

九十年度國科會專題研究計畫報告

「熱電共生太陽能發電系統研製」

Air-cooled photovoltaic/thermal solar power generation system

計畫編號: NSC90-2212-E-002-223

執行期限: 民國90年8月1日至91年7月31日

主持人: 黃秉鈞

研究助理: 黃煥翔 曾國楨 葉裕源

執行機構單位: 國立台灣大學機械工程學系

中文摘要

本研究旨在開發空氣傳熱型熱電共生太陽能發電系統(aPV/T)，以提高能源效率。aPV/T 的設計重點為調整風扇轉速來控制太陽能電池操作溫度，以提高廢熱能的加熱效率。為了準確控制太陽能電池操作溫度，本研究先進行 aPV/T 的動態系統識別，以用來設計控制器，並對系統性能做測試評估。結果顯示，太陽能電池操作溫度設定在 50°C 之下，其溫度變化範圍可控制在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，而且可獲得最高的集熱效率  $\eta_{th}$  (0.28)。

關鍵詞: 太陽能；太陽電池；太陽能發電/集熱器

Abstract

The main purpose of the present research is to develop an air-cooled photovoltaic/thermal solar power generation system (aPV/T) to increase the solar energy utilization efficiency. The design of aPV/T focuses on the fan speed adjustment in order to control the operating temperature of solar cell, which can result in higher thermal efficiency. In order to accurately control the PV temperature, the design of a temperature controller is studied. A system identification was first carried out to determine the system dynamic model of aPV/T. The test results show that if the temperature of the solar cell is set under 50°C, the temperature can be controlled to within  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  error and we can obtain the highest heat collection efficiency  $\eta_{th}$  (0.28).

Keywords: solar energy; solar PV; photovoltaic/thermal system.

九十年國科會專題研究計畫報告  
「熱電共生太陽能發電系統研製」  
Air-cooled photovoltaic/thermal  
solar power generation system

計畫編號: NSC90-2212-E-002-223

執行期限: 民國90年8月1日至91年7月31日

主持人: 黃秉鈞

研究助理: 黃煥翔 曾國楨 葉裕源

執行機構單位: 國立台灣大學機械工程學系

## 一、摘要

本研究旨在開發空氣傳熱型熱電共生太陽能發電系統(aPV/T)，以提高能源效率。aPV/T 的設計重點為調整風扇轉速來控制太陽能電池操作溫度，以提高廢熱能的加熱效率。為了準確控制太陽能電池操作溫度，本研究先進行 aPV/T 的動態系統識別，以用來設計控制器，並對系統性能做測試評估。結果顯示，太陽能電池操作溫度設定在 50°C 之下，其溫度變化範圍可控制在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，而且可獲得最高的集熱效率  $\eta_{th}$  (0.28)。

關鍵詞: 太陽能; 太陽電池; 太陽能發電/集熱器

## Abstract

The main purpose of the present research is to develop an air-cooled photovoltaic/thermal solar power generation system (aPV/T) to increase the solar energy utilization efficiency. The design of aPV/T focuses on the fan speed adjustment in order to control the operating temperature of solar cell, which can result in higher thermal efficiency. In order to accurately control the PV temperature, the design of a temperature controller is studied. A system identification was first carried out to determine the system dynamic model of aPV/T. The test results show that if the temperature of the solar cell is set under 50°C, the temperature can be controlled to within  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  error and we can obtain the highest heat collection efficiency  $\eta_{th}$  (0.28).

Keywords: solar energy; solar PV; photovoltaic/thermal system.

## 二、緣由與目的

我國天然資源缺乏，因此再生能源的開發非常重要。目前我國太陽能產品主力為太陽能熱水器 [1-2]，未來太陽電池發電系統的市場亦具有高度潛力。

太陽電池發電系統被公認是二十一世紀人類的主要電力供應方法之一。尤其是分散式或家庭式的太陽電池發電系統，將傳統的大型發電廠分散到建築物的屋頂上，利用太陽能來直接發電自給自足，多餘的電還可售回給電力公司。可避免土地徵收與公害汙染問題，為最具潛力的電力系統 [3-5]。不過，礙於成本偏高，太陽電池發電系統的推廣並不容易。

為提升太陽電池能源效率，可以發展太陽能電池的廢熱能回收系統，以回收發電剩餘的熱能。太陽電池廢熱能回收系統大致上可分為兩種：

### 1. 水冷式 [6,8-10]

此種設計將太陽電池與集熱板封裝一起，剩餘的廢熱是透過循環液體(如，水)由集熱板帶走，參考圖2-1及圖2-2。此種系統傳熱效率較高，但有封裝問題(如漏水)可能影響太陽電池壽命。

### 2. 氣冷式[11]

係利用風扇將剩餘的熱能由太陽電池底部帶走，此種設計傳熱效率較差，但沒有封裝問題(如漏水)不會影響太陽電池壽命。

有許多學者曾對水冷式熱電共生太陽能發電系統進行研究(如Lalovic[13]、Imre[14]、Hayakashi[15]等、Garg等[16]、Bergene等[17])，發現其總體效率  $\eta_o$  (包含發電與熱水加熱)均超過60%。Bergene[17]的理論分析也證明，熱電共生太陽能發電系統的總效率(包含發電與熱水加熱)可達60%~80%(採定流量設計)。但是使用水作為傳熱的工質會有漏水及產品可靠度的問題產生，所以促使本研究針對氣冷式之熱電共生太陽能發電系統(aPV/T)進行研發。

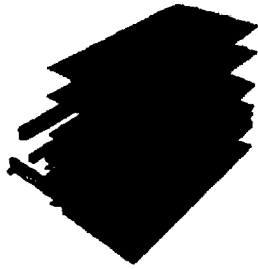


圖2-1 水冷式的熱電共生太陽能發電系統

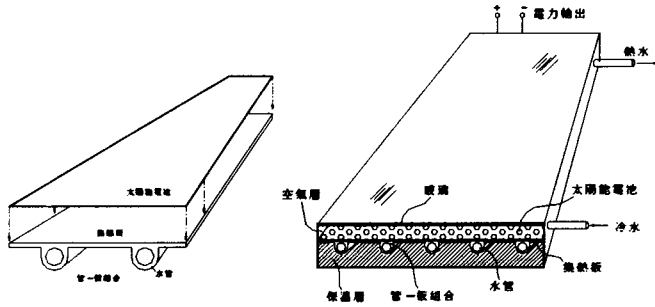


圖2-2 熱電共生太陽能發電系統之「太陽能發電集熱器」(集熱/電池板部分)

本研究設計製作一台名為「空氣傳熱型太陽能熱電收集器(aPV/T)」的芻型機，其構造如圖2-3。aPV/T分為兩層，上層的主要元件為太陽電池、面蓋以及放置在太陽電池底部之主風扇(DC Blower)。下層的主要元件為儲水管組以及放置在儲水管組兩側之橫流扇(內循環風扇)。主風扇的功能是將太陽電池底部熱空氣送至下層同時透過控制器使得太陽電池可以在固定的溫度下運作。橫流扇的功能為增加下層空氣的對流熱傳，以提升集熱效率。儲水管組的主要功能是將主風扇從太陽電池底部帶至下層的熱能儲存。

本計畫研究重點為主風扇的風量控制系統，主要內容包括aPV/T動態系統識別、控制系統設計分析、系統整合測試等。控制系統採ON/OFF以及PI控制兩種，重點為抗干擾(太陽輻射強度、入口溫度、風速、大氣溫度)能力，控制系統係以單晶片8051微處理機來加以實現。

### 三、aPV/T設計

aPV/T以空氣為工質，採強制循環設計，由主風扇帶動，直接由太陽電池底部帶出熱能，再吹向置於太陽電池底下的一排儲水管，將熱能傳給其內之水儲存備用(圖2-3)，其構造與傳統儲置式熱水器相似，唯係利用空氣間接傳熱至水，因此熱傳的控制非常重要。

由熱傳學原理，儲水管的熱傳為：

$$Q_{hl} = U_h A_h (T_h - T_w) \quad (3-1)$$

(3-1) 式中

$$U_h = \frac{1}{1/h_a + r_w + 1/h_w} \quad (3-2)$$

$h_a$  = 儲水管外空氣側熱傳係數 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$r_w$  = 儲水管壁熱阻 ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )

$h_w$  = 儲水管內水側熱傳係數 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$T_h$  = aPV/T上層空氣溫度 ( $^\circ C$ )

$T_w$  = 儲水管內水溫 ( $^\circ C$ )

$A_h$  = 儲水熱傳(管壁)面積 ( $m^2$ )

