



# 感測器於實車碰撞測試之應用

財團法人車輛研究測試中心 黃興閱

## 一、前言

感測器的應用在生活中無處不見，例如冷氣機的溫度感測器、電腦滑鼠的位移感測器及汽車倒車距離感知器等，人類科技發展至今，感測器已是不可或缺的技术。感測器之功能為將欲記錄之物理量轉為電訊號或其他記錄形式，以利後續的運算分析或處理應變。在車輛測試領域中，碰撞測試應用了多項感測技術量測車體及人偶的動態行為及傷害指數，本文將簡單介紹感測器之運作原理，並以碰撞測試使用之感測器說明各項感測技術的應用實例。

## 二、感測器基本原理

感測器的基本原理是將欲量測之物理量或化學量，如溫度、壓力、溼度、長度、速度、震動、聲音、PH值及化學成分等，轉換成可記錄之形式，通常為電訊號，再以資料擷取儀器將此電訊號進行記錄、顯示或分析。如此便可取代人類的視覺、聽覺、嗅覺及味覺等感官記錄，除避免主觀意識之謬誤，方便快速的記錄量測值外，更可避免一些特殊

環境對量測人員的威脅。

感測器通常與轉換器（transducer, 亦稱換能器或傳感器）並稱，實際上所有的感測器都需要有轉換器的存在，轉換器可將待量測之物理或化學量轉換成另一種能量形式（電訊號），轉換器可分為主動式及被動式兩種。主動式轉換器不需外加激發電源，待側量的改變可直接產生電壓或電流，例如熱電偶；被動式轉換器則需外加激發電源才能產生電訊號輸出，如應變規。感測器運作流程如圖1。

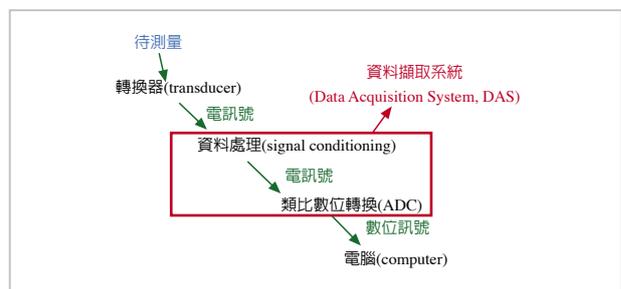


圖1—感測器基本運作流程 [4]

在實際應用中，轉換器存有非理想的結果，顯示值與實際值間的差距稱為誤差（error），引發誤差的因素有很多種，例如：

### 1. 靈敏度 (sensitivity) :

其定義為輸出訊號變化與待測量變化之比，當線性度良好時，可視為校正曲線的斜率，如圖2。

### 2. 重現性 (repeatability) :

指相同條件之下，同一待測量重複輸入量測，轉換器產生相同結果的比率。重現性愈大表示轉換器的可靠度愈高。

### 3. 線性度 (linearity) :

指轉換器校正曲線接近於理想直線的程度，一般而言，轉換器的應用必須在線性度良好的範圍內，此時為定值常數之靈敏度可視為校正曲線斜率，如圖2之常數區域。

### 4. 遲滯現象 (hysteresis) :

當待測量上升至一定值後下降回起點的過程中，對同一數值測量的偏差，意即校正上升曲線與下降曲線並未重合。建立遲滯模型補償遲滯現象造成的過度誤差是必須的。

除上述靜態性能外，轉換器的動態性能也將影響誤差的變化，諸如頻率響應、共振頻率及阻尼等。當待測量作快速變化、步進時，動態性能則為非常重要的參考因素。為確保轉換器的精確度 (accuracy, 定義為誤差與全域輸出之比值)，轉換器於使用前應先進行校正工作，並訂定合理之校正週期，定期追蹤校正，保持轉換器之最佳量測狀態。

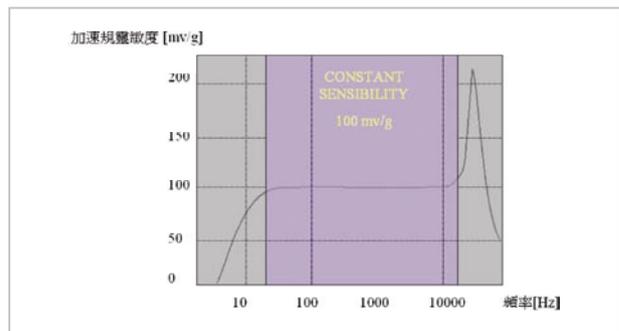


圖2-敏感度校正曲線實例 [2]

