

個人電腦應用之三—空氣線圖之電腦模擬

Applications of Personal Computers (III) --- A New Programming Model for Psychrometric Properties of the Moist Air.

國立臺灣大學農機系副教授

國立臺灣大學農機系研究助理

馮 丁 樹

方 煒

Fon, Din-Sue

Fang, Wei

摘 要

空氣的熱力特性資料為研究空調、冷凍及乾燥者所必須。以往依賴空氣線圖的查表工作，不僅耗時，且容易產生誤差。許多學者經多年的研究，提出不少方程式來描述諸熱力特性間的關係，但未見有一完整的程式可供所有需要的人使用。Bakker-Arkema (1974)雖將各函數間關係整理成副程式的型態，方便大電腦系統的叫用，但其使用的數值分析技巧效率較低，浪費了大量的計算機時間；再者，並不是每個人都能熟悉且方便的使用大電腦。

本文之目的乃在發展一套能在 Apple II+ 及 IBM PC/XT 等個人電腦上執行的軟體，並配合一較新且簡易的數值分析技巧，當任二者的空氣熱力特性資料為已知時，即可求出該特定狀態下所有的資料，包括公制、英制兩種單位。

由於軟體本身具有充份的交談性，使用者幾乎可以立刻熟悉操作的方法而不需其他任何的輔助。在學生的學習，研究者或工程師們的研究、設計上，本軟體不失為一張且有用的工具。

Abstract

In the engineering applications of air conditioning, cooling and drying processes, psychrometric properties of moist air are usually needed and have to be calculated repetitively. In doing so with the traditional chart method, it usually takes time throughout the whole process and only a less degree of accuracy can be obtained. Many complex equations for the related thermodynamic properties have been proposed by several researchers in the past literature, but few of them were systematically organized as a convenient and useful program that can be used everywhere. Bakker-Arkema in 1974 was the first to group all these equations into subroutines, which can be CALLED on a large digital computer. Unfortunately, the root-search technique he used requires a lengthy calculation and more iterations are needed to obtain a final solution. Besides, not everyone in the field of thermodynamics is so familiar with the use of large digital computer and hardly feels

free to employ it in practice.

The purpose of this study is to work out a software which can be RUN on current personal microcomputers, such as Apple II+ and IBM PC/XT. A root-search technique has been built in the program in a very simple manner that once two of the psychrometric variables are specified, all other properties will be shown immediately, either in English or Metric system unit.

Since the software packages are designed to be more interactive, users would quickly acquaint with their commands and usage without need of any auxiliary materials. It would be a very handy and useful tool for students in training or researchers and engineers who are working on a subject related to these properties.

一、前言

在分析大部份的冷凍、空調及乾燥系統時，常需了解空氣在某狀態下之所有特性資料。這些熱力特性資料在傳統上多由空氣線圖(Psychrometric Chart)查得。其項目包括：

- 1) 乾球溫度 (Dry-Bulb temperature, DB)
- 2) 濕球溫度 (Wet-Bulb temperature, WB)
- 3) 相對濕度 (Relative Humidity, RH)
- 4) 露點溫度 (Dew Point temperature, DP)
- 5) 絕對溫度 (Absolute Humidity, AH)
- 6) 比容 (Specific Volume, SV)
- 7) 熱焓 (Enthalpy, EN)
- 8) 飽和蒸汽壓 (Saturation vapor Pressure, PS)
- 9) 蒸發潛熱 (Latent Heat of vaporization, HL)
- 10) 蒸汽分壓 (Vapor Pressure, PV)

因此空氣線圖在工程熱力學中是重要的一個章節，其重要性有如九九乘法表之於算術。但由於圖上刻劃密集不易辨認，再加上使用者估計上的誤差以及查表速度上的限制，使得在應用上仍有諸多不便。

本文參考歐美諸先進學者之文獻，結合各特性資料間之函數關係，將以往耗工耗時之查表工作，利用個人電腦快捷運算之特性來取代。以交談 (Interactive) 的溝通方式配合整體螢幕畫面的顯示，將十種特性資料一次列出，讓使用者能很清楚地得知某狀態下之所有空氣的熱力特性。

二、研究目的

1. 利用個人電腦撰寫一適用於描述空氣狀況的程式，配合數值分析的技巧，快速得出待求狀態點的所有空氣熱力特性資料，取代傳統的空氣線圖。

2. 提供教學上之功能，以交談方式使使用者能方便操作，進而深入了解。

三、介紹

美國暖氣冷凍空調協會 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineer, ASHRAE) 於 1967 年根據 Goff & Gratch (1940年) 在標準狀況下所求得的熱力特性資料，以統計力學方法製作了數套不同溫度範圍之空氣特性方程式。其範圍在 -40°F 至 250°F 之間，依高中低三個溫度層次及不同的壓力狀態可分為 5 個圖表。經過多位學者多年的研究，空氣線圖的適用溫度範圍更廣，精確度也更高，但是圖上的刻劃也變得更密。再者，由於公制、英制單位的通行，使得市面上的空氣線圖之種類更加繁多。利用圖表求得空氣之各種狀態固然是一種簡單的方法，但由於各種的人為誤差，或是在設計、分析上，需要快速的求得大量不同狀態下的空氣特性資料時，傳統的查圖表方法便不敷實用了。典型的空氣線圖，如圖 1 所示。

