

# 專 論

## 屋脊式太陽能集熱器性能之模擬與研究

### Studies and Simulations of the Performance of an Inverted V-shaped Solar Collector

國立臺灣大學農機系教授

國立臺灣大學農工所研究生

馮 丁 樹

黃 山 樵

Fon, Din-Sue

Huang, Shan-Chiao

#### 摘 要

太陽能是一種相當乾淨的熱源，無污染之顧慮，且無需支付燃料費，其應用甚為有利。尤其在交通不便的地區，更為適用。太陽能應用於穀物乾燥方面，已有相當良好之成就。國內外有關此方面之文獻甚多，但配合國內農民使用之循環式乾燥機型者則甚為少見。本文即提供一簡單之構想，以解決農民在此方面應用時所可能發生之困難。

一般言，農民購置循環式或貨櫃式乾燥機後，通常仍須花一筆經費建造廠棚。在此種客觀之情況下，若能利用此廠棚屋頂的結構加以改良，使之既能保持遮棚功效，又能利用太陽能以取代部分燃油消耗，實屬一舉數得之事。

因此本研究即針對屋脊式太陽能集熱器的性能加以分析探討，並利用電腦程式來模擬其運作情形，盼能從中找出一個較佳的操作狀況。此外並對以加裝隔板之方式對整個系統性能的影響作一簡單的探討，以供未來設計時參考。

國內、外對於一般平板式太陽能集熱器性能的研究相當多，本文乃參考其分析方法，再綜合筆者自身見解擴充而成為本模式，並以室外實際測試結果加以驗證。研究結果證實在無隔板及單一隔板時本模式的可信程度相當高，但隨著隔板數目的增加，誤差亦有顯著的增大。試驗結果可得以下幾點結論：

1. 通風量的增加有助於有效能量的提高，然其進出口溫差會減少。
2. 隔板的安裝確實能增加集熱效率，且使用較大、較多數目的隔板，其所產生的效果亦比較好。

#### Abstract

Farmers who bought circulating or container type driers usually have to spend extra expenses building a machinery shed for them. Under such circumstances, it causes worth of designing a solar collector incorporated with the machinery shed such that it can supply the heated air to the drier to replace some energy consumption with little of additional expense.

Purposes of this study are to investigate an inverted V-shape solar collector, accompanied with a use of an interactive program.

to simulate the performance of system and to find the optimal operating conditions. Besides, the effects of separators on the performance of whole system were also studied.

Analysis on the model shows that the model is very reliable as no separator or only one separator is used. The deviation, however, was evidently found increasing as the numbers of the separator increase. The result of experiments leads to the following conclusions:

1. As the airflow rate increases, the available energy increases but the difference of air temperature between inlet and outlet tends to decrease.
2. The installations of separators would certainly increase the collector efficiency, and, therefore, more and larger separators used will tend to better the performance of collectors.

## 一、前 言

臺灣地處亞熱帶，年平均日射量  $5191 \text{ MJ/m}^2$ ，以  $36000 \text{ Km}^2$  來計算，年吸收熱能達  $1.87 \times 10^{14} \text{ MJ}$ 。是為七十三年臺灣地區總能源消耗之 148 倍，同時中南部地區每年可用太陽能日數超過 330 天，因此對於 90% 的能源供應皆依賴進口的我們而言，太陽能利用的研究實為不容忽視的課題。

太陽能是一種相當乾淨的熱源，無污染之顧慮，且無需支付燃料費，其所需之取熱結構亦甚為簡單，並且容易維護。在交通不便的地區，更為適用。太陽能應用於穀物乾燥方面，已有相當良好之成就與相當長久的歷史。國內數千年來多採用傳統之乾燥方式，以曬穀場就地利用太陽能。能源危機後，國外從事有關此方面之研究大為增加；但在國內，因政府之政策性推廣，消耗能源之機械式乾燥機反而增多，利用太陽熱能之諸般優點逐漸遭人遺忘。而且能配合國內農民使用之循環式乾燥機型者，亦不多見。本文即提供一簡單之構想，以解決農民在此方面應用時所可能發生之困難。

一般言，農民購置循環式或貨櫃式乾燥機後，通常仍須花一筆可觀之經費建造廠棚。在此種客觀之情況下，若能利用此廠棚屋頂的結構加以改良，使之既能保持遮棚功效，又能利用太陽能以取代部分燃油消耗，實屬一舉數得之事。

在食品及穀物加工項目中，乾燥部分需消耗相當多的能源。因此要降低能源成本，太陽能之利用應為一可行途徑。其結果不僅能源花費減少，同時

被乾燥物之品質與一般乾燥機的乾燥結果相比毫不遜色，可見太陽熱能的利用在農產品加工方面之可行性。

## 二、目 的

本研究之主要考慮在利用一般循環乾燥機所需之遮棚構造，模擬其外型作成可收集太陽熱能之收集室，其外觀如屋脊。本文之目的乃針對此屋脊式太陽能集熱器的性能加以分析探討，並利用電腦程式來模擬其運作情形，希望能找出一個較佳的操作狀況。此外並對加隔板對整個系統性能的影響作一簡單的探討，以供未來實際應用時參考之用。

## 三、理論分析

一般以空氣為媒體的太陽能集熱系統多為簡單的平板式集熱器，其特點為結構簡單，價格便宜，但集熱效率不高。為求較佳的效率及配合各種使用狀況，不少學者專家曾提出各種改良的集熱系統，如加裝蜂巢式結構等，以適應不同的使用狀況。本文所探討之對象為屋脊式太陽能集熱器，其外觀如圖 1 所示。該型集熱器可利用水平與垂直兩面黑體收集太陽能，如此在一年四季中均可獲得能量供乾燥之用。其安裝方法，可利用一般乾燥機之棚架屋頂或貨櫃式乾燥機之頂部作為太陽能之收集裝置，以所收集之太陽能加熱空氣，再將空氣導入乾燥機供乾燥穀物用。

(一)集熱面對輻射能吸收的基本推導

當輻射能穿過透明覆蓋射抵集熱板時，部分會

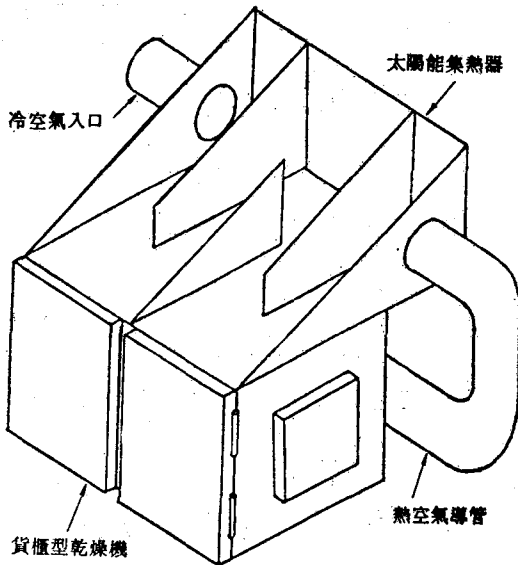


圖 1 屋脊式太陽能集熱器配合於貨櫃型乾燥機之安裝示意圖

再反射回透明覆蓋。集熱板所吸收之輻射能對入射輻射能之比值與透明覆蓋對輻射能之穿透率  $\tau$ ，以及集熱板對輻射能之吸收率  $\alpha$  有關。若定義該比值為  $(\tau\alpha)$

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n$$

$$= \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中  $\rho_d$ ：透明覆蓋對集熱板反射回來之輻射能反射率。

因而集熱板所吸收之輻射能量， $S$ ，為

$$S = (\tau\alpha)I_T \quad \dots\dots\dots(2)$$

(二)基本假設

為簡化對整個集熱系統所進行之熱傳分析，必須先做以下的假設：

1. 整個系統之熱傳遞現象是在穩定狀態下進行。
2. 系統熱傳遞為一瞬時反應，無時間延遲的情形發生。
3. 透明覆蓋以及集熱板等材料的熱含量均忽略不計。
4. 透明覆蓋部分的熱傳遞為一維熱流。
5. 透明覆蓋部分的溫度降忽略不計。
6. 透明覆蓋對紅外線以外部分的輻射而言為不透明。
7. 絕緣部分的熱傳遞為一維熱流。