感測器因量測之物理、化學量不同，及量測原理的不同，種類繁多，這裡將感測器大致分為四類：機電轉換器、光感測器、熱感測器及化學感測器。以下簡略介紹各類感測器之原理：

#### (一) 機電轉換器

機電轉換器顧名思義是將機械計量，如位移、壓力等，轉換為電訊號的一種感測器，亦有多種形式分類：

##### 1. 電位計 (potentiometer) :

電位計為利用可變電阻連接滑行者之轉換器，外加電壓源於可變電阻兩端，滑行者位移使電阻變化造成電壓變化，即可用電壓計量得電壓，進而得知其滑行者之位移量。電位計常見於線性位移計、角度計及定點控制等應用。

##### 2. 應變規 (strain gauge) :

根據歐姆定律，導體之電阻與截面積成反比，與長度成正比；且材料受壓力時電阻係數增加，受張力時電阻係數減小，稱為壓阻效應 (piezoresistance effect)。利用此一原理，配合



惠司同電橋電路 (Wheaston bridge)，量測材料之應變，於第三章作較詳盡之介紹。

### 3. 壓電轉換器 (piezoelectric transducer)：

壓電轉換器乃利用某些種類之晶體，例如石英、鈦酸鋇陶瓷等，受到力的作用會產生電荷的壓電特性 (piezoelectricity)，作為機械力之轉換器。由於產生之電荷量小，通常需要配合電荷放大器 (charge amplifier) 的使用；其晶體受力後之變形量極小，自然頻率高，且轉換器之體積可以很小，常見於壓力、應力、聲波及加速度等感測器應用。

### 4. 線性差動變壓器 (LVDT, Linear Variable Differential Transformer)：

線性差動變壓器為一種線性位移計，可將線性位移量轉換為電訊號。其原理與變壓器之電壓感應類似，其中央鐵心連接滑動器，當其滑動位移時，便使外圍之二次線圈產生電壓感應變化，鐵心位移量與感應電壓成正比。LVDT最大的特色為移動鐵心與外圍線圈並未接觸，此無摩擦裝置壽命長，且兼具解析度大及反應速率快等優點，常見於真圓度、平面度及尺寸量測等細微尺度之應用。

## (二) 光感測器

光感測器分為量子偵測器及熱偵測器兩種，量子偵測器為入射光子與感光材料中的電子相互作用產生訊號，有光伏特、光傳導及光發射三種轉換方

式，光伏特為兩種材料介面受不同照度而產生電壓；光傳導為半導體材料因入射光子產生電阻變化；光發射轉換則為受到一定光子能量時，電子可脫離感光材料而射出。熱偵測器則是對輻射能量產生反應，主要為紅外線的感測，其轉換器有熱電效應、輻射熱計法等。

## (三) 熱感測器

熱為一種能量形式，溫度高低為能量多寡之指標之一，當產生溫差時，熱能以傳導、對流及輻射三種方式傳遞。溫度感測器可分為接觸及非接觸式兩種，接觸式感測器因與待測物直接接觸，量測時易使熱容量小之待測物溫度改變；非接觸式感測器則針對輻射熱作量測，具備不影響待測物溫度之特性，適合用於高溫物體量測。

接觸式溫度感測器有熱阻體、熱電偶等形式，熱阻體為阻抗對溫度變化非常敏感之電阻，隨溫度變化阻值呈現正、反比不同，分為正溫度係數熱阻 (thermistor) 及負溫度熱阻 (posistor) 兩種；熱電偶則是利用兩種金屬連接成的電路，金屬連接點與另一端點有溫度差時，便可產生電流進行溫度量測，其運用的熱電效應為Seebeck、Peltier及Faraday三種。

## (四) 化學感測器

感測器亦應用於量測物體之化學性質，例如PH值、化學成分等。氧氣偵測器即為利用ZnO<sub>2</sub>材料對含氧量產生導電性變化的一種化學感測器，常用於車輛排汽系統之氧氣偵測。

