

# 太陽能空氣加熱器之熱傳模擬分析

## Circuit Simulation of Thermal Behavior of Flat Plate Solar Air Heaters

臺灣大學農業工程學研究所碩士

吳 中 興

C. H. Wu

### Abstract

The collector efficiencies of a flat plate solar air heater as well as a flat plate solar air heater with suspended aluminum screen were investigated and compared.

The thermal-electrical circuit models were developed for predicting the air temperature response of these solar air heaters under time-varying solar radiation and ambient air temperature.

Instrumentation for monitoring the test conditions and variables consisted of a system with thermocouples to measure temperature and a pyranometer to measure solar radiation.

Simulation results conformed well with the measured data. The study showed that the circuit simulation method provided an effective and economic means of studying the thermal behavior of solar air heaters or any other solar drying systems.

### 一、引 言

近年來由於石油價格的激烈上漲，以及產油國供油量的緊縮，人類物質文明的進步，亮起了黃燈，世人均已深切體認出，大量的消耗石油絕非長久之計，因此新的替代性能源或輔助性能源之尋覓與研究，已成為科學家們刻不容緩的任務。

太陽能為唯一不會污染人類生存環境的能源。地球與大氣層每年接受的太陽能總量為世界上所有人為系統所產生的總能量之兩萬七千倍，真可謂取之不盡用之不竭，誠為未來文明世界最理想的能源。

臺灣亦為能源不足地區，為延續國家經濟的蓬勃進展，節約能源與發展新的能源，為目前及今後我國極為重要的課題。

由多年來的臺灣省氣象資料顯示，本省的大多數地區，晴天日數多，日照時數長，為世界上發展太陽能最理想的地區之一。

利用太陽能乾燥農產品，國內國外研究甚多，並已獲得相當程度的成功。一般所採用的太陽能收集器，多屬於平板式。平板式太陽能空氣加熱器構造簡單，成本低廉，為其優點，但熱效率不高為其缺點。為了拓展平板式太陽能空氣加熱器日後的前途，其缺點必須加以改進。為求改進其缺點，其相關之熱傳遞必須有適當方法予以了解分析，而後改良才成為可能。本研究的主要目的旨在改良一般的平板式太陽能空氣加熱器，研究糊狀物對其熱效率之影響情形，並為平板或太陽能空氣加熱器及柵式太陽能空氣加熱器之熱傳遞構成熱電模擬電路模式，並藉此模式來預測此一裝置的熱傳遞。

### 二、試 驗 裝 置

#### (一) 太陽能空氣加熱裝置

平板式太陽能空氣加熱器於民國六十七年十一月製成，安置於臺北市舟山路臺大農機館鋼筋混凝土屋頂平臺上。其外觀有如一半圓柱體，高度距離地面十四公尺，周圍視野甚為遼闊，無巨型建築物

遮蔽陽光，整個加熱裝置與大氣層間的形狀係數 (Shape factor) 很大。

平板式太陽能空氣加熱器主要係由聚氯乙烯 (PVC) 透明覆罩與集熱板二者所組成。聚氯乙烯透明覆罩長 9.7 公尺，寬 1.442 公尺，厚 0.175 毫米。實驗結果顯示其短波透光率為 91.1%，其長波透光率約 16%。集熱板長 9.7 公尺，寬 1.16 公尺，係以 1.5 公分厚的三合板為底層，其上膠合一層 2.54 公分厚的優麗生 (Urethane) 絕熱板，絕熱板上再固著一層 0.079 毫米厚的鋁箔，鋁箔表面塗上平光黑漆，使集熱板表面的集熱效果，近似於理想黑體。

平板式太陽能空氣加熱器之集熱面上放置鋁柵，即成為柵式太陽能空氣加熱器。其柵長 9.7 公尺，寬 1.14 公尺，高度距離集熱板表面 2.5 公分，係以菱形網目的鋁網構成，四周以國產鋁材為框架。柵面甚為粗糙，其平均透光率為百分之四十九。

### 三、試驗步驟及測定儀器

平板式太陽能空氣加熱器於十一月中旬研製完竣。民國六十七年十一月二十五日起開始進行試驗工作，迄六十八年一月二十六日，試驗數據大致完備，乃開始加裝鋁柵，而於二月上旬加裝完畢。六十八年二月十一日起，開始柵式太陽能空氣加熱器的試驗工作。太陽能空氣加熱器內的空氣流量，係於每日正午空氣加熱器與外界的热量交換趨近於穩定狀態時量度之。試驗裝置的外界風速，係以每日中午十二時至下午一時的平均風速為準。

本試驗所採用的溫度記錄儀，為美國 Leed & Northrup 公司所製的 Speedmax H & W 型十二點溫度連續記錄儀，及神港公司六點溫度連續記錄儀。

輻射能量的變化，係以 Eppley Radiometer Model 8-48 型水平日射儀測定，並由 Watanabe Servocorder 記錄之。

太陽能空氣加熱器內的空氣流量，係以 Datametric 800-VTP 型熱線式風速計偵測之。太陽能空氣加熱器外的空氣風速，係以旋葉式風速計 (propeller type anemometer) 連續記錄之。

### 四、太陽能空氣加熱器熱電模擬電路模式

#### (一) 能量平衡方程式

##### 1. 平板式太陽能空氣加熱器能量平衡方程式

茲將透明覆罩，集熱板，左側擋板，右側擋板等四個面所圍成的空間，視為一密閉系統。在太陽正午時刻，輻射能量穩定的維持在全日的極大值。此時整個密閉系統與外界的能量交換，趨近於穩定狀態。根據熱力學能量平衡的原理，可以推導出下列的方程式：

進入集熱裝置的總能量 = 傳導熱損失 + 對流熱損失 + 輻射熱損失 + 熱風帶走的能量  
亦即

$$\begin{aligned} & \alpha_h \tau I A_h + F_{c_s} E_s A_c + \tau_h F_{h_c} F_{c_s} F_s A_h \\ & + \tau_{PIC} F_{PIC} F_{c_s} E_s A_{PI} \\ & + \tau_{PE} F_{PE} F_{c_s} E_s A_{PE} \\ = & \frac{K_p A_{PI} (\bar{T}_{PI} - T_o)}{\Delta x} + \frac{A_h (\bar{T}_h - T_o)}{\frac{\Delta x_a}{K_a} + \frac{\Delta x_u}{K_u} + \frac{\Delta x_p}{K_p}} \\ & + \frac{K_p A_{PE} (\bar{T}_{PE} - T_o)}{\Delta x} \\ & + UA_c (\bar{T}_c - T_o) + F_{c_s} \epsilon_c A_c \sigma \bar{T}_c^4 \\ & + \tau_h F_{h_c} F_{c_s} \epsilon_h A_h \sigma \bar{T}_h^4 + \tau_{PIC} F_{c_s} \\ & F_{c_s} \epsilon_p A_{PI} \sigma \bar{T}_{PI}^4 + \tau_{PE} F_{PE} F_{c_s} \\ & \epsilon_p A_{PE} \sigma \bar{T}_{PE}^4 + \dot{M} C_p (T_2 - T_1) \dots \textcircled{1} \end{aligned}$$

根據 Soribe [1972] 的方程式，可以求得天空給與地面長波輻射的能量，其公式如下：

$$E_s = \sigma (T_o + 273)^4 [1 - 0.261 \exp(-0.00077 T_o^2)] \dots \textcircled{2}$$

加熱空氣所須的热量，以及對流至大氣的能量，為集熱板表面所授予的热量。其能量平衡方式為

$$\begin{aligned} & \dot{M} C_p (T_2 - T_1) + UA_c (\bar{T}_r - T_o) \\ = & h_{c1} A_h (\bar{T}_h - T_o) \dots \textcircled{3} \end{aligned}$$

由式③可求出集熱板表面的對流係數如下：

$$h_{c1} = \frac{\dot{M} C_p (T_2 - T_1) + UA_c (\bar{T}_r - T_o)}{A_h (\bar{T}_h - \bar{T}_r)} \dots \textcircled{4}$$

##### 2. 柵式太陽能空氣加熱器能量平衡方程式

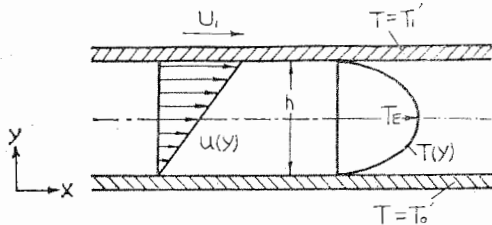
茲將柵式太陽能空氣加熱器之透明覆罩，集熱板，左側擋板，右側擋板等四個面所圍成的空間，視為一密閉系統。基於能量平衡原理，在穩定狀態時，可以推導出下列的方程式：

$$\begin{aligned}
& \alpha_w \tau I A_w + F_{c,s} E_s A_c + \tau_w F_{w,c} F_{c,s} E_s \\
& A_w + \tau_M F_{M,C} F_{c,s} E_s A_M + \tau_{PI} F_{PI,C} F_{c,s} \\
& E_s A_{PI} + \tau_{PE} F_{PE,C} F_{c,s} E_s A_{PE} \\
& = \frac{K_p A_{PI} (\bar{T}_{PI} - T_o)}{\Delta X} + \frac{A_w (\bar{T}_w - T_o)}{\frac{\Delta X_a}{K_a} + \frac{\Delta X_u}{K_u} + \frac{\Delta X_p}{K_p}} \\
& + \frac{K_p A_{PE} (\bar{T}_{PE} - T_o)}{\Delta X} + UA_c (\bar{T}_c - T_o) \\
& + F_{c,s} \epsilon_c A_c \sigma \bar{T}_c^4 + \tau_w F_{w,c} F_{c,s} \epsilon_w A_w \\
& \sigma \bar{T}_w^4 + \tau_M F_{M,C} F_{c,s} \epsilon_M A_M \sigma \bar{T}_M^4 \\
& + \tau_{PI} F_{PI,C} F_{c,s} \epsilon_p A_{PI} \sigma \bar{T}_{PI}^4 + \tau_{PE} F_{PE,C} \\
& F_{c,s} \epsilon_p A_{PE} \sigma \bar{T}_{PE}^4 + \dot{M} C_p (T_2 - T_1) \dots \textcircled{5}
\end{aligned}$$