8. 天空在溫度  $T_{sky}$  下，對長波輻射而言為一黑體。

9. 流體在不同方向的溫度梯度均互相獨立。

10. 各部分之熱損失係對相同的大氣溫度所產生。

11. 陰影以及流體漏失的影響均忽略不計。

(三)無隔板狀況下的熱平衡分析

在無隔板之情況下，如圖 2，須將整個集熱系統以二維視之。就透明覆蓋而言，應考慮的熱傳遞現象包括：（註：有關符號之定義見附錄）。

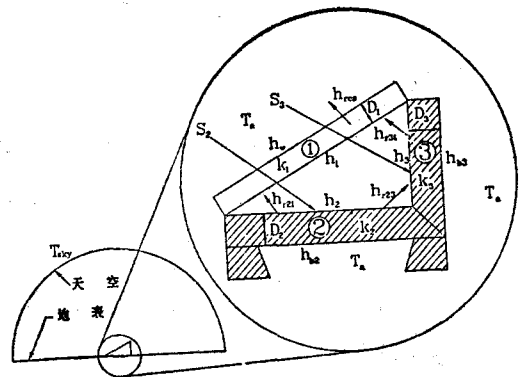


圖 2 集熱器熱平衡示意圖

1. 與水平及垂直集熱板之熱輻射：

$$q_{21} = h_{r21} (T_2^4 - T_1^4) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$q_{31} = h_{r31} (T_3^4 - T_1^4) \quad \dots\dots\dots(4)$$

2. 因外界空氣流動造成的熱對流：

$$q_{w1} = h_w (T_1 - T_a) \quad \dots\dots\dots(5)$$

3. 因內部空氣流動造成的熱對流：

$$q_{r1} = h_1 (T_1 - T_f^1) \quad \dots\dots\dots(6)$$

4. 透明覆蓋與天空間之熱輻射：

$$q_{1s} = h_{r1s} (T_1^4 - T_{sky}^4) \quad \dots\dots\dots(7)$$

因此，關於透明覆蓋的熱平衡方程式為：

$$q_{21} + q_{31} = q_{w1} + q_{r1} + q_{1s} \quad \dots\dots\dots(8)$$

對水平及垂直集熱板而言，所包含的熱傳項均類似，故一併考慮之：

A. 集熱板所吸收的輻射能： $S_3$  與  $S_2$ 。

B. 與透明覆蓋間之熱輻射：

$$q_{12} = h_{r21} (T_2^4 - T_1^4) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$q_{13} = h_{r31} (T_3^4 - T_1^4) \quad \dots\dots\dots(10)$$

C. 絕緣體側的熱流失：根據 Klein (1975)，

此部分的熱損失包括由外界環境造成的熱對流以及溫差造成之熱傳導。

$$q_{b2} = \left( \frac{D_2}{k_2} + \frac{1}{h_{b2}} \right)^{-1} (T_2 - T_a) \dots\dots\dots(11)$$

$$q_{b3} = \left( \frac{D_3}{k_3} + \frac{1}{h_{b3}} \right)^{-1} (T_3 - T_a) \dots\dots\dots(12)$$

D 內部空氣流動造成的熱對流：

$$q_{r2} = h_2 (T_2 - T_f) \dots\dots\dots(13)$$

$$q_{r3} = h_3 (T_3 - T_f) \dots\dots\dots(14)$$

E 水平及垂直集熱板間之熱輻射：

$$h_r = \begin{cases} h_{r23} & \text{若 } T_2 \geq T_3 \\ h_{r32} & \text{若 } T_3 \geq T_2 \end{cases}$$

$$q_{23} = h_r [T_2^4 - T_3^4] \dots\dots\dots(15)$$

因此，關於水平及垂直集熱板的熱平衡方程式為

$$S_2 = q_{12} + q_{b2} + q_{r2} + q_{23} \dots\dots\dots(16)$$

$$S_3 = q_{13} + q_{b3} + q_{r3} - q_{23} \dots\dots\dots(17)$$

最後，對流體而言，其所獲得的能量為

$$Q_u = A_1 q_{r1} + A_2 q_{r2} + A_3 q_{r3} \dots\dots\dots(18)$$

式中的  $A_1$ 、 $A_2$  及  $A_3$  分別代表透明覆蓋，水平及垂直集熱板的面積。

#### 四熱傳係數之推導

在上面運算的過程中，有幾個未知常數如熱輻射係數、熱對流係數、熱傳導率、天空溫度等必須先知道。除了熱傳導率與所用的材料有關外，餘均為某些已知常數的函數，以下將探討這些未知常數。

就兩個平面  $i$  與  $j$  而言，若熱由平面  $i$  輻射至平面  $j$ ，則其間之熱輻射係數為：

$$h_{r,ij} = \sigma \left[ \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{(1 - \epsilon_j) A_j}{\epsilon_j A_i} \right]^{-1} \dots\dots(19)$$

根據 Sparrow 與 Cess (1978) 如圖 3 之兩個平面間的輻射形狀因數可依下列各式求之：

$$X = a/b$$

$$Y = c/b$$

$$Z = X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi$$

$$W = XY \sin \phi + \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) (X^2 + Y^2) + Y^2$$

$$\tan^{-1} \left( \frac{X - Y \cos \phi}{Y \sin \phi} \right) + X \tan^{-1} \left( \frac{Y - X \cos \phi}{X \sin \phi} \right)$$

$$V = \left( \frac{2}{\sin^2 \phi} - 1 \right) \ln \left[ \frac{(1 + X^2)(1 + Y^2)}{1 + Z} \right] + Y^2 \ln \left[ \frac{Y^2(1 + Z)}{(1 + Y^2)Z} \right] + X^2 \ln \left[ \frac{X^2(1 + X^2)}{Z(1 + Z)} \right]$$

$$U = Y \tan^{-1} \left( \frac{1}{Y} \right) + X \tan^{-1} \left( \frac{1}{X} \right) - Z^{1/2} \tan^{-1} \left( \frac{1}{Z^{1/2}} \right)$$

$$T(\xi) = (1 + \xi^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$$

$$S = XT(X) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{X \cos \phi}{T(X)} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{Y - X \cos \phi}{T(X)} \right) \right]$$

$$R = \int_0^{\pi} T(\xi) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\xi \cos \phi}{T(\xi)} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{X - \xi \cos \phi}{T(\xi)} \right) \right] d\xi$$

$$F_{12} = \frac{1}{\pi Y} \left( R \cos \phi + \frac{\sin \phi \sin 2\phi}{2} T + U + \frac{\sin^2 \phi}{4} V - \frac{\sin 2\phi}{4} W \right) \dots\dots\dots(20)$$

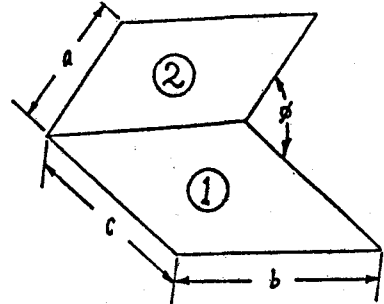


圖 3 公式第20式之相關位置

至於透明覆蓋與天空間之熱輻射係數，因  $A_{s,ky} \gg A_1$ ，且  $F_{12}$  為 1，由第19式可得下式：

$$h_{r,cs} = \sigma \epsilon_1 \dots\dots\dots(21)$$

另外依 Duffie 與 Beckman (1980) 的說法，天空溫度可以下式求之：

$$T_{s,ky} = 0.0552 T_1^{1.5} \dots\dots\dots(22)$$

上式中的溫度均以絕對溫標 (Kelviin Scale) 表示之。

至於熱對流係數須分兩方面說明：首先討論因內部空氣流動造成之熱對流，隨着空氣流速的不同，此可分成強制對流以及自然對流兩種。Ozisik

(1985)為區分等熱流通量的平板表面的熱對流情形，定義下面之指標：

$$\frac{Gr}{Re_L^2} \begin{cases} \gg 1 & \text{自然對流。} \\ \approx 1 & \text{混合對流。} \\ \gg 1 & \text{強制對流。} \end{cases} \quad (23)$$

