

# 熱線式風速傳感器自動線性校正系統之研製

蔡明忠<sup>1</sup> 邱瑞慶<sup>1</sup> 關玉蘋<sup>1</sup> 周佳德<sup>1</sup> 朱仁誠<sup>2</sup> 朱信燁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立臺灣科技大學 自動化及控制研究所

<sup>2</sup>鎰田科技股份有限公司

**摘要：**本研究目的在建構熱線式風速傳感器的自動線性校正系統。系統由 PC 主機與人機界面、高速風洞測試腔體與風速控制模組、通訊介面、資料擷取模組、線性校正模型和微控制器之線性補償模組等所組成。本研究為了實現熱線式風速傳感器自動線性校正與品管檢測，完成之系統包括三個不同功能模式，並將其整合於同一人機介面供使用者選用，使得操控人員可以依照要求，選擇所要執行之功能模式。此三個功能模式分別為校正功能模式、品管功能模式與先校正後品管功能模式。三個功能模式皆整合傳感器的微控制器晶片(MSP430)分別處理校正與品管之電壓訊號。以先校正後品管為例，首先將完成溫度補償的風速感測器安裝於可控制風速之實驗腔體風洞中後，即自動進行風速計校正處理，透過資料擷取模組量測不同量程下風速之原始電壓訊號，並傳至 PC 端之校正系統自動檢測與計算出多項式係數，再藉由通訊模組載入至微控制器中，完成線性化校正。完成線性校正後可接著利用自動品管檢測功能，自動擷取風速計品管電壓去驗證線性化後的品質改善，縮短生產時間。本系統亦可作為一般風速計之自動化品管檢測與產品分級用途。

**關鍵字：**熱線式風速感測、風洞、品管檢測、資料擷取、線性化校正、溫度補償。

## 一、前言

在農、工業、民生等諸多生產設備或系統中，流量或風速是一個很重要的感測項目。而熱線式風速計在各行業具有廣泛的應用。例如在(1)汽車工業，用於檢測進入發動機的空氣量，為汽車發動機提供準確的噴油量；控制噴油氣的噴油量，以得到較準確的油氣比，充分發揮發動機的效能。同時，可以減少對環境的污染以及節約燃油。(2)電廠鍋爐空氣給入量與煤的比例控制。(3)空調室內空氣質量與通風節能的最佳控制。(4)民生、工業現場的天然氣、液化氣、煤氣等可燃性氣體的流量檢測。(5)醫學的臨床診斷和治療，呼吸功能測量儀通過測量受測者的中期、峰值呼吸流速和呼吸容量等靜態、動態肺功能參數，為呼吸疾病診斷、治療提供醫學依據[1]。

熱線式質量流量計的基本原理是利用外部熱源對管道內的熱電偶加熱，熱能被流體帶走，透過測量因流體流動而造成的熱量（溫度）變化來反映出流量體的質量流量。熱線式流量計亦可用於量測氣體流速，或稱風速計[2]。

由於熱線式風速計使用的熱敏電阻大小有些微差異，導致風速計的非線性特徵曲線都有些微的差異。使用人工校正風速計不但耗費時間與金錢，且準確性與精確度都不一致。因此，若能藉由自動化感測系統取代人工記錄，將可以提高量測的準確性與精準度，提高生產效率、使品質穩定並且降低成本。

## 二、熱線式風速計原理及校正模型

### 2.1 熱線式風速計

其熱線式風速計的基本原理是將一根細的金屬線絲放在流體中，通過電流加熱金屬線絲(即熱線)，使其溫度高於流體的溫度，當流體沿垂直方向流過金屬線絲時，將帶走金屬線絲的一部分熱量，使金屬線絲溫度下降，熱線在氣流中的散熱量與流速有關，散熱量導致熱線溫度變化而引起電阻變化，使流速信號轉變成電氣信號，典型熱線式風速計工作原理如圖 3 所示[3]。

本研究之熱線式風速計內部含有惠斯頓電橋(Wheatstone Bridge)和一個電源控制器，使熱線式風速計的電路保持恆溫。熱線與周圍流體的熱傳作用形成一流速的函數，但溫度和壓力的變量會影響它。溫度補償電路自動增加供給熱線的電流使其恢復原來的溫度和阻值，直到電橋重新平衡。

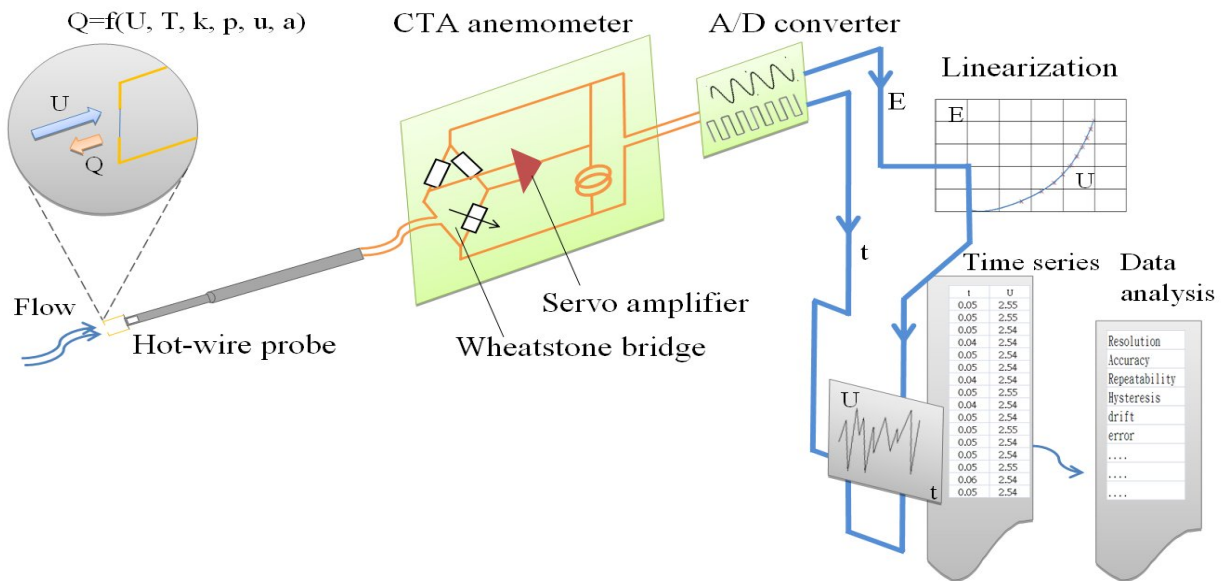


圖 1 典型熱線式風速計工作原理 [3]

