

## 通过 MSP430 进行 PCB 电容触摸感应

Zack Albus

MSP430 WW 应用

### 摘要

此应用报告讨论使用 MSP430 微处理器来设计单触式电容传感器界面。借助超低功耗功能和集成外设，可随时将单触式用户界面集成到 MSP430 应用。此应用报告提供了技术概要、系统注意事项以及使用 MSP430 系列实施电容触摸感应的各种方法的详细信息。图 1 显示了系统的高级图形表现形式，本文档的其余部分将对此进行详细描述。

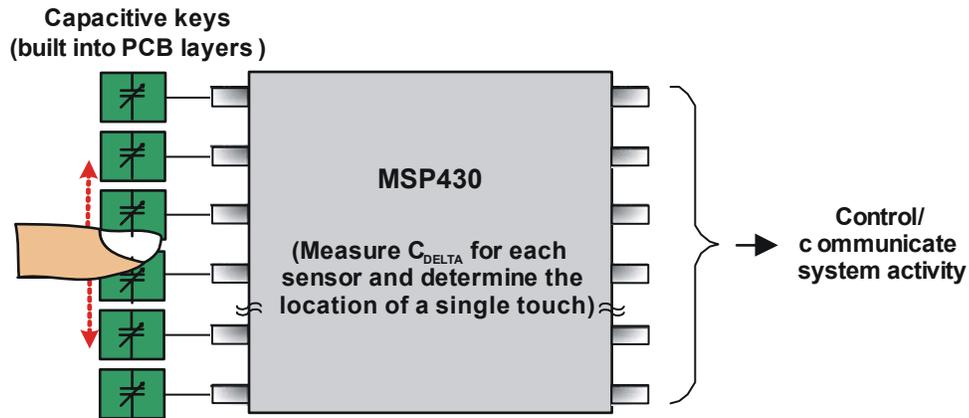


Figure 1. 使用 MSP430 的电容触摸传感器系统概述

## 内容

<b>1</b>	<b>Capacitive Touch Sensing Overview .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Sensor and Interface Construction .....</b>	<b>4</b>
2.1	PCB 传感器特性 .....	4
2.2	传感器绝缘层 .....	6
<b>3</b>	<b>使用 MSP430 测量电容触摸传感器 .....</b>	<b>8</b>
3.1	基于振荡器的电容测量 .....	8
3.2	基于电阻的电容测量 .....	12
<b>4</b>	<b>软件实施 .....</b>	<b>17</b>
4.1	跟踪传感器基准电容 .....	17
4.2	实施按钮功能 .....	19
4.3	实施滑块功能 .....	19
4.4	处理滑块端点 .....	21
4.5	滑块的传感器多路复用 .....	23
<b>5</b>	<b>总结 .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>参考资料 .....</b>	<b>25</b>
附录 A.	灵活的评估和演示硬件 .....	27
附录 B.	简单的演示硬件 .....	28

## 图

<b>Figure 1.</b>	<b>Capacitive Touch Sensor System Overview Using the MSP430 .....</b>	<b>1</b>
<b>Figure 2.</b>	<b>Open Capacitor Acting as a Sensor .....</b>	<b>3</b>
<b>Figure 3.</b>	<b>Plate Capacitor Basics .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 4.</b>	<b>Example Four-Sensor System for Button and Slider Function .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 5.</b>	<b>Pour Styles (Red = Top Signal Layer, Blue = Bottom Signal Layer = GND Pour) .....</b>	<b>6</b>
<b>Figure 6.</b>	<b>Theoretical and Empirical Sensor Sensitivity vs Insulator Thickness .....</b>	<b>8</b>
<b>Figure 7.</b>	<b>Basic Capacitive-Dependent Relaxation Oscillator .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 8.</b>	<b>Frequency Measurement Principle .....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 9.</b>	<b>Multi-Sensor System Using Comparator_A+ .....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 10.</b>	<b>Current Consumption and Measurement Time for One Sensor .....</b>	<b>11</b>
<b>Figure 11.</b>	<b>Basic Resistive Discharge Capacitance Measurement .....</b>	<b>12</b>
<b>Figure 12.</b>	<b>Measurement Methodology Using the GPIO Threshold and Timer_A .....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 13.</b>	<b>Multi-Sensor Charge/Discharge Configuration .....</b>	<b>14</b>
<b>Figure 14.</b>	<b>Single Measurement Cycle for Improved Noise Rejection .....</b>	<b>15</b>
<b>Figure 15.</b>	<b>Resistive Charge/Discharge I<sub>CC</sub> and Measurement Time: Single Sensor .....</b>	<b>16</b>
<b>Figure 16.</b>	<b>Example Algorithm for Tracking Baseline Sensor Capacitance .....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 17.</b>	<b>Button Press in a Four Key System .....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 18.</b>	<b>Fundamental and Neighboring Sensor Response .....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 19.</b>	<b>Example Slider Position Determination Methodology .....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 20.</b>	<b>Representation of Count Measurement Results for Max Endpoint .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure 21.</b>	<b>Example Slider Endpoint Handling .....</b>	<b>23</b>

Figure 22. Example Sensor Multiplexing of 12 Capacitive Sensor Elements .....24  
 Figure 23. Flexible 4-Button RO/RC System Block Diagram.....27  
 Figure 24. Simple 4-Button RC System Block Diagram and Image .....28

表

Table 1. Dielectrics for Example Materials .....7  
 Table 2. 64-Position Slider Key .....21

1 电容触摸感应概述

此处所述的电容触摸感应应用所需的基础元件因电容器本身而异。此电容器应当具有简单的结构并且对人体触摸非常敏感，以便取代机械按钮和开关。通过“开放式”电容器结构，即可构建此类触摸模式敏感传感器元件，以便通过导电外物（在此例中为手指）对电场进行干扰。图 2 以顶视图和剖面图的形式显示了印制电路板中采用的电容传感器。

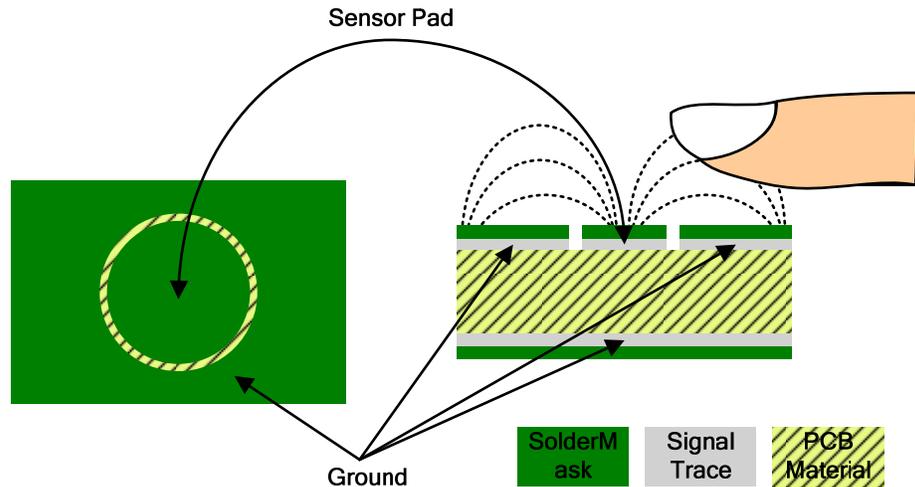


Figure 2. 开放式电容器用作传感器

如上所示，基于 PCB 的电容器是在中心覆铜按键板和其周围的接地区域之间形成的。电场可泄漏到电容器的上方区域。传感器按键板与周围接地区域（或下方的接地平面）的交互将形成可测量的基准电容。对于手指大小的传感器，其基准电容在  $\sim 10\text{pF}$  范围内。当导体（如手指）进入开放式电容器的上方区域时，电场将受到干扰，从而导致最终电容发生变化。具有导电性的手指与电容传感器的耦合会导致结构电容在基准电容（即非触摸情况下的传感器电容）的基础上升高。通过持续测量系统中的传感器电容并将每个结果与预定的基准电容进行比较，系统微处理器不仅能够确定每个传感器元件的开关按钮功能，还可以确定用于更多复杂界面（如定位滑块）的按键“数量”。

该传感器的敏感度取决于周围接地区域与传感器板之间的间距。建议保持大约 0.5mm 的间距。此外，PCB 厚度也会对整个敏感度产生影响：如果非常薄（例如柔性 PCB），则会增加传感器与其下方接地板的耦合紧密度，从而导致敏感度降低。厚度为 1mm 至 1.5mm 的标准 FR4 PCB 是理想的选择。

