

微控制器超取樣量測及快速演算於 低成本乾濕球濕度計之應用

李健¹，鍾瑞永²，楊清富³

1. 行政院農業委員會台南區農業改良場助理研究員，本文通訊作者
2. 行政院農業委員會台南區農業改良場副研究員
3. 行政院農業委員會台南區農業改良場助理研究員

摘 要

本研究提出一個低成本之乾濕球濕度計的設計，其採用小顆且低成本的半導體溫度感測頭及低階微控制器。利用微控制器在極短間隔時間內對溫度感測器作超取樣量測獲得大量數據，再將資料轉化成高解析度且低雜訊的量測值，量測值經標準溫度計校正後可達到精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以內。由於濕球溫度探頭尺寸極小為 $5 \times 5 \times 4 \text{mm}^3$ ，因此可利用 0.35W 耗電量且 $25 \times 25 \text{mm}^2$ 截面積之微型風扇進行通風。

在濕度快速演算部分，推導出飽和蒸氣壓五階多項式近似公式，使得演算能在一般低成本微控制器中快速執行。根據與 Goff-Gratch 公式的誤差分析，在 $0^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 溫度範圍內以此方法得到相對濕度準確度能達到 ± 0.02 以內，而蒸氣壓差準確度則在 $\pm 0.002 \text{mbar}$ 以內，其計算速度及準確度皆優於一般常用的馬格努斯式子。藉由微控制器的編程，濕度計可將資料以指定格式傳送到 micro-SD 卡作儲存或顯示在文字 LCD 上，與兩個精確度為 $\pm 2\%$ 之參考感測器相互比較，其相對濕度差異可達約 $\pm 2\%$ 以內。

關鍵詞：超取樣、乾濕球濕度計、濕球、相對濕度、飽和蒸氣壓

AN APPLICATION OF OVERSAMPLING AND FAST COMPUTATION ON MCU FOR THE LOW COST PSYCHROMETER

Chien Li¹, Jui-Yung Chung², Ching-Fu Yang³

1. *Tainan District Agriculture Research and Extension Station assistant mechanist, Council of Agriculture, Corresponding Author.*
2. *Tainan District Agriculture Research and Extension Station associate mechanist, Council of Agriculture.*
3. *Tainan District Agriculture Research and Extension Station assistant mechanist, Council of Agriculture.*

ABSTRACT

A low-cost design of psychrometer based on cheap temperature sensor and MCU (microcontroller unit) is proposed, where a single high-resolution and low-noise signal of sensor is converted from large numbers of data by oversampling. Through the calibration by a standard thermometer, the accuracy of $\pm 0.1^\circ\text{C}$ for temperature reading is achieved. Because the wet bulb size of $5 \times 5 \times 4 \text{mm}^3$ is small, a mini-fan with 0.35W power consumption can effectively ventilate the wet bulb.

In terms of fast computation of humidity, the 5th-order polynomial approximation equation for saturation vapor pressure is derived, which makes the calculation can be executed fast on the microcontroller. The error analysis with the Goff-Gratch equations shows that the accuracy for relative humidity reading is within ± 0.02 at $0^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ range, and the accuracy for vapor pressure deficit is within $\pm 0.002 \text{mbar}$. The speed and accuracy of this polynomial are both better than the common Magnus equation. By programming in the microcontroller, the data can be displayed on a text LCD and stored in a micro-SD card with specified format and time interval. Through the comparison test along with calibrated humidity sensor of $\pm 2\%$ accuracy, the difference is within $\pm 2\%$ in relative humidity reading.

Keywords: Oversampling, Psychrometer, Wet Bulb, Relative humidity, Saturation Vapor Pressure

一、前言

具有高精度及可靠度之濕度感測器對於環境濕度的監控及控制有著很重要的應用。目前市面上最普遍的濕度感測器皆基於濕度感應材料 (Chen *et al.*, 2005; Rittersma, 2002)，其利用了感應材料的電容值、電阻或機械應變隨濕度變化的機制。然而，也因為濕度感應材料必須直接暴露於空氣中，其在高溫及高濕的環境中會隨著時間快速老化 (Matsuguchi *et al.*, 2000; Nahar, 2000)。一個準確且高可靠度之濕度感測器將可有效降低置換維護及校正成本。

乾濕球濕度計 (dry/wet-bulb psychrometer) 或冷卻鏡面 (chilled mirror dew-point hygrometer) 露點計皆採用溫度感測器作為訊號輸入 (Wiederhold, 1997)，由於溫度感應器能夠封裝隔離，因此無濕度感應材料受外界環境影響而老化問題。以上兩者皆需要使用風扇通風及定期簡單

清理，乾濕球濕度計需要加水及清洗或更換棉球，冷卻鏡面露點計則需要清理鏡面。雖然冷卻鏡面擁有最高等級的可靠度及精確度，但其本身複雜迴路控制硬體成本相當高，並不適用於大規模農業領域。

本研究目標為一個低成本乾濕球濕度計的設計，利用微控制器 (microcontroller unit, MCU) 內建之類比至數位轉換器 (analog to digital converter, ADC) 來執行超取樣量測 (oversampling) (Candy *et al.*, 1962)，其可有效提升低成本但高雜訊的溫度感測器輸出至高解析度。再利用此溫度量測技術獲得乾濕球溫度值，並於微控制器內以本研究推導出的飽和蒸氣壓五階多項式近似公式進行快速運算得出相對濕度 (relative humidity, RH) 及蒸氣壓差 (vapor pressure deficit, VPD)。濕度計可將乾濕球溫度及所計算出相對濕度及蒸氣壓差顯示於文字 LCD 屏幕，並可將資料儲存於 micro-SD 卡中。濕度計所用的組成零件皆是取得容易且低

成本的規格件，其電路設計相當簡易且耗電量低，希望未來作為無線感測及控制網路的感測模組。

二、材料與方法

(一) 近似公式推導及理論誤差分析

空氣中的水份含量可以用多種方式來表示，最常用的就是相對濕度(relative humidity, RH)，其表示式為

$$RH = \frac{p}{p_s} \quad (1)$$

其中 p 是目前空氣中水份的氣體分壓，而 p_s 是在特定溫度下，空氣能容許的最高水份的分壓。在本文中將 p 稱為實際蒸氣壓(actual vapor pressure, AVP)，而 p_s 為飽和蒸氣壓(saturation vapor pressure, SVP)。

另一種與空氣水份含量有關的表示式為蒸氣壓差(vapor pressure deficit, VPD)，其表示式為

$$VPD = p_s - p \quad (2)$$

蒸氣壓差是飽和蒸氣壓與實際蒸氣壓的差值，此值可視為液態水份蒸散至空氣中的一種勢能(potential)，亦為單位質量空氣可再吸收之水蒸氣量。在空氣乾燥的情況下，蒸氣壓差愈高，液態水份蒸散速度愈快；這就好比水管水壓與其流速的關係，因此蒸氣壓差 VPD 在估算植物水分蒸散量上，有著重要應用。

在固定大氣壓力下，空氣水份的飽和蒸氣壓 p_s 會是溫度 T 的唯一函數；而此函數公式將會是以乾濕球溫度去計算相對濕度 RH 或蒸氣壓差 VPD 的重要基礎(Gibbins, 1990)。空氣實際蒸氣壓 p 與乾濕球溫度 T_{dry} 及 T_{wet} 的關係可表示為(Sargent, 1980)

$$p_s|_{T=T_{wet}} - p = \alpha P_{atm}(T_{dry} - T_{wet}) \quad (3)$$

其中 α (Psychrometric Constant) 是與濕球通風蒸散環境有關的常數，在足夠通風情況下， α 值可

視為常數 $6.53 \times 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$ ，而 P_{atm} 為大氣壓力，其值在海平面上為 1013.25mbar (毫巴)。

