

生物環境控制工程電腦軟件之更新及其應用-I.濕空氣熱力性質

Applications and Update of Computer software for Bio-Environmental Control Engineering – I. Psychrometrics

方煒、馮丁樹、簡至樺、王岱淇
台灣大學生物產業機電工程學系
台北市羅斯福路四段一號
email: weifang@ccms.ntu.edu.tw

關鍵詞：軟件，濕空氣性質，環境控制，電腦模擬，濕空氣

Keywords: software, psychrometric property, environmental control, simulation, moist air

摘要

在溫室設計與環境控制工程領域中，過去已有不少電腦軟件已被建立，除實務應用上並廣泛應用於教學與研究。在電腦作業系統不斷改進的現在，部分只能用於DOS版電腦上的軟件已面臨被淘汰的命運。本研究有鑑於此，擬針對過去發展的軟件進行一系列的更版動作，初步規劃使用Microsoft Visual C++與MathWorks MATLAB撰寫程式，前者予以編譯，執行速度較快，提供較多元且彈性的使用者介面，無須其他軟件可直接執行；後者提供原始碼，執行速度較慢，但可跨用於各種不同的電腦平台，將來亦無需改寫，但需具備MATLAB軟件。本文旨在介紹兩套新版的數位式濕空氣線圖軟件的使用方式，計算式及其在生物環境控制領域的應用。此兩套軟件目前均置於網際網路（或稱互聯網，Internet）上。

Abstract

Computer software was developed in the fields of greenhouse design and environmental control. The software has been used in practical applications as well as teaching and research. Due to the advancement of operating systems of computers, software based on DOS will soon be faced out. The purpose of this study is to enable the execution of the previously developed software on a Windows based computer and on multi-platform of computers. The computer language used was Microsoft Visual C++ and MATLAB, respectively. The focus of this paper is to introduce the 2 newly developed software entitled 'Digital Psychrometric Chart', the technical background and its' applications in the fields of Bio-environmental control. Both computer programs can be downloaded from the Internet.

1. 前言

馮與方(1986)、Fang (1989)、Ting等 (1989, 1991) 與Fang等 (1990a, b; 1992a,b,c) 建立的溫室設計與環境控制工程相關電腦軟件包含多個模組，諸如：數位式濕空氣線圖，太陽能工程基礎，溫室被覆資材，溫室通風與地面加熱之規劃，蒸發冷卻系統設計，工程經濟分析，溫室內部配置，動線規劃與模擬，資源最佳化配置與分析等。部分模組亦可用於禽、畜舍等其他生物環境之控制與設計。基於電腦作業系統的演進，過去只適用於DOS版電腦上執行的軟件，有必要重新建立。本文旨在針對環境控制的基礎知識：濕空氣熱力性質進行探討。

專門探討由空氣與水氣組成的混合氣體的一門學問稱為濕空氣熱力學 (Psychrometrics)。所謂空氣與水氣組成的混合氣體簡稱「濕空氣」或「濕氣」。濕

空氣與許多種的處理過程相關，譬如加熱、通風與空調(HVAC)，食品儲藏，堆肥(有
氧發酵)，乾燥，脫水等。濕空氣的作用簡列如下：

1. 做為輸送水蒸氣、氧氣與二氧化碳的介質
2. 做為熱傳遞的介質
3. 做為水蒸氣的來源(source)或去處(sink)
4. 做為熱的來源或去處

環境控制涉及空氣溫度、溼度與成分等的調節，濕空氣為熱與水氣的來源
(source)與去處(sink)，熱與水氣直接影響空氣的溫度與溼度。在熱力學性質
(psychrometric properties)中，空氣的溫度包括乾球、濕球與露點溫度，溼度則包括絕
對溼度(或稱溼度比)與相對溼度。其他的性質包括密度、比容、飽和度、飽和蒸氣
壓、蒸氣分壓、熱焓等。以圖形方式表現濕空氣熱力性質彼此間關係者稱為濕空氣
線圖，簡稱濕氣圖(Psychrometric chart)。濕氣圖以乾球溫度為 X 軸，以濕度比為 Y
軸，以飽和相對濕度線為上界。不同海拔有不同的大氣壓力值，傳統使用濕空氣線
圖有低、中與高海拔三種圖之區別。低海拔者又依溫度範圍分成低溫、常溫與高溫
三種範圍，中、高海拔者則僅有常溫範圍的濕氣圖。另外亦有英制與公制之別。查
圖法在使用上有頗多的限制，譬如：每張濕氣圖僅適用一個大氣壓力狀況，異發生
讀圖誤差，查圖速度慢，不方便使用，且無法納入電腦進行自動化查圖。