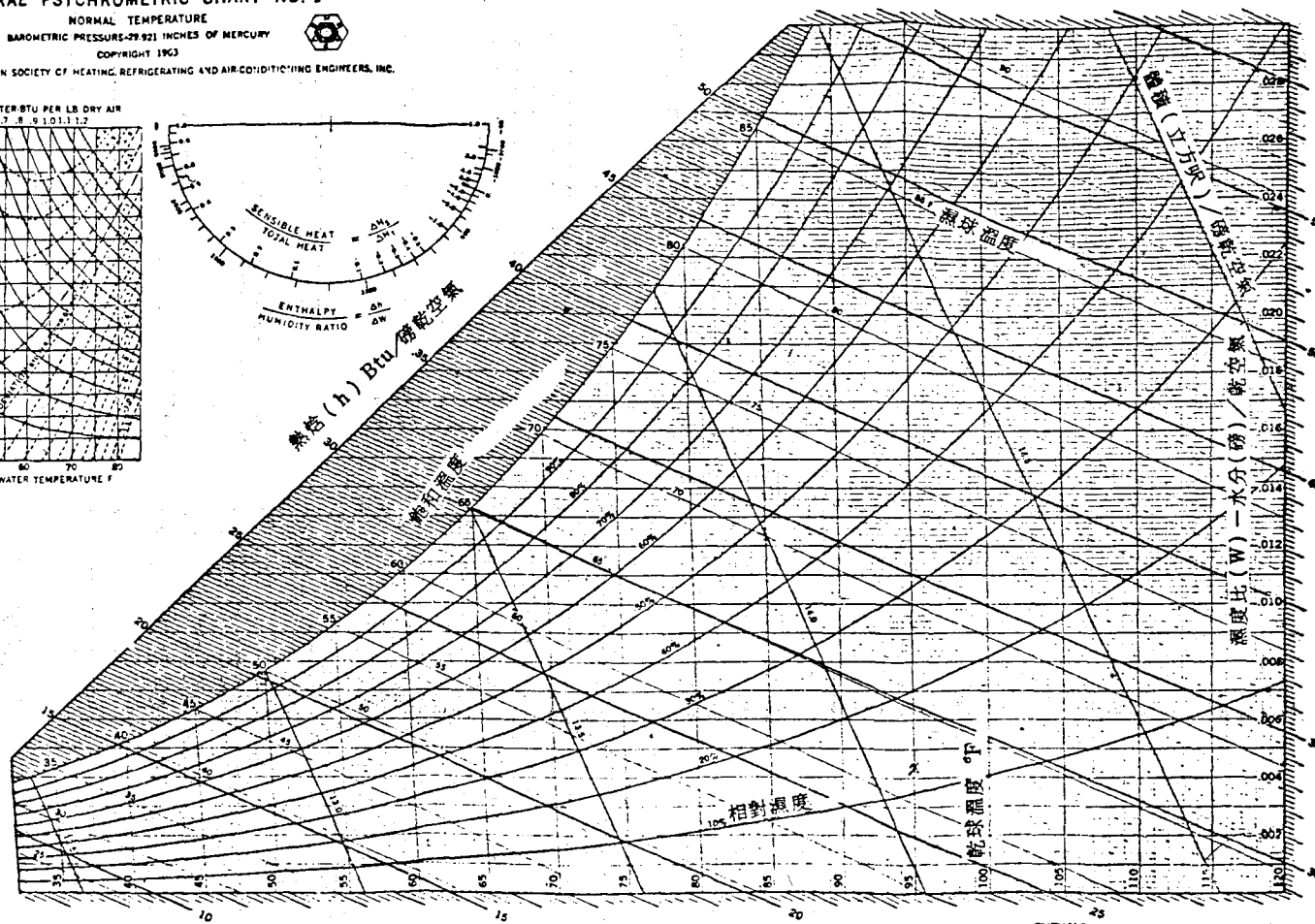
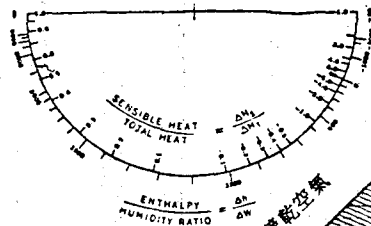
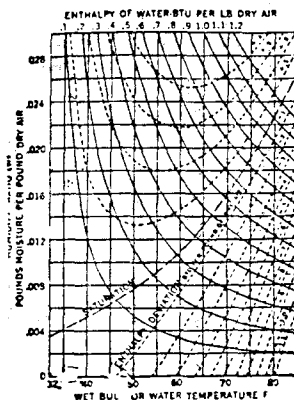
空氣線圖可提供有關空氣之各種熱力特性。在各特性中只要兩項為已知，該空氣在圖上之狀態點通常即可決定，而其他各特性可立即藉由通過該點之各種等值線直接讀出。然而，並非任兩種特性已

ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1

NORMAL TEMPERATURE
BAROMETRIC PRESSURE-29.921 INCHES OF MERCURY
COPYRIGHT 1963



AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.



Courtesy of Am. Soc. Heating, Refrig., Air-cond. Engrs

圖 1. ASHRAE 常溫範圍，第一號空氣線圖 (英制單位)

表一：空氣線圖之初始條件組

	DB	DP	EN	AH	HL	PS	PV	RH	SV	WB
DB		PP _a	PP	PP	I _b	I	PP	PP	PP	PP
DP			P _d	I	P	PP	I	P	S	P
EN				P	P	PP	P	N _c	N	
AH					P	PP	I	P	PP	P
HL						P	P	P	P	P
PS							PP	PP	PP	PP
PV								P	PP	P
RH										N
SV										N
WB										

- (a) PP：由此對初始條件組可直接求出其他的熱力特性資料。
 (b) I：由此對初始條件組在濕氣圖中所決定的點並不唯一。
 (c) N：由此對初始條件組不可能求出其他的熱力特性資料。
 (d) P：由此對初條件組可求出其他的熱力特性資料，但須配合迭代運算

部份摘自 Bakker-Arkema (1974)

知，均足以求出所有的特性資料。如表一所示，有幾對的特性資料不可能求出其他的特性資料。（表上註明N者），另有幾對則是由該組特性資料可能導致不唯一的解（表上註明I者）。可直接求出所有特性資料的初始條件組共有34對。

近年來多位學者發展了一系列複雜的熱力特性方程式，唯多應用於數位及類比型電腦（Digital & Analog Computer）上。然而基於電腦的價格，系統的設置方式及各機型的不能相容……等因素，使得這些方程式只能見諸於文獻上的探討，而不能使大多數需要使用的人享受諸先進學者的智慧成果。文獻上也大多散見各個熱力特性方程式而少見結合諸方程式而成一實用的模式。ASHRAE 基本手冊中也只列出由 DB 與 WB，DB 與 DP；DB 與 RH 三對初始條件求其他各特性資料的簡單步驟。

基於此，筆者選擇現在最為流行的八位元（APPLE II 或相容品）及十六位元（IBM PC/XT /AT或相容品）個人電腦，以培基(BASIC) 及巴斯卡 (PASCAL) 兩種語言寫成兩種版本的程式，由於相容性 (Compatible) 高，可携性 (Portable) 強，再加上硬體價格便宜，使得本程

式之實用價值大大的提高。

本程式最大的特點在於當作初始條件的兩項基本資料沒有受到限制，凡表一中所列可以求出其他特性資料的兩者（有34對）均可，就是有不唯一解的初始條件組（表一中註明I者）亦能找出其中的一組解。程式經驗證結果可得良好的執行速度及精確度。

四、熱力特性方程式

1.飽和蒸汽壓（溫度的函數）

英制：

$$(1) \ln P_s = 23.3924 - \frac{11286.6489}{T} - 0.46057 \ln T \dots\dots\dots 1a$$

