触摸键形状示例，如图 4.8 所示。外侧为发送电极 (Tx)，内侧为接收电极 (Rx)，二者共同组成 1 个触摸键。

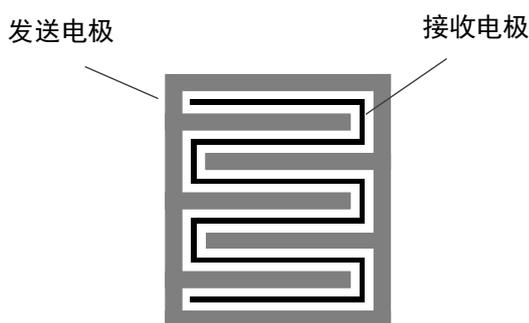


图 4.8 互电容方式触摸键的形状示例

确保发送电极 Tx 和接收电极 Rx 的相向布线长度，以增加电极间的电容量。理想的电极面积为 $10 \sim 16 \text{mm}^2$ 。尽管可以使用 16mm^2 以上的电极，但由于超出手指面积的部分并不会提高电极的效果，反而会增加寄生电容量，因此设计电极时需要注意。

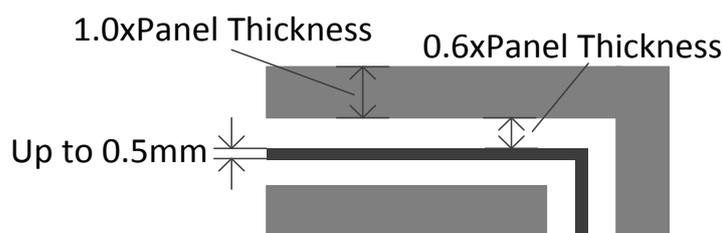


图 4.9 Tx、Rx 的线宽

电极 Tx 和电极 Rx 的线宽，请参考图 4.9。为了尽可能减少寄生电容，Rx 的最大线宽为 0.5mm。Rx 的布线宽度和电极所用材质的电阻率相关。如果电极所用材质的电阻率较大（碳膜等），需要增加布线宽度，以确保作为电极的线电阻不宜太大。Tx 的布线宽度推荐采用与面板厚度相同的值，Rx 和 Tx 的间距推荐为面板厚度的 0.6 倍左右。但是，这些措施应尽量不减少 Tx 和 Rx 相向布线的长度。

(3) 电极的引线

互电容方式中，需要注意 Rx 的引线。因为其引线方式会影响寄生电容以及对来自其他信号线的噪声的抗干扰性能。Rx 引线和 Tx 引线的电容耦合需要特别加以注意。以下通过具体的布线实例进行说明。

建议尽量增加 Tx 和 Rx 的引线间距，避免引线间发生电容耦合。如图 4.10 所示，如果 Tx 和 Rx 的引线间距不足，当手指接近引线时，有可能会出项预想之外的测量结果。此外，当 Tx 和 Rx 的引线交叉时，建议使用双面正交法，避免 Rx 和 Tx 的平行布线。

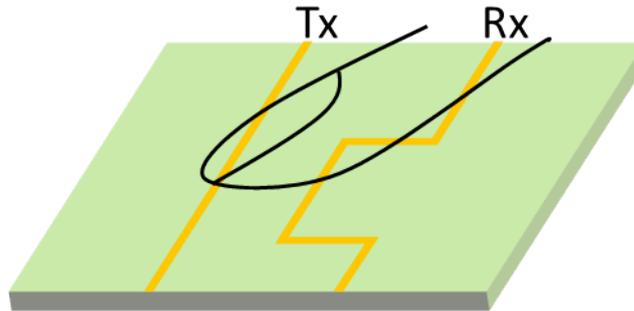


图 4.10 Tx 和 Rx 的布线间距

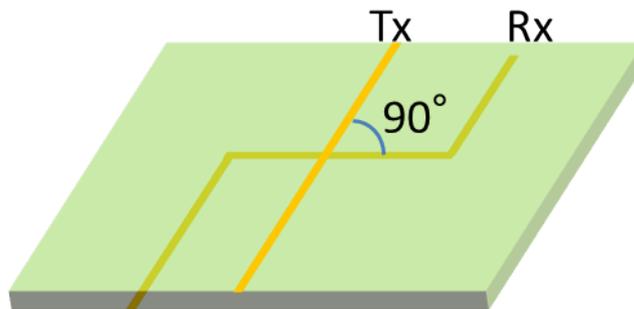


图 4.11 Tx 和 Rx 的交叉布线实例

建议使用尽可能短的引线连接 MCU 的 TS 端子和电极 Rx，以减少寄生电容。布线产生的寄生电容以及每个计测通道上的电阻，推荐使用以下数值。

寄生电容：20pF 以下

电阻：2KΩ 以下（含计测端子上的阻尼电阻）

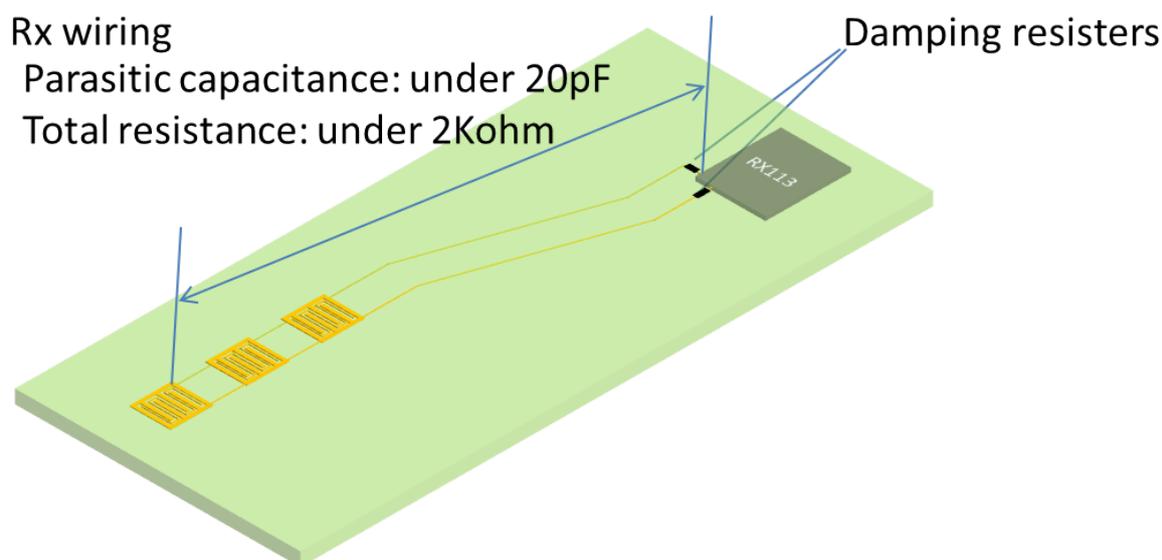


图 4.12 Rx 引线的寄生电容和电阻值

(4) 电极和电极引线的地线屏蔽

如果应用产品的使用环境存在高强度 RF 噪声，或者产品内部产生高强度 RF 噪声，可以使用地线 GND 屏蔽电极及其引线，使其免受噪声干扰。此时，为了降低地线的寄生电容，建议使用网状地线。

(5) TSCAP 端子

TSCAP 端子和 GND 之间接入 10nF 的电容作为低通滤波器 LPF。电容应配置在紧邻 TSCAP 端子的位置，并使连线最短化。

4.3 CTSU 设定

4.3.1 自电容方式的 CTSU 设定

(1) 初始化设定

利用 CTSU 计测电容，需要执行以下的初始化设定。详细的设定方法，请参考硬件手册。

- TS 端子的设定
- TSCAP 端子的 LPF 放电处理
- CTSU 的初始化
- DTC 的设定

(2) ICO counter 的计测时间

如前所述，Sensor ICO 和 Reference ICO 输出的振荡信号，分别由 Sensor ICO counter 和 Reference ICO counter 在计测时间内计数，并将计数结果（计数值）存放到寄存器中。计测时间由以下的寄存器和公式决定。

- IO driver base clock 周期：由输入 CTSU 的 PCLK 的频率、CTSU 工作时钟选择位和 CTSU base clock 设定位共同决定。PCLK 为 32MHz，CTSU 工作时钟选择位设定为 1/4，CTSU base clock 设定位选择 16 分频时，IO driver base clock 的频率为 0.5MHz，周期为 2us。此外，CTSU base clock 设定位的内容由 DTC 传送，每个 TS 端子的设定值可以各不相同。

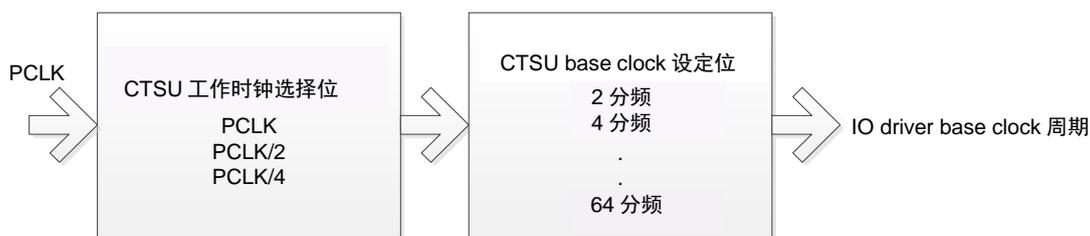
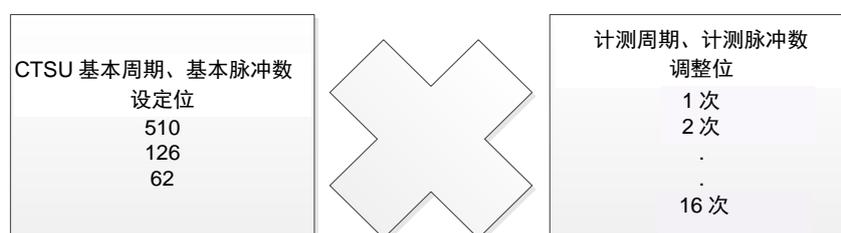