常用的传感器按键板直径约为 10mm。此尺寸与按压时人体手指的表面面积相当。遵循上述注意事项的传感器通常具有 5pF 至 10pF 的非触摸电容。

传感器下方突出显示的接地平面可帮助屏蔽系统中其它电子器件产生的潜在干扰。它还可以帮助维持更加恒定的基准电容，以便在每次测量时用作所需的参考。

此设计的基准电容受 PCB 上的寄生电容影响，并且受其它环境的潜在影响，例如温度和湿度。因此，检测系统需要持续监控和跟踪此变化，以便与触摸事件进行正确比较。

## 2 传感器和界面结构

完整的界面包含基于 PCB 的实际电容传感器以及用于隔离传感器和用户的绝缘体。

### 2.1 2.1PCB 传感器特性

从更高层面上说，电容传感器的依赖关系可通过平板传感器的基准电容获悉。图 3 表示关键元件。

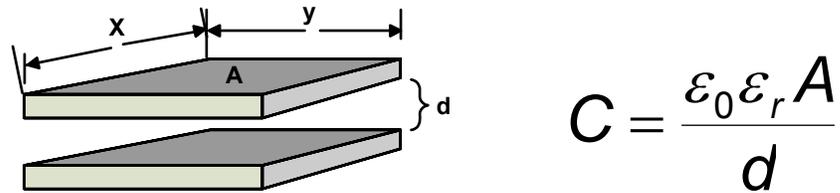


Figure 3. 平板传感器的基准电容

首先，需要对基准电容加以说明。术语“基准电容”是指“非触摸”或未受影响的传感器元件的测量结果。简而言之，可假设基准电容器是在位于 PCB 顶端的传感器按键板和位于 PCB 底端的接地区域之间形成的。在图 3 中，它们分别是顶部平面和底部平面。

PCB 自身构成公式中的“d”。如前所述，当 d 变小时（假设使用软件 PCB），基准电容将增大，这会导致敏感度降低。自由空间的电容率 ( $\epsilon_0$ ) 和材料 ( $\epsilon_r$ ) 定义了 PCB 绝缘体的介电常数，它会影响最终的基准值。

传感器区域“A”的大小通常不超过活动手指的大小。为了达到最佳折中，该尺寸通常设计为介于儿童的小手指和成人的大手指之间，但最终还是取决于实际应用。请记住，手指覆盖区之外的任何传感器区域基本上属于多余，因为这些区域起不到引起所需电容变化的作用。

电容传感器的设计注意事项可以简单地归纳为：最小化传感器的基准电容，同时最大程度地增强潜在的用户交互功能。这两种方法在触摸式和非触摸式传感器之间产生更大电容变化的效果越理想，良好敏感度和强大设计就越显得重要。当然，这两个目标不可同时实现：当区域变大以适应整个活动手指的大小时，基准电容也会增大，因为它与 A 成正比例关系。对于给定的传感器结构，手指按压可以产生的最大变化基本上是固定的。随着同一传感器的基准电容增大，已测量电容的百分比变化幅度将降低，从而导致传感器界面的敏感度和整体性能下降。

对于传感器的固定区域 A，一种解决此问题的方法就是管理传感器按键板下方的接地区域。图 4 显示了可实现单触式功能（例如按钮和滑块）的四键式传感器界面的简单结构。该四键式传感器将用作整个应用报告的示例。

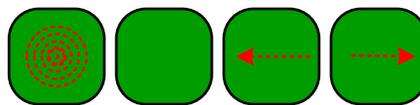
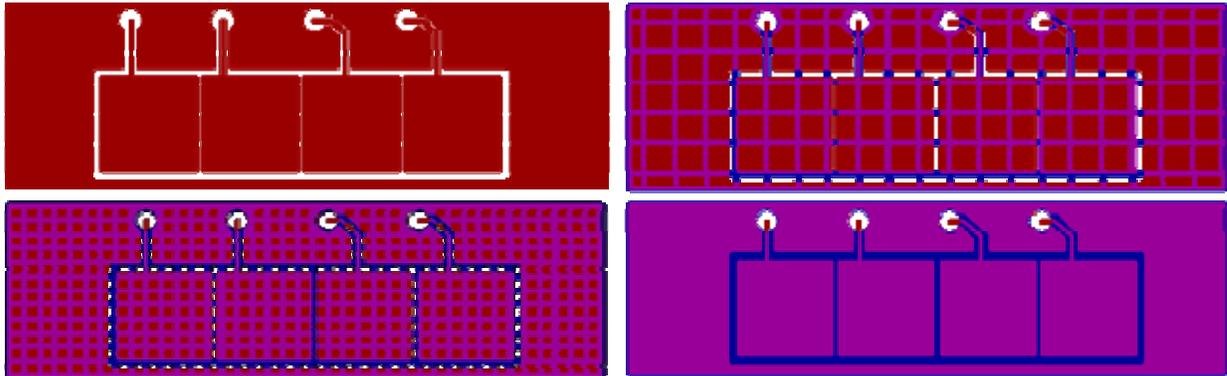


Figure 4. 用于实现按钮和滑块功能的 4 传感器系统示例

图 5 显示了传感器按键板的实际 PCB 布局，并使用 4 种不同的方法来布置接地区域。



**Figure 5.** 区域样式 ( 红色 = 顶部信号层, 蓝色 = 底部信号层 = GND 区域)

左上角的图像仅显示了顶部信号层：4

个传感器按键板位于顶层接地区域；未部署任何底层。右上角的部分显示了相同的电路板设计；假设底层 25% 的接地区域现已部署。左下角版本具有 50% 的区域，而右下角则具有 100% 的已填充接地区域，每个区域都位于在顶层构建的传感器下方。

建议至少让某些底层接地区域处于每个传感器的下方，以便将传感器元件与可能对传感器基准电容产生影响的噪声和外部变化相隔离。很明显，右下角部署中显示的 100% 填充是最佳选择，它提供了最大化的噪声隔离，但它同时扩大了传感器和接地区域之间形成的电容器的底板面积。这会提高已增大的区域 A

中的基准电容。为了实现最佳的噪声隔离和最小化基准电容，通常建议采用 50% 至 75% 的填充。

## 2.2 传感器绝缘层

在此类应用中，绝缘层（通常为塑料）会覆盖 PCB

上的传感器，以便将其与用户隔离。因此，手指不会与传感器板产生物理接触。让传感器和用户之间保持绝缘隔离对最大程度地发挥电容触摸界面的功能至关重要。

图 3

中的平板电容器概念用于描述传感器的基准电容，它还用于直观显示电容变化与手指活动的交互。在这种情况下，传感器将成为电容器的底板，而用户的手指将成为顶部导电板。位于两者之间的绝缘体的体积很小，它可以是覆盖传感器的阻焊层，也很可能是用于包裹特定传感器系统的塑料外壳。很明显，当交互区域增大以适应整个手指大小时，即区域 A 不断增大时，电容变化幅度将达到最大值。此外，随着绝缘体 d 值的增大，电容变化幅度将降低，与之呈现反比例关系。用作用户界面绝缘体的实际材料是一个不可忽略的关键因素。材料的介电常数及其厚度在决定电容触摸传感器的敏感度和实用性上起着重要作用。表 1 显示了某些示例材料的介电常数 ( $\epsilon_0 \times \epsilon_r$ )，塑料的介电常数通常处于 2-3 范围内。

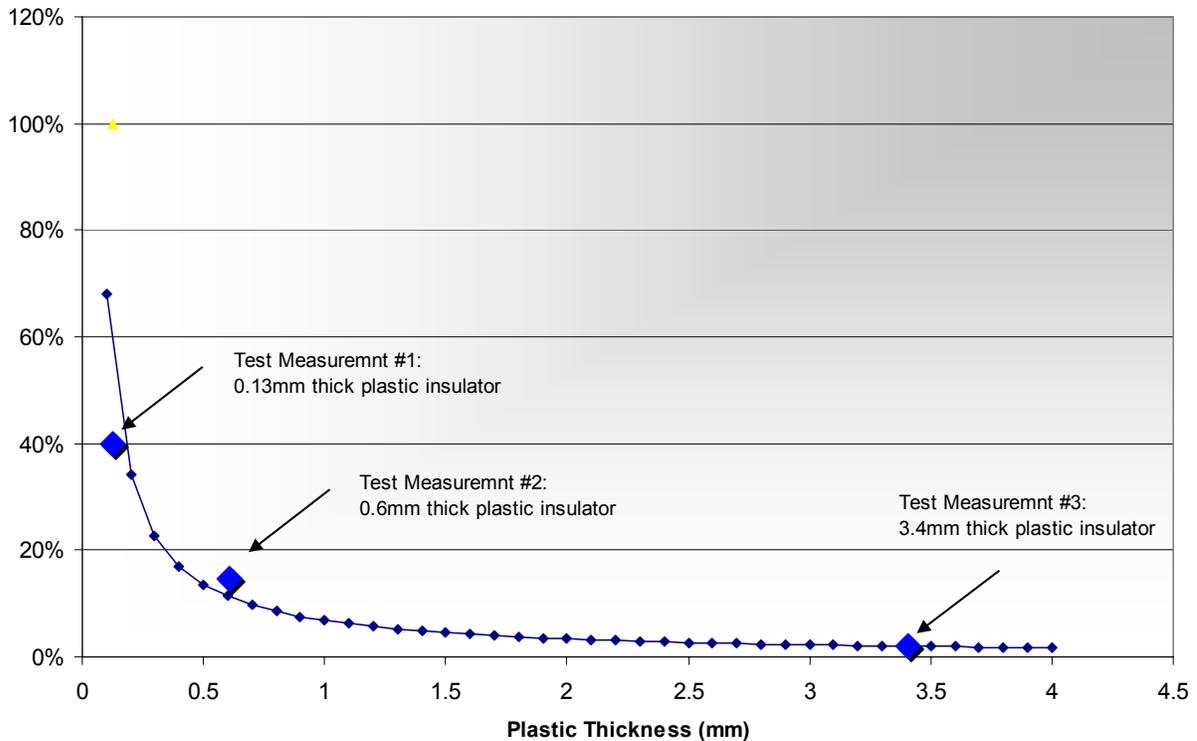
**Table 1. 示例材料的介电常数**

<i>材料</i>	<i>介电常数</i>
真空	1 (根据定义)
空气	1.00054
聚乙烯	2.25
纸张	3.5
高硼硅玻璃	4.7
橡胶	7
芯片	11.68