式中，

$V_0$ ：空氣流速。

$T_w$ ：平板溫度。

$Re_L$ ：Reynolds Number，定義為  $VL_0/\nu$ 。

$Gr$ ：Grashof Number，定義為

$$\frac{g\beta L^3 |T_w - T_f|}{\nu^2}$$

黃文雄 (1978) 認為等熱流通量的平板表面的平均強制對流係數可以下式求得：

$$h_r = 0.838 \frac{k_f}{L} Pr^{1/3} Re_L^{1/2} \quad (24)$$

式中，

$k_f$ ：空氣之熱傳導率。

$Pr$ ：Prandtl Number 定義為  $\nu/\alpha_f$ 。

至於自然對流部分，因與平板角度有關，需分別處理：首先考慮水平板面，由 Ozisik (1985) 可得：

$$X = Gr \cdot Pr$$

$$Nu = \begin{cases} 0.13X^{1/3} & X < 2 \times 10^8 \\ 0.16X^{1/5} & 2 \times 10^8 < X < 10^{11} \end{cases} \quad (25)$$

式中，

$Nu$ ：Nusselt Number 定義為  $h_r L/k_f$ 。

其次考慮一傾斜且受熱面朝下的平面，如圖 4 所示，由 Ozisik (1985) 可得：

$$Nu = 0.56(X \cdot \cos\theta)^{1/4} + \theta < 88^\circ \quad (26)$$

$$10^5 < GrPr < 10^{11}$$

最後考慮一垂直平板，由 ASHRAE Handbook (1977)，可得：

$$h_r = 1.417 \frac{|T_w - T_f|}{W_3} \quad (27)$$

式中， $W_3$ ：直立面高度。

接着考慮因風吹造成的熱對流，根據 Duffie 與 Beckman (1980)，可得：

$$h_w = \text{MAX} \left[ 5, \left( \frac{8.6 V_w^{0.6}}{L_c^{0.4}} \right) \right] \quad (28)$$

式中， $V_w$  為風速。

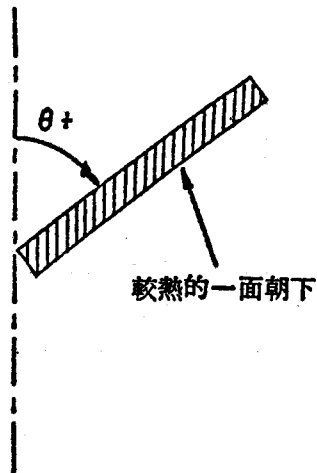


圖 4 公式第26式角度之計算方向

將方程式(10)、(18)、(19)以及(20)聯立求解，即可求得流體所得到的能量，進而得知集熱系統的效率等訊息。

因附加隔板狀況下的熱平衡分析

集熱器內部加裝隔板後，會增加流體流動阻力，但同時也可增加流體與集熱表面接觸機會，此時流體本身產生的紊流亦增加，其所能帶走之有用能量亦會隨之增加。因此集熱效率會比內部無隔板時為高。

對加有隔板的集熱器進行如前述之熱傳平衡分析時，必須將系統視作三度空間來考慮。但如此分析時，聯立方程組中之方程式的個數將隨隔板數目之增加而迅速增加，造成求解上的困難，因此需另外尋求解決方法。

為使計算有一較為簡便之處理方式，當隔板性質與集熱板性質相近時，吾人乃假設如此的集熱器，其所產生的熱效應與一比較長但無備隔板的集熱器相同。基於此種觀念下所能獲之長度估稱之為「等效流動長度」。因此要進行熱平衡分析時，所必須知道的即為該「等效流動長度」。考慮如圖 5 的情形：設隔板個數為奇數，且進出風口中心點在同一直線上的特殊狀況，若令  $L'$  為「等效流動長度」，則可作如下之定義：

$$L' = L + W_2 - 2L_n + \sum_{i=1}^{N_s} L_s(i) \quad (29)$$

式中，

$W_2$ ：水平集熱板的寬度。

$L_s(i)$ ：第  $i$  個隔板的長度。

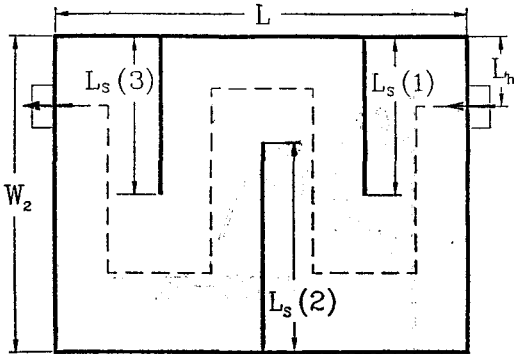


圖 5 等效流動長度之定義

以  $L'$  代替  $L$  代入前述之無隔板狀況的熱平衡方程組中，吾人即可求得有隔板時的流體出口溫度及有效能量等資料。

#### 四、實驗及驗證

##### (一) 實驗儀器與設備

本實驗設備包括送風機、熱電偶線、水平輻射儀、自動溫度記錄器、輻射儀輸出自動記錄器、皮氏管及傾斜壓力計等。

至於屋脊式太陽能集熱器則是用四分厚夾板釘製而成，內面塗以不反光黑漆，如圖 6 所示，而集熱器表面之透明覆蓋為由三久工業機械公司所提供之強化玻璃。

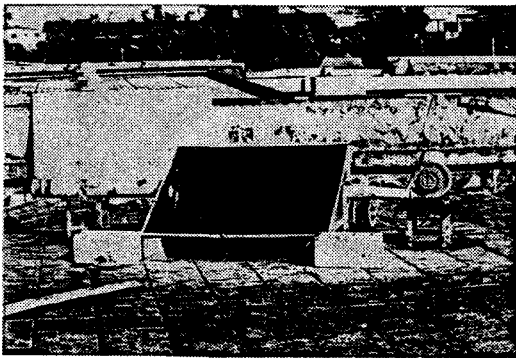


圖 6 試驗裝置之外觀圖

##### (二) 試驗變因之控制

1. 風量：選用 2.38、3.83 以及 4.26 立方米/分等三種大小的風量。
2. 隔板：隔板的配置方式有五種，其中包括：
  - (1) 無隔板。
  - (2) 一塊長 0.6m 的隔板置於集熱器中央。
  - (3) 一塊長 0.3m 的隔板置於集熱器中央。

(4) 三塊長 0.6m 的隔板分置於集熱器中央及距左右兩側各為全年的四分之一的位置。

(5) 一塊長 0.6m 的隔板置於集熱器中央，另外兩塊長 0.3m 的隔板分置於距離左右兩側各為全年的四分之一的位置。

##### (三) 溫度及太陽輻射能之記錄

利用熱偶線量取之溫度包括大氣乾濕球溫度、空氣進出集熱器時溫度、流體與各板面的溫度。然而受限於測點數目之限制，流體與各板面部分僅能測幾點的溫度，因此這部分的溫度只能供參考用。此外各熱電偶的端點皆以鋁箔覆蓋，以免受日光直射的影響。

關於太陽輻射部分，除量測水平全輻射外，尚包括水平面之散射輻射量。後者係利用一木板將輻射儀遮蓋，使其接收不到直射輻射而量得。由於記錄器本身的問題造成只能連接一個輻射儀，因此散射輻射量係在各量測設定時間之間不定時量取，再利用這些數據線性內插而求得量測設定時間當時之散射輻射量。

##### (四) 實驗程序

試驗前先利用皮氏管與傾斜壓力計對風機進行多次測試，將風機風門設定標記，將風門大小開至標記處量得當時風壓，再推算風速與風量。將各次結果平均即為標記所代表之風量大小。此後集熱器性能測試與程式模擬皆以此數據為準。

試驗工作是從民國七十六年二月四日至十八日在霧峰省立農業試驗所農機系大樓屋頂進行。每天早上七點鐘將風機及各記錄器打開暖機，並將覆蓋玻璃表面擦拭乾淨，以消除灰塵的影響。數據記錄是從早上七點半進行至下午四點半，每半個小時記錄一次。