图 4.13 IO Driver Base Clock 周期

- 基本脉冲数：IO driver 输出脉冲数的基本单元。即，IO driver 的输出脉冲经 Phase shifter 随机化处理后的 1 个周期内的脉冲数。基本脉冲数通过 CTSUPRMODE 寄存器设定。
- 计测周期计测脉冲数：上述基本脉冲单元的循环次数。本项参数通过 CTSUPRRATIO 寄存器设定。



- 计测次数：以上乘式所表示的测量动作的重复次数。计测次数通过 CTSUSNUM 寄存器设定。该内容由 DTC 传送，可以分别为每个 TS 端子设定各自的计测次数。

计测时间 (Sec) = IO driver base clock 周期 * {基本脉冲数 * 计测周期计测脉冲数 + (基本脉冲数 - 2) * 0.25} * 计测次数

以上公式决定了 ICO counter 的计数时间和各个 TS 端子的测量时间。IO driver base clock 的周期和计测次数由 DTC 传送，并且可以为每个 TS 端子设定各自的 SCF 频率和计测时间。决定 IO driver base clock 的周期和计测次数时，应结合各被测端子的寄生电容和电阻值，以确保 Sensor ICO counter 不会发生溢出。计测时间和 IO counter 的关系如图 4.14 所示。在本例中，如果将计测次数设定为 2 次，ICO counter 发生溢出，计数值=0xFFFF，获得的计测值不正确。

此外，发生溢出时，ICO counter 的结果固定为 0xFFFF，CTSU 状态寄存器中的 CTSUSOVF (Sensor ICO counter over flow flag) 位和 CTSUROVF (Reference ICO counter over flow flag) 位置 1。

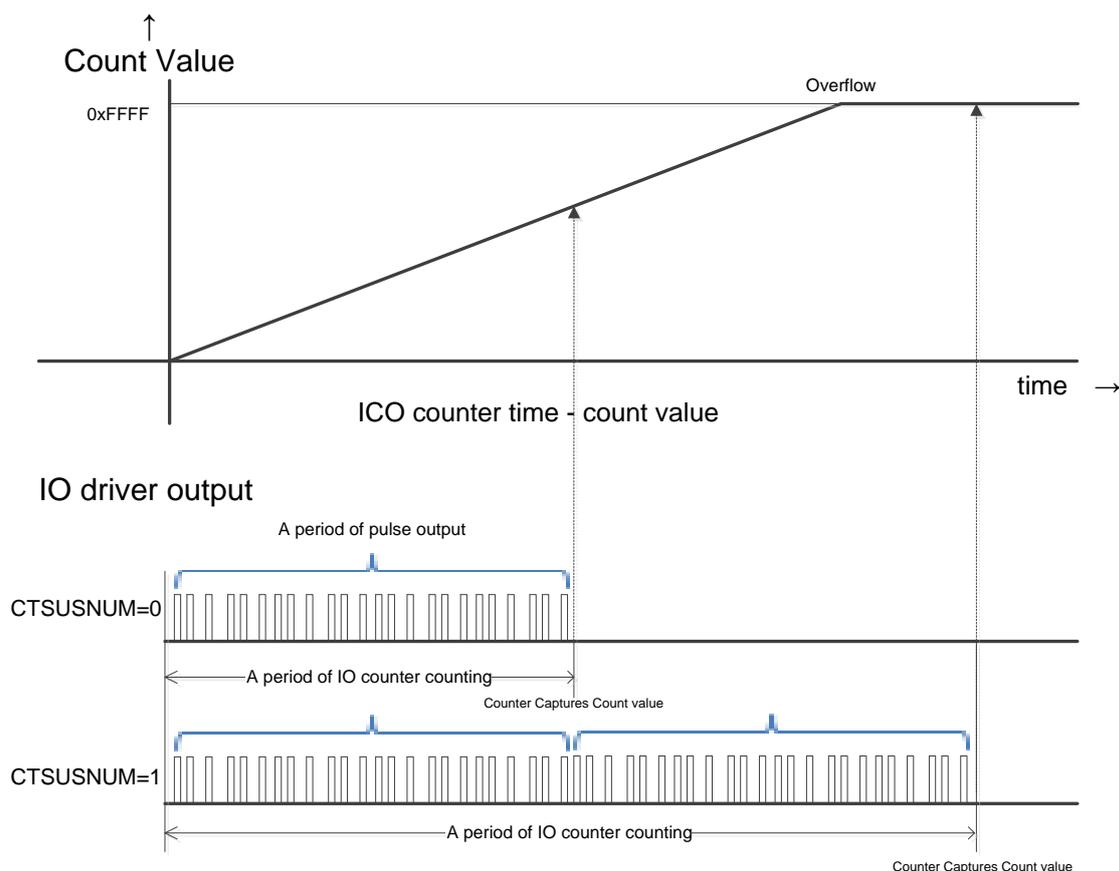


图 4.14 ICO 计测时间和 ICO counter 计测值的关系

(3) IO Driver (SCF) 驱动频率的决定

如前所述，利用 CTSU 测量电容时，IO Driver 的驱动频率对于测量的灵敏度来说是非常重要的参数。

由 $i = FCV$ 可见，电流 i 和 SCF 的频率 F 、电容的容量值 C 以及电压 V 成正比。因此，提高驱动频率可以增加电流量，进而提高测量的灵敏度。但是，由于电容满充电和放电需要一定的时间，所以，当 SCF 的驱动频率提高到一定程度后，测量灵敏度就不再随着驱动频率的增加而提高。因此，确定与 TS 端子上所接电容相匹配的最佳驱动频率是非常必要的。此外，由于电极与 TS 端子之间的电阻值会影响电容的充电/放电时间。因此，当电阻增加时，SCF 的驱动频率也会近乎成比例地降低。

如果电阻值可知，那么使用 CTSU 可以粗略地测量出触摸键基板上寄生电容的容量值。测量方法如下。

首先按照上述自电容方式触摸键的设计方法制作触摸键基板，然后利用 Sensor ICO 测量与各电极相连的 TS 端子上的寄生电容。测量时，CTSUS 各寄存器的设定值如下所示。

- IO driver base clock 频率: 0.5MHz
例如, PCLK = 32MHz 时, CTSUCLK: 00B、CTSUSDPA: 31
- CTSUATUNE0: $V_{cc} \geq 2.4V$ 时设定为“0”， $V_{cc} < 2.4V$ 时设定为“1”
- CTSUATUNE1: 1 高输出
- CTSUPRRATIO: 3 推荐设定值
- CTSUPRMODE: 10B 基本脉冲数 = 62
- CTSUSOFF: 1 禁用高频噪声抑制功能 (OFF)
- CTSUSO: 00000000B 禁用 Sensor Offset 功能
- CTSUSNUM: 0 测量次数 = 1

各个触摸键上的寄生电容的粗略容值，可以根据 Sensor ICO counter 的测量值在表 4.2 中查得。如果根据 Sensor ICO 的测量值查得的寄生电容值小于 9pF 或者大于 50pF，触摸键的性能有可能无法达到预期，此时，需要改善基板来增加或减少寄生电容。

- 寄生电容小于 9pF 时，电极与 GND 之间的电容较小，电磁噪声的抑制能力不足。
- 寄生电容大于 50pF 时，超出了 CTSU 的测量范围，无法获得正确的测量结果。

表 4.2 Sensor ICO 测量值和寄生电容的大致对应关系

Sensor ICO count value	Capacitance (pF)
9801 or under	Under 9
9800-10200	Approximately 10
10201-11000	Approximately 12
11001-11900	Approximately 15
11901-13000	Approximately 18
13001-14600	Approximately 22
14601-16200	Approximately 27
16201-18000	Approximately 33
18001-19600	Approximately 39
19601-20300	Approximately 47
20301 or over	Over 50

* 以上 Sensor ICO 的测量值是基于 RX113 样品的实测值。

利用测量所得的寄生电容值和已知的电阻值，参考表 4.3 可以获得 IO diver 的驱动频率数。

RES	200	220	240	270	300	330	360	390	430	470	510	560	620	680	750	820	910	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200			
0	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	
0.1	13.05	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07
0.2	17.27	17.54	17.60	17.69	17.84	17.91	17.99	18.04	18.11	18.16	18.21	18.25	18.29	18.32	18.35	18.37	18.39	18.41	18.42	18.43	18.44	18.44	18.44	18.44	18.44	18.44	18.44	18.44	18.44	18.44
0.3	22.69	23.21	23.73	24.30	24.93	25.60	26.31	27.07	27.87	28.71	29.59	30.51	31.47	32.47	33.50	34.57	35.68	36.83	38.02	39.25	40.52	41.83	43.18	44.57	46.00	47.47	49.00	50.57	52.19	
0.5	31.69	31.84	32.06	32.36	32.72	33.13	33.59	34.10	34.66	35.27	35.93	36.64	37.40	38.21	39.07	39.98	40.94	41.95	43.01	44.12	45.28	46.49	47.75	49.06	50.42	51.83	53.29	54.80		
1	38.45	37.37	36.31	35.24	34.18	33.13	32.09	31.06	29.99	28.93	27.88	26.84	25.81	24.78	23.75	22.72	21.70	20.68	19.66	18.64	17.62	16.60	15.58	14.56	13.54	12.52	11.50	10.48		
10	44.38	45.42	46.59	47.81	49.09	50.42	51.81	53.25	54.74	56.28	57.87	59.50	61.18	62.91	64.68	66.50	68.37	70.29	72.26	74.28	76.35	78.47	80.64	82.86	85.13	87.45	89.82	92.24		
100	52.29	53.72	55.18	56.72	58.33	59.99	61.71	63.48	65.30	67.17	69.09	71.06	73.08	75.15	77.27	79.44	81.66	83.93	86.25	88.62	91.04	93.51	96.03	98.60	101.22	103.89	106.61	109.38		
200	52.85	54.62	56.32	58.07	59.87	61.72	63.62	65.57	67.56	69.60	71.69	73.83	76.02	78.26	80.55	82.89	85.28	87.72	90.21	92.75	95.34	97.98	100.67	103.41	106.20	109.04	111.93	114.87		
270	76.12	78.21	80.34	82.51	84.73	87.00	89.32	91.69	94.11	96.58	99.10	101.67	104.29	106.96	109.68	112.45	115.27	118.14	121.06	124.03	127.05	130.12	133.24	136.41	139.63	142.90	146.22	149.59		
330	92.27	95.04	97.16	100.02	102.93	105.89	108.90	111.96	115.07	118.23	121.44	124.70	128.01	131.37	134.78	138.24	141.75	145.31	148.92	152.58	156.29	160.05	163.86	167.72	171.63	175.59	179.60	183.66		
390	109.89	111.89	113.99	116.11	118.25	120.42	122.62	124.85	127.11	129.40	131.72	134.07	136.45	138.86	141.30	143.77	146.27	148.80	151.36	153.95	156.57	159.22	161.90	164.61	167.35	170.12	172.92	175.75		
470	130.29	134.96	139.81	144.16	148.21	152.07	155.74	159.22	162.51	165.61	168.52	171.34	174.07	176.71	179.26	181.72	184.09	186.37	188.56	190.66	192.67	194.59	196.42	198.16	199.81	201.37	202.84	204.22		
560	164.65	169.16	173.99	178.17	182.51	187.01	191.68	196.52	201.53	206.71	212.07	217.61	223.33	229.23	235.31	241.57	248.01	254.62	261.41	268.38	275.53	282.86	290.37	298.06	305.93	313.98	322.21	330.62		