濕球微觀表面的水份蒸氣壓會處於飽和狀態，其可表示為 $p_s|_{T=T_{wet}}$ 。式子(3)左項為濕球表面蒸氣壓與環境實際蒸氣壓的差值，其物理意義為濕球表面水份質量蒸散率的勢能(potential)；而式子(3)右項為濕球與環境的溫度差，其代表熱量傳遞率的勢能。因此式子(3)描述了熱量由環境傳遞到濕球後，透過水份蒸發以潛熱形式又回到環境的平衡關係(Simões-Moreira, 1999)。

過去一百多年來，有許多研究的重點在飽和蒸氣壓 p_s 與溫度 T 的數學關係式(Gibbins, 1990)，在眾多的數學公式中，Goff-Gratch 公式(Goff & Gratch, 1945)被世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)建議在溫度範圍 $-100^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 內可作為參考標準(WMO, 2008)，其表示如下：

$$\log\left(\frac{p_s(T)}{P_{atm}}\right) = -7.90298(T' - 1) + 5.02808 \log T' - 1.3816 \times 10^{-7} \left[10^{11.344(1-1/T')} - 1\right] + 8.1328 \times 10^{-3} \left[10^{-3.49144(T'-1)} - 1\right] \quad (4)$$

其中 $T' = 373.16 / (273.16 + T)$ 、 $P_{atm} = 1013.246$ mbar (毫巴)

由於極其複雜的 Goff-Gratch 公式所造成執行運算上的困難。世界氣象組織 WMO 建議在溫度範圍 $-45^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 內使用較為簡易的馬格努斯(Magnus)近似式(WMO, 2008)，其最新公式版本如下：

$$\bar{p}_s(T) = 6.112 \exp\left(\frac{17.62T}{243.12 + T}\right) \quad (5)$$

其中在電腦的運算上，式子(5)的指數函數需表示為以下計算式：

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \quad (6)$$

為了達到精確指數計算值，式子(6)所需的階數 n 需達到十幾階以上，對於一般低成本類型

的為微控制器來說，這似乎會占用太多記憶體資源於程式編碼上，而限制了微控制器執行其他複雜作業的能力。之前的研究(Huang *et al.*, 2013)有結合尋找表(lookup table)及內插計算，然而建立尋找表依然會耗費大量記憶體來儲存數據。之前研究(Lowe, 1977)有提出飽和蒸氣壓 $p_s(T)$ 在溫度範圍 $-50^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 內的六階近似多項式可有效率解決數值運算上的問題，後來另有研究指出(Flatou *et al.*, 1992)，若要在更廣溫度範圍 $-85^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 內得採用高達八階近似多項式以達到足夠精確度。

事實上一般民生或農業應用所需溫度範圍大約只有 $-5^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 以內，本研究以 Goff-Gratch 公式為基礎，針對此溫度範圍推導出飽和蒸氣壓五階近似多項式。假設此五階近似多項式形式如下：

$$\bar{p}_s(T) = a_5 T^5 + a_4 T^4 + a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0 \quad (7)$$

其中 $a_0 \sim a_5$ 為基於目標資料所求得之特徵係數，藉由選取分佈於溫度範圍內的 $n+1$ 個資料點則可得出此範圍的 n 階近似多項式。假設資料點為六個不同溫度 T_0, T_1, \dots, T_5 的 Goff-Gratch 飽和蒸氣壓 $p_s(T_0), p_s(T_1), \dots, p_s(T_5)$ ，則五階近似多項式的特徵係數為：

$$\begin{matrix} a_5 \\ a_4 \\ \vdots \\ a_0 \end{matrix} = \begin{bmatrix} T_0^5 & T_0^4 & \cdots & 1 \\ T_1^5 & T_1^4 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_5^5 & T_5^4 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_s(T_0) \\ p_s(T_1) \\ \vdots \\ p_s(T_5) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式子(7)及(8)事實上也可視為拉格朗日插值法(Lagrange interpolation)的矩陣表示式。

若根據 Goff-Gratch 公式所選擇資料點的溫度為 $-5, 7, 19, 31, 43, 55^{\circ}\text{C}$ ，則依式子(7)及(8)所得出之飽和蒸氣壓五階近似多項式

$$\begin{aligned} \bar{p}_s(T) &= 2.785 \times 10^{-8} T^5 + 2.697 \times 10^{-6} T^4 + 2.715 \times 10^{-4} T^3 \\ &\quad + 1.424 \times 10^{-2} T^2 + 0.444 T + 6.109 \\ &= (((0.02785 T + 2.697) T + 271.5) T + 14240) \\ &\quad \cdot T + 444000) T \times 10^{-6} + 6.109 \end{aligned} \quad (9)$$

其中下項為方便程式編碼運算之因數式(factored

form)

若以 Goff-Gratch 公式(4)為比較基準，而五階多項式(9)及馬格努斯近似式(5)的誤差百分比值計算定義為：

$$\text{error} = \frac{\bar{p}_s(T) - p_s(T)}{p_s(T)} \times 100\% \quad (10)$$

其中 $p_s(T)$ 由 Goff-Gratch 公式(4)所提供。

由繪於圖 1 的誤差百分比值分佈可看出整體而言本研究得出之五階近似多項式在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 溫度範圍內具有較優異的準確度，其平均誤差小 30 倍以上，此外也具有較高運算效率。在計算相對濕度方面，將式(3)帶入式(1)即可求得相對濕度 RH 與乾濕球溫度 T_{dry}, T_{wet} 的關係，如下式所示：

$$RH = \frac{p_s|_{T=T_{wet}} - \alpha P_{\text{atm}}(T_{dry} - T_{wet})}{p_s|_{T=T_{dry}}} \quad (11)$$

圖 2 顯示在乾濕球溫度差 $T_{dry} - T_{wet}$ 為 1、2、3、4、5 $^{\circ}\text{C}$ 時，以 Goff-Gratch 公式(4)帶入式(11)所計算出之相對濕度值，並以此為比較基準，則圖 3 為分別改以五階近似多項式(9)及馬格努斯近似式(5)取代 $p_s(T)$ 帶入式(11)時，所算相對濕度值減去圖 2 結果的誤差。從圖 3 可已明顯看出，乾濕球溫度差 $T_{dry} - T_{wet}$ 愈大時，相對濕度誤差愈大。此外當氣溫於 10°C 以下，五階多項式的計算誤差會明顯上升。在 $0^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 溫度範圍內，五階多項式能達到 ± 0.02 以內的相對濕度誤差，而馬格努斯近似式只能達到 ± 0.1 。

在計算蒸氣壓差方面，將式(3)帶入式(2)即可求得蒸氣壓差 VPD 與乾濕球溫度 T_{dry}, T_{wet} 的關係，如下式所示：

$$\begin{aligned} VPD &= p_s|_{T=T_{dry}} - p_s|_{T=T_{wet}} \\ &\quad + \alpha P_{\text{atm}}(T_{dry} - T_{wet}) \end{aligned} \quad (12)$$

圖 4 顯示在不同 $T_{dry} - T_{wet}$ 下，Goff-Gratch 公式(4)帶入式(12)所計算出之蒸氣壓差 VPD，將圖 4 分佈曲線旋轉 180° 度後，趨勢會非常接近圖 2 的相對濕度 RH 分佈曲線。圖 5 顯示分別以五

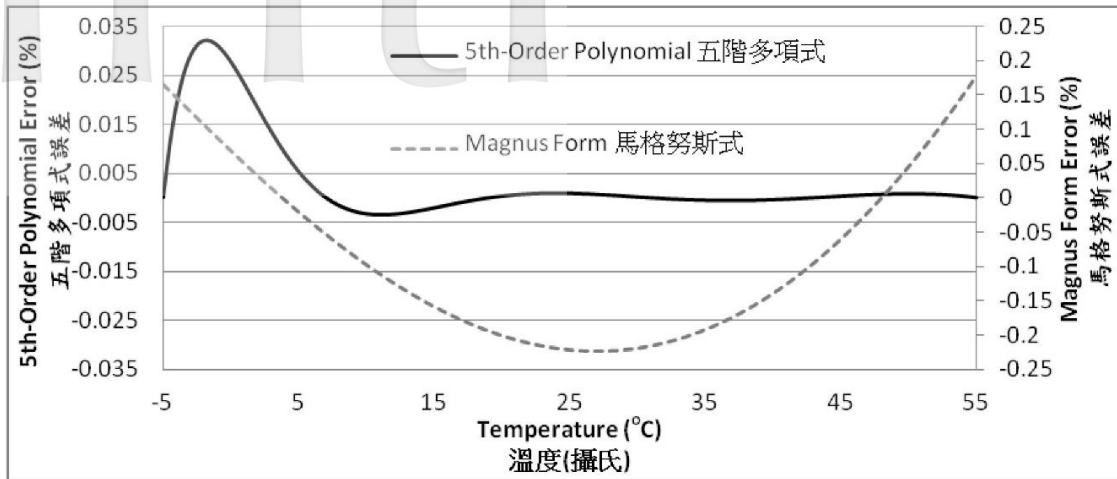


圖 1 五階近似多項式及馬格努斯近似式對 Goff-Gratch 公式的飽和蒸氣壓誤差百分比值
 Fig.1 Saturation vapor pressure error percentage for 5th-order polynomial and Magnus form with Goff-Gratch equation