本研究採用的熱線式風速計乃是由一個探頭、熱敏電阻和信號調整電路組成，如圖 2 所示。

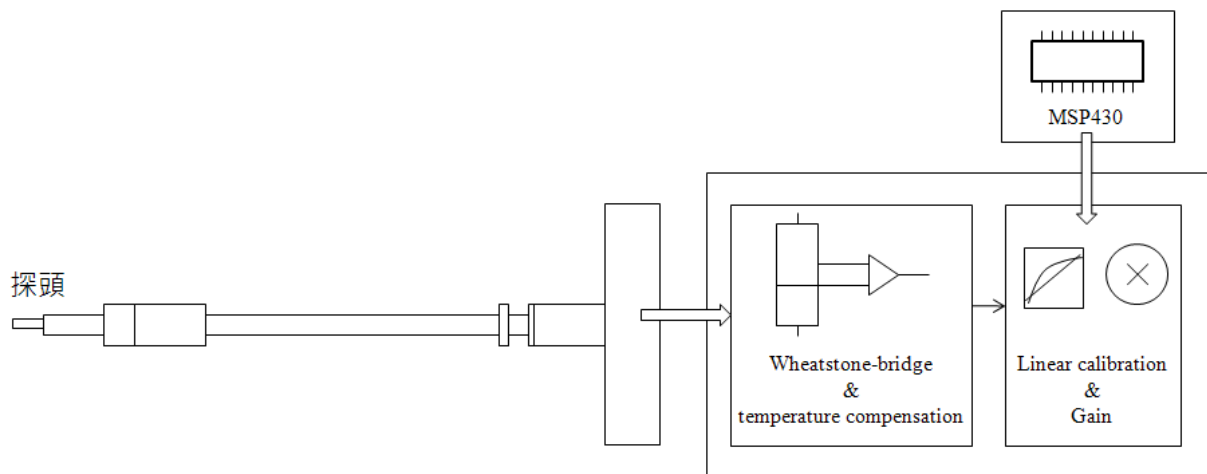


圖 2 熱線式風速計組成架構

其中之熱敏電阻為 PT50 和 PT1000，因屬於薄膜傳感器，可在比光纖薄膜不乾淨的空氣中使用。金屬箔的熔點高、延展性好，性能非常穩定，在 800°C 以下，溫度係數誤差極小，可以忽略溫度對其本身電阻的影響。鉑電阻溫度傳感器是利用電阻與溫度成一定函數關係而製成的溫度傳感器，作為溫度傳感器在實際溫度檢測系統中應用十分廣泛。但其非線性如影響了測溫精度，則成了檢測中需要重點處理的問題。在 0°C-800°C 範圍內，鉑電阻的阻值 R 與溫度 t 之間的關係為[4]：

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (式 1)$$

PT50 和 PT1000 是用鉑製成；PT50 在攝氏零度時電阻值為 50 歐姆，PT1000 在攝氏零度時電阻值為 1000 歐姆。熱線探頭結構如圖 3 所示，探頭的熱敏電阻材料是金屬，一般採用鎢或鉑。鉑的使用溫度較高、不易氧化。

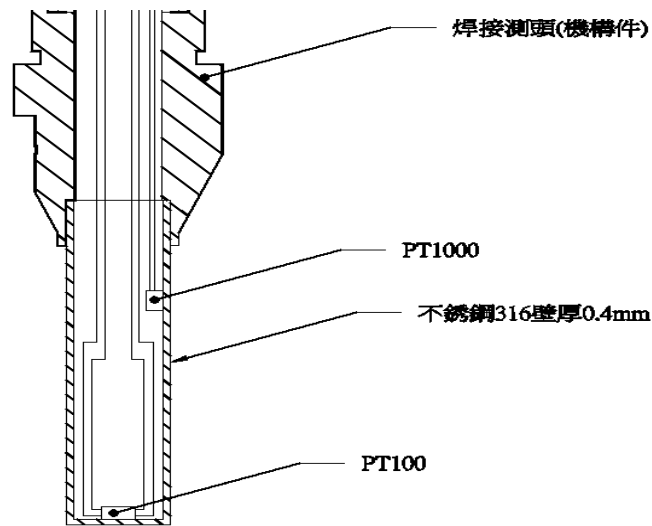


圖 3 熱線探頭結構[5]

熱線式風速計的電橋電路是利用熱敏電阻做為溫度補償，並且調整可變電阻使不同溫度下的零點電壓可以相同。熱傳造成熱線冷卻改變電阻，導致惠斯頓電橋電壓的差異。因此，電橋上的電壓改變使得流速大時通過熱線的電流增加，流速小時電流減少，且加熱電流是空氣流量的非線性函數。而風速計提供的電流控制，保持熱線式電阻本身的溫度恆定。在加熱電流通過精密電阻產生的電壓降作為輸出信號輸給電控單元，其大小可作為空氣流量的度量值[6]。

## 2.2 線性校正模型

針對熱線式風速計傳感器的非線性特性，乃以微處理器 MSP430 為核心，將傳感器特性曲線儲存在傳感器中。傳感器訊號經過溫度零點補償後，通過 A/D 轉換進入微處理器 MSP430。經 MSP430 內的多項式校正模型換算，可將訊號線性化後輸出。

熱膜探頭將氣體流量信號轉為電壓信號，經差動放大電路和同相放大電路後，送入 MSP430 單機片的 12 位 AD 通道。單機片根據採集的信號計算出氣體的流速，同時根據用戶的需求輸出 4-20 mA 電流或電壓輸出。未校正的原始電壓輸出和流體速度有一個幕次定律相關的非線性關係，它最常使用四階多項式建模。透過紀錄風速、傳感器電壓、流體溫度和壓力，可校正隨風速、溫度變化的傳感器電壓[6]。

當傳感器在恆溫下工作，King's law 的熱平衡方程為[3]

$$e^2 = a' + b'v^n \quad (\text{式 2})$$

上式中： $e$  為傳感器電壓輸出(V)； $a'$  為恆溫熱線式風速計的零點輸出，可利用電路消除； $b'$  是傳感器的靈敏度，與工作溫度相關； $v$  是流體的流速； $n$  通常取 0.45~0.5，由公式可以畫出恆溫熱線式風速計的特性曲線，如圖 4 所示，流體速度與傳感器電壓輸出之間的關係不是線性的。幕次法則的準確度通常比多項式低，尤其是在速度範圍較寬的時候，因為  $n$  會造成速度上的相依，所以它最常使用四階多項式建模。