表 4.3 寄生电容、电阻值和 IO Diver 驱动频率的关系

(4) Sensor ICO 电流调整

Sensor ICO 是一种电流—频率转换器，可以将输入的电流转换为成比例的振荡频率。但是，由于电流—频率呈线性关系的频域范围是有限的，因此动态范围的上限约为 100MHz。如图 4.15 中的左上图所示，当频率高于 100MHz 或很低时，电流—频率不再保持线性关系。Sensor ICO 的电流—频率特性在不同的 MCU 个体之间是存在差异的，因此需要使用电流—频率特性相近的 Reference ICO 进行调整。同一 MCU 内的 Sensor ICO 和 Reference ICO，其电路构成相同，因此其电流—频率的特性近乎一致。Sensor ICO 的输入信号来自于 IO driver 和 TSCAP 电源所产生的电流；Reference ICO 的输入信号是由寄存器的设定值所产生的电流（0~19.5uA）。如图 4.15 中的右上图所示，当 CTSURICOA 寄存器设定为 03FH~0FFH 范围时，Reference ICO counter 的输出—输入呈线性关系（蓝色框线内部分）。而 Sensor ICO 的输出振荡频率由 IO driver 供给的电流决定。

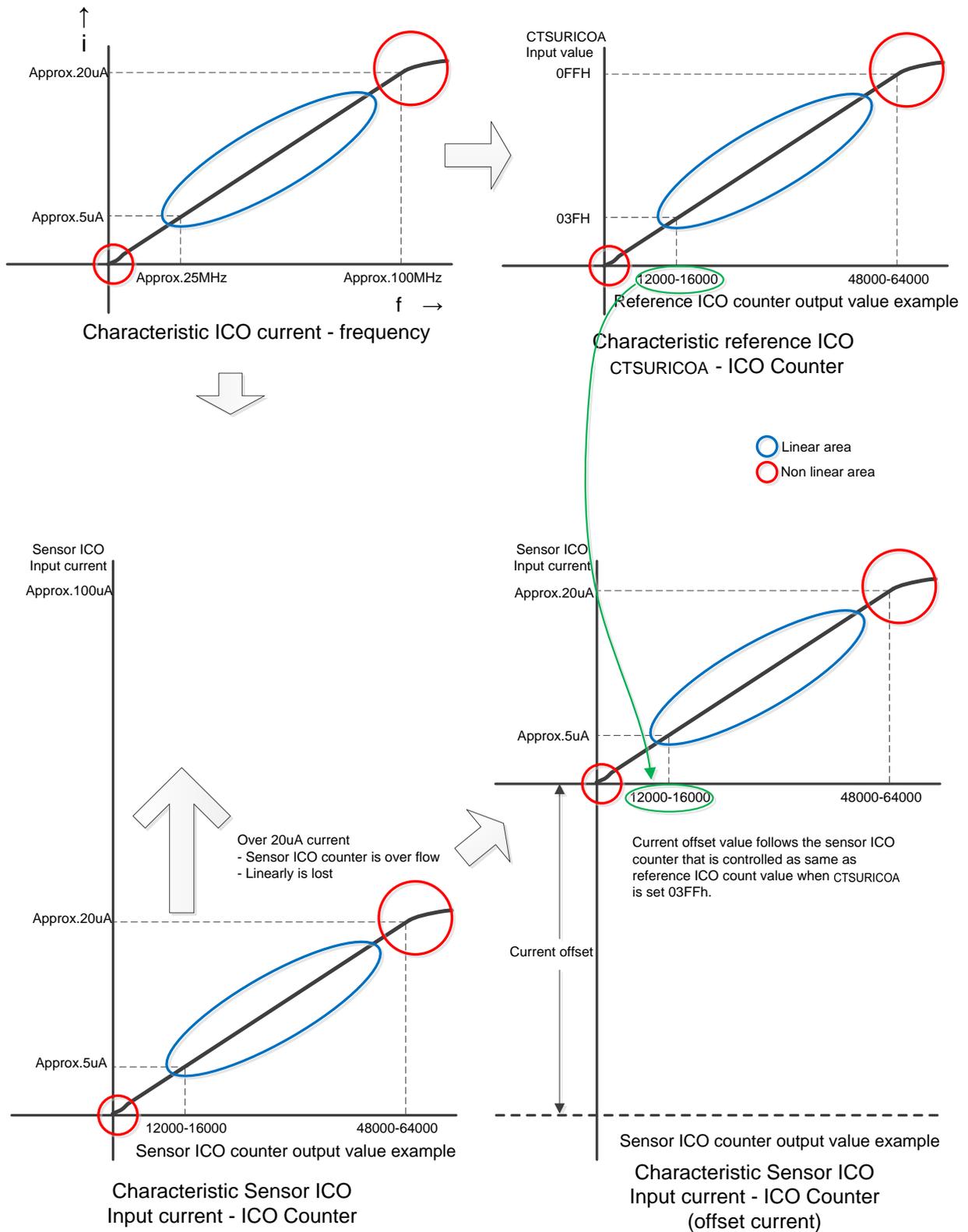


图 4.15 Sensor ICO、Reference ICO 和电流的关系

供给 Sensor ICO 的输入电流与外部的静电电容和 IO driver 的驱动频率成正比，因此实际中该电流值不一定会低于 20uA，有可能会超出 ICO 的线性范围，如图 4.15 中的左下图所示。因此，如图 4.15 中右下图所示，需要利用电流补偿功能限制 Sensor ICO 的输入电流幅度，使该输入电流处于 ICO 的线性范围内。也就是说，需要调整 CTSUSO 的设定值，使 Sensor ICO counter 的计数值和 CTSURICOA=0x03FF 时的 Reference ICO counter 的计数值一致。可以实现的最大补偿电流约为 100uA。由于每个 MCU 的 Reference ICO counter 的输入—输出特性存在差异，因此需要通过执行补偿程序逐一调整。

(5) Sensor ICO 的下溢

利用前面介绍的电流补偿方法时，如果输入 Sensor ICO 的电流小于补偿电流，Sensor ICO 将发生下溢。此时，无法得到正确的 Sensor ICO counter 计测结果，其计测结果为不定值。为了防止 Sensor ICO 下溢造成误测，计测结束时必须确认 TSCAP 电压异常监视位，确定计测结果是否正确。如果电压异常监视位 CTSUICOMP = 1，表明某个 TS 端子的计测发生了下溢，这时需要重新设定该 TS 端子的补偿值，或者停止计测。Sensor ICO 电流补偿正确时，通常不会发生下溢。通常发生下溢的原因，有可能是 TS 端子和触摸电极间的引线断路，造成静电容量显著减少；或者是 TS 端子与其他引线意外接触，造成 TSCAP 电压出现异常。无论是哪个原因，硬件原因造成下溢发生的可能性较高，使用软件方法可能无法处理。

4.3.2 互电容方式的 CTSU 设定

(1) 初始化设定

利用互电容方式计测电容时，和自电容方式相同，首先也必须执行初始化设定。详细内容请参考硬件手册。

(2) ICO counter 的计测时间

互电容方式的单次计测时间与自电容方式相同。但是正如 4.2.2 互电容方式触摸键的设计所述，互电容方式需要对每个电极执行 2 次计测，因此计测时间是自电容方式的 2 倍。

(3) IO driver (SCF) 驱动频率的决定

和自电容方式相同，首先粗略计算电容的容值，然后根据这一电容值决定 SCF 的频率。

4.4 软件处理

4.4.1 自电容方式的软件处理

(1) 计测处理

CTSU 连续测量触摸键的静电电容量，并根据电容量的变化判断触摸键的 ON/OFF。因此，必须以一定的周期循环测量静电电容。CTSU 逐个测量设定为计测对象的 TS 端子上的静电电容量，并通过 DTC 将各 TS 端子的静电电容测量值 (Sensor ICO counter、Reference ICO counter) 存储到 RAM 中。软件按照一定的周期定期启动 CTSU 测量电容量，并在测量结束中断发生后读取存储在 RAM 中的测量结果，根据测量结果判断键的 ON/OFF。CTSU 对 1 个 TS 端子的测量时间约为 500us，如果对 10 个 TS 端子执行测量过程，共计需要 5ms 左右。