此外，在民國七十六年三月份在臺大農機系館屋頂對強化玻璃的透射率進行測試實驗：記錄太陽時間中午時穿過玻璃之輻射能量以及未被玻璃遮蓋時之輻射能量，再求二者之比值，即得玻璃之透射率，並將每次結果予以平均，以驗證由廠商所提供數據的正確性。

#### 五、程式介紹與操作說明

本研究除依上述方式進行試驗外，為使所獲得之資料有所印證，作者亦依上述理論之基本探討建立一應用模式。使整個運算過程能在電腦中事先模擬完成。

本模擬程式係在 IBM PC 系列個人電腦上利用美國 Borland 公司出品的 TURBO PASCAL 所發展而成。經編譯後之程式大小約 60K。同時程式中有關螢幕顯示部分皆以中文為之，只要是屬於 BIG-5 碼的中文系統皆能配合使用。

以下步驟可說明本模擬程式之演算過程 (Algorithm)：

1. 自磁碟片讀入氣象資料。
2. 選擇測試地點。
3. 設定系統操作參數 (如圖 7)。
4. 選擇每小時水平日輻射資料來源，依下面三個步驟計算，每小時之太陽輻射量 (如圖 8)：

(1) 實值法：自磁碟片讀入實測之逐時日輻射資料。

(2) 日照推測法：依實際日照時數依下面二式推算得全天日輻射量，再推算小時日輻射量。

$$\text{水平面日全輻射量 } H = H_o(0.141 + 0.584 \frac{n}{N}) \dots\dots\dots(30)$$

$$\text{水平面日全輻射量 } H_d = H - 1.617H_o(0.141 + 0.584 \frac{H}{H_o}) \dots\dots\dots(31)$$

(3) 日射推測法：依輸入之全天日輻射量資料，由公式(31)推算每小時日輻射量。

5. 全螢幕檢查已知資料並作最後修正 (如圖 8)：
6. 逐時計算垂直面之入射全輻射量。
7. 逐時計算出口處空氣溫度、有效能量以及瞬時效率。計算過程如下：

(1) 假設流體平均溫度為流體進入集熱器時之溫度。

(2) 根據流體平均溫度求得流體性質。

(3) 利用第 8、16、17 式解得三個平面的平均溫度。

(4) 由第 18 式求得有效能量。

(5) 由有效能量反推流體離開集熱器時之溫度。

(6) 若定義流體平均溫度為流體進入與離開集熱器時溫度之平均，則比較先前假設的流體平均溫度與流體進入與離開集熱器時溫度之平均值，若其差值超過容許度，則以後者為流體平均溫度，重回步驟(2)繼續執行。

(7) 將結果輸出到螢幕上。

8. 將結果存到指定檔案中。
9. 程式執行結束。

=====

操作參數表 (第1頁)

=====

1. 集熱板長度 (m)	: 1.200
2. 水平集熱板寬度 (m)	: 0.900
3. 垂直集熱板寬度 (m)	: 0.500
4. 透明覆蓋厚度 (mm)	: 3.200
5. 透明覆蓋輻射穿透率	: 0.830
6. 透明覆蓋平均折射率	: 1.526
7. 透明覆蓋熱傳導率 (W/(mC))	: 0.791
8. 透明覆蓋輻射放射率	: 0.900
9. 水平集熱板輻射放射率	: 0.900
10. 垂直集熱板輻射放射率	: 0.900
11. 集熱面輻射吸收率	: 0.900
12. 水平絕緣層厚度 (mm)	: 10.000
13. 垂直絕緣層厚度 (mm)	: 10.000

=====

操作參數表 (第2頁)

=====

1. 操作時間-月份	: 2
2. 操作時間-日期	: 16
3. 實際日照時數 (Hour)	: 9.700
4. 地表反射率	: 0.250
5. 空氣流通率 (m <sup>3</sup> /min)	: 2.300
6. 隔板個數 (Ns<=3)	: 3
7. 適當中心至垂直集熱面之距離 (m)	: 0.200
8. 適當中心至水平集熱面之距離 (m)	: 0.200

=====

隔板參數表

=====

No. 1 長度 (m) : 0.60	厚度 (mm) : 7.00	輻射率 : 0.900
No. 2 長度 (m) : 0.60	厚度 (mm) : 7.00	輻射率 : 0.900
No. 3 長度 (m) : 0.60	厚度 (mm) : 7.00	輻射率 : 0.900

圖 7 系統參數設定之螢幕

=====

氣象資料檢查表

<台中>

=====

日期: 2/16 日全輻射量 = 14.84 (MJ/m<sup>2</sup>)

時刻	乾球溫度 (°C)	風速 (m/s)	全輻射量 (W/m <sup>2</sup> )	濕射量 (W/m <sup>2</sup> )	入口溫度 (°C)
0800	18.00	0.00	182.00	135.18	21.00
0900	19.00	0.00	354.60	298.30	24.00
1000	22.00	0.00	487.80	242.00	28.00
1100	26.00	0.00	637.00	238.30	29.00
1200	27.00	0.00	890.40	247.70	31.00
1300	28.00	0.00	694.20	234.50	32.00
1400	27.00	0.00	626.60	198.00	32.00
1500	29.00	0.00	495.30	159.50	32.00
1600	28.00	0.00	363.90	112.60	32.00

=====

2月16日效率計算列表

=====

時刻	水平輻射 (W/m <sup>2</sup> )	垂直輻射 (W/m <sup>2</sup> )	總輻射能 (KW)	吸收功率 (KW)	入口溫度 (°C)	出口溫度 (°C)	有效功率 (KW)	效率
0800	182.00	142.52	0.282	0.224	21.0	23.8	0.135	0.478
0900	354.60	278.39	0.550	0.438	24.0	31.0	0.320	0.583
1000	487.80	377.97	0.754	0.601	26.0	36.9	0.504	0.659
1100	637.00	501.58	0.990	0.790	29.0	44.6	0.718	0.717
1200	890.40	548.45	1.070	0.855	31.0	47.8	0.759	0.700
1300	694.20	552.54	1.081	0.863	32.0	49.1	0.766	0.709
1400	626.60	519.49	0.988	0.788	32.0	47.1	0.679	0.687
1500	495.30	441.03	0.800	0.636	32.0	44.2	0.552	0.690
1600	363.90	309.18	0.514	0.408	32.0	38.8	0.309	0.691
總和 =			25.302	20.171			17.059 (MJ)	
日平均效率 = 0.674								

圖 8 氣象資料之輸入及修正

## 六、結果與討論

表一與表三為實驗當時的氣象資料、變因控制狀況與天氣狀況之概略描述。氣象資料以大里鄉菸葉試驗所氣象站的資料為準。該資料中僅有四個時間的資料，使用上有所困難，因此實際作業時皆令大氣風速為零。在數學模式上所求得之集熱性能應為一極限狀況。

首先由無隔板時的結果來探討模擬程式的準確性：在模擬程式中，求得每小時之太陽輻射量。圖9及10為二月十六及十八日之全天日射功率變化，十六日為典型之晴天；十八日則屬陰天，中午有雲層遮蔽，故使太陽入射能量曲線明顯下降。

圖11為十六日實際增加之溫度與不同日射估算法下所模擬而得之溫度差比較。其間所顯示之曲線變化，兩者相當吻合，且在數值上的誤差不超過攝氏三度；圖12則為十八日之熱風溫度增加情形。就

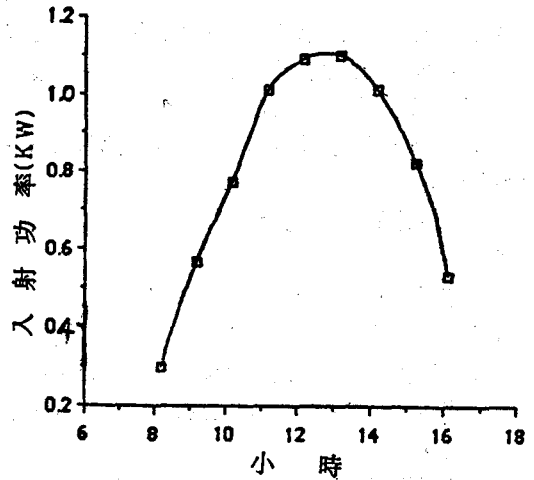


圖9 全天入射功率變化曲線圖(二月十六日)