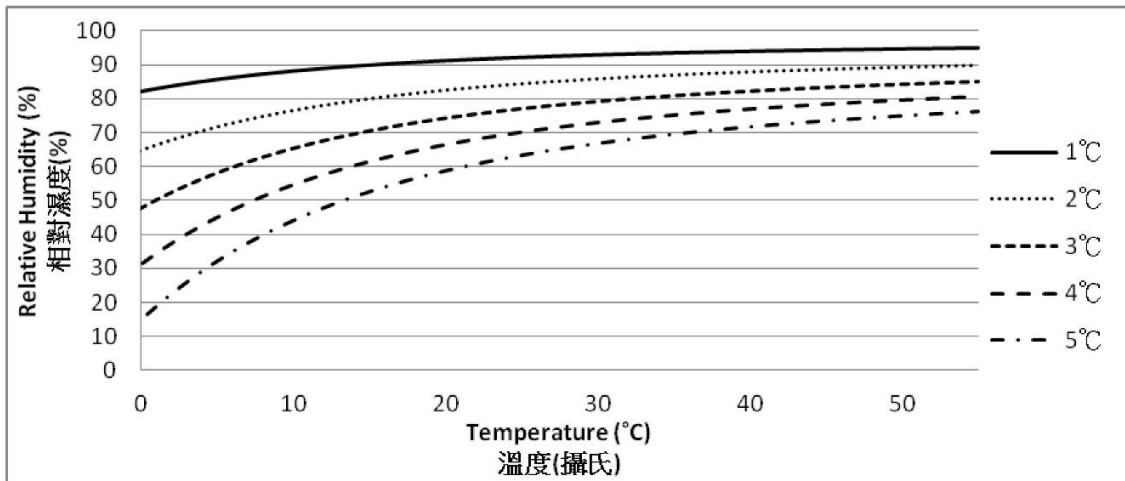


圖 2 乾濕球溫度差 $T_{dry} - T_{wet}$ 為 $1^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 時，基於 Goff-Gratch 公式所算出之相對濕度
 Fig.2 Relative humidity based on Goff-Gratch equation with $T_{dry} - T_{wet}$ from 1°C to 5°C

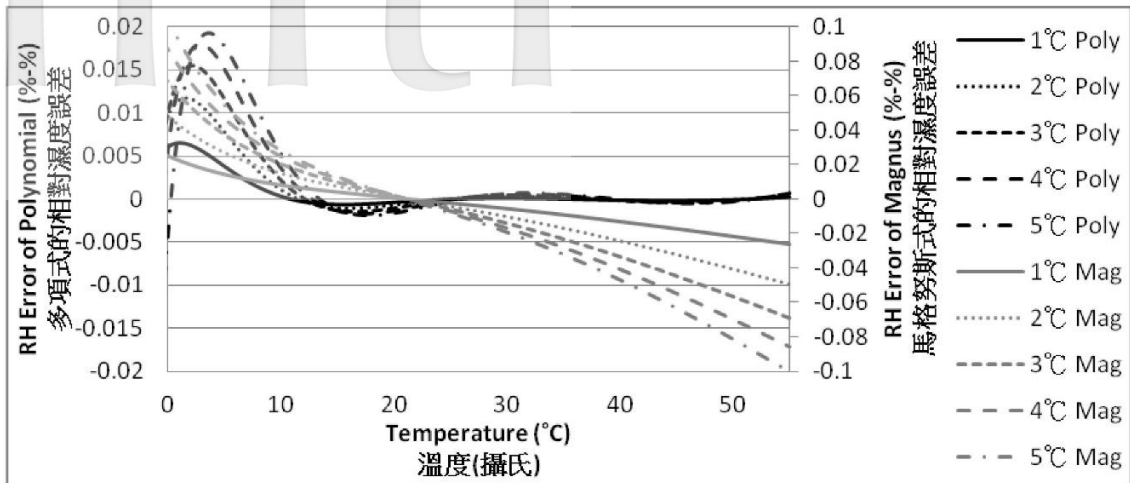


圖 3 在不同 $T_{dry} - T_{wet}$ 下，五階近似多項式與馬格努斯近似式所算出之相對濕度誤差
 Fig.3 Relative humidity error on different $T_{dry} - T_{wet}$ for 5th-order polynomial and Magnus form

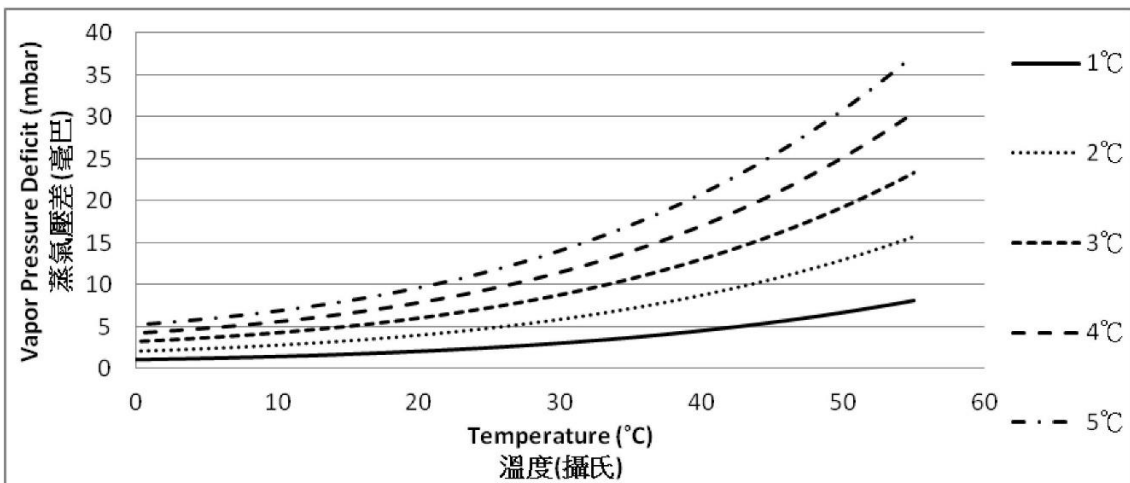


圖 4 乾濕球溫度差 $T_{dry} - T_{wet}$ 為 $1^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 時，基於 Goff-Gratch 公式所算出之蒸氣壓差
 Fig.4 Vapor pressure deficit based on Goff-Gratch equation with $T_{dry} - T_{wet}$ from 1°C to 5°C