依上述熱傳原理，欲增強儲水管外的熱傳效果，可在儲水管兩側裝設內循環扇，以增強對流熱傳( $h_a$ )。為增加傳熱量，可用多重管方式製作儲水管組，以增加傳熱面積( $A_h$ )。此一作法也同時可以讓整個太陽能熱電收集器顯得更為扁平(厚度 $< 20cm$ )，以利安裝。為減小管壁熱阻 $r_w$ ，儲置管可採高導熱之薄管材質(0.6mm不銹鋼)。另外，如果利用電子控制器，將主風扇的風量進行自動調節控制，以使流入儲水管組之空氣溫度 $T_h$ 維持在一較高之值，可以提高傳熱位差( $T_h - T_w$ )，而有助於增加儲水管的熱傳。此一設計同時也具有傳統強制循環式熱水器所採用的溫差控制器功能，可以確保水溫已高或太陽輻射變小時風扇停止運轉，以防止已收集之熱能再度散失。

為阻絕熱散失，在太陽電池板上加裝透明面蓋保溫(或是玻璃)，在儲水管組與太陽電池背面氣流道以及底殼之間，鋪設隔熱材料。由於太陽電池板上加裝透明面蓋後，會影響透光率以及太陽能電池發電效率，操作溫度提高後也會影響太陽電池效率。

透過上述種種考量，圖2-3之設計可以大為改善因採用空氣為工質的負面影響。而類似儲置式的設計，可以使其生產成本與安裝費用降低，甚至容易製成建材形狀(如屋頂、遮陽板)，使更易推廣太陽能的利用。

由於太陽電池板上加裝透明面蓋後，會影響透光率以及太陽能電池發電效率，操作溫度提高後也會影響太陽電池效率。因此，必須選擇溫度係數較低之太陽電池。本計畫以非晶矽電池來試作，其溫度係數較低，成本也低，雖然其發電效率較低，但如整合成建材後，系統成本仍可以降低。

主風扇與內循環扇均由太陽電池供電，因此其運轉與太陽能輻射大小同步。aPV/T主要規格如下：

- 太陽電池面積 1.22 m × 0.68 m
- 集熱管(6支) 外徑60mm × 長900mm × 厚0.6mm
- PU隔熱層 20mm
- 主風扇 120 × 120 × 32 軸流扇
- 內擾動風扇 250 × 60 × 60 橫流扇

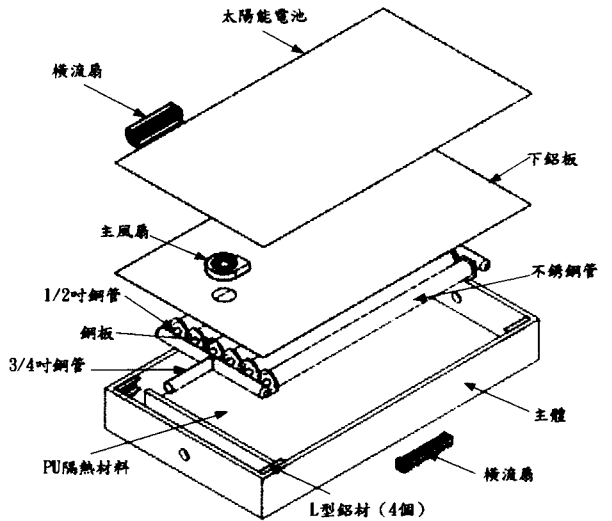
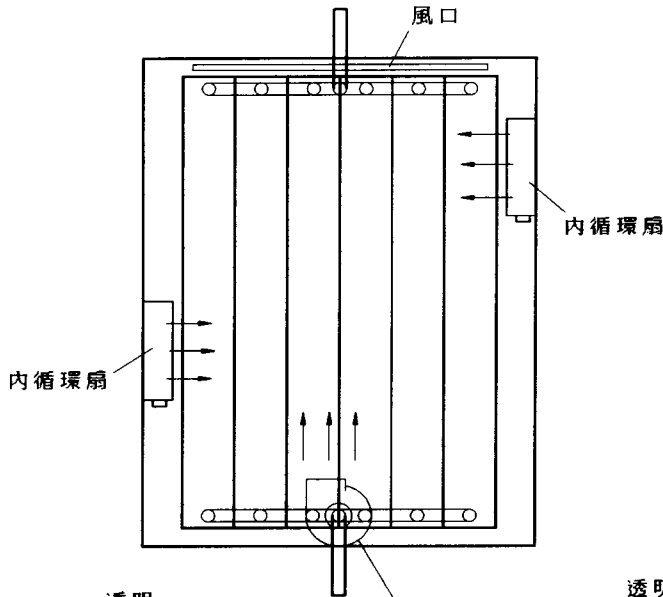


圖 3-2 空氣傳熱型太陽能熱電收集器爆炸圖

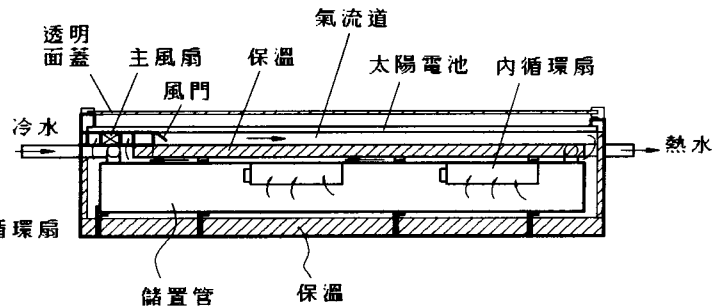
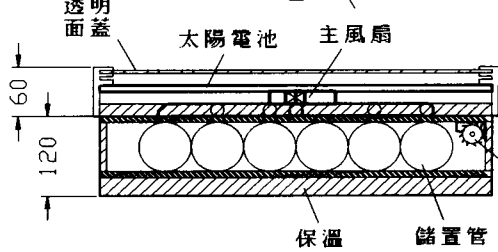


圖 2-3 空氣傳熱型太陽能熱電收集器(aPV/T)構造

另外，為方便實驗，本計畫進行室內實驗。為模擬太陽能輻射熱源，利用電熱片貼在集熱板上(PV)以電熱來模擬太陽能輻射熱，以便在室內進行測試。

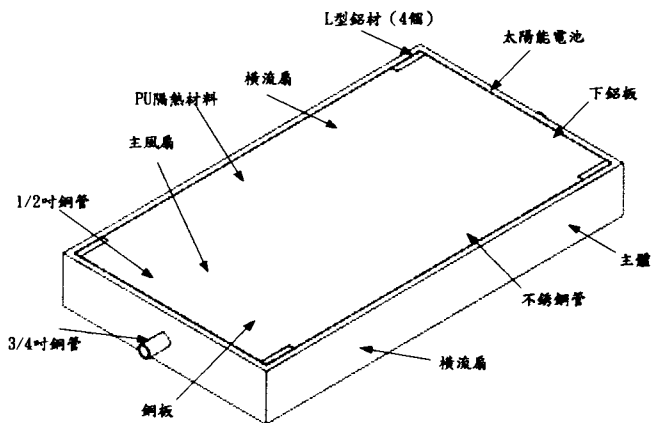


圖 3-1 空氣傳熱型太陽能熱電收集器硬體組合圖

#### 四、aPV/T動態系統識別

本研究的设计重點在太陽能電池底部空氣溫度 ( $T_h$ ) 的控制，為了要設計一個能夠準確控制  $T_h$  的控制系統，本研究先進行 aPV/T 動態系統識別。空氣溫度  $T_h$  之控制系統結構如圖 4-1 所示，本研究將根據此方

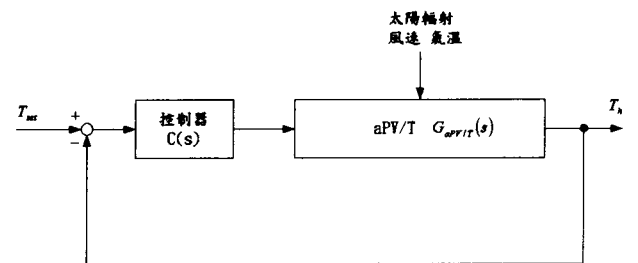


圖 4-1 空氣溫度  $T_h$  之控制系統方塊圖

塊圖進行 aPV/T 之動態系統識別 (System Identification)。

#### 4.1 aPV/T 動態模型的理論推導

從圖 4.1-1 中可以得知太陽能電池溫度受到太陽輻射、從太陽能電池傳遞至 aPV/T 上層空氣的熱傳及從面蓋傳遞至大氣的熱傳的影響。透過 aPV/T 能量傳遞圖(圖 4.1-1)，可推導 aPV/T 的能量平衡方程式，進而推導出 aPV/T 的狀態空間模型[38]:

$$\dot{\tilde{x}}_{aPV/T} = A_{aPV/T} \tilde{x}_{aPV/T} + B_{aPV/T} \tilde{u}_{aPV/T} \quad (4.1-1)$$