由此裝置對流至大氣的熱量與由加熱空氣所帶走的熱量，為鋁柵表面及集熱板表面所授予之熱量。其能量平衡方程式如下：

$$\begin{aligned}
& \dot{M} C_p (T_2 - T_1) + UA_c (T_\infty - T_o) \\
& = h_M A_M (\bar{T}_M - T_\infty) + h_w A_w (T_w \\
& - T_\infty) \dots \textcircled{6}
\end{aligned}$$

實驗結果發現，在鋁柵下表面及集熱板上表面，流體的流速分佈與溫度分佈，近似於圖一所示，亦即在鋁柵下表面及集熱板上表面間，熱風的流體性質趨近於柯特流 (Couette flow) 的流體性質。



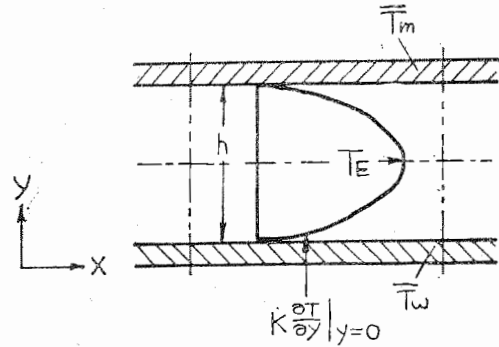
圖一 柯特流流速分佈與溫度分佈

Schlichting [1968] 曾導出柯特流流體溫度分佈方程式如下：

$$\begin{aligned}
\frac{T - T_o'}{\bar{T}' - T_o'} &= \frac{y}{h} + \frac{\mu U_1^2}{2k (\bar{T}'_1 - T_o')} \\
&\times \frac{y}{h} (1 - \frac{y}{h}) \dots \textcircled{7}
\end{aligned}$$

茲於鋁柵與集熱板之間，在 X 軸方向隨意截取一小段，形成一密閉區間，如圖二所示，並做以下三點假設：

- (1) 流體僅在平行於 x 軸方向流動。
- (2) x 軸方向無壓力梯度存在。
- (3) 熱風的流動為一完全開展的流體運動。



圖二 集熱板表面與外界的傳導熱交換

根據式⑦，鋁柵與集熱板之間，流體的溫度分佈為

$$\begin{aligned}
\frac{T - \bar{T}_w}{\bar{T}_m - \bar{T}_w} &= \frac{y}{h} + \frac{\mu U_1^2}{2k (\bar{T}_m - \bar{T}_w)} \times \\
&\frac{y}{h} (1 - \frac{y}{h}) \dots \textcircled{8}
\end{aligned}$$

在此密閉區間內

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_w (\bar{T}_w - T'_\infty) \dots \textcircled{9}$$

$$\begin{aligned}
& \text{即 } \frac{k (\bar{T}_w - \bar{T}_m)}{h} - \frac{\mu U_1^2}{2h} \\
& = h_w (\bar{T}_w - T'_\infty) \dots \textcircled{10}
\end{aligned}$$

$$h_w = \frac{k (\bar{T}_w - \bar{T}_m)}{h (\bar{T}_w - T'_\infty)} - \frac{\mu U_1^2}{2h (\bar{T}_w - T'_\infty)} \dots \textcircled{11}$$

將式⑩代入式⑥

$$h_M = \frac{\dot{M} C_p (T_2 - T_1) + UA_c (\infty - T_o)}{A_M (\bar{T}_M - T_\infty)}$$

$$\frac{-A_w (\bar{T}_w - T_\infty') \left[ \frac{k (\bar{T}_w - \bar{T}_m)}{h (\bar{T}_w - T'_\infty)} - \frac{\mu U_1^2}{2h (\bar{T}_w - T'_\infty)} \right]}{A_M (\bar{T}_M - T_\infty)} \dots \textcircled{12}$$

### ☐ 太陽能空氣加熱器電路模擬

電學系統與很多系統都有相似之處，熱學系統便是其中之一。每一個與電學系統相似的非電學系

統，均可模擬成等效電路，而無需去推導及求解繁雜的數學模式。解電路系統的方法很多，本論文採用「電路分析程式」(ECAP)。此程式曾被

Huang (1975,1976), Chang [1976], Jordan [1975], Lieberman [1968] 等, 廣泛的運用在不同的動力學系統與熱力學系統上。

茲將熱系統及電系統與本文有關之相似項目列入表一:

表一 熱系統與電系統的對應相似關係

熱系統	電系統
溫度 (Temperature)	電壓 (Voltage)
熱流量 (Heat Flow)	電流量 (Current)
熱容量 (Thermal Capacitance)	電容量 (Capacitance)
熱傳導係數 (Thermal Conductivity)	導電率 (Conductance)
熱阻 (Thermal Resistance)	電阻 (Resistance)

由上表所示的對應相似關係, 配合基本的熱傳遞學理論, 可以將各種不同情況的熱傳遞, 模擬成各種不同的電路。茲將模擬的過程分述於下:

### 1. 傳導熱傳遞

在一個介質內, 因其本身的溫度分佈不均勻而產生的熱傳遞, 稱為傳導熱傳遞。在這介質內, x 軸方向的熱流量為

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (13)$$

若此介質是一k值為定值的均質(homogeneous)物質, 且熱量由上表面至下表面穩定的傳導L公尺長, 則經過積分後, 上式可以化成

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \dots\dots\dots (14)$$

根據此式, 我們可以求得傳導熱阻

$$R' = \frac{L}{kA} \left( \frac{^\circ C}{Kcal/hr} \right) \dots\dots\dots (15)$$

### 2. 熱容量 (thermal capacity)

熱容量為質量提升溫度一度所須的熱量, 茲將其定義如下:

$$C = \frac{Q}{T_r - T_i} = \frac{\int_{T_i}^{T_r} C_p \gamma V dT}{T_r - T_i} \dots\dots\dots (16)$$

若是從  $T_i$  至  $T_r$  的溫度區間內,  $C_p$  值與  $\gamma$  值為常數或為某一適量的平均值, 則式(16)可改寫成

$$C = C_p \gamma V \dots\dots\dots (17)$$

### 3. 對流熱傳遞

在流體與固態表面間, 因溫度差異而引起的能量交換, 稱為對流熱傳遞。其熱交換量如下:

$$Q_c = h_c A (T_s' - T_a) \dots\dots\dots (18)$$

由式(18)可知對流熱阻為

$$R_c = \frac{1}{h_c A} \left( \frac{^\circ C}{Kcal/hr} \right) \dots\dots\dots (19)$$

### 4. 輻射熱傳遞

在諸溫度不同的表面間, 未經任何媒介物質, 所產生的能量交換, 稱為輻射熱傳遞。

今有一密閉空間, 是由 P 個表面構成。這 P 個表面都是不透明灰體, 其光學性質不具方向性。若是此 P 個表面的反射係數 (reflectivity), 逸熱係數 (emissivity), 與溫度均為常數, 則其中第 i 個表面與其餘諸面的能量淨交換量為

$$(Q_{net})_i = \frac{A_i \epsilon_i}{1 - \epsilon_i} [R_i - (E_b)_i] = \frac{R_i - (E_b)_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{A_i \epsilon_i}} \dots\dots\dots (20)$$

在式(20)中,  $\frac{1 - \epsilon_i}{A_i \epsilon_i}$  可被視為輻射熱傳遞的表面阻力。

這密閉空間內的第 i 個表面與其餘諸面的能量淨交換量, 亦可以下式表示:

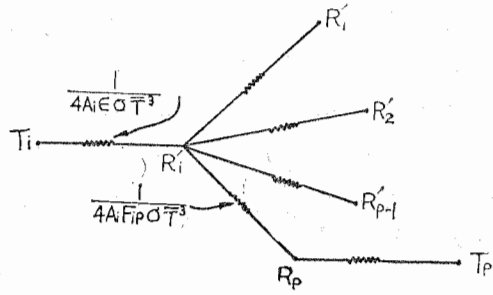
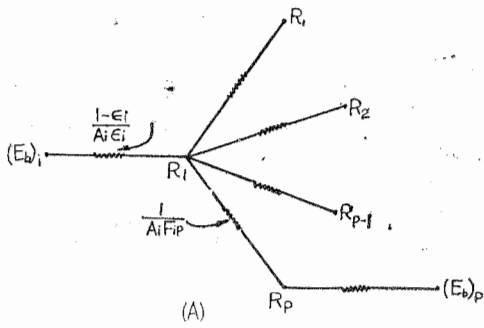
$$(Q_{net})_i = \sum_{m=1}^P [F_{im} A_i (R_m - R_i)] = \sum_{m=1}^P \frac{R_m - R_i}{\frac{1}{F_{im} A_i}} \dots\dots\dots (21)$$