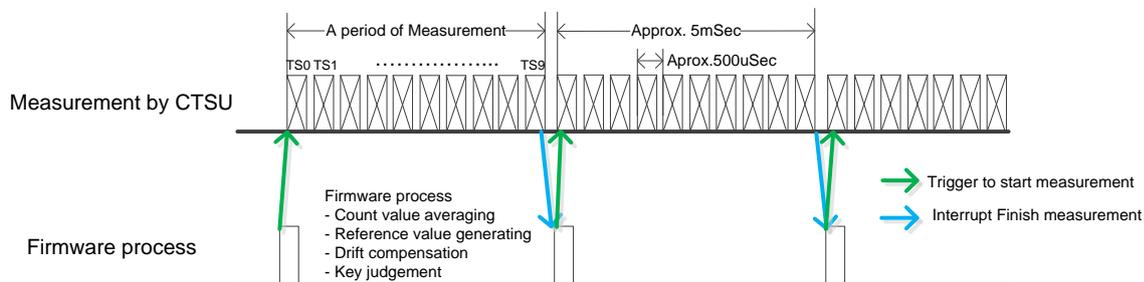


图 4.16 CTSU 计测和软件的时序

(2) 基准值和临界值的计算

和机械触点型开关不同，触摸开关并不存在确定的 ON/OFF 状态，它是通过测量静电电容的变化，判断有无人体的接触。为了测量静电电容量的变化，首先需要设定非接触状态下的测量值，并把它作为基准值。当实际的测量值和基准值的差值大于某一阈值时，判断为 Touch Key ON。而这个差值的阈值，就称之为临界值。计算一定次数的测量值的平均值，作为下一次 ON/OFF 判断的基准值。通过更改用来求取平均值的测量值的次数和更改基准值的更新速度，可以调整触摸键的反应速度。此外，改变阈值的大小，可以调整触摸键的灵敏度。当判定结果为 ON 时，为了避免此时基准值跟随测量值变化逐渐接近测量值，出现判定结果为 OFF 的误判，当判定结果为 ON 时，暂停基准值对测量值的跟随。当测量值下降到 OFF 临界值后，再重新启动基准值对测量值的跟随。

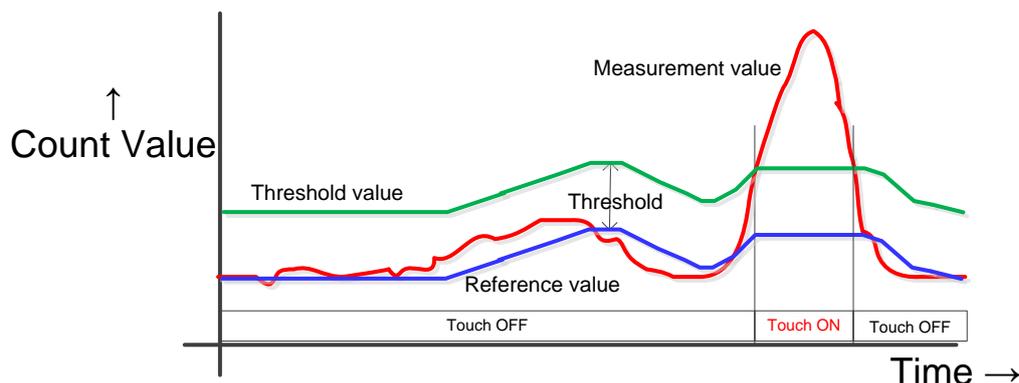


图 4.17 测量值、基准值、阈值和判断结果 ON/OFF 的关系

(3) 软件参数的调整

标准软件中可以调整的参数如下所示。

- Continual touch limiter (持续 ON 取消, 强制 OFF)**
 强噪声或者寄生电容的激增, 有时会造成持续的 Key ON 状态。而且即使强噪声消失后, 也无法返回 Key OFF 的初始状态。出现这一现象, 是由于漂移校正功能对于环境因素造成的电容量的急剧增加, 无法跟随所致。为了恢复到初始状态, 当检测到 Key ON 状态并且这一状态已持续一定时间后, 需要强制返回到 OFF 状态, 并重新启动漂移校正功能。这一操作被称为持续 ON 取消。通过设定参数, 可以启用或禁用本功能, 还可以设定连续 ON 的次数。
- Drift correction (漂移校正)**
 如上所述, 基准值通过计算多次测量值的平均值得到的。改变基准值对测量值的跟随速度, 可以调整触摸键的反应速度和对环境的适应性。通过设定参数, 可以启动或禁用本功能, 还可以设定用于计算基准值的测量值的数目。
- Response delay time to touch/non-touch (连续 ON/OFF 判定)**
 防抖颤的方法。ON 或者 OFF 的状态持续一定次数时, 确定当前状态为 ON 或者 OFF。通过设定参数, 可以启用或禁用本功能, 还可以设定连续 ON/OFF 的次数。
- Hysteresis (迟滞)**
 另一种防抖颤的方法。Key ON 后, 给临界值加上一个常数, 使 OFF→ON、ON→OFF 的临界值具有迟滞性, 从而防止抖颤。通过设定参数, 可以设定各个触摸键的迟滞常数。
- Threshold (阈值)**
 接触键时, 计测值的变化量如果超过临界值, 判定为 Key ON。通过设定参数, 可以设定每个触摸键的临界值。

4.4.2 互电容方式的软件处理

互电容方式的软件处理方法和自电容方式基本相同。如前所述，当人体接近时，组成互电容方式的一对电极间的电容量减少，因此，在计测值减小的方向设置临界值，判定触摸开关的 ON/OFF。详细的软件处理方法，请参考软件处理的应用说明。

5. 抗扰度

5.1 概要

静电电容式触摸开关是基于静电电容量的微弱变化而工作的。因此，设计时必须尽量避免噪声和电源波动的影响。

瑞萨电子提供的 Touch 解决方案，不仅在 CTSU 中内置了如前所述的各种噪声抑制电路，同时还提供了用于抑制噪声的软件滤波器。并且通过对用户基板的优化处理，进一步提高了抗噪声性能。本章对这些抗噪声对策分别进行介绍。

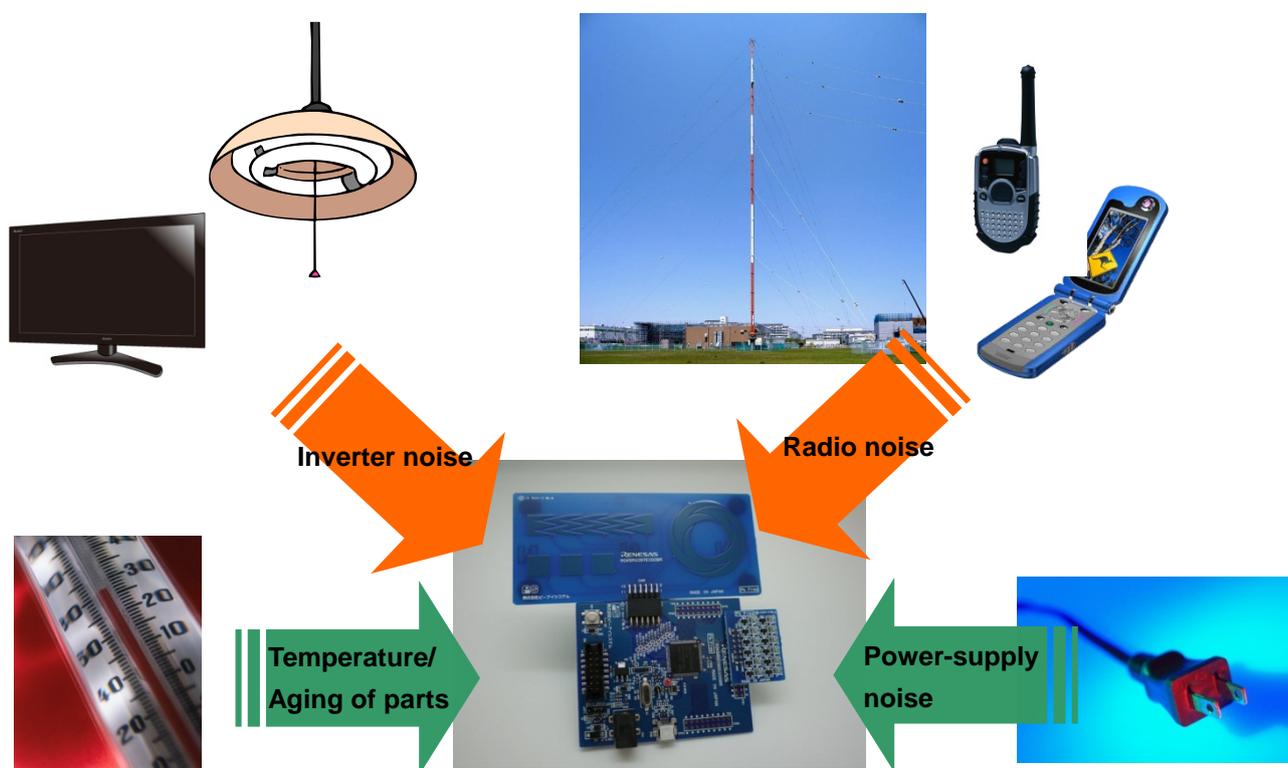


图 5.1 影响 Touch 检测的外部干扰源

5.2 基板的抗噪声对策

5.2.1 电源电路

电源电路必须为 Touch MCU 提供非常稳定的电源。以下列举电源电路的注意事项和抗噪声对策。

(1) 使用 3 端稳压器

推荐使用足够功率的 3 端稳压器，以消除电源电路中的纹波。

(2) TS 计测端子的附近端子的处理

关于 TS 计测端子附近的端子，建议不要将其用于输出驱动 LED 的 PWM 波、声音信号输出，以及串行通信等高速、高电流的场合。特别是互电容方式中送信端子和 Vcc 之间的端子，由于其消耗电流增加会造成 MCU 内部供给端子电压的下降，从而使得 Touch 计测不稳定，因此不建议使用这些端子输出电流。

(3) 使用铁氧体磁环

如果电源线上有可能发生传导噪声，推荐在电源线上串入铁氧体磁心。

(4) 电源的分离

和其他器件共用同一个电源时，要确保电源具备足够的负载能力，并且在电源输出的起始处将电源线分离，以减少来自其他器件的影响。

5.2.2 Touch 电极及其引线

Touch 电极及其引线相当于引入噪声的天线，因此在电磁噪声的环境中，需要采取对策来抑制电磁噪声的干扰。以下列举设计时的注意事项和对策。

(1) 布线

建议尽量缩短 Touch 电极和 TS 端子间的引线。此外，应避免引线和高速信号线平行分布，否则噪声可能通过电容耦合的方式叠加到 Touch 引线上。

(2) 地线的设计

在可能出现电磁噪声的环境中，建议在 Touch 电极及其引线周边布置地线，用以实现屏蔽电磁噪声的效果。然而，布置屏蔽用的地线会增加寄生电容量，从而影响触摸电极的灵敏度。因此，可使用 7:3 比例的网状地线（空白区域：70%，铺铜区域：30%），以减轻对灵敏度的影响。