美國加熱冷凍空調工程師協會 (American Society of Heating, Refrigerating and
Air-conditioning Engineers, ASHRAE, 1993) 與美國農業工程師協會 (American
Society of Agricultural Engineers, ASAE, 1999) 將前人的研究成果彙整列出了計算濕
空氣性質所需的所有計算式，美國康乃爾大學所建的 Psychrometric Look Up
Subroutines (PLUS, Albright, 1990)與台灣大學所建的 Psychart (馮與方, 1986) 電腦
軟件即植基於此些計算式。此些先前所建立的軟件在 Windows 的作業系統中即將無
法使用，所以有必要重新建立適用於新的作業系統的軟件。經評估後，擬由兩方面
著手，首先使用 MATLAB 建立的程式具有適用於多種電腦平台的特性，以後應該
可以不需重新發展，且原始碼以 ASCII 格式儲存，方便後續者學習與修改是最大的
優點，但有需具備 MATLAB 軟件的限制。其次，使用其他可編譯的 Windows 版高
階語言(MS Visual C++)撰寫程式，使用者介面較多元，執行速度較快，可單獨使用。

2.1 MATLAB 版軟件

圖 1 所視為 MATLAB 版軟件的操作畫面。使用者只需輸入右側所列的大氣壓
力值與其下四種性質(依序為乾球、濕球溫度、相對溼度與露點溫度)中的任二者，
再按下右上角的 執行鍵，其他性質的計算結果即可在左下角的資訊欄
(Information)內顯示，顯示的圖形與習知的濕氣圖相似，其上的藍環所在即為輸入的
狀態點。X 軸的範圍可透過 滑動元件(slider)來調整。選按 可看到程式
設計者相關資訊，結束程式選按 。

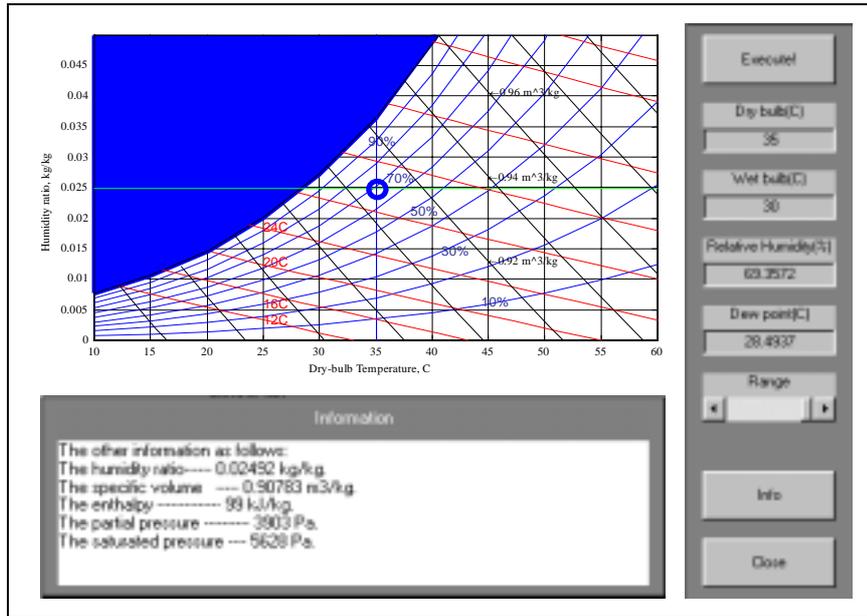


圖 1. MATLAB 版濕氣圖計算軟件之操作畫面

Fig. 1. Operation window of the MATLAB version of digital psy.chart software

2. 軟件使用與相關計算式

2.2 濕空氣性質計算式

2.2.1. 飽和蒸氣壓 (Saturated vapor pressure, P_{ws} , ASHRAE, 1993)

低於攝氏 0 度時的飽和蒸氣壓 (173.16 K T 273.16 K)

$$\ln(P_{ws}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln(T) \quad (1a)$$

$$C_1 = -5.6745359E+03 \quad C_4 = 6.2215701E-07 \quad C_7 = 4.1635019$$

$$C_2 = -5.1523058E-01 \quad C_5 = 2.0747825E-09$$

$$C_3 = -9.6778430E-03 \quad C_6 = -9.4840240E-13$$

高於攝氏 0 度時的飽和蒸氣壓 (273.16 K T 473.16 K)

$$\ln(P_{ws}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln(T) \quad (1b)$$

$$C_8 = -5.8002206E+03 \quad C_{10} = -4.8640239E-02 \quad C_{12} = -1.4452093E-08$$

$$C_9 = -5.5162560E+00 \quad C_{11} = 4.1764768E-05 \quad C_{13} = 6.5459673$$

2.2.2. 露點溫度 (Dew point temperature, T_{dp} , ASAE, 1999)

$$T_{dp} = 237.203 - 1.8726 + 1.1689^2 (273.16 \text{ K } T_{dp} \text{ } 343.16 \text{ K}) \quad (2a)$$

$$T_{dp} = 212.71 + 7.0322 + 0.3700^2 (213.16 \text{ K } T_{dp} \text{ } 273.16 \text{ K}) \quad (2b)$$