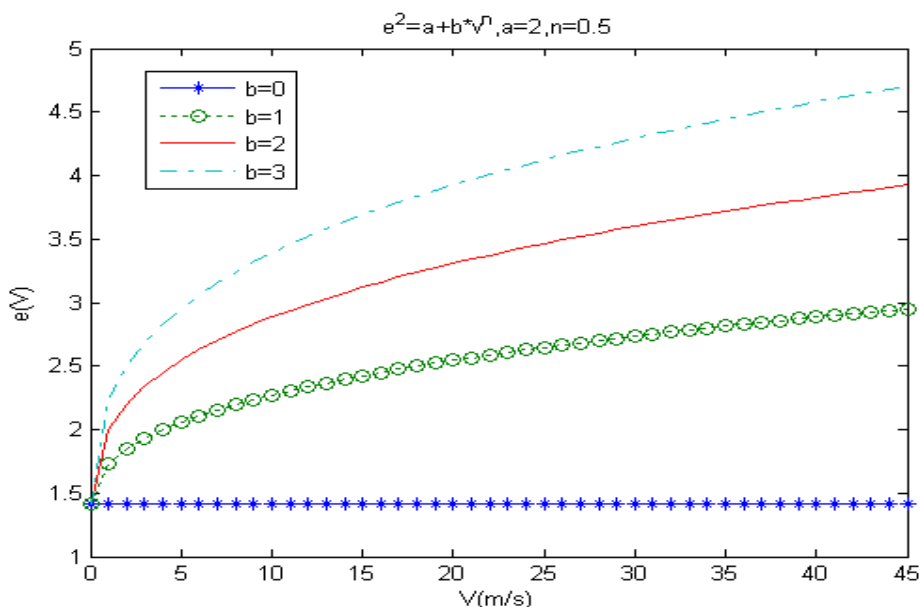


圖 4 恆溫熱線式風速計特性曲線

本研究採用一個四階的多項式曲線以擬合上述之非線性特性曲線：

$$U = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + C_4 E^4 + e \quad (式 3)$$

上式中 U 為風速(m/sec)，E 為傳感器電壓輸出(V)， $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  為多項式之係數，e 為誤差。假設有 n 組已知之風速與傳感器電壓訊號  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ ，代入式(3)得。

$$\begin{aligned} U_1 &= C_0 + C_1 E_1 + C_2 E_1^2 + C_3 E_1^3 + C_4 E_1^4 + e_1 \\ U_2 &= C_0 + C_1 E_2 + C_2 E_2^2 + C_3 E_2^3 + C_4 E_2^4 + e_2 \\ U_3 &= C_0 + C_1 E_3 + C_2 E_3^2 + C_3 E_3^3 + C_4 E_3^4 + e_3 \\ &\vdots \\ U_n &= C_0 + C_1 E_n + C_2 E_n^2 + C_3 E_n^3 + C_4 E_n^4 + e_n \end{aligned} \quad (式 4)$$

式(4)之平方誤差和 SSE(Sum of Squares for Error)為

$$SSE = \sum_{i=1}^n \left[ U_i - (C_0 + C_1 E_i + C_2 E_i^2 + C_3 E_i^3 + C_4 E_i^4) \right]^2 \quad (式 5)$$

利用最小平方誤差法，可得以下列多項式方程式

$$\frac{\partial SSE}{\partial C_j} = 0 \quad ; \quad j=0, 1, 2, 3 \quad (式 6)$$

經過式(6)聯立方程式解求出多項式之係數( $C_0 \sim C_4$ )，即可得傳感器線性化的輸出信號。實務上之傳感器數據採集與校正處理，可透過 PC-based 虛擬儀器和微處理器 MSP430 來達成。MSP430 微處理器有 A/D 轉換模組，可以簡化數據採集系統的硬體電路，其低功耗的特性適合長期的數據採集。PC-based 虛擬儀器可以在系統內共享軟硬體資源，提高系統性能。運用 MSP430 微處理器可設計系統的數據採集模組、儲存模組、通訊模組及電源模組，降低數據採集系統的開發成本、提高效率[7]。

根據上述熱線式風速計的工作原理，利用 PC-based 圖控程式和 MSP430 微處理器結合，可即時顯示和監控量測數據，還可對採集的數據作儲存、分析、報表輸出等處理。本研究採用之熱線式風速計的架構與訊號處理流程如圖 5 所示。其中線性校正模型之多項式係數則有賴 PC-based 控制器處理後再以通訊方式自動寫入傳感器，以達到線性化的輸出目的。

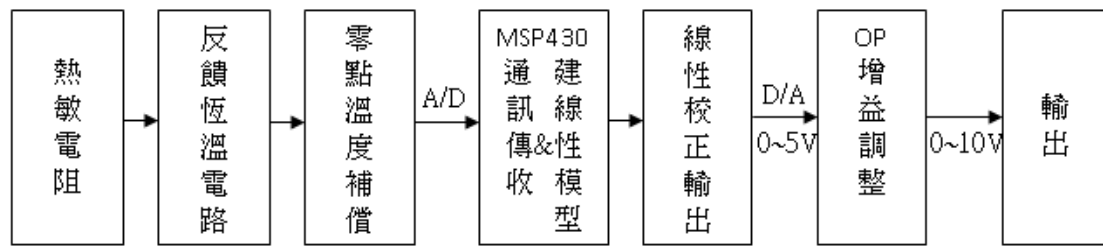


圖 5 熱線式風速計的架構與訊號處理流程

### 三、自動線性校正與品管系統架構

#### 3.1 系統硬體架構

本研究針對風速計建構自動化線性校正與品管系統，採用之待測風速計本身是由微處理器與硬體感測裝置組合而成的韌體，而檢測平台的硬體架構包括 PC-based 控制系統、DAQ 訊號擷取卡、風洞腔體、傳送裝置、電壓轉換器、浦風機控制模組與風速計載放架構。運用 DAQ 訊號擷取卡搭配圖控程式自動資料處理，擷取所需檢測值與輸出電位控制浦風機。而風速計放在固定的載具上，使風速計可以固定座標感測風速並透過電壓轉換裝置穩定電壓後輸出，最後則是透過傳送裝置來達到軟體與韌體的交握通訊。

