
PTC 子系统固件用户指南

简介

本用户指南介绍了 PTC（外设触摸控制器）子系统固件，并说明了驱动程序提供的软件设置的工作原理，其中清楚地描述了每个参数的作用和确保 PTC 正常工作所需的设置。

本文档适用于 PTC 子系统固件版本 6.0 或更高版本。

参考文档

标题	文档类型	文档编号
运用 SAMA5D2 MPU 实现 QTouch® 解决方案	应用笔记	AN2472
QTAN0079——按钮、滑动条和滑轮传感器设计指南	应用笔记	10752

目录

简介.....	1
参考文档.....	1
1. 概述.....	4
1.1. 说明.....	4
1.2. 特性.....	4
2. 电容式触摸传感器.....	6
2.1. 通用.....	6
2.2. 定义.....	6
3. 使用 PTC 子系统的 QTouch 技术.....	12
3.1. 简介.....	12
3.2. PTC 模拟前端.....	13
3.3. PTC 数字控制器.....	17
4. 固件和 QTouch 模块化库 (QTML)	18
4.1. 固件.....	18
4.2. QTouch 模块化库.....	19
4.3. 配置参数示例.....	21
4.4. 数据参数示例.....	22
4.5. 邮箱映射.....	22
4.6. 固件初始化.....	31
4.7. 采集模块.....	31
4.8. 按键模块.....	35
4.9. 滚动条模块.....	40
4.10. 跳频模块.....	42
5. 版本历史.....	46
5.1. 版本 A——2017 年 11 月.....	46
Microchip 网站.....	47
变更通知客户服务.....	47
客户支持.....	47
Microchip 器件代码保护功能.....	47
法律声明.....	48
商标.....	48

DNV 认证的质量管理体系.....	49
全球销售及服务网点.....	50

1. 概述

1.1 说明

PTC 子系统适合自主执行电容式触摸传感器测量。外部电容式触摸传感器通常在 PCB 上形成，传感器电极使用器件 I/O 引脚连接到 PTC 的模拟电荷积分器。

在互电容模式下，PTC 的每条 X 线路（驱动线路）和 Y 线路（传感线路）都分别需要一个引脚。在自电容模式下，PTC 的每个自电容传感器只需要一个带有 Y 线驱动器的引脚。

1.2 特性

- 实现低功耗、高灵敏度、不受环境影响的可靠电容式触摸按钮、滑块和滚轮
 - 每个电极一个引脚——无需外部元件
 - 在温度和电源/参考电压范围内零漂移
 - 无需温度或电源/参考电压补偿
- “按需”或“定时”测量
- 支持互电容和自电容传感功能
 - 在自电容模式下最多 8 个按钮
 - 在互电容模式下最多 64 个按钮
 - 支持集总模式配置⁽¹⁾
- 校准
 - 负载补偿电荷传感功能
 - 对寄生电容和电极电容进行补偿
- 增益可调节，提高了灵敏度
 - 模拟增益 1 到 16
 - 数字增益 1 到 32
- 抗噪声
 - 基于累积 1 到 64 进行硬件噪声滤波
 - 支持相邻按键抑制，消除了虚假检测⁽²⁾
 - 跳频：去同步噪声信号，提高了传导抗扰度⁽³⁾
- 提供了 PTC 子系统固件⁽⁴⁾
- 采集模块（节点定义、pPP 和 PTC 管理）与产品相关，它实现了配置和测量电容式触摸传感器或接近传感器时所有与硬件相关的操作。
- 信号调理（跳频）模块采用算法和反馈控制方法来改善采集模块捕获到的测量数据的质量。
- 后处理模块（Key 和 Scroller）基于电容式触摸传感器或接近传感器的环境对测量数据进行解析。
- Scroller 模块定义滑块和滚轮配置以及数据。它基于 Key 模块设置来工作。

注:

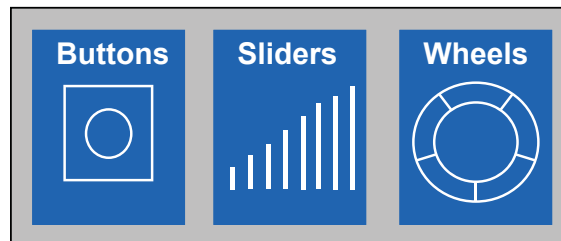
1. 集总传感器的实现形式为：将多条传感线路（自电容测量）或多个驱动和传感线路（互电容测量）相组合，以用作一个按钮传感器。这在触摸传感器实现中为应用开发人员提供了极大的灵活性。
2. PTC 集成了相邻按键抑制（Adjacent Key Suppression, AKS）技术，可以根据单个按键进行选择。AKS 技术用于基于相关信号强度抑制多个按键按压操作。此特性有助于解决表面潮湿的问题，表面潮湿会产生到相邻按键的按键触摸，从而导致多个按键按压操作。
3. 此 PTC 子系统支持跳频，此功能会尝试选择不与产品或产品工作环境中其他位置的特定频率噪声冲突的采样频率。跳频会尝试跳过噪声。
4. 要使用 PTC 子系统，必须使用 Microchip 提供的固件。

2. 电容式触摸传感器

2.1 通用

电容式触摸传感器可取代传统的机械接口，工作时无机械磨损，并且对环境封闭。它们为工业设计提供了更大的灵活性，能够使最终产品设计脱颖而出。

图 2-1. 传感器类型



2.2 定义

2.2.1 电极

电极通常是印刷电路板上的覆铜区域，但也可以是玻璃或塑料触摸屏上的透明导电铟锡氧化物（Indium Tin Oxide, ITO）区域。

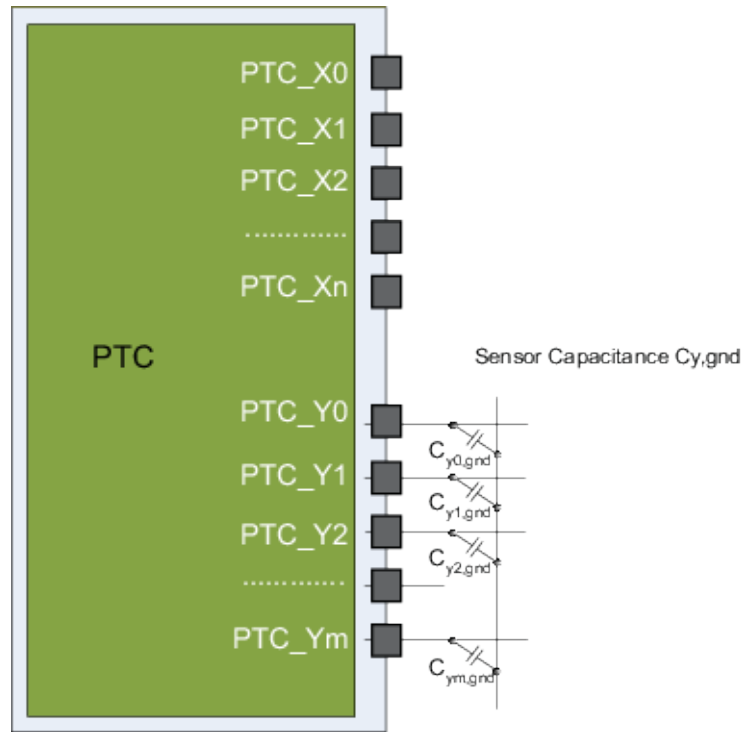
- X 线路：用于互电容测量的驱动电极（或驱动线路）。
- Y 线路：用于互电容和自电容的传感电极（或传感线路）。

不能在电气直流耦合中直接接触 X 电极和 Y 电极；必须在交流耦合中接触。电极金属需要用电绝缘层覆盖。如果手指接触金属，测量结果将是错误的，PTC 可能会停止正常工作。

2.2.2 自电容传感器

与自身的其中一个部件（Y 电极）存在连接的传感器。测量从 Y 到地的自电容。

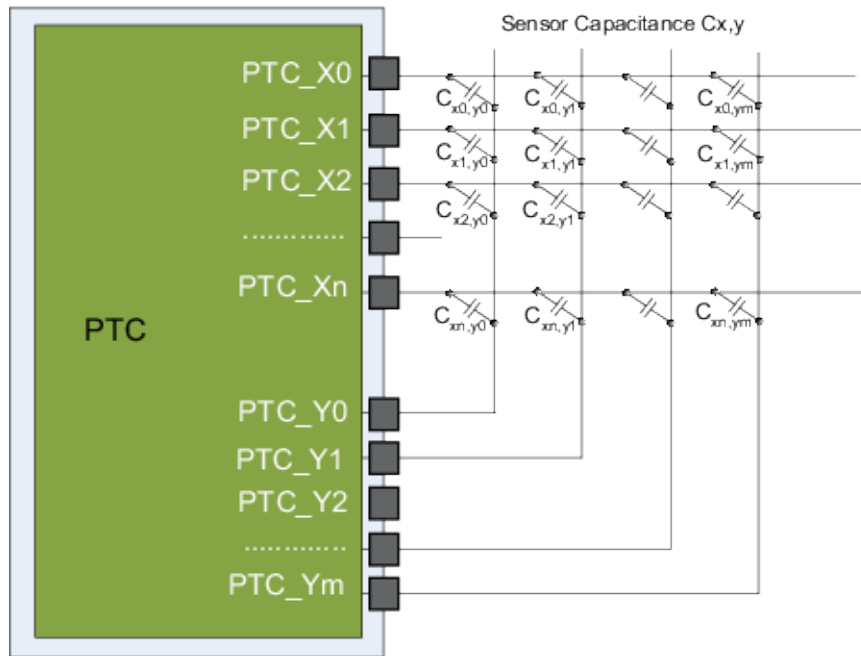
图 2-2. 自电容传感器



2.2.3 互电容传感器

与自身的两个部件（X（驱动）电极和 Y（传感）电极）存在连接的传感器。测量从 X 到 Y 的互电容。

图 2-3. 互电容传感器



2.2.4 节点或通道

电容测量点之一，传感器控制器可在其上检测电容变化（“节点”和“通道”具有相同的含义）。

2.2.5 传感器

用于形成触摸传感器的一个节点或一组节点。传感器有四种类型：按钮、滚轮、滑动条和表面。高级触摸处理模块（例如滚动条和表面）需要触摸软件按键模块，在这种情况下，1D 和 2D 位置传感器实现为一组触摸按键。触摸按键模块管理触摸接触的检测，其中更高级模块执行位置插值和接触跟踪等。

按键或按钮：形成单键型传感器的单个通道。零维传感器是一种代表单个接触点的传感器。所有传感器均基于按键。

滚动条：线性传感器滑动条或滚轮。

线性传感器可以采用任何物理形状，是否从最后一个传感器折回到第一个传感器均可。折回的传感器配置为“滚轮”，不折回的传感器配置为“滑动条”。配置为滚轮时，以第一个按键为中心的接触点使用最后一个按键进行“左侧”插值，反之亦然；而滑动条选项则在末尾实现死区。

滑动条：一组通道形成滑动条传感器，以检测触摸的线性位置。

线性传感器利用排成一行的两个或更多个相邻传感器节点的触摸增量来计算沿该行的接触点的位置。设计传感器布局和配置阈值时，应确保接触传感器上的任何位置时都会引起：

1. 至少一个传感器节点上的触摸增量超过阈值
可将具有最大触摸增量的节点确定为接触点的中心节点，并且利用该节点标识接触点的大致位置。
2. 相邻节点上出现一定触摸增量，用于节点之间的位置插值
中心节点左侧和右侧节点上的相对增量用于将计算出的触摸位置向具有最大增量的一侧调整。

转子或滚轮：一维传感器在触摸期间（即，沿着单个轴）检测手指的线性移动。这种类型的传感器是一组通道，这些通道形成滚轮传感器以检测触摸的角位置。

QTouch[®]表面和触摸板：（也称为 QMatrix 技术）二维传感器。

线性传感器在物理上以一行按键的形式实现，利用相同的方法，可以通过按键网格扩展到 2D 位置检测。按键的设计应保证可以在垂直或水平方向上进行插值，并且多个单独接触点可在各自的插值位置单独解析。

2.2.6 插值传感器

一种利用电极的形状在传感器上方电场实现空间插值的传感器。此技术提高了触摸传感器的分辨率。

2.2.6.1 空间插值互电容滑动条或滚轮

图 2-4. 插值互电容 4 节点滑动条示例

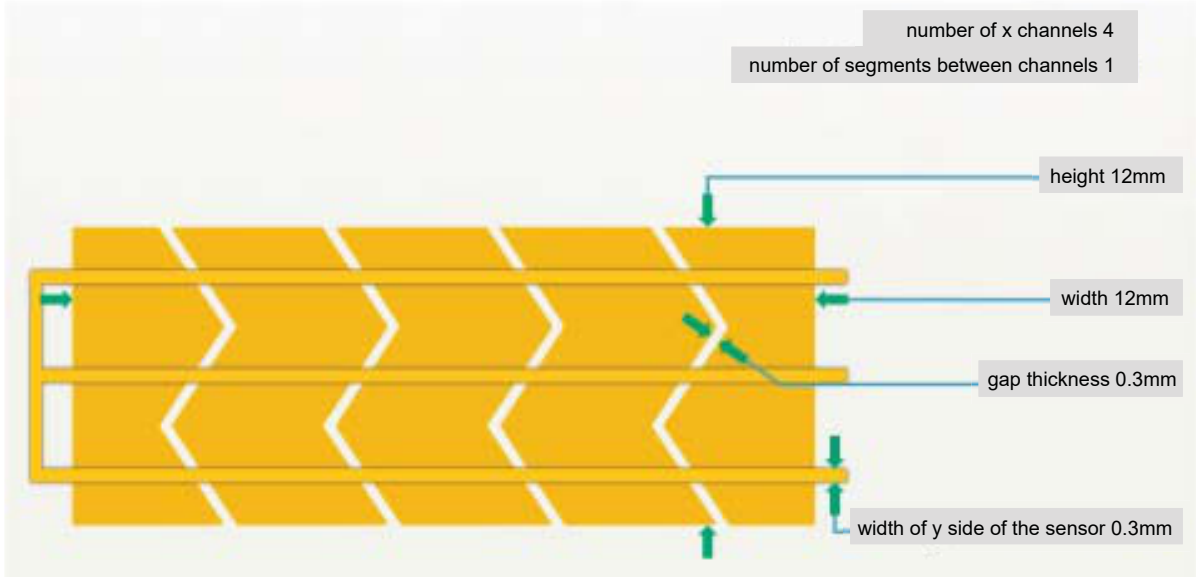
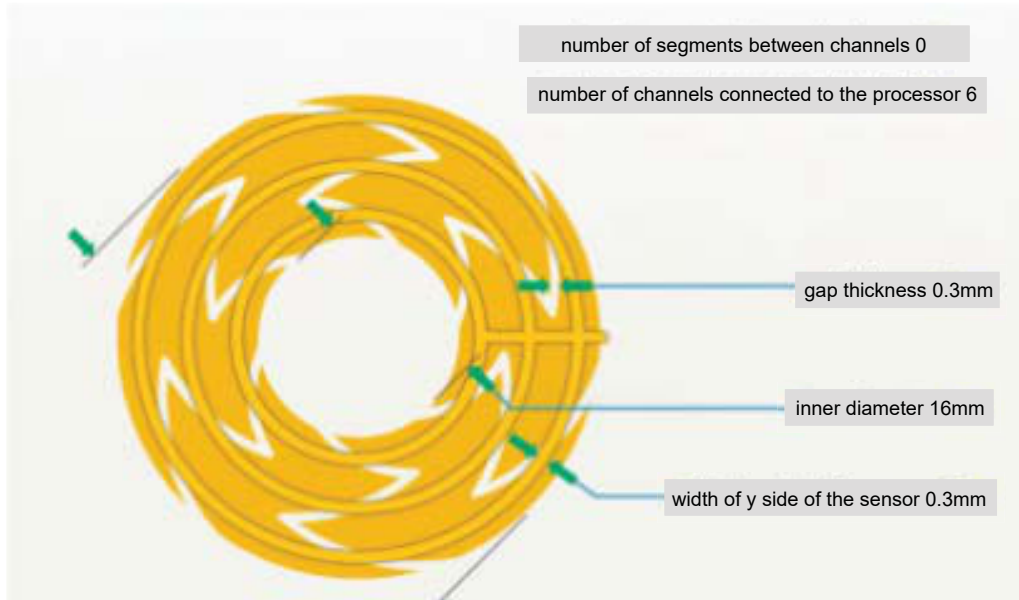