其中, $\alpha = \ln(P_v / 1000)$

2.2.3. 濕球溫度 (Wet bulb temperature, T_{wb} , ASAE, 1999)

$$P_{swb} - P_v = B'(T_{wb} - T) \quad (255.38 \text{ K } T \text{ } 533.16 \text{ K}) \quad (3a)$$

$$B' = \frac{1006.9254 \times (P_{swb} - P_{atm}) \times (1 + 0.15577 \frac{P_v}{P_{atm}})}{0.62194 \times h'_{fg}} \quad (3b)$$

以 h'_{ig} 取代 h'_{fg} 當 $T_{wb} = 273.16 \text{ K}$

2.2.4. 飽和度 (Degree of saturation, dos, ASAE, 1999)

飽和度是濕空氣中水氣重量對相同乾球溫度下飽和態水氣重量的比值：

$$dos = W / W_s \quad (4)$$

2.2.5. 溼度比/絕對溼度 (Humidity ratio, W 或 Absolute humidity, AH, ASAE, 1999)

溼度比是單位重量乾空氣中的水氣重量：

$$W = M_w / M_d = (\text{mole fraction ratio } X_w / X_a) (18.015 / 28.964) = 0.62198 X_w / X_a$$

透過理想氣體公式的轉換，可得下式：

$$W = 0.62198 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (255.38 \text{ K} \leq T \leq 533.16 \text{ K}) \quad (5a)$$

$$\text{或 } P_v = \frac{W \times P_{atm}}{0.62198 + W} \quad (5b)$$

$$\text{或 } W = \frac{(2501 - 2.381 \times t) \times W_s - (t - t_w)}{(2501 + 1.805 \times t - 4.186 \times t_w)} \quad (5c)$$

在式 (5a) 中以 P_{swb} 取代 P_v 可求出 W_s ， P_{swb} 為飽和蒸氣壓，可透過式(1a) 或 (1b)，以濕球溫度取代乾球溫度求出。

2.2.6 比容 (Specific volume, V_{sa} , ASHRAE, 1993)

$$V_{sa} = \frac{287 \times T}{P_{atm} - P_v} \quad (255.38 \text{ K} \leq T \leq 533.16 \text{ K}) \quad (6a)$$

$$\text{或 } T = \frac{V_{sa} \times (P_{atm} - P_v)}{287} \quad (6b)$$

$$\text{或 } P_v = P_{atm} - \frac{287 \times T}{V_{sa}} \quad (6c)$$

$$\text{或 } V_{sa} = \frac{287 \times T \times (1 + 1.6078 * W)}{P_{atm}} \quad (6d)$$

2.2.7 相對溼度 (Relative humidity, rh , ASHRAE, 1993)

$$rh = \frac{P_v}{P_s} \quad (7)$$

相對溼度(rh)與飽和度(dos)都是指濕空氣狀態點相對於相同乾球溫度下的飽和狀態點的比例，前者為蒸氣壓的比，後者為水蒸氣含量的比。

2.2.8 潛熱 (Latent heat, ASAE, 1999)

飽和下之溶解潛熱， h_{ig}

$$h_{ig}=2,839,683.144 - 212.56384 \times (T - 255.38) \quad 255.38 \text{ K} \quad T \quad 273.16 \text{ K} \quad (8a)$$

飽和下之蒸發潛熱, h_{fg}

$$h_{fg}=2,502,535.259 - 2,385.76424 \times (T - 273.16) \quad 273.16 \text{ K} \quad T \quad 338.72 \text{ K} \quad (8b)$$

$$h_{fg} = (7,329,155,978,000 - 15,995,964.08 \times T^2)^{1/2} \quad 338.72 \text{ K} \quad T \quad 533.16 \text{ K} \quad (8c)$$