表一、實驗期間之相關氣象資料

日期	乾球溫度				相對濕度				風速 (m/s)				日照時數	日射量 MJ/m <sup>2</sup>
	6時	9時	14時	21時	6時	9時	14時	21時	6時	9時	14時	21時		
0204	8.3	11.5	17.4	9.4	57	49	40	73	2.5	4.4	3.6	1.3	9.2	12.49
0205	9.3	13.3	21.6	13.0	80	75	45	82	0.8	1.2	2.5	2.1	9.4	13.70
0206	9.1	13.3	24.4	15.0	88	88	40	72	1.8	1.1	2.5	1.5	9.9	14.56
0207	12.1	17.9	25.5	16.5	87	70	49	72	1.2	0.7	4.5	0.9	9.1	13.66
0208	13.2	18.0	27.2	17.3	87	80	47	82	1.7	0.5	2.4	2.6	8.9	13.99
0209	13.8	18.7	26.5	17.6	88	81	52	65	1.7	0.0	4.8	1.6	9.7	14.18
0210	13.3	17.6	27.5	19.5	82	72	36	67	0.8	0.3	1.0	1.8	9.8	14.06
0211	16.2	22.5	28.5	22.7	74	64	61	86	1.2	1.8	5.4	2.8	8.4	12.35
0212	19.1	24.5	28.0	20.7	85	65	55	83	1.5	1.5	6.3	1.3	9.2	14.33
0213	12.4	18.5	26.0	17.1	92	87	65	89	2.9	2.6	2.4	1.8	7.0	12.00
0214	16.6	18.5	24.1	17.5	90	80	66	87	0.7	1.9	4.2	1.9	6.9	12.29
0215	15.7	20.0	24.0	17.3	89	77	63	84	3.2	2.7	3.7	2.7	10.0	15.51
0216	15.6	18.5	25.5	18.2	86	83	59	89	1.4	1.4	2.9	1.8	9.7	14.84
0217	15.6	18.5	26.4	18.8	89	89	61	81	1.5	0.5	4.5	0.8	9.0	14.51
0218	16.3	20.1	25.1	17.7	93	78	64	79	0.0	1.0	3.4	1.1	8.9	11.89

(資料來源臺中縣大里鄉菸葉試驗所。測站位置：東經 120° 41'，北緯 24° 05'，高度 77.7 公尺)。



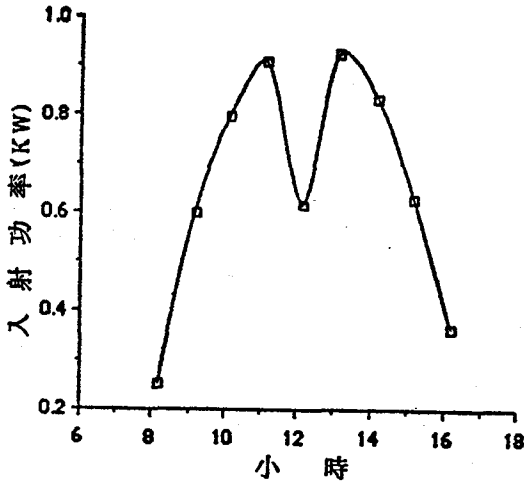


圖10 全天入射功率變化曲線圖 (二月十八日)

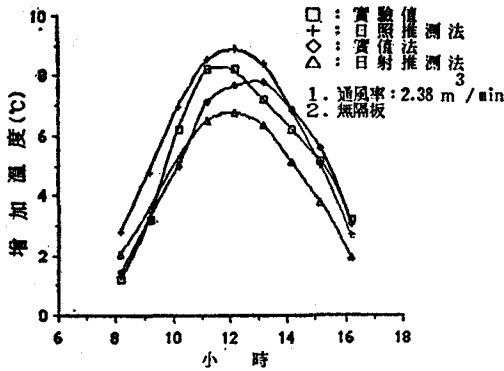


圖11 無隔板時熱風溫度增加之實驗值與預測值比較 (二月十六日)

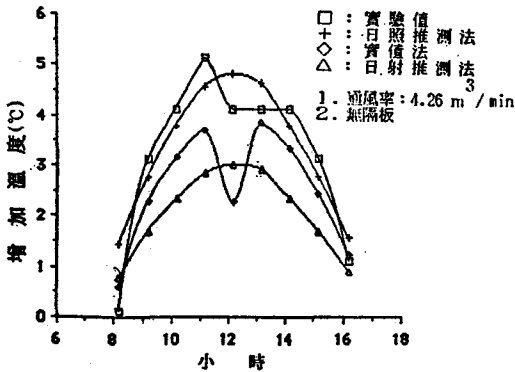


圖12 無隔板時熱風溫度增加之實驗值與預測值比較 (二月十八日)

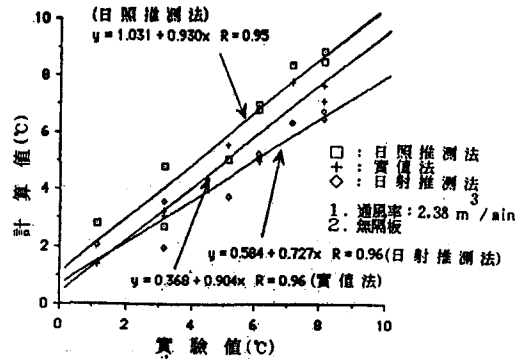


圖13 無隔板時熱風溫度預測值與實驗值之比較 (二月十六日)

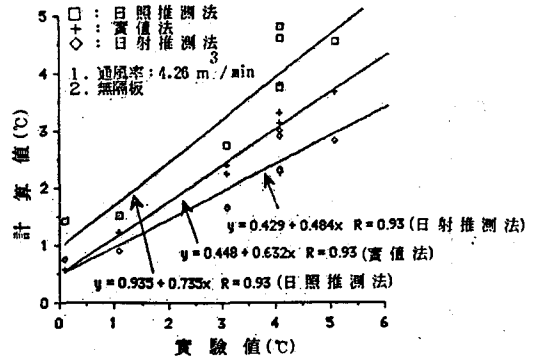


圖14 無隔板時熱風溫度預測值與實驗值之比較

整個變化趨勢而言，日照與日射推測法之曲線由於其日輻射資料為某些已知資料代入數學公式中推算而得，故無法預測雲層遮掩時之太陽入射能量的下降以及溫度方面之瞬間改變情形；而實值法係使用直接測定之日輻射資料，故較能符合實際之變化，但由於集熱板本身之熱容量存在，其實際之變化則不如預測值大。

圖13及14所示為利用直線迴歸法，針對三種氣象資料取得方式之比較分析。就測點分佈上，日照法所得之預值較高；日射法則略為偏低。在一般情形下，實際日照時數與全天日射量的資料較易獲得，故可利用這兩個推測之數據計算相關值，作為估計集熱器性能之上下限。由於在實驗過程中日射量係逐時記錄，因此，往後的討論部分皆以實值法所得之結果作為計算根據。

圖15及16為兩日所測試之集熱效率值比較。集熱效率隨入射功率之增加而增加，故在早晚的時間內，集熱效率均甚低。本裝置之平均集熱效率大約在30%左右。由十六日之資料得知預測值與實驗值

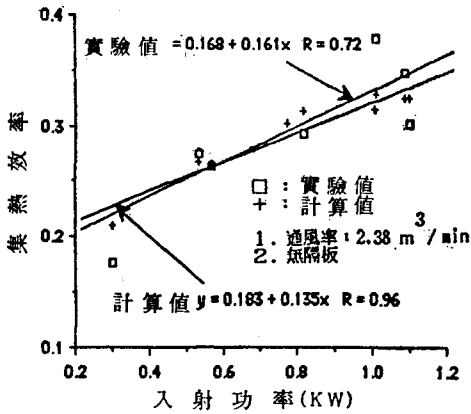


圖15 無隔板時集熱效率與入射功率間之關係 (二月十六日)