### 三、應變規與惠司同電橋

第二章所提及之應變規除用於材料應變量測，也常見於材料荷重量測，車輛碰撞測試領域中，加速規 (accelerometer)、荷重元 (load cell) 多為此類應用，因此對應變規與惠司同電橋電路作較詳盡之介紹。材料應變定義單位長度之變化量： $\epsilon = \Delta L/L$ ，應變規量測材料應變，需配合惠司同電橋 (Wheaston Bridge) 電路，使應變造成細微的電阻變化，轉為可量測之電壓變化。

標準惠司同電橋電路如圖3：

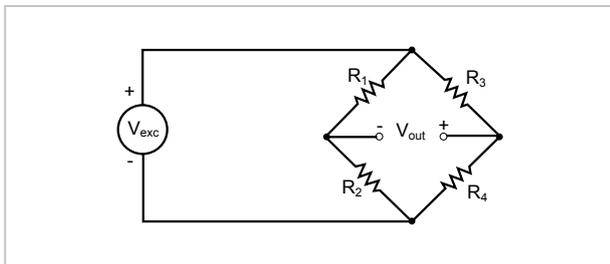


圖3－惠司同電橋電路 [1]

當  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  時， $V_{out} = 0$ ，此時電橋為平衡狀態 (balance bridge)。惠司同電橋電路之使用主要分為三種：

#### (一) 全橋配置 (full bridge)：

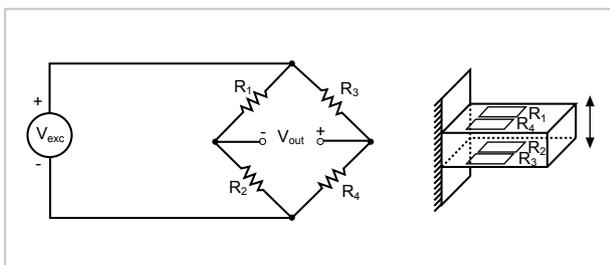


圖4－惠司同電橋電路：全橋配置 [1]

電橋四臂電阻皆為隨待測物變化之應變規，如圖4，相同之四個應變規兩兩貼於旋臂樑上下兩面，故四應變規之電阻變化大小相等（但上下應變規之變化相反），其輸出電壓與其電阻變化（應變）成正比：

$$V_{out} = \left( \frac{R_d}{R} \right) V_{ex}$$

此種配置提供最大的輸出，造成最大之敏感度，雜訊的影響也相對較小，而溫度所產生的誤差可忽略，因為四個電阻具有相同的變化趨勢，故全橋配置為最佳的應變規配置。

#### (二) 半橋配置 (half bridge)：

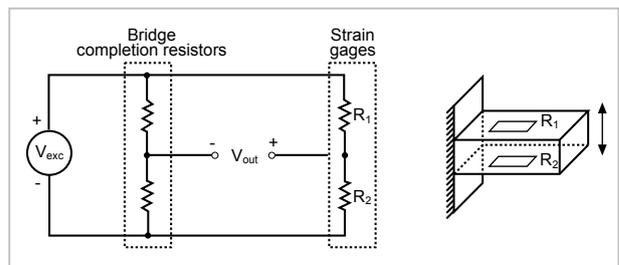


圖5－惠司同電橋電路：半橋配置 [1]

電橋上僅兩臂電阻為隨待測物變化之應變規，上圖5，與全橋相同，上下兩應變規電阻變化大小相同（變化相反），其輸出電壓同樣與應變成正比，但輸出電壓大小減為1/2：

$$V_{out} = \frac{1}{2} \left( \frac{R_d}{R} \right) V_{ex}$$

上式為 $R_d$ 很小時之近似公式，當應變量大時，上式不再成立，將產生非線性之誤差；且因電橋並

非等比例變化，溫度誤差不可忽略，若電橋中另外兩臂之固定電阻與待測物距離太遠，其環境差異更造成誤差增加，於使用上應盡量使固定電阻靠近待測物。

(三) 1/4橋配置 (quarter bridge) :