除了绝缘体本身以外，绝缘体和传感器之间的连接也至关重要。以具有低介电常数的空气为例，绝缘层和传感器在耦合中出现的任何空隙都会导致电容变化出现钝化。确保两个元件之间的良好连接对于保持稳定的触摸敏感度至关重要。通常使用粘合剂来粘连它们，除了拥有超薄特性和极强触感以外，粘合剂还必须在环境发生变化时最大程度地保持厚度或粘性不受影响。非导电粘性膜（例如 3M 467MP 和 468MP）具有回弹特性，非常适合此类应用。

为了说明绝缘体厚度对传感器敏感度的影响，图 6 显示了当用户界面绝缘体 d 值增大时的理论关系图。连续曲线上标出了三个用于专门测试的实证数据点，可使用特定厚度的塑料进行测试。

**Capacitance Change vs. Thickness**  
(Fingerpress, 8x8mm pad, 1.5mm FR4 PCB)



**Figure 6. 理论和实证传感器灵敏度与绝缘体厚度**

通过了解 PCB

传感器和用户界面绝缘体的物理和电气性能取舍，可在系统的性能预期和可行性上实现平衡，以便满足特定应用的要求。最后，机械和材料的限制也会制约具体的实施。

### 3 使用 MSP430 测量电容触摸传感器

现在，我们已定义了传感器概念和结构，下面将介绍用于测量电容触摸传感器的两种不同方法。实施和执行结果在每个案例中都做了详细介绍，并且对每种方法的取舍也进行了比较和讨论。

#### 3.1 基于振荡器的电容测量

第一种用于测量电容触摸传感器的方法就是使用振荡器。从根本上说，通过将 MSP430 的片上比较器和电容传感器用作调优元件，可以构建简单的弛张振荡器。传感器的任何电容变化都有对应的变化频率，通过使用 MSP430 的内部 Timer\_A 硬件可以测量该变化。图 7 显示使用具有 Comparator\_A 外设的 MSP430 来实施此类系统。

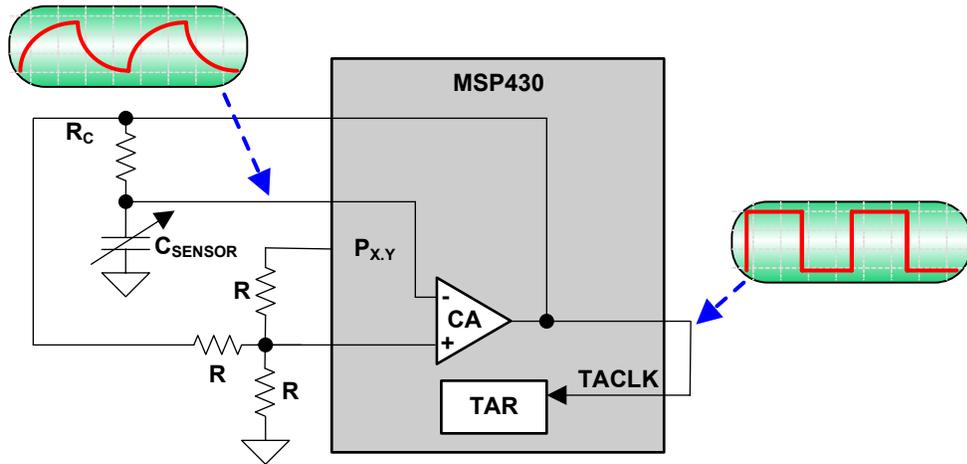


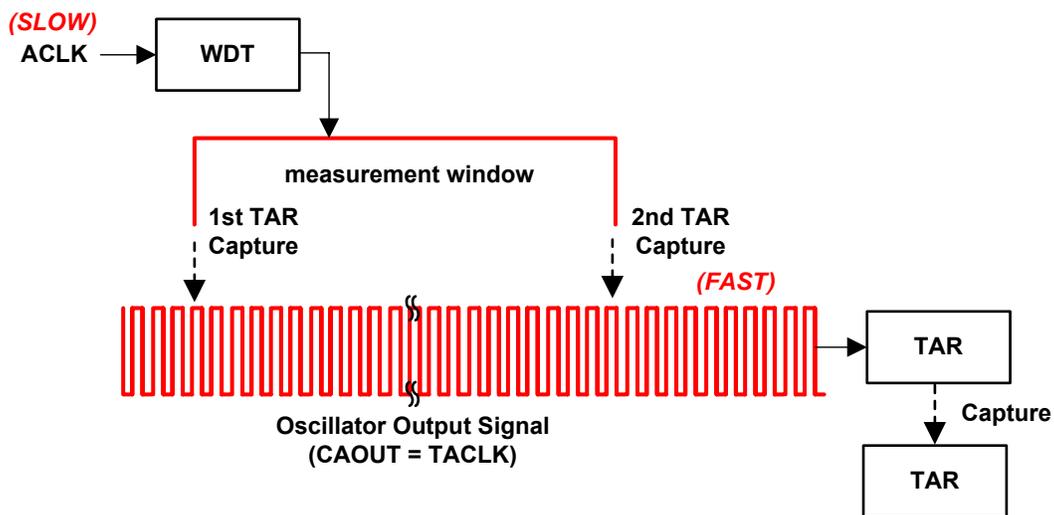
Figure 7. 依赖于基准电容的弛张振荡器

对于 R 梯形网络，如果 P<sub>x,y</sub>

为高，则需要为随输出变化的比较器创建参考。该切换参考与传感器电容 (C<sub>SENSOR</sub>) 的充电和放电完全相反，从而产生持续振荡。梯形网络中的等值 R 可提供 1/3V<sub>CC</sub> 和 2/3V<sub>CC</sub> 跳闸点，振荡频率的计算公式为：

$$f_{OSC} = 1/[1.386 \times R_C \times C_{SENSOR}]$$

通过对固定时间段内的振荡周期进行计数，可以计算频率和测量电容。对于此应用报告，使用 100k 的传感器电阻 R<sub>C</sub>。对于常用的 ~10pF 传感器，它可以产生大约 600kHz 的振荡频率。图 8 显示了该计数原理，它可以在 MSP430 硬件中实施。

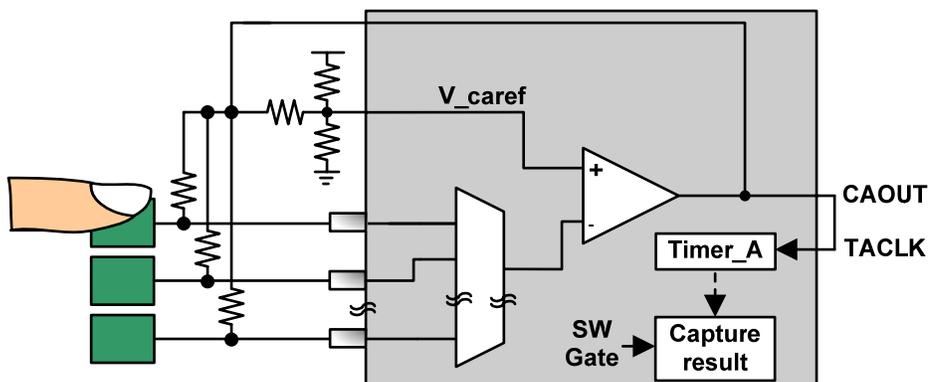


**Figure 8. 频率测量原理**

图 8 显示使用超低速 ACLK 信号（在此例中使用 12kHz 集成 VLO）为 WDT 计时，以创建测量时段。当 WDT 每次出现中断时，软件中的 CPU 将为持续计数的 Timer\_A 寄存器（即 TAR）拍摄快照。它们当中的两幅快照（或抓图）之间的差值就是测量结果。

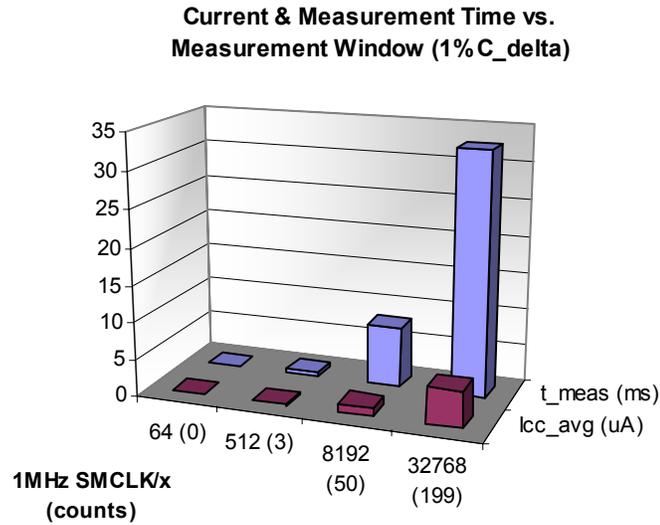
事实上，实际电容值没有多大价值，基线测量和触摸式传感器之间的电容变化才是研究的重点。要确定这一点，获取测量时段中的实际计数至关重要。通过存储用于比较未来测量结果的基准电容值，可以确定电容的相关变化。