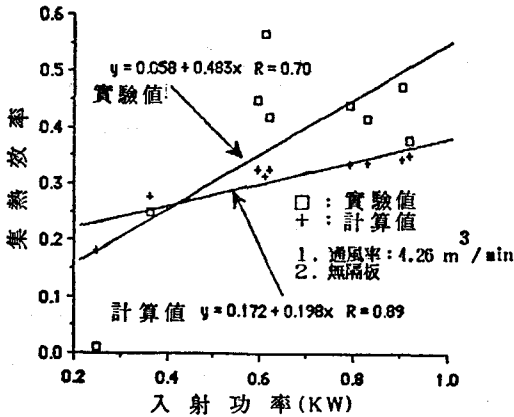


圖16 無隔板時集熱效率與入射功率間之關係 (二月十八日)

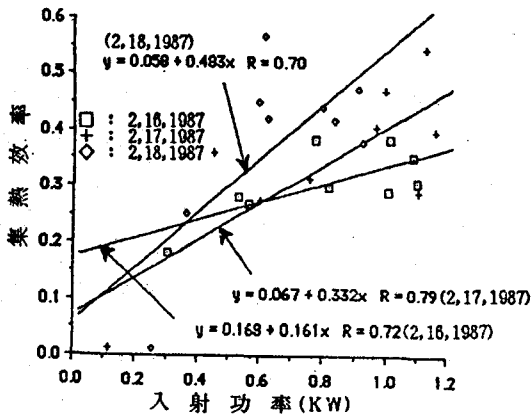


圖17 無隔板時，在不同通風率下集熱效率與入射功率之關係 (實驗值)

甚為接近；但在有雲的天中（如十八日），預測值有偏低的現象。除了通風率本身之影響外，在發展數學模式過程中，忽略了兩側三角形平板的影響，亦可能造成此項誤差的原因。

無隔板的狀況下，不同通風率對集熱性能的影響，如圖17~20所示。由表二知，二月十六日所使用的通風率最低；二月十八日的通風率最高。

由圖17所示之實驗值中，較高入射功率之範圍下，風量率低時，其集熱效率之變化斜率也隨之降低。在低入射功率之範圍內（小於0.6 KW），則不顯著。圖18所示之預測值亦有相同的趨勢，但在高通風率下，其預測值似乎不甚良好，模式對高風量率之預測，較不敏感。

在熱風溫度方面，圖19與20各顯示不同風量率之下，集熱器出口溫度之實驗值與預測值比較。由圖19知：在較高的通風率下，熱風溫度之增加量將相對減少。由預測值與實驗值間之對照可知：出口溫度之變化趨勢相當吻合，僅在風量較大時，其反應較為敏感。

表二則為不同操作狀況下，出口溫度的實驗值與計算值之比較。配合表二的控制變因說明，將相同隔板狀況但通風率不同的實驗日期的「計算值與實驗值差之絕對值的平均值」加以平均可得狀況A、B、C、D、E（參看表四的說明）的平均誤差分別為0.74°C、1.06°C、1.09°C、1.84°C、2.66°C，表示模擬程式的計算誤差會隨著隔板數目的增加與尺寸的加大而提高。此外由表三「計算值與實驗值差之絕對值的平均值」欄位中的數據可以看出當集熱器未加裝隔板與當只有一塊隔板但通風率為3.83與4.26立方米/分鐘時，誤差平均值均小於1°C，而熱電偶本身誤差即有±0.5°C，因此這部分的計算結果應在可以接受的範圍內。也就是說在無隔板或一塊隔板但有較大通風率時，本模擬程式可準確地求得空氣離開集熱器時的溫度；至於在有隔板而通風率較小或隔板數較多時，計算值的可信度較低。

表三則為不同操作狀況下有效能量以及集熱效率的實驗值與計算值之比較。將表三及表四中有關「增加溫度」、有效能量和集熱效率的實驗值對計算值進行迴歸分析可得圖21、22、23。由圖21中之溫度增加量加以比較，出口溫度超過5°C以上時，預測值有偏高之趨勢。在熱效率方面（如圖22），超過60%時，預測值亦稍偏高。有效能量部份，每

表二、出口熱風溫度之預測值與實驗值比較

日期	實 驗 值			預 測 值			預 測 值 - 實 驗 值			
	平均值	標準差	最大值	平均值	標準差	最大值	平均值	標準差	最大值	最小值
0204	4.89	1.97	8.00	6.94	2.65	10.60	2.05	0.93	3.86	0.63
0205	5.11	2.69	9.00	5.41	2.53	8.60	0.69	0.53	1.56	0.02
0206	5.22	2.15	8.00	5.37	2.01	7.38	0.54	0.33	1.27	0.23
0207	5.67	3.30	10.00	7.70	4.03	12.82	2.04	1.22	3.96	0.00
0208	4.89	2.18	8.00	5.12	2.00	7.81	0.51	0.29	0.93	0.12
0209	4.78	2.30	8.00	4.58	1.71	6.48	0.63	0.51	1.52	0.08
0210	6.89	3.70	11.00	11.19	4.78	17.13	4.30	1.29	6.13	2.16
0211	5.44	3.37	10.00	7.07	3.40	12.19	1.63	0.53	2.19	0.34
0212	5.56	2.27	9.00	7.59	2.68	10.59	2.04	0.98	3.59	0.72
0213	5.11	4.33	10.00	7.68	5.18	13.40	2.57	1.10	4.25	0.86
0214	4.67	3.40	9.00	6.05	3.92	10.39	1.38	0.82	2.59	0.01
0215	5.33	2.31	8.00	6.89	2.74	10.07	1.56	0.84	2.87	0.27
0216	5.22	2.30	8.00	5.10	2.15	7.57	0.53	0.40	1.22	0.03
0217	4.00	2.36	8.00	3.49	1.73	5.33	0.85	0.84	2.86	0.00
0218	3.11	1.52	5.00	2.41	1.03	3.71	0.83	0.51	1.83	0.12

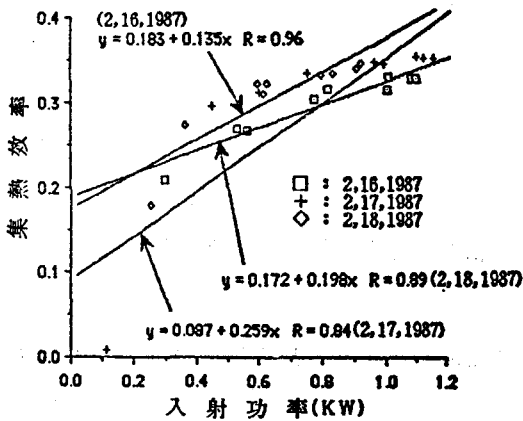


圖18 無隔板時，在不同通風率下集熱效率與入射功率之關係 (預測值)

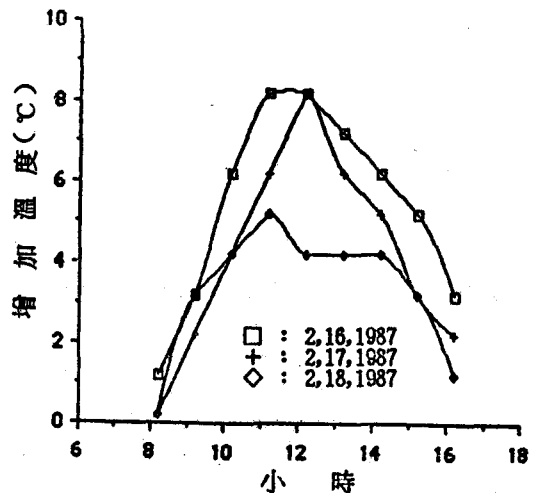


圖19 無隔板時，通風率對增加之熱風溫度之影響 (實驗值)