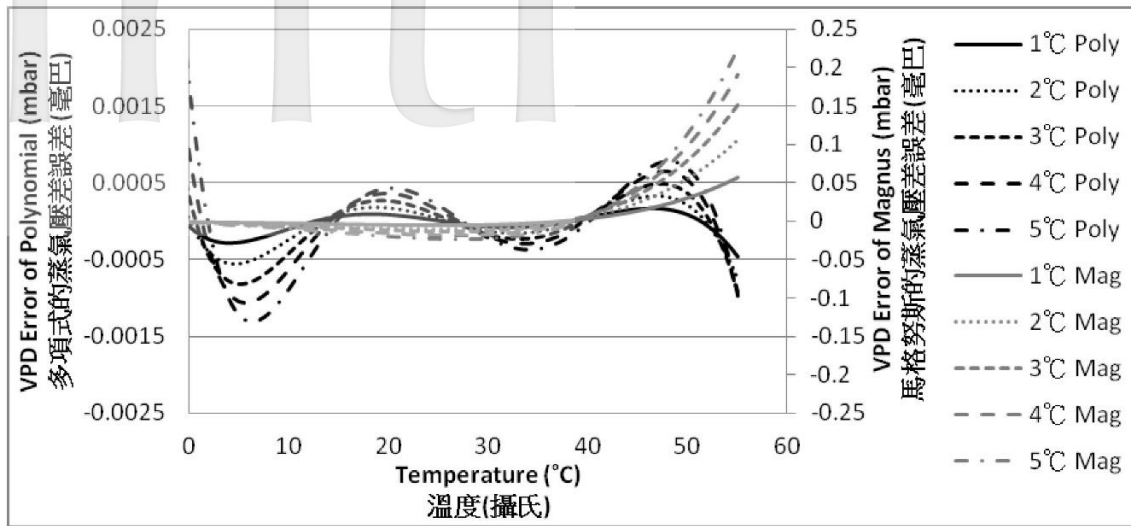


圖 5 不同 $T_{dry} - T_{wet}$ 下，五階近似多項式與馬格努斯近似式所算出之蒸氣壓差值誤差
 Fig.5 Vapor pressure deficit error on different $T_{dry} - T_{wet}$ for 5th-order polynomial and Magnus form

階近似多項式(9)及馬格努斯近似式(5)取代 $p_s(T)$ 帶入式(12)時，所算蒸氣壓差 VPD 減去圖 4 結果之誤差，在 $0^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 溫度範圍內，五階多項式能達到 $\pm 0.002\text{mbar}$ 以內的蒸氣壓差誤差，而馬格努斯近似式只能達到 $\pm 0.2\text{mbar}$ 。從以上分析可明顯看出本研究所採用的五階近似多項式在計算速度及準確度上皆優於傳統常用之馬格努斯近似式。

(二)超取樣量測原理與模擬

超取樣(oversampling)為類比至數位轉換器(analog to digital converter, ADC)在固定時間間隔內取得 k 倍的數據量並轉換成低雜訊且高解析度的單筆數據(Candy *et al.*, 1992)，亦即提高取樣頻率 k 倍來改善數據品質。其基本原理為降低雜訊(noise)對訊號的干擾，假設雜訊的頻譜平均分佈於所有頻帶(band)。根據數位訊號處理的理論(Lathi, 2009)，如圖 6 所示若提高取樣頻率 k 倍至 $k \cdot f_s$ ，則在頻譜上其雜訊能量會推向高頻區域(noise shaping)，使雜訊振幅為原先取樣頻率 f_s 的 $1/k$ 。因此提高取樣頻率在頻譜上會減低雜訊

對訊號的干擾，並使數據在數位濾波後可還原至高解析度訊號。

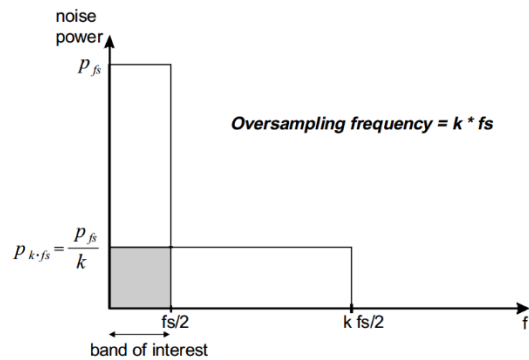


圖 6 提高取樣頻率 k 倍會使雜訊振幅為原先取樣頻率的 $1/k$

Fig.6 The noise amplitude can be k -fold reduced by increasing sampling rate

超取樣技術能在不依靠濾波電路的情況下有效解決嚴重雜訊的干擾外，其亦可降低類比至數位轉換器(ADC)的量化(Quantization)誤差(Candy

et al., 1992), 進而增加量化位元解析度(bit resolution)。假設超取樣率(Oversampling Ratio)為 k 倍, 則其可提升一個 10-bit ADC 至 $(10+0.5 \log_2 k)$ -bit, 亦即 $k=1024$ 時, 可提升成為一個 15-bit ADC。

在接下來的部分將模擬分析超取樣技術如何有效增強 ADC 數據的解析度, 如圖 7 所示假設一個週期 5 秒且振幅 1V 的正弦波被具有標準差

為 0.3 的高斯分佈雜訊干擾。在取樣時間間隔為 0.64 秒的情況下, 一個 3-bit ADC 輸出的數據顯示於圖 8。由圖可看出雜訊嚴重影響到 ADC 輸出訊號, 假設現在 ADC 以時間間隔 0.01 秒進行超取樣, 並將取樣後的數據每 64 筆進行平均得出一筆新數據, 事實上求平均的程序可視為在執行數據的數位濾波。ADC 超取樣數據及平均後的新數據繪於圖 9, 模擬的結果顯示超取樣技術

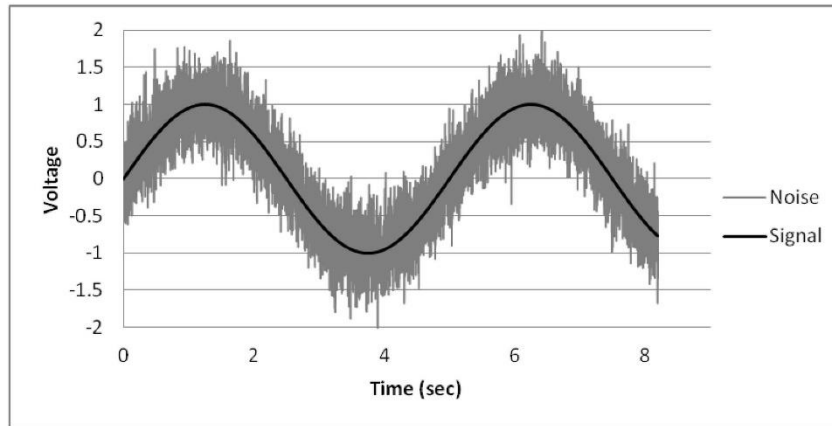


圖 7 週期 5 秒且振幅 1V 的正弦波疊加上標準差為 0.3V 的高斯分佈雜訊

Fig.7 A sinusoidal wave of 5 sec period and 1V amplitude superimposed with a Gaussian noise of 0.3V standard deviation