图 2-5. 插值互电容 3 节点滚轮示例



2.2.6.2 空间插值自电容滑动条或滚轮

图 2-6. 插值自电容 4 节点滑动条示例

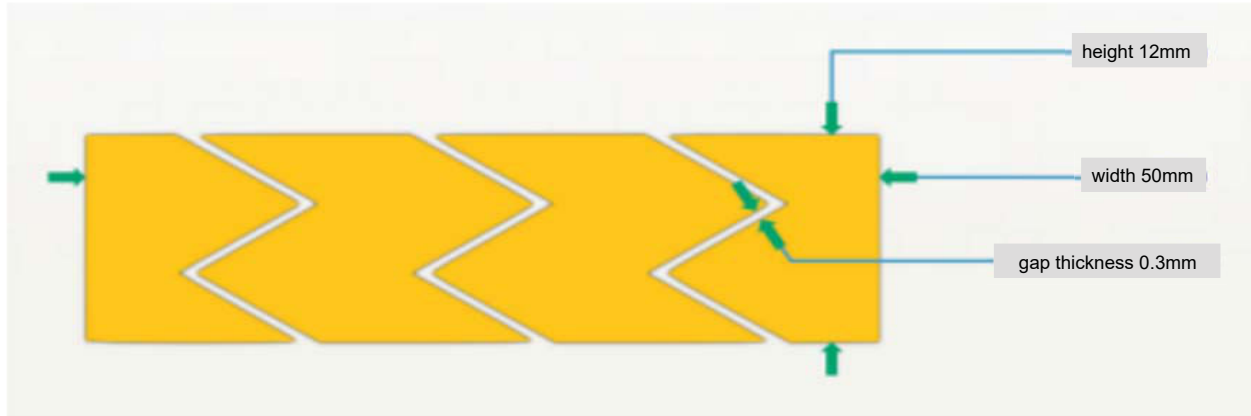
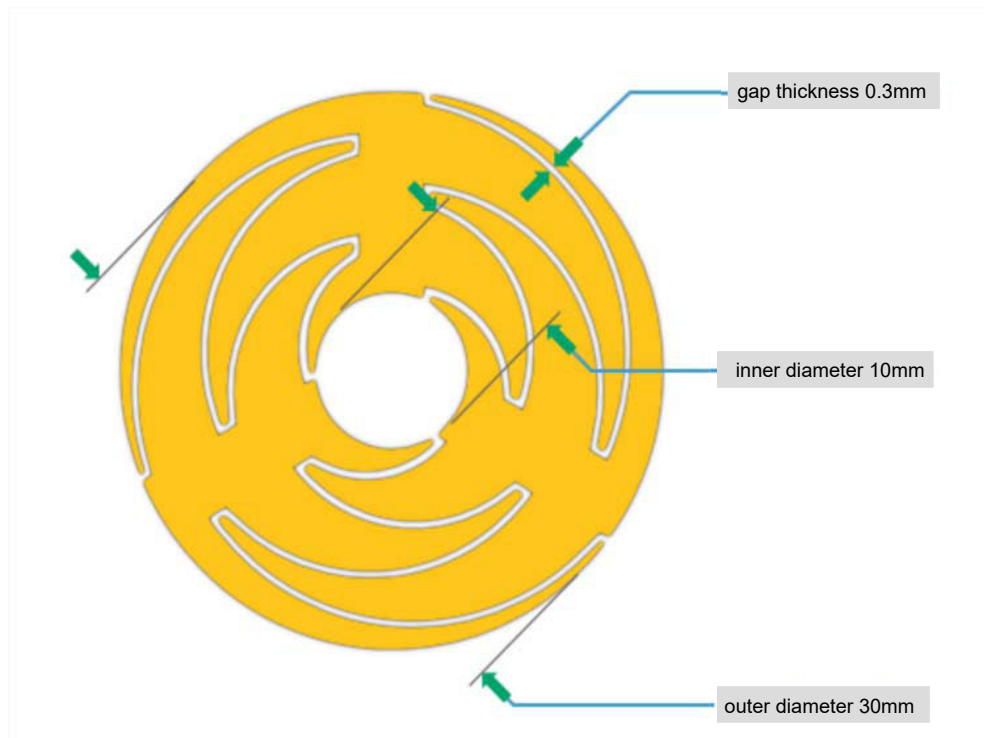


图 2-7. 插值自电容 3 节点滚轮示例



这项技术用于提高滑动条的线性度和分辨率。对于 3 节点滑动条，通过使用最多 255 个位置的分辨率参数，可以获得 3 个以上的位置。然后，空间插值将线性化插值位置。

2.2.6.3 触摸间隔

触摸间隔是两个手指边缘之间所需的最小距离，为保证传感器将两个手指识别为两个不同的触摸。可支持的触摸间隔取决于传感器的几何形状（这不包括插值传感器）。

2.2.7 集总模式

PTC 具有集总模式配置，允许组合多条 Y 线路（自电容）或多条 X 线路和 Y 线路（互电容）以形成单个传感器。凭借此特性，可组合多个物理传感器节点，并将其配置为称为“集总传感器”的单个传感器。使用集总模式可以改善功耗和响应时间。在具有大量按键的应用中，传感器可以成组排列以形成多个集总传感器。只能在集总传感器上执行扫描。当其中一个集总传感器显示触摸检测时，仅单独测量该集总传感器

内的按键以确定实际触摸了哪个按键。这提高了系统的效率，因为与扫描所有单独的按键相比，需要的测量周期更少。

- 通过减少测量次数来提高触摸传感器响应速度，从而缩短初始触摸检测所需的时间
- 通过二进制搜索快速获得位置分辨率
- 通过集总在触摸按钮应用中的“**All but one**”按键改善耐湿性
- 通过任何按键提供触摸唤醒功能（不超过最大电容限值），这将显著降低功耗，因为所有按键只需要一次传感器测量
- 双用途传感器电极：例如，各个按键可以集总在一起以形成接近传感器。集总传感器上触摸检测的实现方式与单节点触摸按钮相同。

对于自电容和互电容，集总传感器的电容负载不应超过~30 pF 的最大限值。设计人员必须选择适当数量的按键来形成集总传感器，确保不超过此限值。如果超出此限值，则固件会发出校准错误。互电容传感器通常具有较小的补偿值，因此在校准饱和之前可以将更多的互电容传感器集总在一起。

低功耗传感器配置仅允许使用一个通道。因此，原则上，滑动条或转子不能配置为低功耗传感器，因为它们由多个传感器通道组成。但是，滑动条或转子的所有通道都可以配置为单个集总传感器，而这可以配置为低功耗传感器。

2.2.8 灵敏度

灵敏度是指传感器上手指触摸的触摸增量的大小。灵敏度取决于传感器布局的几何形状和所使用的模拟增益设置。灵敏度与增量信号幅值成正相关，与阈值成负相关。

2.2.9 接近模式

接近是指触摸面板在实际处于接触状态之前点亮的情况（通常与集总模式相关）。按钮的扩展应用即是接近传感器。监测单个传感器节点的电容变化是否超过预先配置的阈值。与按钮相同，超过相应阈值时，认为传感器处于“检测中”。一旦处于检测中，就需要通过调整初始“检测”和第二个“完全接触”这两个阈值间的触摸增量进行接触距离的相对测量。

2.2.10 抖动

抖动是传感器上存在静止手指触摸时报告的触摸位置变化。它代表系统中的整体噪声。增加滤波等级设置可以减少抖动。抖动是应用固定触摸时轴的报告位置的峰-峰值变化。通常，抖动本质上是随机的并且呈高斯分布；因此，峰-峰值抖动的测量必须在一段时间（通常是几秒钟）内进行。抖动通常以所讨论轴的百分比来测量。

2.2.11 串扰

串扰是指在与触摸节点相邻的节点中引起的增量变化。存在的串扰量取决于传感器布局的几何形状。

2.2.12 线性误差

线性误差是指当手指在传感器上滑动时报告的触摸位置与实际触摸位置之间的偏差。

2.2.13 分辨率（单位为 DPI）

分辨率是指手指沿传感器的水平轴或垂直轴直线移动时报告的不同触摸位置的数量。使用 5.08 cm 长的滑动条和定义为最大 8 位的分辨率参数时，分辨率为 128 DPI（点数/英寸（2.54 cm））。

2.2.14 响应时间

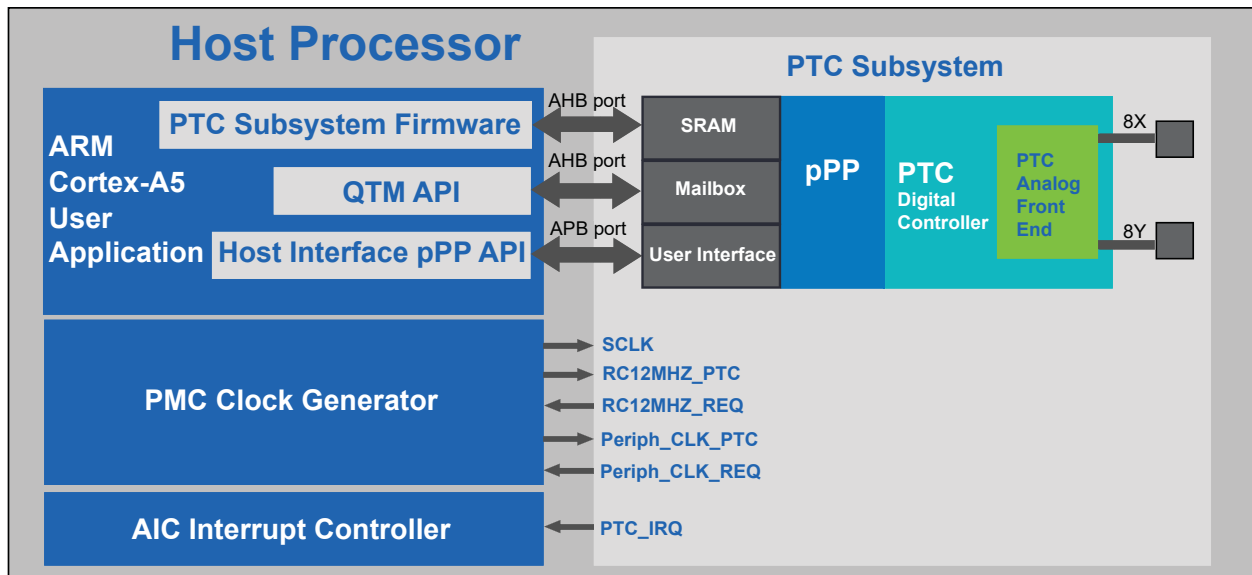
一个公认的事实是，每秒触摸按键八次是人类的极限。每 128 ms 左右检测一次触摸对于用户界面应用来说便已足够。对于 64 个节点的面板，PTC 和单片机处理应在 2 ms 内完成每个节点的检测。

3. 使用 PTC 子系统的 QTouch 技术

3.1 简介

PTC 模拟前端和数字控制器不由主机处理器直接管理；主机处理器可以是 Arm 处理器，也可以是其他处理器。引入协处理器来管理 PTC 子系统的所有功能。该处理器与一些外设一起称为微功率处理器（Pico Power Processor, pPP）。在这种情况下，需要一个名为 PTC 子系统固件的 pPP 程序；该程序由主机处理器装入共用 SRAM 存储区中。

图 3-1. PTC 子系统框图



现有产品将 QTouch 技术视为电容传感器触摸检测的方法。该方法称为 PTC（外设触摸控制器）并嵌入在 PTC 子系统中。

该方法使用模数转换器（Analog-to-Digital Converter, ADC）来精确测量所连接传感器的电容以及确认触摸时该传感器的电容变化。PTC 是获取电容式触摸的替代方法，不需要外部积分电容（Cs）。在数字域中执行积分，并使用内部采样保持电容（Csh）实现单脉冲的电荷转移。

- 这能够实现低功耗、高灵敏度且不受环境影响的可靠电容式触摸按钮、滑动条、滚轮和表面
- 优点包括：
 - 每个电极一个引脚——无外部元件 [见下面的注]
- 整个温度和电源/参考范围内零漂移
- 无需温度或电源/参考补偿