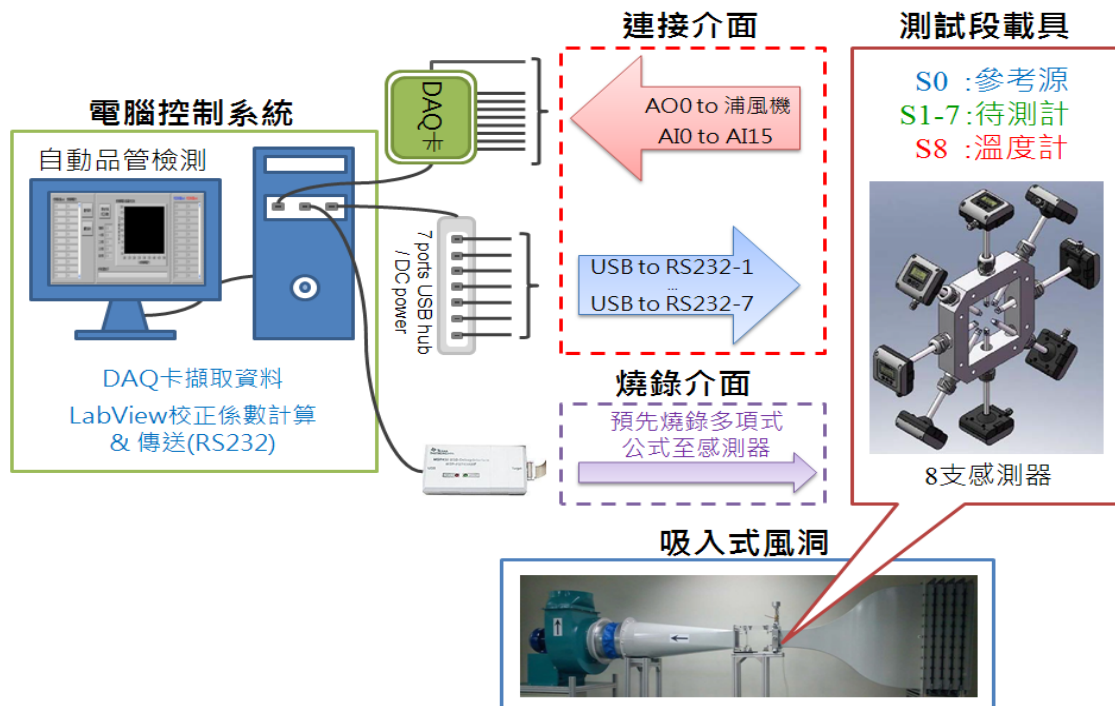


圖 6 風速計自動化線性校正與品管系統硬體組成圖

圖 6 為風速計自動化線性校正與品管系統硬體組成，由 PC-based 控制系統、DAQ 訊號擷取卡、待校正風速計 FTS64[12]、風速參考源 SS20.60[13]、MSP430 微處理器[14]、MSP430 燒錄器、測試風洞、USB hub、USB 轉 RS232 裝置等所組成。首先安裝待校正風速計至系統測試風洞中並連結所有類比與通訊界面，再使用電腦控制系統透過 DAQ 依量程規劃控制風洞之風速，將風速傳感器測量出來的風速值透過 DAQ 轉換成數位值，傳回給電腦。電腦中的圖控程式對採集到的數據進行資料分析處理，計算出校正函數並將校正係數透過 RS232 分別傳送到待校正風速計 FTS64 中的 MSP430 微處理器即完成熱線式之風速計線性校正。

#### 3.2 系統軟體架構

軟體部分則採用圖型控制人機介面，包括風洞控制、風速計訊號擷取、校正係數運算、校正傳送程式、校正與品管報表等。從圖控程式接收風速計的原始訊號，計算其校正多項式，然後將校正多項式傳送至風速計內的 MSP430 微處理器中，再經由微處理器內所建立好的線性校正模型載入各項次的係數，使得訊號透過線性校正模型達到線性化的輸出，再經由微處理器處理硬體倍率輸出。最後則是編輯各穩定時間所需的

Excel 報表，配合圖控程式呼叫寫入，達到一貫作業的自動化流程。

圖 7 所示為圖控軟體與 MSP430 微處理器的互動架構，執行校正模式系統時，一開始由圖控軟體傳送辨識碼開啟 MSP430 校正模式，圖控軟體就會輸出電位控制浦風機並量測每一個量程的校正待測點，直到所有量程結束後迴圈才會結束，並在傳送一辨識碼關閉 MSP430 校正模式。接下來就是利用採集到的數據來去做分析並計算其校正係數，傳送給 MSP430 接收做為校正用之係數，此同時會輸出一份校正報表，可由裡頭內容得知相關的校正參數與量程資料，然後當 MSP430 接收完成後會進行 check sum 的動作，確認所有資料都接收正確，就接下去進行品管檢測程式，最後由品管檢測報表中就可以得知所待測之風速計的誤差值與量程曲線。

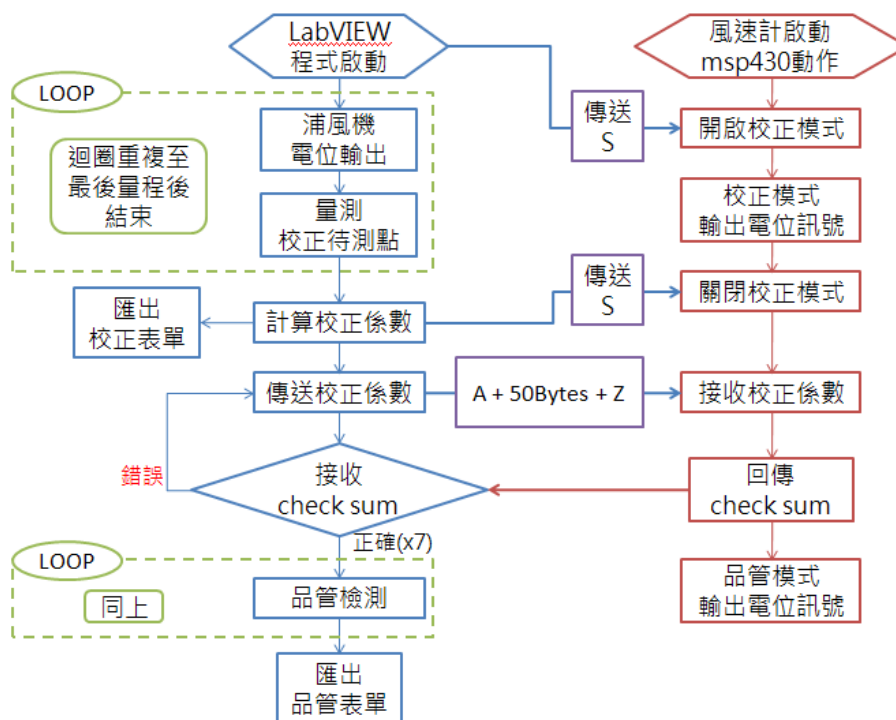


圖 7 通訊程式架構圖

本研究的軟體系統架構中，包含了三大主要的程式，分別是線性校正程式、品管程式與先校正後品管程式。校正程式與品管程式最大的差別就在於是否有計算與傳送多項式的校正係數值，而兩程式呼叫寫入的 Excel 報表也有所不同，其校正報表主要為校正電壓與參考源流量之曲線擬合圖，而品管報表則是用來觀察校正後待測物各誤差率之報表。最後先校正後品管程式則為組合前面兩者程式的完整系統流程，並同時輸出校正與品管之報表，達到完整自動化之生產作業。

本研究以順序式量程進行品質檢測，其量程規劃順序如表 1，以取樣點數 11 點為例，將量程 100% 分成 10 等分後進行風洞控制電壓輸出，其順序則是由低風速吹至高風速後再進入下一循環，直到滿足所設定循環數，程式就會進入下一個狀態。

表 1 類比輸入排程代碼

量程	第一循環	第二循環	第三循環
0%	1	21	41
10%	2	20	40
20%	3	19	39
30%	4	18	38
40%	5	17	37
50%	6	16	36
60%	7	15	35
70%	8	14	34
80%	9	13	33
90%	10	12	32
100%	11	31	51