用户可以使用 Comparator\_A（如图 7 中所示）轻松测量单个传感器，而利用振荡器方法实施多个传感器测量则需要使用启用了 Comparator\_A+ 的器件。内置于 Comparator\_A+ 中的模拟多路复用器允许用户利用振荡器方法单独测量多个电容传感器。如图 9 中所示，使用 Comparator\_A+ 的多传感器系统可以确定滑块上的单点触摸位置。



**Figure 9. 使用 Comparator\_A+ 的多传感器系统**

通过为每个传感器使用一个外部电阻并为比较器参考使用三个附加电阻，可借助 MSP430 实现简单的多传感器系统。通过启用自由 GPIO 所需的 100k 参考电阻，可以创建敏感且具有超低功耗的电容触摸界面系统。图 10 显示了采用此方法的单个电容传感器的平均电流消耗和测量时间。



**Figure 10. 单个传感器的电流消耗和测量时间**

上述每个测量都假设传感器电容会出现 1% 的变化幅度。这个变化幅度虽然很小，但由于机械限制，它在许多系统中并不少见。通过使用更大的 WDT 除法器可增大测量时段，这会导致连续中断的时间间隔延长，特定电容变化的计数也会增加。更多  $\Delta$  计数会为系统带来更高的敏感度和实用性。此高计数  $\Delta$  可通过特定  $\Delta C$  以更长的测量时间和更大的平均电流来实现。

#### 系统电流分配器

- DCO : 在 1MHz 时为  $\sim 85\mu\text{A}$
- Comp\_A+ :  $\sim 45\mu\text{A}$
- CA Vref :  $V_{cc}/(1.5R)$  (对于 100k Rs,  $\sim 20\mu\text{A}$ )

为了发挥应用的最大作用，为应用定义适当的 t\_measure 计数并且最大程度地减小电流消耗至关重要。

- 较大的  $\Delta C$  表示可以使用更小的 t\_measure 时段
- 设计为最低电流所需的最少计数

### 3.2 基于电阻的电容量测量

我们将介绍的第二种方法是使用外部电阻让特定电容传感器充电或放电。通过使用 MSP430 的端口引脚让传感器电容充电或放电，内部 Timer\_A 可用于测量相应的充电或放电时间。假设固定的外部电阻提供了充电/放电路径，则可以测量传感器的电容。图 11 显示了通过 MSP430 实施的仅测量放电的系统。

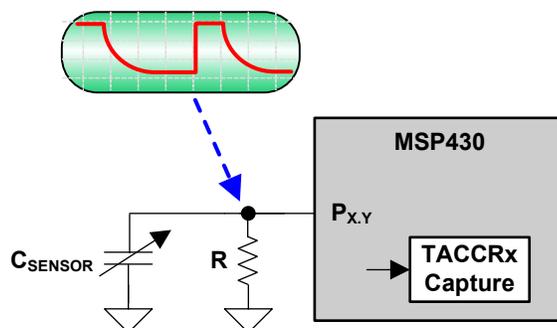


Figure 11. 基本电阻放电电容量测量

具有同样小的  $\sim 10\text{pF}$   $C_{\text{SENSOR}}$ ，很显然  $R$  值需要足够大，这样才能提供可实际测量的任何放电时间。在此实施中，选择使用的  $R$  为  $5.1\text{M}$ ，它可从  $V_{\text{CC}}$  提供将近  $\sim 250\mu\text{s}$  ( $5\tau$ ) 的放电时段。在此配置中， $P_{x,y}$  可设为高输出，以用于为传感器电容充电。它随后可以切换成输入，使  $C_{\text{SENSOR}}$  能够通过  $R$  放电。假设 MSP430 具有  $\pm 50\text{nA}$  的最大端口引脚漏电流，则通过端口引脚结构的少量放电即可完成测量。

如果  $P_{x,y}$  是已启用中断的 GPIO（在所有 MSP430 器件中为  $P1.x$  或  $P2.x$ ），则内部低电平阈值跳闸电压将用作放电参考，超过此阈值时，就会发生中断。在中断过程中，CPU 可使用 Timer\_A 模块的捕捉逻辑为 Timer\_A 寄存器拍摄快照，并存储特定传感器的放电时间。通过使用内部 DCO，计时器能够以高达  $8\text{MHz}$  或  $16\text{MHz}$  的频率计时，具体取决于所使用的 MSP430（ $1xx$ 、 $2xx$  或  $4xx$  器件）。频率越高，特定传感器电容变化的  $\Delta$  计数就越高。图 12 详细说明了使用 Timer\_A 外设的整个测量流程。

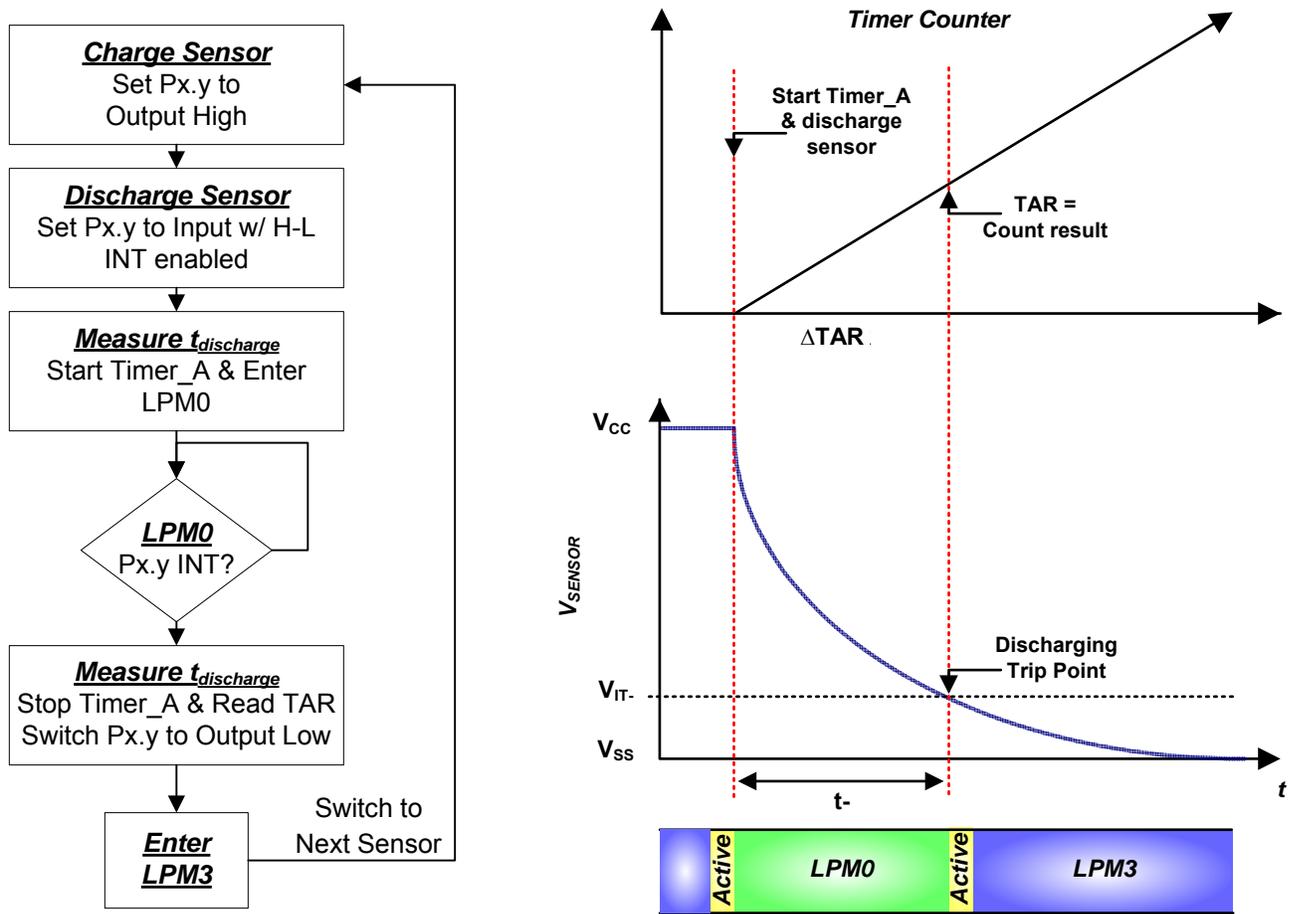


Figure 12. 使用 GPIO 阈值和 Timer\_A 的测量方法

图 12 中的流程图显示了单个测量周期。如果测量中的计时器从零开始，则达到跳闸点后的 TAR 值就是测量的最终计数。此外，计时器可以连续运行，在这种情况下，需要在放电开始和结束时分别采集计时器数据，两点计数的差值就是计数结果。