(3) 电极面板

用于覆盖电极的电极面板的厚度及材质，要对可能发生的静电具备足够的绝缘性能和抗破坏性。此外，由于静电可能会通过面板和 PCB 的接合处对电极放电，因此设计时需要避免面板接合处的缝隙。



图 5.2 静电通过面板间隙对电极放电的示例

5.3 CTSU 的抗扰度

为了抑制由于辐射、传导引入的噪声，CTSU 内置了多种噪声抑制电路，以稳定静电电容的测量。以下分别说明这些电路的组成。

5.3.1 SCF 时钟的相移

为了使用 SCF 将静电电容量转换为电流量，CTSU 按照一定的周期切换 SCF 开关的 ON/OFF 状态，实现对外部电容充电/放电的循环操作。此时，如果在电极上混入和 SCF 开关同周期的噪声，并且噪声的波峰/波谷与充电/放电期间始终一致，那么电流会因噪声相应增加或减少，可能会造成测量无法正确进行。作为解决同周期噪声的对策，CTSU 内置了 SCF 驱动脉冲的相移电路。通过反转驱动脉冲的相位，防止驱动脉冲和噪声的波峰/波谷同相位。相移由多项式计数器决定，1 次计测中，SCF 脉冲的相移次数和 180°相移次数要一致。

同周期噪声的影响和 180°相移对同周期噪声的抑制作用，如图 5.3 所示。充电时如果 SCF 驱动脉冲和噪声的波峰同相，噪声产生的电流分量会叠加到电流的充放电波形上。此时，充电电流会因噪声而增加，造成计测结果大于实际容量。如果噪声产生的容量大于手指接触所产生的电容增加量，就会发生由于噪声的干扰，即使无触摸动作，判定结果却为 ON 的误判。因此，需要按照一定的规则对 SCF 驱动脉冲执行 180°相移，通过反转驱动脉冲和噪声的同步关系，平衡因噪声造成的电流量增减。多项式计算器的次数和频率，可以通过 CTSU 的寄存器调整。

此外，位移对策不仅可以抑制同频率的噪声，对频率为驱动脉冲频率奇数倍的噪声同样有效。

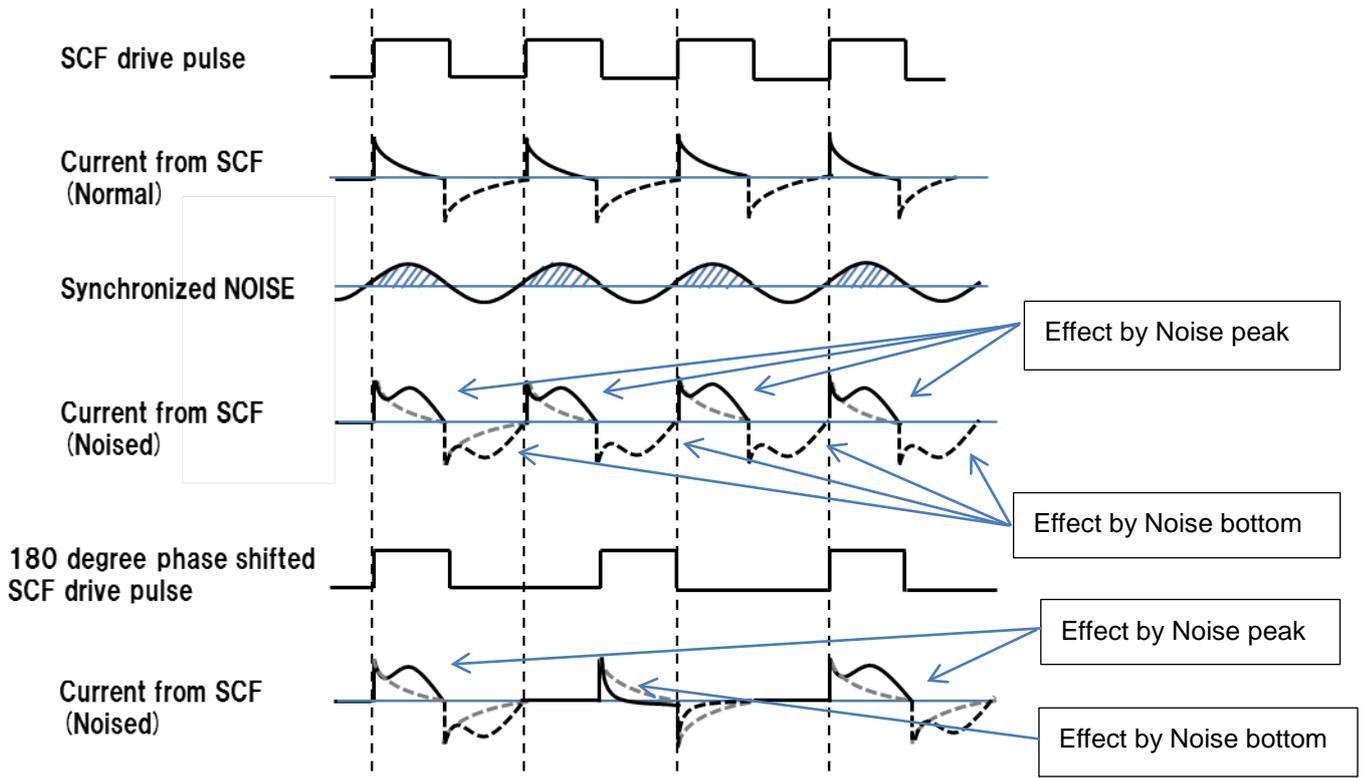


图 5.3 同周期噪声的影响和 180°相移对同周期噪声的平衡化

5.3.2 SCF 驱动脉冲的边沿扩散

噪声频率是 SCF 驱动脉冲频率的整数倍时，驱动脉冲的边沿会和噪声同步，对静电电容的测量造成影响。对于如图 5.4 所示的噪声，可以利用和驱动脉冲非同步的信号对 SCF 驱动脉冲的边沿做归一化处理，扩展边沿频率。如前所述，将调制后的电流输入到 ICO for spread spectrum 产生归一化所用的脉冲，可以避免 SCF 驱动脉冲与噪声的同步（参考图 5.5）。

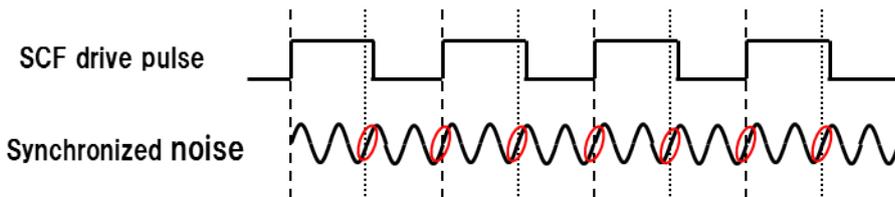


图 5.4 SCF 驱动脉冲和倍频噪声的示例

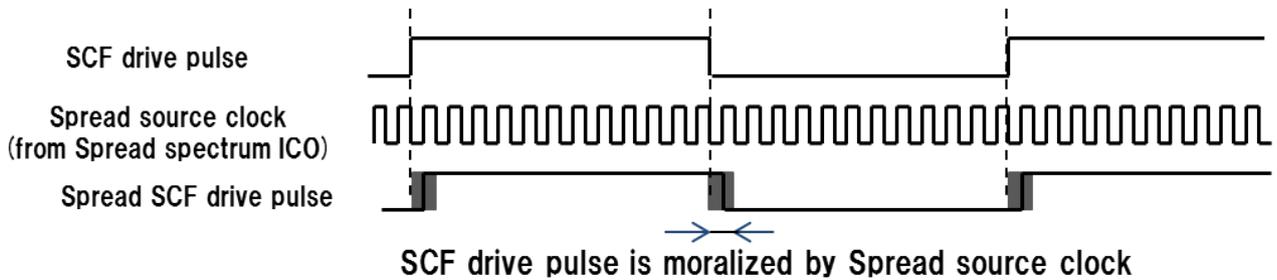


图 5.5 通过扩展时钟对 SCF 驱动脉冲归一化

5.4 软件对策

CTSU 内置的抗干扰电路无法消除数 KHz 以下的低频噪声。数 KHz 频域的低频噪声需要通过软件方法消除。以下举例说明抑制低频噪声的软件对策。

5.4.1 漂移校正处理

触摸检测的结果会受到温度、湿度、材料老化等环境变化的影响。这些频率为数 Hz 以下的缓慢变化，很难通过硬件处理。因此，需要通过软件积分的方法抑制这些低频噪声的干扰。

漂移校正的工作原理如图 5.6 所示。如前所述，基准值以及在其基础上生成的 ON/OFF 阈值是由软件计算生成的。计测值和生成的阈值逐次比较，进而判定触摸或非触摸（ON/OFF）。计测值积分运算后的结果取平均值作为基准值，可以平缓环境变化对计测值造成的变动。变更积分运算所用的计测值的次数，可以调整对环境变化的适应性。

此外，当判定结果为 ON 时，暂停漂移校正处理；当后续的判定结果出现 OFF 时，再重启漂移校正处理。如果判定为 ON 时继续执行漂移校正处理，长时间的触摸动作会造成基准值逐渐接近计测值，并最终等于计测值，这时会出现结果为 OFF 的误判。因此，当判定结果为 ON 时，要暂停漂移校正处理，防止结果误判。