摘自 Brooker (1967)

$$459.69 < T < 491.69^\circ R$$

$$\ln P_s = 54.6329 - \frac{12301.688}{T} - 5.16923 \cdot \ln T \dots\dots\dots 2a$$

摘自 Brooker (1967)

$$491.69 < T < 959.69$$

(2a) 式之誤差較大，一般建議採下式

$$\ln(P_s/R) = \frac{A+BT+CT^2+DT^3+ET^4}{FT-GT^2} \dots 3a$$

摘自 Keenan and Keyes (1936)

$$491.69 < T < 959.69$$

其中

$$R=3206.18$$

$$A=-27405.5$$

$$B=54.1896$$

$$C=-0.045137$$

$$D=0.215321 \times 10^{-4}$$

$$E=-0.462027 \times 10^{-8}$$

$$F=2.41613$$

$$G=0.00121547$$

T: 乾球溫度, °R

P_s: 飽和蒸汽壓, Psi

公制:

$$\ln P_s = 31.9602 - \frac{6270.3605}{T} - 0.46057 \ln T \dots 1b$$

摘自 Brooker (1967)

$$255.38 < T < 273.16$$

及

$$\ln(P_s/R) = \frac{A+BT+CT^2+DT^3+ET^4}{FT-GT^2} \dots 3b$$

摘自 Keenan and Keyes (1936)

$$273.16 < T < 533.16$$

其中

$$R=22,105,649.25$$

$$A=-27,405.526$$

$$B=97.5413$$

$$C=-0.146244$$

$$D=0.12558 \times 10^{-3}$$

$$E=-0.48502 \times 10^{-7}$$

$$F=4.34903$$

$$G=0.39381 \times 10^{-2}$$

T: 乾球溫度 °K

P_s: 飽和蒸汽壓 P_s

結冰狀態之飽和蒸汽壓在 -100°C (-148°F) 至 0°C (32°F) 範圍內為:

$$\ln(p_{ws}) = C_1/T + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot \ln(T) \dots 1c$$

其中:

$$C_1 = -5674.5359$$

$$C_2 = 6.3925247$$

$$C_3 = -0.9677843 \times 10^{-2}$$

$$C_4 = 0.62215701 \times 10^{-6}$$

$$C_5 = 0.20747825 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = -0.9484024 \times 10^{-12}$$

$$C_7 = 4.1635019$$

液態下之飽和蒸汽壓在 0°C (32°F) 至 200°C (392°F) 範圍內為:

$$\ln(p_{ws}) = C_8/T + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln(T) \dots 2c$$

其中:

$$C_8 = -5800.2206$$

$$C_9 = 1.3914993$$

$$C_{10} = -0.04860239$$

$$C_{11} = 0.41764768 \times 10^{-4}$$

$$C_{12} = -0.14452093 \times 10^{-7}$$

$$C_{13} = 6.5459673$$

上兩方程式中,

$\ln = \log_e$

p_{ws} = 蒸汽壓, Pa (1 Pa = 0.000145 psi)

T = 絕對溫度, °K (°K = °C + 273.15)

2. 濕球溫度 (飽和蒸汽壓的函數)

英制:

$$T - 459.69 = \sum_{i=0}^8 A_i (\ln(10 p_s))^i \dots 4a$$

摘自 Steltz and Silvestri (1958)

$$0.09 < p_s < 680$$

式中,

$$A_0 = 35.1579$$

$$A_1 = 24.5926$$

$$A_2 = 2.11821$$

$$A_3 = -0.341447$$

$$A_4 = 0.157416$$

$$A_5 = -0.0313296$$

$$A_6 = 0.00386583$$

$$A_7 = -0.249018 \times 10^{-3}$$

$$A_8 = 0.684016 \times 10^{-5}$$

公制:

$$T - 255.38 = \sum_{i=0}^8 A_i (\ln(0.00145 P_s))^i \dots 4b$$

摘自 Steltz and Silvestri (1958)

$$620.52 < P_s < 4,688,396.00$$

$$A_0 = 19.5322$$

$$\begin{aligned}A_1 &= 13.6626 \\A_2 &= 1.17678 \\A_3 &= -0.189693 \\A_4 &= 0.087453 \\A_5 &= -0.0174053 \\A_6 &= 0.00214768 \\A_7 &= -0.13843 \times 10^{-3} \\A_8 &= 0.38 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

其中

T: 濕球溫度, °R (英制), °K (公制)
P_s: 飽和蒸汽壓, psi (英制), P_s (公制)
當 P_s 以 P_v 取代時, T 表露點溫度

3. 露點溫度 (蒸汽分壓的函數)

英制:

在 32~150°F 範圍內:

$$t_d = 79.047 + 30.5790\alpha + 1.8893\alpha^2 \dots\dots\dots 5a$$

低於 32°F 時:

$$t_d = 71.98 + 24.873\alpha + 0.8927\alpha^2 \dots\dots\dots 6a$$

公制:

在 0~70°C 範圍內:

$$t_d = -35.957 - 1.8726\alpha + 1.1689\alpha^2 \dots\dots\dots 5b$$

在 -60~0°C 範圍內:

$$t_d = -60.45 + 7.0322\alpha + 0.3700\alpha^2 \dots\dots\dots 6b$$

其中

$$\begin{aligned}t_d &: \text{露點溫度, } ^\circ\text{F (英制), } ^\circ\text{C (公制)} \\ \alpha &= \ln(P_v)\end{aligned}$$

P_v: 蒸汽分壓, in-Hg (英制), P_s (公制)

4. 飽和溫度

其基本公式為:

$$t = A p_s^B + C \ln(P_s) + D \dots\dots\dots 7a$$

其中 A, B, C, D 的係數依單位與飽和蒸汽壓 (P_s) 之範圍區分如下:

英制:

摘自 khe V. Chau, (1980)

$$(a) \quad 0.0886 < p_s < 14.696 \text{ psi } (32^\circ\text{F} \leq t \leq 212^\circ\text{F})$$

$$\begin{aligned}A &= 0.93016617 \times 10^2 \\B &= 0.22179961 \\C &= 0.12818107 \times 10^2 \\D &= 0.87034683 \times 10^1\end{aligned}$$

$$(b) \quad 14.696 < p_s < 680.0 \text{ psi } (212^\circ\text{F} \leq t \leq 500^\circ\text{F})$$

$$A = 0.43816284 \times 10^2$$

$$\begin{aligned}B &= 0.29545748 \\C &= 0.21868439 \times 10^2 \\D &= 0.56272667 \times 10^2\end{aligned}$$

