



## 電容式感測技術與設計考量因素

資深產品經理 Ryan Seguine.

作為使用者輸入媒介的電容式感測已不再是特定產品採用的陪襯技術，而是已發展成一種成熟的技術，可應用在數千種產品上，目前使用數量已累積至數百萬個。當研發業者、模組製造商以及半導體業者，努力在快速成長的市場中搶攻市佔率的同時，電容式感測技術進展顯著，並持續技術演化腳步。此種發展趨勢的核心就是感測方法，感測到的電容轉換成數位化的數據，可進一步處理、操作、與轉譯。電荷轉移、連續近似法、Sigma-Delta、互容值量測等，都是最常用的感測方法。以下我們將逐一介紹。

### 問題

要感測10pF至100pF的電容變化並不困難。要感測出10.0pF與10.5pF之間的電容變化雖非易事，但也不會造成嚴重的挑戰。然而，要感測從10.00pF到10.05pF的電容變化，所面臨的挑戰就相當高，尤其是在環境條件不斷改變、系統層級的電磁干擾、以及量測控制電路變異的情況下。若再考量功耗、反應時間、以及可用性等問題，挑戰就更顯嚴苛。

電容式感測應用的量測元件是指感測器墊片(導電材料區域)與週圍導電材料之間的電容器，通常是一個有一定密度與距離的接地填充層。感測器的電容值計算公式如下：

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

其中的A

是整個感測器與相關路由的完整區域，d是感測器/路由與週圍導體之間的距離。當有導電物體(像是手指)移至感測器附近時，它們會改變電容式感測器的電場線，並改變控制電路所量測到的電容值。

### 電荷轉移

電荷轉移是一種電容式感測類別，運用電荷放大與過濾的方法，來量測一個感測器周圍的所有電荷。產生的波型經由參考時序與過濾的平均值，再轉換成一個具代表性的電容值。

電荷轉移不是電容式感測的專屬名詞。它指的是電荷透過一連串的电閘轉移至另一處。MEMS微機電系統也使用相同的技巧進行量測。電容式感測中的電荷轉移，使用一個電閘電容器網路把電荷儲存在至一個積分電容器。系統再量測出積分電容的電動勢，和參考電壓進行比對，或利用一個類比至數位轉換器來讀取。

在前兩個非重疊階段，感測電容器連結至電壓源，並將電荷累積至感測電容器。在第二階段，儲存在感測電容器內的電荷被釋放至較大的積分電容器。這個程序會重複數次，進而提高積分電容器的電壓。之後，每個階段轉移至積分電容的電荷量，以指數比率快速減少。感測電路的結構其實很簡單，可讓積分電容器的電壓和一個固定式參考電壓作比較。

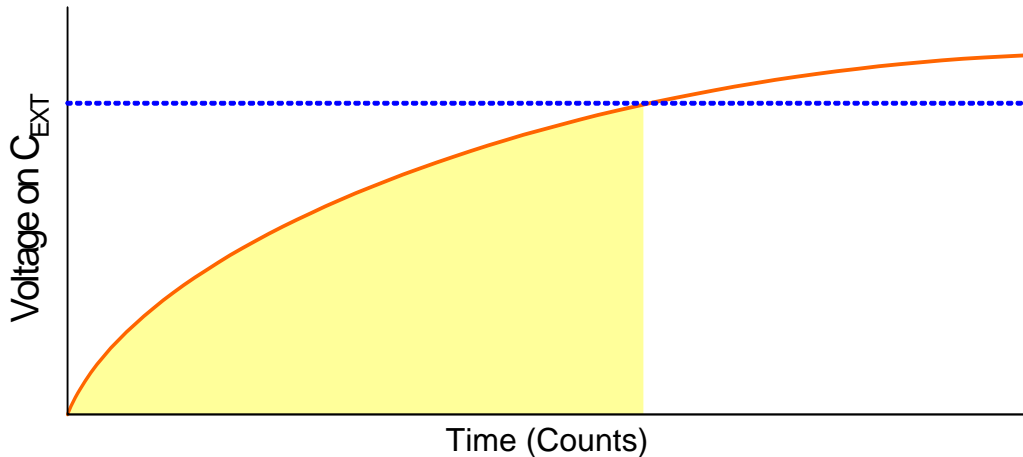


圖1

### 和固定電閘電容器電壓進行整合的電荷

在達到參考電壓時，系統會量測達到此電壓的時間或轉換步驟的次數(如圖1)。輸出結果和感測電容器的尺寸成反比。感測電容器的電荷越大，積分電路就越快，且只需較少的切換步驟，就能達到臨界電壓。

另一種方法，是以一個類比對數位轉換器來取代比較器。在這項結構中，從感測電容器傳出的電荷，會經過先前所述的步驟週期，送至積分電容器。在完成這些步驟周期後，再量測積分電容器的電壓，ADC的輸出值會和感測電容器的尺寸成一定的比例。

這種感測方法相當強固，且其訊噪比相對來說比較高。但在現有的電容式感測IC中建置電荷轉移器，會衍生許多缺點。現今市面上大多數電容式感測元件並不包含多工電路。缺少這類電路意謂著需要額外的針腳、電阻器、和電容器，來支援感測功能，以及針對每個感測器元件來調校靈敏度。參考電壓必須配合外部元件(電阻器)來產生。此外，現有的電荷轉移元件需要高品質的專屬電壓調節器，以確保輸出無雜訊的電壓，讓電閘電容器能在無雜訊且無錯誤的環境下運作。

### Sigma-Delta 調變

Sigma-Delta 調變也使用一個電閘電容器網路來對一個大型“匯流排調整”電容器進行充電。然而，在這個拓撲中，外部電容器不會從一個初始電壓充電到參考電壓。外部電容器的電壓反而會進行調變，並配合充電與放電步驟的參考電壓。根據比較器的位元流密度，來比較這些步驟的時間長度。若密度夠高，感測器就會讀出“on”的資訊。

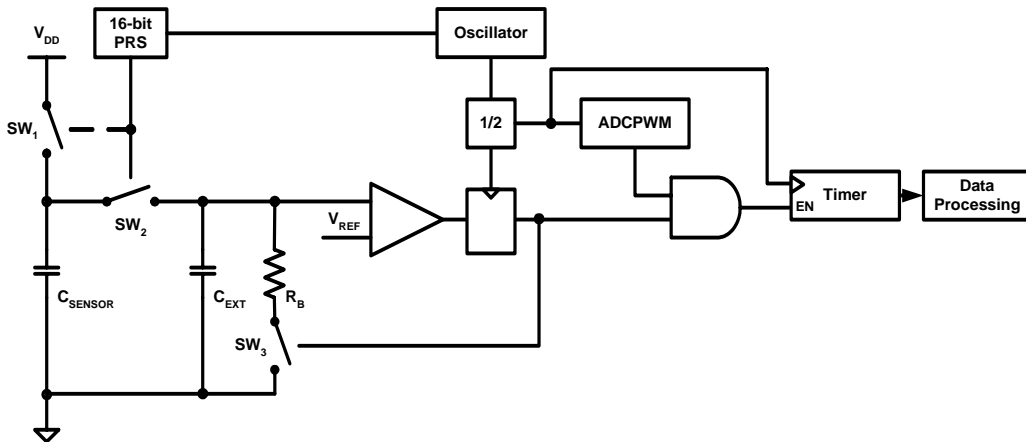


圖2. CSD 模塊圖表

感測電容器作為一個電開電容與類比輸入端的等效電阻，這個輸入端通常會透過一個內部電路來連結至一個大型外部電容器。當外部電容器的電荷增加時，電壓也會跟著提高。這個電壓也是比較器其中一個輸入值。當比較器的輸入值達到臨界電壓時，一個放電電路(接地的電阻器)就會連結，外部電容器的電荷就會釋出，其速度取決於電容器的啟始電壓以及泄放電阻值。當外部電容器的電壓下降時，會再度超過臨界電壓，接地電阻器就會切斷連結。外部電容器的電壓再次提高，整個程序就會再重複。(如圖2)

外部電容器的充電/放電週期可以比較器輸出端的位元流呈現。這個位元流是 'ANDed'，含有一個脈衝寬度調變器，搭配一個計時器。計時器的輸出端是用來處理電容變化，並判斷感測器的啟用狀態。

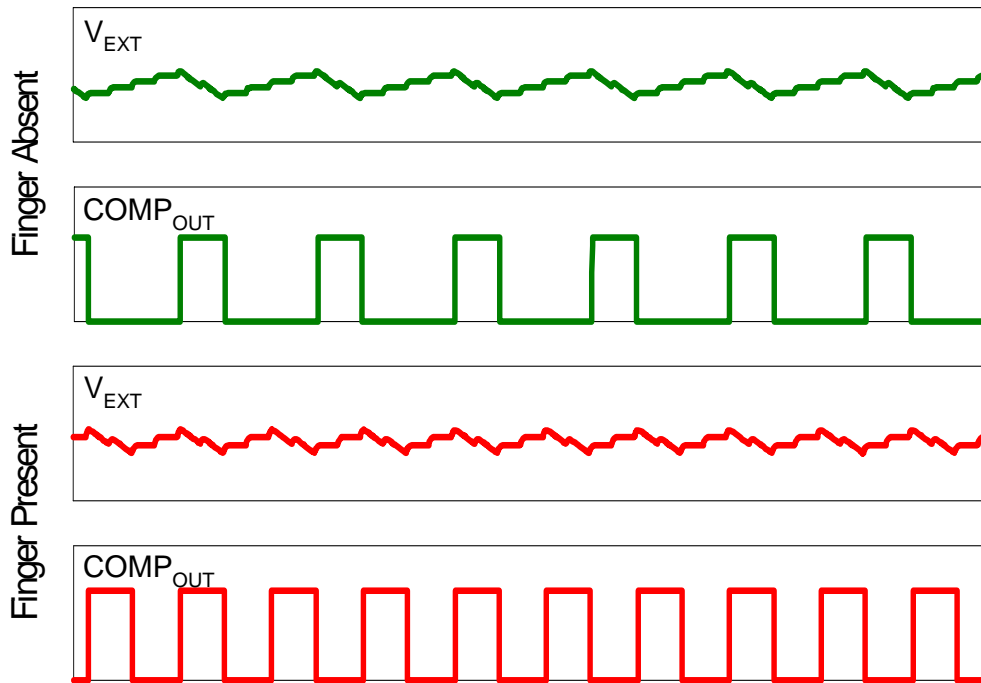


圖3. 比較器的輸入/輸出波型

這個Sigma-Delta調變感測方法的一項附加利益，是電閘電容器網路的偽隨機控制機制。偽隨機序列產生器(PRS)而不是一個固定頻率的時脈可用來為電閘電容器網路提供時脈；如此一來，減少了電容式感測電路的電磁干擾與電磁輻射，尤其適合支援汽車、家電產品、以及工業應用等。PRS會增加掃描獨立式感測器所需的時間，限制其在高速應用的實用性。

外部匯流排調整電容器的尺寸，可適當調整，以改善量測電路的抗雜訊能力。事實上，在某些情況下並不需要外部電容器，但若匯流排電容夠低，輸入的阻抗又夠高，電路就可能面臨電磁干擾影響正常運作的情況。雖然較大的電容值能改善覆蓋雜訊效能，但卻也會限制靈敏度，或讓掃描時間過長，以致外部電容器的尺寸過大。

### 連續近似法與單斜率ADC

運用連續近似法以及一個單斜率ADC的電容式感測元件，採用和先前所述的兩種感測方法相類似的電閘電容器網路。一個電流DAC (iDAC) 搭配外部電容器連結至匯流排，電閘電容器網路連結至外部電容器與比較器輸入端，並進行充電至臨界電壓。對外部電容器充電至臨界電壓所需的時間進行量測，並將其結果與儲存值進行比對，以研判感測器的啟動狀態與層級。(如圖3)

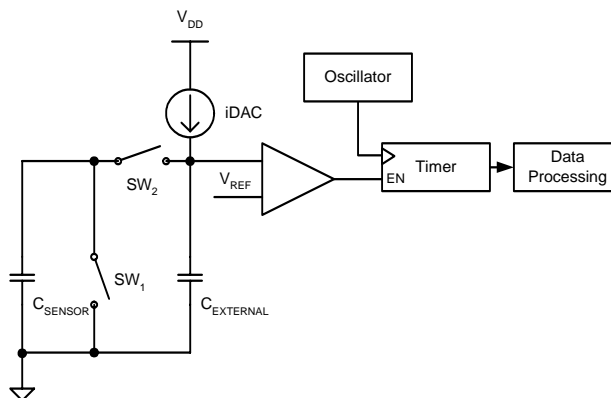


圖4. CSA模塊圖表

當電閘電容的等效電阻對外部電容器放電至接地時，連續近似法是用來研判正確的iDAC值，以維持外部電容器的電壓(如圖4)。這個數值會被儲存，並用作為對單斜率ADC充電的參考。電閘電容器電路作為對匯流排充電的iDAC(第一階段)。其結果就是單斜率ADC的起始電壓取決於電閘電容器電路中感測電容器的尺寸。

$$V_{start} = \frac{1}{f \cdot C_x} \cdot iDAC$$

電閘電容器之後切斷與匯流排的連結，而外部電容器從 $V_{start}$ (第二階段)進行充電。較低的起始電壓會產生較長的充電時間，因為iDAC的相同電流輸送至外部電容器時，同時提高了電壓。(如圖5)

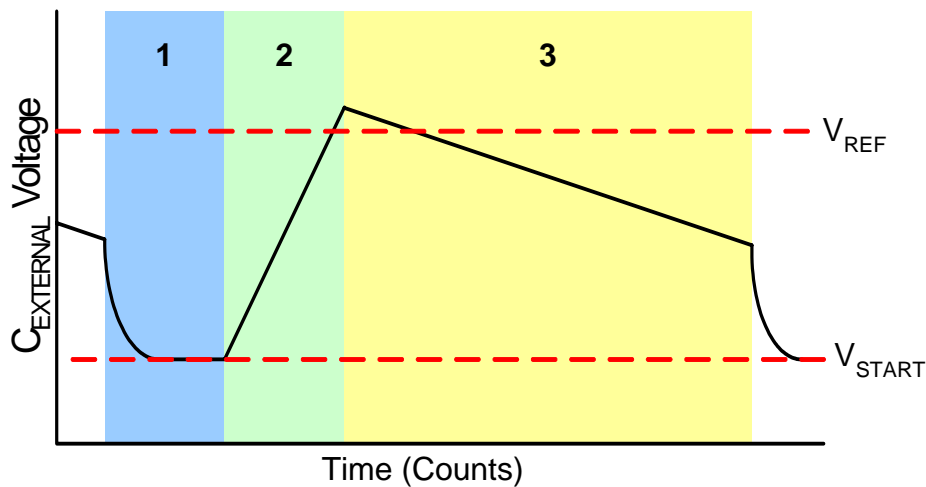


圖5. 充電圖

外部電容器的電壓之後透過一個低通濾波器而降低，並與電容器網路串接，並連結至比較器的輸入端。控制電路利用這段時間處理資料，並根據電容輸入值來做決策。在第三階段，則針對單次掃瞄至儲存值的次數進行計算。若變更幅度夠大，則可啟動感測器。

連續近似感測方法能以最少數量的外部元件，建構出可用的電路；大多數應用採用單一電容，不一定和應用的需求有直接關聯。匯流排的內部電容，和比較器、iDAC、以及感測電容器相連結，可能足以達到所需的抗雜訊能力。此外，連續近似感測法不會受到電源暫態效應所影響，因為電容電容器是一個等效接地電阻器，而iDAC是來自於內部參考源，而不是直接以 $V_{DD}$ 連結。用來建置連續近似法的元件，受到外部電容式感測功能的限制。因此，它們雖以針對電容式感測進行最佳化，但也只能執行一些像是LED控制等的基本數位功能。連續近似法現已普及至更多通用型元件，以及搭載更多程式記憶體、類比與數位功能、以及更高的I/O數的元件。

### 補償

任何電容式感測方案建置都必須解決系統層級變數，以及因溫度、溼度、靜電放電(ESD)與其他因素所產生的干擾問題。像是溫度與溼度等因素的改變，對於系統逐漸產生效應，且必須持續追蹤，以確保溫度與系統電容的改變對控制電路效能的影響，均納入考量範圍。由於材料會隨著溫度的上升而膨脹，電容計算公式中的A與d都會增加。此外，感測覆蓋與基板的介電常數都會隨著溫度而改變。如先前所述，這類改變是逐漸的。在許多狀況下，系統溫度要經過數分鐘才會改變一度。在先前所述的所有感測方法中，數分鐘等於經過數千次的掃瞄。這讓控制電路能在極短時間內做出反應，讓使用者或主控制器察覺不出來。

像是靜電放電等事件，會對電容式感測系統產生較大的影響，但時間卻相當短暫。若妥善設計元件硬體，並經過專門設計用來辨識靜電放電這種特殊且重複事件之偵測演算法，這些影響可在幾次掃瞄後就會消失且可被忽略。

像Cypress可程式系統單晶片(PSoC®)這樣的元件，讓研發業者能控制大多數的補償參數，在系統因應環境變遷，以及產品可用性需求間，取得理想的平衡點。

**電容式感測技術持續演進，以上介紹的感測方法還有非常大的發展空間。許多新的設計理念不斷地被進行測試，而研發業者亦致力降低功耗、提高靈敏度、縮短掃瞄時間、以應付日趨嚴苛的環境。**



## References

Cypress Semiconductor  
198 Champion Court  
San Jose, CA 95134-1709  
Phone: 408-943-2600  
Fax: 408-943-4730  
<http://www.cypress.com>

© Cypress Semiconductor Corporation, 2007. The information contained herein is subject to change without notice. Cypress Semiconductor Corporation assumes no responsibility for the use of any circuitry other than circuitry embodied in a Cypress product. Nor does it convey or imply any license under patent or other rights. Cypress products are not warranted nor intended to be used for medical, life support, life saving, critical control or safety applications, unless pursuant to an express written agreement with Cypress. Furthermore, Cypress does not authorize its products for use as critical components in life-support systems where a malfunction or failure may reasonably be expected to result in significant injury to the user. The inclusion of Cypress products in life-support systems application implies that the manufacturer assumes all risk of such use and in doing so indemnifies Cypress against all charges.

PSoC Designer™, Programmable System-on-Chip™, and PSoC Express™ are trademarks and PSoC® is a registered trademark of Cypress Semiconductor Corp. All other trademarks or registered trademarks referenced herein are property of the respective corporations.

This Source Code (software and/or firmware) is owned by Cypress Semiconductor Corporation (Cypress) and is protected by and subject to worldwide patent protection (United States and foreign), United States copyright laws and international treaty provisions. Cypress hereby grants to licensee a personal, non-exclusive, non-transferable license to copy, use, modify, create derivative works of, and compile the Cypress Source Code and derivative works for the sole purpose of creating custom software and or firmware in support of licensee product to be used only in conjunction with a Cypress integrated circuit as specified in the applicable agreement. Any reproduction, modification, translation, compilation, or representation of this Source Code except as specified above is prohibited without the express written permission of Cypress.

Disclaimer: CYPRESS MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, WITH REGARD TO THIS MATERIAL, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Cypress reserves the right to make changes without further notice to the materials described herein. Cypress does not assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit described herein. Cypress does not authorize its products for use as critical components in life-support systems where a malfunction or failure may reasonably be expected to result in significant injury to the user. The inclusion of Cypress' product in a life-support systems application implies that the manufacturer assumes all risk of such use and in doing so indemnifies Cypress against all charges.

Use may be limited by and subject to the applicable Cypress software license agreement.