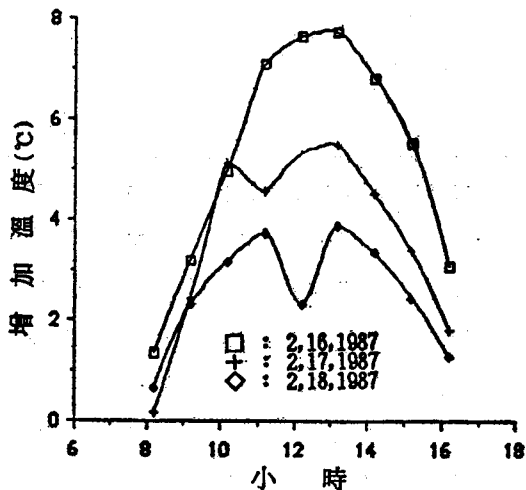


圖20 無隔板時，通風率對增加之熱風溫度之影響 (預測值)

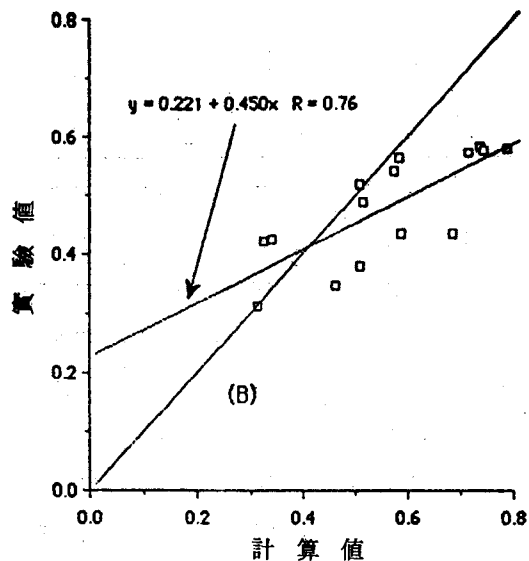


圖22 集熱效率之預測值與實驗值間之關係

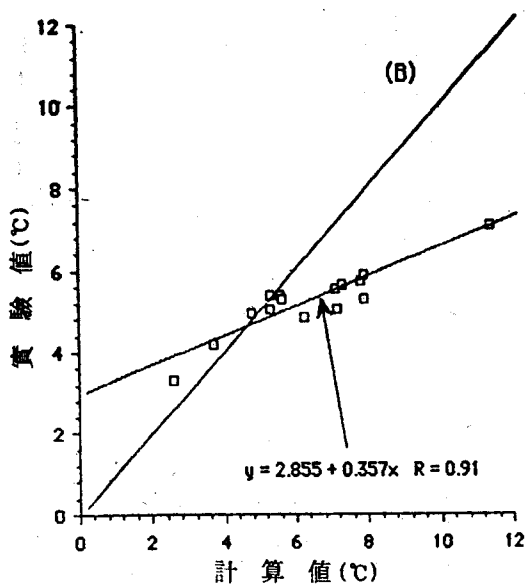


圖21 熱風溫度增加之預測值與實驗值之關係

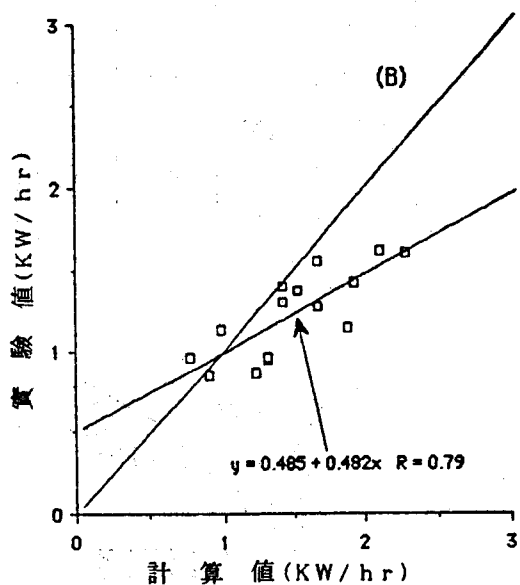


圖23 有效能量之預測值與實驗值間之關係

小時超過 1KW 時，其預測值亦略微偏高。為使預測值更精確，可直接利用其直線迴歸方程式進行修正。

表四與圖24為二月十六日的大氣條件配合不同隔板狀況代入模擬程式中計算所得，並經修正的結果。由表四中十二點當時的資料來看，加裝三塊

60 cm. 的隔板時，其所增加之熱風溫度為無隔板時的 1.6倍，就全天平均來看的話，也有 1.5倍，因此加裝隔板的確能提高集熱器的性能。

本實驗亦曾利用模擬程式計算流體出口處、玻璃內面、水平以及垂直集熱面的溫度，與實際量得溫度相比較如下：

表三、不同變因及時間下，有效能量和集熱效率之預測值與實驗值之比較

日期	使用風量 m <sup>3</sup> /min	隔板個數		有效能量 (MJ/hr)		集熱效率	
		0.6 m	0.3 m	實驗值	計算值	實驗值	計算值
2/ 4	2.38	1	0	0.823	1.183	0.369	0.496
2/ 5	3.83	1	0	1.320	1.475	0.528	0.560
2/ 6	4.26	1	0	1.511	1.622	0.553	0.572
2/ 7	2.38	0	1	0.921	1.265	0.336	0.450
2/ 8	3.83	0	1	1.256	1.373	0.477	0.501
2/ 9	4.26	0	1	1.350	1.367	0.508	0.497
2/10	2.38	3	0	1.099	1.826	0.421	0.670
2/11	3.83	3	0	1.368	1.875	0.564	0.731
2/12	4.26	3	0	1.557	2.238	0.568	0.775
2/13	2.38	1	2	0.903	1.262	0.422	0.573
2/14	3.83	1	2	1.231	1.621	0.560	0.703
2/15	4.26	1	2	1.561	2.059	0.571	0.724
2/16	2.38	0	0	0.803	0.845	0.299	0.301
2/17	3.83	0	0	1.088	0.938	0.414	0.330
2/18	4.26	0	0	0.915	0.726	0.409	0.314

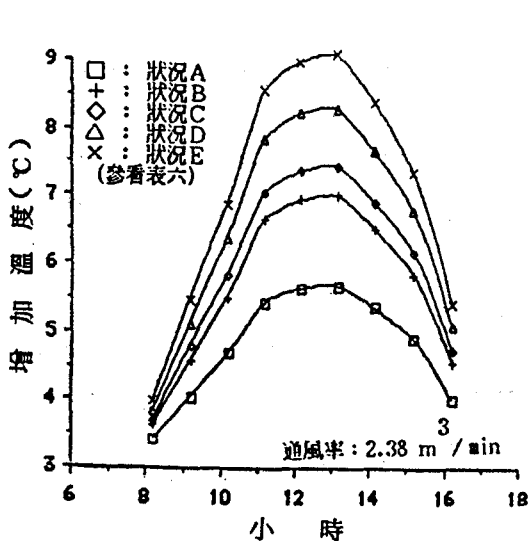


圖24 加隔板時，對熱風溫度增加之影響  
(二月十六日)

	實驗值°C	預測值°C
流體出口溫度	39	39.7
玻璃內面溫度	38	47.4
水平集熱面溫度	54	83.0
垂直集熱面溫度	53	79.4

由上述資料可明顯地看到三個平板溫度的計算值與實際值相差太多，關於這一點，形成原因可能有三：

1. 在計算過程中所引用的公式與實際情形有偏差而無法正確描述平板溫度。
2. 在量度板溫時，為避免太陽直射的影響，在熱偶線上覆蓋了一小塊鋁箔，這對於熱偶線附近的平板而言，亦失去被太陽照到的機會，而使該量測點附近的溫度較低。
3. 熱偶線未與各平板密切接觸，因此量得之溫度並非板面溫度，而是平板附近的流體溫度。

表四、加隔板對熱風溫度增加量之影響  
(二月十六日)

時間	狀況A	狀況B	狀況C	狀況D	狀況E
08:00	3.28	3.50	3.57	3.71	3.85
09:00	3.93	4.46	4.68	5.00	5.35
10:00	4.57	5.39	5.71	6.25	6.75
11:00	5.32	6.53	6.92	7.71	8.42
12:00	5.53	6.82	7.25	8.10	8.85
13:00	5.57	6.89	7.32	8.17	8.96
14:00	5.25	6.39	6.78	7.53	8.25
15:00	4.78	5.71	6.03	6.64	7.21
16:00	3.89	4.43	4.60	4.96	5.28
平均值	4.68	5.57	5.87	6.45	6.99