英制: 摘自 ASHRAE 基本手冊 (1977)

$$(a) \quad 2.29 \times 10^{-3} < P_s < 0.0886 \text{ psi } (-100^\circ\text{F} < t < 32^\circ\text{F})$$

$$\begin{aligned}A &= 0.1844049 \times 10^3 \\B &= 0.1171117 \\C &= 0.5561646 \times 10^1 \\D &= -0.9335884\end{aligned}$$

$$(b) \quad 0.0886 < p_s < 14.696 \text{ psi } (32^\circ\text{F} < t < 212^\circ\text{F})$$

$$\begin{aligned}A &= 0.9229778 \times 10^2 \\B &= 0.2226883 \\C &= 0.1288743 \times 10^2 \\D &= 0.9415002 \times 10\end{aligned}$$

$$(c) \quad 14.696 < p_s < 680.0 \text{ psi } (212^\circ\text{F} < t < 500^\circ\text{F})$$

$$\begin{aligned}A &= 0.4411702 \times 10^2 \\B &= 0.2949225 \\C &= 0.2177737 \times 10^2 \\D &= 0.5598708 \times 10^2\end{aligned}$$

公制:

摘自 khe V. Chau, (1980)

$$(a) \quad 0.6105 < p_s < 101.33 \text{ kPa } (0^\circ\text{C} < t < 100^\circ\text{C})$$

$$\begin{aligned}A &= 34.20975 \\B &= 0.2203603 \\C &= 7.048104 \\D &= -27.22600\end{aligned}$$

$$(b) \quad 101.33 < p_s < 4694.0 \text{ kPa } (100^\circ\text{C} < t < 260^\circ\text{C})$$

$$\begin{aligned}A &= 13.66825 \\B &= 0.2959410 \\C &= 12.20140 \\D &= -9.979682\end{aligned}$$

公制: 摘自 ASHRAE 基本手冊 (1977)

$$(a) \quad 0.00016 < p_s < 0.61074 \text{ kPa } (-73.3^\circ\text{C} < t < 0^\circ\text{C})$$

$$\begin{aligned}A &= 82.44543 \\B &= 0.1164067 \\C &= 3.056448 \\D &= -76.34573\end{aligned}$$

(b) $0.61074 < p_s < 101.34 \text{ kPa} (0^\circ\text{C} < t < 100^\circ\text{C})$

$$A = 33.38269$$

$$B = 0.2226162$$

$$C = 7.156019$$

$$D = -26.39589$$

(c) $101.34 < p_s < 4688.5 \text{ kPa} (100^\circ\text{C} < t < 260^\circ\text{C})$

$$A = 13.85606$$

$$B = 0.2949901$$

$$C = 12.10512$$

$$D = -10.03128$$

其中

P_s : 飽和蒸汽壓, Psi (英制), kPa (公制)

t : 飽和溫度, $^\circ\text{F}$ (英制), $^\circ\text{C}$ (公制)

5. 飽和蒸汽壓之關係

英制 :

$$P_{\text{swb}} - P_v = B(T_{\text{wb}} - T) \dots\dots\dots 8a$$

摘自 Brunt (1941)

$$B = \frac{0.2405(P_{\text{swb}} - P_{\text{atm}})(1 + 0.15577P_v/P_{\text{atm}})}{0.62194h_{fg}}$$

其中 :

P_{swb} : 濕球溫度時之飽和蒸汽壓

P_v : 蒸汽分壓

T_{wb} : 濕球溫度

T : 乾球溫度

P_{atm} : 大氣壓值

h_{fg} : 蒸發潛熱 (由方程式 14a~16a 求得, 當 $T_{\text{wb}} \leq 492^\circ\text{R}$ 時, 以 h_{fg} 取代)

公制 :

$$P_{\text{swb}} - P_v = B'(T_{\text{wb}} - T) \dots\dots\dots 8b$$

摘自 Brunt (1941)

式中

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

當 $T_{\text{wb}} \leq 273.16, 255.38 \leq T \leq 533.16$ 時以 h'_{fg} 替換 h_{fg}

6. 乾球與濕球溫度 :

英制 :

$$t_{\text{wb}} = t_{\text{dp}} + [b_1(D_t)^3 + b_2(D_t)^2 + b_3(D_t)]$$

$$e^{(b_4 D_t + b_5)} t_{\text{dp}}^{b_6} \dots\dots\dots 9a$$

摘自 Khe V. Chau (1980)

其中 :

$b_1 \sim b_6$: 常數 (查表二)

t_{dp} : 露點溫度, $^\circ\text{F}$

t_{wb} : 濕球溫度, $^\circ\text{F}$

$D_t = t_{\text{db}} - t_{\text{dp}}, ^\circ\text{F}$

t_{db} : 乾球溫度, $^\circ\text{F}$

表二係將乾球溫度 (由 $0^\circ\text{F} \sim 500^\circ\text{F}$) , 露點溫度 (由 $0^\circ\text{F} \sim 150^\circ\text{F}$) 分割成 7 部份, 如圖 2 所示。表二中所須的另一參數 t_{db}^* 則由下式定義 :

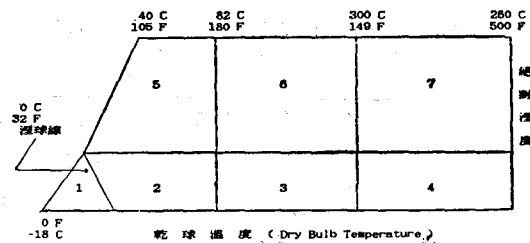


圖 2. 將空氣線圖區分為七部份, 各部份由相關係數分別演算公式 9a, 9b 之溫、溼度。摘自 Khe v. Chau. 1980

$$t_{\text{dp}}^* = at_{\text{dp}}^3 + bt_{\text{dp}}^2 + ct_{\text{dp}} + d \dots\dots\dots 10a$$

式中

$$a = -0.11756 \times 10^{-3}$$

$$b = -0.32646 \times 10^{-2}$$

$$c = -0.19195$$

$$d = +45.345$$

t_{db}^* = 在濕球 32°F 時之乾球溫度, $^\circ\text{F}$

t_{dp} = 露點溫度, $^\circ\text{F}$

公制 :

$$t_{\text{wb}} = t_{\text{dp}} + (b_1(D_t)^3 + b_2(D_t)^2 + b_3(D_t))$$

$$e^{(b_4 D_t + b_5)} (|t_{\text{dp}}|)^{b_6} \dots\dots\dots 9b$$

其中 :

$b_1 \sim b_6$: 常數 (查表三)