在式(21)中,  $\frac{1}{F_{im} A_i}$  可視為輻射熱傳遞的空間阻力。

綜合式(20)與式(21)可得

$$\frac{R_i - (E_b)_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{A_i \epsilon_i}} = \sum_{m=1}^P \frac{R_m - R_i}{\frac{1}{F_{im} A_i}} \dots\dots\dots (22)$$

根據式(22)可繪出此密閉空間內, 第 i 個表面輻射熱傳的熱阻網路, 如圖三 A 所示。同理, 其餘諸面亦可繪成相似的熱阻網路, 這些網路可組合成一代表此密閉空間的輻射熱傳網路。



圖三 輻射熱傳網路之一

今有另一密閉空間，係由  $q$  個表面組成。此  $q$  個表面均具有不使輻射能量穿透散逸之特性。在此  $q$  個表面之間，放置一層能夠透過輻射能量，又能吸收輻射能量的介質  $k$ ，則其中第  $j$  個表面與其餘  $q-1$  個表面在能量穿透的過程中，淨熱交換量為

$$(Q_{net})_j = \sum_{n=1}^q A_j F_{jn} (R_j - R_n) \sum_{n=1}^q \frac{R_j - R_n}{A_j F_{jn}} \dots \dots \dots (23)$$

在式(23)中， $\frac{1}{A_j F_{jn}}$  可視為輻射能量的穿透阻力。

在此  $q$  個表面彼此進行能量交換的過程中，介質  $k$  與表面  $j$  的淨熱交換量為

$$(Q_{net})_{k-j} = A_j F_{jk} \epsilon_k [(E_b)_k - R_j] = \frac{(E_b)_k - R_j}{\frac{1}{A_j F_{jk} \epsilon_k}} \dots \dots \dots (24)$$

在式(24)中， $\frac{1}{A_j F_{jk} \epsilon_k}$  可視為介質  $k$  對輻射熱傳遞的吸收阻力。

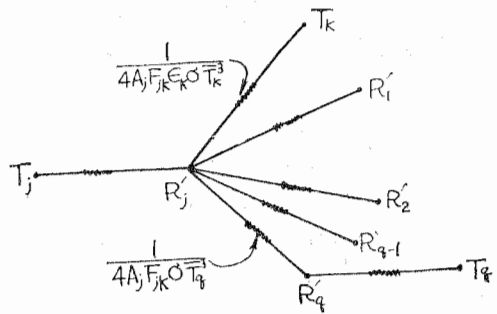
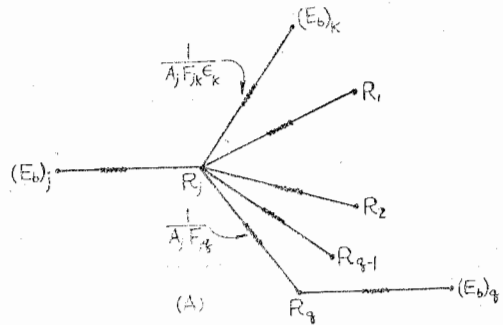
根據式(24)，此密閉空間之第  $j$  個表面，與其餘  $q-1$  面及介質  $k$  之間的能量淨交換量為

$$(Q_{net})_j = \frac{R_j - (E_b)_j}{\frac{1 - \epsilon_j}{A_j \epsilon_j}} \dots \dots \dots (25)$$

在此密閉空間之能量交換趨近於平衡狀態時，由式(23)，式(24)，和式(25)可得

$$\frac{R_j - (E_b)_j}{\frac{1 - \epsilon_j}{A_j \epsilon_j}} = \sum_{n=1}^q \frac{R_j - R_n}{\frac{1}{A_j F_{jn}}} + \frac{(E_b)_k - R_j}{\frac{1}{A_j F_{jk} \epsilon_k}} \dots \dots \dots (26)$$

根據式(26)，可繪出此密閉空間內第  $j$  個表面輻射熱傳的熱阻網路，如圖四 A 所示。同理，其餘諸面亦可繪成相似的熱阻網路，這些網路可以組合成一代表此密閉空間的輻射熱傳網路。



圖四 輻射熱傳網路之二

在本實驗裝置中，任一表面  $Z$  的熱輻射量，均可由下式計算：

$$E_z = \epsilon_z \sigma (T_z + 273)^4 \dots \dots \dots (27)$$

根據式(2)與式(27)，透明覆蓋與天空的能量淨交換量為

$$(Q_{net})_c = F_{c-s} A_c (E_c - E_s) = \frac{E_c - E_s}{\frac{1}{F_{c-s} A_c}} \dots \dots \dots (28)$$

集熱板表面與天空的能量淨交換量為

$$(Q_{net})_h = \tau_h F_{hc} F_{cs} A_h (E_h - E_s) \dots\dots\dots (29)$$

$$= \frac{E_h - E_s}{\frac{1}{\tau_h F_{hc} F_{cs} A_h}}$$

鉛柵表面與天空的能量淨交換為

$$(Q_{net})_M = \tau_M F_{Mo} F_{cs} A_M (E_M - E_s) \dots\dots\dots (30)$$

$$= \frac{E_M - E_s}{\frac{1}{\tau_M F_{Mo} F_{cs} A_M}}$$

左側擋板與天空的能量淨交換量為

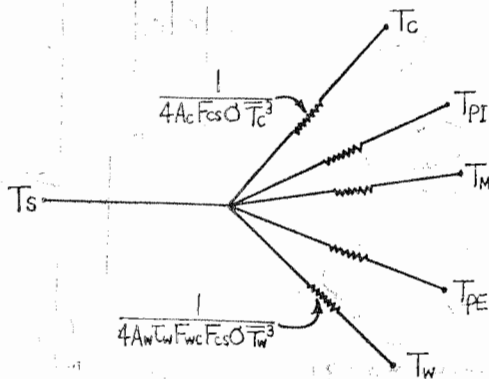
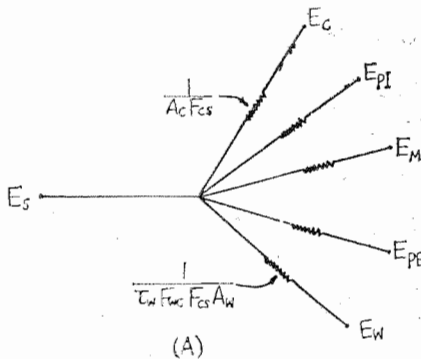
$$(Q_{net})_{PI} = \tau_{PI} F_{PIc} F_{cs} A_{PI} (E_{PI} - E_s) \dots\dots\dots (31)$$

$$= \frac{E_{PI} - E_s}{\frac{1}{\tau_{PI} F_{PIc} F_{cs} A_{PI}}}$$

右側擋板與天空的能量淨交換量為

$$(Q_{net})_{PE} = \tau_{PE} F_{PEc} F_{cs} A_{PE} (E_{PE} - E_s) \dots\dots\dots (32)$$

$$= \frac{E_{PE} - E_s}{\frac{1}{\tau_{PE} F_{PEc} F_{cs} A_{PE}}}$$



(B)

圖五 輻射熱傳網路之三

根據式(28)，式(29)，式(30)，式(31)，與式(32)可繪成集熱系統的熱輻射網路，如圖五 A 所示。

在以上所述的諸輻射熱傳遞公式中， $E_b$  項， $R$  項，及  $E$  項均與絕對溫度的四次方成正比。為了配合表一，將熱傳系統的熱學網路轉化成等效模擬電路，茲在不改變流經各熱阻熱流大小的前提下，將溫度因次線性化。

茲考慮兩個有輻射能量交換的表面。表面 I 具有熱勢能  $(E_b)_I$ ，表面 II 具有熱勢能  $(E_b)_{II}$ 。令

$$\frac{t_I - t_{II}}{NR} = \frac{(E_b)_I - (E_b)_{II}}{R} \dots\dots\dots (33)$$

$$(E_b)_I = \sigma t_I^4 \dots\dots\dots (34)$$

$$(E_b)_{II} = \sigma t_{II}^4 \dots\dots\dots (35)$$

式(34)與式(35)代入式(33)