一般的平均量程計算公式如下：

$$V_{out} = (V_{max} - V_{min}) \times Span + V_{min} \quad (式 7)$$

$V_{out}$  為量程輸出電壓、 $V_{max}$  為最大風速控制電壓值、 $V_{min}$  為最小風速控制電壓值，而  $Span$  為各量程累加比例(%)。一般量程計算是先將最大控制電壓減掉最小控制電壓後，再分成  $n-1$  等份( $n$  為總量程點數)，然後從最小的控制電壓逐漸向上累加，並由 DAQ 輸出電壓控制浦風機達到所需要的流量值(線性關係)。

由於本系統之浦風機的最小啟動電壓約為 1.24V(與系統風阻有關)，此時浦風機即有風速產生且約與控制電壓成正比，然而代表 0% 量程之  $V_{min}$  並無法確知，但在計算校正參數時必須加入輸出 0m/sec 之 0% 量程電壓  $V_{min}$ ，所以本系統利用式(8)自動將 0% 之量程(即  $V_{min}$ )加入總量程之中。此公式算出  $(V_{100\%}-V_{10\%})$  縮減一位之靈敏度，將其靈敏度與  $V_{10\%}$  相減後，即可照取樣點數比例順序輸出，程式將以 100% 量程電壓與 10% 量程電壓自動判斷輸出 0%~100% 量程之電壓，其取樣點數以變數  $n$  為代號(如  $n=11$ )。

$$V_{out} = \left[ V_{100\%} - \left( V_{10\%} - \frac{(V_{100\%} - V_{10\%})}{(n-2)} \right) \right] \times Span + \left( V_{10\%} - \frac{(V_{100\%} - V_{10\%})}{(n-2)} \right) \quad (式 8)$$

在計算校正係數時，程式需求輸入  $X$  與  $Y$  值來去建立多項式項次，並以標準源的流量值來去當作  $Y$  值，對應到待測物校正電壓的  $X$  值，帶入計算校正係數的程式裡頭，即可匯出多項式函數中  $Y(X)=aX^4+bX^3+cX^2+dX+e$  的係數值。

依照標準風速與待測電壓點數對應排列，便可繪出多項式函數圖形，並觀察其校正曲線的線性度，如圖 8。

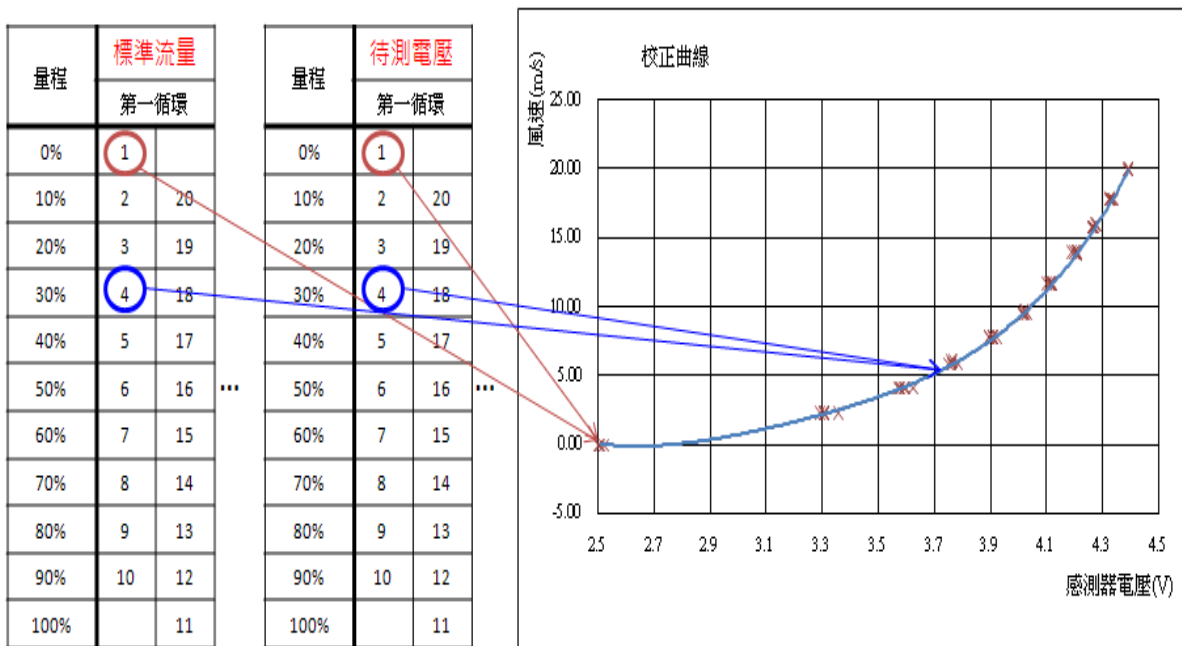


圖 8 標準風速與待測電壓對應排列多項式函數圖形

### 3.3 品管檢測報表定義

參考 IEC61298-2[8]與 GB/T 18271.2-2000 版標準[9]中測量程序與標準，本研究對待測點數值及循環數做了修正，目的為自由增加上行下行循環數及更多採樣點，平均出來的數值更有可性度，亦可更明確的知道該感測器於高流量轉低流量及低流量轉高流量的物理量變化的特性。表 2 為量測循環及待測點數目與數值定義。

表 2 量測循環及待測點數目與數值定義

測量循環數量	試驗點數量	試驗點的位置(輸入量程%)
1 或 2 或 3	6	由低到高或由高到低自行輸入
	11	
	5	

延續過去自動品管檢測系統[10、11]，先校正後再建立風速計品管檢測報表，包含參考源與風速計對應之總循環量程曲線，並繪出一份各循環的量程曲線辨識其重現度，最後依照每一上下循環的標準與實際誤差百分比，繪出對應的誤差百分比曲線，達到品質檢測功能之報表。

## 四、系統建構及結果驗證

### 4.1 開迴路吸入式風洞實驗機構

本次研究以熱線式風速計 FTS64[12]為待測物，此風速計乃利用電橋平衡理論作為基礎，找出硬體適當的零點位置，並透過 MSP430 晶片內之線性校正模型，將外部感測電壓經多項式校正後以提高輸出精度，並利用微處理器內部程式設計切換校正與品管模式，使得風速計在做完校正處理後可以立即進行品管檢測流程。

本次研究首先開發開迴路吸入式風洞實驗機構如圖 9 所示，整套系統流程分別從啟動浦風機，設定所要求的風速後，經由風洞將風速穩定至測試區段進行待測物感測數據分析，最後經由擴散段至出風口排出風速，可達到 60m/sec 穩定風速的實驗機構，設計流程可參考[11]。