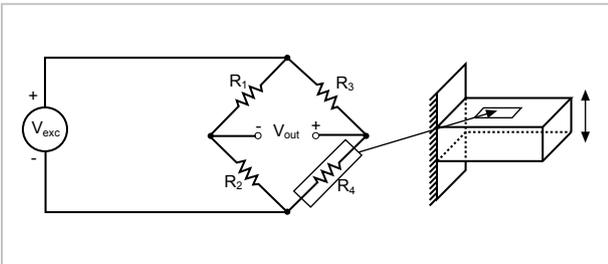


圖6—惠司同電橋電路：全橋配置 [1]

電橋由一臂的應變規和三臂的固定電阻組成，如圖6，於小應變時可得下列近似公式：

$$V_{out} = \frac{-1}{4} \left( \frac{R_d}{R} \right) V_{ex}$$

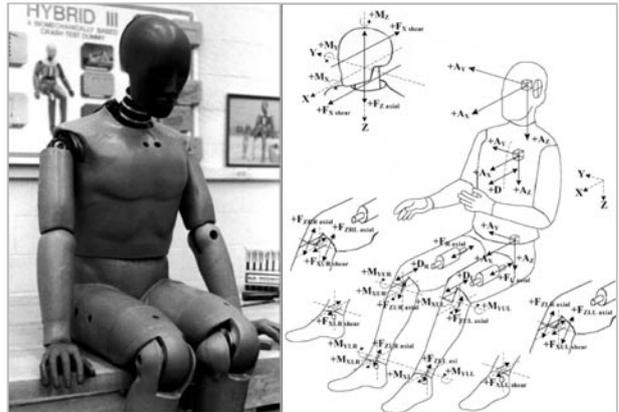
其輸出電壓大小較全橋減為1/4，由於較小之輸出電壓，使雜訊的影響相對較大，且與半橋同樣存在非等比例電橋之缺陷，必須注意使用之環境和誤差因素。

四、碰撞測試感測器量測

車輛碰撞測試領域中，最常見的感測器為加速規、荷重元、位移計、速度計等，以ARTC實車碰撞實驗室試用設備之感測器為例，分為人偶感測器、車體感測器、設備感測器、資料擷取系統及資料後處理加以介紹：

(一) 人偶感測器

人偶感測器以Hybrid III人偶(前撞測試用人偶)為例，如圖7，頭部、胸部、髖部三處配有三軸加速規；頭頸介面配有六軸荷重元，其中三軸為受力，三軸為力矩；胸部配有胸骨位移計，大腿配有軸向受力荷重元；膝蓋配有膝蓋滑動位移計；膝蓋U型鉤配有兩個軸向荷重元；小腿上下部各配有四軸荷重元，其中兩軸受力、兩軸力矩。其量測位置及方向表示於圖8，其中座標定義根據SAE J211之符號傳統：



(左)圖7—Hybrid III 50th percentile男性人偶 [5]  
(右)圖8—Hybrid III 50th percentile男性人偶 [5]

1. 加速規

實車碰撞實驗室人偶皆採用全橋式壓阻式加速規，即第三章中所述以應變規構成之加速規，加速規內部之質量或結構物，因加速度的作用而受力(牛頓定律 $F = ma$ )發生應變，該結構表面之應變規即產生輸出電壓之差異，如此便可定義出以V/g為單位之靈敏度進行加速度量測。

實驗室共計有 Entran EGE-73CM、ENDEVCO 7231C 兩型方塊狀單軸加速規，Entran EGE-73B6、ENDEVCO 7264A~C 等多種小型單軸加速規（凸字形），其量測範圍有 500、750、2000 g 等（g 為重力加速度），這些符合碰撞測試之加速規皆須符合 SAE J211 和 SAE J2570 之規範，例如阻尼比須小於 0.05、頻率響應 0~2 kHz  $\pm 2.5\%$ 、0~4 kHz  $\pm 4\%$ 、共振頻率須大於 20 kHz 等。於實際應用中，三個單軸加速規安裝於治具上，組成可量測三軸向之加速規組合，再安裝於頭、胸、髖部量測點，藉以量測各部位加速度值。我國於 2008 年即將實施之前面碰撞法規中，頭部傷害指數的定義為頭部合成加速度之積分值，因此加速規在此被賦予重任，於實務中亦常見在重要的量測點另外加裝一個加速規，以降低訊號擷取失敗之風險。