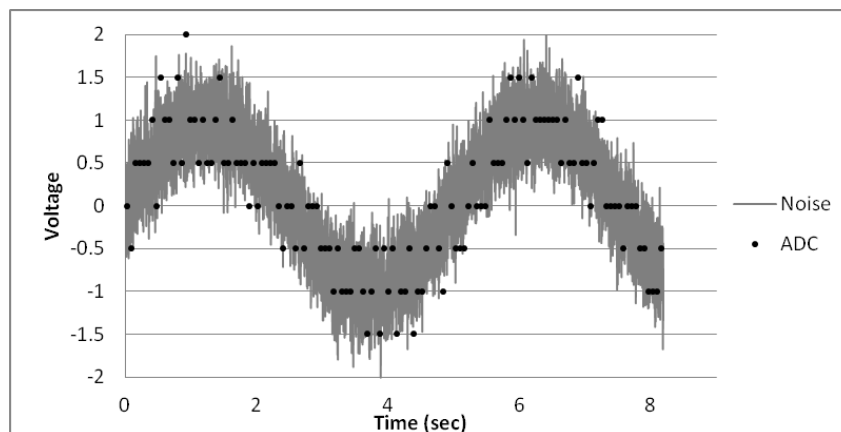


圖 8 取樣間隔 0.64 秒下, 3-bit ADC 的數據輸出

Fig.8 Output of 3-bit ADC with sampling period 0.64 sec

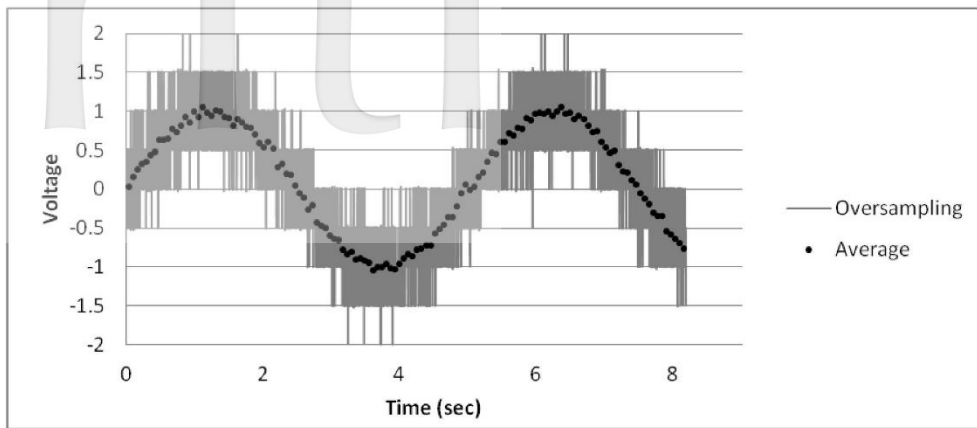


圖 9 取樣間隔 0.01 秒下，3-bit ADC 執行超取樣後，每 64 筆數據取平均作數位濾波
 Fig.9 The average of 64 oversampled data from 3-bit ADC with oversampling period 0.01 sec

確實能非常有效抑制感測器雜訊及提升 ADC 量化位元解析度，且不需濾波電路及高性能 ADC 的成本。

(三)溫度感測器輸出校正

在本研究中所發展之乾濕球濕度計採用 Analog Devices Inc.所製造之半導體溫度感測器 TMP37，其單價約\$0.47 美元，探頭大小 $4.7 \times 4.6 \times 3.6\text{mm}^3$ (TO-92 封裝)，探頭內部等效電路設計繪於圖 10。利用電晶體載子濃度隨溫度變化的原理(Meijer, 1986)，其輸出電壓與溫度約有 $20\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的線性關係(Analog device inc., 2013)。每顆 TMP37 對溫度的線性係數皆有差異，此外由於供電雜訊及延長電線的微波干擾，其電壓輸出充滿雜訊。本研究利用微控制器的超取樣來抑制雜訊並校正各顆的線性係數關係。溫度感測器讀值可表示如下

$$T = AX + B \tag{12}$$

其中 X 值是微控制器對 TMP37 輸出電壓 ADC 超取樣 1024 次後取平均的結果，在 X 值為 0~1024 下，所對應的電壓值範圍為 0~1.5V，A 及 B 乃是針對每顆 TMP37 所各別設定之校正參數。超取樣 1024 次後取平均將能使 10-bit ADC 解析度理論上提升到 15-bit，亦即達到 0.00228°C 的解析

能力，並使雜訊降低 60dB。但由於實際上雜訊衰減後仍然會影響到量測品質，在實驗中所測得解析度約 0.02°C 。

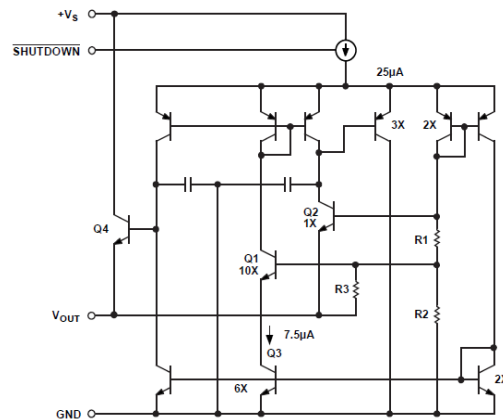


圖 10. 電晶體溫度感測器 TMP37 探頭內部等效電路設計 (Analog device inc., 2013)
 Fig.10 The equivalent circuit of temperature sensor TMP37 (Analog device inc., 2013)

藉由一次數顆的高效率批次校正，在本研究中每顆 TMP37 將可達到媲美鉑鉯溫度感測器的精確度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，其校正方法為將整批溫度計與參考溫度計放入裝水保溫杯中，藉由紀錄每

顆溫度感測器 X 值與溫度的關係，再利用最小平方誤差擬合，即可求得校正參數，此校正參數將適用於往後的永久使用。圖 11 顯示校正過後之乾球與濕球溫度感測器 TMP37 與參考溫度計的誤差，其校正參數(A, B)值分別為乾球(0.0756, 0)、濕球(0.0752, 0.3)。

表 1 詳細列舉比較 TP-100 溫度感測器與電晶體溫度感測器 TMP37 的各項差異，TP-100 感測頭出廠時已經過電阻值校正，可直接搭配任何已校正過的電阻讀取電路，其優式在於可互換性，如果感測頭或讀取電路有任何故障，可以直接就故障部分進行更換，不需要再經過任何校正的程序。而溫度感測器 TMP37 其感測及放大電路皆整合於 TO-92 封裝，對於使用端來說其有整合度高與小尺寸的優勢，若要獲得高準確性的溫度值，每顆必須要取得其各自的校正參數，因此其無法達到互換性。於產品層面上來說，在故障後其很難進行後續維修。

四) 乾濕球濕度計電路設計與架構

本研究之乾濕球濕度計電路設計中採用 Texas Instruments Inc. 所製之微控制器 MSP430G2553，其內部韌體包含四條主要子程序，分別為「量測計算」、「資料儲存」、「數據顯示」及「計時排程」。量測計算負責微控制器內

部 ADC 超取樣執行及相對濕度和蒸氣壓差的計算，資料儲存負責將乾濕球溫度及所算空氣濕度特性，以指定格式儲存於 micro-SD 卡儲存器 (SparkFun, 2014)。數據顯示負責將乾濕球溫度、相對濕度及蒸氣壓差顯示於 16*2 液晶文字顯示器 (Itead Studio, 2014)，微控制與外部儲存及顯示元件的通訊都是透過 9.6Kbps UART (universal asynchronous receiver/transmitter) 介面。計時排程藉由微控制器外接石英晶振負責時間上的精密計時，及其他三個子程序的時間排程。由於利用超取樣來處理感測器雜訊，不需要實體濾波電路致使電路設計部份相當簡潔。圖 12 為本研究設計之電路圖，其中的光耦合元件 PC817 負責切換 UART TX 埠至儲存器或液晶文字顯示器。

圖 13 為乾濕球濕度計的機械配置，吸入管道的空氣樣本先流過乾球後再流過濕球，其管道截面積與微型風扇尺寸一致，皆為 $2.5 \times 2.5 \text{cm}^2$ 。抽取空氣的微型風扇為建準電機公司所製之 KD0502PFB3-8，其功率及管道風速分別為 0.35W 及 1.7m/s，遠較一般市售產品所用大顆風扇耗電量低十幾倍，本研究架構能夠使用微型風扇的主要原因是採用了探頭小之半導體溫度計 TMP37。