注： 在高噪声环境中，可能需要外部电阻在自电容模式下进行滤波。

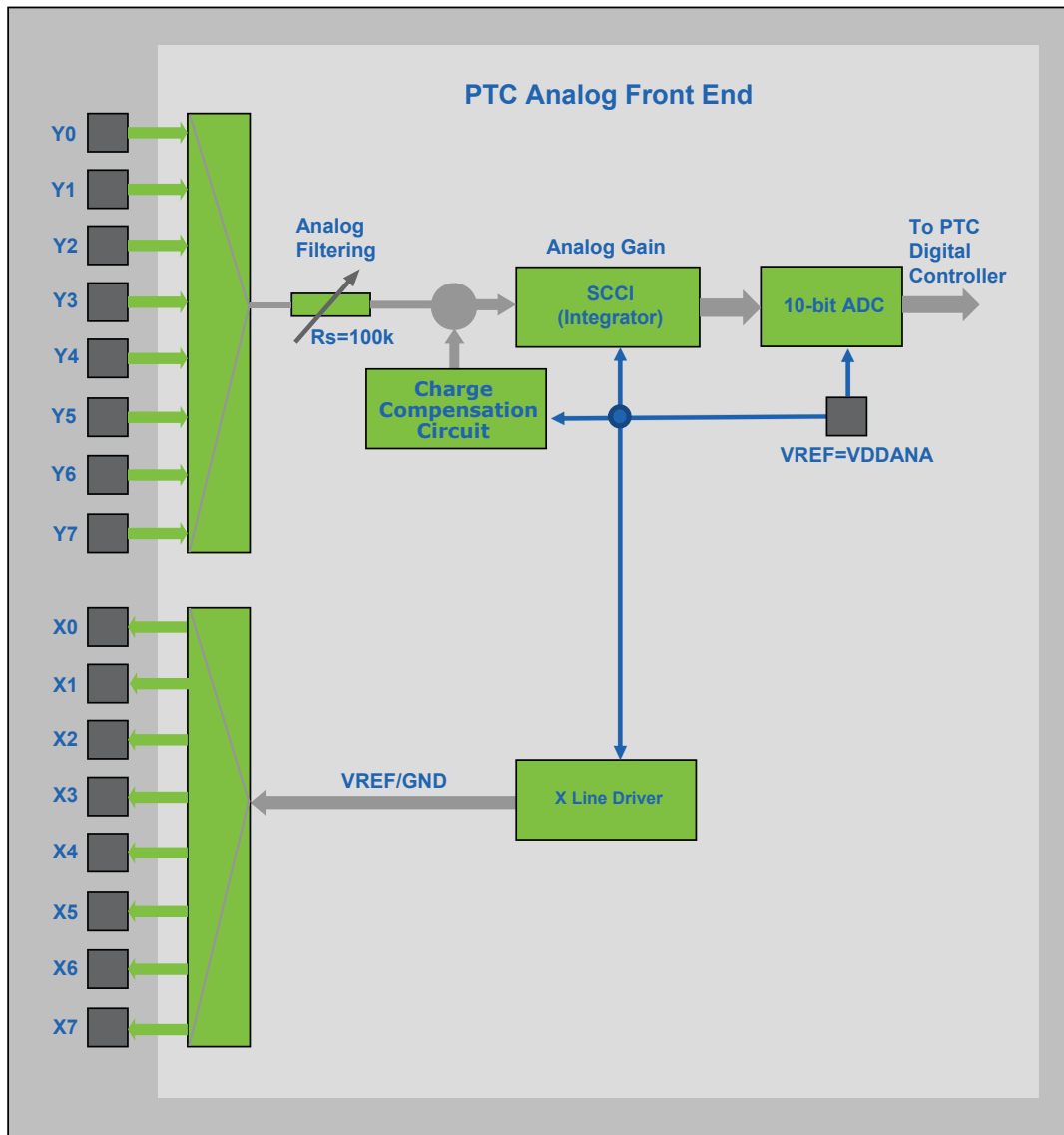
PTC 子系统的固件可用于触摸传感器引脚配置、采集参数设置以及定期的传感器数据捕捉和状态更新操作。固件与 PTC 连接来执行必要的操作。PTC 与外部电容式触摸传感器连接，能够执行自电容和互电容方法测量。固件具有低功耗和集总模式配置。

3.2 PTC 模拟前端

模拟前端由 X 线路驱动器、一个传感器电容补偿电路和一个寄生电容不敏感模拟开关电容电荷积分器（Switched Capacitor Charge Integrator, SCCI）组成。积分器通过模拟多路开关连接到传感器 Y 线路。使能 PTC 数字控制器时，SCCI 输出自动连接到 ADC 输入。

外部电容式触摸传感器通常在 PCB 上形成，传感器电极通过 I/O 端口引脚连接到 PTC AFE 的模拟电荷积分器。PTC AFE 支持将互电容传感器组织为不同 X-Y 配置的电容式触摸矩阵（QTouch 表面）。PTC AFE 的每条 X 线路和 Y 线路都需要一个引脚。无需外部元件。PTC AFE 还支持“自电容触摸传感器”（QTouch）。在自电容模式下，PTC AFE 的每个自电容传感器只需要一个 Y 线路引脚。

图 3-2. PTC 模拟前端



3.2.1 PTC 主电容

下图所示为主电容如何在特定时刻连接，但未描述测量的实际开关行为。

图 3-3. 自电容模式框图

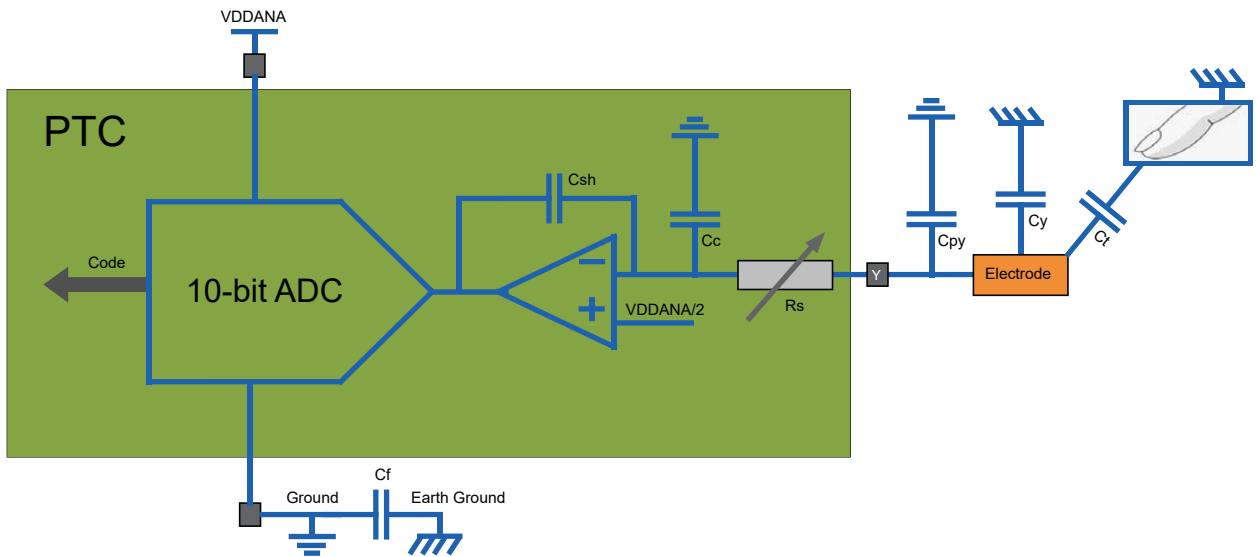
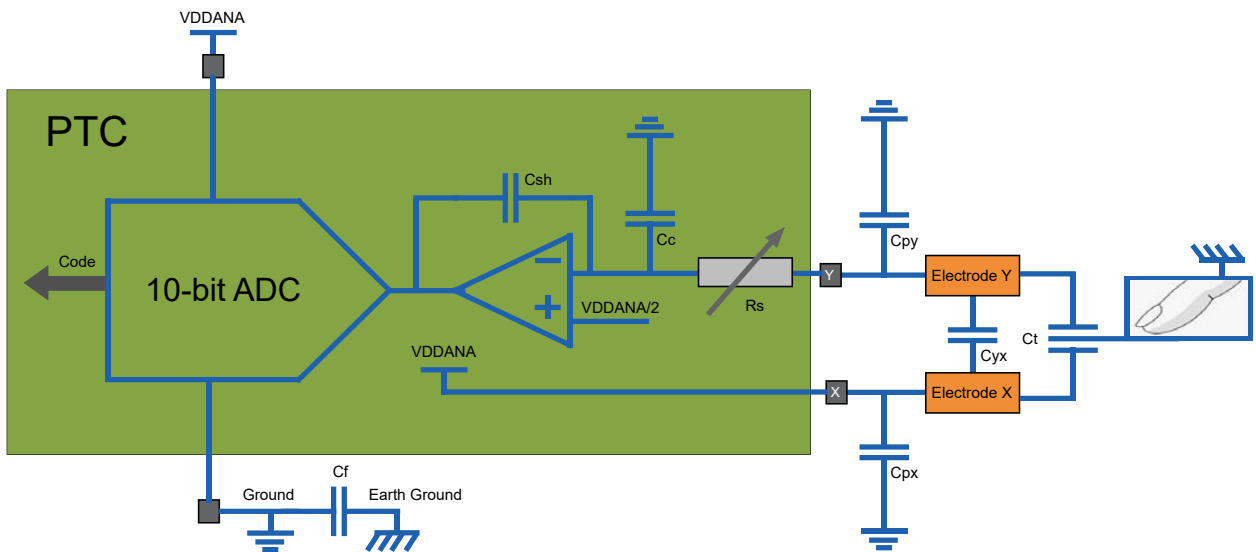


图 3-4. 互电容模式框图



3.2.2 电容和电阻定义

3.2.2.1 电阻 (Rs)

Rs (设定为 0、20、50 和 100 kΩ) 以与电极传感器串联的方式接入。可以调节 Rs 电阻来提高传感器的 EMC/EMI/ESD 性能。传感器电容与 Y 线路 (传感) 上的已编程串联电阻组合使用。该组合构成硬件 (Rs、Csh 和 Cc) 一阶低通滤波器, 可将该滤波器视为第一级噪声保护。与使用大量采样的其他数字滤波解决方案相比, 这种第一级保护能够降低采集信号中存在的噪声比例, 同时对采集时间的影响更小。不过, 当增加 Rs 时, 有必要将 CSD 稳定时间参数调整到更高的值, 同时增加采集时间。

3.2.2.2 电极对地电容 (Cy 和 Cyx)

传感电极的自电容或互电容 (介于 2 pF 和 30 pF 之间, 电极最小 6x6 mm) 具有特定设计规则, 应用笔记《按钮、滑动条和滚轮触摸传感器设计指南》中说明了这些规则 (见[参考文档](#))。

3.2.2.3 补偿电容 (Cc)

PTC 具有内部补偿电路，用于补偿传感器电容。自电容和互电容传感模式具有相同的补偿范围。但是，与自电容模式相比，互电容模式可以补偿更多寄生电容。可通过调节校准 Cc 来匹配传感器负载（最高 30 pF）。

在自电容模式下，补偿电容等于外部传感器加寄生电容 (Cy + Cp)。在互电容模式下，补偿电容仅等于传感器电容 (Cyx)。寄生电容 (Cpy) 由积分器的虚拟地输入补偿。

该校准过程由 PTC 数字控制器自动完成，只需要执行固件的使能信号即可。

自电容模式的典型补偿电路值的范围为 10 pF 至 25 pF。对于互电容模式，该值约为 2 pF 至 7 pF。

补偿电路值受传感器尺寸和传感器或走线周围的地的影响。补偿电路值的范围为 0.007 pF 至 30 pF。

如果补偿电路值超出限值，要减小该值，请在传感器和地平面中使用网格而不是固定平面。

请参见应用笔记《按钮、滑动条和滚轮传感器设计指南》（见[参考文档](#)）。

3.2.2.4 对地触摸电容 (Ct)

Ct 是由传感电极上的手指触摸引起的（约 1 pF）。该电容可修改 Cy + Cpy 电极电容的值。

3.2.2.5 寄生电容 (Cpx 和 Cpy)

Cpy 和 Cpx 来自电路板布线和附近的任何平面。在自电容模式下，该电容与 Cy 值相加，并由 Cc 电容校准。Cx 上的寄生电容无关紧要，因为它由电源电压或地驱动。

3.2.2.6 大地到地的耦合 (Cf)

电路地与大地之间的耦合电容：(Cf >> Cy & Ct)

3.2.3 工作原理

自电容测量方法指将未知电容的感测电极充电到已知电位。所得到的电荷被转移到测量电路中。通过测量一个或多个充电-转移周期的电荷，可以确定感测板的电容。

互电容测量方法使用一对感测电极。一个电极用作发射极，由逻辑脉冲组成的电荷以突发模式被驱送到发射极。另一个电极用作接收极，使用覆盖在面板上面的电介质耦合到发射极。当手指触摸面板时，场耦合会减小，从而检测到触摸。

3.2.3.1 采集操作

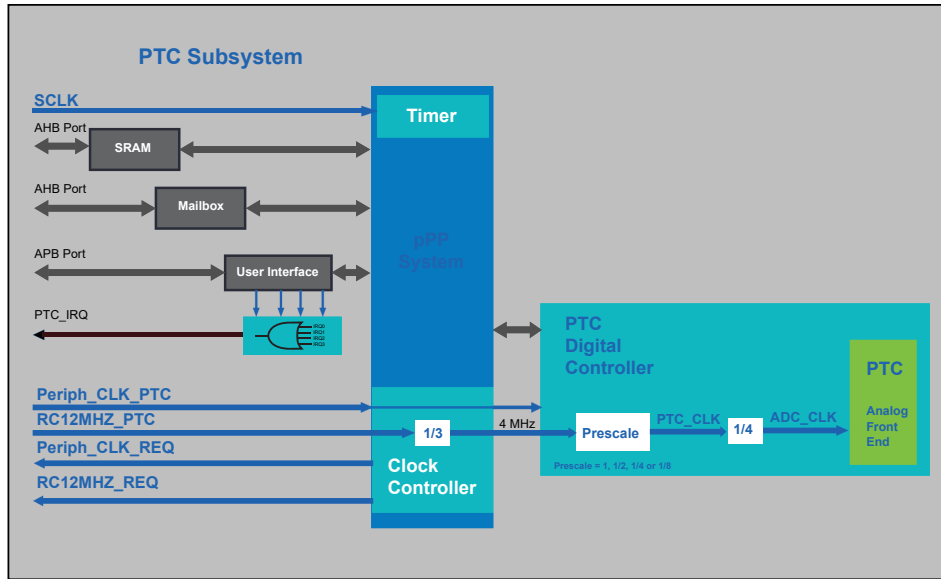
PTC 方法是单引脚采集方法。

首先，被测按键通过电压脉冲完全充电，并且此电荷与补偿 Cc 电容共用。触摸事件将使这种电荷共用失衡。

接下来，传感器电荷被转移到内部采样保持电容 Csh。然后由 ADC 测量保留在 Csh 上的电压。传感器上的触摸将影响传感器的电容，并将使每个脉冲的测量电压发生变化。

在互电容测量中，原理是相同的，但电容在两个电极之间。

图 3-5. PTC 子系统时钟原理图



在 PTC 子系统中，RC12HMZ 时钟在内部进行 3 分频，因此可为 PTC 数字控制器提供 4 MHz 时钟。该控制器可以进一步对时钟进行 1、2、4 或 8 分频，以降低 PTC 时钟的速度。预分频时钟 PTC_CLK 进行 4 分频，以将 ADC_CLK 提供给 PTC 模拟前端。ADC 数据速率由控制器定义。典型值约为 33 kHz 至 66 kHz，具体取决于时序配置。

如果在自电容或互电容测量中没有发生触摸，则认为 10 位 ADC 输出代码的理想值为 512（无数字增益）。单次 ADC 转换使用 26 个 ADC_CLK 周期。PTC_CLK/4 = 1 MHz 时，结果约为 38 ksps。

在互电容测量中，Ct 触摸电容会减小传感器电容。Csh 的电压降低，ADC 代码超过 512。增量随后变为正。

在自电容测量中，机制类似，但增加了符号校正以验证增量是否始终为正。

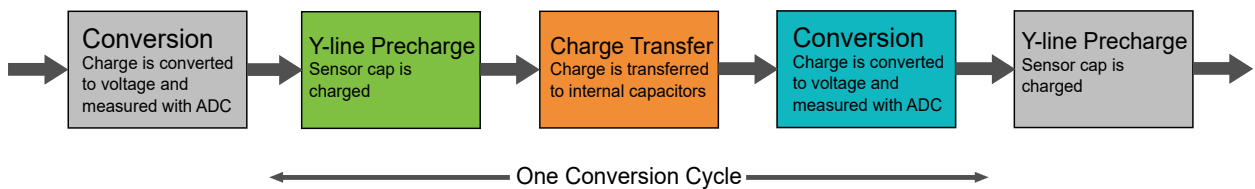
3.2.3.2 模拟增益

通过修改积分电容 Csh 可以调节模拟积分器的增益。增益是电容比值 Ct/Csh，不会对数据速率频率进行抽取。

3.2.3.3 采集时间

采集时间取决于转换周期中执行的操作。

图 3-6. 转换周期



PTC 采集时序取决于 pPP 中经过 3 分频的 12 MHz RC 时钟频率以及随后的预分频比“prsc”。最终使用的时钟如下：

- 对于不可编程的固定延时，对 4 MHz 进行 4 分频
- 对于可编程延时，ADC_Clock=4 MHz 进行 4×Prsc 分频

ADC_clock 定义时基周期 $T_b=1\ \mu\text{s}$ 、 $2\ \mu\text{s}$ 、 $4\ \mu\text{s}$ 或 $8\ \mu\text{s}$ 。建议将 ADC_clock 保持在最快值 1 MHz ($T_b=1\ \mu\text{s}$)。这可以通过添加最多 255 个 CSD PTC 周期来扩展，通常为 $\text{CSD} = 3$ 至 10。一个通道的最快转换速度为 $35\ \mu\text{s}$ 。

使用多个转换周期时的时序定义是采集时间。这取决于配置的滤波等级和消除噪声所使用的不同软件算法。

可通过滤波等级（最多 64 个转换周期）增加可靠 PTC 测量的转换周期数。

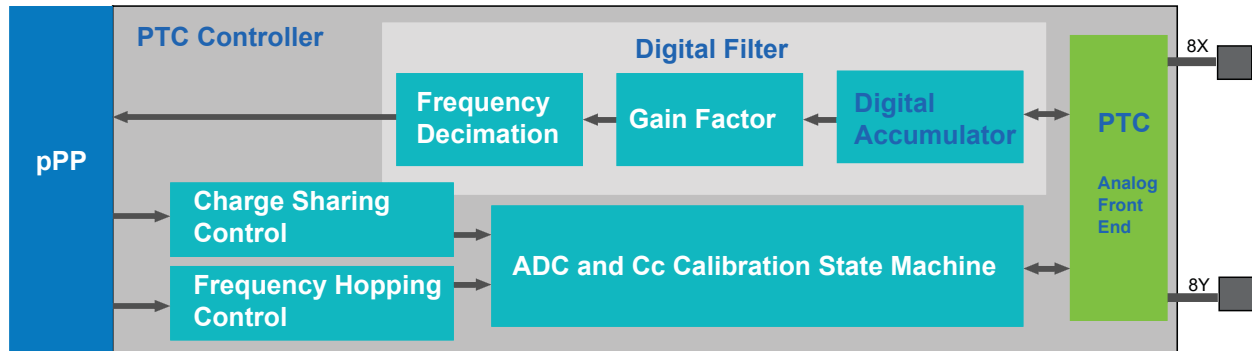
其他参数对时序有重要影响，如检测积分和漂移以及重新校准控制。

3.3 PTC 数字控制器

信号处理的一部分由 pPP 固件控制的硬件控制器处理。

PTC 数字控制器是 pPP 的外设，作用是通过控制处理器在有限的固件控制下获取电容式触摸传感器和电容式接近传感器信号。PTC 数字控制器包括一个模拟电荷积分器和一个 10 位 ADC 控制器，以及一个用于 ADC 结果的 16 位数字累加器和一个负责传感器采样和数字累加序列的状态机。

图 3-7. 信号处理和校准块



3.3.1 PTC 数字控制器工作原理

- 控制 ADC 10 位 SAR 状态机单 ADC 转换或自由运行模式（比较器和 ADC 数据/累加器寄存器）
- 数字增益最高为 32，可对最多 64 个 ADC 代码求平均值
- 选择滤波电阻（0 k Ω 、20 k Ω 、50 k Ω 或 100 k Ω ）
- 调节补偿电容（最高 30 pF）
- 调节积分电容（最高 30 pF）
- 跳频⁽¹⁾实现（修改采样率以避免同步寄生噪声）
- 通道共用延时选择⁽²⁾（稳定时间）
- 预分频（1、1/2、1/4 和 1/8），4 MHz 至 ADC_CLK

注：

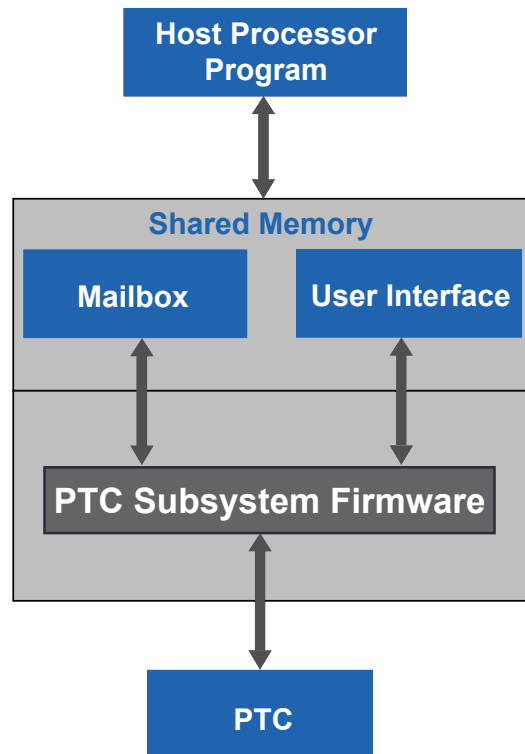
1. 可编程采样延时可用于选择（修改）其他周期性噪声源可能干扰采样的应用中最适合的采样频率。通过设置软件驱动程序参数，也可以自动将跳频从一个采样周期修改为另一个采样周期。
2. CSD 位定义更改输入通道时的延时。该延时允许模拟电路在新的（Y）通道或通道对（X-Y）上趋于稳定。延时与应用有关，因此该选项可供用户选择合适的延时。延时用多个 ADC 时钟周期来表示。

4. 固件和 QTouch 模块化库 (QTML)

4.1 固件

固件管理与 pPP 和 PTC 子系统相关的所有操作。该固件是一个在存储器映射定义的地址处被复制到 SRAM 代码区域的二进制文件。除了 PTC 子系统外，固件还管理 pPP 板上定时器以及与主机处理器的通信。pPP 使用 QTML (QTouch 模块化库) 来管理 PTC 系统。QTML 包含可处理特定触摸功能的一系列预配置库。应用开发人员不能修改这些库；他们可以配置 PTC 触摸系统和接收与触摸相关的数据。配置信息由主机处理器写入共享的存储器。pPP 随即会读取该信息并配置 PTC。完成配置后，如果 PTC 在测量触摸数据，则 pPP 会用触摸数据更新共享的存储器。

图 4-1. 固件框图



为高效编程 PTC 技术，需要了解头文件中使用的术语和定义以及 Softpack 提供的驱动程序。本文档使用组件头文件 ppp.h 和 qtm.h 中提供的定义。主机程序 (Softpack 未提供) 为使用组件和驱动程序头文件开发的最终用户应用程序。

结构由节点、按键和滚动条 (滑块和滚轮) 的单独配置或组配置以及数据构成。请参见下面的“配置对象”和“数据对象”列表。

- 配置对象：
 - 节点配置
 - 节点组配置
 - 按键组配置

- 按键配置
- 滚动条组配置
- 滚动条配置
- 自动扫描配置
- 跳频自动调节配置
- 跳频频率
- 数据对象：
 - 节点数据
 - 按键数据
 - 按键组数据
 - 滚动条数据
 - 跳频自动调节数据
 - 触摸事件

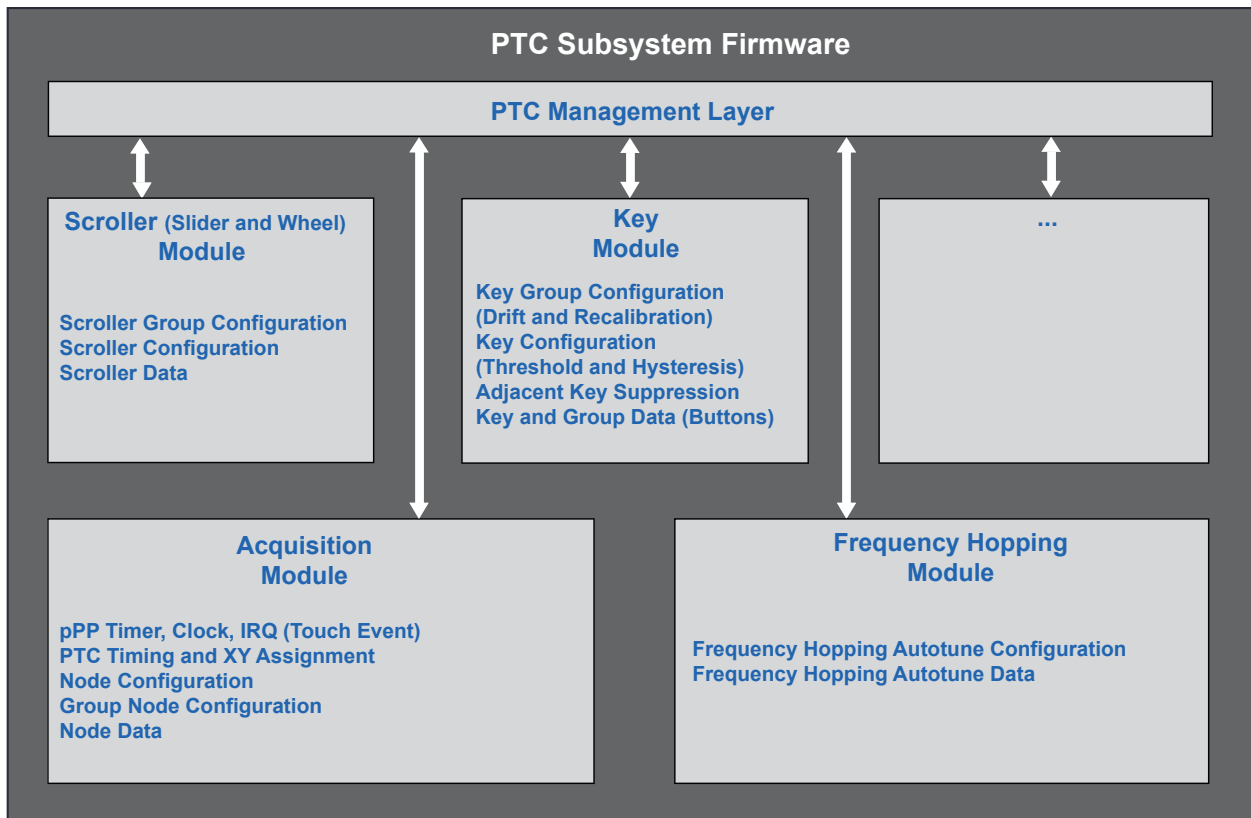
4.2 QTouch 模块化库

QTouch 模块化库在模块化架构下提供了 QTouch 库的触摸传感功能。每个模块的用户选项均在主机应用程序代码中配置，并通过邮箱 SRAM 区域与库模块共享。在触摸传感器的测量间隙，可通过应用程序代码实时修改配置。

模块列表：

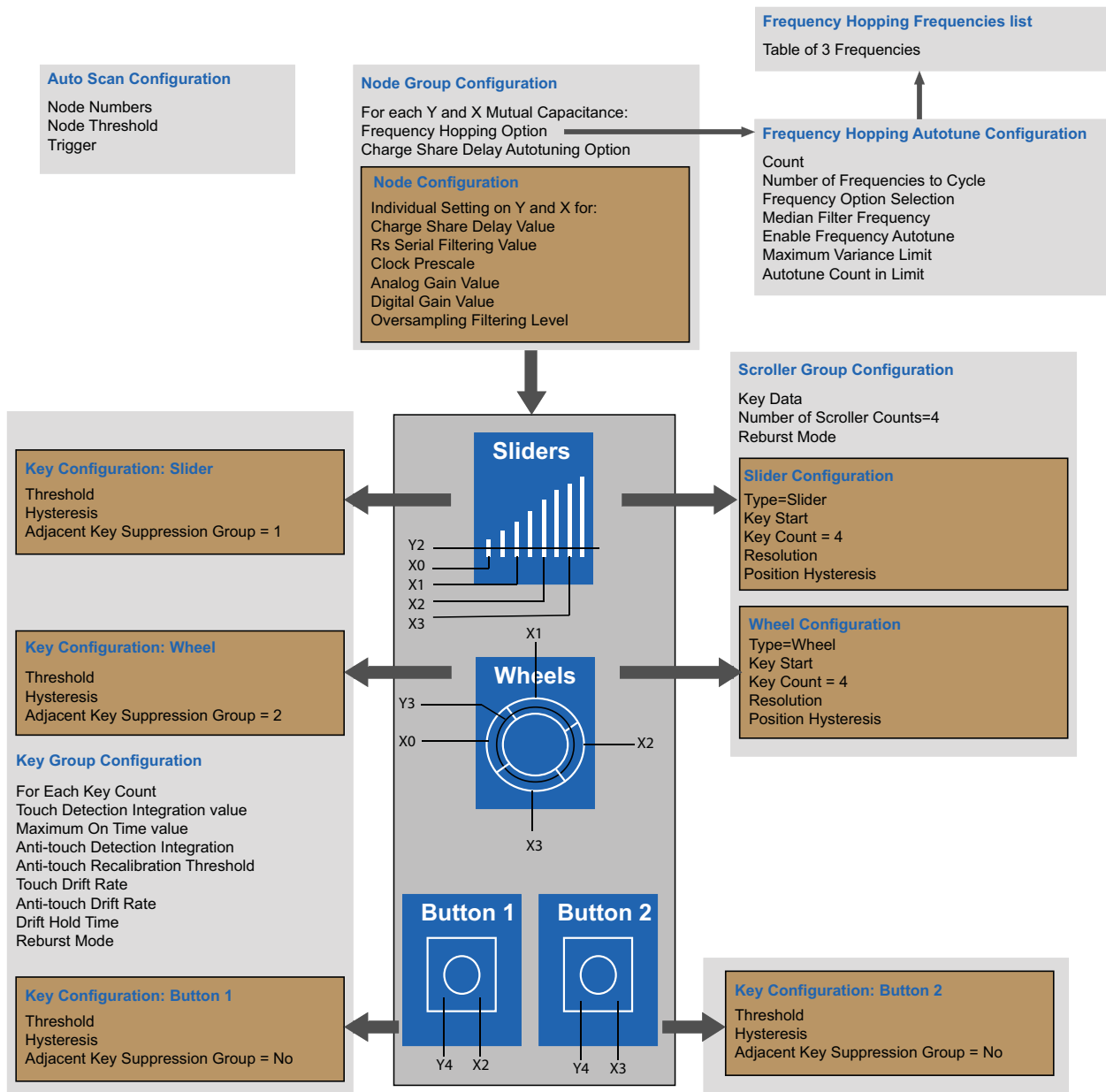
- 采集模块（节点定义、pPP 和 PTC 管理）与产品相关。它实现了配置和测量电容式触摸传感器或接近传感器时所有硬件相关操作。
- 信号调理（跳频）模块采用算法和反馈控制方法来改善采集模块捕获到的测量数据的质量。
- 后处理模块（按键和滚动条）以按键或滚动条的形式对测量数据进行解析。
- 滚动条模块管理滑块和滚轮功能。它使用来自按键处理模块的输出作为数据源进行滑块/滚轮计算。

图 4-2. PTC 子系统固件框图



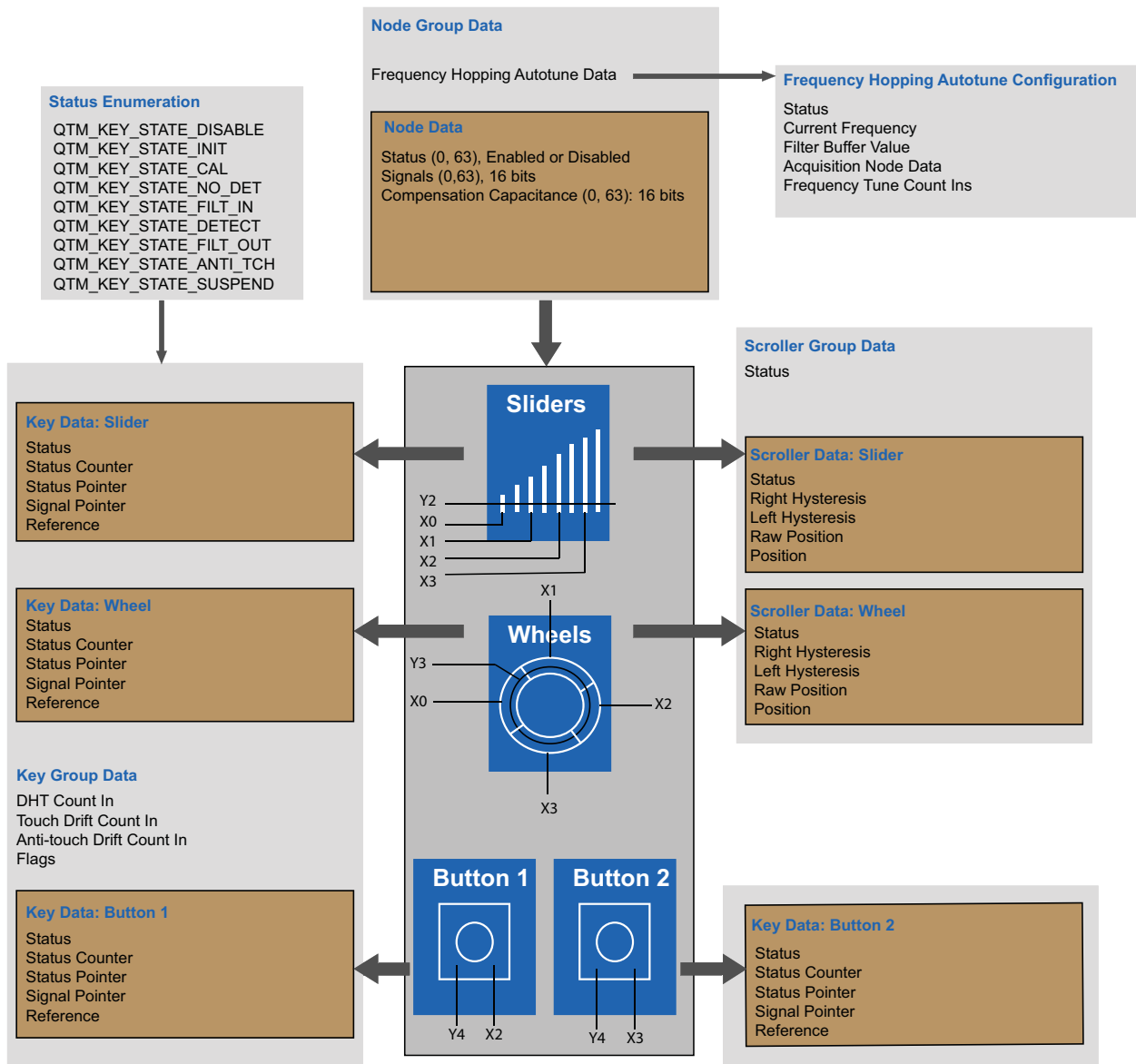
4.3 配置参数示例

图 4-3. QT1 互电容的配置参数示例



4.4 数据参数示例

图 4-4. QT1 互电容的数据参数示例



4.5 邮箱映射

SAMA5D2 固件存储器映射

SRAM 基址: PPP_ADDR=0x00800000

SRAM 长度: PPP_SRAM_LEN=0x4000

邮箱基址: PPP_MAILBOX_ADDR=0x00804000

注: 所有寄存器均为 8 位寄存器。R/W 代表读/写。

表 4-1. 命令及节点的配置和数据

偏移量	结构名称	字段	位	访问	7	6	5	4	3	2	1	0
0x0000	cmd	id	7:0	R/W					寄存器			
0x0001			15:8	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-
0x0002		地址	7:0	R/W	地址							
0x0003			15:8	R/W	地址							
0x0004		数据	7:0	R/W	数据							
0x0005			15:8	R/W	数据							
0x0006			23:16	R/W	数据							
0x0007		31:24	R/W	数据								
0x0100	node_group_config	计数	7:0	R/W	-	-	-	-	计数			
0x0101			15:8	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-
0x0102		ptc_type	7:0	R/W	-	自电容	互电容	-	-	-	-	-
0x0103		freq_option	7:0	R/W	-	-	-	扩频	freq			
0x0104		calib_option	7:0	R/W	-	-	-	-	calib	tau		
0x0105		未用	7:0	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-

(续)													
偏移量	结构名称	字段	位	访问	7	6	5	4	3	2	1	0	
		寄存器											
0x0106	node_config[64]	mask_x	7:0	R/W	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0	
0x0107			15:8	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0x0108		mask_y	7:0	R/W	Y7	Y6	Y5	Y4	Y3	Y2	Y1	Y0	
0x0109			15:8	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0x010A				23:16	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-
0x010B				31:24	R/W	-	-	-	-	-	-	-	-
0x010C			csd	7:0	R/W	csd							
0x010D			rsel	7:0	R/W	-	-	-	-	-	-	rsel	
0x010E			prsc	7:0	R/W	-	-	-	-	-	-	prsc	
0x010F			gain_analog	7:0	R/W	-	-	-	-	-	模拟增益		
0x0110		gain_digital	7:0	R/W	-	-	-	-	-	数字增益			
0x0111		过采样	7:0	R/W	-	-	-	-	-	过采样			
0x0406	node_data[64]	状态	7:0	R	-	-	-	-	-	状态			
0x0407		未用	7:0	R	-	-	-	-	-	-	-	-	
0x0408		信号	7:0	R	信号								
0x0409				15:8	R	信号							
0x040A		comp_caps		7:0	R	C1	C0						
0x040B				15:8	R	C3	C2						

表 4-3. 滚动条配置和数据

偏移量	结构名称	字段	位	访问	寄存器		
0x0810	auto_scan_config	未用	7:0	R/W	-		
0x0811			15:8	R/W	-		
0x0812		node_number	7:0	R/W	-	数字	
0x0813			15:8	R/W	-	-	
0x0814		node_threshold	7:0	R/W	阈值		
0x0815		触发	7:0	R/W	-	触发	
0x0816	scroller_group_config	key_data	7:0	R/W	key_data		
0x0817			15:8	R/W	key_data		
0x0818		计数	7:0	R/W	-	-	计数
0x0819		未用	7:0	R/W	-	-	-
0x081A	scroller_config [4]	类型	7:0	R/W	-	-	类型
0x081B		未用	7:0	R/W	-	-	-
0x081C		key_start	7:0	R/W	-	key_start	
0x081D			15:8	R/W	-	-	-
0x081E		key_count	7:0	R/W	-	key_count	
0x081F		resolution_deadband	7:0	R/W	分辨率	死区	
0x0820		position_hysteresis	7:0	R/W	position_hysteresis		
0x0821		未用	7:0	R/W	-	-	-
0x0822		contact_min_threshold	7:0	R/W	-	-	-
0x0823				15:8	R/W	-	-

..... (续)		寄存器	
偏移量	结构名称	字段	访问
0x0842	scroller_data [4]	状态	-
0x0843		right_hyst	-
0x0844		left_hyst	-
0x0845		未用	-
0x0846	raw_position	raw_position	-
0x0847		位置	-
0x0848	contact_size	contact_size	-
0x0849		contact_size	-
0x084A	contact_size	contact_size	-
0x084B		contact_size	-

表 4-4. 跳频配置和数据

偏移量	结构名称	字段	位	访问	寄存器			
0x086A	fh_autotune_config	计数	7:0	R/W	-	-	-	-
0x086B		num_freqs	7:0	R/W	-	-	-	num_freqs
0x086C		freq_option_select	7:0	R/W	-	-	-	-
0x086D			15:8	R/W	-	-	-	-
0x086E		median_filter_freq	7:0	R/W	-	-	-	频率
0x086F			15:8	R/W	-	-	-	-
0x0870		enable_freq_autotune	7:0	R/W	-	-	-	使能
0x0871		max_variance_limit	7:0	R/W	-	-	-	-
0x0872		auto_tune_count_in_limit	7:0	R/W	-	-	-	-
0x0873		未用	7:0	R/W	-	-	-	-
0x0874	fh_autotune_data	状态	7:0	R	重新突发	-	-	位置变化
0x0875		current_freq	7:0	R	-	-	-	频率
0x0876		filter_buffer	7:0	R	-	filter_buffer	-	-
0x0877			15:8	R	-	filter_buffer	-	-
0x0878		acq_node_data	7:0	R	-	信号	-	-
0x0879			15:8	R	-	信号	-	-
0x087A		freq_tune_count_ins	7:0	R	-	-	-	-
0x087B			15:8	R	-	-	-	-

..... (续)		寄存器	
偏移量	结构名称	位	访问
0x087C	fh_freq	7:0	R/W
0x087D		7:0	R/W
0x087E		7:0	R/W
0x087F		7:0	R
	频率 0	- - -	-
	频率 1	- - -	-
	频率 2	- - -	-
	未用	- - -	-
			频率 0
			频率 1
			频率 2
			-
			-
			-

表 4-5. IRQ

偏移量	结构名称	字段	位	访问	寄存器							
					事件 7	事件 6	事件 5	事件 4	事件 3	事件 2	事件 1	事件 0
0x0880	key_event_id[8]	事件	7:0	R	事件 7	事件 6	事件 5	事件 4	事件 3	事件 2	事件 1	事件 0
0x0888	key_event_state[8]	状态	7:0	R	状态 7	状态 6	状态 5	状态 4	状态 3	状态 2	状态 1	状态 0
0x088A	scroller_event_id[4]	事件	7:0	R	事件 7	事件 6	事件 5	事件 4	事件 3	事件 2	事件 1	事件 0
0x088E	scroller_event_state[4]	状态	7:0	R	状态 7	状态 6	状态 5	状态 4	状态 3	状态 2	状态 1	状态 0

4.6 固件初始化

通过使用 RUN 值填充命令寄存器来启动 pPP 时，固件会装入邮箱提供的配置和参数。然后，固件会执行传感器节点的第一次校准。这将为按键检测过程使用的所有节点建立首批参考值。以后可以根据漂移和重新校准参数条件重新调整此参考值。

表 4-6. 命令 ID 值

命令	十进制值
QTM_CMD_FIRM_VERSION	8
QTM_CMD_DEEPSLEEP	16
QTM_CMD_ACQ	17
QTM_CMD_INIT	18
QTM_CMD_RUN	19
QTM_CMD_STATUS	20
QTM_CMD_STOP	21
QTM_CMD_UPDATE_TOUCH_CFG	22
QTM_CMD_SET_ACQ_MODE_ON_DEMAND	23
QTM_CMD_SET_ACQ_MODE_TIMER	24
QTM_CMD_SET_ACQ_MODE_WCOMP	25
QTM_CMD_SET_TIMER_INTERVAL	26
QTM_CMD_STOP_TIMER	27
QTM_CMD_START_TIMER	28
QTM_CMD_RESET	29

4.7 采集模块

本节介绍可用于描述传感器性能的各种参数。

4.7.1 节点配置

4.7.1.1 mask_X 或 mask_Y

mask_X 和 mask_Y 寄存器的每个字段可以是 1 或 0，用于单独激活 X（驱动）和 Y（传感）。测量传感将在自电容配置下的已激活 Y 中以及互电容配置下的选定 XY 中执行。激活后，X 与 Y 同步驱动。最多可提供 64 种测量组合。多个 X 驱动可以组合为单个 X 驱动。此外，多个 Y 可以组合为单个 Y。此过程称为集总模式，并在软件配置中进行管理。应注意集总 Y 组合，以免超出内部补偿要求（见[使用电容补偿进行校准](#)）。

4.7.1.2 电荷共用延时 (CSD)

CSD 是 PTC 时钟的延迟周期数，用于确保通过 Rs 对 Cc 和 Cy 之间的传感器节点电容电荷充电。CSD 应逐渐增加，直至信号从一个设置到下一个设置保持稳定。这是最佳信号电平，表示电荷转移完成。可编程值的范围为 0 至 255 个 ADC_clock 周期（ADC 时钟为 PTC_clock/4/预分频比=1 MHz/预分频比，可编程预分频比为 1、2、4 和 8）。

增加预分频比还会延长充电时间。因此可用范围可以是 4 至 16 或 4 至 32。

每个 Yn 通道可以具有不同的值。

4.7.1.3 电阻选择 (Rsel)

Rsel 是用于编程与 Y 传感输入串联的 Rs 电阻的字段。可以编程四个电阻值。在自电容模式下，建议使用外部电阻，因为内部 Rsel 无效。

- 0 表示 0Ω
- 1 表示 20 kΩ
- 2 表示 50 kΩ
- 3 表示 100 kΩ

4.7.1.4 预分频 (Prsc)

PTC 数字控制器嵌入了时钟预分频功能，用于对 4 MHz 输入时钟进行分频以产生 PTC_clock。

可以使用字段 prsc 对此预分频进行编程，如下所示：

- 0 表示不分频
- 1 表示 2 分频
- 2 表示 4 分频
- 3 表示 8 分频

4.7.1.5 模拟增益

PTC 增益的可能值为 1、2、4、8 和 16，可用于模拟增益和数字增益。

模拟增益字段可以编程为 0 至 4：

- 0 表示增益为 1（建议的默认使用值）
- 1 表示增益为 2
- 2 表示增益为 4
- 3 表示增益为 8
- 4 表示增益为 16

4.7.1.6 数字增益

数字增益是寄存器中的代码，通过累加增益值 1 至 16 的数值得出。通过增益因子（累加中所需的采样数）对频率数据速率进行抽取。将累加的和换算为数字增益。

数字增益字段可以编程为 0 至 4：

- 0 表示无增益
- 1 表示增益为 2
- 2 表示增益为 4
- 3 表示增益为 8
- 4 表示增益为 16
- 5 表示增益为 32

4.7.1.7 过采样

过采样是每次测量累加的采样数。PTC 滤波等级为 1、2、4、8、16、32 和 64。这是 ADC 输出代码的数字平均值计算结果。数字增益累加器也执行相同的操作；这就是 PTC 滤波等级参数需要大于或等于数字增益值的原因。

过采样字段可以编程为 0 至 6：

- 0 表示无滤波
- 1 表示滤波等级为 2
- 2 表示滤波等级为 4
- 3 表示滤波等级为 8
- 4 表示滤波等级为 16
- 5 表示滤波等级为 32
- 6 表示滤波等级为 64

4.7.2 节点组配置

4.7.2.1 num_sensor_nodes (计数)

计数是节点配置数组中定义的节点数。

不同的组合可以进行集总，也可以使用由应用程序开发人员定义的不同参数设置。该字段为 6 位，因此可能的数量是 64。

4.7.2.2 acq_sensor_type (Ptc 类型)

如果节点组为自电容型，则在自电容字段中设置 1，在互电容字段中设置 0。

如果节点组为互电容型，则在互电容字段中设置 1，在自电容字段中设置 0。

节点组不能同时为自电容型和互电容型。

4.7.2.3 频率选项

- Freq_option = PTC_FREQ_SEL_n, n=0 至 15

预设为远离噪声频率的某个特定频率（禁止跳频）。

该选项在测量之间插入延迟周期，其中 0 是最短延时，15 是最长延时。

PTC 采集频率取决于 PTC 的通用时钟输入和 PTC 时钟预分频设置。该延时设置在给定传感器上的连续测量之间插入“n”个 PTC 时钟周期，从而改变 PTC 采集频率。FREQ_FREQ_SEL_1 设置在连续测量之间插入 1 个 ADC 时钟周期。FREQ_FREQ_SEL_14 设置插入 14 个 ADC 时钟周期。因此，与低延时设置相比，高延时设置增加了给定传感器上的电容测量所花费的总时间。使用理想设置可避免出现频率与采集频率接近的噪声。

- Freq_option = PTC_FREQ_SEL_SPREAD

在过采样期间，扩展使这段延时以锯齿方式从 0 变化到 15

在过采样期间的连续采样中，延时以锯齿方式从 0 变化到 15，以应用更宽的采样频率范围。与单频采集相比，频率扩展选项降低了在特定“最差情况”频率下对噪声的敏感度，但增加了最差情况频率周围的噪声频率范围，这将表现为谐波干扰。

4.7.2.4 校准选项

校准字段提供 4 种选项：

- 0 表示无自动调节
- 1 表示 Rs 自动调节
- 2 表示预分频自动调节
- 3 表示 CSD 自动调节

Tau 字段是自动调节的收敛标准。Tau 是一阶 RC 滤波值。

- 0 表示 2 Tau 收敛

- 1 表示 3 Tau 收敛
- 2 表示 4 Tau 收敛
- 3 表示 5 Tau 收敛

4.7.2.4.1 Rs 自动调节

时钟预分频器和 CSD 保持所配置的设置不变，而内部串联电阻调整到最大值，以便每个传感器节点充分充电。该功能仅适用于 PTC 互电容采集。可编程值为 0k、20k、50k 和 100k。

4.7.2.4.2 预分频自动调节

串联电阻和 CSD 保持所配置的设置不变，而预分频器调整到最小值，以便每个传感器节点充分充电。

4.7.2.4.3 CSD 自动调节

预分频器和电阻保持所配置的设置不变，而电荷共用延时调整到最小值，以便每个传感器节点充分充电。递增 CSD 会将一个周期添加到采集序列的电荷转移阶段。

4.7.2.4.4 Tau 校准目标

自动调节使用的目标。它对允许的电荷转移损耗应用了一个限值，其中较高的目标设置可确保转移更大比例的满充电荷。这是以 Rs、Cc 和 Cy 一阶网络形成的 TAU 的数量（2 至 5）来评估的。可选择三种独有的自动调节功能。

4.7.3 节点数据

4.7.3.1 状态节点、按键和滚动条数据

传感器触摸状态是用户应用程序使用的主要触摸传感器信息。传感器状态可以是使能或禁止。

4.7.3.2 信号节点数据

信号是最近测量的节点的电平，无论是否发生触摸均如此。当应用增益时，信号的值通常在 0 至 1023 与 (0 至 1023) x (数字增益) 之间。信号是 ADC 转换、增益和数字滤波累加的结果。当没有触摸时，值处于中间轨 (512) 或数字增益 x 512，因为 comp_cap (补偿电容) 与传感器电容匹配且 PTC 在中间轨处静止。

4.7.3.3 如何通过节点数据 comp_caps 计算 Cc 电容

表 4-7. 节点数据参数: comp_caps 代码寄存器

字段	位	访问	寄存器	
comp_caps	7:0	R	C1	C0
	15:8	R	C3	C2

使用的补偿电路值 (pF) =

$$\begin{aligned}
 & ([\text{comp_caps}] \& 0x0F) * 0.007 + \\
 & ([\text{comp_caps}] \gg 4) \& 0x0F) * 0.07 + \\
 & ([\text{comp_caps}] \gg 8) \& 0x0F) * 0.7 + \\
 & ([\text{comp_caps}] \gg 12) \& 0x3) * 7
 \end{aligned}$$

经过简化得到:

$$\text{使用的补偿电路值 (pF)} = 0.007 \times C0 + 0.07 \times C1 + 0.7 \times C2 + 7 \times C3$$

4.8 按键模块

4.8.1 按键配置

最低级别的后处理模块是“按键”，它实现了触摸传感器操作所需的功能。该模块提供用于实现应用触摸传感器的信号后处理、环境漂移、触摸检测、触摸状态机和时序管理。每个 X/Y 节点组合定义对应于 64 种可能的按键配置。按键配置数对应于节点组数。

4.8.1.1 阈值

传感器的（检测）阈值定义其信号必须与其参考值保持多大差值才能判定为潜在触摸检测。

不过，最终检测确认必须符合检测积分器（DI，请参见“触摸检测积分和防触摸检测积分”部分）限制的要求。阈值越大，传感器的灵敏度越低，因为信号必须改变更大（也就是需要更大范围的触摸）才能超过阈值水平。相反，阈值越小，传感器的灵敏度越高。阈值设置取决于触摸传感器时信号摆幅大小。通常来说，前面板越厚或电极越小，触摸时信号的摆幅越小，因此需要的阈值水平也越低。

通常，检测阈值设置为触摸增量的 50%。按钮的所需触摸增量约为 30 至 80 个计数，而滚轮或滑动条约为 50 至 120 个计数。大增量也意味着更长的漂移率；它们也会使漂移无效，因此必须保持平衡。确保使用增益将增量保持在 50 到 120 之间。

阈值是定义检测值的 8 位字段值。当触摸修改电容时，电容的这种显著变化（增量）将与配置的触摸阈值进行比较，如果超过阈值，则认为传感器处于检测中。如果在节点上应用增益，则阈值将自动适应所获得的范围。

4.8.1.2 滞后

PTC 采用 n% 的可编程滞后等级，n = 50、25、12.5 和 6.25。检测滞后是从阈值返回到参考值的这段距离的百分比，用于定义触摸检测停止执行的点。值为 12.5% 时，滞后点更接近阈值而不是信号参考值。滞后可以防止抖动，并使按键检测更加稳健。只有在声明按键处于检测状态时才使用滞后，以确定按键何时释放。滞后量过多可能导致按键卡住，不能释放。相反，如果存在噪声或手指小幅移动，则低滞后量会导致按键抖动。增益和滞后的使用允许基于不超过阈值滞后带的增量值抑制不需要的负脉冲。这有助于减少滤波参数，从而在不降低其稳定性的情况下提高整体系统性能。这是在处理触摸应用噪声抗扰度时执行的最后一步。

滞后字段是自动调节的收敛标准（因为 $\text{Tau} = RC$ 一阶 R-C 滤波器）。

- 0 表示阈值的 50%
- 1 表示阈值的 25%
- 2 表示阈值的 12.5%
- 3 表示阈值的 6.25%

4.8.1.3 AKS 组

AKS® 代表相邻按键抑制。

在传感器靠近放置或者配置为高灵敏度的设计中，多个传感器可能同时报告检测。为了允许应用确定预期的单次触摸，触摸库支持在 AKS 组中配置特定数量的传感器。

如果一组传感器在同一个 AKS 组中，那么只有变化量最大的传感器才会报告检测。即使另一个传感器的增量变大，报告检测的传感器也将继续报告检测。传感器保持检测状态，直至其增量值低于其检测阈值。如果 AKS 组中的任何其他传感器仍在检测中，则只有最强的传感器才会报告检测。在给定时间点，仅报告每个 AKS 组的一个传感器处于检测中。

AKS_group 具有每个按键的组号：

- AKS 组的编号为 1 至 7

- 0 表示无 AKS 分组

固件能够将传感器配置为属于相邻按键抑制 (AKS) 组之一。

AKS 技术允许基于相对信号强度抑制多个按键按下操作。该功能有助于解决表面潮湿问题，表面潮湿会将按键触摸桥接到相邻按键，从而导致多个按键按下操作。该功能对于按键距离很小的面板也很有用，这种情况下，指尖可能无意中激活相邻按键。AKS 技术适用于矩阵中任何位置上使能 AKS 的按键，不限于物理上相邻的按键。

PTC 不知道实际上哪些按键是物理上相邻的。为某个按键使能相邻按键抑制功能时，会抑制对该按键进行检测，前提是面板中任何其他使能 AKS 的按键在检测积分过程中与其参考值的增量信号差异更大。一旦按键进入检测状态，只要触摸保持不变，按键就会保持检测状态，而与任何其他使能 AKS 的按键上的信号强度无关。

该功能不会导致按键增益 (突发长度) 变化，但会忽略按键的实际检测阈值设置。如果使能 AKS 的按键具有不同尺寸，则可能需要降低较大按键的增益来均衡 AKS 技术的影响。可通过改变较大按键的信号阈值来对此进行补偿，而不会引起按键抑制的相关问题。相邻按键抑制用于增强窄门控转换开关的自然潮湿抑制，从而创建更稳健的传感方法。

此外，当 AKS 组中的一个按键需要重新突发时，整个 AKS 组都将重新突发，如果需要重新突发，则会导致采集时间增加。

4.8.2 按键组配置

该组配置对所有已定义的按键有效。它管理检测参数、传感器电容漂移控制和参考重新校准过程。该过程在 PTC AFE 中使用电容补偿。

4.8.2.1 使用电容补偿进行校准

要最大程度扩大 PTC 测量的动态范围，理想情况下，测量信号的平均值以 PTC 中间轨为中心。未补偿的信号将不符合此标准，因此可能发生动态范围限制。补偿机制使传感器电容与内部电容达到平衡。这种平衡导致信号的平均值以 PTC 的中间值为中心。校准后，信号点将作为关键数据参考存储。补偿值将作为节点数据 `comp_cap` 值存储。

该校准在 PTC 初始化期间通过固件启动。该操作自动执行，不需要编程。嵌入式算法执行几个信号测量的循环，并修改补偿电容，直至达到信号中间值。如果传感器电容不大于 30 pF，则该算法会收敛到正确的参考数据。将对每个使能的节点执行该操作。

4.8.2.2 校准后漂移

在校准和参考存储之后，信号值可能漂移到发生虚假触摸 (正漂移) 或触摸未记录的点，具体取决于温度和湿度等环境因素。漂移补偿可确保补偿这些缓慢的变化。由于漂移通常比触摸慢得多，因此漂移校准不会对触摸事件做出反应。

一般意义上的漂移意味着调整 (传感器的) 参考值以允许补偿温度 (或其他因素) 对物理传感器特性的影响。降低这种补偿的参考值称为负漂移，增加参考值称为正漂移。具体而言，应将漂移补偿设置为对增强信号的补偿比对减弱信号的补偿更快。