当传感器电容增大时，放电时间同样会增加，并且测量的计数会随之升高。非触摸式传感器和触摸式传感器之间可实现的计数越多，系统灵敏度就越高。

图 11

中描述的设置显示了系统中每个传感器所使用的单个端口引脚和单个电阻。通过让每对传感器共享一个电阻，可以进一步优化该设置。在测量传感器对中的某个传感器时，连接到另一个传感器的 GPIO

及电阻的另一端可以设为低输出，这样做可以为放电创建接地点。您可以交换这些方向，以便测量传感器对中的第二个传感器。图 13 显示了该配置，它将系统中的电阻计数优化为传感器数量的  $\frac{1}{2}$ ，以实现均衡的传感器计数。

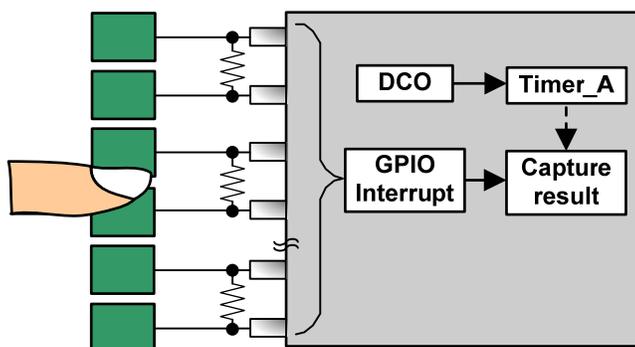


Figure 13. 多传感器充电/放电配置

该配置的另一个好处就是可以双向测量每个传感器：从接地充电到高电平阈值，然后从 Vcc 放电到低电平阈值跳闸点。图 14 显示了此方法。

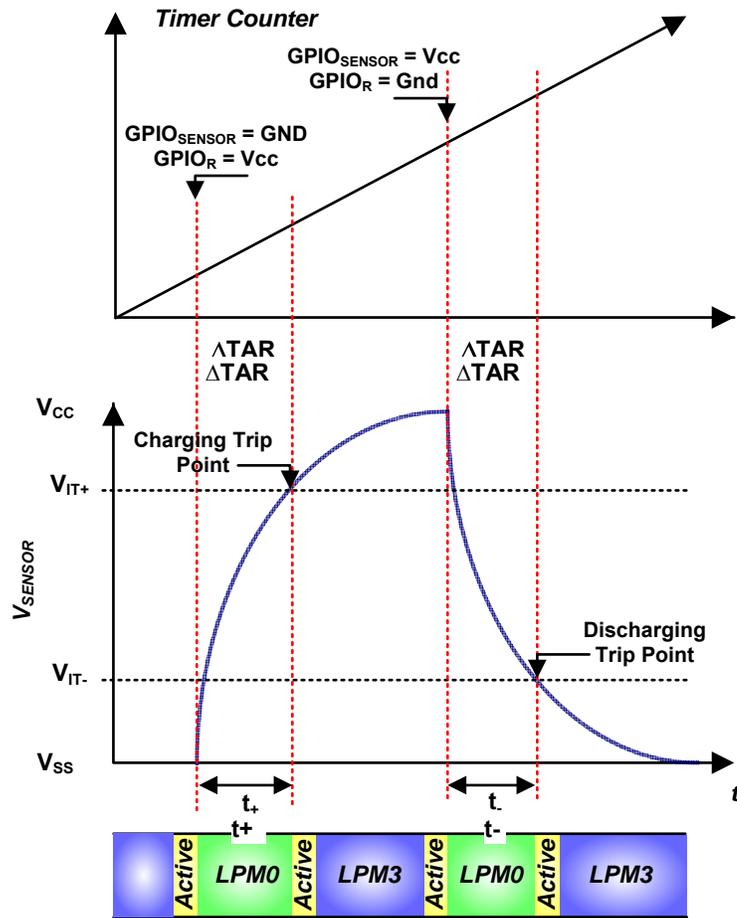
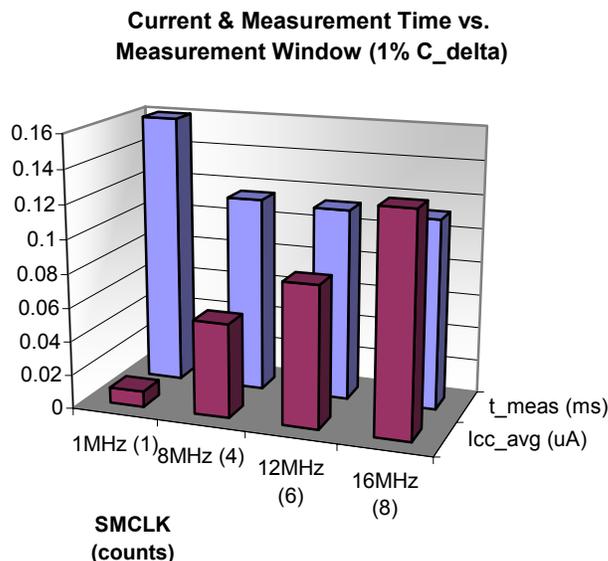


Figure 14. 改善噪声抑制的单测量周期

测量计数为两个结果的组合。您可以对它们进行平均运算或简单求和，绝对结果没有多大价值，而与基准测量结果的差值则有重要研究意义。通过测量充电和放电时段，可以更好地抑制系统噪声（例如 50/60Hz 电源噪声），以防止它对最终结果造成影响。

充电/放电系统的平均电流消耗非常低。对于给定的传感器和 1% 的电容变化，图 15 显示了基于 DCO 频率（用于为 Timer\_A 计时）的单个传感器的平均电流消耗和测量时间。



**Figure 15. 电阻充电/放电 I<sub>CC</sub> 和测量时间：单个传感器**

假设使用 5.1M

电阻和充电/放电组合测量，则可在几分之一毫秒内测量单个传感器。由于测量时间是根据传感器的充电和放电时间设定的，因此所需的实际时间非常少，因为传感器电容非常小。在这种测量方法中，该时段基本上是固定的，需要控制的设计变量是计时器的驱动频率。Timer\_A TAR 所使用的频率越高，特定电容变化的计数结果就越大。在图 15 所示的测量中，使用 1MHz 的频率只能提供 1 个  $\Delta$  计数，这并不适用于按钮测量方法。如果频率为 16MHz，则可实现的  $\Delta$  计数增至 ~8，从而可为触摸式和非触摸式开关检测事件提供测量空间。

随着电容变化幅度的增大，用于系统的最终测量数值也会随之增大。通过减小覆盖层厚度来提高影响程度是一种增加可用  $\Delta$  计数的好方法。

## 4 软件实施

在获得原始的测量结果之后，用户软件必须针对特定应用对数据进行分析。假设测量敏感度不变，电源噪声、测量时钟频移和外部因素（例如 50/60Hz 电源噪声）都会导致嘈杂结果。

通常，忽略结果中的某些 LSB

数值是很好的做法。如果特定触摸事件的已测量计数发生大幅改变，那么此方法的可行性就很高。例如，当您为开关功能执行简单的按键检测时，LSB

噪声通常会被忽略。如果应用要求更高的分辨率（即实施多点滑块），则有必要更为细致地处理数据。通过数据低通滤波并对多次采样进行简单的平均运算，有助于解决此类系统中的位置检测问题。由于系统限制（例如功率预算，尤其是传感器覆盖层的绝缘体厚度）非常严格，提取最终的 LSB 数据就显得更为重要。

### 4.1 跟踪传感器基准电容

无论是实施简单的按钮传感器还是更加复杂的滑块，跟踪每个传感器的基准电容都是任何触摸感应软件算法的关键任务。基准电容是指特定传感器在未受用户触摸时的电容。电压稳定性、PCB 机制、绝缘体特性和环境条件（例如温度以及附近的其它物体）都会对基于 PCB 的电容传感器的基准测量产生影响。

不具备动态能力来跟踪不断变化的基准值，不稳定性可能会导致错误的按键检测或“卡键”现象。假设某个简单的按钮具有预设的开关阈值，但不具有动态基准跟踪功能。在这种情况下，基准结果会出现漂移，它可能会接近有效按键的跳闸阈值。如果基准（非触摸）结果出现漂移，它会达到预设的跳闸点并创建错误的触发器。

图 16

显示了一种用于动态测量和调节（跟踪）基准电容的方法。请记住，必须单独为每个传感器完成这些操作。另外请注意，图中可变“基准”的增大或减小并未完全反映基准电容的相应增大或减小。只需调节算法所使用的变量。对于 RO 和 RC 方法，符号“ $\Delta$ ”计算和“基准”调节是不相同的。（对于 RO，当传感器电容增大时，测量的计数将减小；对于 RC，当传感器电容增大时，测量的计数也会增大。）