2.2.9 熱焓 (Enthalpy, H, ASHRAE, 1993)

$$H=1000 \times [1.006 \times t + W \times (2501 + 1.805 \times t)] \quad (9)$$

2.2.10 蒸氣分壓 (Vapor pressure, P_v , ASHRAE, 1993)

$$P_v = \frac{P_{atm} \times W}{(0.62198 + W)} \quad (10)$$

2.3. MS Visual C++版軟件

如圖 2 所示為 MS Visual C++版軟件的操作畫面，圖中的橢圓框與 A,B,C 三個英文字母為方便後續說明之用，軟件執行時並不會出現。左上角的跳出(popup)視窗為選擇 Set 選項後的結果，允許使用者輸入不同的大氣壓力值。右上角橢圓框框出的 Edit 區允許使用者輸入資料， T_{db} 為必須的輸入，另一個參數則可由下方選項中擇一，其中 H, SV, H_{fg} 與 P_{ws} 不允許輸入。前二者理論上允許輸入，只是此部份程式尚未完成，後二者則理論上不允許輸入，詳見後面之討論。

左側為濕氣圖區，右下角之 Line and Curves 區允許針對濕氣圖上的直線或曲線作選擇性的繪出，如圖 2 只繪出乾球溫度與相對溼度線，圖 3 則繪出全部提供的直線與曲線，包括：溫度(TEMP)、相對溼度(RH)、絕對溼度(AH)、蒸氣分壓(P_w)、熱焓(H)與比容(SV)。圖 2 與 3 的濕氣圖內除了乾球溫度與相對溼度線之外，上有四條直線，以交叉髮線 (crosshair)稱之，由左至右分別為 Edit 區所設定的狀態點的絕對溼度線、濕球溫度線、比容線與乾球溫度線。交叉髮線的交點即為狀態點，在 Move 區選按方向鍵可移動狀態點，髮線隨狀態點移動。

使用者也可用滑鼠左鍵直接在濕氣圖上點選，當在 Line and Curves 區下方的 Misc 區中的中央化(Centralize)功能未選取時，狀態點會落在使用者點選的位置上；當選取中央化功能時，使用者點選的狀態點 Y 軸位置不動，但 X 軸位置會被自動移至圖形的中央。亦可使用 Move 區上下左右鍵來移動狀態點的位置，當左右移動範圍超過 1 度 C 時，程式會自動將新的狀態點移回圖形的正中央，此時 X 軸的溫度值會有所更新。此部份功能與操作者一般習慣較不相同，若無法適應，可取消中央化功能(再點選一次)。

在 Line and Curves 區左側的 Move 區提供上、下、左、右移動髮線的功能，分別代表加濕、除濕、顯熱加熱與顯熱冷卻等過程。Steps 區允許調整每次移動的圖點(pixel)數，由 1 至 10。Steps 區下方的兩個圖示允許對濕氣圖的放大(Zoom out)或縮小(Zoom in)，每選按一次，X 軸範圍加減 10 度 C。如圖 4 左圖所示，當縮小至極限時，左側的圖示會消失；如圖 4 右圖所示，當放大到極限時，右側的放大圖示會消失。按一下 Move 區上下左右箭頭中央的圖示可將濕氣圖還原成如圖 2 與 3 所示的適當大小 (X 軸範圍為 20 度 C)。