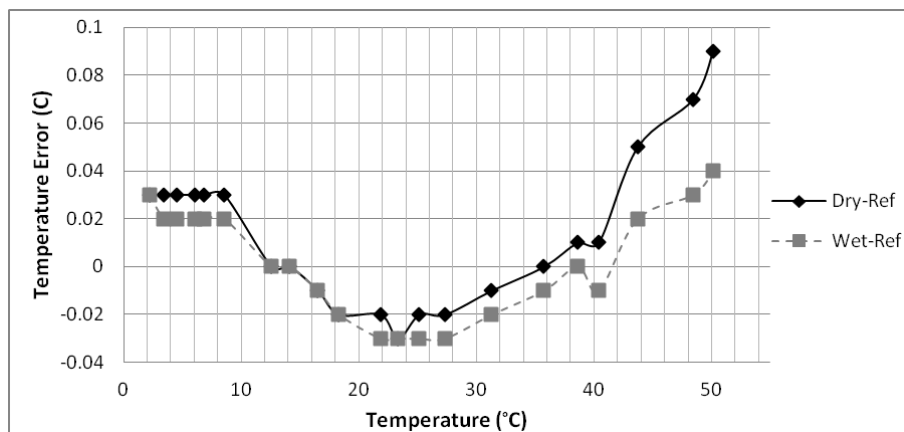



圖 11 校正過後之乾球與濕球溫度感測器與參考溫度計的誤差

Fig.11 Error of two temperature sensors after the slope and offset calibration

表 1 PT-100 式與電晶體式溫度感測器比較

Table 1 Comparison of PT-100 type and transistor type thermal sensors

	TP-100 溫度感測器 TP-100 temperature sensor	電晶體溫度感測器 TMP37 Transistor temperature sensor TMP37
外觀 Appearance		
原理 Principle	鉑金屬阻值於 0°C 時為 100Ω，溫度與電阻變化接近線性關係。 The resistance of platinum coil is 100Ω at 0 °C, and its value varies linearly with temperature.	電晶體電壓隨溫度線性變化的特性 Based on the linear temperature dependence of the base/emitter voltages of bipolar transistors
讀取 Reading	電阻讀取模組轉換成電流或電壓輸出 Current or voltage output by the resistance reading module	感測頭整合放大電路並直接輸出電壓 Voltage output by the in-probe amplification circuit
校正 Calibration	出廠時感測頭及讀取模組皆已各別校正 Calibrated in factory separately for both probe and reading module	需再經校正 Calibrative procedure needed
互換性 Exchangiable	感測頭及讀取電路皆可更新替換。 Any probe will match with any reading module	更換感測器時需再重新設定校正參數 Every probe needs its quique calibrative parameters
尺寸 Size	探頭尺寸大於 (probe larger than) L20mm × Φ 6mm	5×5×4mm ³
成本 Cost	昂貴 Expensive	便宜 Cheap

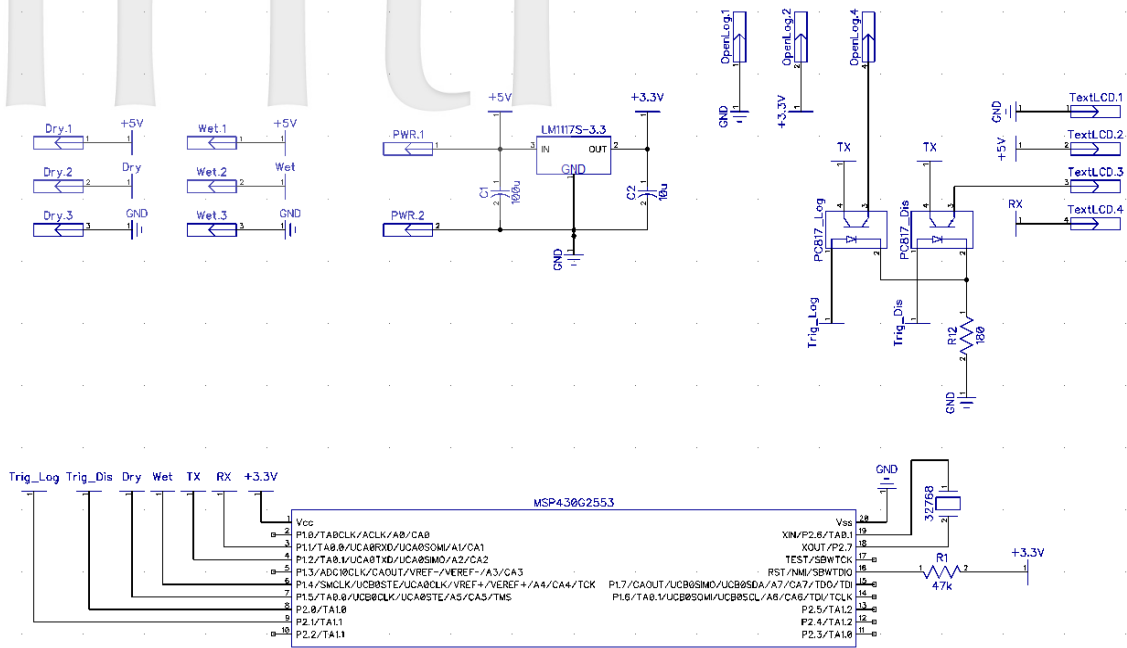


圖 12 乾濕球濕度計電路設計
Fig.12 Circuit design for the psychrometer

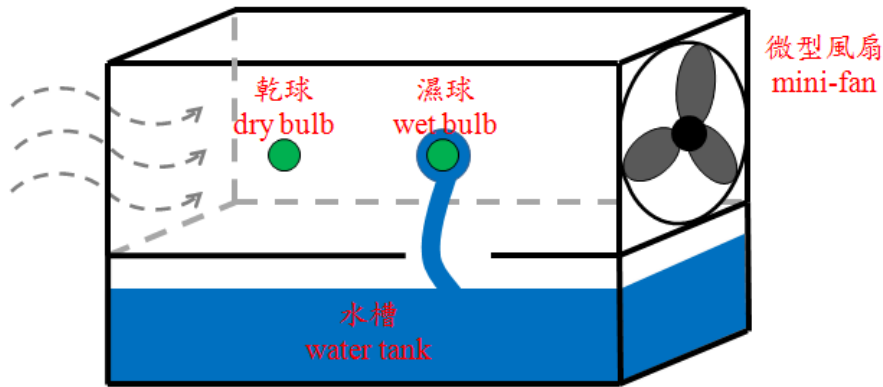


圖 13 乾濕球濕度計的機械配置
Fig.13 The arrangement for dry/wet-bulb temperature sensors, mini-fan, and water tank

(五)市面上既有乾濕球濕度計商品

表 2 顯示了目前市面上四種採用乾濕球原理的濕度計產品，目前商業化的乾濕球溫度計皆使用昂貴之 PT-100 鉑電阻式溫度計，其龐大探頭尺寸對於裝置體積的進一步縮小造成限制，此外其大顆包覆棉球也使水分蒸散量高及需要通風量高；前者需高用水量，後者需用高功率風扇。

一組 PT-100 溫度探頭的成本約 NT\$500~1500；而本研究所用小尺寸半導體溫度探頭

TMP37 成本只要約 NT\$20。四種市面商品的販售價格皆大於新台幣一萬塊以上，而本研究的乾濕球濕度計所需成本保守來說只要 1000 元以下，其元件及校正成本總共約 700 元，而塑膠零件及印刷電路板則約 300 元。目前的產品皆需國外進口且價格高昂，此外體積龐大及耗電量高，這些皆限制了分佈量測點的佈置量，因此難與目前正流行的物聯網或無線感測網路進行整合。

表 2 目前市面上採用乾濕球原理之濕度計的價格比較
Table 2 Price comparison of psychrometers on the market

	產品(product)	品牌/價格 (brand/price)
1		荷蘭(Holland) Priva Measuring Box v1.1 NT\$20,000
2		紐西蘭(New Zealand) Intech Instruments WDT-DW NT\$16,000
3		澳洲(Australia) Ocean Control RHUS-BD-X NT\$12,000
4		日本(Japan) skSATO SK-5RAD-MR NT\$74,000

三、測試結果與討論

實際比較測試在室內進行，圖 14 為架設狀況，兩個精確度為 $\pm 2\%$ 之相對濕度感測器置於樣本空氣進氣口前，此兩組感測器皆為嘉升科技型號 SE3000 的濕度傳送器。在測試期間，水槽大概需要每 2 週透過注水孔加水。圖 15 為本研究乾濕球濕度計完整模組，其包含電路設計圖的所有元件。在每五分鐘紀錄一次數據下，圖 16 為本研究乾濕球溫度的變化紀錄，而圖 17 為本研究乾濕球濕度計所計算之相對濕度與兩組參考感測器所測得之值相互比較。從圖 17 很難看出彼此間的差異，因此繪製了圖 18 來表現三條數據間彼此的差值，R1-R2 表示兩個參考感測器彼此的差值，而 H-R1 及 H-R2 分別表示本研究乾濕球濕度計與兩參考感測器的差值。從圖 18 可以很明顯看出兩個參考感測器值非常接近，其差異值接近於零。比較值得注意的一點是 H-R1 及 H-R2 值含有比較多的尖雜訊(spike noise)，其原因為本研究乾濕球濕度計與參考感測器本質上響應速度差異所導致。若不考慮圖 18 中因暫態環境變動所產生的尖雜訊並將其濾除，本研究乾濕