$t_{\text{dp}}, t_{\text{wb}}, t_{\text{db}}$: $^\circ\text{C}$

$D_t = t_{\text{db}} - t_{\text{dp}}, ^\circ\text{C}$

表三中之另一參數 t_{db}^* 由下式定義 :

$$t_{\text{db}}^* = at_{\text{dp}}^3 + bt_{\text{dp}}^2 + ct_{\text{dp}} + d \dots\dots\dots 10b$$

式中

$$a = -0.38799 \times 10^{-3}$$

$$b = -0.26394 \times 10^{-1}$$

$$c = -0.76378$$

$$d = 0.28894 \times 10^{-3}$$

t_{db}^* 及 t_{dp} 之單位為 $^\circ\text{C}$

表二：公式9a中及圖2各區內所需之係數值（英制）

Zone	1	2	3	4
	$0 \leq T_{dp} \leq 32^{\circ}\text{F}$ $0 \leq T_{db} \leq T^*_{db}$	$0 \leq T_{dp} \leq 32^{\circ}\text{F}$ $T^*_{db} \leq T_{db} \leq 180^{\circ}\text{F}$	$0 \leq T_{dp} \leq 32^{\circ}\text{F}$ $180 \leq T_{db} \leq 300^{\circ}\text{F}$	$0 \leq T_{dp} \leq 32^{\circ}\text{F}$ $300 \leq T_{db} \leq 500^{\circ}\text{F}$
b1	0.904803E-6	0.554717E-5	0.232489E-5	0.864159E-6
b2	-0.333017E-2	-0.314334E-2	-0.204027E-2	-0.116780E-2
b3	0.831231	0.84224	0.746559	0.615543
b4	-0.239490E-4	0.593269E-5	0.624943E-5	0.392047
b5	-0.808793E-2	-0.863032E-2	-0.883485E-2	-0.824950E-2
b6	1.130519	1.082753	1.074474	1.070437
Zone	5	6	7	
	$32 \leq T_{dp} \leq 105^{\circ}\text{F}$ $32 \leq T_{db} \leq 180^{\circ}\text{F}$	$32 \leq T_{dp} \leq 105^{\circ}\text{F}$ $180 \leq T_{db} \leq 300^{\circ}\text{F}$	$32 \leq T_{dp} \leq 105^{\circ}\text{F}$ $300 \leq T_{db} \leq 500^{\circ}\text{F}$	
b1	0.737013E-5	0.249546E-5	0.844289E-6	
b2	-0.353885E-2	-0.204326E-2	-0.110977E-2	
b3	0.827522	0.707415	0.572561	
b4	0.389627E-5	0.18247E-5	0.897368E-6	
b5	-0.260113E-2	-0.200086E-2	-0.153339E-2	
b6	1.404192	1.442215	1.475598	

T*db 值之定義如公式 10a

摘自 Khe V. Chau (1980)

表三：公式9b中及圖2各區內所需之係數值（公制）

Zone	1	2	3	4
	$-18 \leq T_{dp} \leq 0^{\circ}\text{C}$ $-18 \leq T_{db} \leq T^*_{db}$	$-18 \leq T_{dp} \leq 0^{\circ}\text{C}$ $T^*_{db} \leq T_{db} \leq 82^{\circ}\text{C}$	$-18 \leq T_{dp} \leq 0^{\circ}\text{C}$ $82 \leq T_{db} \leq 149^{\circ}\text{C}$	$-18 \leq T_{dp} \leq 0^{\circ}\text{C}$ $149 \leq T_{db} \leq 260^{\circ}\text{C}$
b1	0.125896E-6	0.118282E-4	0.509257E-5	0.192236E-5
b2	-0.476257E-2	-0.370293E-2	-0.243035E-2	-0.143934E-2
b3	0.463702	0.578023	0.519673	0.441919
b4	0.679164E-3	-0.325391E-4	-0.388462E-4	-0.215822E-4
b5	0.120197	0.302971E-1	0.287864E-1	0.255032E-1
b6	0.547492	0.878100	0.897871	0.904967
Zone	5	6	7	
	$0 \leq T_{dp} \leq 40^{\circ}\text{C}$ $0 \leq T_{db} \leq 82^{\circ}\text{C}$	$0 \leq T_{dp} \leq 40^{\circ}\text{C}$ $82 \leq T_{db} \leq 149^{\circ}\text{C}$	$0 \leq T_{dp} \leq 40^{\circ}\text{C}$ $149 \leq T_{db} \leq 260^{\circ}\text{C}$	
b1	0.157853E-4	0.571141E-5	0.200000E-5	
b2	-0.413278E-2	-0.257305E-2	-0.146300E-2	
b3	0.587189	0.525065	0.441100	
b4	0.560380E-4	0.293342E-4	0.146200E-4	
b5	-0.197368E-1	-0.165536E-1	-0.137500E-1	
b6	0.115724E+1	0.118502E+1	0.120600E+1	

T*db 值之定義如公式 10b

摘自 Khe V. Chau (1980)

7. 絕對濕度 (蒸汽分壓的函數)

英制：

$$AH = \frac{0.6219P_v}{P_{atm} - P_v} \dots\dots\dots 11a$$

$$459.69 < T < 959.69^\circ R$$

$$P_v < P_{atm}$$

公制：

$$AH = \frac{0.6219P_v}{P_{atm} - P_v} \dots\dots\dots 11b$$

$$255.38 < T < 533.16^\circ K$$

$$P_v < P_{atm}$$

其中：

AH：絕對濕度

P_v ：蒸汽分壓，psi (英制)， P_a (公制)

P_{atm} ：大氣壓，14.7psi (英制)，

$$1.01 \times 10^5 P_a \text{ (公制)}$$

T：乾球溫度， $^\circ R$ (英制)， $^\circ K$ (公制)

由11a及11b式可得下式：

$$P_v = \frac{AH \times P_{atm}}{(0.6219 + AH)} \dots\dots\dots 11c$$

8. 比容 (乾球溫度及蒸汽分壓的函數)

英制：

$$SV = \frac{53.35 \times T}{144(P_{atm} - P_v)} \dots\dots\dots 12a$$

$$459.69 < T < 959.69^\circ R$$

$$P_v < P_{atm}$$

公制：

$$SV = \frac{287T}{P_{atm} - P_v} \dots\dots\dots 12b$$

$$255.38 < T < 533.16^\circ K$$

$$P_v < P_{atm}$$

其中：

SV：比容， ft^3/lb (英制)， m^3/kg (公制)

由12a及12b式可得下式：

$$T = \frac{SV \cdot 144 \cdot (P_{atm} - P_v)}{53.35} \dots\dots\dots 12c$$

$$P_v = P_{atm} - \frac{53.35 \cdot T}{144 \cdot SV} \dots\dots\dots 12d$$

9. 相對濕度 (蒸汽分壓與飽和蒸汽壓的函數)