$$\tilde{y}_{aPV/T} = C_{aPV/T} \cdot \tilde{x}_{aPV/T} \quad (4.1-2)$$

式中

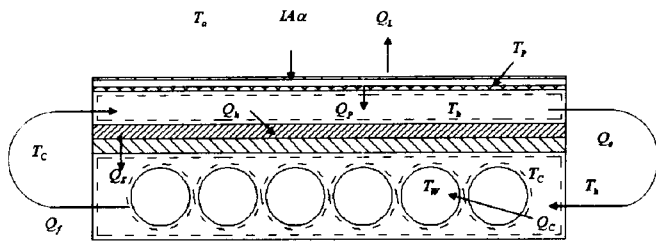


圖 4.1-1 aPV/T 能量傳遞圖

$$\tilde{\mathbf{x}}_{PV/T} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_p \\ \tilde{T}_h \\ \tilde{T}_s \\ \tilde{T}_c \\ \tilde{T}_w \end{bmatrix} \quad (4.1-3)$$

$$A_{aPV/T} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_p C_p} (U_L A_L + U_p A_p) & \frac{U_p A_p}{M_p C_p} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{U_p A_p}{M_p C_p} & -\frac{1}{M_p C_p} (U_p A_p + U_L A_L) & \frac{K_f C_f \bar{V}_f}{M_p C_p} & \frac{U_L A_L}{M_p C_p} & \frac{K_f C_f \bar{V}_f}{M_p C_p} \\ 0 & \frac{U_L A_L}{M_p C_p} & -\frac{1}{M_p C_p} (U_L A_L + U_p A_p) & \frac{U_p A_p}{M_p C_p} & 0 \\ 0 & \frac{K_f C_f \bar{V}_f}{M_p C_p} & \frac{U_p A_p}{M_p C_p} & -\frac{1}{M_p C_p} (U_p A_p + U_L A_L) & \frac{K_f C_f \bar{V}_f}{M_p C_p} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{U_p A_p}{M_p C_p} & -\frac{1}{M_p C_p} (U_p A_p + U_L A_L) \end{bmatrix} \quad (4.1-4)$$

$$B_{aPV/T} = \begin{bmatrix} \frac{A\alpha}{M_p C_p} & \frac{U_L A_L}{M_p C_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_f (\bar{T}_c - \bar{T}_h)}{M_p C_p} \\ 0 & 0 & \frac{0}{M_p C_p} \\ 0 & 0 & \frac{C_f (\bar{T}_h - \bar{T}_c)}{M_p C_p} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1-5)$$

$$\tilde{\mathbf{u}}_{aPV/T} = \begin{bmatrix} \tilde{I} \\ \tilde{T}_a \\ K_f \tilde{V}_f \end{bmatrix}; \quad \tilde{\mathbf{y}}_{aPV/T} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_h \\ \tilde{T}_w \end{bmatrix} \quad (4.1-6)$$

$$C_{aPV/T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1-7)$$

由  $\tilde{G}_{aPV/T}(s) = C_{aPV/T}(sI - A_{aPV/T})^{-1} B_{aPV/T}$ ，可推導出 aPV/T 微擾模型  $\tilde{G}_{aPV/T}(s)$ ：

$$\tilde{G}_{aPV/T}(s) = \begin{bmatrix} \tilde{G}_{11}(s) & \tilde{G}_{12}(s) & \tilde{G}_{13}(s) \\ \tilde{G}_{21}(s) & \tilde{G}_{22}(s) & \tilde{G}_{23}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(s) & a_{12}(s) & a_{13}(s) \\ b_{11}(s) & b_{12}(s) & b_{13}(s) \\ a_{21}(s) & a_{22}(s) & a_{23}(s) \\ b_{21}(s) & b_{22}(s) & b_{23}(s) \end{bmatrix} \quad (4.1-8)$$

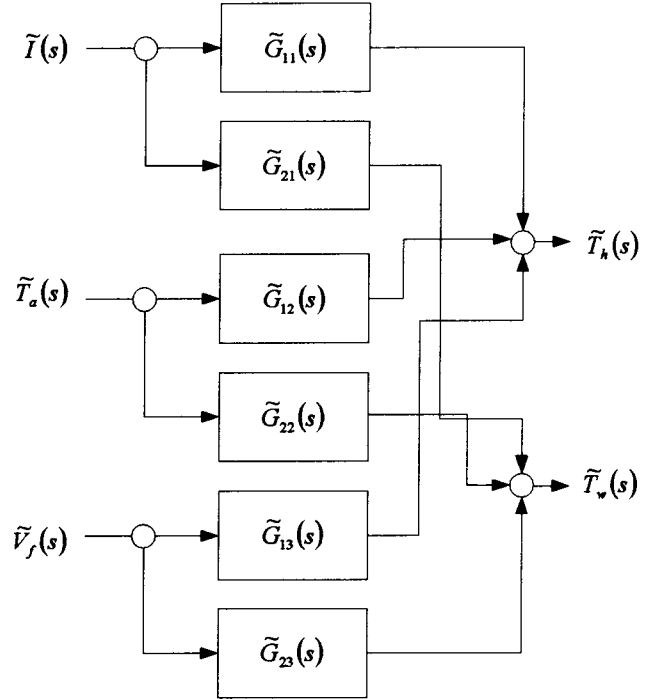


圖 4.1-2 aPV/T 多變量系統方塊圖

式中， $b(s) = b_{11}(s) = b_{12}(s) = b_{13}(s) = b_{21}(s) = b_{22}(s) = b_{23}(s)$  為五階函數， $a_{ij}(s)$  的階數如表 4.1-1 [38]。

表 4.1-1  $a_{ij}(s)$  的階數

$a_{11}(s)$	$a_{12}(s)$	$a_{13}(s)$	$a_{21}(s)$	$a_{22}(s)$	$a_{23}(s)$
3	3	4	2	1	3

#### 4.2 aPV/T 動態模型的化簡

由 aPV/T 系統方塊圖可知，aPV/T 的輸入有  $\tilde{I}$ 、 $\tilde{T}_a$  及  $\tilde{V}_f$ ，輸出有  $\tilde{T}_h$  及  $\tilde{T}_w$ ，如 (4.2-1) 式所示。 $\tilde{T}_w$  是水溫，主要受太陽能輻射  $\tilde{I}$  影響，且是持續上升（受限能量平衡），因此無法利用控制主風扇電壓來使  $\tilde{T}_w$  增加或是降低。本研究旨在利用控制主風扇電壓來使  $\tilde{T}_h$  維持在一固定值以利空氣對水之加熱，故本研究的控制目標為  $\tilde{T}_h$ 。

$$\begin{bmatrix} \tilde{T}_h(s) \\ \tilde{T}_w(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{G}_{11}(s) & \tilde{G}_{12}(s) & \tilde{G}_{13}(s) \\ \tilde{G}_{21}(s) & \tilde{G}_{22}(s) & \tilde{G}_{23}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}(s) \\ \tilde{T}_a(s) \\ \tilde{V}_f(s) \end{bmatrix} \quad (4.2-1)$$

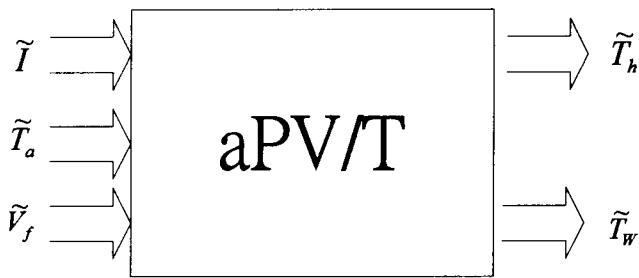


圖 4.2-1 aPV/T 系統方塊圖

由於上述理由，可將 (4.2-1) 式改寫成 (4.2-2) 式：

$$\tilde{T}_h(s) = \tilde{G}_{11}(s)\tilde{T}(s) + \tilde{G}_{12}(s)\tilde{T}_a(s) + G_{13}(s)\tilde{V}_f(s) \quad (4.2-2)$$

由於 \$\tilde{T}\_a\$ 變化較慢，故可將其影響忽略，因此 (4.2-2) 式可化簡為：

$$\tilde{T}_h(s) = \tilde{G}_{11}(s)\tilde{T}(s) + G_{13}(s)\tilde{V}_f(s) \quad (4.2-3)$$

由 (4.2-3) 式可知影響 \$\tilde{T}\_h\$ 的變數為 \$\tilde{T}\$ (輻射加熱量) 及 \$\tilde{V}\_f\$ (主風扇電壓)。

本研究使用隔離法分別對 \$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 及 \$\tilde{G}\_{13}(s)\$ 作動態系統識別，在進行系統識別前，先利用 aPV/T 硬體材料的物理性質及熱力性質求得 \$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 及 \$\tilde{G}\_{13}(s)\$：

$$\tilde{G}_{11}(s) = \frac{\tilde{T}_h}{\tilde{T}}$$

$$= \frac{17.910s^3 + 8882.783s^2 + 9462.456s + 271.686}{s^5 + 1401.569s^4 + 109848.935s^3 + 166232.827s^2 + 50763.216s + 360.165}$$