球濕度計與兩個參考感測器的相對濕度誤差約在 $\pm 2\%$ 以內。

四、結論

本研究提出了一個有效且低成本之小型乾濕球濕度紀錄器的詳盡設計，架構中採用了小尺寸的半導體溫度感測器 TMP37，使得整個搭配裝置的體積可大幅縮小，且降低水分蒸散量，進而能使用 0.35W 耗電量且 $25 \times 25 \text{mm}^2$ 截面積之微型風扇進行通風，其耗電量遠較一般商品所採用之大型風扇低十幾倍。此外也規劃一套溫度計批次校正程序，使得低成本 TMP37 溫度感測器輸出經過微控制器超取樣量測處理及校正參數調整後可達到媲美 PT-100 鉑電阻式溫度計的精確度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

在數值計算方面，利用拉格朗日插值法求得五階多項式飽和蒸氣壓近似公式，此簡單公式能允許在一般低成本微控制器上作快速運算，根據與 Goff-Gratch 公式的誤差分析，在 $0^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 溫度範圍內以此方法得到相對濕度準確度能達到 ± 0.02 以內，而一般普遍使用的馬格努斯近似式

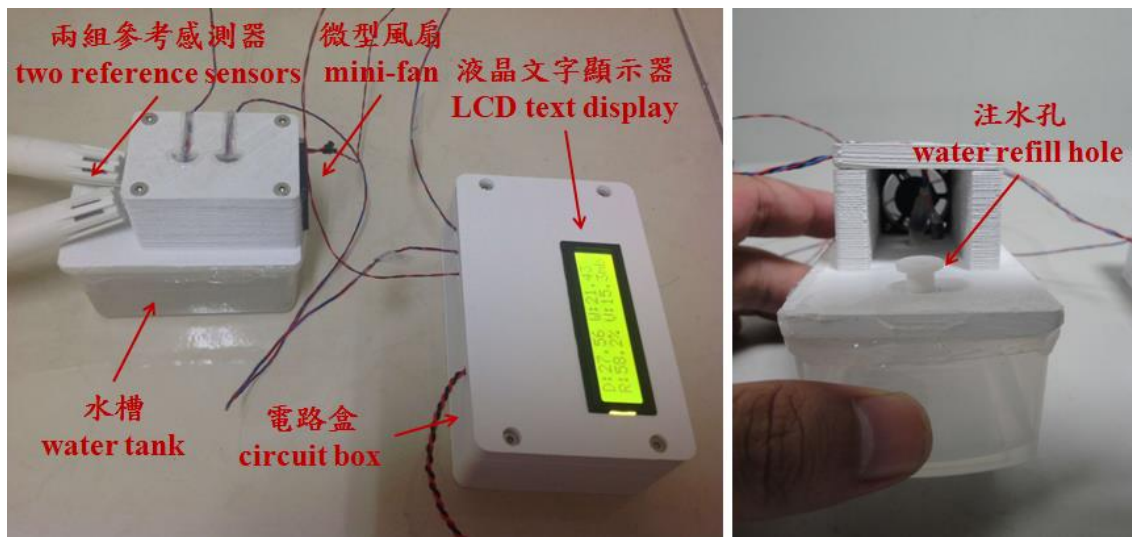


圖 14 比較測試的實驗配置，兩個校驗過之相對濕度感測器置於空氣樣本進氣口前
Fig.14 Setup for indoor field test, two referential sensors are at the intake opening

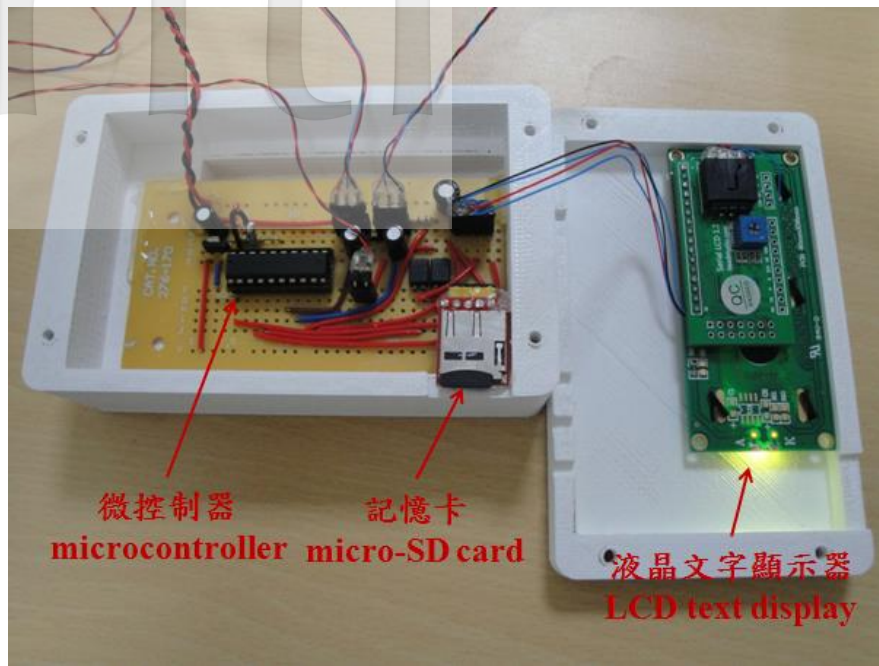


圖 15 乾濕球濕度計所測得資料顯示於文字 LCD 或儲存於 micro-SD 卡
Fig.15 Measured data is shown on the text LCD in real time and stored in micro-SD card

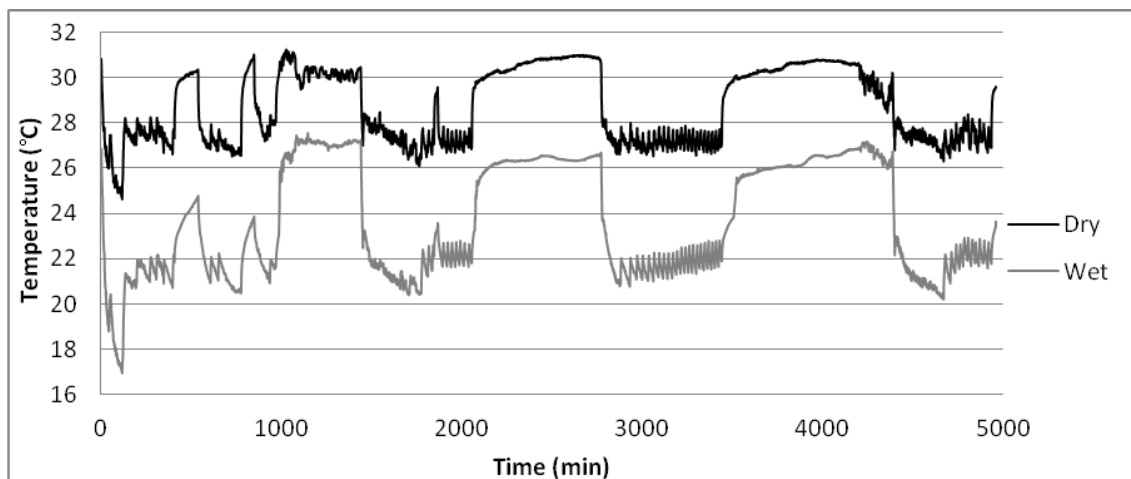


圖 16 本研究乾濕球溫度的變化紀錄
Fig.16 The loggings of dry/wet-bulb temperatures in the field test