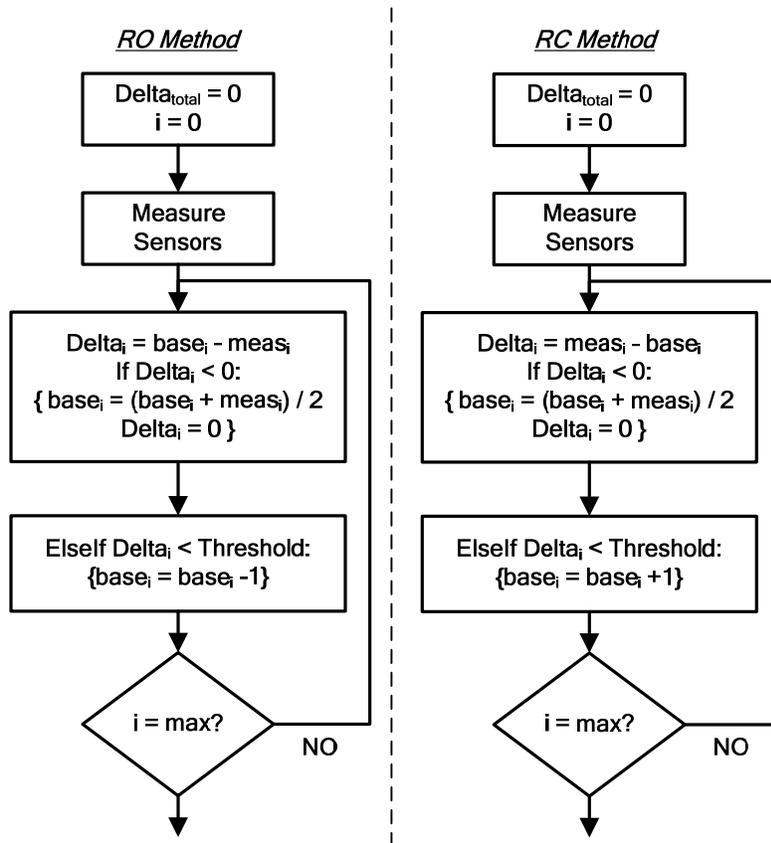


Figure 16. 用于跟踪基准传感器电容的示例算法

完成测量后，首先必须确定是否发生了有效触摸。这可以通过查看阈值来实现，此阈值表示检测到的最小实际触摸值。对于简单的开关按钮，该阈值比开关阈值要小很多。

一旦确定未发生触摸，便可以调节基准值。基准值的调节方式取决于它感应已发生改变的方向。例如，如果传感器的测量结果表明基准电容正在降低，则基准值将自动调小。由于触摸式传感器的电容在增大，不断减小的结果值体现了基准值的实际减小。这可以通过对旧基准值和新测量值进行简单的平均运算来实现，得出的新基准值将用于下一阶段的测量。

如果测量的结果表明基准电容在增大，则建议以更慢的速度对基准值进行跟踪。增大可能表示真实的上升，也可能表示附近的手指即将触摸到所测量的传感器。如果基准值上升过快，则在手指实际触摸传感器时计算出的变化值可能无法体现这次按键行为。如果在非触摸式传感器中检测到电容增大，则只需根据图 16 所示的算法中的单计数来调节基准值。

## 4.2 实施按钮功能

与使用电容触摸感应相比，实施简单的按钮功能相对更为直接。由于简单的开关按钮需要单级检测，因此对触摸事件来说，电容变化的敏感度和幅度都非常低。图 17

以图形方式显示了四键式系统中的测量计数。非触摸式按键提供的计数表示基准电容。第二个触摸式按键提供了更大的  $\Delta$

计数结果，这是由于电容增大导致的。通过在基准值和最大计数结果之间调大或调小阈值，可以提高按键的敏感度。

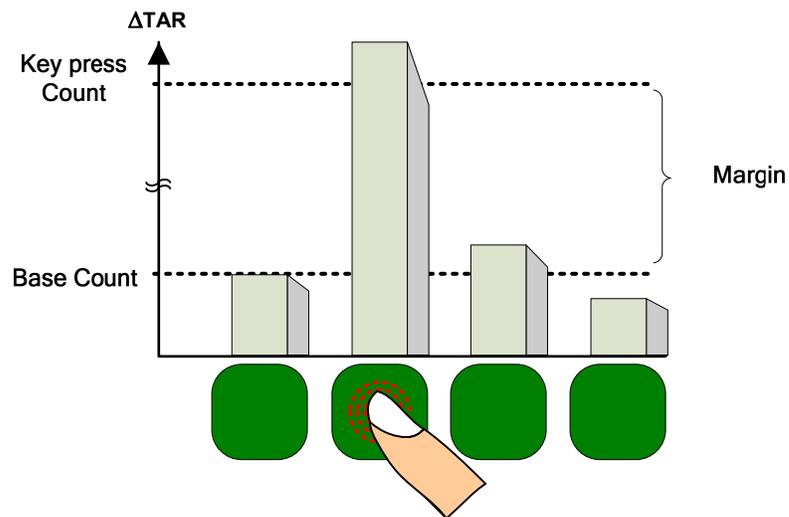


Figure 17. 四键式系统中的按钮

阈值设置点应当高于测量中的任何噪声值，这样才能获取准确可靠的按键结果。

## 4.3 实施滑块功能

为具有开关功能的简单按钮扩展功能，通过使用电容传感器为单个“按钮”实施多个“位置”，可以确定多个阈值。随着更多的电容传感器与用户交互，电容将越来越大。图 18 显示当单点触摸在 4 个传感器元件之间移动时所作出的响应。

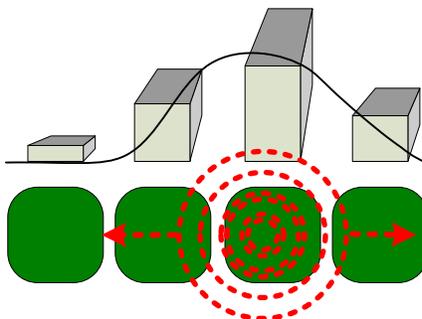


Figure 18. 基本和相邻的传感器响应

通过为每个传感器分配多个位置，可以实现简单的滑块实施。此示例为 4 传感器配置的每个传感器创建了 16 个位置，可提供 64 个单独步阶检测。传感器可以适应的步阶数是传感器对特定触摸事件的敏感度函数，即感应的电容变化量。电容变化幅度越大，测量的  $\Delta$  计数就越大，每个传感器的单独步阶数也就越大。图 19 定义了通过 4 个传感器实施 64 位滑块的简单算法。

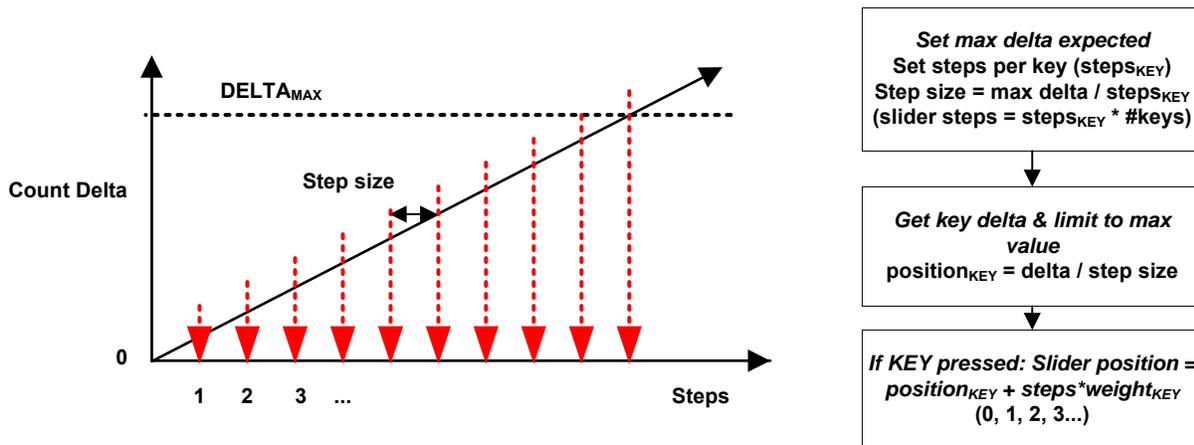


Figure 19. 确定滑块位置的示例方法

此实施仅限制了对于上限值的最大响应，特定系统通常可以达到该上限值。然后，该最大的  $\Delta$  值将除以每个按键所需的步阶数。每个按键经过加权计算后，将产生 1 至 64 步阶（位置“0”被定义为无按键触发）的线性结果。最高有效的触摸式传感器将用于确定位置。表 2 显示了每个按键的相关步阶。

**Table 2. 64 位滑块按键**

<u>传感器</u>	<u>每个传感器的位置</u>	<u>重量因素</u>	<u>最终位置</u>
1	1 至 16 (最小 $\Delta$ 至最大 $\Delta$ )	0	1-16 + 16×0 : 1-16
2	1 至 16 (最小 $\Delta$ 至最大 $\Delta$ )	1	1-16 + 16×1 : 17-32
3	1 至 16 (最小 $\Delta$ 至最大 $\Delta$ )	2	1-16 + 16×2 : 33-48
4	1 至 16 (最小 $\Delta$ 至最大 $\Delta$ )	3	1-16 + 16×3 : 49-64