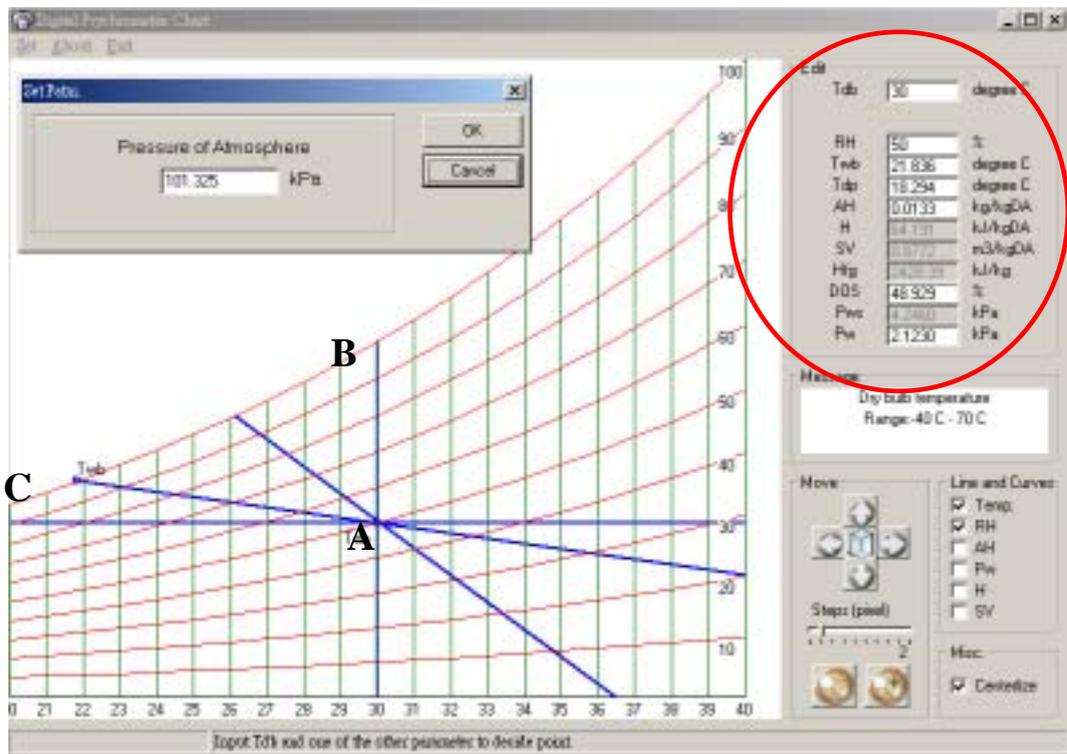


圖 2. MS Visual C++版濕氣圖計算軟件 Set 選項之操作畫面

Fig. 2. Operation window of 'Set' menu of the MS Visual C++ version of the digital Psychrometric chart software

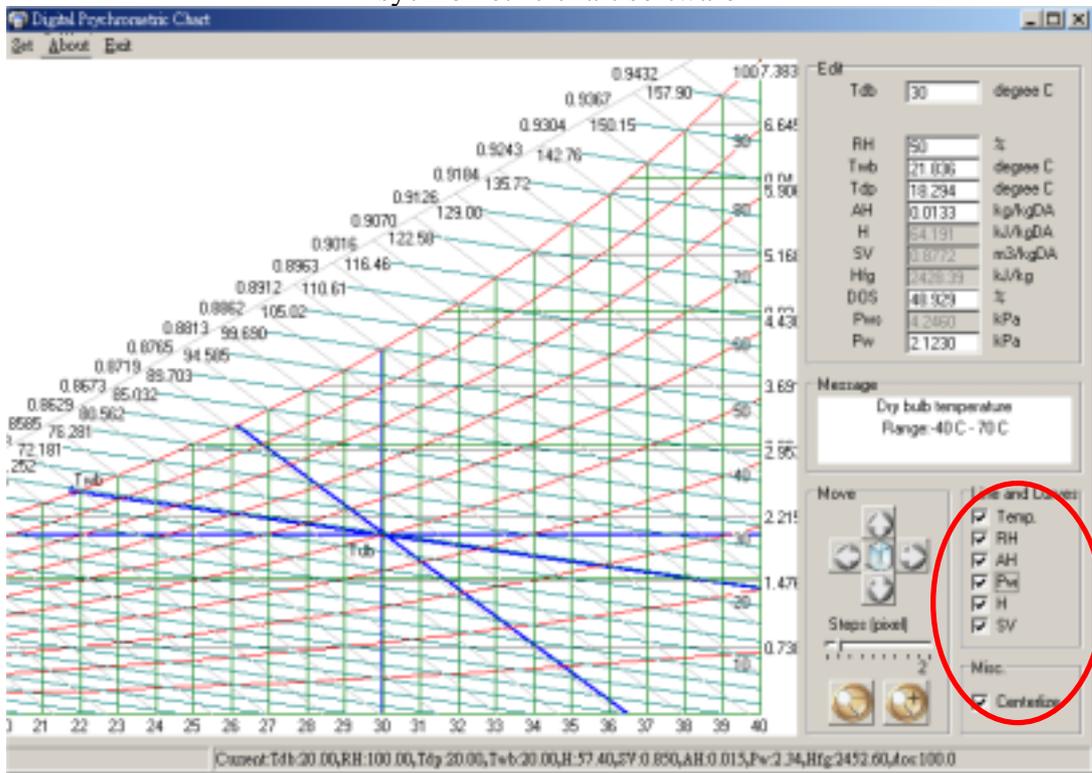


圖 3. MS Visual C++版濕氣圖計算軟件 Line and Curves 區之操作畫面

Fig. 3. Operation window of 'Line and Curves' zone of the MS Visual C++ version of the digital Psychrometric chart software