$$N = \frac{t_I - t_{II}}{\sigma(t_I^4 - t_{II}^4)} \dots\dots\dots (36)$$

表面 I 與表面 II 溫差不大時

$$t_I^4 - t_{II}^4 = 4t_{av}^3 (t_I - t_{II}) \dots\dots\dots (37)$$

式(37)代入式(36)內

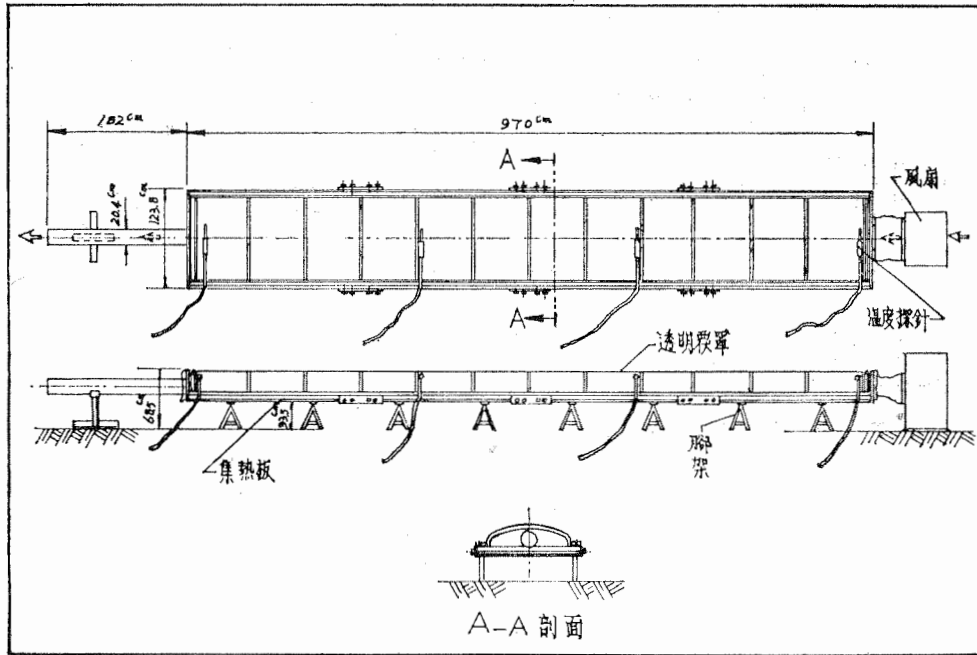
$$N = \frac{1}{4\sigma t_{av}^3}$$

將  $N$  值併入圖三 A，圖四 A，與圖五 A 之各熱阻內，可分別繪出圖三 B，圖四 B，與圖五 B。

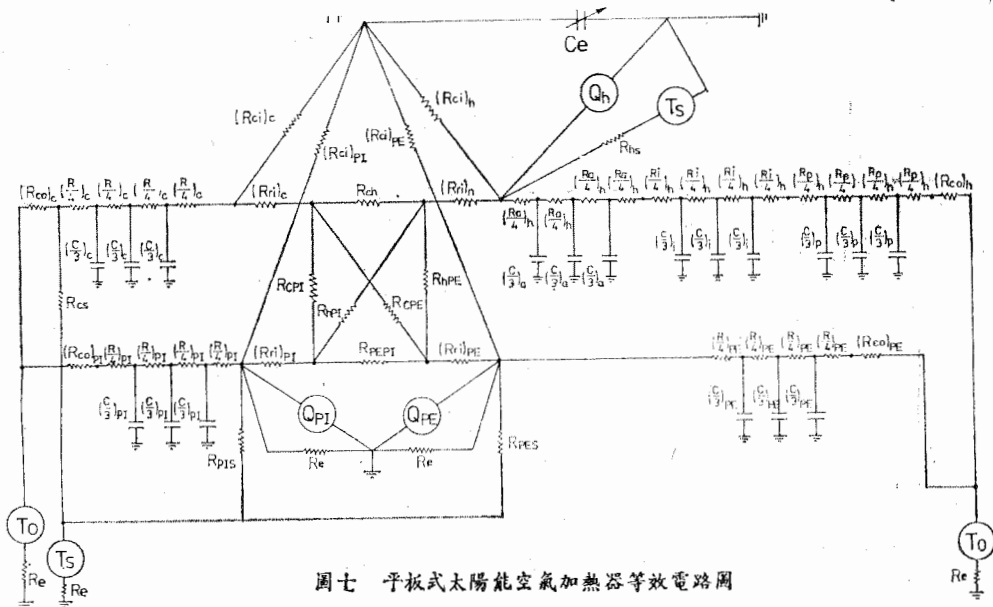
茲對集熱裝置的熱傳遞，做以下三點假設：

1. 熱能只在垂直於熱傳導體的方向單向傳遞。
2. 在所討論的溫度範圍內，所有團塊質量的熱學性質 (lumped thermal property) 不變。
3. 在任一時刻，空間各處溫度視為均一。

綜合以上的電學模擬推演以及假設，平板式太陽能空氣加熱器 (圖六) 以 (圖七) 所示的等效電路來模擬；柵式太陽能空氣加熱器 (圖八) 以 (圖九) 所示的等效電路來模擬。集熱裝置與等效電路相似項間的互換係數，如表二所示。



圖六 平板式太陽能空氣加熱器示意圖



圖七 平板式太陽能空氣加熱器等效電路圖





表二 電系統與熱系統相似項間的單位與轉換係數

類 似 項 目	單 位		轉 換 係 數	
	熱 系 統	電 系 統	比 率	比 值
時 間 ( $\theta$ )	小 時 (hrs)	秒 (Sec)	$\frac{\theta e}{\theta t}$	2
能 量 容 量 (C)	仟 卡 ( $\frac{kcal}{^\circ C}$ ) 攝氏溫度	拉 法 (Farads)	$\frac{Ct}{Ce}$	$4 \times 10^6$
能 量 傳 遞 阻 力 (R)	攝氏溫度 ( $^\circ C$ ) 仟卡 / 小時 ( $\frac{kcal}{hr}$ )	歐 姆 (Ohms)	$\frac{Re}{Rt}$	$8 \times 10^6$
勢 能 (E 或 T)	攝氏溫度 ( $^\circ C$ )	伏 特 (Volts)	$\frac{E}{T}$	1
能 量 傳 遞 量 (Q 或 I)	仟卡 小時 ( $\frac{kcal}{hr}$ )	安 培 (Amperes)	$\frac{Q}{I}$	$8 \times 10^6$

實驗裝置所用材料的熱學性質，如表三所示

表三 實驗裝置所用材料的熱學性質

材 料	熱傳導率 $\frac{kcal}{hr-m-^\circ C}$	比 熱 $\frac{kcal}{kg-^\circ C}$	比 重 $\frac{kg}{m^3}$
三合板 (1.5 公分)	0.145	0.413	483.6 <sup>(1)</sup>
三合板 (1.1 公分)	0.145	0.413	511.3 <sup>(1)</sup>
鋁 材	175.5	0.220	2707.1 <sup>(2)</sup>
絕 熱 板	0.015	0.361	32.0 <sup>(3)</sup>
聚氯乙稀 (PVC)	0.126	0.4	1347.49 <sup>(4)</sup>

- (1) Franz F.P. Kolimann, Edward W. Kuenzi, and Alfred J. Stamm. 1967, Principles of wood Science and technology, Volumn II: Wood Based Materials. 北原覺一, 1967, 木材物理, 森北出版株式會社 p. 55.
- (2) J. P. Holman. 1976. Heat Transfer, fourth edition, Mc Graw-Hill Book Company.
- (3) Knox, R.E. Insulation properties of fluorocarbon expanded rigid Urethane foam. Trans. ASHRAE, Vol 69, p. 150.
- (4) H.M. Leeper and I.L. Gomez. 1966. Quality standards for rigid PVC for exterior construction. Modern Plastics, p257-270.

(三) 透明覆蓋長波輻射透光率

任何物體與其周圍環境隨時都有輻射能量的交換。任一具有單位面積的非黑體，在單位時間內所逸散的輻射能量為

$$E = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots\dots (39)$$

根據普朗克定律 (Plancks Law)，一個位於真空中的黑體，其半球能量放射率 (hemispherical emissive power) 為

$$e_{\lambda b} = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5 (e^{0.2} \lambda T - 1)} \dots\dots\dots (39)$$

式中

$$C_1 = 0.59544 \times 10^{-12} \text{ w-cm}^2$$

$$C_2 = 1.4388 \text{ cm-k}$$

非黑體能量放射率的定義為

$$e_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} e_{b\lambda} \dots\dots\dots (40)$$

由式(39)與式(40)

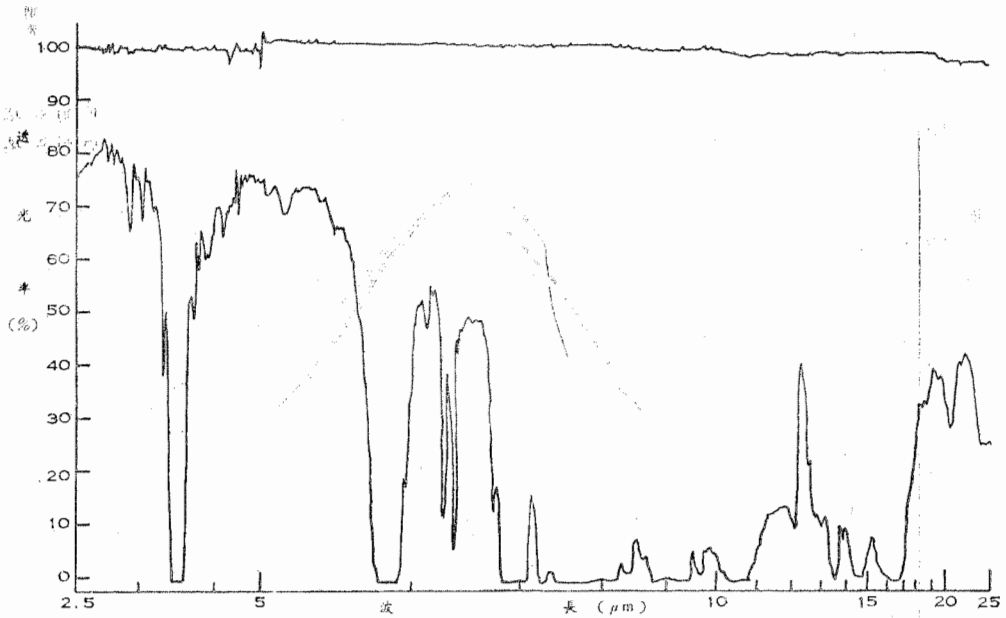
$$e_{\lambda} = \frac{2\pi \epsilon_{\lambda} c_1}{\lambda^5 (e^{0.2} \lambda T - 1)} \dots\dots\dots (41)$$

