

利用系统已有资源 添加电容式触摸用户接口

Jonathan Dillon, 应用工程师 安防、单片机及技术开发部, Microchip Technology Inc.

摘要

如果在嵌入式系统中已经有单片机存在, 为了最小化花费或节省成本, 就可以使用电容触摸控件来替代按钮和接近传感器。电容触摸接口在现代应用中很受欢迎, 原因在于: 它们美观而时尚; 没有活动部件, 可将触摸系统密封起来, 使之与元件隔离。应用该接口可实现高技术控制面板。不过, 人们认为电容触摸用户接口的实现是门神秘的艺术。对于大多数系统而言, 单片机的外设中已经包含有用于实现电容触摸传感的模块, 比如接近传感器或按钮, 但目前还尚未利用这些资源。本文将讨论下列方法, 利用系统已有资源, 添加电容触摸用户接口:

1. 仅使用单片机内部模数转换器 (ADC) 的电容触摸传感
2. 使用内部精准电流源和ADC来测量电容
3. 使用嵌入在单片机I/O引脚的电容检测电路 (很多单片机都有这样的嵌入电路) 以及板载计数器/定时器。

本文还将解释克服噪声和其他环境问题所需的软件处理, 解释当电容式触摸用来开关系统时降低功耗的方法。本文还将讨论实现可靠的电容触摸传感所需的一些设计技巧。

1. 引言

电容触摸传感用户接口已经变得广受欢迎, 原因在于它们提供了时髦的单面板控制, 除了其流行的设计外观之外, 还提供了更高的可靠性和稳健性。在电容触摸传感用户接口中没有活动部件, 从而避免了接触磨损或腐蚀, 防止了按压式按钮的机械故障, 而这延长了产品寿命。由于能够透过材料检测到触摸, 因此可将面板密封起来, 从而保护内部电子器件免受恶劣环境的影响, 比覆膜技术的耐用性更好。不过, 电容触摸并不是纯粹的双位信号, 这与机械式按钮不同, 电容触摸解析的是模拟信号。

由于电容触摸技术不需要直接的电连接, 而是透过材料进行检测, 它还可以用作接近传感器, 用在当用户靠近接口时 (而不是在触摸接口时) 就进行反应的用户接口中。

由于许多系统和用户接口控制电路中已经有单片机存在, 采用电容触摸用户接口可以降低系统成本和元件数。电容式传感器可以替代按钮、滑动条和拨号盘, 电容式传感器可以简单到只是电路板上的导电焊盘。其成本基本上可忽略不计, 而可靠性却要大很多。

当用户按压面板表面时, 电容触摸传感电路开始工作, 形成对地的电容, 电容的一个极板是电路板上的导电焊盘, 另一极板是用户的手指。导电焊盘还有寄生电容, 把焊盘连接到单片机的电路走线同样也有寄生电容。寄生电容值可随环境改变 (诸如温度和湿度) 而变化。由于这两个电容是并联的, 如图1所示, 我们不能同时测量它们。

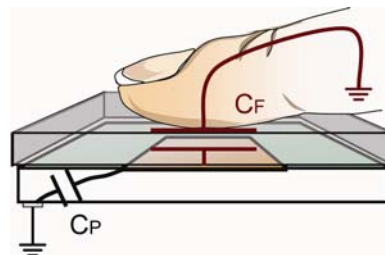


图1: 传感器电容

用户手指产生的电容取决于极板和手指的面积以及面板材料的厚度和介电常数，如公式1所示。

$$C_f = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

公式1: 平行极板的电容

其中:

- C_f : 用户手指产生的电容
- ϵ_0 : 自由空间的介电常数为 8.85×10^{-12}
- ϵ_r : 两极板间材料的介电常数
- A : 两极板重叠区域的面积
- d : 两极板之间的距离

产生的电容越大，检测到触摸或感应到接近就越容易。从公式1中，我们可以看出，决定所产生电容的因素是：挑选用于用户接口面板的材料和材料的厚度。材料的选择决定了介电常数，厚度决定了用户手指和导电焊盘之间的距离。增大板上导电焊盘的面积会产生一定的效果，但面积超过用户手指面积后就不再有用，因为重要的是重叠区域的面积。不过，对于接近感应，导电焊盘可设计地大一些，这样不仅能与用户的手进行耦合，而且多出来的面积可提高感应范围。