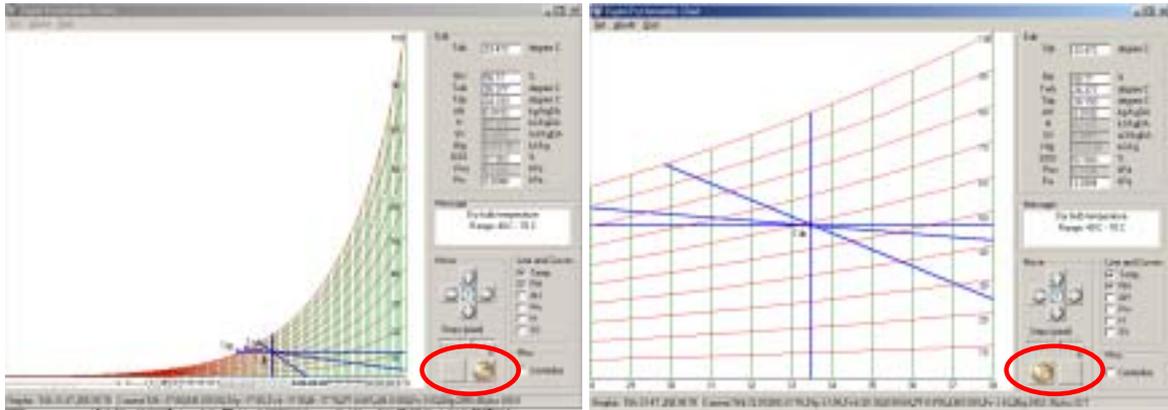


圖 4. MS Visual C++版濕氣圖計算軟件圖形縮小與放大至極限時之操作畫面
左圖的 X 軸範圍為 110 度 C，右圖的 X 軸範圍為 10 度 C

Fig. 4. Operation window of 'Zoom in' and 'Zoom out' option of the MS Visual C++ version of the digital Psychrometric chart software.

(Left: range of X axis is 110 degree C, Right: Range of the X axis is 10 degree C)

3. 結果與討論

3.1 相依或獨立的熱力學性質

如前所述，除了大氣壓力之外，若已知任何兩個獨立的濕空氣性質，則該空氣性質的狀態點即可由濕氣圖中找到，其他性質即可依序求出。表 1 所示為所有常見濕空氣性質之成對列表，其中 P 代表獨立的組合，可由該組合求出其他性質，I 代表為相依的組合，無法由該組合求出其他性質。與 $T_{db} - h_{fg}$ 均為相依的組合，由前述的計算式(1)可知， P_{ws} 為 T_{db} 的函數，所以 $T_{db} - P_{ws}$ 為相依的組合。由式(8)可知， h_{fg} 為 T_{db} 的函數，所以 $T_{db} - h_{fg}$ 為相依的組合。 T_{wb} 與 H 為近乎平行的兩線，所以也非獨立的參數， T_{dp} , AH 與 P_v 亦彼此相依，三者之任意組合均無法求出其他性質。

表 1. 相依或獨立的濕空氣熱力性質之成對組合

Table 1. Correlated or independent pairs of moist air properties

	T_{wb}	rh	T_{dp}	AH	SV	H	P_{ws}	h_{fg}	P_v
T_{db}	P	P	P	P	P	P	I	I	P
T_{wb}		P	P	P	P	I	P	P	P
rh			P	P	P	P	P	P	P
T_{dp}				I	P	P	P	P	I
AH					P	P	P	P	I
SV						P	P	P	P
H							P	P	P
P_{ws}								P	P
h_{fg}									P

兩個版本的軟件各自提供六種組合的輸入選擇：MATLAB 版提供的是 $T - T_{wb}$, $T - rh$, $T - T_{dp}$, $T_{wb} - rh$, $T_{wb} - T_{dp}$ 與 $rh - T_{dp}$ 等組合；MS Visual C++ 版提供的是 $T - rh$, $T - T_{wb}$, $T - T_{dp}$, $T - AH$, $T - P_v$ 與 $T - P_v$ 等組合。

3.2 過程

濕氣圖的功用除了求出某狀態點所有性質的值之外，更重要的功能在找出某已知狀態點在經過熱量與/水份與/或其它氣流的加入或除去後的新狀態點的性質；或兩已知狀態點之間的變化過程，譬如增加或除去多少熱量與/或水分等。此種狀態點的變化過程以濕空氣熱力過程(Psychrometric Processes)稱之，主要不外乎如圖 5 右圖所示的幾種狀況：

- 顯熱加熱與冷卻 (Sensible Heating and Sensible Cooling)
- 加濕與除濕 (Humidification, Dehumidification)
- 加熱與冷卻 (Heating, Cooling)
- 通風 / 空氣混合 (Ventilation, Air Mixing)
- 蒸發冷卻與乾燥 (Evaporative Cooling, Drying)
- 上述之綜合 (Combinations of the above)