\$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 的零點為：Z1=-0.030，Z2=-1.038，

Z3=-494.892。極點為：P1=-0.007，P2=-0.411，

P3=-1.119，P4=-1318.341，P5=-81.691。

P4、P5 及 Z3 皆遠離虛軸，且分別與其他極點及零點相差超過 20 倍以上，所以可以將 P4、P5 及 Z3 對 \$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 的影響忽略，圖 4.2-2 為 \$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 化簡後之頻率響應圖。

$$\tilde{G}_{13}(s) = \frac{\tilde{T}_h}{\tilde{V}_f}$$

$$= \frac{318.008s^4 + 16143.480s^3 + 30978.746s^2 + 14692.853s}{s^5 + 1401.569s^4 + 109848.935s^3 + 166232.827s^2 + 50763.216s + 360.165}$$

\$\tilde{G}\_{13}(s)\$ 的零點為：Z1=0，Z2=-0.814，Z3=-1.163，

Z4=-48.775。極點為：P1=-0.007，P2=-0.411，P3=-

1.119，P4=-1318.341，P5=-81.691。P4、P5 及 Z4 皆遠離虛軸，且分別與其他極點及零點相差超過 20 倍以上，所以可以將 P4、P5 及 Z4 對 \$\tilde{G}\_{13}(s)\$ 的影響

忽略，圖 4.2-3 為 \$\tilde{G}\_{13}(s)\$ 化簡後之頻率響應圖。

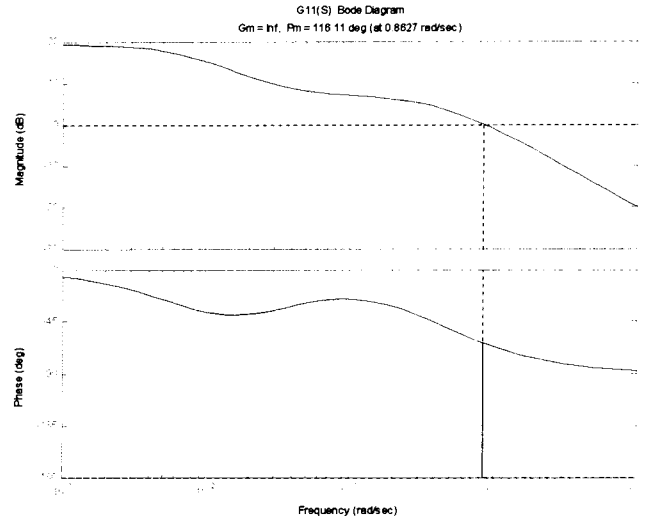


圖 4.2-2 \$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 化簡後之頻率響應圖

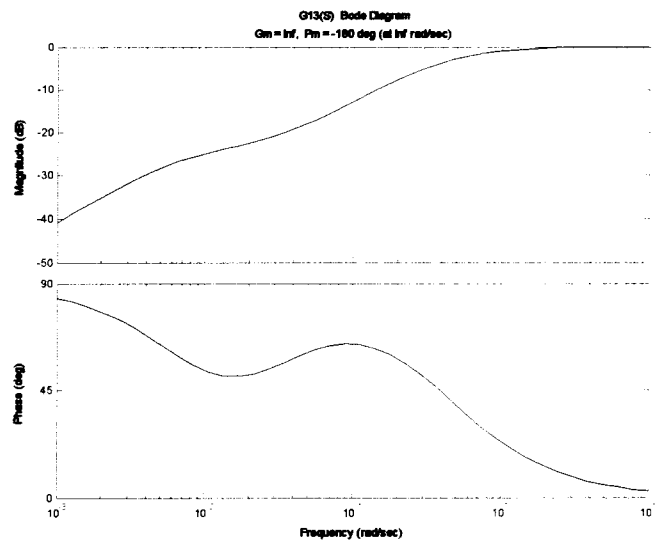


圖 4.2-3 \$\tilde{G}\_{13}(s)\$ 化簡後之頻率響應圖

#### 4.3 aPV/T 動態模型系統識別

根據 \$\tilde{G}\_{11}(s)\$ 及 \$\tilde{G}\_{13}(s)\$ 的化簡結果，作為 aPV/T 動態系統識別的依據，並進行系統識別實驗，其實驗設定條件如下：

1. 分別固定加熱量為 300W、400W、500W，當 aPV/T 系統狀態穩定時，變更主風扇操作電壓由 12V 變為 18V、24V，使得 aPV/T 產生步階響應。
2. 分別固定主風扇操作電壓為 12V、18V、24V，當 aPV/T 系統狀態穩定時，加熱量由 200W 變為 300W、300W 變為 400W、400W 變為 500W，使得 aPV/T 產生步階響應。
3. 固定主風扇操作電壓為 12V、18V、24V，當 aPV/T 系統狀態穩定時，加熱量由 300W 變為 200W、400W 變為 300W、500W 變為 400W，使得 aPV/T 產生步階響應。

$\tilde{G}_{11}(s)$  識別結果如圖 4.3-1 所示，從圖 4.3-1 得知  $\tilde{G}_{11}(s)$  之平均模型與  $\tilde{T}_h$  在增溫或是降溫操作下所識別之  $\tilde{G}_{11}(s)$  模型，其大小值相差不超過 5db 而且相位接近，所以可將  $\tilde{G}_{11}(s)$  簡化成平均模型，如 (4.3-1) 式所示：

$$\tilde{G}_{11}(s) = \frac{s^2 + 0.02348s + 2.413 \times 10^{-6}}{s^3 + 0.006377s^2 + 1.138 \times 10^{-5}s + 7.651 \times 10^{-9}} \quad (4.3-1)$$

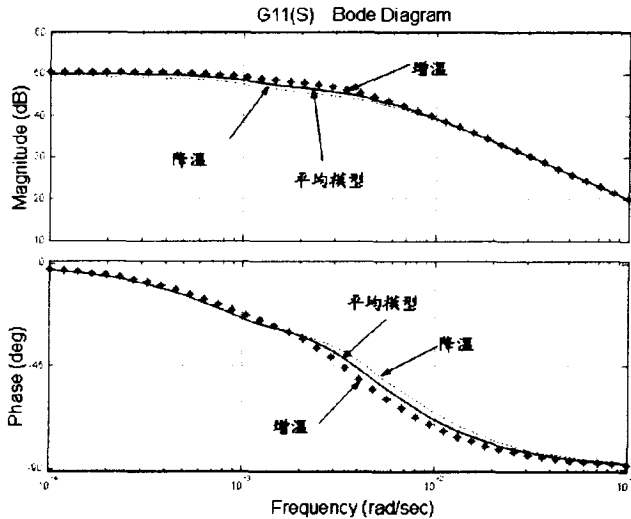


圖 4.3-1  $\tilde{G}_{11}(s)$  模型比較之頻率響應圖

$\tilde{G}_{13}(s)$  識別實驗結果如圖 4.3-2 所示，從圖 4.3-2 得知在電熱板加熱量為 300W、400W、500W 操作條件下所識別之  $\tilde{G}_{13}(s)$  模型與  $\tilde{G}_{13}(s)$  之平均模型，其大小值相差不超過 5db 而且相位接近，所以可將  $\tilde{G}_{13}(s)$  簡化成平均模型，如 (4.3-2) 式所示：

$$\tilde{G}_{13}(s) = \frac{s^2 + 0.01127s + 3.857 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.2252s^2 + 0.001981s + 6.103 \times 10^{-6}} \quad (4.3-2)$$

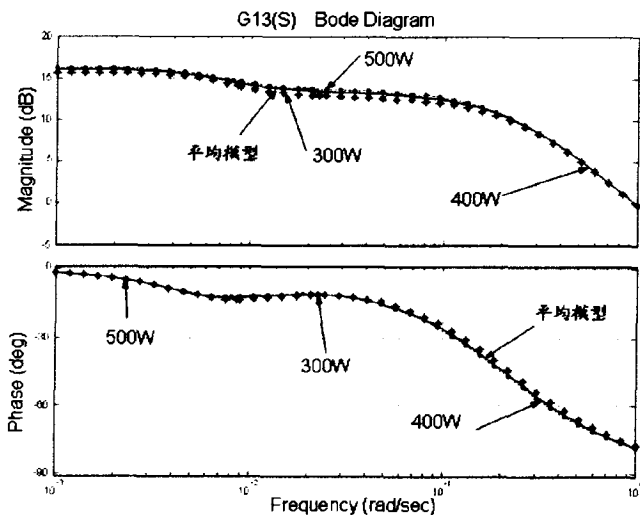


圖 4.3-2  $\tilde{G}_{13}(s)$  模型比較之頻率響應圖

## 五、aPV/T 控制系統設計

利用上述 aPV/T 動態系統模型，本研究進行控制器的設計，控制目標為 aPV/T 上層空氣溫度  $\tilde{T}_h$ ，如 (5-1) 式所示：

$$\tilde{T}_h(s) = \tilde{G}_{11}(s)\tilde{I}(s) + G_{13}(s)\tilde{V}_f(s) \quad (5-1)$$