## 2. 頸部荷重元

頸部荷重元用以量測頭頸介面之三軸受力及力矩，共計六頻道輸出，實驗室使用的是人偶製造商 First Technology 和 Robert A. Denton（全球惟二 Hybrid III 人偶製造商）所生產的荷重元，其運作原理與壓組式加速規相同，利用結構物受力之應變量測



圖9-頸部荷重元 [5]

人偶頭部與頸部以此荷重元為介面相連接，如圖，量測頭部與頸部相互作用產生之力與力矩。

## 3. 胸部位移計

Hybrid III 人偶胸部位移計非直覺的線性位移計所構成，而是以角度計自胸骨連接一連桿至胸骨內側，端點球頭於胸骨內側凹槽內滑動，如圖 10、11，此特殊的設計可以避免線性位移計之自由度不足，於測試過程中易因人偶胸部變形而受損。胸部位移計是量測胸骨相對於胸椎之位移量，其位移量與連桿角度成一比例關係 ( $x = r \times \cos \theta$ )，故可以角度計量測胸骨位移量。角度計是為可變電阻構成之電位計 (potentiometer, 如第二章之敘述)，不同角度位置輸出不同之電源分壓，以量得角度。



圖10-胸部位移計：胸椎面 [5]

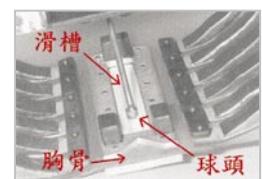


圖11-胸部位移計：胸骨面 [5]

## 4. 膝蓋位移計

膝蓋位移計為線性可變電阻電位計，量測直線位移，原理與前述相同。小腿骨以 U 形鉤夾住大腿骨（膝蓋）連接，於交界處以橡膠材料外罩金屬滑軌連接，當小腿與大腿相互作用，

橡膠材料受剪應力而沿滑軌變形，膝蓋位移計即固定於此量測相對位移，其構造如圖11。

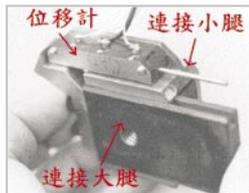


圖12-胸部位移計：  
胸骨面 (5)

## 5. 腿部荷重元

大腿骨及小腿骨皆配有荷重元，其量測原理同頸部荷重元。大腿為單軸荷重元，量測大腿骨軸向受力；小腿則分為上、下部，各配有四軸荷重元，量測小腿骨軸向、前向受力和前向、側向軸力矩四種負荷；小腿U形鉤亦配有單軸荷重元，量測U形鉤軸向受力。腿部三種荷重元加上膝蓋位移計之讀值，為重要之腿部傷害指標，判定碰撞測試中人偶腿部是否因車體結構擠入或撞擊造成嚴重傷害。

現行之實車碰撞測試法規及標準，諸如美國FMVSS、IIISH、歐洲ECE、EuroNCAP，規範之指標皆為人偶感測器所量得的傷害指數，而非車體之破壞程度，保護乘員不受嚴重傷害也是車輛工程師之最高準則，因此人偶感測器為實車碰撞測試中最重要的部分。目前世界各國之碰撞法規標準大多使用統一規格之人偶，如前撞測試-Hybrid III 50th percentile male，側撞測試-EuroSID1或ES2，新形式之人偶隨著時代演進而出現，除更接近真實人體行為表現外，符合各國不同體型之人偶研究也逐漸被學者專家所提出。

## (二) 車體感測器

除人體感測器外，碰撞測試之車體感測器也是不可或缺的要件，常見於車體量測之感測器有加速規、位移計、安全帶張力計等。與人偶相同，車體之加速規為符合碰撞領域使用之加速規，實車實驗室所使用的加速規除與人偶相同的型號外，亦有Kyowa ASD、AS等系列加速規。

位移計應用於車體上，可量測安全帶伸出量、人偶位移量或車體變形量等。目前實車碰撞實驗室採用的是拉線式位移計，如圖13，其原理與角度電位計相同，彈簧轉軸將拉線捲進輪轂，拉線之伸出量以轉軸角度量測計算。僅能量測單軸向線性位移為拉線式位移計之缺點，若量測點發生過大橫向位移，其拉線伸出量代表量測點線性位移量的正當性則降低，甚至失效。車輛測試領域中也有以光學位移計量測安全帶伸出量的例子，於織帶上黏貼等間距深淺相間貼紙，繞於織帶上的光感測器便可根據光反射訊號量測安全帶伸出量。