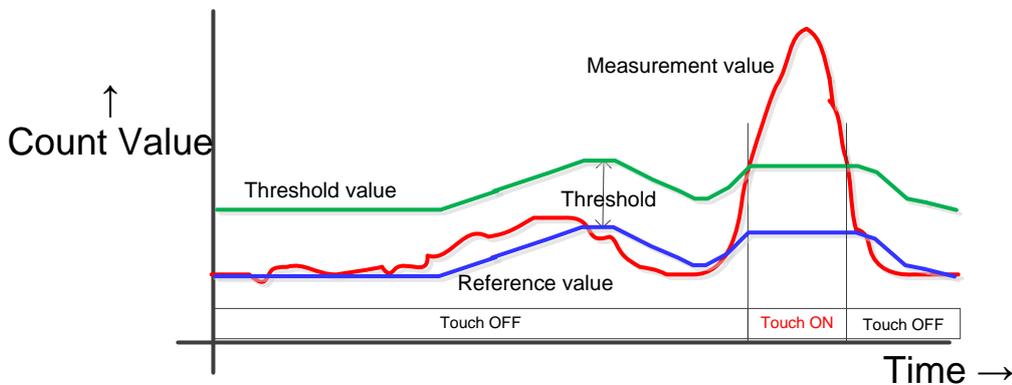


图 5.6 漂移校正处理

5.4.2 随机噪声的对策

为了抑制随机噪声对计测值的干扰，软件中增加了对计测值执行平滑处理的软件滤波器。以下通过实例对软件滤波器进行说明。

(1) 平滑滤波器

平滑滤波器的实例，如图 5.7 所示。在本例中，使用本次计测值及前 3 次计测值（共计 4 次）的平均值作为本次检测的计测值。通过调整计算平均值所用的计测值的个数，可以抑制不同频率的噪声。例如，计测周期 = 20ms 时，为了抑制 10Hz 的噪声（噪声周期 = 100ms），需要使用 5 个以上的计测值计算平均值。需要注意的是，用于计算平均值的计测值个数越多，触摸键的反应速度越慢。

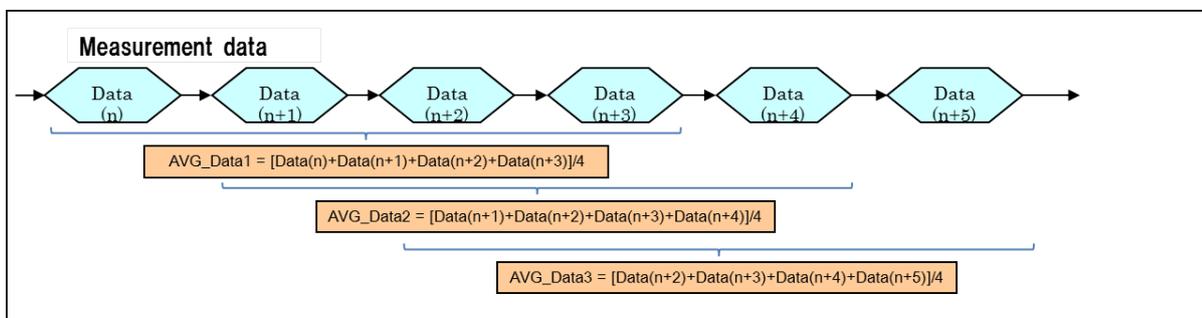


图 5.7 平滑滤波器的示例

(2) 上限滤波器

上限滤波器，首先比较本次计测值和前次计测值。如果二者的差值大于预先设定的差值上限，则将前次计测值与差值上限之和作为本次的计测值。当系统中出现爆发式噪声时，计测值会出现剧烈的变化。使用上限滤波器，能够实现平稳计测值的作用。上限滤波器的应用示例，如图 5.8 所示。在本例中，如果本次计测值与前次计测值的差值大于 ± 20 ，则将差值限定为 ± 20 。如图所示，通过限制计测值的急剧增减，抑制了因噪声造成的触摸/非触摸的误判。由于上限滤波器削减了噪声的峰值，因此在抑制噪声方面，比前面介绍的平滑滤波器更为有效。但同样需要注意的是，设定缩小差值的上限/下限，会增加触摸检测的时间，从而降低触摸键的反应速度。

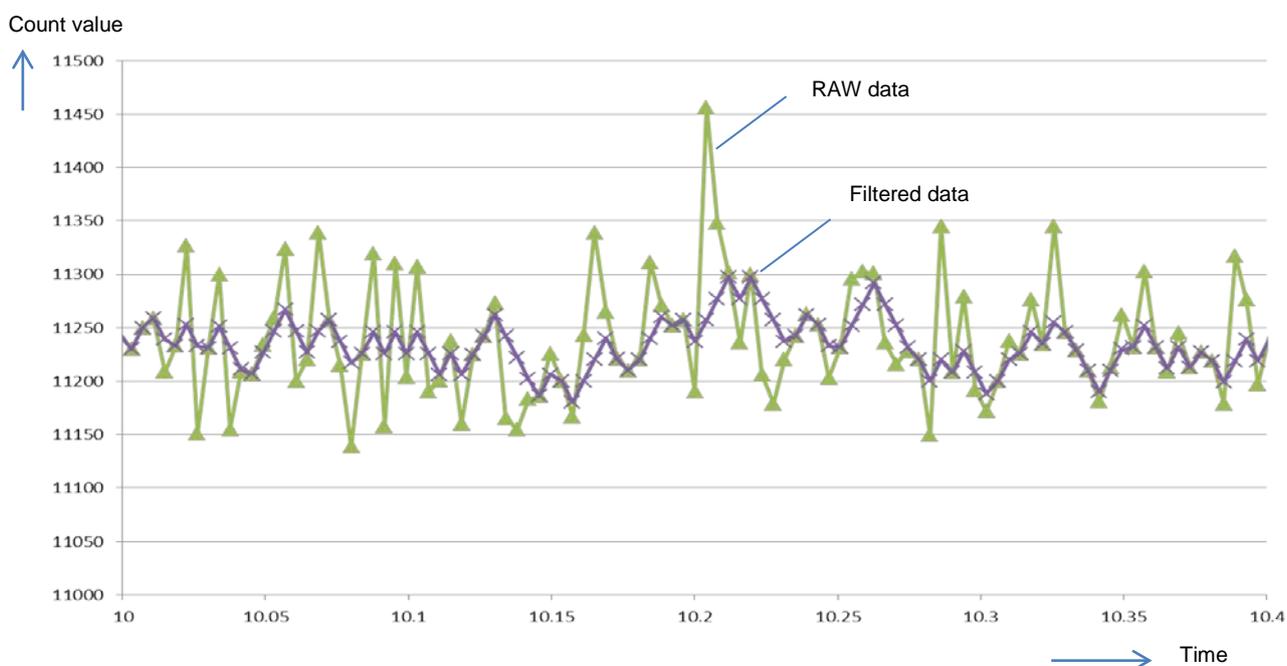


图 5.8 上限滤波器的应用示例

5.4.3 抖动噪声的对策

和机械触点型开关相同，使用触摸键有时也需要消除抖动。以下说明消除抖动的对策。

(1) N 次一致法

判断触摸键 ON \rightarrow OFF、OFF \rightarrow ON 的状态变化时，如果连续 N 次的判断结果一致，即 N 次的判断结果均为 ON 或均为 OFF 时，判定为 ON 或者 OFF。增加连续一致的次数 N，可强化抑制抖动的效果，但会降低触摸键的反应速度。

(2) 多数一致法

累计一定时间内的 ON 或者 OFF 的次数，将次数多者作为本次的判断结果。和上述的 N 次一致法相比，多数一致法的判断速度更快，但去抖动能力相对较低。

6. 附录

6.1 开关电容滤波器 (SCF)

结合水车的工作原理，可以更加容易理解 SCF 的工作。以下将 SCF 的电流、电容、驱动频率分别比作水车的水流、水桶和水桶数目，来进行说明。如图 6.1 所示，悬挂着水桶的水车以一定的速度旋转，同时水管向水车内源源不断地注水。水车的另一端连接着水槽，将水桶内的水倒入水槽，在水槽内形成一定的水流。如果水车上的水桶数目加倍（相当于一定时间内水车的转速上升 → 频率增加），那么水槽内的水流也相应加倍，如图 6.2 所示。如果水桶的容积加倍（每次的注水量增加 → 电容量增加），水槽内的水流同样加倍，如图 6.3 所示。但是，如图 6.4 所示，如果水桶的数目无限制地增加，那么每一个水桶的注入水量就会减少。当水桶数目增加到一定数量后，水流量就不再随着水桶数目的增加而增加了。而且，由于注水量不满一桶，效率也下降了。