本研究設定的控制器規格如下：

1. 上升時間 (rise time) < 15 sec
2. 安定時間 (settling time) < 20 sec
3. 穩態誤差 (steady-state error) < 1 °C
4. 最大超越量百分比 (percent overshoot) < 10%

大多數在工業上設計控制器，較常用的是 PI 控制器 (Rank[25]、Kuo[26]、Franklin[27])，其控制演算法 (Karl[28])，如 (5-2) 式所示：

$$V_{PI}(t) = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) = K_p e + K_I \int_0^t e dt \quad (5-2)$$

其中的變數為

$V_{PI}(t)$  = 控制器輸出。

$K_p$  = 比例增益常數。

$K_I = K_p / T_i$  (積分增益常數)。

$e$  = 誤差值 (Set point - Process variable) (SP - PV)。

為求得控制器參數 ( $K_p, K_I$ )，本研究根據圖 5-1，先行推導加入 PI 控制器之後， $\tilde{T}_h / \tilde{T}_{SET}$  及  $\tilde{T}_h / \tilde{I}$  的閉迴路轉移函數，以及分析兩者的對  $\tilde{T}_h$  影響程度。

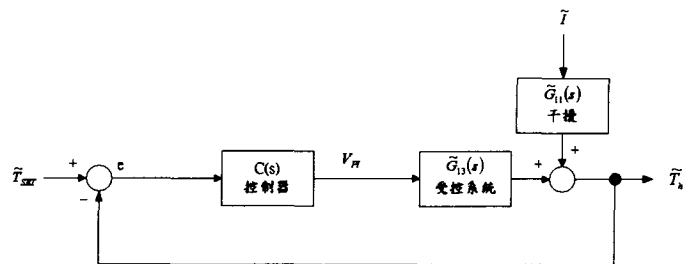


圖 5-1 PI 控制系統方塊圖

由圖 5-1 知，

$$\tilde{T}_h = \frac{\tilde{T}_{SET} C(s)\tilde{G}_{13}(s) + \tilde{I}\tilde{G}_{11}(s)}{1 + C(s)\tilde{G}_{13}(s)} \quad (5-3)$$

分別定義  $\tilde{T}_h / \tilde{T}_{SET}$  及  $\tilde{T}_h / \tilde{I}$  閉迴路轉移函數：

$$F_T(s) = \frac{\tilde{T}_h}{\tilde{T}_{SET}} = \frac{C(s)\tilde{G}_{13}(s)}{1 + C(s)\tilde{G}_{13}(s)} \quad \tilde{I} = 0 \quad (5-4)$$

$$F_I(s) = \frac{\tilde{T}_h}{\tilde{I}} = \frac{\tilde{G}_{11}(s)}{1 + C(s)\tilde{G}_{13}(s)} \quad \tilde{T}_{SET} = 0 \quad (5-5)$$

PI 控制器的轉移函數：

$$C(s) = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (5-6)$$

圖 5-2 是閉迴路系統頻率響應 ( $K_p = 1$ ,  $K_I = 0$ )，可以發現，當工作頻率低於  $0.08 \text{ rad/s}$  時， $\tilde{T}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響大於  $\tilde{T}_{SET}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響，對  $\tilde{T}$  之排斥能力降低，所以必須加入 PI 控制器將  $\tilde{T}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響降低，讓  $\tilde{T}_h$  只對  $\tilde{T}_{SET}$  的變化有反應，以達到排斥干擾 ( $\tilde{T}$ ) 的目的。

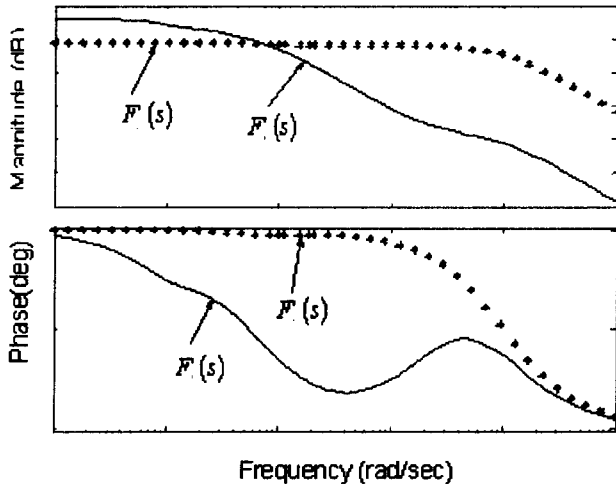


圖 5-2  $F_T(s)$  及  $F_I(s)$  頻率響應圖 ( $K_p = 1, K_I = 0$ )

本研究先將  $K_p$  設為 1,  $K_I$  設定為  $10 \sim 30$ ，畫出  $F_T(s)$  及  $F_I(s)$  頻率響應圖進行分析，如圖 5-3 所示。由圖 5-3 中，可以發現到加入 I control 之後，在低頻時可使  $\tilde{T}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響明顯減少，但是當  $K_I$  值超過 20 以後對於降低  $\tilde{T}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響之能力已到達一極限值，即使再增加  $K_I$  值對於排除干擾的效果增加不大，因此設定  $K_I$  值在 10 到 30 之間。另外，在頻率從  $1 \sim 10 \text{ rad/s}$  之間， $\tilde{T}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響還是過大，因此下一步就是要消除這部分的影響，也就是增加  $K_p$  值。

$F_T(s)$  and  $F_I(s)$  (PI Control) Bode Diagram  $K_p=1$   $K_I=10 \sim 30$

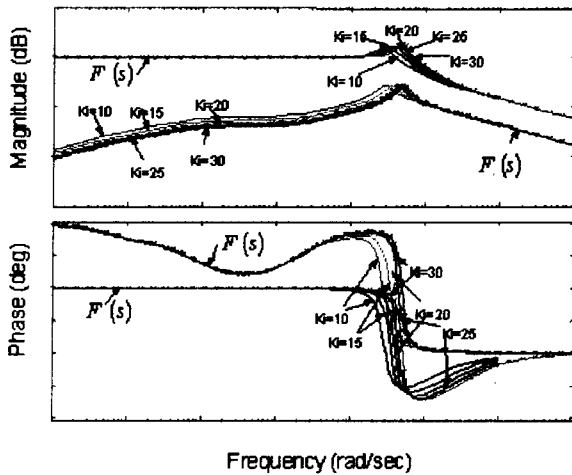


圖 5-3  $F_T(s)$  及  $F_I(s)$  頻率響應圖

因此本研究先將  $K_p$  設定為  $0.2 \sim 30$ ，由圖 5-4 中，可以發現到，在頻率從  $1 \sim 10 \text{ rad/s}$  之間， $K_p$  值增加後， $\tilde{T}$  對  $\tilde{T}_h$  的影響明顯降低，而且  $F_T(s)$  的頻寬明顯增加，由  $4 \text{ rad/s}$  增加到  $14 \text{ rad/s}$ 。但是  $K_p$  值也有其極限值，當  $K_p$  值大於 30 時對於排除干擾的效果增加不大，因此將  $K_p$  值設定在  $20 \sim 40$  之間。

$F_T(s)$  and  $F_I(s)$  (PI Control) Bode Diagram  $K_p=1 \sim 40$   $K_I=30$

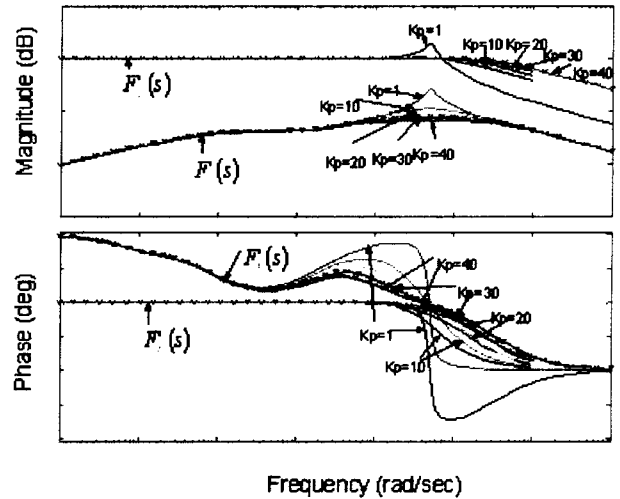


圖 5-4  $F_T(s)$  及  $F_I(s)$  頻率響應圖 ( $K_p = 1 \sim 40$ ,  $K_I = 30$ )