圖 5 左圖所示為溫室環控中典型的空氣狀態變化過程，簡單說明如下：

- A. 蒸發冷卻過程 (1-2)：點 1 為室外空氣的狀態，點 2 為室外空氣經過水簾片後的狀態。過程 1-2 依循絕熱狀態下的蒸發冷卻原則，所有增加的水蒸氣，其所需的蒸發潛熱全部吸自空氣，造成空氣溫度的下降。
- B. 空氣混合過程 (2-3)：由於溫室的氣密性不佳，除了水簾片之外，還有其他的孔隙允許室外空氣的進入，所以真正進入溫室的空氣為兩股氣流的混合，其狀態分別為狀態點 2 與 1，混合後的空氣狀態點 3 落於 1-2 的連線上，其位置與兩端點的距離與兩者的空氣量成反比。
- C. 顯熱加熱過程(3-4)與加濕過程 (4-5)：狀態點 3 的空氣進入溫室內，假設後者的溫度與溼度均較高，所以進入的空氣由入口至出口，沿途吸熱與吸濕，其累積的吸熱量與吸濕量可分別用 3-4 與 4-5 過程來表示。

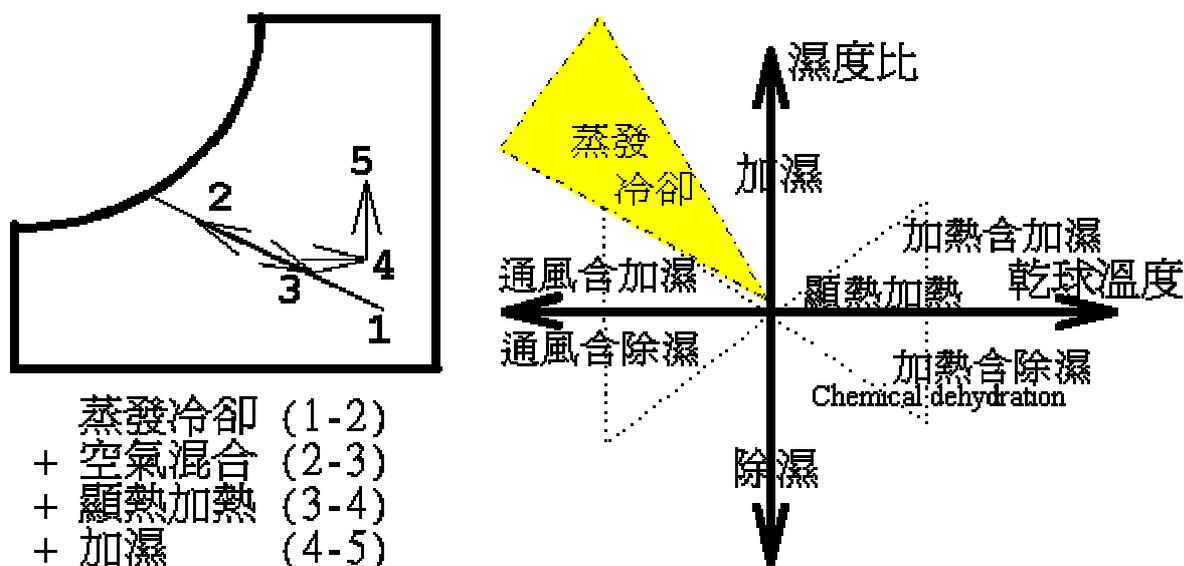


圖 5. 濕空氣狀態點變化過程

Fig. 5. Various processes of the change of states of the moist air

3.3 溫室降溫

遮蔭之外，自然通風與強制通風均為常見的溫室降溫方式，當兩者力有未逮時，蒸發冷卻方式為下一個選擇。風扇與水簾片分裝於溫室兩側或同側者分別為負壓式或正壓式蒸發冷卻降溫系統，前者適用於氣密性良好的溫室，後者亦可用於開放式溫室。安裝於溫室內的高壓噴霧系統其降溫原理亦為蒸發冷卻，但與水簾片系統不同者在於前者之降溫極限為室內的濕球溫度，後者之極限為室外的濕球溫度。水簾系統的效率()可透過下式計算：

$$= (T_{db} - T_{pad}) / (T_{db} - T_{wb}) \quad (11)$$

已知室外空氣的溫度(T_{db}) 與相對溼度 (rh)可求出濕球溫度(T_{wb})，量測通過水簾片後的空氣溫度(T_{pad})，代入上式可求出效率；若效率為已知，則 T_{pad} 為可求。

3.4 空氣的吸濕能力

一般以空氣的相對溼度作為其吸濕能力的代表，如圖 2 所示的 A, B 與 C 三點的數據如表 2 所示，空氣狀態點 A 為 30 度 C，50%相對溼度；狀態點 B 為與點 A 有相同乾球溫度時的飽和狀態點；狀態點 C 為與點 A 有相同濕球溫度時的飽和狀態點。在溫度不變的情況下，空氣的吸濕能力取決於 VPD_{A-B} 的大小；然而，在蒸發冷卻的過程中，空氣的吸濕能力取決於 VPD_{A-C} 的大小；後者(VPD_{A-C})比前者(VPD_{A-B})要小多了。