本實驗裝置所採用的聚氯乙稀透明覆蓋，曾取樣送往化學系，做紅外線透光率測定。在 2.5 微米至 25 微米的波長範圍內，測定結果如圖十所示。

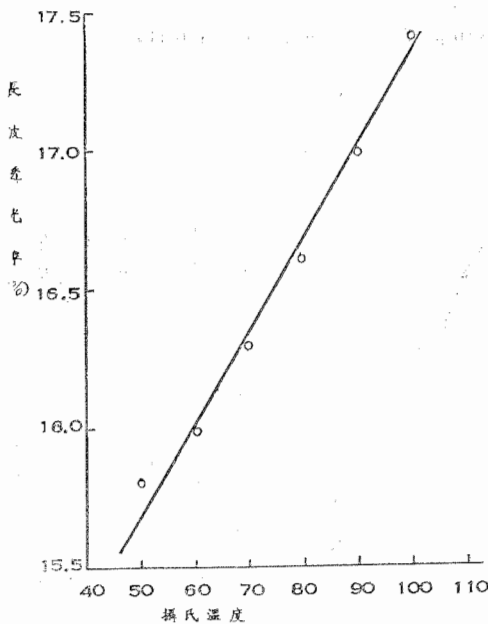
表面溫度為 T 的單位逸熱面積，對波長  $\lambda$  的光波之能量放射率，可由式(41)計算出來，根據圖十將此數值乘上其相對的透光率，便是波長為  $\lambda$  的光波，對透明覆蓋的能量穿透率。由波長三微米起，至二十五微米止，分別求出其能量放射率與能量穿透率。波長小於三微米時，能量放射率趨近於零，可略去不計。根據式(41)可求出全部波長範圍內，單位逸熱面積所逸散的熱能總量。這總能量扣除在二十五微米波長內的總逸熱量，便是大於二十五微米波長的逸熱總和。在攝氏八十度時，這總和佔全部能量的百分之十一。根據圖十研判，將這百分之十一能量的透光率，定為百分之二十。

將經由上列步驟求出的穿透能量總和，除上單位面積所逸散的總能量，便是透明覆蓋在溫度 T 的透光率。

在攝氏五十度至攝氏一百度的溫度範圍內，由透光率對絕對溫度所繪出的迴歸直線，如圖十一所



圖十 透明覆罩長波透光率



圖十一 透明覆罩長波透光率迴歸直線

示。此迴歸直線的方程式為

$$\tau = 14.064 + 0.03257 T \dots\dots\dots (42)$$

相關係數為

$$r = 0.992$$

### 五、結果與討論

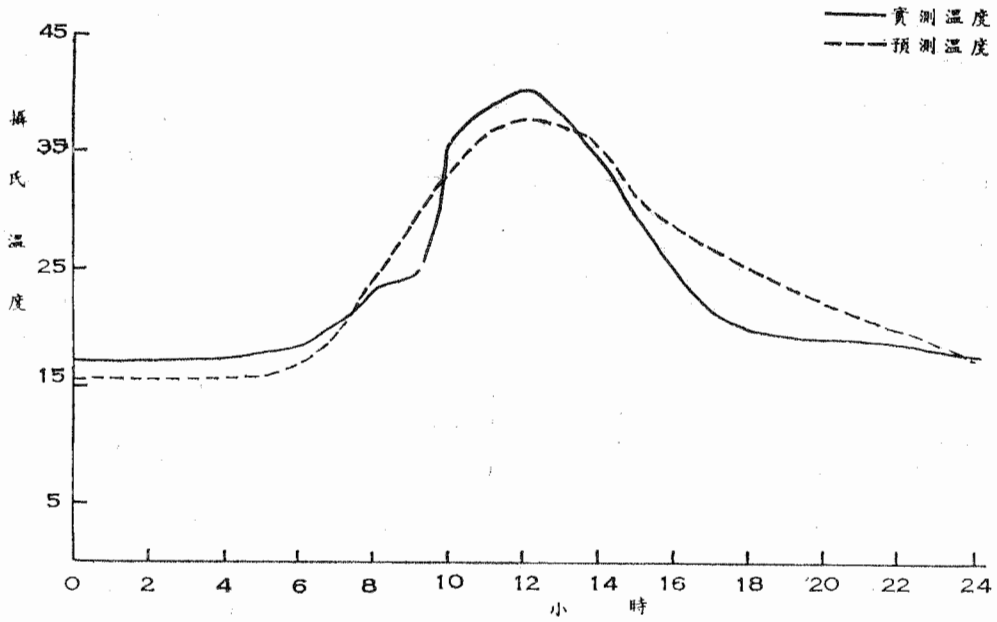
茲將民國六十七年十一月二十五日，十二月七

日與民國六十八年一月五日，二月十七日，二月十八日，二月二十一日的出口熱風溫度實測值以及相關熱電模擬電路模式所得出的預測值，分別比較並繪成圖十二，十三，十四，十五，十六及十七。

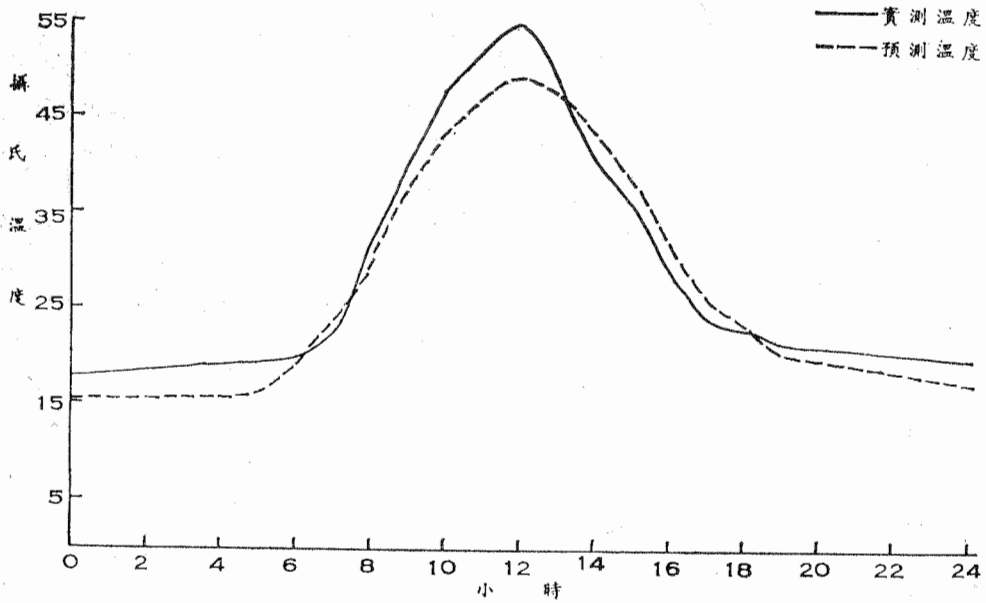
根據平板式太陽能空氣加熱器及柵式太陽能空氣加熱器的實驗結果，將兩者空氣流量與熱效率的關係，繪於圖十八。在圖十八的風速範圍內，柵式太陽能空氣加熱器之熱效率，較平板式太陽能空氣加熱器之熱效率平均高 8.7%。柵式太陽能空氣加熱器所提昇的空氣溫度，則較平板式太陽能空氣加熱器平均高出 10.9°C。由此可見加柵是改善平板式太陽能空氣加熱器之有效方法。

熱電模擬電路之預估溫度值與實測溫度值之間的差異，以最小平方和法，求得每日預估值與實測值的標準差。平板式太陽能空氣加熱器每日預估值與實測值的平均標準差為 2.70°C。柵式太陽能空氣加熱器每日預估值與實測值的平均標準差為 3.76°C。由此顯示熱電模擬法可以有效的預測太陽能空氣加熱器之熱傳遞。

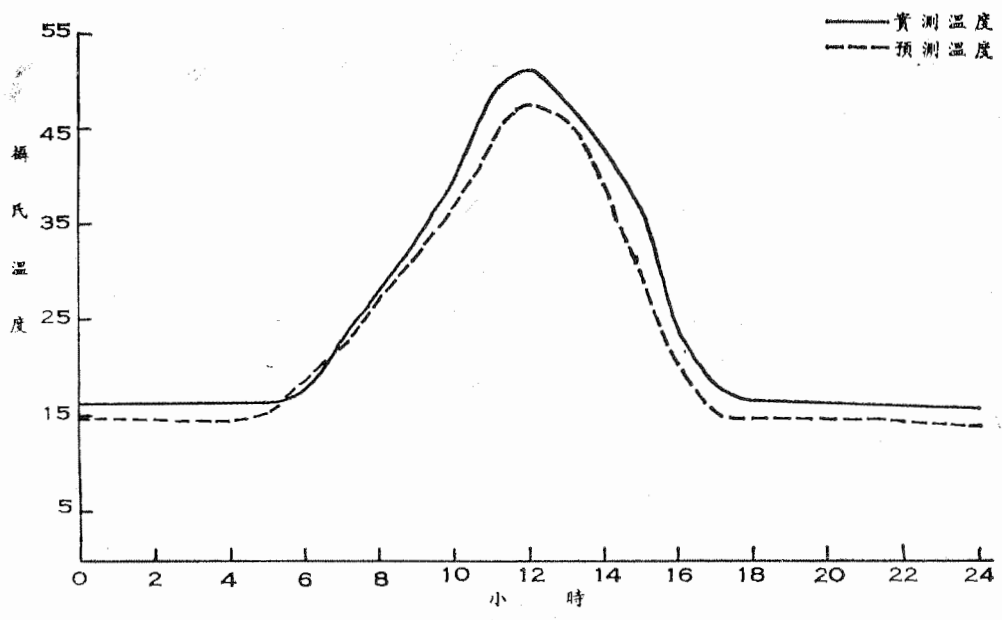
如以單日為例，根據六十七年十一月二十五日的試驗，預測值標準差為 2.63°C，正午的實測熱風溫度為 40.5°C，預估溫度為 37.2°C，兩者相差僅為 8.1%。又以六十八年十八日的試驗為例，預測值標準差為 2.75°C，正午的實測熱風溫度為 42.5°C，預估溫度為 37.1°C，兩者相差為 12.7%。



