

# 電容位移感測器應用

振聯科技 / 凌強

## 一、電容感測器測量原理

非接觸式電容位移感測器是基於理想平板電容原理設計研發的，被測物體與感測器各自作為一個平板電極。給感測器一個持續穩定的交流電，交流電壓的振幅變化與電容到被測物體之間的距離成正比。交流電經過調解，可以輸出為類比量信號。如圖 1 電容感測器構造示意圖。

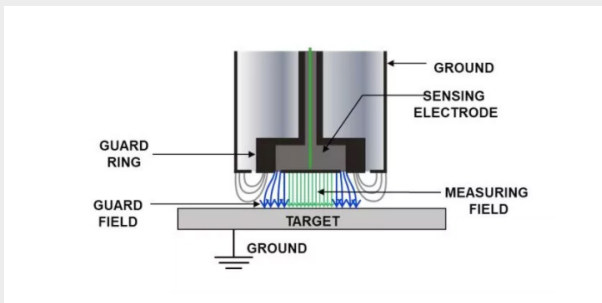


圖 1. 電容感測器構造示意圖

電容器是具有“容量”存儲電荷的元件，由不接觸或相互連接的導電平行板組成。這些金屬板通過空氣或一層絕緣材料（即電介質）進行電氣隔離。美國 MTI 公司基於平行板電容器測量原理，使用電容探頭作為其中一個極板，將接地目標作為另一個極板。探頭和目標之間形成的電容隨著這兩個表面之間的距離（間隙）而變化。放大器將間隙的電容轉換為與間隙成正比的電壓輸出，即  $C=A\epsilon/D$ 。如圖 2，其中  $C$  為電容， $\epsilon$  為間隙介質的介電常

數，通常為空氣， $D$  為探頭與接地目標物體之間的距離， $A$  為探頭感測區域面積。在典型的電容感測器測試系統中，電容探頭作為一個極板，而被測物充當另一個極板，而間隙內的材料介電常數與探頭的面積保持恒定，因此引起電容變化的唯一變數是探頭到目標物的距離。MTI 的電容測試系統可以將這種變化的電容轉換成與探頭間隙成比例的線性電壓，因間隙變化所引起的電壓變化量稱為電容感測器的靈敏度。

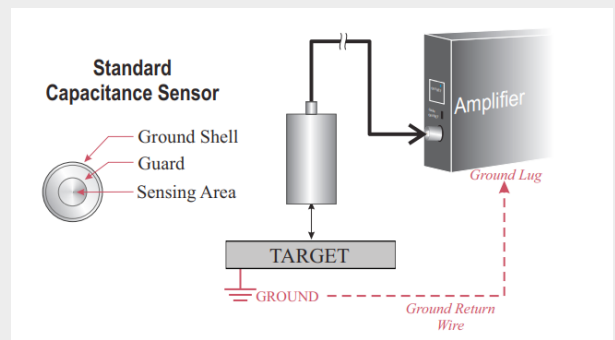
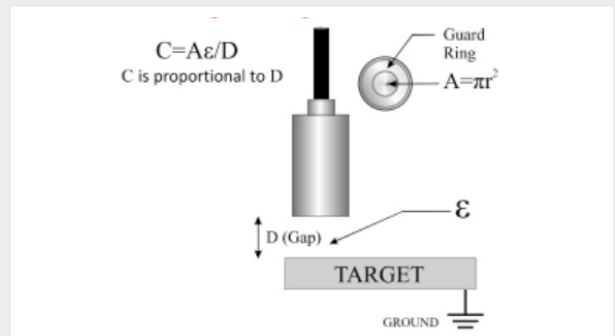


圖 2. 電容感測器原理圖

## 二、MTI 電容感測器系統介紹

### (一)、電容感測器探頭外觀

電容感測器為非接觸式測量位移或振動，具有量程小，頻響快等特點。根據不同的應用環境及安裝要求，MTI 提供多種探頭供選擇，依據不同的安裝要求可以選擇不同的探頭長度和後端導線的出線方式，如圖 3。

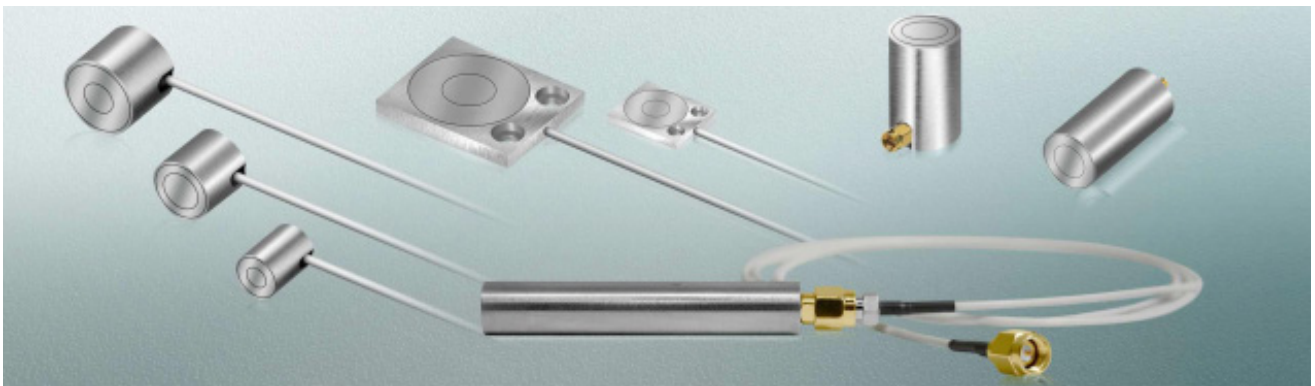
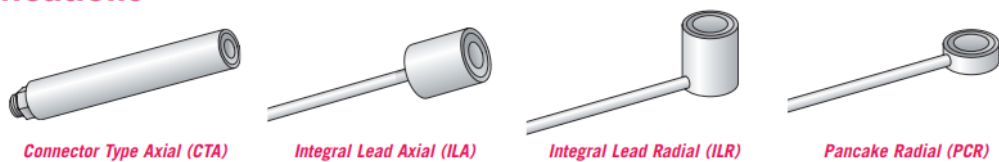


圖 3. 電容傳感器外形圖

### (二)、部分探頭尺寸和量程

如圖 4，最大量程可以達到 12.5mm，使用溫度範圍高溫可到 650°C，低溫可到 -269°C，另外還可在 2T 的強磁場下工作。

## Specifications



### Standard Accumeasure Probes

Range Mils (μm)	Sensing Electrode Diameter in (mm)	Model Number	Length Inches (cm)	Diameter Inches (mm)	Model Number	Length Inches (cm)	Diameter Inches (mm)
1 (25)	0.042 (1.07)	ASP-1-CTA	2.50 (6.35)	0.250 (6.35)	ASP-1-ILA	0.375 (0.95)	0.093 (2.36)
2 (50)	0.060 (1.52)	ASP-2-CTA	2.50 (6.35)	0.250 (6.35)	ASP-2-ILA	0.375 (0.95)	0.112 (2.85)
5 (125)	0.097 (2.46)	ASP-5-CTA	2.50 (6.35)	0.250 (6.35)	ASP-5-ILA	0.375 (0.95)	0.156 (3.96)
10 (250)	0.138 (3.50)	ASP-10-CTA	2.50 (6.35)	0.250 (6.35)	ASP-10-ILA	0.375 (0.95)	0.219 (5.56)
20 (500)	0.197 (5.00)	ASP-20-CTA	2.50 (6.35)	0.437 (11.09)	ASP-20-ILA	0.375 (0.95)	0.312 (7.92)
50 (1250)	0.313 (7.95)	ASP-50-CTA	2.50 (6.35)	0.625 (15.87)	ASP-50-ILA	0.375 (0.95)	0.546 (13.87)
1 (25)	0.042 (1.07)	ASP-1-ILR	0.375 (0.95)	0.093 (2.36)	ASP-1-PCR	0.100 (0.254)	0.093 (2.36)
2 (50)	0.060 (1.52)	ASP-2-ILR	0.375 (0.95)	0.112 (2.85)	ASP-2-PCR	0.100 (0.254)	0.112 (2.85)
5 (125)	0.097 (2.46)	ASP-5-ILR	0.375 (0.95)	0.156 (3.96)	ASP-5-PCR	0.100 (0.254)	0.156 (3.96)
10 (250)	0.138 (3.50)	ASP-10-ILR	0.375 (0.95)	0.219 (5.56)	ASP-10-PCR	0.100 (0.254)	0.219 (5.56)
20 (500)	0.197 (5.00)	ASP-20-ILR	0.375 (0.95)	0.312 (7.92)	ASP-20-PCR	0.100 (0.254)	0.312 (7.92)
50 (1250)	0.313 (7.95)	ASP-50-ILR	0.375 (0.95)	0.546 (13.87)	ASP-50-PCR	0.100 (0.254)	0.546 (13.87)

圖 4. 電容傳感器種類

### (三)、電容感測器控制器

電容探頭必須配備控制器使用，控制器分為類比式和數位式，如圖 5。模擬放大器輸出為直流電壓 0-10V，根據測試要求選擇濾波器範圍，最大值為 5KHZ. 單台設備測量通道可以達到 6 通道。



圖 5. 電容傳感器放大器

1. 數位式控制器可用 USB 或網路介面連接電腦。
2. 自帶軟體可以顯示位移曲線圖及資料保存。
3. 通過軟體設置可以對感測器量程進行擴大，最大可以達到 9 倍。
4. 濾波器可以根據測試要求進行選擇，範圍為 0.1HZ~5KHZ。
5. 採樣頻率最大可達 20KHZ。
6. 24bit AD 轉換。
7. 可使用多種語言進行程式設計含 Labview, C+, C++。
8. 可選擇 2 通道或 4 通道。
9. 解析度可達 0.01%。
10. 多台機器可以同步串列測試。

### 三、MTI PUSH-PULL 電容感測器

電容感測器原理需要被測物體接地作為另外一個極板，針對被測物體無法接地的情況，MTI 開發出 PUSH-PULL 電容探頭。這種探頭由兩個電容感測器組成，內置於一個探頭中，如圖 6，每個感測器在相同的電壓下驅動，然

而信號之間有 180 度的相位偏移，這種轉換允許當前路徑通過被測物體表面而不是通過被測物體接地，解決了被測物體不能接地的困擾。

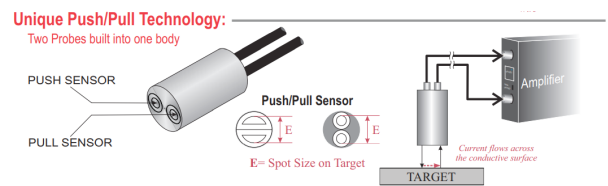


圖 6. 電容傳感器

## 四、電容感測器應用

### (一)、壓電驅動組件閉環控制，如圖 7

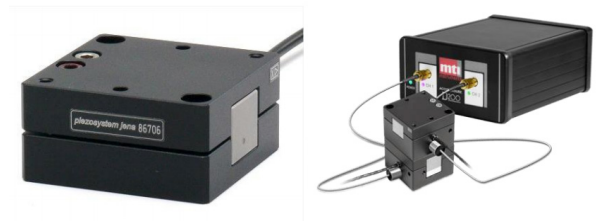


圖 7. 壓電驅動閉環控制

21 世紀的電子製造要求對微型元件進行快速、精確的定位。對於許多裝配線，程序控制的精度已經從毫米到微米，甚至亞微米。為了滿足更高精度的需求，需要具有閉環回饋控制的壓電定位執行器。MTI 的數位式電容感測器系統為精確的閉環定位控制提供運動平臺回饋，該系統的主要功能是在任何時候保持測量過程變數盡可能接近命令設定點，當設定值發生變化或過程發生擾動時，控制系統必須檢測這些變化，根據這些變化執行計算，然後返回

一個值，使過程穩定在設定值。回饋性能取決於控制系統回應的速度和資料的一致性，如圖為電容感測器採集的壓電平臺的變化值。如圖 8，其中 PV 為壓電平臺的當前位置，SP 為設置命令點，CO 為控制輸出。

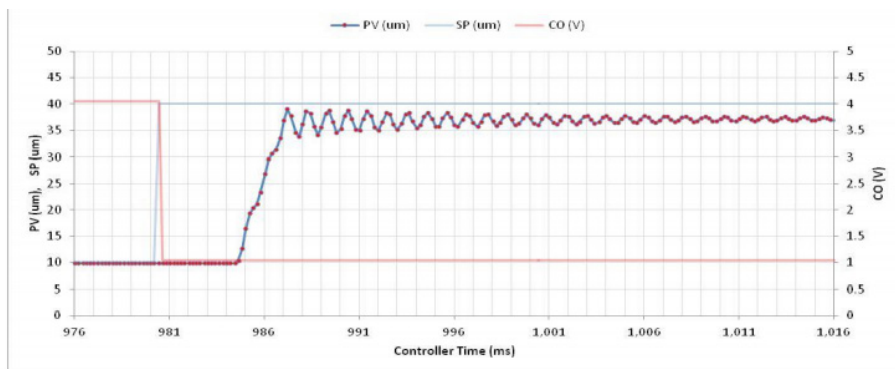


圖 8. 閉環控制曲線圖

## (二)、汽車剎車盤動態形變測試

高速列車採用盤型制動，當閘片壓到制動盤上時就會產生摩擦力，使用盤型制動並使較高速度運行的列車停下來會產生較多的摩擦熱，制動盤和閘片在制動過程中相互摩擦，同時由於熱衝擊的影響，制動盤表面和閘片經歷了複雜的變形模式，從而降低制動盤和閘片的制動性能，因此有必要對制動盤在制動過程中動態形變進行測量。MTI 高溫電容探頭可以對此進行測試，如圖 9，溫度可以達到 650°C，配合數位式控制器對資料進行採集。

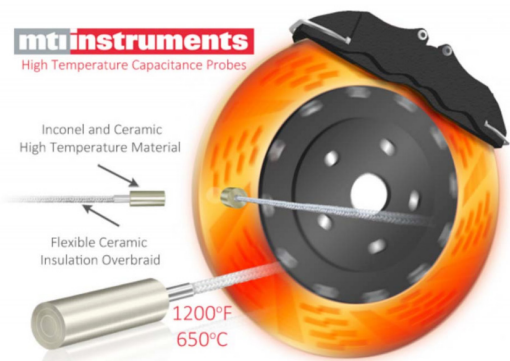


圖 9. 剎車盤動態形變示意圖

## (三)、絕緣體厚度測試

MTI 電容測試系統還可以測量絕緣體的厚度，條件為絕緣體放置在探頭與另一導電體之間，在測試時，電容探頭與另一導電體間距保持不變，只需插入絕緣體，如圖 10。

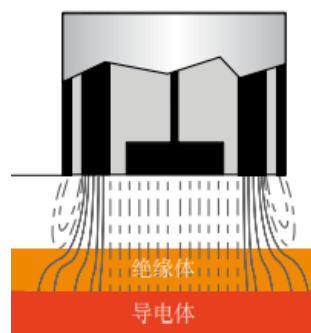


圖 10. 非導體測試示意圖

當磁力線穿過絕緣體，到達導電體基層。由於  $C=A\epsilon/D$ ，當 A 與 D 為恒定值，由於探頭與另一導體之間有絕緣體，所以介電常數  $\epsilon$  發生了變化，而不是單純的空氣，這將會影響 C 的變化，通過電容調節器可以轉變為線性電壓輸出，如果絕緣體的厚度變化，電容感測器的輸出電壓會產生變化，具體絕緣體厚度隨控制

器輸出電壓變化的靈敏度係數  $K=S/(V_{air}-V_{air} \div \epsilon)$ ，其中  $S$  為探頭與導體之間間距， $V_{air}$  為此時控制器的輸出電壓。

例如：當探頭與導體間距離  $S$  為 1mm, 此時控制器電壓輸出  $V_{air}=5V$ ，當放入介電常數  $\epsilon$  為 2 的絕緣體時，電容感測器的控制器輸出電壓為 3.5V，則絕緣體的厚度靈敏度係數  $K=1/(5-5 \div 2)=1/2.5$ ，而絕緣體的厚度  $d=K \times (V_{air}-3.5)=K \times 1.5=0.6mm$ （如表一）。

表 1. 常用絕緣體的介電常數

Material	Temperature° C	Frequency(Hz)	Dielectric Constant
Polyamide	25	$1 \times 10^6$	3.3
Polyethylene	-12	$1 \times 10^6$	2.3
Polyvinyl Chloride	25	$1 \times 10^6$	3.3
Polyesters	25	$1 \times 10^6$	3.1 to 4.0
Epoxy Resins	25	$1 \times 10^6$	3.5
Neoprene	25	$1 \times 10^6$	6.2
Silicone Rubber	25	$1 \times 10^6$	3.1
Alumina			4.5 to 8.4
Silica Glass(clear)			3.8
Water			80
Motor Oil(SAE 30)			2.5 to 3.0

#### (四)、矽片厚度測試

在半導體行業中，為了實現工業要求和生產效率，矽片的厚度需要精密控制，由於矽片在測量過程中不能接地，故可使用 PUSH-PULL 電容探頭，採用上下各安裝一個電容探頭進行厚度測試，通過手動或自動移動矽片可以測出矽片的厚度和 TTV，如圖 11，此安裝和設計常用於實驗室。

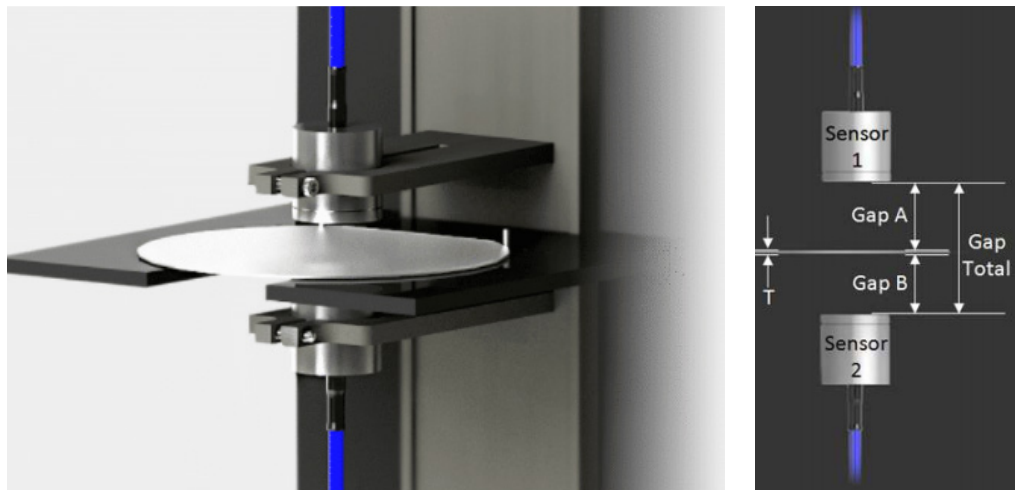


圖 11. 矽片厚度測試



如果在產線上進行厚度測試，則會採取多點測試，一般會安裝三組探頭進行測試。如圖 12 可瞬間測試矽片的厚度，通過自動化產線對矽片進行篩選。

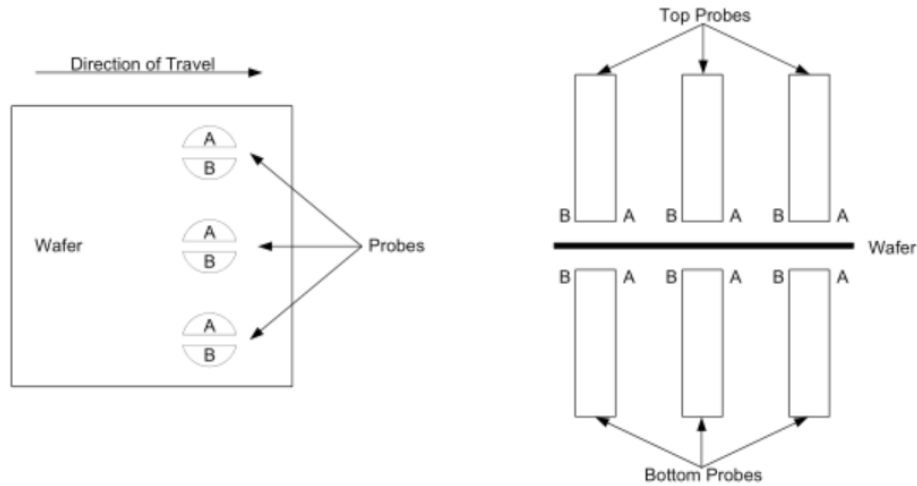


圖 12 . 多點矽片厚度測試

## 五、結語

電容傳感器具有體積小，高精度、高解析度、高頻響等特性應用於很多高端自動化中用於位移和振動測試，同時在汽車、航天、半導體、電池等行業廣泛應用。合理地安裝在精密定位系統中，電容感測器可以直接測量運動部件相對於基體的實際位置，傳動系統、執行機構或導向系統的誤差均不影響測量，而發生在傳動系統中的任何漂移或滯後會自動消除。由於外部誤差可以通過電容感測器及時檢測並回饋，因此位置控制壓電陶瓷納米定位系統可實現卓越的運動性、長期的高穩定和快速響應的伺服閉環控制。

## 參考資料

- [1] MTI 電容感測器資料