出于机械的原因，比如接口面板上的支撑肋，可能无法紧贴接口面板安装电路板。在电路板上安装弹簧而不是导电焊盘可以克服这一问题。弹簧应紧压接口面板上的按钮区域，桥接面板与电路板之间的空隙。用户手指于是经由面板与弹簧进行耦合。这一方法最小化了电容极板间距，避免了出现气隙，气隙可能显著减弱响应的灵敏度。

电容触摸接口不断地测量导电焊盘的电容，跟踪由于环境逐步变化而导致的寄生电容变化，记录下可用来判断触摸是否发生的内部估计值（触摸发生时电容频率改变）。

2. 测量方法

适用于单片机测量导电焊盘电容的方法如下：

- 电容分压器
- 充电时间测量
- 电容检测模块

所有这三种方法都不需要外部元件；但在测量和解析电容时确实对单片机有一些要求。

电容分压器

此方法需要具有内部模数转换器（ADC）的单片机，对于多数系统而言这已经是普通要求了，对单片机不再有其他功能要求。此方法使用ADC的内部保持电容以及电路板上导电感应焊盘的电容来产生电压，电压取决于传感器的电容。然后使用ADC测量电压，再由软件进行处理。

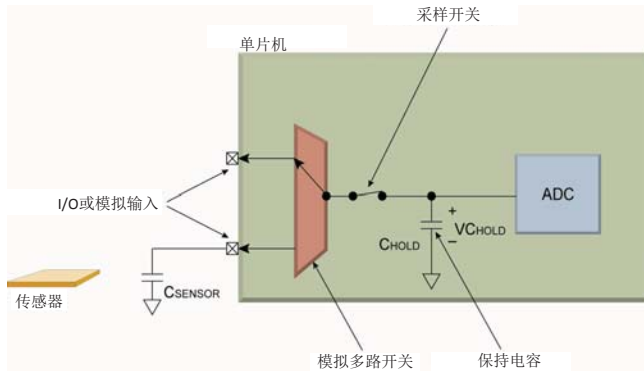


图2-1: 单片机中的模拟通道和ADC电路

正常工作期间，在进行模数转换时，图2-1中的模拟多路开关用来选择、测量单片机引脚（称作选取的通道）上的电压。允许保持电容器充电至引脚电压，充电时间为采集时间，然后采样开关断开，ADC产生保持电容上电压的数字表示。

当单片机的引脚被模拟多路开关选中时，它们还可以配置成数字I/O，这使得我们能够把保持电容充电或放电至电源电压的上下轨值。

这种测量方法需要若干步骤。一些步骤的时序可能是至关重要的，因为电容的泄漏和延时将导致读数漂移。

i) 要为测量初始化系统，我们需要在系统中对电容进行适当的充放电。通过使用模拟多路开关选择未占用引脚并把它配置为高输出驱动，我们可以对内部保持电容器进行充电。同时，我们需要确保传感器没有充电。从而，我们把连接传感器的引脚配置为低输出驱动，它使传感器接地。模拟多路开关和输出的状态可见图2-2。

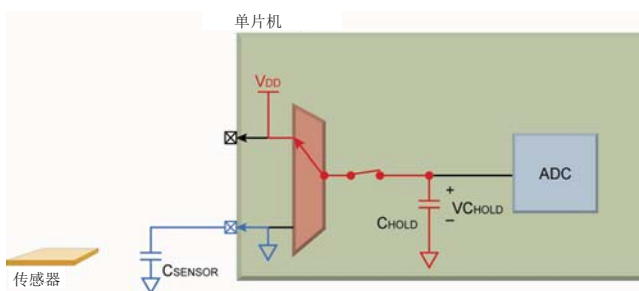


图2-2: CVD测量初始化状态

ii) 一旦传感器电容已经放电，且保持电容器已经充电至正电源电压，连接到传感器的引脚上的输出驱动被禁用，如图2-3所示。这时，至电容的线路浮空，电容可以通过引脚或板泄漏获得一些电荷。正因为如此，这一步的时间应尽可能短。

iii) 使用模拟多路开关选中连接到传感器的引脚，这将使保持电容与传感器并联。保持电容充电至 V_{DD} ，传感器则完全放电。其结果就是电流从保持电容流至电容传感器。模拟多路开关允许双向电流，尽管其阻抗确实会导致一些电流损耗。

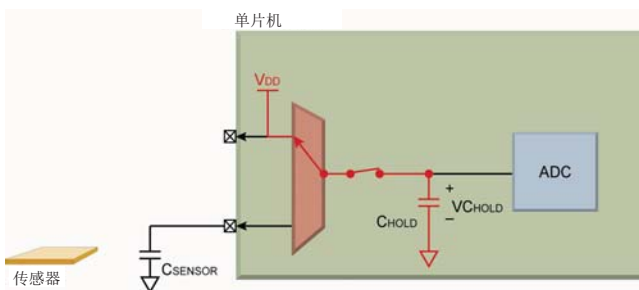
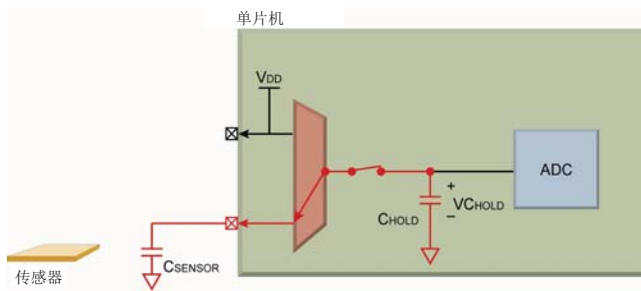


图2-3: 传感器不再放电



iv) 在足以使系统稳定下来的时间之后，模数转换启动，采样开关断开，如图2-4所示。然后测量保持电容上的电压。这个稳定时间非常短，转换通常可以在下一条指令处开始。

图2-4：传感器电容与保持电容并联

保持电容上的电压取决于传感器电容，即传感器寄生电容和用户手指电容之和，如果触摸的话。这引出了下面的关系式，电压由ADC测得。

$$V_{\text{Chold}} = \frac{C_{\text{hold}}}{C_{\text{hold}} + C_{\text{p}} + C_{\text{f}}} \times V_{\text{dd}}$$

公式2-1：保持电容上的电压

其中：

- V_{Chold} : 由ADC测得的电压
- V_{dd} : 单片机电源电压
- C_{hold} : 保持电容的电容，对于测试器件而言是10 pF
- C_{p} : 传感器寄生电容
- C_{f} : 手指产生的电容

从公式中我们可以看到，手指按压加入的电容将导致保持电容上的电压下降。这将转换为ADC输出结果的较低值。

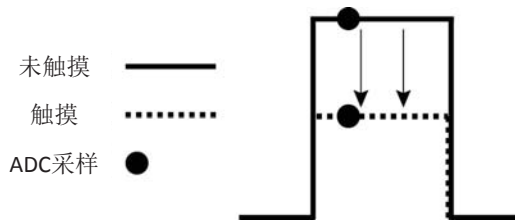


图2-5: 传感器上的电压

读数的分辨率由ADC分辨率决定。由于这个原因，推荐使用10位ADC。可以使用较低分辨率的ADC，但它将需要更大的电容改变量，而这通常要求较小的极板间距和更薄的接口面板。因为测得的电压通常要低很多，为了提高ADC分辨率，可以使用比电源轨电压更低的参考电压来进行转换。这个参考电压的改变将增大每一数字位能够分辨的电压，但要小心避免饱和。当被转换电压超过参考电压，而ADC只能以其最大输出码进行响应，这样就会出现饱和。因为电容式测量非常快，通常为10-20 μs，可以对传感器进行过采样，以便提高分辨率。

上述文字讨论的是使用未占用引脚对保持电容进行充电的情况。但是，如果要测量多个电容触摸传感器，连接另一传感器的引脚可以暂时用来对保持电容进行充电。用于该输入的传感器此时不会被测量，由于涉及的电容小，并且数字输出的输出阻抗也较低，所以可将该输入驱动为高电平。至ADC的任何内部参考电压也可用来给保持电容充电。

充电时间测量

一些单片机集成了恒流源，它可用来给传感器电容充电一段固定时间，然后测量得到的电压，如图2-6所示。

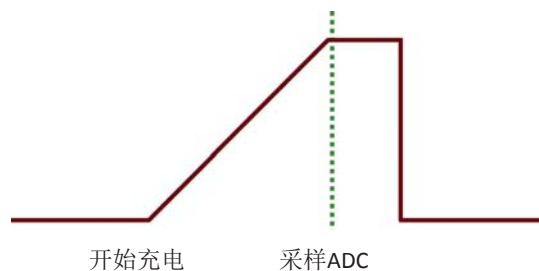


图2-6: 传感器上充电时间测量单元 (CTMU) 的电压

用户手指加入的电容（它与传感器耦合）将减小ADC测得的电压。

$$V = \frac{i \times t_{\text{charge}}}{C_{\text{hold}} + C_p + C_f}$$

公式2-2: 传感器上产生的电压

其中:

- V : ADC测得的电压
- i : 来自恒流源的电流
- t_{charge} : 传感器充电的固定时间长度
- C_{hold} : 保持电容的电容值，对于测试器件而言为10pF
- C_p : 传感器的寄生电容
- C_f : 手指按压产生的电容

此方案使用ADC的模拟通道多路开关（见图2-7），选择单片机的不同引脚。这使得它能够扫描多个传感器，而且保持电容充电时是与传感器电容并联的，从而避免形成电容分压器。

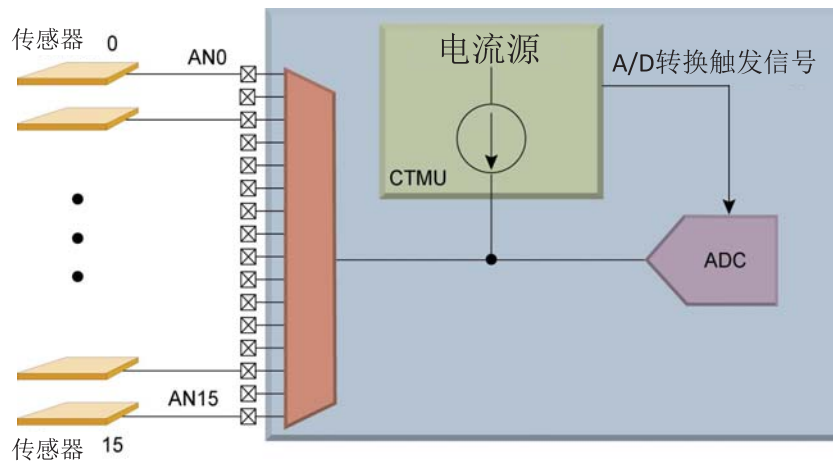


图2-7: ADC电路和电流源 (电流源、A/D转换触发)

在使能电流源之前，电容的电荷应该是一个已知值。因此，可将电容通过单片机中的内部门接地，确保它完全放电。在软件中可调节电流，形成快速充电时间，从而允许在扫描多个传感器时进行快速测量。在引脚数较高的很多Microchip单片机上都实现了恒流源，这些单片机还拥有很多模拟通道，允许实现多个电容式传感器。

电容检测模块

若干更新款的通用单片机还提供电容检测模块，集成了用于检测电容的特殊电路。这些新款单片机包含一个大模拟多路开关，允许对用于多按钮接口的多个电容式传感器进行扫描；除了CSM模块之外，此类单片机还使用一对内部计数器/定时器。