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \dots\dots\dots 13a$$

由上式可得

$$P_v = P_s \cdot RH \dots\dots\dots 13b$$

$$P_s = \frac{P_v}{RH} \dots\dots\dots 13c$$

10. 潛熱 (溫度的函數)

英制：

飽和昇華潛熱

$$h_{ig} = 1220.844 - 0.05077(T - 459.69) \dots\dots 14a$$

$$459.69 < T < 491.69$$

摘自 Brooker (1967)

飽和蒸發潛熱

$$h_{fg} = 1075.8965 - 0.56983(T - 491.69) \dots\dots 15a$$

$$491.69 < T < 609.69$$

$$h_{fg} = (1354673.214 - 0.9125275587T^2)^{1/2} \dots\dots 16a$$

$$609.69 < T < 959.69$$

摘自 Brooker (未發表)

公制：

飽和昇華潛熱

$$h_{ig} = 2,839,683.144 - 212.56384(T - 255.38) \dots\dots\dots 14a$$

$$255.38 < T < 273.16$$

摘自 Brooker (1967)

飽和蒸發潛熱

$$h_{fg} = 2,502,535.259 - 2,385.76424(T - 273.16) \dots\dots\dots 15b$$

$$273.16 < T < 338.72$$

$$h_{fg} = (7,329,155,978,000 - 15,995,964.08 T^2)^{1/2} \dots\dots\dots 16b$$

$$338.72 < T < 533.16$$

摘自 Brooker (未發表)

11. 熱焓值 (溫度、潛熱、絕對濕度的函數)

英制：

$$h = 0.2405(T - 459.69) - H[143.35 + 0.485$$

$$(491.69 - T_{dp})] + h''_{ig} H + 0.448H(T - T_{dp}) \dots\dots\dots 17a$$

$$459.69 < T_{dp} < 491.69$$

$$h = 0.2405(T - 459.69) + H(T_{dp} - 491.69)$$

$$+ h''_{fg} H + 0.448H(T - T_{dp}) \dots\dots\dots 18a$$

$$491.69 < T_{dp} < 671.69$$

公制：

$$h = 1006.92540(T - 273.16) - H[333,432.1 +$$

$$2030.5980(273.16 - T_{dp})] + h''_{ig} H +$$

$$1875.6864H(T - T_{dp}) \dots\dots\dots 17b$$

$$255.38 < T_{dp} < 273.16$$

及

$$h = 1006.92540(T - 273.16) + 4186.8H(T_{dp} - 273.16) + h_{fg}''H + 1875.6864H(T - T_{dp}) \quad \dots\dots\dots 18b$$

$$273.16 < T_{dp} < 373.16$$

由於式 17, 18 涉及的因子頗多，在計算機的運算上頗為耗時，另有些學者為了降低計算機時間，便在精確度的要求上作了些微的讓步，以下即為較精簡的方程式。

英制：

$$h = 0.240t + W(1061 + 0.444t)(\text{Btu/lb}) \quad \dots\dots\dots 19a$$

公制：

$$h = t + W(2501 + 1.805t)(\text{kJ/kg}) \quad \dots\dots\dots 19b$$

其中：

t：乾球溫度，°F (英制)，°C (公制)

W：絕對濕度

h：熱焓，BTU/lb (英制)，KJ/kg (公制)

五、程式計算流程

由表 1 可知，有 34 對的初始條件組可求出其他的空氣熱力特性資料。以下各表就各種可行的初始條件組詳細列出其計算流程以供參考。

CASE 1: 已知乾球溫度 DB, 濕球溫度 WB

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示 Y 為 x 的函數	
蒸汽分壓 PV (HL, PS, WB, DB)		eqn 8a		先以 eqn 14a, 15a, 16a 求 HL(WB)	
相對濕度 RH (PS, PV)		eqn 13a			
露點溫度 DP (PS, PV)		eqn 7b			
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15a, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
絕對濕度 AH (PV)		eqn 11a			
比容 SV (DB, PV)		eqn 12a			
熱火含 EN (DB, DP, AH, HL)		eqn 17a			

狀況一：已知乾，濕球溫度求其他各參數，演算所需引用之公式

CASE 2: 已知乾球溫度 DB, 相對濕度 RH

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示 Y 為 x 的函數	
蒸汽分壓 PV (PS, RH)		eqn 13b			
露點溫度 DP (PS, PV)		eqn 7b			
濕球溫度 WB (DP, DB)		eqn 10a			
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15a, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
絕對濕度 AH (PV)		eqn 11a			
比容 SV (DB, PV)		eqn 12a			
熱火含 EN (DB, DP, AH, HL)		eqn 17a			

狀況二：已知乾球溫度及相對濕度求其他各參數，演算所需引用之公式

CASE 3: 已知乾球溫度 DB, 露點溫度 DP

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示Y為x的函數	
蒸汽分壓 PV (DP)		eqn 1a, 3a		與前者使用同一公式, 但改以 DP代入, 可得PV	
相對濕度 RH (PS, PV)		eqn 13a			
濕球溫度 WB (DP, DB)		eqn 10a			
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15a, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
絕對濕度 AH (PV)		eqn 11a			
比容 SV (DB, PV)		eqn 12a			
熱焓 EN (DB, DP, AH, HL)		eqn 17a			

狀況三: 已知乾球及露點溫度, 求其他各參數, 演算所需引用之公式

CASE 4: 已知乾球溫度 DB, 絕對濕度 AH

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示Y為x的函數	
蒸汽分壓 PV (AH)		eqn 11c			
露點溫度 DP (PS, PV)		eqn 7b			
相對濕度 RH (PS, PV)		eqn 13a			
濕球溫度 WB (DP, DB)		eqn 10a			
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15a, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
比容 SV (DB, PV)		eqn 12a			
熱焓 EN (DB, DP, AH, HL)		eqn 17a			

狀況四: 已知乾球溫度及絕對濕度求其他各參數, 演算所需引用之公式

CASE 5: 已知乾球溫度DB, 比容 SV

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示Y為x的函數	
蒸汽分壓 PV (DB, SV)		eqn 12d			
露點溫度 DP (PS, PV)		eqn 7b			
相對濕度 RH (PS, PV)		eqn 13a			
濕球溫度 WB (DP, DB)		eqn 10a			
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
絕對濕度 AH (DB)		eqn 11a			
熱焓 EN (DB, DP, AH, HL)		eqn 17a			