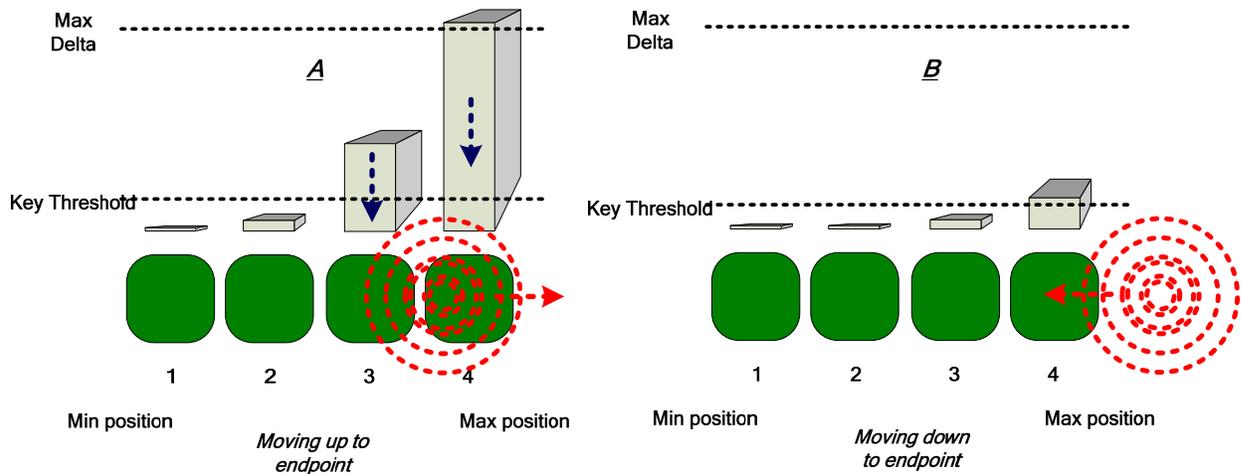
此示例方法的一个缺点是，一旦特定传感器达到最大的  $\Delta$  值，则计算出的位置不会发生改变，除非下一个最高有效的传感器会受到影响。虽然未在本文档的上下文中介绍，但这可以实现强大可靠的实施，根据受影响最大的传感器及其相邻的传感器来内插位置，可提供更多的线性传输特性。

#### 4.4 处理滑块端点

上述示例滑块可确定 4

传感器阵列的位置。位置“0”表示无按键触发，而位置“1”则表示最低的按键触发。它位于滑块的最左端。位置“64”是最大位置，它位于滑块的最右端。

实施的简单算法本身会从传感器的最低端点开始处理有序的位置上升或下降，并遵循从左至右的移动顺序。然而，必须以更为直接的方式管理最大端点。这是因为，一旦触摸超出了最后一个传感器的中心位置，最高有效端的测量结果将从最大  $\Delta$  值减小；如果触摸从同一传感器的最右端开始，则测量结果将从最小值增大。图 20 显示了这两种情形。



**Figure 20. 最大端点的计数测量结果演示**

在图中，A 部分表示触摸可以延伸到并超出所需的最大位置，B 部分则显示从最大位置开始的触摸。在这两种情况下，必须正确评估该影响，并相应地计算预期位置。

在此 64 位滑块示例中，超出最大位置的从左至右的触摸将导致结束键的测量响应降低，除非不再触摸该按键（即  $\Delta$  测量结果为“0”）。在不执行任何特殊处理的情况下，它将从位置 64 逐渐降到 49，最后到 0，即使触摸并非按下降方向移动。

同样，从最右边的位置开始，从右至左移动触摸将导致结束键的测量响应上升，除非达到最大影响（即产生最大的  $\Delta$  测量结果）。在不执行任何特殊处理的情况下，它将从 0 瞬间变为 49，然后逐渐升高至 64，即使触摸是从滑块的物理端开始。

图 21 中定义的算法可管理这两种情形。如果出现如图 20 所示的情形 A，通过监控计算出的最后一个位置和倒数第二个传感器（在此示例中为第三个传感器），可以检测到它的发生。如果确定第三个传感器的影响力在降低并且前一位置是最大位置（即 64），则计算出的新位置将保持在 64，即使最后一个传感器的实际测量结果在减小。

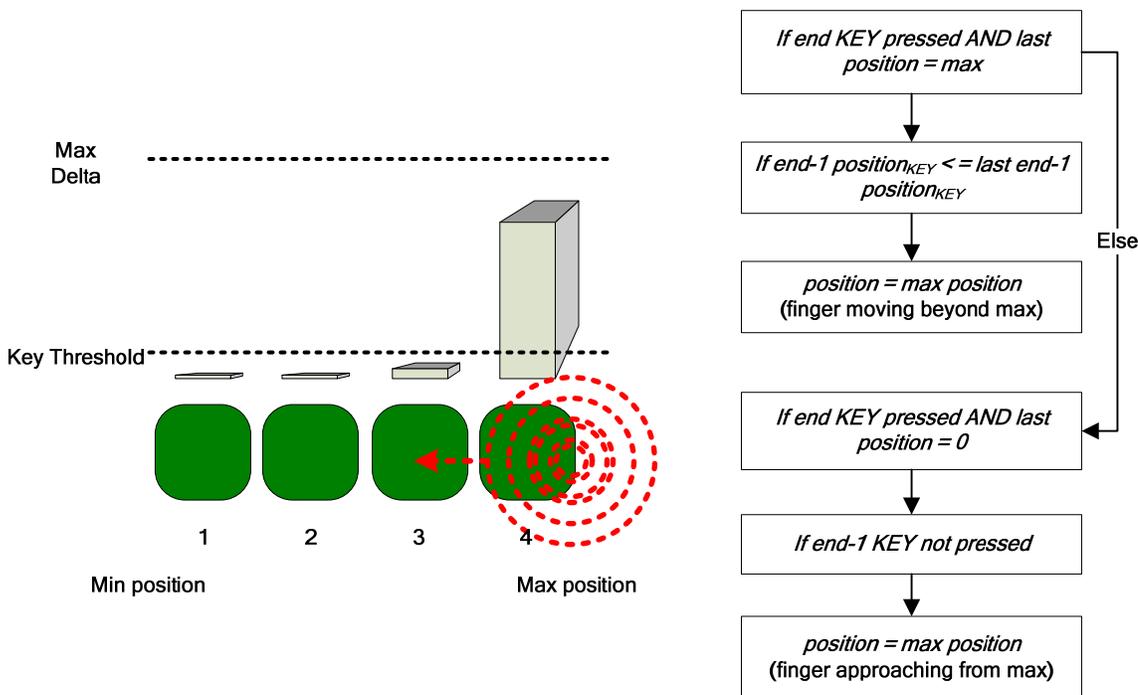


Figure 21. 示例滑块端点处理

如果出现情形

B, 通过确定触摸是从最右边的按键开始并且其左边的下一个按键无任何响应, 可以检测到它的发生。您可以这样理解, 从最右边的传感器开始并且从右至左移动触摸将导致位置瞬间定位在最大位置 64。

#### 4.5 滑块的传感器多路复用

在实施滑块时, 通常可以扩展所使用的传感器数量, 使它超过可用于测量的实际 MSP430 引脚数。通过将多个传感器连接到一个特定的测量引脚, 可以实现这一点。对于测量, 附加传感器就像一个更大的基准电容, 它不会影响系统的功能。然而, 由于基准电容增大并且两个传感器中每次只有一个传感器受到影响, 并联传感器的响应将降低。我们认为, 以并联方式连接的传感器的实际数量应限制为 2。

在测量传感器对方面，MSP430 无法将两个传感器区分开来，并且“看到”它们具有相同的结果，不管用户实际触摸的是哪个传感器。为了将此类设置应用到滑块实施，假设机械设计使滑块上的任何位置都能影响多个传感器。如果能实现这一点，并且对于传感器组合，多个受影响的传感器的联合响应方式对滑块上的任何位置来说都是唯一的，那么滑块和位置的可用性就能提高。图 22 显示了 6 对 12 的配对和每 6 对的位置。通过对用于确定滑块触摸位置的图表进行分析，可在整个传感器组中建立独特响应。通过采用适用于此独特响应检测的内插算法，传感器数量可以超出特定器件的实际引脚数。

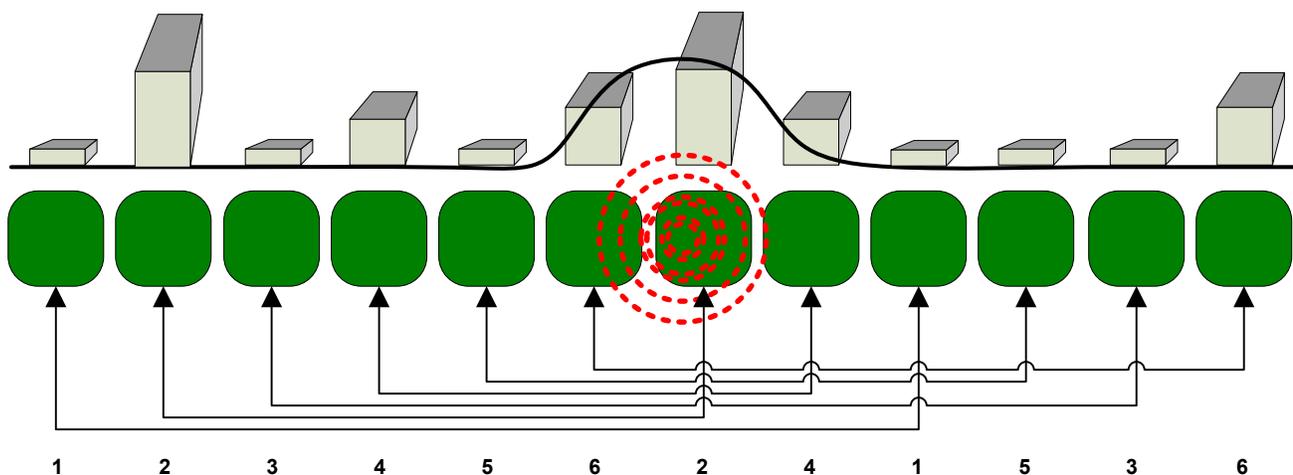


Figure 22. 12 个电容传感器元件的示例传感器多路复用

## 5 概要

我们讨论了两种在 MSP430

上实施单触式电容感应的方法。虽然每种方法各有其优缺点，但**这些方法都可用于在机械组装和硬件/软件为立足点的适用测量中实现最佳解决方案。**

归纳起来，**每种方法的主要注意事项为：**

- **MSP430 RO 方法**
  - 仅适用于 Comp\_A+ 器件
  - 独立传感器数量受可用的 CA+ MUX 输入限制
  - 需要外部电阻（每个传感器各一个）和参考阶梯（三个附加电阻）
  - 敏感度受电流消耗限制（可编程测量时间）
- **MSP430 RC 方法**
  - 可在任何 MSP430 上实施
  - 多达 16 个独立传感器（16 个可中断 GPIO）
  - 每两个传感器共用一个外部电阻
  - 敏感度受片上最大时钟频率限制（固定测量时间）
  - 最低功耗实施