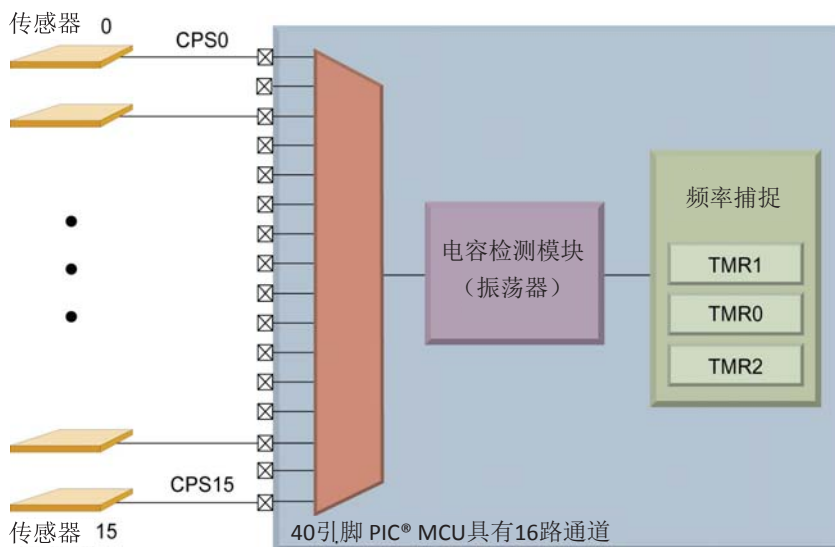


图2-8: CSM连接与资源

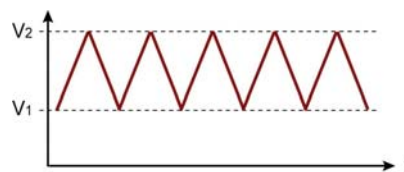


图2-9: CSM传感器波形

模块自动处理电流源和吸流阱之间的切换，充/放电周期取决于传感器电容，增大电容将增大这个周期。

为了测量波形的频率，把波形用作提供给数字逻辑计数器/定时器的时钟信号。在特定的时间窗口内，清零并使能计数器，然后读其终值，我们就知道了在该时间段内出现了多少次振荡。电容的增加，诸如由于按压导致的电容增加，会降低振荡频率，导致记录的读数变小，如图2-10所示。时间窗长度可以由另一个计数器来控制，这个计数器还可以自动禁止振荡计数，以便允许处理器处理其他任务。时间窗的提供还可以使用来自看门狗定时器（WDT）的振荡器，WDT的功耗极低。当CSM仍然工作并递增计数器/定时器时，单片机可以处在低功耗休眠模式中。WDT将周期性地唤醒单片机，唤醒后软件可以读取并处理振荡计数值。

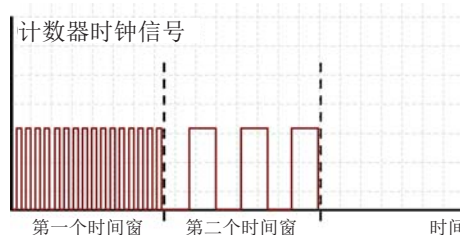


图2-10: 至内部计数器/定时器的时钟信号（第一个时间窗，第二个时间窗，时间）

为了处理不断变化的电路寄生电容，我们需要记录当前寄生电容的基线值，而这通常由滑动平均滤波器来进行处理，对传感器的以往测量值进行滑动平均。由于可用的存储空间有限，通常采用基于IIR的滑动平均，避免存储多个以往采样值。

为了确定是否出现按压，把传感器电容的最新测量值与基线值进行比较。如果差异大于设计的阈值，就认为触摸已经出现，应该交由软件进行处理。可以不直接使用电容测量值，而是使用测量滤波值或平均值，这取决于应用。

电容检测模块可用于接近传感以及触摸，因为其工作原理实际上是相同的；不同之处在于接近传感两极板之间的间距更大。通过增加测量时间窗口的长度，电容的变化将更小，在时间窗内还将平滑掉暂态噪声。不过，这种办法所延长的时间不能过长，因为延迟可能使得接口响应缓慢。

对于接近传感，使用计数器/定时器测量一段时间内波形的振荡次数，可以提高分辨率。这种配置增加了分辨率，从而补偿了增大极板间距带来的损失。

3. 讨论

电容触摸传感提供了诸多优点，实现了新型的人机交互接口。缺少活动部件增加了系统可靠性，能够把用户接口密封起来不受其工作环境的影响。如果在应用中已经使用了单片机，那么可以使用电容式接口来替代各种开关，几乎不会增加成本，因为需要的仅仅是导电传感器焊盘而已。但是，电容触摸传感可能对系统提出其他需求——即对机械安装和材料电介质常数有要求，以便确保得到程度可接受的电容耦合。

电容分压器和充电时间测量单元都提供了电容的高速测量，但需要确定的时序，要求处理器管理测量步骤。能够进行高速测量将允许系统在大多数时间处于低功耗休眠状态，周期性地唤醒并测量用户按压。电容分压器利用了ADC的优点，ADC已经普遍存在于各种单片机之中，对于大多数应用而言也是必须的功能。电容分压器广受欢迎，仅在短时间内使用ADC外设，使得它易于实现，适用于大量系统。而CTMU则是许多Microchip较高引脚数器件普遍具有的外设。

电容检测模块提供较高分辨率的测量，适用于接近传感，其测量方法是对时间窗口中的若干振荡进行计数，从而平滑掉了暂态噪声。当单片机处于低功耗休眠状态时它也能工作，从而能够最小化电流消耗，但这种方法需要使用单片机中两个内部计数器/定时器。

参考文献

1. Bruce Bohn: AN1250: 《Microchip用于电容触摸应用的CTMU》，Microchip Technology Inc., 2009
2. Tom Perme: AN1101: Introduction to Capacitive Sensing, Microchip Technology Inc., 2007
3. Thomas Perme和Dieter Peter: AN1298: Capacitive Touch Using Only an ADC (“CVD”), Microchip Technology Inc., 2009
4. Enrique Aleman: AN1171: How To Use The Capacitive Sensing Module (CSM), Microchip Technology Inc., 2010

如需了解更多资讯，请访问Microchip网站
www.microchip.com