圖13-拉線式位移計



圖14-安全帶張力計

安全帶張力計為一種量測軟質帶狀物之荷重元，原理為三根橫樑以結構件連接，織帶交叉穿過

此三根橫樑，如圖14，當織帶受到張力時，三根橫樑因而受力，其中一根受力方向相反，因此造成連接之結構件彎曲變形，藉由量測結構件變形便得知安全帶所受張力。

### (三) 設備感測器

人偶及測試車以外，測試設備也具備數種感測器，以速度量測而言，測試車速度可由車體測速桿掃過光柵的訊號計算，是為光感測器之應用；亦可以拖曳鋼索速度定義，而拖曳鋼索速度可以驅動馬達之轉速計算，是為電磁感應器之應用。

另一種相當簡單的裝置也可以視為最基本的感測器形式，就是接觸開關（tape switch），發生接觸時，接觸開關便以短路訊號送出，通常被當作車載系統，如資料擷取系統、高速攝影機或緊急煞車系統等之觸發訊號。雖然一般認知的感測器為可連續記錄一段時間之待測量變化，而接觸開關這種簡單的裝置僅能將接觸與否之物理量轉換為短路訊號，卻仍符合計量轉換的感測器基本定義。

### (四) 資料擷取系統

前面談到各種形式的感測器將待測量轉為電訊號，而所有電訊號皆需要經過處理才能儲存、分析，資料擷取系統（DAS, Data Acquisition System）即扮演這個重要的角色，收集感測器之類比電訊號，於測試中作暫存工作，並經過數位類比轉換器轉為數位訊號，再由電腦作儲存及後處理分析，其架構如第一章之圖1。

碰撞測試採用的DAS須具備體積小、重量輕、耐衝擊、記憶量大、可離線作業等特性。體積、重量小的DAS裝置於空間有限的測試車上，不至影響車內活動件之作動，也方便進行軸重配置。耐衝擊為車載裝置當然之特性，一般而言碰撞測試之車身部分承受20~50 g之加速度，DAS之耐衝擊性通常須達100 g。然而控制電腦並非車載裝置，因此DAS須具有離線作業的功能，設定完成後即離線進行碰撞測試，測試後再連結電腦進行存取及後處理。其資料記憶量也須完整記錄碰撞過程，一般碰撞測試使用10 kHz取樣頻率，碰撞的過程大多約在200 ms內結束，因此DAS每頻道至少需足夠儲存2000筆資料之能力，以現今的記憶體技術，10 kHz取樣率、各頻道滿載的情況下，記憶1分鐘以上相當容易。圖15、16為ARTC實車碰撞實驗是採用之兩型DAS。



圖15—DTS TDAS G5



圖16—KYOWA DIS-3000B

國際間的實車碰撞測試單位也常見非離線作業的DAS，利用堅固的線纜自控制室電腦直接連結在車載DAS上，除線纜佈置，無須離線及再連結的動作，設定操作便利性高，但具有線纜碰撞損壞的潛在風險，且須注意線纜重量是否影響測試。



(五) 訊號處理

感測器原始資料於測試後存取完畢後，便可進行處理分析，然而感測器擷取之訊號必定含有雜訊及其他非目標訊號，因此雜訊處理及濾波為優先工作。常見的雜訊類型的有突波、零點漂移、背景噪音等，經過軟體去除雜訊後便可進行濾波。

感測器量測值除目標訊號外，亦含有其他非量測目標之訊息，例如加速規訊號常有結構振動所造成的高頻訊號，須由各部位的機械特性而有不同之濾波形式得到欲量測之訊號。碰撞測試領域所用的頻率等級設定皆依據SAE J211和SAE J2570標準或各種碰撞法規所規範，圖17、18為SAE J211定義之CFC（Channel Frequency Class）頻率等級，表1為ECE R94所規範之感測器頻率等級，完成去雜訊及濾波後方可進行資料計算分析。