所以，对于 SCF 来说，选择使电容达到满充电的最大驱动频率，是最有效率的做法。此外，最大限度地增加电容的容量值，则可以捕捉微弱的电容变化。

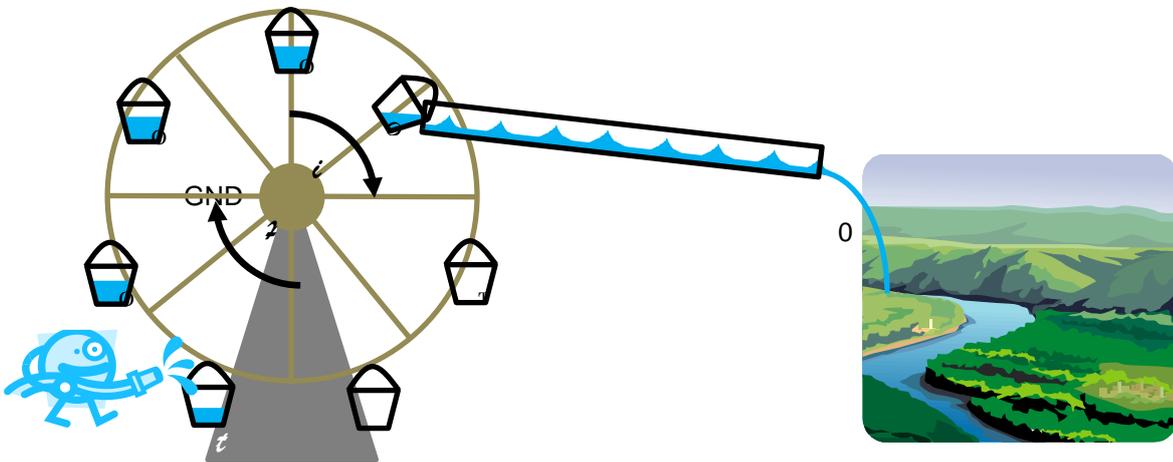


图 6.1 水车

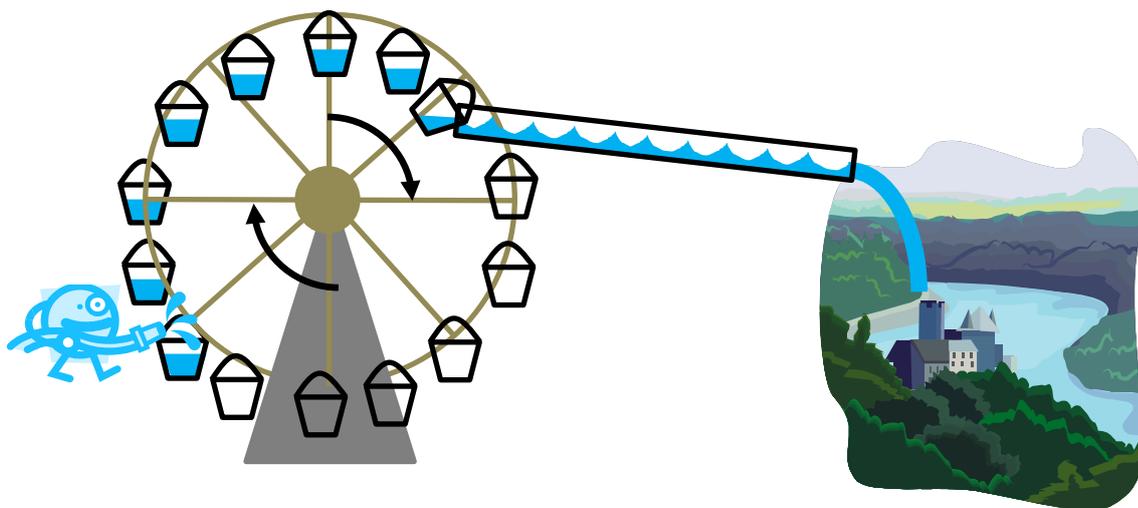


图 6.2 水桶数目×2 倍（频率增加）

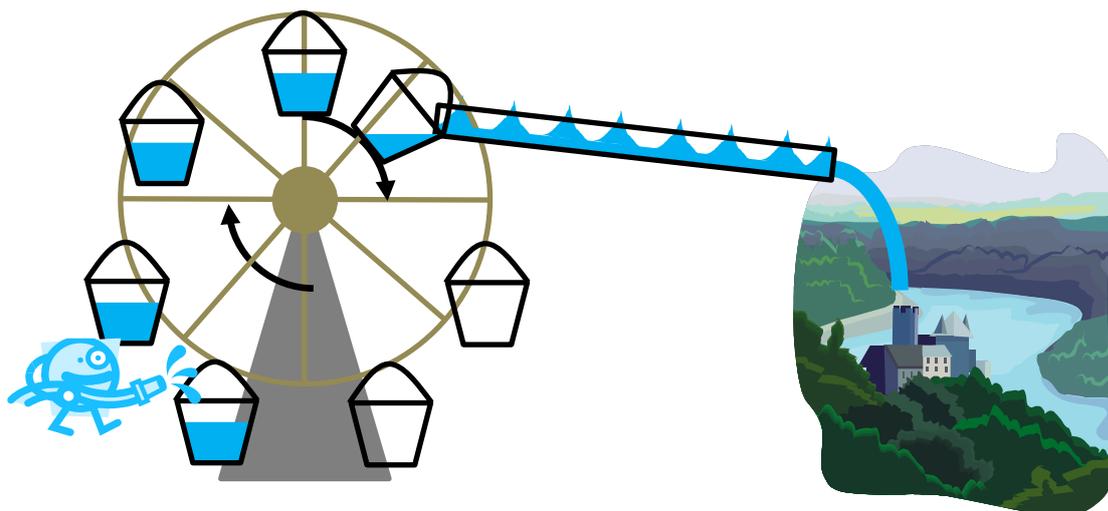


图 6.3 水桶容积 $\times 2$ 倍

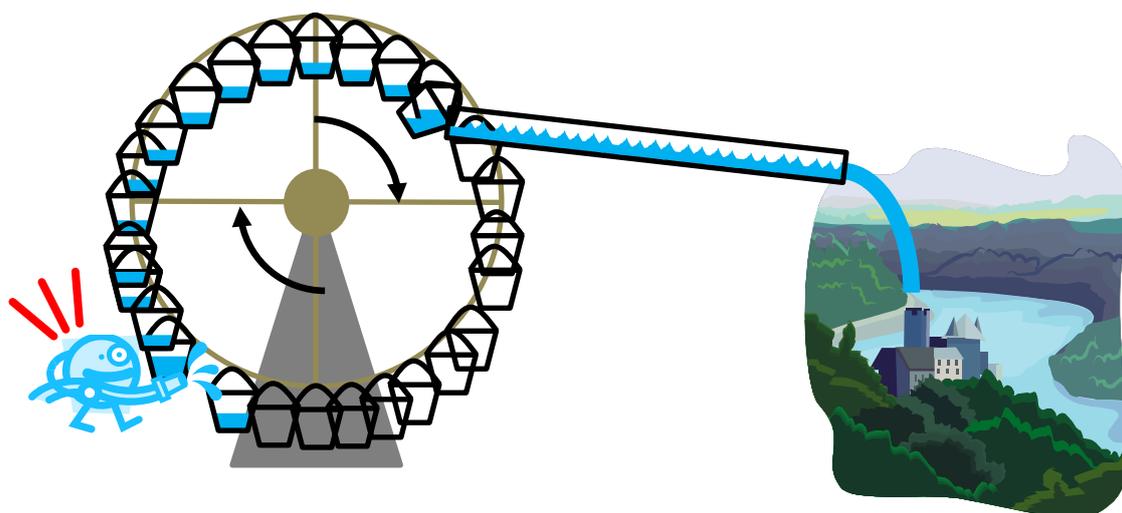


图 6.4 水桶数目 $\times 4$ 倍 (频率更高)

公司主页和咨询窗口

瑞萨电子主页

- <http://www.renesas.com/zh-cn/>

咨询

- <http://www.renesas.com/zh-cn/support/contact.html>

修订记录

Rev.	发行日	修订内容	
		页	要点
1.00	2016.12.31	—	出版发行

所有商标及注册商标均归其各自拥有者所有。

产品使用时的注意事项

本文对适用于单片机所有产品的“使用时的注意事项”进行说明。有关个别的使用时的注意事项请参照正文。此外，如果在记载上有与本手册的正文有差异之处，请以正文为准。

1. 未使用的引脚的处理

【注意】将未使用的引脚按照正文的“未使用引脚的处理”进行处理。

CMOS产品的输入引脚的阻抗一般为高阻抗。如果在开路的状态下运行未使用的引脚，由于感应现象，外加LSI周围的噪声，在LSI内部产生穿透电流，有可能被误认为是输入信号而引起误动作。未使用的引脚，请按照正文的“未使用引脚的处理”中的指示进行处理。

2. 通电时的处理

【注意】通电时产品处于不定状态。

通电时，LSI内部电路处于不确定状态，寄存器的设定和各引脚的状态不定。通过外部复位引脚对产品进行复位时，从通电到复位有效之前的期间，不能保证引脚的状态。

同样，使用内部上电复位功能对产品进行复位时，从通电到达到复位产生的一定电压的期间，不能保证引脚的状态。

3. 禁止存取保留地址（保留区）

【注意】禁止存取保留地址（保留区）

在地址区域中，有被分配将来用作功能扩展的保留地址（保留区）。因为无法保证存取这些地址时的运行，所以不能对保留地址（保留区）进行存取。

4. 关于时钟

【注意】复位时，请在时钟稳定后解除复位。

在程序运行中切换时钟时，请在要切换成的时钟稳定之后进行。复位时，在通过使用外部振荡器（或者外部振荡电路）的时钟开始运行的系统中，必须在时钟充分稳定后解除复位。另外，在程序运行中，切换成使用外部振荡器（或者外部振荡电路）的时钟时，在要切换成的时钟充分稳定后再进行切换。

5. 关于产品间的差异

【注意】在变更不同型号的产品时，请对每一个产品型号进行系统评价测试。

即使是同一个群的单片机，如果产品型号不同，由于内部ROM、版本模式等不同，在电特性范围内有时特性值、动作容限、噪声耐量、噪声辐射量等不同。因此，在变更不认同型号的产品时，请对每一个型号的产品进行系统评价测试。