經過上述轉移函數推導的  $K_p$  及  $K_I$  參數分析，本研究將  $K_p$  值設定為  $20 \sim 40$ ,  $K_I$  值設定為  $10 \sim 30$ 。但是在設計  $K_p$  及  $K_I$  參數時必須要考慮到，實際上主風扇的致動器有飽和 (Saturation) 性質，主風扇的致動器輸出電壓不可能無限大的增加，最多只能維持在上限值。因此本研究利用 MATLAB 的 SIMULINK 功能將飽和現象加入設計的考量，並進行模擬，如圖 5-5 所示。

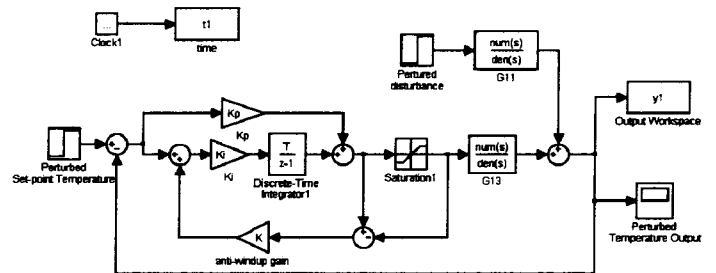


圖 5-5 加入反積分終結迴路的 PI 控制系統模擬方塊圖

根據前述的  $K_p$  及  $K_I$  參數設定分析， $K_p$  值設定為  $20 \sim 40$ ,  $K_I$  值設定為  $10 \sim 30$ ，本研究依據 Integral of the Square of the Error (ISE) [29] 為調整基準：



$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (5-7)$$

將  $K_p$  及  $K_i$  設定如表 5-1 所示，並利用 SIMULINK 進行模擬。

表 5-1  $K_p$  及  $K_i$  設定

$K_p$	$K_i$	模擬之 ISE 值
20	10	5.990
30	20	8.133
40	30	4.783
50	40	16.291

依據 ISE 來判斷，結果發現  $K_p=40$ ， $K_i=30$  這組設定的 ISE 最小 (ISE=4.783)，因此本研究選定  $K_p=40$ ， $K_i=30$  作為 PI 控制器的設定參數，圖 5-6 為  $K_p=40$ ， $K_i=30$  所產生的步階響應圖，由圖中可以發現其步階響應特性符合本研究的控制器規格。

## 六、aPV/T 系統整合測試

為進行 aPV/T 系統整合測試，本研究設計了一套全天輻射量模擬及固定加熱系統，由測試實驗所得到的數據利用 (6-1) 式計算後可得到 aPV/T 系統的集熱效率  $\eta_{th}$ ：

$$\eta_{th} = \frac{(T_f - T_i) \cdot C_p \cdot M}{A_c \cdot Q_i} \quad (6-1)$$

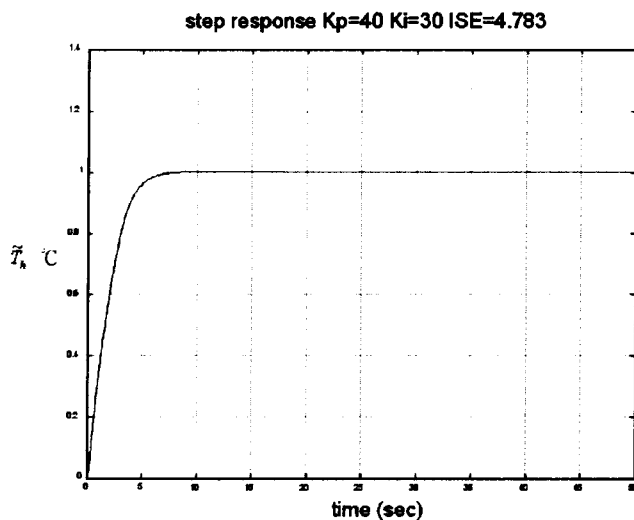


圖 5-6  $\tilde{T}_h$  步階響應模擬圖 ( $K_p=40$ ， $K_i=30$ )

$T_f$  為儲水管終止水溫 (°C)； $T_i$  為儲水管初始水溫 (°C)； $C_p$  為水比熱 ( $kJ/kg \text{ } ^\circ C$ )； $M$  為儲水管水質量 ( $kg$ )； $A_c$  為加熱板面積 ( $m^2$ )； $Q_i$  為太陽能輻射入射量 ( $MJ/m^2$ )。

## 6.1 主風扇啟動溫度設定測試分析

主風扇啟動溫度測試實驗安排如下：

1. 固定加熱量，加熱時數為 4 小時，主風扇電壓設定為 24V，採 ON/OFF 控制主風扇，啟動內擾動風扇，加上保溫面蓋 (厚度為 1 cm)。
2. 模擬全天太陽能輻射量，加熱量不固定，加熱時數為 8 小時，主風扇電壓設定為 24V，採 ON/OFF 控制主風扇，啟動內擾動風扇，加上面蓋 (厚度為 1 cm)。

主風扇啟動溫度測試實驗結果如表 6.1-1 所示，aPV/T 在主風扇啟動溫度設定在 50°C 時，可以得到最好的效率 (在固定加熱量下為 0.36，在模擬全天太陽能輻射量下為 0.25)，當主風扇啟動溫度超過 50°C 時，啟動溫度越高，aPV/T 的集熱效率越低。

## 6.2 aPV/T 的性能測試

根據主風扇啟動溫度的測試結果可以得知，主風扇啟動溫度設定在 50°C 可以獲得最佳的集熱效率，下一步則採 PI 控制器來控制主風扇，進行 aPV/T 集熱性能測試。

表 6.1-1 主風扇在不同啟動溫度下之集熱效率

固定加熱量					
啟動溫度	效率	啟動溫度	效率	啟動溫度	效率
50°C	0.358	60°C	0.326	70°C	0.3
50	0.352	60	0.339	70	0.295
50	0.343	60	0.273	70	0.297
50	0.335	60	0.343	70	0.328
模擬全天太陽能輻射量					
啟動溫度	效率	啟動溫度	效率	啟動溫度	效率
50	0.244	60	0.251	70	0.192
50	0.249	60	0.23	70	0.182
50	0.252	60	0.243	70	0.18

aPV/T 集熱性能測試實驗安排如下：

- Case 1 模擬全天太陽能輻射量，加熱量不固定，加熱時數為 8 小時，採 PI 控制主風扇，不啟動內擾動風扇，不加面蓋 (1 cm)，主風扇啟動溫度 50°C。
- Case 2 模擬全天太陽能輻射量，加熱量不固定，加熱時數為 8 小時，採 PI 控制主風扇，啟動內擾動風扇，不加面蓋 (1 cm)，主風扇啟動溫度 50°C。
- Case 3 模擬全天太陽能輻射量，加熱量不固定，加熱時數為 8 小時，採 PI 控制主風扇，啟動內擾動風扇，加面蓋 (1 cm)，主風扇啟動溫度 50°C。

表 6.2-1 模擬全天太陽能輻射量，不啟動內擾動風扇，不加面蓋

主風扇啟動溫度：50°C			
控制模式：PI 不啟動內擾動風扇，不加面蓋			
大氣溫度 Ta (°C)	25.7	25.6	26
起始水溫 Ti (°C)	20.8	20.2	21.3
終止水溫 Tf (°C)	32.9	39	43.1
加熱時數 (hours)	8	8	8
累積加熱量 Qt (MJ/m <sup>2</sup> )	10.423	16	16.926
(Ti-Ta)/Qt (°C*m <sup>2</sup> /MJ)	-0.47	-0.338	-0.278
最大加熱量	400W	500W	500W
效率 $\eta_{th}$	0.101	0.102	0.112

在表 6.2-1 中所列出的是採用 Case 1 的測試實驗設定，所得到的各項測試數據，從這些數據中，可以得知 aPV/T 的集熱效率在 0.10~0.11 之間。

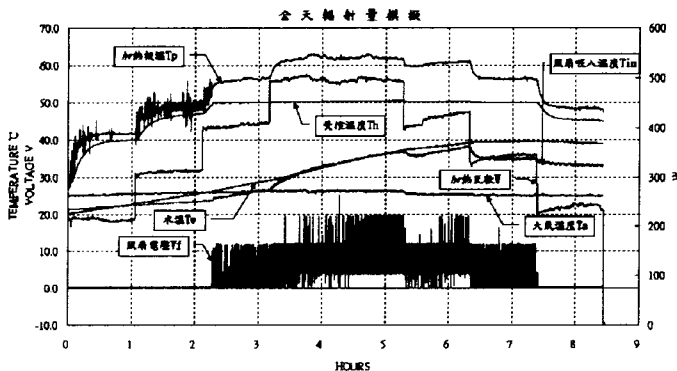


圖 6.2-1 模擬全天太陽能輻射量，2002/3/20 (不啟動內擾動風扇，不加面蓋，最大加熱量為 500W，效率為 0.102)