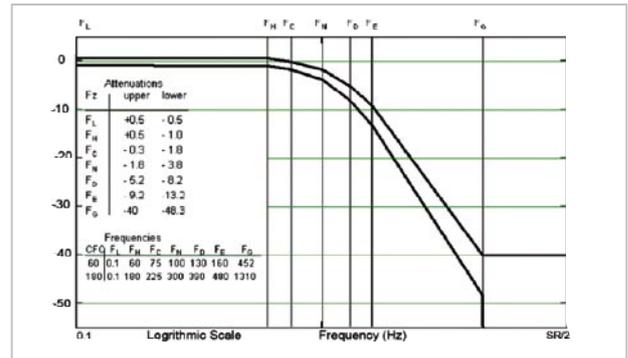


圖18—CFC60和CFC180

表1—ECE R94感測器頻率等級規範 [7]

量測項目	濾波等級
頭部加速度	CFC 1000
頸部受力	CFC 1000
頸部力矩	CFC 600
胸部變形量	CFC 180
大腿軸向受力	CFC 600
小腿受力及力矩	CFC 600
膝蓋位移計	CFC 180
車體B柱底部	CFC 180

經過上述初步處理後的資訊，便可進行法規規範值得計算，如人偶的頭部傷害指數為合成加速度之積分值： $HPC = (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5}$

；頸部張力及剪力則以時間累積位準判別，圖18為累積時間位準之計算實例；而小腿傷害指標：

$$TI = |M_R / (M_C)_R| + |F_Z / (F_C)_Z|$$

(M為力矩，F為受力)，為時間之函數，其他傷害指數之計算及感測器訊號規範請參閱各碰撞法規及標準。

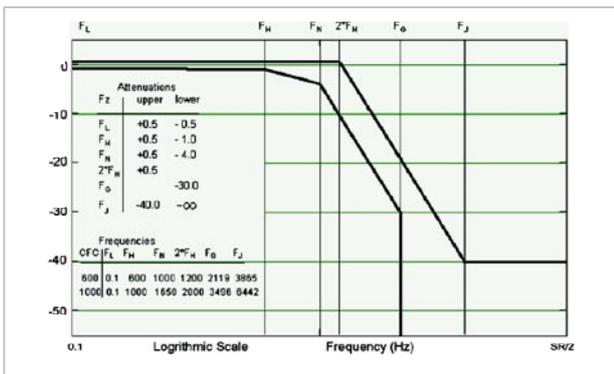


圖17—CFC600和CFC1000

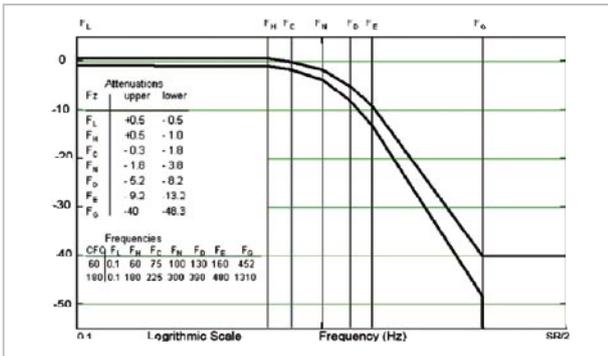


圖18—累積時間位準計算實例

## 五、結語

感測器的原理及應用是非常精深的一門學問，學校工學院內往往是整學期（年）的課程，在短篇內無法詳盡描述細節，僅概略性的介紹感測器種類、原理；同時文中簡介碰撞測試領域常用的幾種感測器，目的在於使讀者看見實車碰撞測試的輪廓，2005年初國內第一間實車碰撞實驗室在ARTC開幕，2008年我國第一個實車碰撞法規（前、側撞）也將實施，對於國人而言應是相當陌生的領域，期望本文能帶給從未接觸此類測試資訊的讀者一個新的衝擊，引發深入探究的興趣。

## 六、參考文獻

1. <訊號處理與資料蒐集系統>，德技股份有限公司QUATEK CO., LTD技術文件。
2. 程紅蓉，<訊號分析入門>，集研科技教育訓練。
3. 謝廣文，<感測器原理>，農用自動化叢書12，機電整合—第二章。
4. 黃興閔，<TDAS G-5資料擷取系統簡介/設備操作>，ARTC動態安全課內部研討會。
5. <USER'S MANUAL FOR THE 50th PERCENTILE MALE HYBRID III TEST DUMMY>, Society of Automotive Engineers, Dummy Testing Equipment Subcommittee, SAE Engineering Aid 23, June 1998.
6. SAE J211、SAE J2570。
7. ECE R94。