註：A、無隔板。

B、一塊長 0.3 m 的隔板置於集熱器之中央。

C、一塊長 0.6 m 的隔板置於集熱器之中央。

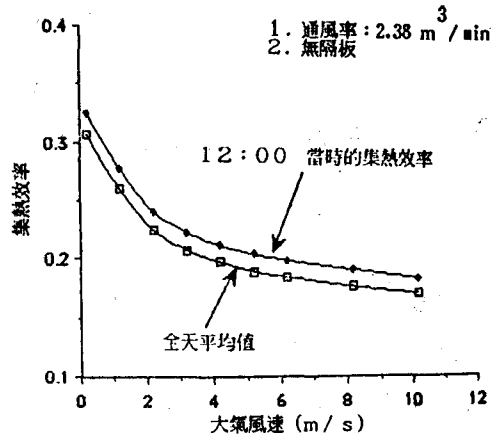
D、一塊長 0.6 m 的隔板置於集熱器之中央，另外兩塊長 0.3 m 之隔板分置於距左右兩側各為全長四分之一之位置。

E、三塊長 0.6 m 的隔板分置於集熱器之中央，及距左右兩側各為全長的四分之一之位置。

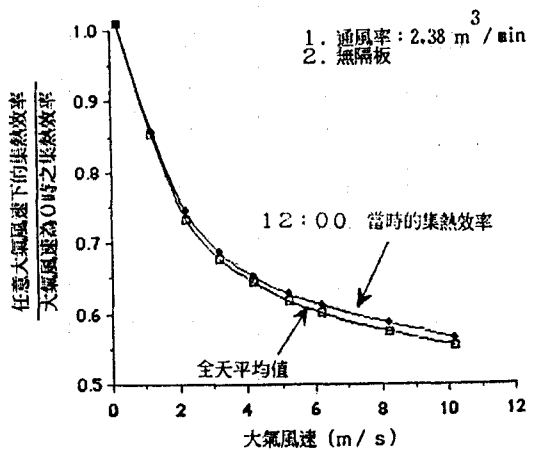
以上的結果分析是基於大氣風速為零的假設所進行的，然而在真實情況中，該假設成立的可能性極低，圖25為以二月十六日的大氣條件配合不同風速代入模擬程式中計算所得的結果。在計算過程中，透明覆蓋側及垂直集熱板背側的計算用風速即為所輸入的風速資料，而水平集熱板背側的計算用風速則依據吳氏 (1979) 的說法，以所輸入風速資料的六成代入之。由圖25可知當風速增加時，集熱效率會因外界空氣流動增加熱對流損失而降低——當風速增加到 10m/s 時，集熱效率僅為完全無風時的55%左右。有關這部分的實驗驗證，尚待日後做更進一步的探討。

## 七、結 論

(一)本研究中所建立之數學模式經實驗驗證，在



(A)



(B)

圖25 大氣風速對集熱效率的影響

無隔板或一塊隔板但有較大通風量時可準確地求得空氣離開集熱器時的溫度，但無法正確地描述各板面溫度。

(二)利用較高的通風量雖使空氣在進出集熱器時之溫差減小，但有效能量與集熱效率均會增加。

(三)在集熱器內部加裝隔板，不但可以加強玻璃之對外界衝擊抵抗力，且可以增加有效能量的獲得，應為可以採行的方法。

## 八、誌 謝

本研究承農委會75農建計畫-糧-之經費補助，以及省農試所農機系之協助，方克以成，謹此誌謝。

## 九、參考文獻

- 1.黃文雄。民國六十七年，太陽能之應用與理論。臺北：協志工業叢書出版股份有限公司。
- 2.吳中興。民國六十八年。太陽能空氣加熱器之熱傳模擬分析。臺北：國立臺灣大學碩士論文。
- 3.康國裕。民國七十五年。我國太陽能之研究與發展，中華民國太陽能學會第六屆年會暨學術研討會論文集。中華民國太陽能學會。
- 4.ASHRAE. 1977. ASHRAE Handbook of Fundamentals. ASHRAE Inc.
- 5.Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- 6.Klein, S. A. 1975. Calculation of Flat-plate Collector Loss Coefficients. Solar Energy 17(1):79-80.
- 7.Sparrow, E. M. and R. D. Cess. 1978. Radiation Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company.
- 8.Ozisik, M. N. 1985. Heat Transfer A Basic Approach. McGraw-Hill Book Company.

## 十、符號列表

- $A_{(i)}$  : 平面  $i$  面積 ( $m^2$ )。
- $C_{p,f}$  : 流體比熱 ( $J/kg^{\circ}C$ )。
- $D_{(i)}$  : 平面  $i$  部分絕緣厚度 ( $m$ )。
- $F_{(i)(j)}$  : 平面  $i$  對平面  $j$  之熱輻射交換因子。
- $g$  : 重力常數 ( $m/s \cdot s$ )。
- $h_{(i)}$  : 平面  $i$  對流體之熱對流係數 ( $W/m^2C$ )。
- $h_{b(i)}$  : 平面  $i$  絕緣部分的熱損失係數 ( $W/m^2C$ )。
- $h_{r(i)(j)}$  : 平面  $i$  對平面之熱輻射係數 ( $W/m^2C^4$ )。
- $h_{r,cs}$  : 透明覆蓋與天空間之熱輻射係數 ( $W/m^2C^4$ )。

- $h_w$  : 由外界風所引起的熱對流係數 ( $W/m^2C$ )。
- $I_r$  : 單位小時傾斜面上之太陽入射能量 ( $W/m^2$ )。
- $L$  : 平板長度 ( $m$ )。
- $L_o$  : 集熱器體積之立方根 ( $m$ )。
- $L_h$  : 進出風口至垂集熱面之直線距離 ( $m$ )。
- $L'$  : 等效流動長度 ( $m$ )。
- $m$  : 流量 ( $kg/s$ )。
- $N$  : 理論日照時數 (Hour)。
- $N_s$  : 隔板個數。
- $n$  : 實際日照時數 (Hour)。
- $Q_u$  : 實際可用功率 (Watt)。
- $S_{(i)}$  : 集熱器所吸收之輻射功率 ( $W/m^2$ )。
- $T_{(i)}$  : 平面  $i$  之平均溫度 ( $K$ )。
- $T_a$  : 大氣溫度 ( $K$ )。
- $T_{fi}$  : 流體進入集熱器時之溫度 ( $K$ )。
- $T_f$  : 流體 (空氣) 之平均溫度 ( $K$ )。
- $T_{fo}$  : 流體離開集熱器時之溫度 ( $K$ )。
- $T_{sky}$  : 天空等量溫度 ( $K$ )。
- $V_w$  : 大氣風速 ( $mm/s$ )。
- $W_{(i)}$  : 平板  $i$  之寬度 ( $m$ )。
- $\alpha$  : 集熱板對輻射能之吸收率。
- $\alpha_t$  : 熱擴散係數 ( $m^2/s$ )。
- $\beta$  : 體積熱膨脹係數 ( $1/K$ )。
- $\epsilon_{(i)}$  : 平面  $i$  之輻射放射率。
- $\theta$  : 傾斜角 ( $^{\circ}$ )。
- $\nu$  : 動黏滯係數 ( $m^2/s$ )。
- $\rho$  : 反射率。
- $\rho_d$  : 透明覆蓋對集熱板反射回來之輻射能的反射率。
- $\rho$  : 地面散射反射率。
- $\sigma^s$  : Stefan-Boltzman 常數 ( $W/m^2C^4$ )。
- $\tau$  : 集熱器透明覆蓋對輻射能之穿透率。
- $(\tau\alpha)$  : 有效「透射率-吸收率」乘積。

[註] 下標 ( $i$ ) 與 ( $j$ ) 之定義：

- = 1 → 指透明覆蓋。
- = 2 → 指水平集熱板。
- = 3 → 指垂直集熱板。