從圖 6.2-1 中可以發現到以下幾點現象：

- (1) 受控溫度皆控制在 50°C 上下，變化範圍為 ±0.1°C，符合控制器的設計規格及控制目標，而主風扇的電壓也隨之變化，參考圖 6.2-2。

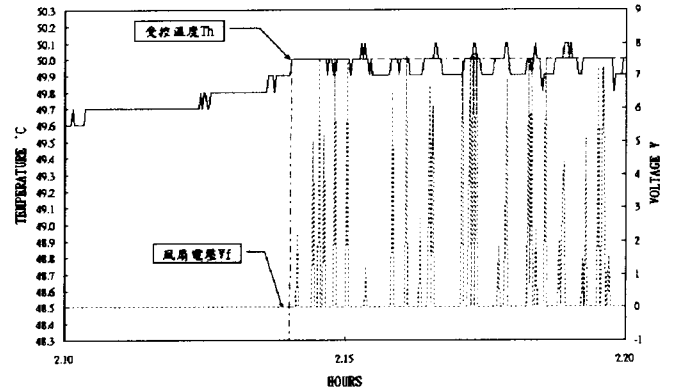


圖 6.2-2 受控溫度局部放大圖 (PI 控制)

- (2) 雖然加熱量有急遽變化，但是還是可將受控溫度控制在 50°C，證明其控制系統具有排斥干擾的能力。
- (3) 大氣溫度變化範圍在 ±1°C 內，符合在第四章 aPV/T 動態系統識別的假設 ( $\tilde{T}_a = 0$ )。
- (4) PV 板溫隨著加熱瓦數變化而改變。
- (5) 當主風扇電壓開始有變化時 (PI 控制器作動)，水溫之溫度曲線斜率明顯增加。
- (6) 因為本研究在計算水溫時是取五個水溫量測點之平均值，然而，從圖 6.2-3 得知儲水管之水溫並不均勻，所以會有風扇吸入口溫度低於平均水溫的現象發生。

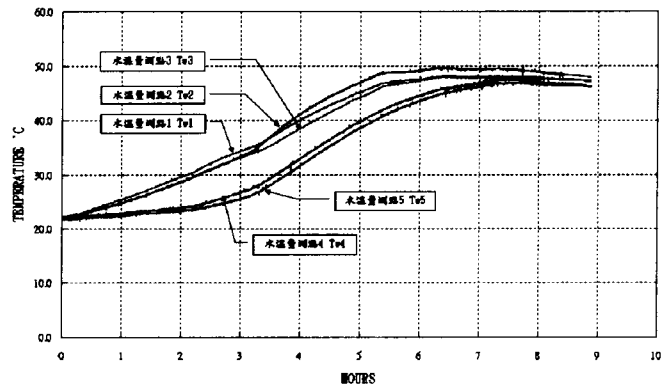


圖 6.2-3 五個溫度量測點之儲水管水溫

在表 6.2-2 中所列出的是採用 Case 2 的測試實驗設定，所得到的各項測試數據，從這些數據中，可以得知 aPV/T 的集熱效率在 0.12~0.13 之間，與表 6.2-1 比較之後，可以發現到，若啟動內擾動風扇可以讓 aPV/T 的集熱效率增加 2~3%。

表 6.2-2 模擬全天太陽能輻射量，啟動內擾動風扇，不加面蓋

主風扇啟動溫度：50°C			
控制模式：PI 啟動內擾動風扇，不加面蓋			
大氣溫度 Ta (°C)	25.9	24	25
起始水溫 Ti	20.8	20.6	21.6

(°C)			
終止水溫 Tf (°C)	35.7	41.4	46.3
加熱時數 (hours)	8	8	8
累積加熱量 Qt (MJ/m <sup>2</sup> )	10.852	13.987	18.158
(Ti-Ta)/Qt (°C*m <sup>2</sup> /MJ)	-0.470	-0.243	-0.187
最大加熱量	400W	500W	600W
效率 $\eta_{th}$	0.119	0.129	0.118

在表 6.2-3 中所列出的是採用 Case 3 的測試實驗設定，所得到的各項測試數據，從這些數據中，可以得知 aPV/T 的集熱效率在 0.22~0.28 之間，而且受控溫度維持在 50°C 的時間越久，其集熱效率越高，與表 6.2-2 比較之後，可以發現到，若加上面蓋可以讓 aPV/T 的集熱效率增加 10%，其 aPV/T 的集熱效率參考圖 6.2-4。

表 6.2-3 模擬全天太陽能輻射量，啟動內擾動風扇，加面蓋

主風扇啟動溫度：50°C 控制模式：PI 啟動內擾動風扇，加面蓋					
大氣溫度 Ta (°C)	25.4	24.9	26.5	24.4	25.5
起始水溫 Ti (°C)	20.9	20.7	21.3	20.5	21.4
終止水溫 Tf (°C)	40.2	50.1	50.9	48.7	56.7
加熱時數 (hours)	8	8	8	8	8
Qt (MJ/m <sup>2</sup> )	5.899	9.44	9.875	9.93	13.835
(Ti-Ta)/Qt (°C*m <sup>2</sup> /MJ)	-0.729	-0.434	-0.506	-0.342	-0.296
最大加熱量	200W	300W	350W	400W	500W
效率 $\eta_{th}$	0.284	0.271	0.261	0.247	0.222

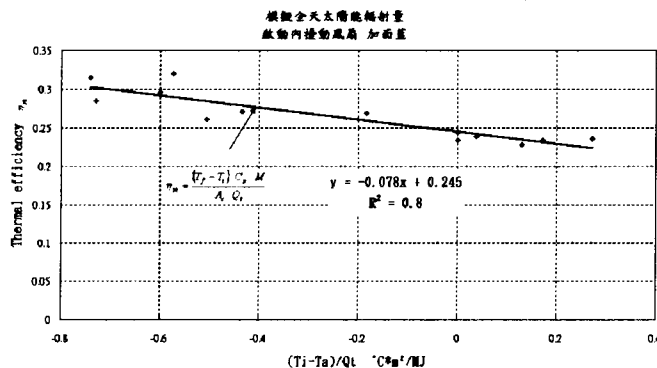


圖 6.2-4 aPV/T 之集熱效率(Case 3)

## 七、討論與結論

本研究所研製的空氣傳熱型太陽能熱電收集器 (aPV/T) 重點為太陽能電池的底部溫度 (aPV/T 上層空氣溫度) 的控制，其原因如下：

- (1) 一般市面上的太陽電池發電效率受到電池板溫的影響較大，板溫越高發電的效率越低，為了兼顧發電效率及集熱效率，因此必須固定太陽能電池的操作溫度。
- (2) 「水冷式熱電共生太陽能發電系統」的設計是利用水作為回收熱能的工質，但是在施工上及品質上有其困難，因此利用空氣作為回收廢熱的工質，是較為可行的解決方法。

研究結果發現 aPV/T 最佳主風扇的啟動溫度設定值為 50°C，其原因如下：

- (1) 假如設定的目標溫度值越高 (60°C 或是 70°C)，其等待時間就會加長，相對的儲水管加熱的時間就會縮短，而造成集熱效率降低。
- (2) 若溫度設定為 40°C，雖然等待昇溫時間變短，但是水溫最高只能加熱到 40°C，不符合實際需求，而且很容易會超過 PI 控制器的控制極限值，造成主風扇電壓即使操作至飽和值也無法追蹤到控制目標溫度的情形發生。

從 aPV/T 系統整合測試中發現，PI 控制器有其控制的極限值，就是當板溫大於控制目標溫度 (50°C) 20°C 以上時，就算主風扇電壓操作至飽和值也無法追蹤到控制目標溫度，其原因如下：

- (1) 由於主風扇的額定電壓為 DC24V，無法加大，除非更換規格。但主風扇的消耗功率會增加，也耗去更多太陽能電池所發出的電量，因此兩者之取捨，必須加以考量。
- (2) 由於儲水管的水溫會不斷的升高，造成主風扇吸入口的溫度也不斷上升，時間一久，aPV/T 上層空氣溫度不斷增加。
- (3) 由於主風扇的功能是將 aPV/T 上層的熱空氣帶往 aPV/T 的下層，所以主風扇只能降低 aPV/T 上層空氣溫度而不能提高，這是硬體設計上的限制。

圖 7-1 為 aPV/T 系統集熱 (水量/面積比=21 L/m<sup>2</sup>) 與 IPVTS 集熱效率 (水量/面積比=82 L/m<sup>2</sup>) [20] 比較。由此圖可看出 IPVTS 的集熱效率高於 aPV/T，但是由於 IPVTS 是採用循環泵作強制水循環，大量的消耗太陽能電池發電量，又加上有品質上的潛在危險 (如漏水等)，因此兩個系統的各有其優缺點。而若 aPV/T 系統能再提升主風扇及內擾動風扇的風量及轉速，將可增加系統之集熱效率。