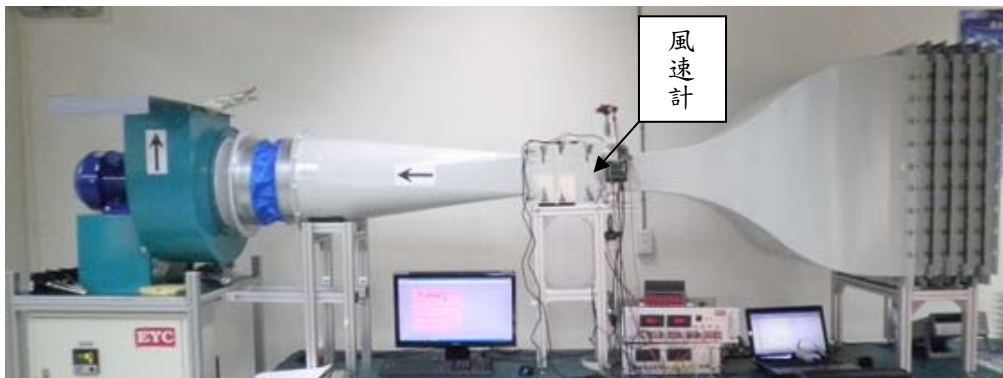


圖 9 開迴路吸入式風洞實驗機構

## 4.2 實驗步驟

熱線式風速計自動校正與品管檢測系統兼具自動校正與品管檢測功能，可依需要選擇。風速計安裝妥當後，若選完整流程則由電腦的圖控軟體依量程以電壓控制浦風機產生風速，同樣再由 DAQ 卡擷取每支風速計之電壓值，而後由電腦的圖控程式收集電壓值來去計算其校正係數並透過硬體連接 RS232 傳送係數給風速計中的 MSP430，達到線性校正之目的，校正完後再做一次品管檢測，並輸出其 Excel 報表即完成風速計自動校正與檢測。

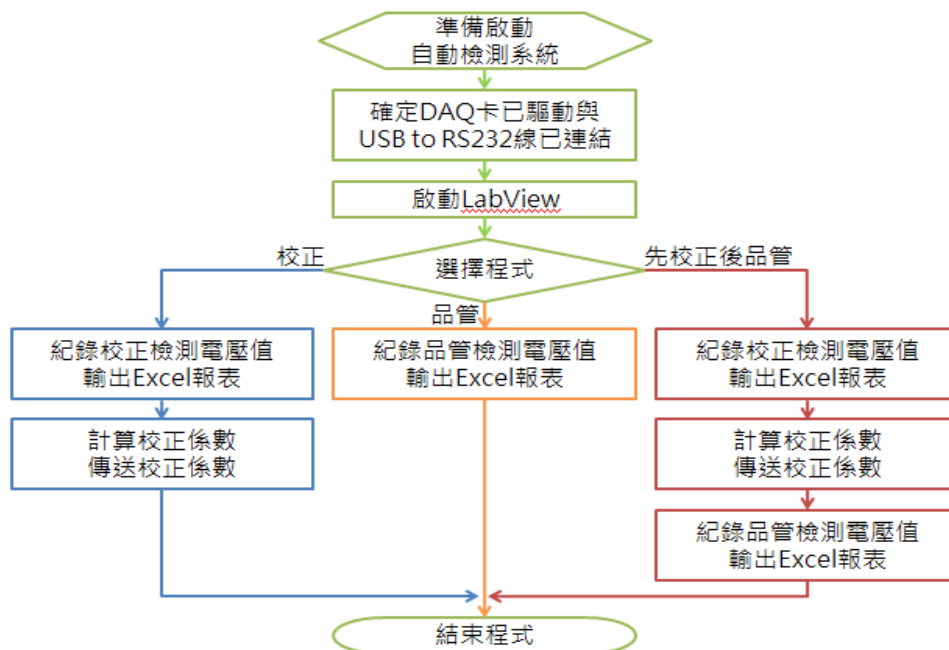


圖 10 熱線式風速計線性校正與品管程式流程圖

熱線式風速計線性校正與品管實驗步驟如下：首先須確認類比數位資料擷取 DAQ 卡與 USB to RS232 裝置已正確連結，接下來便將標準風速計與待測風速計訊號載入由圖控程式撰寫而成的熱線式風速計線性校正與品管系統。程式一開始會出現選擇視窗，尋問使用者需要進行哪一種程式，其程式主要分成 3 大部分，分別是校正模式、品管模式與先校正後品管模式，其校正程式在檢測完數據後會與 MSP430 做出互動傳送與接收的部分，並在校正完成時輸出校正報表觀看其校正擬合曲線；而品管程式則是以量測待測風速計數據為目的，當品管完成時可以藉由報表觀察並比較各待測計量程誤差值與總量程曲線圖；其先校正後品管程式是將兩大程式組合，先行對風速計作校正後立即進行品管檢測，完成整體熱線式風速計校正與品管自動化生產流程，以上實驗流程說明如圖 10 所示。

### 4.3 熱線式風速計自動校正與品管檢測結果

本研究之檢測實驗樣本(一)為 FTS64-20[12]、標準源為 ss20.60[13]，總量程為 0-20m/s、循環數為 3 循環 11 點、取樣間隔為 10%、每一間隔定速 40 秒、穩定 30 秒後以最後 10 秒之 10 筆平均作為實驗數據。由圖 11 中可以看出感測器校正電壓與參考源輸出風速所繪出之校正曲線與多項式。校正后感測器之品管電壓與對應之風速線性曲線如圖 12，其線性度已大幅改善。

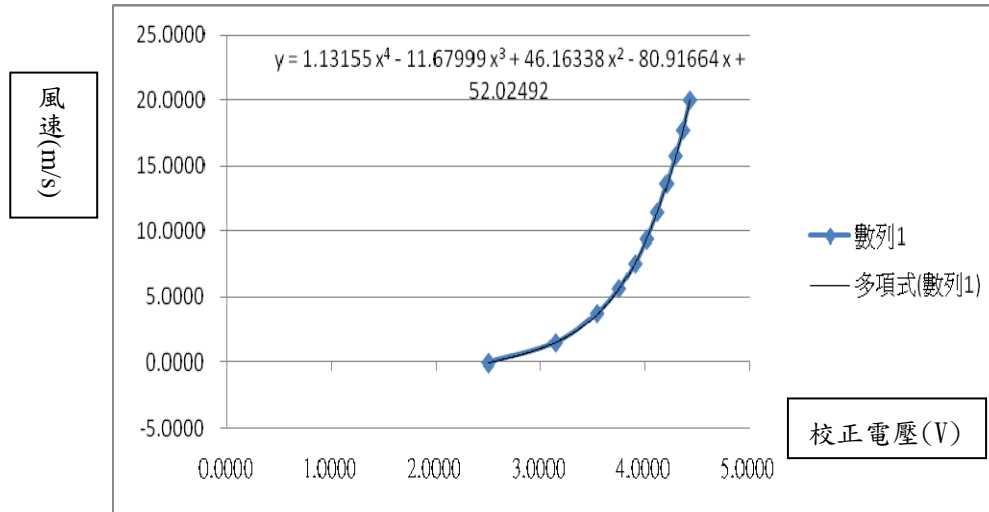


圖 11 校正曲線(20m/s)