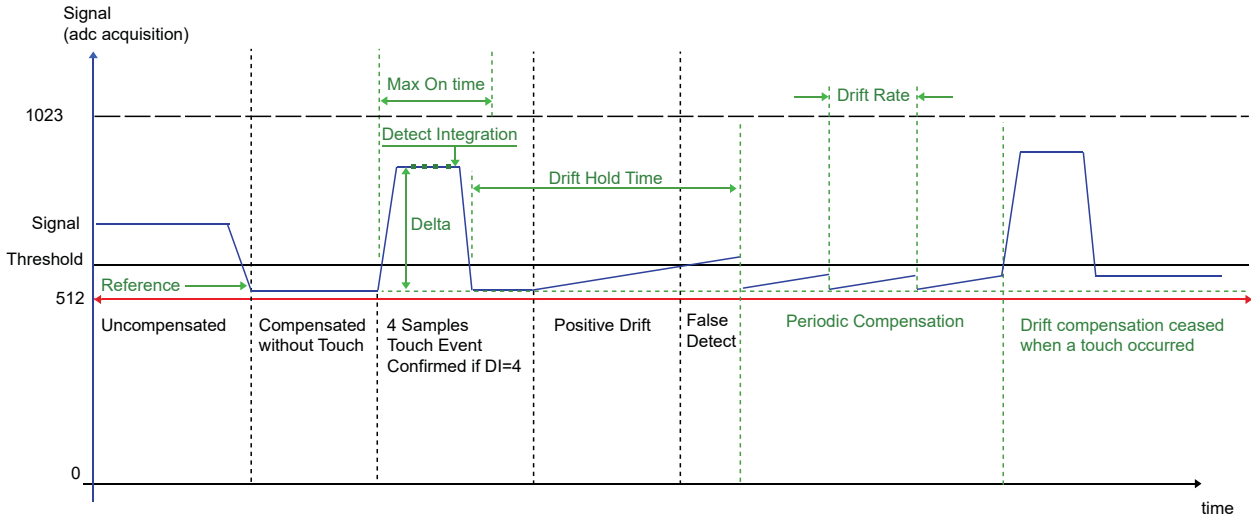
如果每个漂移周期的信号不等于参考值，则该漂移会将参考值改变 1 个计数。漂移周期等于 $200 \text{ ms} \times \text{漂移率}$ 。补偿这种漂移至关重要，否则可能发生虚假检测和灵敏度变化。仅当没有检测进行时才进行漂移补偿。一旦感测到手指，漂移补偿机制就会停止，因为信号正在检测物体。

漂移补偿仅在相关信号未超过“检测阈值”时起作用。

漂移补偿机制可以是不对称的。要确保该机制在一个方向上比在另一个方向上更快速，只需更改相应的设置参数即可。

当一个物体（触摸）接近传感器或传感器特性随时间和温度变化时，传感器的信号值趋于增加。不应快速补偿增强的信号，因为在触摸通道之前可以部分或完全补偿接近的手指（朝向触摸漂移）。

图 4-5. 漂移补偿



漂移补偿涉及以下参数：

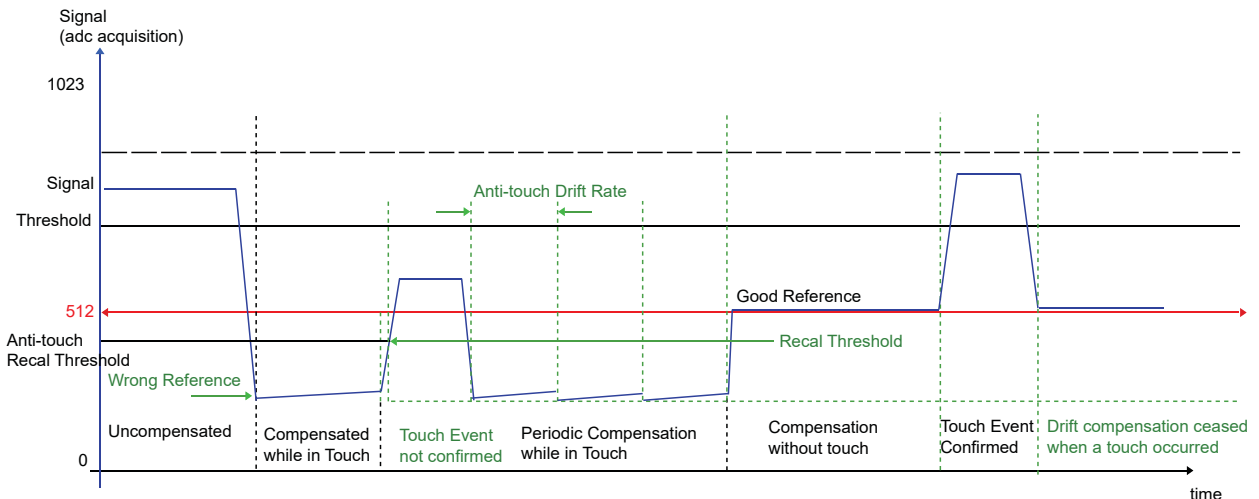
- Touch_di
- Touch_drift_rate
- Touch_recal_thr

4.8.2.3 校准期间漂移

如果在传感器处于触摸状态时运行固有电容补偿，则补偿值将过低，导致参考值比期望值低一个触摸增量——因此不会记录后续触摸。防触摸重新校准（Anti-touch-recalibration）将检测到这种异常并进行纠正。

然而，通道上不会引起检测且已经过传感器完全允许（在一段时间内）的物体可能会被突然移除，从而使传感器具有虚假的抑制参考值，因此变得对触摸不敏感。在后一种情况下，传感器应通过相对快速地提高参考值来补偿物体的移除操作（远离触摸漂移）。

图 4-6. 防触摸重新校准



防触摸漂移补偿涉及的参数:

- Anti_touch_di
- Anti_touch_drift_rate
- Anti_touch_recal_thr

这些参数与其触摸等效参数具有相同的效果,但是在防触摸情况下使用。

术语“防触摸”意味着参考值低于指定的 Anti_touch_recal_thr 值。

4.8.2.4 计数

触摸面板上定义的按键数量,包括按钮以及每个滑动条或滚轮中使用的所有按键。

4.8.2.5 最大检测时间

字段 Max_on_time 等于 $N \times (200 \text{ ms})$, 其中 $N = 0$ 至 255。

如果物体无意接触到传感器,导致较长时间的触摸检测,则通常需要重新校准传感器以便恢复其功能,这可能会在几秒延时后发生。

最大检测持续时间定时器用于监视此类检测。如果检测时间超过定时器的设置,则会自动重新校准传感器。重新校准完成后,受影响的传感器即使仍然与异物接触也会再次正常工作。可以通过将最大检测持续时间设置为零(无限超时)来将其禁止,在这种情况下,通道在连续检测期间始终不会重新校准。

4.8.2.6 漂移保持时间

$DHT = N \times (200 \text{ ms})$, 其中 $N = 1$ 至 255, 典型值约为 4s。

漂移保持时间(Drift Hold Time, DHT)用于在激活一个或多个传感器时限制所有传感器的漂移。它定义了按键检测后漂移停止的时长。此功能在高密度键盘的情况下非常有用,其中触摸按键或手指在键盘上方浮动会导致未触摸的按键漂移,从而产生灵敏度变化,并最终禁止任何触摸检测。

4.8.2.7 重新突发模式

需要重复特定传感器的测量。它表示应用程序应重新开始传感器组的测量,无需等待测量周期超时。

- 0 表示没有重新突发
- 1 表示未解析的重新突发
- 2 表示所有按键重新突发

4.8.2.8 触摸检测积分和防触摸检测积分

字段 touch_di 可以是 0 至 255。

字段 anti_touch_di 可以是 0 至 255。

QTouch 库具有检测积分机制,可以稳健地确认检测。检测积分器(Detect Integrator, DI)用作简单的信号滤波器,以抑制由电噪声等杂散事件引起的虚假检测。

每当传感器增量超过其阈值并且保持特定数量的采集不低于阈值,计数器便递增。如果该计数器达到预设限值(DI 值),最终会声明传感器被触摸。如果在任何采集中都未检测到增量超过阈值,计数器将清零,并且相应过程必须从头开始。DI 过程也适用于“释放”(退出检测)事件。

例如,如果 DI 值为 10,则器件必须超过其阈值并且保持连续 10 次采集不低于阈值,才能声明传感器被触摸。

4.8.2.9 触摸漂移率和防触摸漂移率

字段 touch_drift_rate 为 $N = 0$ 至 127。

字段 anti_touch_drift_rate 为 $N = 0$ 至 127。

周期时间等于 $N \times (200 \text{ ms})$

漂移补偿消除了环境变化导致的基值漂移。补偿间隔是可配置的，在传感器后处理中使能后定期发生。

如果发现任何按键的信号增量显著下降（在负侧），则认为处于错误状态。如果此状态持续超过漂移率，则执行自动重新校准。每当传感器增量等于防触摸重新校准阈值并且持续特定数量的采集不变时，计数器就递增。如果该计数器达到预设限值，最终会重新校准传感器。如果在任何采集中增量大于重新校准阈值，则会清零计数器并执行正漂移。

4.8.2.10 防触摸重新校准阈值

该字段将触发防触摸重新校准的负阈值设置为触摸阈值的百分比：

- 0 表示阈值的 100%
- 1 表示阈值的 50%
- 2 表示阈值的 25%
- 3 表示阈值的 12.5%
- 4 表示阈值的 6.25%

4.8.3 按键数据

共有 64 个按键数据。

电容传感器的最简单实现是按钮，其中传感器由单个节点（一个用于自电容的电极，一对用于互电容的电极）组成，并且被解释为二进制状态：检测中或未检测。

4.8.3.1 状态

传感器触摸状态是用户应用程序使用的主要触摸传感器信息。传感器状态可以具有多个值，如下所示。

表 4-8. 传感器触摸状态

状态	内容	十进制值
QTM_KEY_STATE_DISABLE	禁止按键	0
QTM_KEY_STATE_INIT	QTML 结构已初始化/实现，但尚未执行校准。	1
QTM_KEY_STATE_CAL	校准过程激活。处理算法将为按键确定适当的参考值。	2
QTM_KEY_STATE_NO_DET	执行校准后，这是未触摸传感器的正常状态。在以下情况下也可以设置此状态： <ul style="list-style-type: none"> • 没有从 QTM_KEY_STATE_FILT_OUT 状态确认检测，或 • 没有在 QTM_KEY_STATE_FILT_IN 中确认检测。 	3
QTM_KEY_STATE_FILT_IN	来自 QTM_KEY_STATE_NO_DET。在触摸信号 > (参考 + 触摸阈值参数) 时应用。	4

..... (续)		
状态	内容	十进制值
QTM_KEY_STATE_DETECT	保持 QTM_KEY_STATE_FILT_IN 时观察到 TouchDetect_DI 次连续测量, 或者 QTM_KEY_STATE_FILT_OUT 时观察到小于 TouchDetect_DI 次连续测量。	133
QTM_KEY_STATE_FILT_OUT	来自 QTM_KEY_STATE_DETECT。在信号 < (参考 + 触摸阈值参数) 时应用。	134
QTM_KEY_STATE_ANTI_TCH	测量的触摸信号低于参考值以及超过防触摸阈值时。如果测量的连续信号电平超出 anti-touch-di 计数, 则重新初始化并校准传感器。	7
QTM_KEY_STATE_SUSPEND	QTML 按键后处理不会处理暂停的按键。暂停的按键可以漂移, 因此重新激活时不需要重新校准。	8

4.8.3.2 节点结构指针

指向传感器节点数据结构的指针。

4.8.3.3 参考

参考是在校准阶段期间未发生触摸时获取的信号的电平。当应用增益时, 参考的值通常在 512 与 (512) x (数字增益) 之间。

如果触摸面板上的环境状况发生变化, 则当按键未处于检测中时, 按键参考可随时间改变 (漂移)。如果发生这种情况, 则使用漂移控制过程来允许系统根据环境变化进行调整, 并使用相关的漂移参数进行配置。

4.8.3.4 增量定义

增量不是作为邮箱中的字段给出的, 而是由固件在内部使用。

增量是参考和信号之差的绝对值。

$$\text{增量} = \text{abs}(\text{信号} - \text{参考})$$

库负责增量方向, 因此用户只能看到正增量。

4.9 滚动条模块

电容传感器的实现目的在于将接触简单地检测为按钮替换, 或者扩展功能来提供距离 (接近式)、1D 位置 (滑动条或滚轮)、2D 位置 (QTouch 表面) 或 3D 位置 (带接近式的 QTSurface) 的相对测量。

在每种情况下, 模块化库均通过超过预配置阈值的电容变化来检测触摸接触。一旦确认发生接触, 各种后处理模块将使用计算的触摸增量在相邻传感器之间执行插值并计算触摸位置或相对接近度。

4.9.1 滚动条配置

可使用四种滚动条配置。

4.9.1.1 类型

该字段定义滚动条的类型——滑动条或滚轮：

- 类型 = 0 表示滑动条
- 类型 = 1 表示滚轮

4.9.1.2 key_start

该字段定义滚动条起始按键的编号（0 至 63）。

滚动条中使用的按键必须是连续的。

例如 Key[key_start]、Key[key_start+1]..Key[key_start+key_count-1]

4.9.1.3 key_count

该字段定义滚动条中使用的按键的数量（2 至 63）。

4.9.1.4 分辨率

转子或滑动条需要设定位置分辨率（对于转子为角度分辨率，对于滑动条为线性分辨率）。分辨率是报告转子或滑动条位置所需的位数，其值可以为 2 位至 8 位（分辨率可以高于此值，但需要在分辨率、总响应时间、要处理的滚动条的数量与滚动条大小之间进行权衡）。

编程值为 2 的幂（范围为 2 至 8），例如，如果滑动条分辨率为 7 位，则报告的位置在 0-127 范围内。

4.9.1.5 死区

死区是仅适用于滑动条的参数。它是滑动条报告触摸的最小和最大计数，单位是滚动条分辨率值的百分比。

例如，如果分辨率为 10 位（0-1023）且死区为 2%，则仅报告最小值和最大值之间的位置。

- $2^n \times 2\% \approx 20$ （最小值， $n = \text{分辨率位数} = 10$ ）
- $2^n - (2^n \times 2\%) \approx 1000$ （最大值， $n = \text{分辨率位数} = 10$ ）

4.9.1.6 位置滞后

用于减少位置更改更新次数的阈值。可以在嘈杂的环境中使用或确定位置变化的显著性。在出现以下情况时报告位置变化：

当前位置 > (先前位置 + 位置滞后)

或

当前位置 < (先前位置 - 位置滞后)