表 2. 空氣吸濕能力說明例

Table 2. Examples to illustrate the capability of absorption of moisture of air

狀態點	T_{db} , 度 C	T_{wb} , 度 C	rh, %	P_v , kPa	蒸氣壓差 VPD
A	30	21.84	50	2.12	
B	30	30	100	4.24	$VPD_{A-B} = 2.12$ kPa
C	21.84	21.84	100	2.62	$VPD_{A-C} = 0.50$ kPa

3.5 灌溉之需求

溫室內的水分蒸散(Evapotranspiration) 主要來自土壤或其他介質之蒸發(Evaporation)與作物之發散(Transpiration)，前人之研究證實水分蒸散量與葉片(leaf)氣孔內之飽和蒸氣壓($P_{ws}@T_{leaf}$)與空氣(air)中的蒸氣分壓($P_v@T_{db}$)的差(VPD_{l-a})有顯著的關係。空氣狀態點為已知， $P_v@T_{db}$ 為可求；葉溫(T_{leaf})為已知，且假設氣孔內相對溼度為 100%，則 $P_{ws}@T_{leaf}$ 為可求，兩者的差愈大代表水分蒸散愈多，對灌溉的需求愈大。作物之水逆境指標(Crop Water Stress Index, CWSI)之發展即植基於 VPD_{l-a} 之應用。

表 3. 空氣與葉片之蒸氣壓差說明例

Table 3. Examples to illustrate the vapor pressure deficit among air and leaf

狀態點	T_{db} , 度 C	T_{wb} , 度 C	rh, %	P_v , kPa	蒸氣壓差 VPD_{l-a}
air	30	21.84	50	2.12	
Leaf 1	30	30	100	4.24	2.12 kPa
Leaf 2	25	25	100	3.17	1.05 kPa

4. 結論

過去建立的濕空氣熱力性質計算軟件在隨著電腦作業系統的演進過程中，已面臨淘汰的命運，本研究所建立的兩套軟件均可適用於新的作業系統，也各有優、缺點：MATLAB 版提供原始碼，可作為極優的教學工具，同時允許跨電腦平台使用，後續就算作業系統再有改變，軟件本身所需的修改應該也不大，可永續發展，但受限於需有 MATLAB 軟件才能執行。MS Visual C++ 版提供方便且多元的操作介面，運算速度快，且針對前述各應用層面提供進階功能，可作為極佳的日常使用工具，但受限於必須是 Windows 作業系統的電腦才能使用。此兩套軟件目前安裝於網路上，可免費下載，網址列於參考文獻中。

5. 參考文獻

- ASAE D271.2 DEC94. Psychrometric Data. Agricultural Engineering Yearbook ASAE, St. Joseph, MI. 49085. 1999.
- ASHRAE. 1993. Handbook of Fundamentals. ASHRAE, Inc. New York.
- Albright, L.D. Environment Control for Animals and Plants. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. 1990. 410 pp.
- Fang, W. Strategic Planning Through Modeling of Greenhouse Production Systems. Unpublished Ph.D. dissertation, 1989 Rutgers University.
- Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. Optimizing Resource Allocation for Greenhouse Potted Plant Production. Transactions of the ASAE, 1990a. 33(4): 1377-1382.
- Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. Animated Simulation of Greenhouse Internal Transport using SIMAN/CINEMA. Transactions of the ASAE, 1990b. 33(1): 336-340.
- Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. Computer software development for Greenhouse design and management. 1992a. ASAE publication 1-92: 274-279.
- Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. Computer Aided Instruction on Solar Engineering Fundamentals. 1992b. ASAE paper No. 927031.
- Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. Greenhouse Layout Design and Labor Planning. 1992c. ASAE paper No. 924071.
- Ting, K.C., J. Dijkstra, W. Fang and M. Giniger. Engineering Economy of Controlled Environment for Greenhouse Production. Transactions of the ASAE, 1989 32(3): 1018-1022.
- Ting, K.C., W. Fang and G.A. Giacomelli. Decision Support Software for Integrated Greenhouse Production Systems. International Seminar on New Frontiers in Horticulture, Bangalore, India. 1991.
- 馮丁樹，方煒。個人電腦應用之三：空氣線圖之電腦模擬。中國農業工程學報 1986 32(2)：49-64。
- 濕空氣線圖計算軟件下載網址：<http://ecaaser3.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/psy/cea2-5.htm>