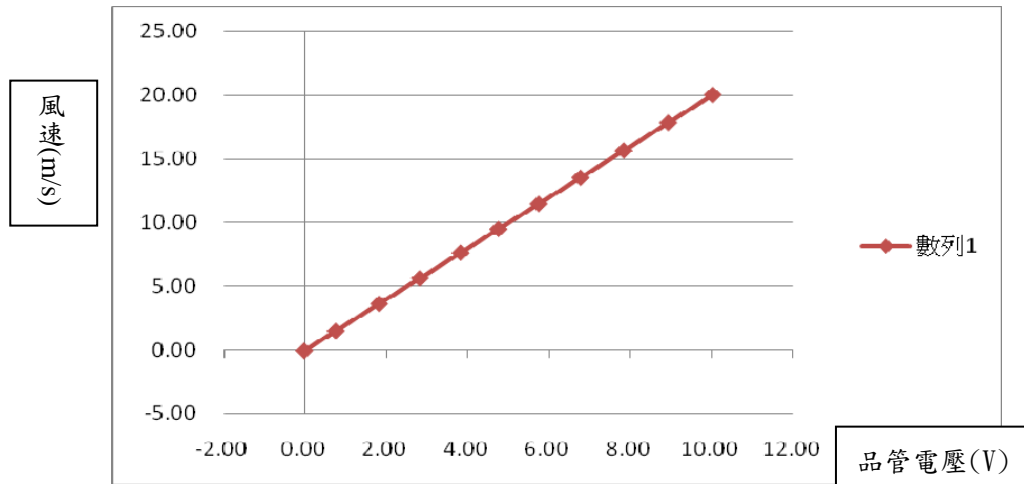


圖 12 線性校正後之電壓對應風速曲線(20m/s)

FTS64 熱線式風速計經校正再品管作業，以標準源風速 0-20m/s 算出標準平均量程 0-100%，並以 3 循環製作其輸出誤差一覽表，接下來畫出誤差值曲線如圖 13，然後從誤差表底下看出最大正負誤差、最大回差與最大不重複性，詳細之品質指標計算方式可參考[11]。

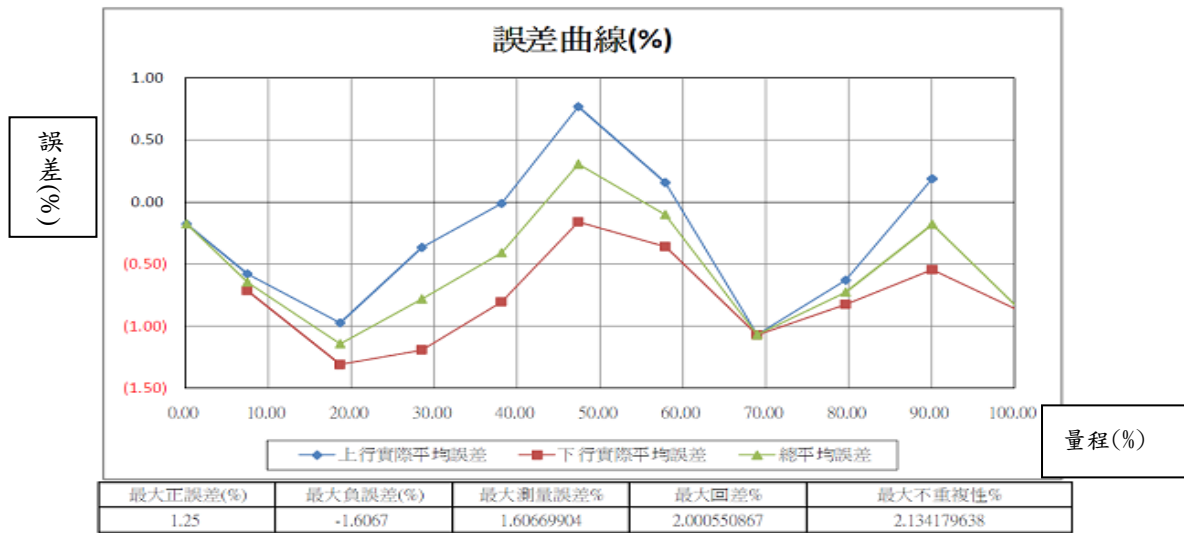


圖 13 線性校正後之品管誤差曲線(20m/s)

本研究之檢測實驗樣本(二)為 FTS64-40[12]、標準源為 ss20.60[13]，總量程為 0-40m/s、循環數為 3 循環 11 點、取樣間隔為 10%、每一間隔定速 40 秒、穩定 30 秒後以最後 10 秒之 10 筆平均作為實驗數據。由圖 14 中可以看出感測器校正電壓與參考源輸出風速所繪出之校正曲線與多項式。校正后感測器之品管電壓與對應之風速線性曲線如圖 15，其線性度已大幅改善。

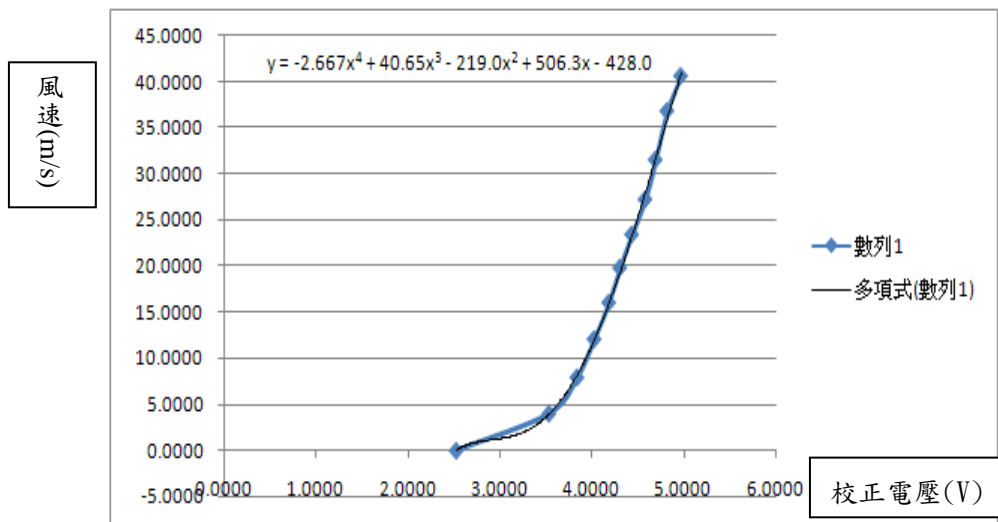


圖 14 校正曲線(40m/s)