4.9.2 滚动条组配置

4.9.2.1 按键数据

指向 key_data 结构起始处的指针。按键数据是滚动条的源数据。该参数不得由最终用户修改。

4.9.2.2 滚动条计数配置

该字段定义要监视的滚动条的数量。最小值为 1，最大值为 4。

4.9.2.3 使能检测重新突发

在判定为错误时，允许固件算法重新启动采集。

在滚动条检测到触摸时，重新突发与滚动条相关的按键。用于提供沿滚动条的位置的响应报告。

4.9.3 滚动条数据

4.9.3.1 状态

报告当前的滚动条状态：

- 触摸激活：检测到手指。
- 滚动条重新突发：重新突发激活。
- 位置变化：更新位置字段。

4.9.3.2 右滞后

报告从滚动条配置分配给滚动条的位置滞后。

4.9.3.3 左滞后

报告从滚动条配置分配给滚动条的位置滞后。

4.9.3.4 原始位置

基于按键数据的未处理的滚动条位置。

4.9.3.5 位置

应用分辨率、滞后和死区（如果为滑动条）时的已处理滚动条位置。值为 0 至 255。

示例：如果滑动条分辨率为 7 位，则报告的位置在 0-127 范围内。

4.9.3.6 接触大小

在与滚动条关联的所有按键上测量的最大触摸增量。

4.10 跳频模块

- 抗噪措施

在任何触摸传感应用中，系统设计人员都必须考虑目标环境中的电气干扰如何影响传感器的性能。

调节不充分的触摸传感器可能会在辐射或传导噪声的测试中出现故障，故障可能在设备的周围环境或电源域中发生，也可能在正常操作期间由设备本身产生。

频率模式设置允许用户通过调节 PTC 触摸采集频率特性来抵抗环境噪声。考虑的噪声是由在特定频率下干扰 PTC 测量的发射源发射的同步噪声。这种技术不会消除白噪声或随机噪声，但可以通过平均值处理（过采样模式）来降低白噪声或随机噪声。

抗噪声是以增加触摸响应时间和功耗为代价的。系统设计人员必须对触摸传感器进行适当调节，以确保最低功耗。QTouch 模块化库具有许多用户可配置功能，这些功能支持调节，从而在触摸响应时间、抗噪性和功耗之间取得最佳平衡。

- 跳频

此 PTC 子系统支持跳频，跳频会尝试选择一个不干扰产品或产品工作环境中其他位置处特定频率下的噪声的采样频率。它试图通过跳频来远离噪声。在采集突发期间，以特定间隔（等于特定采样频率）发射一系列脉冲。如果后者与其他位置处产生的明显噪声一致，则可能严重破坏触摸传感或可能发生虚假检测。

“跳频自动调节”模块应用可配置的循环跳频算法，能够在每个测量周期使用不同的采样频率。许多预先配置的频率在连续的测量周期期间依次实现。

为帮助减少这种噪声，突发频率可以使用不同的模式。

频率模式：

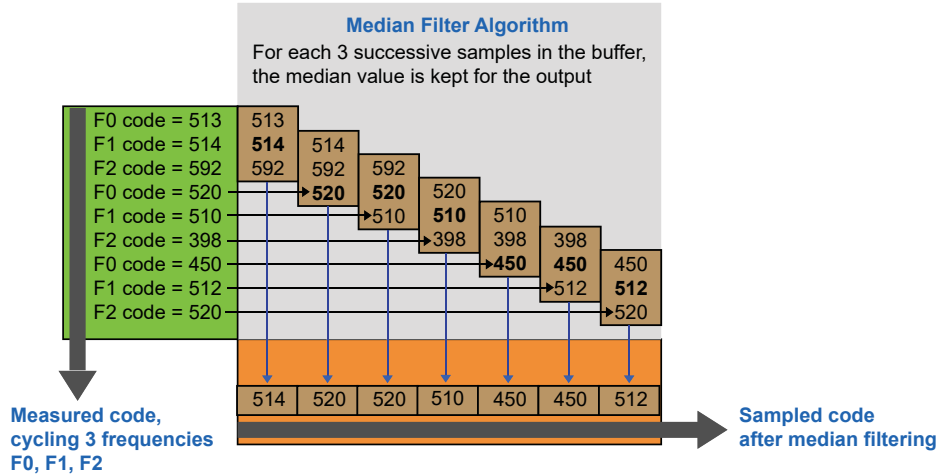
- 跳频中值滤波器测量 3 个固定频率。
- “跳频自动调节” 设置为通过噪声测量扫描配置的频率范围。

4.10.1 跳频中值滤波器

该模块应用可配置的循环跳频算法，能够在每个测量周期使用不同的采样频率。许多预先配置的频率在连续的测量周期期间依次实现。

下图给出了中值滤波器的行为（以 3 个频率循环时）/中值滤波器的深度。

图 4-7. 中值滤波器算法



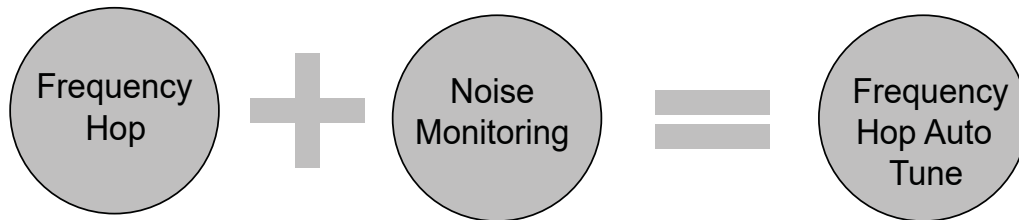
中值滤波器以字段 `fh_freq` 中定义的 3 个不同频率执行 3 次连续采集。

滤波器会去除这 3 个数据中较大的数据和较小的数据，然后将剩下的数据作为采集结果从滤波器中输出。之后，频率循环 F0、F1 和 F2 将移动一个频率步长，执行新的采集。中值滤波器中会将最后得出的这个结果与前两个结果进行比较，得出新的输出数据。

4.10.2 跳频自动调节

要执行自动调节，需针对每个选定的频率记录在各传感器节点上测得的信号。当一个频率的变化高于其他频率时，该频率将从测量序列中移除并替换为另一个频率。

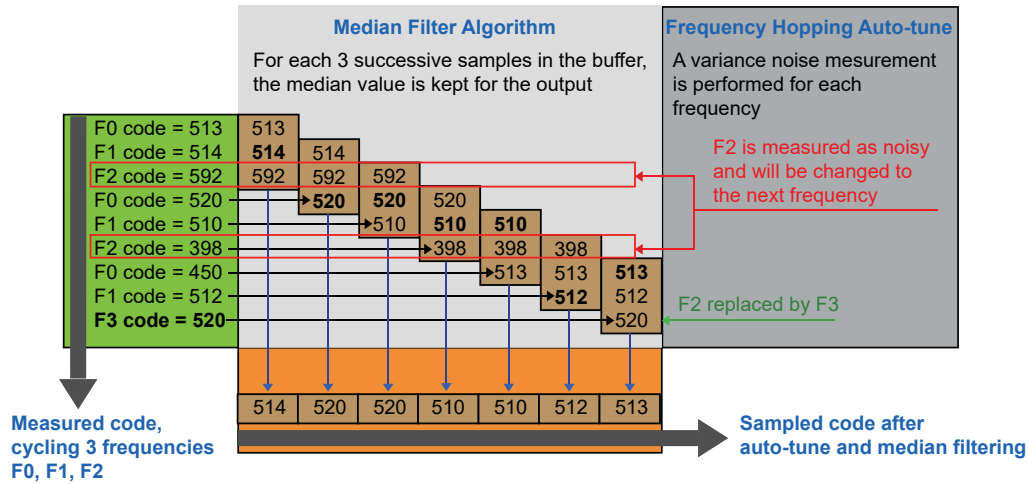
图 4-8. 跳频自动调节



算法

- 分别监视全部三个频率下的信号的稳定性。
- 如果特定频率下的信号不稳定，则将替换该频率并进行监视。
- 保留其他两个频率。
- 如果替换后的频率稳定，则保留该频率，否则应选择下一个频率并对其进行监视。
- 一直持续到找到稳定的频率为止。
- 如果未发现任何频率处于稳定状态，则使用信号变化最小的频率。

图 4-9. 自动调节跳频



4.10.3 频率自动调节配置

4.10.3.1 计数

面板上的传感器数量（例如，一个滑动条、一个滚轮和两个按钮）。

值：1 至 4。

4.10.3.2 频率自动调节配置数

对于此器件，字段 `num_freqs` 在 `n = 3` 时是固定值。

在循环中包括 3 个频率的情况下，将 3 点中值滤波器应用于输出数据。

4.10.3.3 频率选项选择

指向中值滤波器频率中特定条目以进行内部处理的指针。

无法由用户修改。

4.10.3.4 中值滤波器频率

指向所选频率（`=freq[n]`）的数组的指针

4.10.3.5 使能频率自动调节

此参数针对两个跳频选项设置：中值滤波器 + 噪声测量。

值处于开启或关闭状态。

4.10.3.6 最大变化限值

触发跳频恢复所需的信号变化。值 = 1 至 255。

此参数需要系统评估。作为初始起点，设置为最小按键阈值的 75% 左右，然后观察系统性能。

4.10.3.7 自动调节计数限值

用户定义的参数，用于确定采集到多少个连续的含噪声结果后应更改频率。

4.10.3.8 跳频频率

`freq0`、`freq1` 和 `freq2` 字段定义要使用的初始 3 个频率的值。跳频自动调节算法将改变这些值并使用 `PTC_FREQ_SEL 0-15`，具体取决于检测到的噪声。

有关更多定义，请参见 [4.7.2.3 频率选项](#)。

4.10.4 频率自动调节数据

4.10.4.1 状态

目前未使用，该字段可用于报告跳频模块状态。

4.10.4.2 当前频率

freq 字段是自动调节期间使用的频率的值。

4.10.4.3 滤波缓冲区

内部使用的指针，用户无法访问。滤波缓冲区用于存储传感器之前循环的信号值，以确定何时改变频率。

4.10.4.4 采集节点数据

filter_buffer 字段自动调节模式下测量的信号，对应于 freq 字段。

4.10.4.5 频率调节计数

内部使用的指针，用户无法访问。用于确定何时改变频率的计数器。

5. 版本历史

5.1 版本 A——2017 年 11 月

本用户指南的初始版本。

Microchip 网站

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

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

变更通知客户服务

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

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

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

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

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

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

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

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

代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》。如

果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

法律声明

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

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、Heldo、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LINK MD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、tinyAVR、UNI/O 和 XMEGA 是 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、mTouch、Precision Edge 和 Quiet-Wire 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

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

SQTP 为 Microchip Technology Inc. 在美国的服务标记。

Silicon Storage Technology 为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

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

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2019, Microchip Technology Incorporated 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-4206-6

DNV 认证的质量管理体系

ISO/TS 16949

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部、设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2009 认证。Microchip 的 PIC[®] MCU 和 dsPIC[®] DSC、KEELOQ[®]跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器及模拟产品严格遵守公司的质量体系流程。此外，Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。

全球销售及服务中心

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话: 1-480-792-7200 传真: 1-480-792-7277 技术支持: http://www.microchip.com/support 网址: www.microchip.com	中国 - 北京 电话: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 电话: 86-28-8665-5511 中国 - 重庆 电话: 86-23-8980-9588 中国 - 东莞 电话: 86-769-8702-9880 中国 - 广州 电话: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 电话: 86-571-8792-8115 中国 - 南京 电话: 86-25-8473-2460 中国 - 青岛 电话: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 电话: 86-21-3326-8000 中国 - 沈阳 电话: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 电话: 86-755-8864-2200 中国 - 苏州 电话: 86-186-6233-1526 中国 - 武汉 电话: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 电话: 86-29-8833-7252 中国 - 厦门 电话: 86-592-2388138 中国 - 香港特别行政区 电话: 852-2943-5100 中国 - 珠海 电话: 86-756-3210040 台湾地区 - 高雄 电话: 886-7-213-7830 台湾地区 - 台北 电话: 886-2-2508-8600 台湾地区 - 新竹 电话: 886-3-577-8366	澳大利亚 - 悉尼 电话: 61-2-9868-6733 印度 - 班加罗尔 电话: 91-80-3090-4444 印度 - 新德里 电话: 91-11-4160-8631 印度 - 浦那 电话: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 电话: 81-6-6152-7160 日本 - 东京 电话: 81-3-6880-3770 韩国 - 大邱 电话: 82-53-744-4301 韩国 - 首尔 电话: 82-2-554-7200 马来西亚 - 吉隆坡 电话: 60-3-7651-7906 马来西亚 - 檳榔嶼 电话: 60-4-227-8870 菲律宾 - 马尼拉 电话: 63-2-634-9065 新加坡 电话: 65-6334-8870 泰国 - 曼谷 电话: 66-2-694-1351 越南 - 胡志明市 电话: 84-28-5448-2100	奥地利 - 韦尔斯 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 丹麦 - 哥本哈根 电话: 45-4450-2828 传真: 45-4485-2829 芬兰 - 埃斯波 电话: 358-9-4520-820 法国 - 巴黎 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 德国 - 加兴 电话: 49-8931-9700 德国 - 哈恩 电话: 49-2129-3766400 德国 - 海尔布隆 电话: 49-7131-67-3636 德国 - 卡尔斯鲁厄 电话: 49-721-625370 德国 - 慕尼黑 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 德国 - 罗森海姆 电话: 49-8031-354-560 以色列 - 赖阿南纳 电话: 972-9-744-7705 意大利 - 米兰 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 意大利 - 帕多瓦 电话: 39-049-7625286 荷兰 - 德卢内市 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 挪威 - 特隆赫姆 电话: 47-7288-4388 波兰 - 华沙 电话: 48-22-3325737 罗马尼亚 - 布加勒斯特 电话: 40-21-407-87-50 西班牙 - 马德里 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 瑞典 - 哥德堡 电话: 46-31-704-60-40 瑞典 - 斯德哥尔摩 电话: 46-8-5090-4654 英国 - 沃金厄姆 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820
亚特兰大 德卢斯, 乔治亚州 电话: 1-678-957-9614 传真: 1-678-957-1455 奥斯汀, 德克萨斯州 电话: 1-512-257-3370 波士顿 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 1-774-760-0087 传真: 1-774-760-0088 芝加哥 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 1-630-285-0071 传真: 1-630-285-0075 达拉斯 艾迪生, 德克萨斯州 电话: 1-972-818-7423 传真: 1-972-818-2924 底特律 诺维, 密歇根州 电话: 1-248-848-4000 休斯敦, 德克萨斯州 电话: 1-281-894-5983 印第安纳波利斯 诺布尔斯维尔, 印第安纳州 电话: 1-317-773-8323 传真: 1-317-773-5453 电话: 1-317-536-2380 洛杉矶 米申维耶霍, 加利福尼亚州 电话: 1-949-462-9523 传真: 1-949-462-9608 电话: 1-951-273-7800 罗利, 北卡罗来纳州 电话: 1-919-844-7510 纽约, 纽约州 电话: 1-631-435-6000 圣何塞, 加利福尼亚州 电话: 1-408-735-9110 电话: 1-408-436-4270 加拿大 - 多伦多 电话: 1-905-695-1980 传真: 1-905-695-2078			