Notice

1. Descriptions of circuits, software and other related information in this document are provided only to illustrate the operation of semiconductor products and application examples. You are fully responsible for the incorporation of these circuits, software, and information in the design of your equipment. Renesas Electronics assumes no responsibility for any losses incurred by you or third parties arising from the use of these circuits, software, or information.
2. Renesas Electronics has used reasonable care in preparing the information included in this document, but Renesas Electronics does not warrant that such information is error free. Renesas Electronics assumes no liability whatsoever for any damages incurred by you resulting from errors in or omissions from the information included herein.
3. Renesas Electronics does not assume any liability for infringement of patents, copyrights, or other intellectual property rights of third parties by or arising from the use of Renesas Electronics products or technical information described in this document. No license, express, implied or otherwise, is granted hereby under any patents, copyrights or other intellectual property rights of Renesas Electronics or others.
4. You should not alter, modify, copy, or otherwise misappropriate any Renesas Electronics product, whether in whole or in part. Renesas Electronics assumes no responsibility for any losses incurred by you or third parties arising from such alteration, modification, copy or otherwise misappropriation of Renesas Electronics product.
5. Renesas Electronics products are classified according to the following two quality grades: "Standard" and "High Quality". The recommended applications for each Renesas Electronics product depends on the product's quality grade, as indicated below.
"Standard": Computers; office equipment; communications equipment; test and measurement equipment; audio and visual equipment; home electronic appliances; machine tools; personal electronic equipment; and industrial robots etc.
"High Quality": Transportation equipment (automobiles, trains, ships, etc.); traffic control systems; anti-disaster systems; anti-crime systems; and safety equipment etc.
Renesas Electronics products are neither intended nor authorized for use in products or systems that may pose a direct threat to human life or bodily injury (artificial life support devices or systems, surgical implantations etc.), or may cause serious property damages (nuclear reactor control systems, military equipment etc.). You must check the quality grade of each Renesas Electronics product before using it in a particular application. You may not use any Renesas Electronics product for any application for which it is not intended. Renesas Electronics shall not be in any way liable for any damages or losses incurred by you or third parties arising from the use of any Renesas Electronics product for which the product is not intended by Renesas Electronics.
6. You should use the Renesas Electronics products described in this document within the range specified by Renesas Electronics, especially with respect to the maximum rating, operating supply voltage range, movement power voltage range, heat radiation characteristics, installation and other product characteristics. Renesas Electronics shall have no liability for malfunctions or damages arising out of the use of Renesas Electronics products beyond such specified ranges.
7. Although Renesas Electronics endeavors to improve the quality and reliability of its products, semiconductor products have specific characteristics such as the occurrence of failure at a certain rate and malfunctions under certain use conditions. Further, Renesas Electronics products are not subject to radiation resistance design. Please be sure to implement safety measures to guard them against the possibility of physical injury, and injury or damage caused by fire in the event of the failure of a Renesas Electronics product, such as safety design for hardware and software including but not limited to redundancy, fire control and malfunction prevention, appropriate treatment for aging degradation or any other appropriate measures. Because the evaluation of microcomputer software alone is very difficult, please evaluate the safety of the final products or systems manufactured by you.
8. Please contact a Renesas Electronics sales office for details as to environmental matters such as the environmental compatibility of each Renesas Electronics product. Please use Renesas Electronics products in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances, including without limitation, the EU RoHS Directive. Renesas Electronics assumes no liability for damages or losses occurring as a result of your noncompliance with applicable laws and regulations.
9. Renesas Electronics products and technology may not be used for or incorporated into any products or systems whose manufacture, use, or sale is prohibited under any applicable domestic or foreign laws or regulations. You should not use Renesas Electronics products or technology described in this document for any purpose relating to military applications or use by the military, including but not limited to the development of weapons of mass destruction. When exporting the Renesas Electronics products or technology described in this document, you should comply with the applicable export control laws and regulations and follow the procedures required by such laws and regulations.
10. It is the responsibility of the buyer or distributor of Renesas Electronics products, who distributes, disposes of, or otherwise places the product with a third party, to notify such third party in advance of the contents and conditions set forth in this document, Renesas Electronics assumes no responsibility for any losses incurred by you or third parties as a result of unauthorized use of Renesas Electronics products.
11. This document may not be reproduced or duplicated in any form, in whole or in part, without prior written consent of Renesas Electronics.
12. Please contact a Renesas Electronics sales office if you have any questions regarding the information contained in this document or Renesas Electronics products, or if you have any other inquiries.
(Note 1) "Renesas Electronics" as used in this document means Renesas Electronics Corporation and also includes its majority-owned subsidiaries.
(Note 2) "Renesas Electronics product(s)" means any product developed or manufactured by or for Renesas Electronics.

以下“注意事项”为从英语原稿翻译的中文译文，仅作参考译文，英文版的“Notice”具有正式效力。

注意事项

1. 本文件中所记载的关于电路、软件和其他相关信息仅用于说明半导体产品的操作和应用实例。用户如在设备设计中应用本文件中的电路、软件和相关信息，请自行负责。对于用户或第三方因使用上述电路、软件或信息而遭受的任何损失，瑞萨电子不承担任何责任。
2. 在准备本文件所记载的信息的过程中，瑞萨电子已尽量做到合理注意，但是，瑞萨电子并不保证这些信息都是准确无误的。用户因本文件中所记载的信息的错误或遗漏而遭受的任何损失，瑞萨电子不承担任何责任。
3. 对于因使用本文件中的瑞萨电子产品或技术信息而造成的侵权行为或因此而侵犯第三方的专利、版权或其他知识产权的行为，瑞萨电子不承担任何责任。本文件所记载的内容不应视为对瑞萨电子或其他人所有的专利、版权或其他知识产权作出任何明示、默示或其它方式的许可及授权。
4. 用户不得更改、修改、复制或其他方式部分或全部地非法使用瑞萨电子的任何产品。对于用户或第三方因上述更改、修改、复制或其他方式非法使用瑞萨电子产品的行为而遭受的任何损失，瑞萨电子不承担任何责任。
5. 瑞萨电子产品根据其质量等级分为两个等级：“标准等级”和“高质量等级”。每种瑞萨电子产品的推荐用途均取决于产品的质量等级，如下所示：
标准等级： 计算机、办公设备、通讯设备、测试和测量设备、视听设备、家用电器、机械工具、个人电子设备以及工业机器人等。
高质量等级： 运输设备（汽车、火车、轮船等）、交通控制系统、防灾系统、预防犯罪系统以及安全设备等。
瑞萨电子产品无意用于且未被授权用于可能对人类生命造成直接威胁的产品或系统及可能造成人身伤害的产品或系统（人工生命维持装置或系统、植埋于体内的装置等）中，或者可能造成重大财产损失的产品或系统（核反应堆控制系统、军用设备等）中。在将每种瑞萨电子产品用于某种特定应用之前，用户应先确认其质量等级。不得将瑞萨电子产品用于超出其设计用途之外的任何应用。对于用户或第三方因将瑞萨电子产品用于其设计用途之外而遭受的任何损害或损失，瑞萨电子不承担任何责任。
6. 使用本文件中记载的瑞萨电子产品时，应在瑞萨电子指定的范围内，特别是在最大额定值、电源工作电压范围、移动电源电压范围、热辐射特性、安装条件以及其他产品特性的范围内使用。对于在上述指定范围之外使用瑞萨电子产品而产生的故障或损失，瑞萨电子不承担任何责任。
7. 虽然瑞萨电子一直致力于提高瑞萨电子产品的质量和可靠性，但是，半导体产品有其自身的具体特性，如一定的故障发生率以及在某些使用条件下会发生故障等。此外，瑞萨电子产品均未进行防辐射设计。所以请采取安全保护措施，以避免当瑞萨电子产品在发生故障而造成火灾时导致人身事故、伤害或损害的事故。例如进行软硬件安全设计（包括但不限于冗余设计、防火控制以及故障预防等）、适当的老化处理或其他适当的措施等。由于难于对微软件单独进行评估，所以请用户自行对最终产品或系统进行安全评估。
8. 关于环境保护方面的详细内容，例如每种瑞萨电子产品的环境兼容性等，请与瑞萨电子的营业部门联系。使用瑞萨电子产品时，请遵守对管制物质的使用或含量进行管理的所有相应法律法规（包括但不限于《欧盟RoHS指令》）。对于因用户未遵守相应法律法规而导致的损害或损失，瑞萨电子不承担任何责任。
9. 不可将瑞萨电子产品和技术用于或者嵌入日本国内或海外相应的法律法规所禁止生产、使用及销售的任何产品或系统中。也不可对本文件中记载的瑞萨电子产品或技术用于与军事应用或者军事用途有关的目的（如大规模杀伤性武器的开发等）。在将本文件中记载的瑞萨电子产品或技术进行出口时，应当遵守相应的出口管制法律法规，并按照上述法律法规所规定的程序进行。
10. 向第三方分销或处分产品或者以其他方式将产品置于第三方控制之下的瑞萨电子产品买方或分销商，有责任事先向上述第三方通知本文件规定的内容和条件；对于用户或第三方因非法使用瑞萨电子产品而遭受的任何损失，瑞萨电子不承担任何责任。
11. 在事先未得到瑞萨电子书面认可的情况下，不得以任何形式部分或全部转载或复制本文件。
12. 如果未对本文件所记载的信息或瑞萨电子产品有任何疑问，或者用户有任何疑问，请向瑞萨电子的营业部门咨询。
(注1) 瑞萨电子：在本文件中指瑞萨电子株式会社及其控股子公司。
(注2) 瑞萨电子产品：指瑞萨电子开发或生产的任何产品。



SALES OFFICES

Renesas Electronics Corporation

<http://www.renesas.com>

Refer to "<http://www.renesas.com/>" for the latest and detailed information.

Renesas Electronics America Inc.
2801 Scott Boulevard Santa Clara, CA 95050-2549, U.S.A.
Tel: +1-408-688-0000, Fax: +1-408-688-6130

Renesas Electronics Canada Limited
9251 Yonge Street, Suite 8309 Richmond Hill, Ontario Canada L4C 9T3
Tel: +1-905-237-2004

Renesas Electronics Europe Limited
Dukes Meadow, Millboard Road, Bourne End, Buckinghamshire, SL8 5FH, U.K
Tel: +44-1628-585-100, Fax: +44-1628-585-900

Renesas Electronics Europe GmbH
Arcadiastrasse 10, 40472 Düsseldorf, Germany
Tel: +49-211-6503-0, Fax: +49-211-6503-1327

Renesas Electronics (China) Co., Ltd.
Room 1709, Quantum Plaza, No.27 ZhiChunLu Haidian District, Beijing 100191, P.R.China
Tel: +86-10-8235-1155, Fax: +86-10-8235-7679

Renesas Electronics (Shanghai) Co., Ltd.
Unit 301, Tower A, Central Towers, 555 Langa Road, Putuo District, Shanghai, P. R. China 200333
Tel: +86-21-2226-0888, Fax: +86-21-2226-0999

Renesas Electronics Hong Kong Limited
Unit 1601-1611, 16/F., Tower 2, Grand Century Place, 193 Prince Edward Road West, Mongkok, Kowloon, Hong Kong
Tel: +852-2265-6888, Fax: +852-2886-9022

Renesas Electronics Taiwan Co., Ltd.
13F, No. 363, Fu Shing North Road, Taipei 10543, Taiwan
Tel: +886-2-8175-9600, Fax: +886-2-8175-9670

Renesas Electronics Singapore Pte. Ltd.
80 Bendemeer Road, Unit #05-02 Hyflux Innovation Centre, Singapore 339949
Tel: +65-6213-0200, Fax: +65-6213-0300

Renesas Electronics Malaysia Sdn.Bhd.
Unit 1207, Block B, Menara Amcorp, Amcorp Trade Centre, No. 18, Jin Persiaran Barat, 46050 Petaling Jaya, Selangor Darul Ehsan, Malaysia
Tel: +60-3-7955-9390, Fax: +60-3-7955-9510

Renesas Electronics India Pvt. Ltd.
No.777C, 100 Feet Road, HAL II Stage, Indiranagar, Bangalore, India
Tel: +91-80-67208700, Fax: +91-80-67208777

Renesas Electronics Korea Co., Ltd.
12F., 234 Teheran-ro, Gangnam-Gu, Seoul, 135-080, Korea
Tel: +82-2-558-3737, Fax: +82-2-558-5141