狀況五: 已知乾球溫度及比容求其他各參數, 演算所需引用之公式

CASE 6: 已知乾球溫度 DB，熱焓 EN

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示Y為x的函數	
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15a, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
絕對濕度 AH (EN, DB)		eqn 19a		∵eqn 19a 為較 rough ∴需配合迭代法以求正確解	
蒸汽分壓 PV (AH)		eqn 11c			
露點溫度 DP (PS, PV)		eqn 7b			
相對濕度 RH (PS, PV)		eqn 13a			
濕球溫度 WB (DP, DB)		eqn 10a			
比容 SV (DB, PV)		eqn 12a			

狀況六：已知乾球溫度及熱焓求其他各參數，演算所需引用之公式

CASE 7: 已知乾球溫度 DB，蒸汽分壓 PV

求	得	使	用	備	註
飽和蒸汽壓 PS (DB)		eqn 1a, 3a		Y(x) 表示Y為x的函數	
比容 SV (DB, PV)		eqn 12a			
露點溫度 DP (PS, PV)		eqn 7b			
相對濕度 RH (PS, PV)		eqn 13a			
濕球溫度 WB (DP, DB)		eqn 10a			
潛熱 HL (DB)		eqn 14a, 15a, 16a		由 DB 之範圍決定使用之方程式	
絕對濕度 AH (DB)		eqn 11a			
熱焓 EN (DB, DP, AH, HL)		eqn 17a			

狀況七：已知乾球溫度及蒸汽分壓求其他各參數，演算所需引用之公式

CASE 8: 已知濕球溫度 WB，飽和蒸汽壓 PS

求	得	使	用	備	註
乾球溫度 DB (PS)		eqn 4a		Y(x) 表示Y為x的函數	
以下同於已知 DB, WB (CASE 1) 之執行動作					

CASE 9: 已知相對濕度 RH，飽和蒸汽壓 PS

求	得	使	用	備	註
乾球溫度 DB (PS)		eqn 4a		Y(x) 表示Y為x的函數	
以下同於已知 DB, RH (CASE 2) 之執行動作					

狀況八、九：已知濕球溫度及飽和蒸汽壓或相對濕度及飽和蒸汽壓求其他各參數，演算所需引用之公式

CASE 10: 已知露點溫度 DP，飽和蒸汽壓 PS						
求	得	使	用	備	註	
乾球溫度 DB (PS)		eqn 4a		Y(x) 表示Y為x的函數		
以下同於已知DB, DP(CASE 3) 之執行動作						
CASE 11: 已知絕對濕度 AH，飽和蒸汽壓 PS						
求	得	使	用	備	註	
乾球溫度 DB (PS)		eqn 4a		Y(x) 表示Y為x的函數		
以下同於已知 DB, AH (CASE 4) 之執行動作						
狀況十、十一：已知露點溫度及飽和蒸汽壓或絕對濕度及飽和蒸汽壓求其他各參數，演算所需引用之公式						
CASE 12: 已知絕對濕度 AH，比容 SV						
求	得	使	用	備	註	
蒸汽分壓 PV (AH)		eqn 11c		Y(x) 表示Y為x的函數		
乾球溫度 DB (SV, PV)		eqn 12c				
以下同於已知 DB, AH (CASE 4) DB, SV (CASE 5) 或 DB, PV(CASE 7)之執行動作						
CASE 13: 已知比容 SV，飽和蒸汽壓 PS						
求	得	使	用	備	註	
乾球溫度 DB (PS)		eqn 4a		Y(x) 表示Y為x的函數		
以下同於已知 DB, SV (CASE 5) 之執行動作						
狀況十二、十三：已知絕對濕度及比容或比容及飽和蒸汽壓求其他各參數，演算所需引用之公式						
CASE 14: 已知比容 SV，蒸汽分壓 PS						
求	得	使	用	備	註	
乾球溫度 DB (PV, SV)		eqn 12c		Y(x) 表示Y為x的函數		
以下同於已知 DB, SV(CASE 5) DB, PV(CASE 7) 之執行動作						
CASE 15: 已知熱焓 EN，飽和蒸汽壓 PS						
求	得	使	用	備	註	
乾球溫度 DB (PS)		eqn 4a		Y(x) 表示Y為x的函數		
以下同於已知 DB, EN (CASE 6) 之執行動作						

CASE 16: 已知飽和蒸汽壓 PS, 蒸汽分壓 PV

求 得 使 用 備 註

乾球溫度 DB (PS) eqn 4a $Y(x)$ 表示 Y 為 x 的函數

以下同於已知 DB, PV (CASE 7) 之執行動作

狀況十四、十五、十六：已知比容及蒸汽分壓，熱焓及飽和蒸汽壓或飽和蒸汽壓及蒸汽分壓求其他各參數，演算，所需引用之公式

除以上16對初始條件組外，尚有18對未予列出，基於其執行時所耗用的計算機時間，在此建議不直接由諸方程式來直接求解，而改配合數值分析的技巧，其方法簡述如下：

步驟 1：

列出已知之參數，若其中之一參數，與前述16種情況中任一組的初始條件相合者，則採用該CASE的計算模式。

假設 已知RH及DP兩參數，

令 $RH = V(L1)$

$DP = V(L2)$

此組初始條件不在前述16種情況中，但RH為CASE 2中初始條件之一，故採CASE 2的計算模式，則需要的已知條件為DB及RH。RH為已知值，DB值則必須採用嘗試與錯誤 (Trial & Error) 之方式，當成假定值。原DP已知值則成為比較基準值，利用CASE 2所算出之DP與已知DP值不斷比較。

步驟 2：

將兩項參數（其中之一為已知者 (RH)，另一為自設初值者 (DB)），依該CASE之計算步驟可求出原已知條件中未予採用之參數項（此處為DP）之計算值。再重複本步驟一次，唯採用另一初值 (DB)。其程序如下：