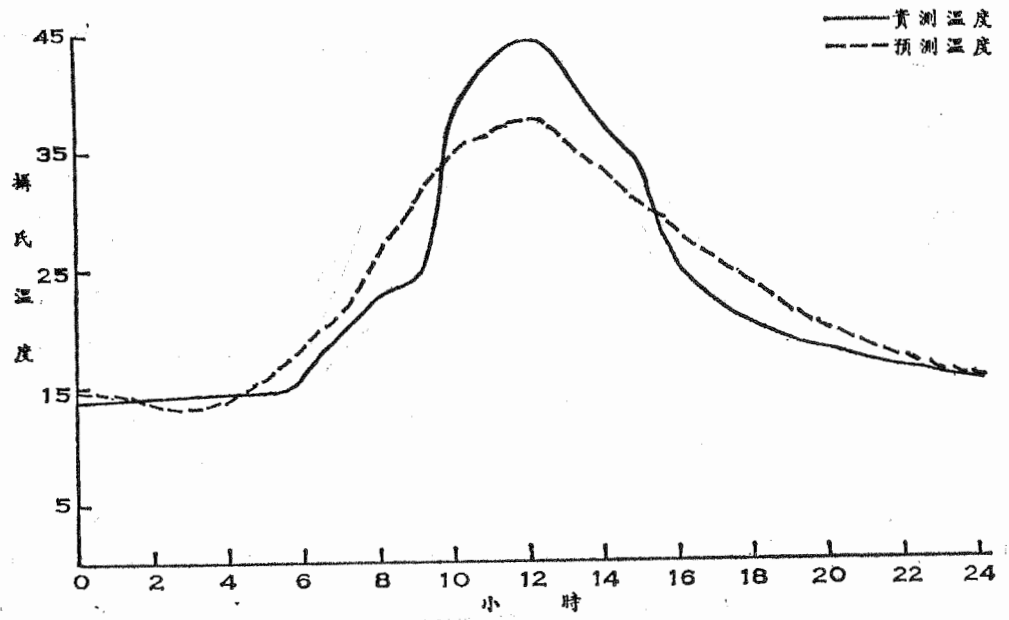
圖十二 平板式太陽能空氣加熱器試驗與預測熱風溫度 (六十七年十一月二十五日)



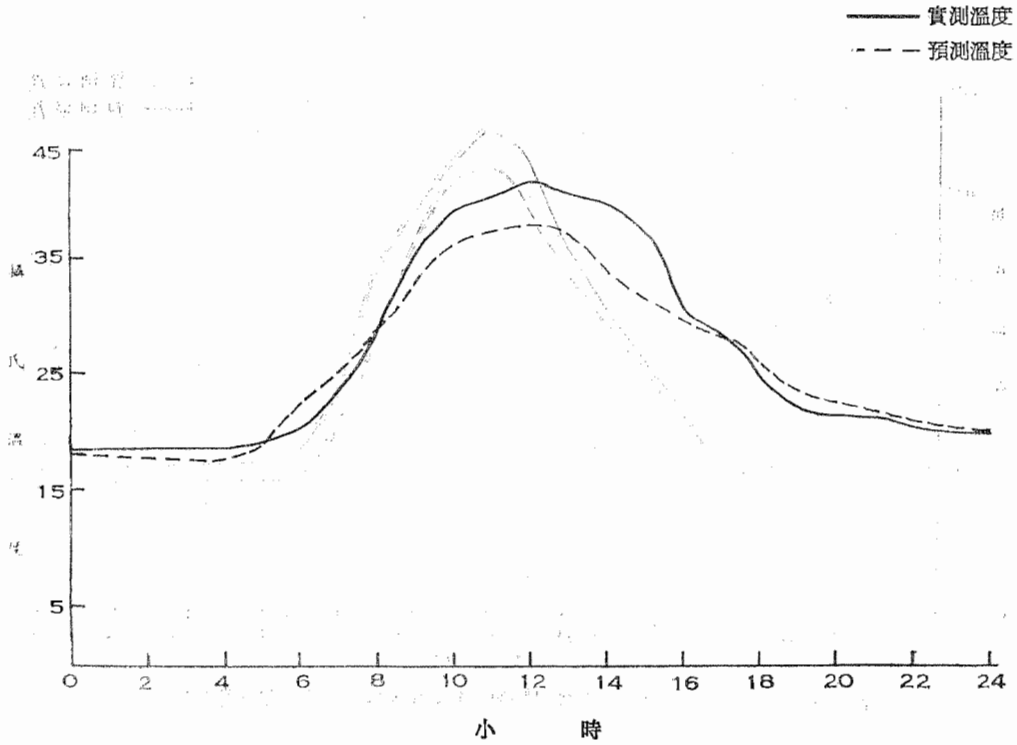
圖十三 平板式太陽能空氣加熱器試驗與預測熱風溫度 (六十七年十二月七日)



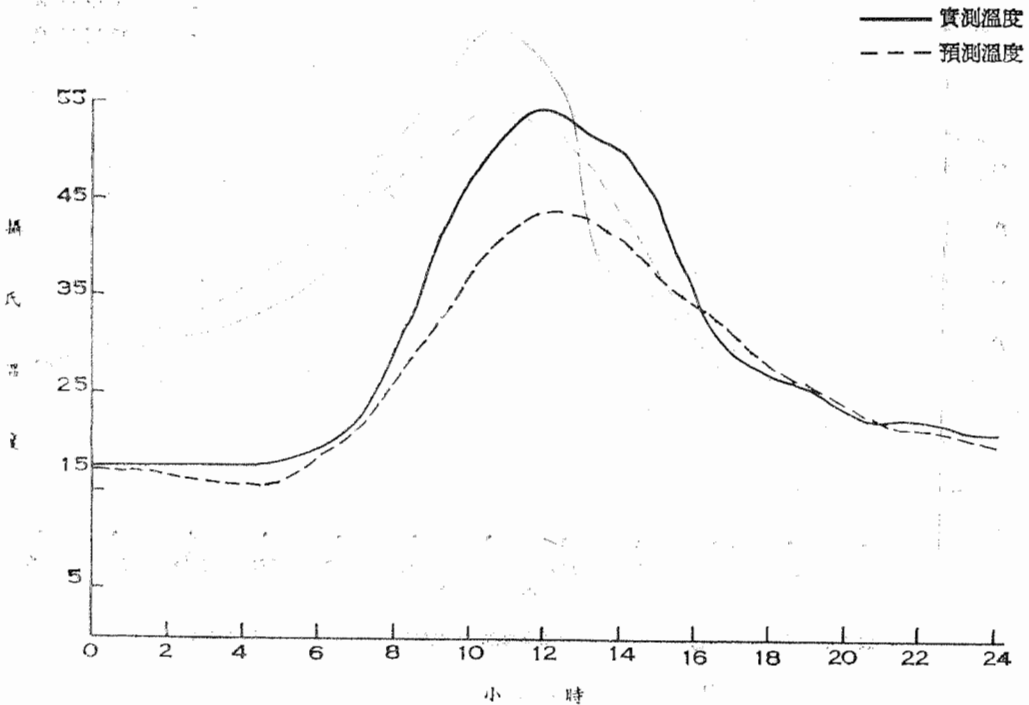
圖十四 平板式太陽能空氣加熱器試驗與預測熱風溫度(六十八年一月五日)



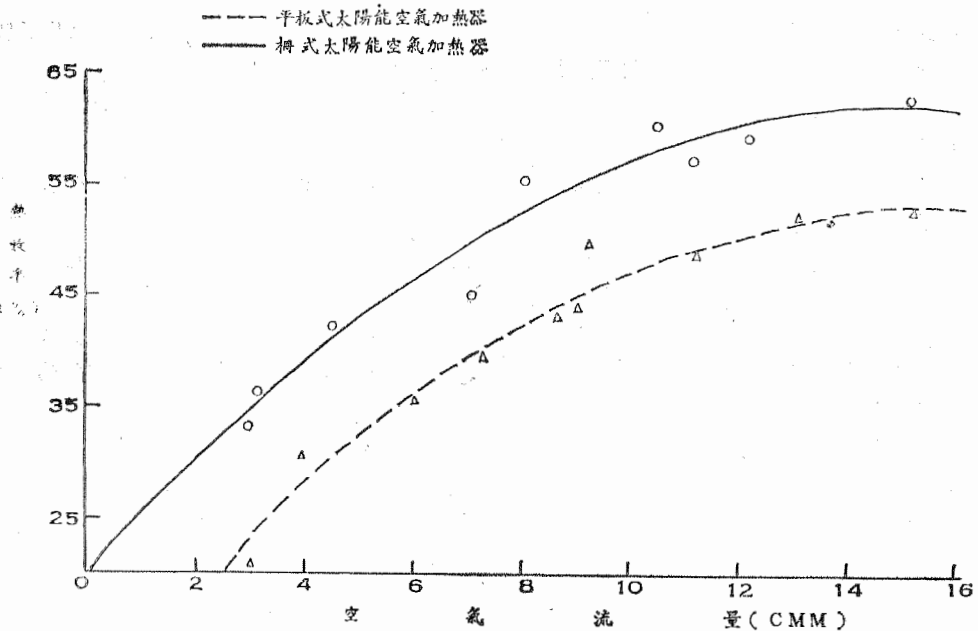
圖十五 柵式太陽能空氣加熱器試驗與預測熱風溫度(六十八年二月十七日)