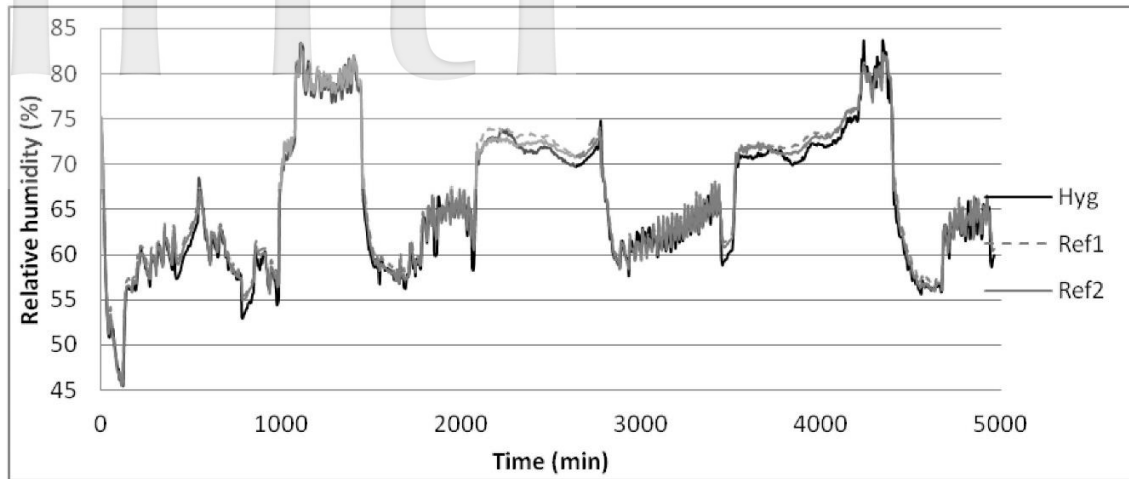


圖 17 本研究乾濕球濕度計的相對濕度(Hyg)與兩組參考感測器所測值(Ref1、Ref2)相互比較
Fig.17 The loggings of RH of psychrometer and two reference in the field test

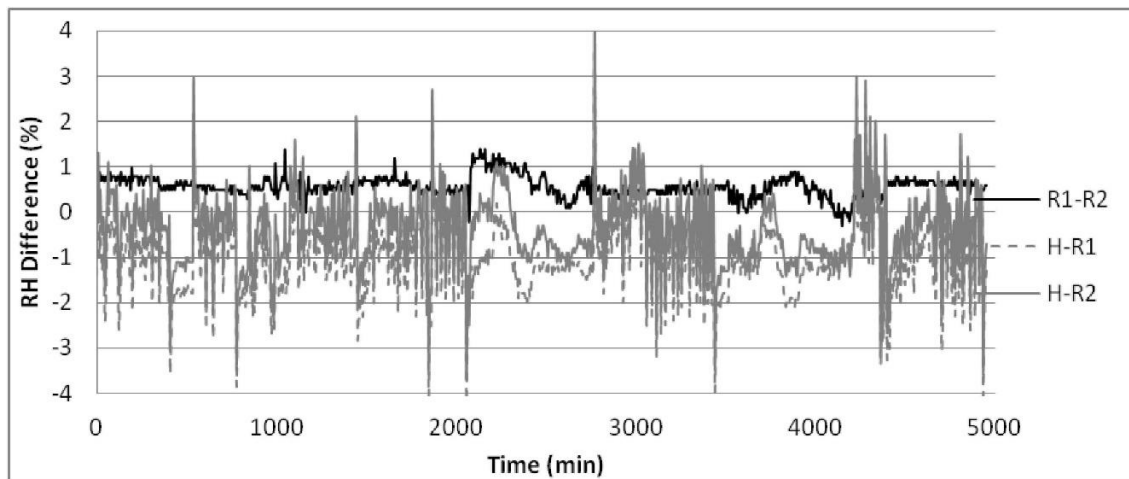


圖 18 本研究乾濕球濕度計及兩組參考感測器彼此差值比較
Fig.18 The differences between two references, and those between psychrometer and two references

只能達到 ± 0.1 。而五階多項式蒸氣壓差準確度則在 $\pm 0.002\text{mbar}$ 以內，而馬格努斯近似式只能達到 $\pm 0.2\text{mbar}$ ，其計算速度、軟體資源占用量及準確度皆優於馬格努斯式子5倍以上。與兩個精確度為 $\pm 2\%$ 之參考感測器相互比較，其相對濕度差異可達約 $\pm 2\%$ 以內。

因為一般基於濕度感應材料的感測器在高溫及高濕的環境中會隨著時間老化，因此以溫度量測為基礎之乾濕球式濕度感應器長久以來一直提供農業界一個準確且高可靠度之解決方案，然而經過市售產品調查，目前的乾濕球式濕度感應器皆需國外進口且價格高昂，其龐大體積及高耗電量亦限制了分佈量測點的佈置量，因此難與目前正流行的物聯網或無線感測網路進行整合。本研究證明低成本及低耗能之乾濕球濕度計是可行的，且將可成為未來發展無線感測網路的基礎。

五、誌謝

本研究承蒙行政院農業委員會經費補助，計畫編號 103 農科-8.2.2-南-N1。以及台南區農業改良場各級長官的支持，以及諸位同仁提供寶貴意見，特此誌謝。

六、參考文獻

1. Analog device inc. 2013. Low Voltage Temperature Sensors. Website: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/TMP35_36_37.pdf
2. Chen, Zhi and Chi Lu. 2005. Humidity sensors: a review of materials and mechanisms. *Sensor Letters* 3:274-295.
3. Candy, J. C. and G. C. Temes 1992. *Oversampling Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation*. New York: Wiley-IEEE Press.
4. Flatau, Piotr J., Robert L. Walko and William R. Cotton 1992. Polynomial fits to saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteor.* 31:1507-1513.
5. Gibbins, C. J. 1990. A survey and comparison of relationships for the determination of the saturation vapour pressure over plane surfaces of pure water and of pure ice. *Ann. Geophys.* 8:859-885.
6. Goff, J. A. and S. Gratch. 1945. Thermodynamic properties of moist air. *Amer. Soc. Heat. Vent. Eng. Trans.* 51:125-157.
7. Huang, Y., K. Zhang, S. Yang and Y. Jin. 2013. A method to measure humidity based on dry-bulb and wet-bulb temperatures. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6(16):2984-2987.
8. Itead Studio. 2014. Character LCD screen. Website: <http://imall.iteadstudio.com/im130129001.html>
9. Lowe, Paul R. 1977. An approximating polynomial for the computation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteor.* 16:100-103.
10. Lathi, B. P. 2009. *Linear systems and signals*. Oxford: Oxford University Press.
11. Matsuguchi, M., E. Hirota, T. Kuroiwa, S. Obara, T. Ogura and Y. Sakai. 2000. Drift phenomenon of capacitive-type relative humidity sensors in a hot and humid atmosphere. *Journal of the Electrochemical Society* 147(7):2796-2799.
12. Meijer, G. C. M. 1986. Thermal sensors based on transistors. *Sensors and Actuators* 10(1): 103-125.
13. Nahar, R. K. 2000. Study of the performance degradation of thin film aluminum oxide sensor at high humidity. *Sensors and Actuators B: Chemical* 63(1):49-54.
14. Rittersma, Z. M. 2002. Recent achievements in miniaturised humidity sensors — a review of transduction techniques. *Sensors and Actuators A: Physical* 96(2):196-210.
15. Sargent, G. P. 1980. Computation of vapour pressure, dew-point and relative humidity from dry- and wet-bulb temperatures. *Meteor. Mag.* 109:238-246.
16. Simões-Moreira, J. R. 1999. A thermodynamic

- formulation of the psychrometer constant. Measurement Science and Technology 10(4): 302.
17. SparkFun. 2014. OpenLog. Website: <https://github.com/sparkfun/OpenLog/wiki/datasheet>
18. Wiederhold, Pieter R. 1997. Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation. Florida: CRC Press.
19. World Meteorological Organization. 2008. Guide to meteorological instruments and methods of observation. Website: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/IMO-Guide.html>

收稿日期：2014年xx月xx日

修改日期：2014年xx月xx日

接受日期：2014年xx月xx日