已知 $RH = V(L1)$

設 $DB = X1 = 50$

由 CASE 2 可求得

$DP = Y1$

其次再設 $DB = X2 = 60$

$RH = V(L1)$

再由 CASE 2 求得

$DP = Y2$ ，如圖 3 中之②

步驟 3：

由步驟 2 所求得之兩 (DP) 計算值，(即 Y1 與 Y2) 配合該項參數之原已知值 ($DP = U2$)，以相似形原理，反求出近似的 DB 值。其方法如

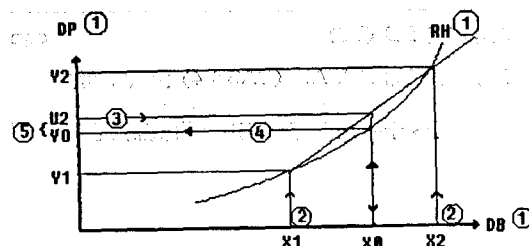


圖3. Root-Searching 解析步驟示意圖

圖 3 所示，圖 3 為沿已知線 RH 上，DB 與 DP 間之關係。設最初已知 DP 值為 $U2$ ，經由 DB 之兩假設值 $X1$ 與 $X2$ 以 CASE 2 所得之對應 DP 值為 $Y1$ 與 $Y2$ ，利用直線比例關係得到與 $U2$ 對應之 DB 值為 $Xφ$ 如下：

$$\frac{U2 - Y1}{Xφ - X1} = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

即 $Xφ = X1 + [(U2 - Y1)(X2 - X1) / (Y2 - Y1)]$
此時之 $Xφ$ 即為 DB 之近似值。

步驟 4：

為求更精確之 DB 值可將 $Xφ$ 當作新的 DB 已知條件，再配合 RH 之原值，採 CASE 2 之計算步驟，求得 DP 之新值 ($Yφ$)，如圖 3 中之④

已求得 $DB = Xφ$

已知 $RH = V(L1)$

由 CASE 2 可得 $DP = Yφ$

步驟 5：

求 DP 之新值 ($Yφ$) 與原已知值 ($U2$) 間的誤差，若誤差百分率 < 0.001 則視為無誤差，則 $DB = Xφ$ 即為所求，其他之熱力特性資料，則以 DB 及 RH 為已知，依 CASE 2 之方法求得。若誤差百分率 > 0.001 則將 $X1, X2, Y1, Y2$ 以 $X2, Xφ, Y2, Yφ$ 為新值代入，重回步驟 3 計算。

本迭代方法為數值分析中，假位法 (false method) 及切割法 (Secant Method) 的改良，並不要求一定是求根，即如圖 3 所示， $U2$ 並不要

求為 0，事實上可為 Y 軸上之任意值，另外， $X\phi$ 也可落在 $X1, X2$ 之外，而不影響程式之執行。有關此部份之程式內容，請參考 BASIC 版本程式中行號 5600 至 5660 部份。

六、輸入及輸出格式

程式執行之後，首先呈現如螢幕 1，第二行顯示使用單位為公制 (S.I Units)，最末行為指令行，允許輸入 I 鍵、C 鍵、S 鍵，I 表開始輸入資料，C 表更改單位，S 則結束程式執行。單位更改後如螢幕 2 所示，螢幕上第二行顯示使用單位為英制 (English Units)，此為初始螢幕。

PSYCHROMETRIC CHART (S.I. TNITS)

```

1 DRY B TEMP=0      ..<C>
2 WET B TEMP=0      ..<C>
3 REL. HUM.=0       ..<%>
4 DEW P TEMP=0      ..<C>
5 HUM. RATIO=0      ..KG/KG AIR
6 SPEC. VOL.=0      ..M^3/KG AIR
7 ENTHALPY =0       ..KCAL/KG
8 SAT. VAPOR=0      ..PA.
9 EVAP. HEAT=0      ..KCAL/KG
10 PART VAPOR=0     ..PA.
1) NPUT, C(HANGE UNIT, S(TOP?

```

螢幕 1

PSYCHROMETRIC CHART (ENGLISH UNITS)

```

1 DRY B TEMP=32     ..<F>
2 WET B TEMP=32     ..<F>
3 REL. HUM.=0       ..<%>
4 DEW P TEMP=32     ..<F>
5 HUM. RATIO=0      ..LB/LB AIR
6 SPEC. VOL.=0      ..FT^3/LB
7 ENTHALPY =0       ..BTU/LB AIR
8 SAT. VAPOR=0      ..PSI
9 EVAP. HEAT=0      ..BTU/LB AIR
10 PART VAPOR=0     ..PSI
1) NPUT, C(HANGE UNIT, S(TOP?

```

螢幕 2

選擇任兩項之後，電腦將所求得的所有熱力特性資料 (共 10 項) 顯示於螢幕上，如螢幕 3 所示，使用者可一目了然。

PSYCHROMETRIC CHART (S.I. UNITS)

```

1 DRY B TEMP=60     ..<C>
2 WET B TEMP=55     ..<C>
3 REL. HUM.=77.491  ..<%>
4 DEWP TEMP=54.576  ..<C>
5 HUM. RATIO=.112   ..KG/KG AIR
6 SPEC. VOL.=1.113  ..M^3/KG AIR
7 ENTHALPY =87.216  ..KCAL/KG
8 SAT. VAPOR=19921.274 ..PA.
9 EVAP. HEAT=556.25 ..KCAL/KG
10 PART VAPOR=15437.243 ..PA.
1) NPUT, C(HANGE UNIT, S(TOP?

```

螢幕 3

七、結 論

目前通用的空氣線圖，除溫度範圍不同外，單位不同，壓力範圍不同等等，都使得圖表的種類繁多，教人莫衷一是。本程式除包括公制、英制兩種單位外，溫度範圍適用於 0°F 至 500°F ，幾乎包括了所有的空氣線圖，而且電腦執行的結果，不會有作圖或估計等人為誤差，再加上能迅速反應，即刻求解，足以取代傳統的空氣線圖而有過之。

本文利用前人所提之各種理論或經驗方程式，進行整理、運用，並將整個軟體表現在交談性很強的電腦語言上，不僅可作為工程人員在設計、分析上的基本工具，更可作為老師 (學生) 的教學 (學習) 應用軟體。

八、參考文獻

1. ASAE D271. 2, 1983. Psychrometric Data. Agricultural Engineering Yearbook ASAE, St. Joseph, MI, 49085.
2. ASHRAE, 1977. Handbook of Fundamentals. ASHRAE, Inc. New York.
3. Brooker, D.B. 1967. Mathematical Model of the Psychrometric Chart. Trans. of the ASAE. 10(4): 588-560, 563.
4. Goff J.A. and S. Gratch. 1945. Thermodynamic Properties of Moist Air. Trans. American Soc. Heat. Vent. Eng. 51:125-164.
5. Khe V. Chau. 1980. Some New Empirical Equations for Properties of Moist Air. Trans. of the ASAE 23(5):1266-1271.
6. Barwick, A.J., Jordan, K.A. and Longhouse A.D. 1967. Accuracy in Computer Evaluation of Moist Air Properties. ():579-584.
7. Bakker-Arkema, F.W., Lerew, L.E., De Boer, S.F. and Roth, M.G. 1974. Grain Dryer Simulation. Research Report from the Michigan State University.