圖十六 柵式太陽能空氣加熱器試驗與預測熱風溫度 (六十八年二月十八日)



圖十七 柵式太陽能空氣加熱器試驗與預測熱風溫度 (六十八年二月二十一日)



圖十八 空氣流量與熱效率之關係

太陽能空氣加熱器之熱電模擬電路構成之後，即可迅速代入電腦分析程式去求解，每次花費不過僅新臺幣一百五十元左右，即可獲知太陽能空氣加熱器任何一處的溫度變化。因此分析太陽能空氣加熱器之熱傳遞，熱電模擬法應可稱為快捷簡便的方法。

模擬電路模式的預測結果，與實際溫度有差異，基本可能原因如下：

(一)在一般的熱傳遞問題中，正確對流係數不易求得，因此多以數值分析之方法求其近似解。本研究係以能量平衡方程式求出太陽能空氣加熱器集熱面的對流係數。在能量平衡方程式內，多項常數的決定雖力求正確，但受儀器裝置之精度限制，這些常數的決定，誤差難免。

(二)本研究中柵式太陽能空氣加熱器之預估溫度準確度較低是因為為了簡化繁雜的推導過程，而省略了柵的上方與下方之能量交換，使得板面對流係數偏低，柵面對流係數增大，因而降低了柵式太陽能空氣加熱器理論預測的準確程度。

(三)本研究的分析過程中，對外界風速的估計不夠正確。因大氣科學系在農機館附近的風速測站，高度雖然與太陽能收集器的高度相同，但此測站四周比太陽能收集器附近更為空曠，所量得的風速也較高，因此增加了模擬電路模式的對流熱損失，而降低了預測的熱風溫度。

根據圖十八上諸點數據，平板式太陽能空氣加熱器熱效率對空氣流量的迴歸方程式為

$$E = -0.188 (FR)^2 + 5.81 (FR) + 7.47$$

$$R^2 = 0.903$$

$$S. E. = 3.161$$

柵式太陽能空氣加熱器效率對空氣流量的迴歸方程式為

$$E = -0.188 (FR)^2 + 5.64 (FR) + 19.3$$

$$R^2 = 0.93$$

$$S. E. = 2.967$$

## 六、今後研究工作的建議

太陽能利用的廣泛程度，端視於集熱材料與儲熱裝置之能否突破。因此高明的設計與廉價而有效材料的發現，對能源問題的解決，同具關鍵性的地位。本文已證實電路模擬的方法，能有效的預測新型平板式太陽能空氣加熱器的熱傳行為。今後須更進一步從事於集熱裝置各部份最佳尺寸的探求，以及研究各種不同集熱材料及絕熱材料對熱效率的影響情形。日後從事新型太陽能收集器之研製或舊有集熱裝置改良的研究工作時，若是採用本文中所使用的分析方法及模擬程式，將可快捷的得到比較性的結果。

## 七、誌謝

本文承吾師 張漢聖博士悉心指導，始能順利完成，藉此致由衷的謝忱。

## 符號說明

A = 熱傳導體截面積

$A_o$	=透明覆蓋表面積	$F_{PEC}$	=太陽能空氣加熱器右側擋板與透明覆蓋之間的形狀係數
$A_h$	=平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面積	$F_{PIC}$	=太陽能空氣加熱器左側擋板與透明覆蓋之間的形狀係數
$A_i$	=表面 i 之表面積	$F_{wc}$	=柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面與透明覆蓋之間的形狀係數
$A_j$	=表面 j 之表面積	FR	=太陽能空氣加熱器內空氣流量
$A_M$	=柵式太陽能空氣加熱器集熱柵表面積	h	=上板與下板間的距離
$A_{PE}$	=太陽能空氣加熱器右側擋板表面積	$h_c$	=流體與固態表面間的對流係數
$A_{PI}$	=太陽能空氣加熱器左側擋板表面積	$h_{c,i}$	=平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面對流係數
$A_w$	=柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面積	$h_{c,o}$	=外界對流係數
C	=熱容量	$h_M$	=柵狀物表面對流係數
$C_o$	=透明覆蓋等效電容量	$h_w$	=柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面對流係數
$C_o$	=熱風等效電容量	I	=水平日射量
$C_i$	=絕熱板等效電容量	k	=導體熱傳導係數
$C_M$	=柵狀物等效電容量	K	=空氣熱傳導係數
$C_m$	=鋁箔等效電容量	$K_a$	=鋁箔熱傳導係數
$C_p$	=等壓比熱	$K_p$	=三合板熱傳導係數
$C_P$	=集熱板底層等效電容量	$K_u$	=絕熱板熱傳導係數
$C_{PE}$	=右側擋板等效電容量	$\dot{M}$	=太陽能空氣加熱器空氣流量
$C_{PI}$	=左側擋板等效電容量	N	=溫度因次線性化係數
E	=太陽能空氣加熱器熱效率	Q	=熱傳遞量
$(E_b)_I$	=表面 I 輻射能量放射率	$Q_c$	=對流熱傳遞量
$(E_b)_{II}$	=表面 II 輻射能量放射率	$Q_h$	=平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面所獲輻射能量
$(E_b)_i$	=與表面 i 溫度相同黑體之輻射能量放射率	$Q_M$	=柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面所獲輻射能量
$(E_b)_j$	=與表面 j 溫度相同黑體之輻射能量放射率	$(Q_{net})_o$	=透明覆蓋與天空的能量淨交換量
$(E_b)_K$	=與表面 K 溫度相同黑體之輻射能量放射率	$(Q_{net})_h$	=平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面與天空的能量淨交換量
$E_o$	=透明覆蓋單位面積熱輻射量	$(Q_{net})_i$	=表面 i 的能量淨交換量
$E_h$	=集熱板表面單位面積熱輻射量	$(Q_{net})_j$	=表面 j 的能量淨交換量
$E_M$	=集熱柵柵面單位面積熱輻射量	$(Q_{net})_{k-j}$	=介質 k 與表面 j 的能量淨交換量
$E_{PE}$	=太陽能空氣加熱器右側擋板單位面積熱輻射量	$(Q_{net})_M$	=柵狀物與天空的能量淨交換量
$E_{PI}$	=太陽能空氣加熱器左側擋板單位面積熱輻射量	$(Q_{net})_{PE}$	=右側擋板與天空的能量淨交換量
$E_s$	=單位面積上大氣層授予之長波輻射量	$(Q_{net})_{PI}$	=左側擋板與天空的能量淨交換量
$E_z$	=表面 Z 的熱輻射量	$Q_{PE}$	=太陽能空氣加熱器右側擋板內所獲輻射能量
$F_{o_a}$	=透明覆蓋與天空之間的形狀係數	$Q_{PI}$	=太陽能空氣加熱器左側擋板內所獲輻射能量
$F_{hc}$	=平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面與透明覆蓋之間的形狀係數	$Q_w$	=柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面所獲輻射能量
$F_{im}$	=表面 i 與表面 m 之間的形狀係數		
$F_{jn}$	=表面 j 與表面 n 之間的形狀係數		
$F_{jk}$	=表面 j 與表面 k 之間的形狀係數		
$F_{MO}$	=柵狀物與透明覆蓋之間的形狀係數		