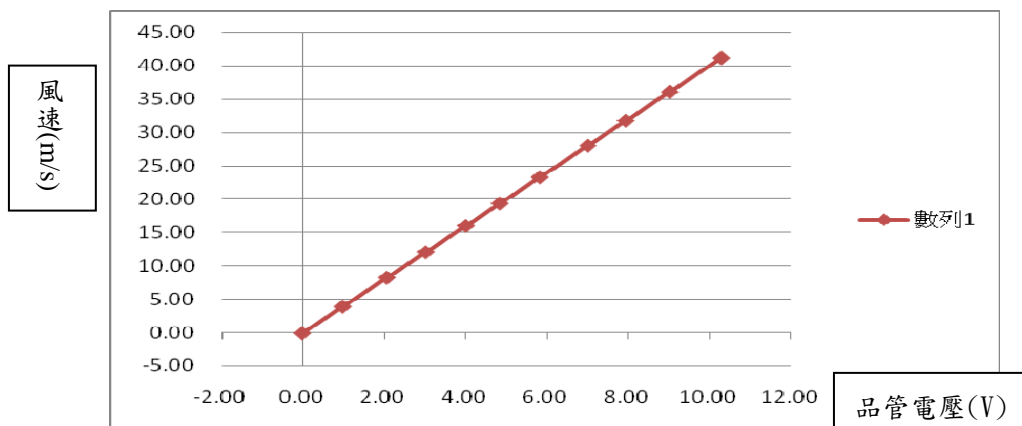


圖 15 線性校正後之電壓對應風速曲線(40m/s)

FTS64 熱線式風速計經校正再品管作業，以標準源風速 0-40m/s 算出標準平均量程 0-100%，並以 3 循

環製作其輸出誤差一覽表，接下來畫出誤差值曲線如圖 16，然後從誤差表底下看出最大正負誤差、最大回差與最大不重複性，詳細之品質指標計算方式可參考[11]。

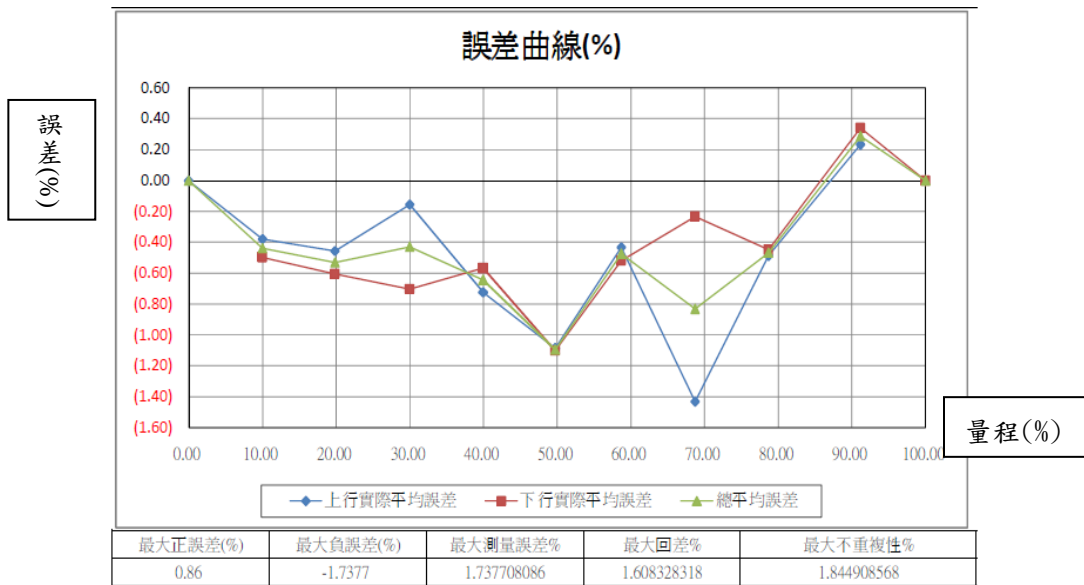


圖 16 線性校正後之品管誤差曲線(40m/s)

## 五、結論

本研究針對熱線式風速計進行自動化線性校正與品管檢測系統研製，所獲結論如下：

- 1、本系統可利用先校正後自動作品管，一併完成校正與品管的整體流程，達到時間上的縮短與自動化的生產。
- 2、熱線式風速計充分利用 MSP430 內部功能模組，利用回歸分析做訊號的非線性化校正，有效解決了熱線式風速計的非線性問題，提升產品品質。
- 3、經以 20m/s 與 40m/s 熱線式風速計進行線性校正與品質檢測，可達到誤差率在 1.5% 以內。
- 4、本系統有效導入自動化作業流程，節省人工在校正與品管檢測時間，操作人員只要透過人機介面將相關參數輸入，點擊啟動鈕，即可將該校正/檢測的數值顯示於人機介面上，直到所有待測點檢測完畢，於電腦上便可觀看輸出的檢測報表，並可自行定義檔名另存至電腦中的資料夾，可作為資料歸檔用。
5. 本系統亦可作為一般風速計之自動化品管檢測與產品分級用。

## 六、誌謝

感謝宇田控制科技股份有限公司[5]的產學合作計畫贊助，並提供相關設備與技術支援。

## 七、參考文獻

- [1] 杜士鵬，「熱線式流量傳感器原理與應用」，瀋陽工程學院院報，第三卷，第四期，第354-356頁 (2007)。
- [2] King, L.V, “On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires, with Applications to Hot-Wire Anemometry,” Phil. Trans. Roy. Soc. A214, pp.373-432 (1914).
- [3] K. D. Jensen, “Flow Measurement,” J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., Vol. XXVI, No. 4, pp.400-419 (2004).
- [4] 姬建偉、李平、宋家友，「鉑電阻高精度測量和非線性校正的研究」，鄭州大學信息工程學院(2007)。

- [5] 宇田控制科技: <http://www.yuden.com.tw> ,(2012)。
- [6] 婁陽,「熱線式空氣流量傳感器的檢測與診斷」,中小企業管理與科技,第三十四期,第244頁(2011)。
- [7] 劉克虎、周杏鵬,「基於MSP430羅茨氣體流量積算儀的設計與實現」,自動化與儀表,第二十五卷,第四期,第25-29頁 (2011)。
- [8] IEC International standard, “IEC 61298-2:E2 PROCESS MEASUREMENT AND CONTROL DEVICES –GENERAL METHODS AND PROCEDURES FOR EVALUATING PERFORMANCE –Part 2: Tests under reference conditions”, 2008.
- [9] 中華人民共和國國家質量技術監督局,「GB/T 18271.2-2000過程量測和控制裝置通用性能評定方法與程序 第2部分:參比條件下試驗」, 2001.
- [10] 周佳德、蔡明忠、朱仁誠,“溫濕度感測器自動化品管檢測系統研發,” 機械月刊自動化專輯 38 卷第 07 期, pp.26-44 , 2012 年 7 月.
- [11] 關玉蘋、蔡明忠、朱仁誠、朱信燁,“風速計自動品管檢測系統之研製,” 2012 年智慧自動化產業期刊 NO.2, pp.35-45,2012 年九月.
- [12] 鎰田科技股份有限公司, 自動化儀表/控制元件, <http://www.eyc-tech.com/>, (2012).
- [13] SCHMIDT ss20.60: <http://www.schmidttechnology.com>, (2012).
- [14] Texas Instruments MSP430 : <http://www.ti.com>, (2012).
- [15] Advantech DAQ: <http://www.advantech.com>, (2012).