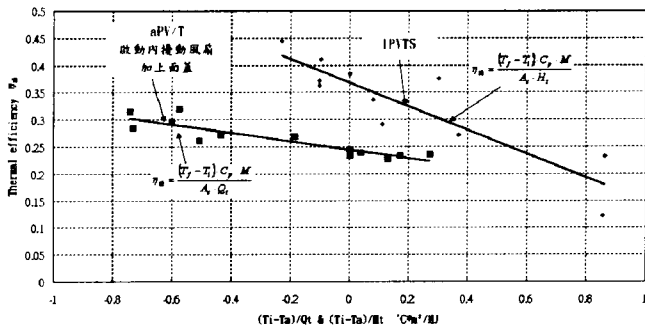


圖 7-1 aPV/T 系統集熱 (質量面積比=21 L/m<sup>2</sup>) 與 IPVTS 集熱效率 (質量面積比=82 L/m<sup>2</sup>) [20]

本研究由「熱電共生太陽能發電系統研製」的實驗結果，獲得如下的結論：

- (1) 本研究所設計的 PI 控制器 ( $K_p=40$ ,  $K_I=30$ )，經由實驗證明若控制目標溫度為 50°C，確實可將 aPV/T 上層空氣溫度控制在 50°C，溫度變化範圍在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  而且可獲得最高的集熱效率  $\eta_{th}$  (0.28)，因此本研究所設計的溫度控制器及系統的集熱性能良好，證明 aPV/T 是可行的。
- (2) 透過主風扇之啟動溫度的測試實驗(主風扇啟動溫度分別設定為 50°C、60°C 及 70°C)，本研究找出最佳的主風扇啟動溫度為 50°C。
- (3) 本研究建立 aPV/T 的動態系統模型(aPV/T 的熱傳模型、aPV/T 的狀態空間模型及 aPV/T 微擾模型)，並將一套測試系統完整建立，對於今後有關太陽電池熱能回收相關研究，具有參考價值。
- (4) 透過 aPV/T 系統整合實驗結果，發現若啟動內循環風扇可增加集熱效率 2~3%，加入面蓋可增加 10% 的集熱效率。
- (5) 本研究已著手依其研究成果，逐部完成 aPV/T 的室外測試機，將其研究成果，實際地進行戶外測試。

#### 參考資料

- [1] 黃信雄:「太陽熱能技術研究」。能源基金 85 年度研究計畫報告, 1995。
- [2] 黃信雄:「太陽能熱水系統推廣獎勵辦法執行成果評估」。能源基金研究報告
- [3] Ulrike Jahn: "Monitored results from the German PV roof programme". *SunWorld* Vol.18, No.2, pp.10-12(1994).
- [4] Jeffrey Serfass: "Expanding the PV market: US and European strategies". *SunWorld* Vol.18, No.2, pp.7-8(1994).
- [5] Barry Butler: "A Contract with America". *J Solar Industry*, Vol5, Issue 4, p2(1994).
- [6] Morgan D. Bazilian, "Photovoltaic cogeneration

in the built environment", *Solar Energy* Vol. 71, No. 1, pp. 57-69, 2001.

- [7] 何榮文, "太陽能電池發電系統控制", 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2001.
- [8] 黃秉鈞:「熱電共生型太陽能發電系統研製(一)」。87 年度國科會電力科技產業學術合作研究計畫報告 NSC87-TPC-E-002-016。
- [9] 黃秉鈞:「熱電共生型太陽能發電系統研製(二)」。88 年度國科會電力科技產業學術合作研究計畫報告 NSC88-TPC-E-002-010。
- [10] Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C. and Sun, F.S. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, in print (2001).
- [11] Garg H. P. and Adhikari R. S. (1998) Transient simulation of conventional hybrid photovoltaic/thermal air heating collectors. *International Journal of Energy Research* 22, 547-562.
- [12] Y. Tripanagnostopoulos, TH. Nousia, M. Souliotis and P. Yianoulis, Hybrid Photovoltaic/ Thermal Solar Systems, *Solar Energy*, Vol.72, No.3, 217-234(2002).
- [13] Lalovic, B. "A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector." *Solar Cells*, 19, 131-138(1986-1987).
- [14] Imre L., Bitai A., Bohonyey F., Hecker G. and Palfy M.: "PV-thermal combined building elements." *Proc. ISES Solar World Congress, Budapest, 1993*, 3, 277-280(1993).
- [15] Hayakashi B., Mizusaki K., Satoh T. and Hatanaka T. : "Research and developent of photovoltaic/thermal hybrid solar power generation system". *Proc. 1989 Congr. ISES*, Vol.1, 302-306(1990).
- [16] Garg H.P., Bharagaba A.K. and Agarwal R.K. : "Experimental and theoretical studies on a photovoltaic/thermal hybrid solar collector water heater." *Proc. 1989 Congr. ISES*, Vol.1, 701-705(1990).
- [17] Bergene T. and Bjerke B. : "Thermodynamic cosiderations concerning the efficiency and possible utilization of combined quatum/thermal sloar energy converters. *Proc. ISES Solar World Congress, Budapest, 1993*, 4, 25-30(1993).
- [18] Bergene T., and Lovvik O.: "Model calculations on a flat-plate solar heat collector with intergrated solar cells". *Solar Energy*, Vol.55, No.6, 453-462(1995).
- [19] Wenham S., Green M. and Watt M. (1998) *Applied Photovoltaics*, University of NSW Publications, Sydney.
- [20] 洪維志, "整體式太陽能發電集熱系統設計", 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論

- 文,2000.
- [21] Huang, B.J. and Wang, S.B. Identification of solar collector dynamics using physical model-based approach. *ASME J Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.116, pp.755-763(1994).
- [22] Frank P. Incropera, David P. Dewitt. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Son, Inc., pp.345-461(1996)
- [23] 黃秉鈞, System Identification(課程講義),2001.
- [24] Rank H., "Step Response and Frequency Response Methods", *Automatica*, Vol. 16, pp.159-526, 1980.
- [25] Kuo B.C., "Automatic Control System",5<sup>th</sup> Edition. Prentice-Hall International Inc. ,1987.
- [26] Franklin ,G. F. ,J. D. Powell and A. E. Naeini, "Feedback-Control of Dynamic System", 3<sup>th</sup> Edition, Addison Wesley, Reading, MA, 1994.
- [27] Christopher T. Kilian, "Modern Control Technology components and systems",West Publishing Company, pp.361-450, 1996.
- [28] Karl J. and Tore, "PID Controllers", 2<sup>th</sup> Edition, Instrument Society of America, 1995.
- [29] 黃秉鈞, 自動控制(課程講義), pp4-1~4-67, 2000
- [30] 李宜達, "控制系統設計與模擬:使用 MATLAB/SIMULINK", 修訂二版, 全華科技圖書股份有限公司, pp10-2~10-10, 民87.
- [31] AT89C52 8-Bit Microcontroller with 4K Bytes Data Sheet, ATMEL Co.
- [32] 陸一平, 機電整合理論與實驗講義, 2000.
- [33] ADC0804 8-Bit  $\mu$  p Compatible A/D Converter Data Sheet, National Semiconductor.
- [34] LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Data Sheet, National Semiconductor.
- [35] DAC0800 8-Bit  $\mu$  p Compatible D/A converter Data Sheet, National Semiconductor.
- [36] 吳金戌等, "8051 C語言應用與實習", 松崗電腦圖書資料股份有限公司, 1995.
- [37] Vartiainen E., Peippo K. and Lund P. (1999) Daylight optimization of multifunctional solar facades. *Solar Energy* 6(3), 233-235.
- [38] 黃煥翔:「熱電共生太陽能發電系統研製」, 國立台灣大學機械研究所碩士論文, 2002.

- $T_w$  : 水溫 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_p$  : 太陽電池溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_s$  : 下鋁板溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_c$  : aPV/T 下層空氣溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $I$  : 太陽輻射量 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )
- $A$  : 電池面積,  $\text{m}^2$
- $\alpha$  : 太陽能電池的輻射量吸收率
- $Q_h$  : 從aPV/T上層空氣傳遞至下鋁板的熱傳 ( $J$ )
- $Q_s$  : 從下鋁板傳遞至 aPV/T 下層空氣的熱傳 ( $J$ )
- $Q_c$  : 從aPV/T下層空氣傳遞至儲水的熱傳 ( $J$ )
- $Q_e$  : 透過主風扇從 aPV/T 上層空氣傳遞至 aPV/T 下層空氣的熱傳 ( $J$ )
- $Q_f$  : 透過主風扇從 aPV/T 下層空氣傳遞至 aPV/T 上層空氣的熱傳 ( $J$ )
- $Q_L$  : 從面蓋傳遞至大氣的熱傳 ( $J$ )

#### 符號說明

- $T_a$  : 大氣溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_h$  : aPV/T 上層空氣溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $Q_p$  : 從太陽能電池傳遞至 aPV/T 上層空氣的熱傳 ( $J$ )