- $R$  = 表面 I 與表面 II 間所有輻射熱傳遞阻力總和  
 $R'$  = 傳導熱傳遞阻力  
 $R_e$  = 對流熱傳遞阻力  
 $(R)_e$  = 透明覆蓋等效熱傳導電阻  
 $(R_{e1})_e$  = 透明覆蓋內側等效對流電阻  
 $(R_{e1})_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板內側等效對流電阻  
 $(R_{e1})_m$  = 柵狀物等效對流電阻  
 $(R_{e1})_{PE}$  = 右側擋板內側等效對流電阻  
 $(R_{e1})_{PI}$  = 左側擋板內側等效對流電阻  
 $(R_{e1})_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板內側等效對流電阻  
 $R_{eh}$  = 透明覆蓋與集熱板間等效空間電阻  
 $R_{om}$  = 透明覆蓋與柵狀物間等效吸收電阻  
 $(R_{oo})_e$  = 透明覆蓋外側等效對流電阻  
 $(R_{oo})_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板外側等效對流電阻  
 $(R_{oo})_{PE}$  = 右側擋板外側等效對流電阻  
 $(R_{oo})_{PI}$  = 左側擋板外側等效對流電阻  
 $(R_{oo})_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板外側等效對流電阻  
 $R_{es}$  = 透明覆蓋與天空間等效輻射電阻  
 $R_{oPE}$  = 透明覆蓋與右側擋板間等效空間電阻  
 $R_{oPI}$  = 透明覆蓋與左側擋板間等效空間電阻  
 $R_{ew}$  = 透明覆蓋與集熱板間等效穿透電阻  
 $R_o$  = 內阻  
 $R_{hPE}$  = 集熱板與右側擋板間等效空間電阻  
 $R_{hPI}$  = 集熱板與左側擋板間等效空間電阻  
 $R_{hs}$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板與天空間等效輻射電阻  
 $R_i$  = 表面 i 能量放射率  
 $(R_i)_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器絕熱板等效熱傳導電阻  
 $(R_i)_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器絕熱板等效熱傳導電阻  
 $R_j$  = 表面 j 能量放射率  
 $R_m$  = 表面 m 能量放射率  
 $(R)_m$  = 柵狀物等效熱傳導電阻  
 $(R_m)_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器鋁箔等效熱傳導電阻  
 $(R_m)_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器鋁箔等效熱傳導電阻  
 $R_{ms}$  = 柵狀物與天空間等效輻射電阻  
 $R_{mw}$  = 柵狀物與集熱板間等效吸收電阻  
 $R_n$  = 表面 n 能量放射率  
 $(R_P)_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板底層等效熱傳導電阻  
 $(R_P)_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板底層等效熱傳導電阻  
 $(R_{PE})_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器右側擋板等效熱傳導電阻  
 $(R_{PE})_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器右側擋板等效熱傳導電阻  
 $(R_{PI})_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器左側擋板等效熱傳導電阻  
 $(R_{PE})_m$  = 柵式太陽能空氣加熱器左側擋板等效熱傳導電阻  
 $R_{PEO}$  = 右側擋板與柵狀物間等效吸收電阻  
 $R_{PEO}$  = 右側擋板與透明覆蓋間等效穿透電阻  
 $R_{PEPI}$  = 右側擋板與左側擋板間等效空間電阻  
 $R_{PES}$  = 右側擋板與天空間等效輻射電阻  
 $R_{PEW}$  = 右側擋板與集熱板間等效穿透電阻  
 $R_{PIO}$  = 左側擋板與透明覆蓋間等效穿透電阻  
 $R_{PIM}$  = 左側擋板與柵狀物間等效吸收電阻  
 $R_{PIPE}$  = 左側擋板與右側擋板間等效穿透電阻  
 $R_{PIS}$  = 左側擋板與天空間等效輻射電阻  
 $R_{PIW}$  = 左側擋板與集熱板間等效穿透電阻  
 $(R_{r1})_e$  = 透明覆蓋等效表面電阻  
 $(R_{r1})_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板等效表面電阻  
 $(R_{r1})_{PE}$  = 右側擋板等效表面電阻  
 $(R_{r1})_{PI}$  = 左側擋板等效表面電阻  
 $R_{ws}$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面與天空間等效輻射電阻  
 $t_I$  = 表面 I 的絕對溫度  
 $t_{II}$  = 表面 II 的絕對溫度  
 $T$  = 柯特流體溫度  
 $T_o$  = 集熱裝置外界溫度  
 $T_o'$  = 下板溫度  
 $T_1$  = 集熱裝置進口處空氣溫度  
 $T'_1$  = 上板溫度  
 $T''_1$  = 熱傳導體表面溫度  
 $T_2$  = 集熱裝置出口處空氣溫度  
 $T''_2$  = 熱傳導體表面溫度  
 $T_a$  = 自由流體溫度



$\bar{T}_c$  = 透明覆罩表面平均溫度  
 $T_f$  = 物體加熱後溫度  
 $\bar{T}_f$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面與透明覆罩間的自由流體溫度  
 $\bar{T}_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面平均溫度  
 $\bar{T}_i$  = 物體加熱前溫度  
 $\bar{T}_M$  = 柵狀物表面平均溫度  
 $\bar{T}_{PE}$  = 右側擋板表面平均溫度  
 $\bar{T}_{PI}$  = 左側擋板表面平均溫度  
 $T_s$  = 輻射熱傳遞天空等效溫度  
 $T'_s$  = 固態表面之表面溫度  
 $\bar{T}_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面平均溫度  
 $\bar{T}_z$  = 表面乙平均溫度  
 $T_\infty$  = 柵式太陽能空氣加熱器柵狀物表面與透明覆罩間的自由流體溫度  
 $T'_\infty$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面與柵狀物間的自由流體溫度  
 $\Delta x$  = 擋板厚度  
 $\Delta x_a$  = 鋁箔厚度  
 $\Delta x_p$  = 集熱板底層厚度  
 $\Delta x_n$  = 絕熱板厚度  
 $U$  = 整體熱傳係數  
 $U_1$  = 柯特流上板前進速度  
 $V$  = 體積  
 $V_0$  = 外界風速  
 $y$  = 下板算起之縱向垂直位置  
 $\alpha_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面吸熱率  
 $\alpha_M$  = 柵狀物表面吸熱率  
 $\alpha_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面吸熱率  
 $\gamma$  = 比重  
 $\epsilon_c$  = 透明覆罩表面逸熱係數  
 $\epsilon_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器集熱板表面逸熱係數  
 $\epsilon_i$  = 表面 i 逸熱係數  
 $\epsilon_j$  = 表面 j 逸熱係數  
 $\epsilon_k$  = 表面 k 逸熱係數  
 $\epsilon_M$  = 柵狀物表面逸熱係數  
 $\epsilon_P$  = 左側擋板及右側擋板表面逸熱係數

$\epsilon_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器集熱板表面逸熱係數  
 $\epsilon_z$  = 表面 Z 逸熱係數  
 $\tau$  = 動黏度  
 $\sigma$  = 波茲曼常數  
 $\tau$  = 透明覆罩之水平日射量透光率  
 $\tau_h$  = 平板式太陽能空氣加熱器透明覆罩對集熱板表面長波輻射透光率  
 $\tau_M$  = 透明覆罩對柵狀物表面長波輻射透光率  
 $\tau_{PE}$  = 透明覆罩對右側擋板表面長波輻射透光率  
 $\tau_{PI}$  = 透明覆罩對左側擋板表面長波輻射透光率  
 $\tau_w$  = 柵式太陽能空氣加熱器透明覆罩對集熱板表面長波輻射透光率

### 參 考 文 獻

1. 張漢聖：太陽能烤菸（稻）系統之研究實驗。1977。農工學報 V. 23, No. 2.
2. 徐明同，陳正改，林蘭貞：臺灣氣象與太陽能發展之關係。能源季刊，6卷2期。
3. B. K. Huang, and H. S. Chang. 1976. Circuit simulation analysis of heat transfer effect in solar drying. ASAE paper No. 76-3019.
4. Beville V. D. 1965. A solar energy collector for heating air. University of California (Davis). Unpublished M. S. thesis.
5. Hollands, K. G. T. 1965. Honeycomb devices in flat plate solar collectors. Solar energy 9 (3): 159-164.
6. Souka, A. F. 1965. Double exposure flat-plate collector. Solar energy 9 (3); 117-118.
7. Gupta, C. L., and M. P. Garg. 1967. Performance studies of solar air heaters. Solar energy 11 (1); 25-31.
8. S. M. Henberson, and C. V. Khe. 1975. Performance of a matrix solar collector for heating air. ASAE Paper No. 75-3005.
9. K. V. Chau, O. D. Baird, and L. O. bagnall. 1977. performance of a plastic solar air heater. ASAE Paper No. 77-4015.
10. Bobby L. Clary, P. E., and Ronnie G. Morgan. 1977. Evaluation of matrix solar collector for heating air. proceedings of

- solar crop drying conference, North Carolina State University, June 30, 1977.
11. Schlichting. 1968. Boundary Layer Theory, Sixth edition, Mc Graw-Hill Book Company.
  12. Jordan, K. A., B. K. Huang, and C. Magee. 1975, ECAP in agricultural engineering teaching and research. Trans. ASAE Vol. 18, No. 3, p. 569-599.
  13. Jensen, R. W. and M. D. Lieberman. 1968. IBM electronic circuit analysis program techniques and application. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
  14. J. P. Holman. 1976. Heat Transfer, fourth edition. Mc Graw-Hill Book Company.
  15. E. M. Sparrow, and R. D. Cess. 1968. Radiation heat transfer. New York State University.
  16. Robert Siegel, and John R. Howell. 1972. Thermal radiation heat transfer. Mc Graw-Hill Book Company.
  17. Hodges, C. N., et al. 1966. Solar distillation utilizing multiple effect humidification. Final Report. The University of Arizona Solar Energy Laboratory of the Institute of Atmospheric Physics.
  18. Franz F. P. Kollmann, Edward W. Kuenzi, and Alfred J. Stamm. 1967. Principles of wood science and technology, Volumn II: Wood Based Materials.
  19. 北原寛一, 1967. 木材物理, 森北出版株式會社 p. 55.
  20. Knox, R. E. Insulation properties of fluorocarbon expanded rigid Urethane foam. Trans. ASHRAE, Vol. 69, P. 150.
  21. H. M. Leeper and I. L. Gomez. 1966. Quality standards for rigid PVC for exterior construction. Modern Plastics. P257-270.
  22. Soribe, M. 1972. Dynamic simulation of a greenhouse. Unpublished Ph. D. thesis, Ohio State University.

承包土木、建築、水利工程

## 乾隆土木包工業

負責人 呂 乾 朝

地址：中壢市青埔里五鄰四三號  
電話：(〇三四) 四二七三三四

承包土木、建築、水利工程

## 杉合土木包工業

負責人 林 盧 杉

地址：中壢市普義里普義路七五巷六七號  
電話：(〇三四) 四二五二三八四一二