从根本上说，电容的实际测量其实非常简单；然而，传感器和触摸界面的机械组装以及用于确定触摸性质的软件算法却为终端设备的实施带来了重大挑战。虽然本应用报告的内容并非万能解决方案，但它创建了应用基础和方法，您可以对它们进行扩展和自定义，以满足特定产品的要求。

## 6 参考资料

**特别感谢 TI 员工 Vincent Chan 和 Steve Underwood 对此应用开发做出的重大贡献。**

1. “Capacitive Keyswitch Sensor and Method”，作者 Robert E Marin 和 Roger K Simonson，美国专利 #3931610，1976
2. MSP430x2xx 系列用户指南 (SLAU144)
3. MSP430F20xx 数据表 (SLAS491)
4. MSP430FG4618/F2013 实验板和软件 <http://focus.ti.com.cn/cn/docs/toolsw/folders/print/msp-exp430fq4618.html>
5. MSP430 USB 记忆棒开发工具 <http://focus.ti.com.cn/cn/docs/toolsw/folders/print/ez430-f2013.html>



## Appendix A. 灵活的评估和演示硬件

此部分是对基于 MSP430

的单触式电容感应系统的硬件说明，本文档的前面部分已对该用于测试/测量的系统进行了介绍。

该硬件在单平台上实施振荡器和 RC 方法，仅用于评估目的

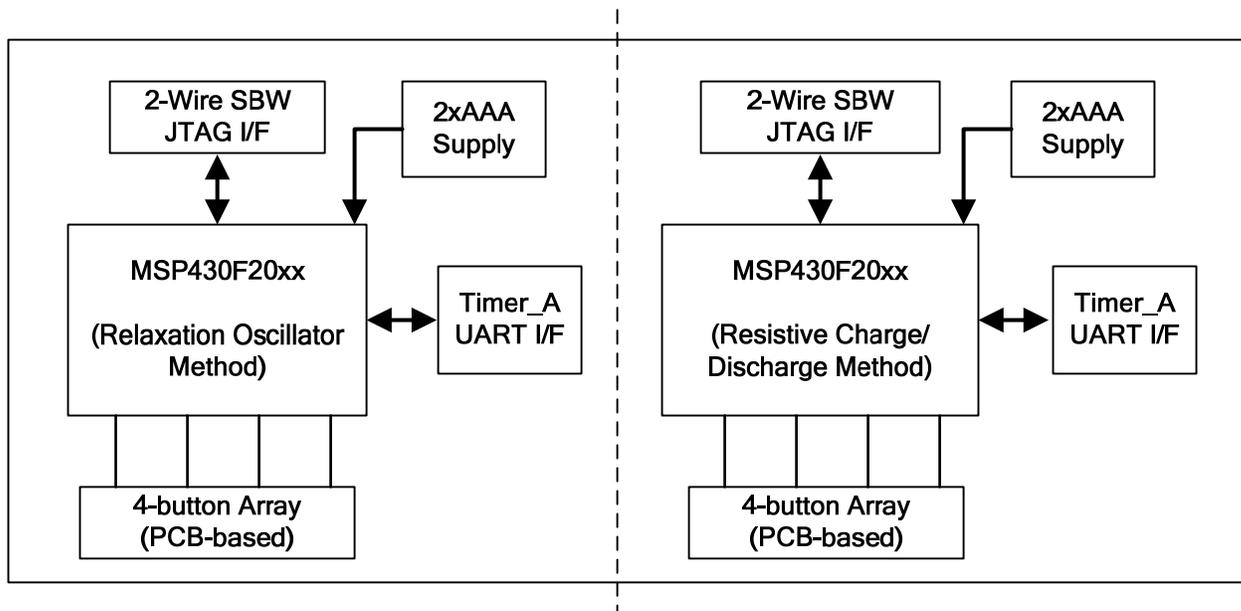


Figure 23. 灵活的四键式 RO/RC 系统方框图

我们介绍的两种电容传感器测量都可以通过此硬件来实现。但是，每种方法的实施都是相互独立的，因此需要从单个 PCB 将这两个实例分开。除了触摸感应界面以外，每种实施还提供了专用的 2xAAA 电池电源、用于访问每个 MSP430 MCU 的 14 引脚 JTAG 插头以及可与 Timer\_A 引脚相连的硬件接口。Timer\_A 连接允许与基于 PC 的应用进行电路板通信，例如，提供一种通过标准 UART 进行数据传输和控制的方法。（Timer\_A UART 的具体实施细节可以在其它相关的 MSP430 应用手册中找到。）

您可以在与本应用手册相关的 .zip 存档中找到相应的硬件和软件资料，并且可从 <http://focus.ti.com.cn/cn/mcu/docs/mcuprooverview.tsp?sectionId=95&tabId=140&familyId=342> 下载。

## Appendix B. 简单的演示硬件

此部分是对使用 MSP430 的简单四键单触式感应系统的硬件和软件说明。该系统仅采用基于 RC 的测量方法，并且专为与 EZ430 开发工具配合使用而设计。

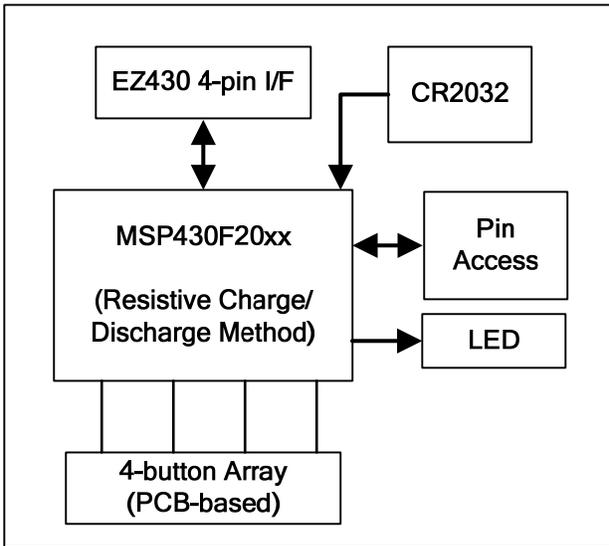


Figure 24. 简单的四键式 RC 系统方框图和图像

有关 EZ430 开发工具的信息，请访问 <http://focus.ti.com.cn/cn/docs/toolsw/folders/print/ez430-f2013.html>

您可以在与本应用手册相关的 .zip 存档中找到相应的硬件和软件资料，并且可从 <http://focus.ti.com.cn/cn/mcu/docs/mcuprooverview.tsp?sectionId=95&tabId=140&familyId=342> 下载。

## 重要声明

德州仪器 (TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合 TI 标准保修的适用规范。仅在 TI 保修的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的数据手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售 TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关 TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

可访问以下 URL 地址以获取有关其它 TI 产品和应用解决方案的信息:

### 产品

放大器	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">http://www.ti.com.cn/amplifiers</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">http://www.ti.com.cn/dataconverters</a>
DSP	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">http://www.ti.com.cn/dsp</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">http://www.ti.com.cn/interface</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">http://www.ti.com.cn/logic</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">http://www.ti.com.cn/power</a>
微控制器	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">http://www.ti.com.cn/microcontrollers</a>

### 应用

音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">http://www.ti.com.cn/audio</a>
汽车	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">http://www.ti.com.cn/automotive</a>
宽带	<a href="http://www.ti.com.cn/broadband">http://www.ti.com.cn/broadband</a>
数字控制	<a href="http://www.ti.com.cn/control">http://www.ti.com.cn/control</a>
光纤网络	<a href="http://www.ti.com.cn/opticalnetwork">http://www.ti.com.cn/opticalnetwork</a>
安全	<a href="http://www.ti.com.cn/security">http://www.ti.com.cn/security</a>
电话	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">http://www.ti.com.cn/telecom</a>
视频与成像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">http://www.ti.com.cn/video</a>
无线	<a href="http://www.ti.com.cn/wireless">http://www.ti.com.cn/wireless</a>

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated