

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 物理科

第二名

080107

「空穴」也「來風」

— 「太陽能塔」氣流動力因素之剖析

學校名稱：臺南市永康區崑山國民小學

作者： 小六 張瑋哲 小五 李蕎恩 小五 康百榮 小五 孫可杰	指導老師： 沈聰男 陳伶伶
---	-------------------------

關鍵詞：太陽能塔、溫室、煙囪效應

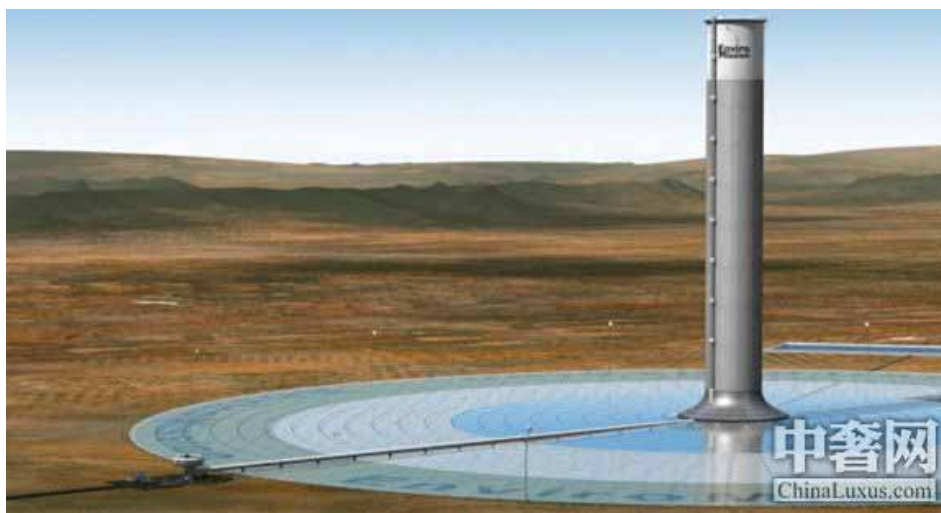
「空穴」也「來風」—「太陽能塔」氣流動力因素之剖析

摘要

太陽能發電塔（Solar Tower）是未來最新一代的潔淨能源。但從報章雜誌和科技網站上所揭露的有限資訊，我們仍難以一窺其全貌。本研究希望能透過模型的設計、製作及情境的模擬，由內而外的進一步探索太陽能塔（Solar Tower）的熱氣流特性及其相關變因，並嘗試運用其他物理方法來改良太陽能塔的運轉性能。實驗研究發現：塔徑、塔高、集熱板面積、集熱棚底角、入口間隙等內在變因以及光源強弱、管端溫差、管端氣壓差等外在變因均會影響太陽能塔的氣流強弱。利用加設導流錐、篩選溫室採光、改善集熱板鋪面材質等物理方法均能有效提升太陽能塔的運轉性能。此外，在實驗過程中我們也意外發現：太陽能塔在尺寸上若採集熱板半徑/塔徑（ R/Φ ）比值為 6.54~6.60 的設計，也能獲致相當理想的熱效能。

壹、研究動機

這學期的自然課，我們剛接觸到有關「熱傳播」的一些基本概念。恰巧在去年 100.10.4 聯合報國際版版面上，登載了一篇關於「熱氣流發電塔」（國外網站大多稱之為「太陽能塔」-- Solar Tower）的簡介，文中提到：澳洲一家從事開發能源的企業—EnviroMission公司正計畫在美國亞利桑納州的沙漠中興建一座 792.5 公尺的高塔，此塔利用太陽能將溫室棚內的空氣加熱，並藉由空氣浮力驅動塔裡的渦輪機組發電（如下圖一）。這一篇簡介令我們感到非常好奇——天燈、熱氣球都需要燃燒燃料，產生高溫後才能形成足夠的空氣浮力來帶動球體上飄；而這樣一個看似簡單的裝置，卻只要利用最原始的能源—陽光來加熱溫室，在室溫條件下就能推動塔裡的渦輪扇葉？這會不會太神奇了點？我們決定親自動手試試…



圖一、太陽能塔的外貌構想圖，照片來源：

<http://ep.chinaluxus.com/Ste/20110728/35256.html>

貳、研究目的

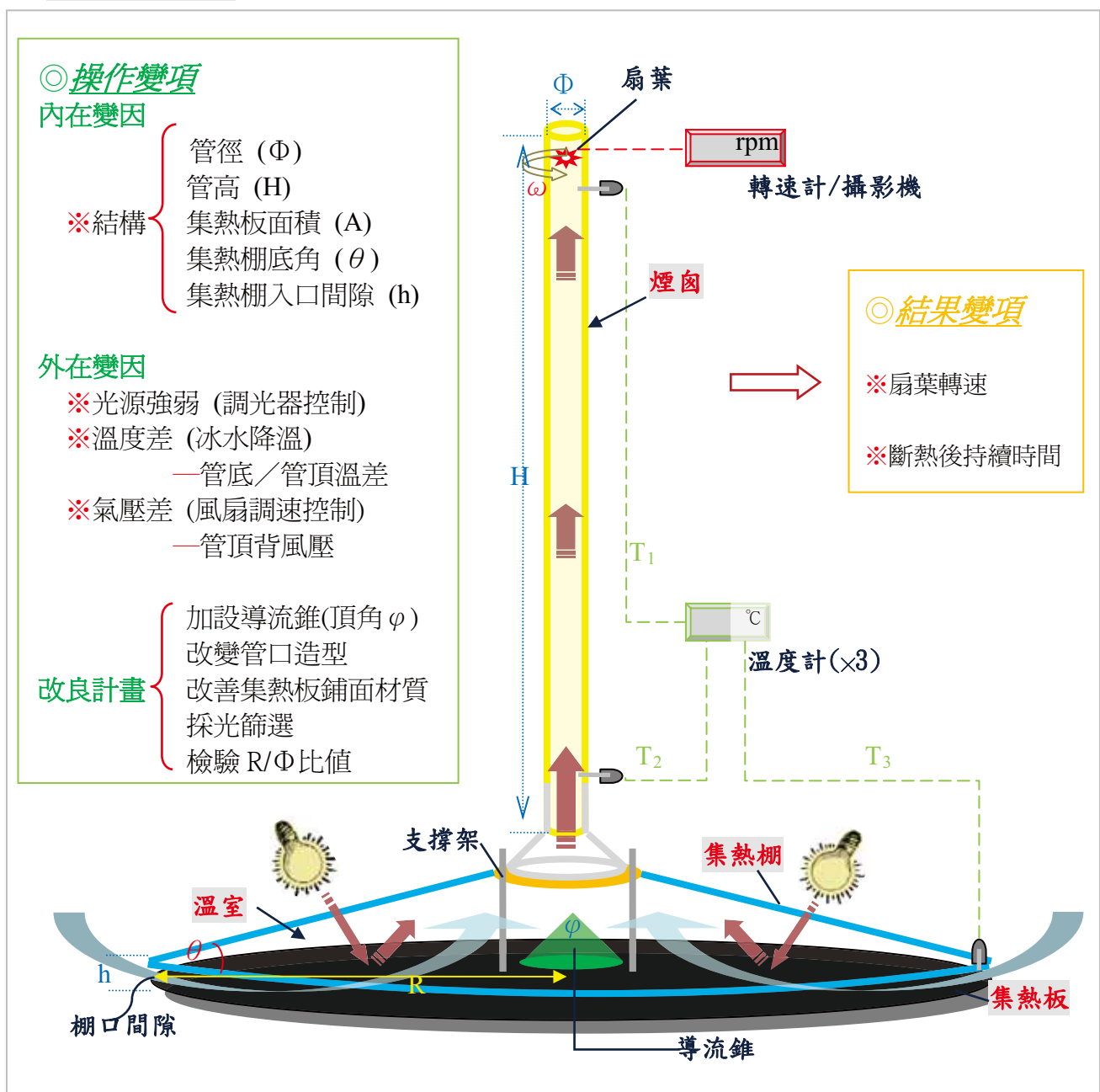
- 一、動手實作太陽能塔的模型，並驗證利用陽光來加熱太陽能塔是否真能推動塔中的渦輪扇葉？是否太陽能塔真能在黑暗環境中持續運轉？
- 二、探究影響扇葉轉速的內在變因有哪些？
- 三、探究影響扇葉轉速的外在變因有哪些？
- 四、嘗試以其它物理方法來提升太陽能塔的熱效能。

參、研究設備及器材

- 一、模型材料：寶特瓶、透明硬質 PVC 管、竹筷、大頭針、保麗龍板、黑色中空板、細木條、塑膠布、粗棉線、厚紙板、鋁製漏斗、自製造型管口
- 二、實驗材料：黑絨布、粗砂紙、鋁箔紙、竹炭渣、咖啡渣、貓砂、洗衣粉
- 三、儀器設備：電子式溫度計、溼度計、攝錄影機、光照度計、風速計、150W 鹵素燈三具、計時器、調光器、D.C12V 電源供應器、直流鼓風機、三腳架

肆、研究流程、方法及結果

一、研究架構



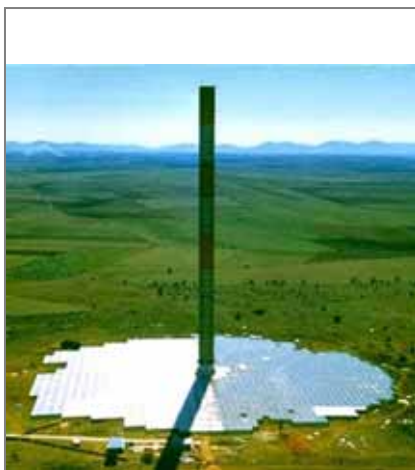
圖二、模型外觀與研究架構

二、文獻資料蒐整及探討

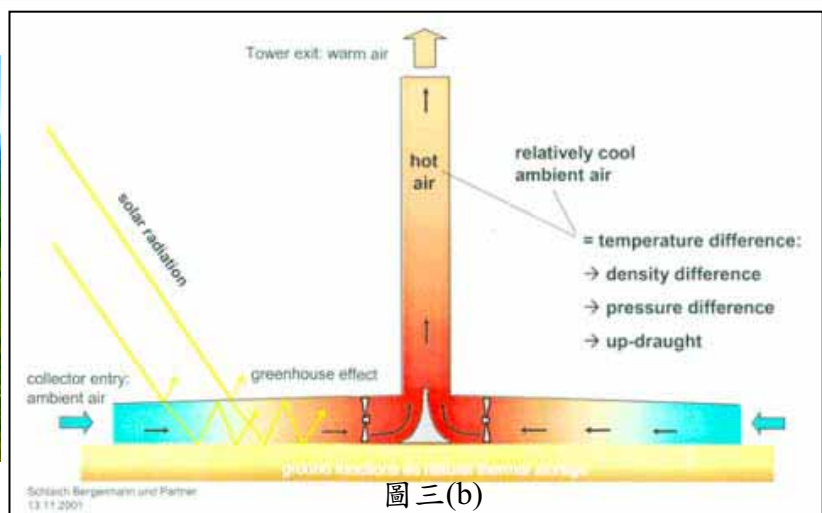
可能是涉及專利或商業機密的關係，有關太陽能塔在網路上所揭露的資料非常有限且內容多所重複，大多只是說明其運作原理，很少提及其構築材料或尺寸比例等細節。我們只能按圖索驥，或憑想像建構出它的雛型。根據報載資料以及網路搜尋所得，概略得知其外觀結構上包含中樞塔及溫室兩大部分（如圖三 b）：

1. 中樞塔：豎立於溫室中心的直管，是熱氣流上升的通道。於管中或管底設置渦輪扇葉，即可藉由人造風力的帶動，產生渦輪的高速旋轉，甚而進一步達到發電的目的。
2. 集熱棚：具有高透光率，陽光直射進來後將棚罩內的空氣直接加熱，並使熱氣不致散逸。集熱棚與基座之間留有間隙，以導入太陽能塔周圍的冷空氣，並循環加熱。
3. 基座（集熱板）：負責吸收光熱，將熱能輻射至棚罩內，並確保太陽西下時，仍能持續釋放其儲存的輻射熱，達到夜間也能自主運轉的目標。

集熱棚和基座（或集熱板）兩大元件構成溫室，是整個系統收集熱能並將氣流引導至煙囪底部的核心。1982 年的西班牙版測試原型（如圖三a，已毀於颶風）是採用天然地表為基座；但未來在美國亞利桑納州興建的版本從外觀上判斷已與原型有所不同，至於是採用何種材料？網路搜尋並無所獲。



圖三(a)



圖三(b)

圖三(a)(b)、太陽能塔測試原形及其運作原理，照片來源：

http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/news.xinhuanet.com/tech/2008-07/04/content_8487214.htm

我們針對太陽能塔的特性，歸納出以下幾點：

1. 國外網站也有稱太陽能塔為「太陽能煙囪」的，但此名稱容易引起誤解，原因是此塔運作時只輸出暖氣流，過程中並不燃燒任何物質，更不會產生毒害的煙霧。是一種標準的「綠色能源」。
2. 太陽能塔可說是結合了溫室效應與煙囪效應兩種應用的科技產物。利用陽光的輻射熱產生溫差，形成中樞塔內氣流的「熱浮現象」，並藉由高塔兩端的自然溫差及大氣壓差加速系統內外部冷、暖空氣的對流，使得這股「人造氣流」在塔內不斷上竄，進而推動渦輪扇葉。
3. 不像一般的太陽能應用，太陽能塔在夜晚還能藉由白天時的儲熱繼續運作；而且它的風力是自產的，相較於自然風力的難以捉摸，太陽能人造風較能預測與掌握。即使位處無風帶，也能保有全天候的風力。

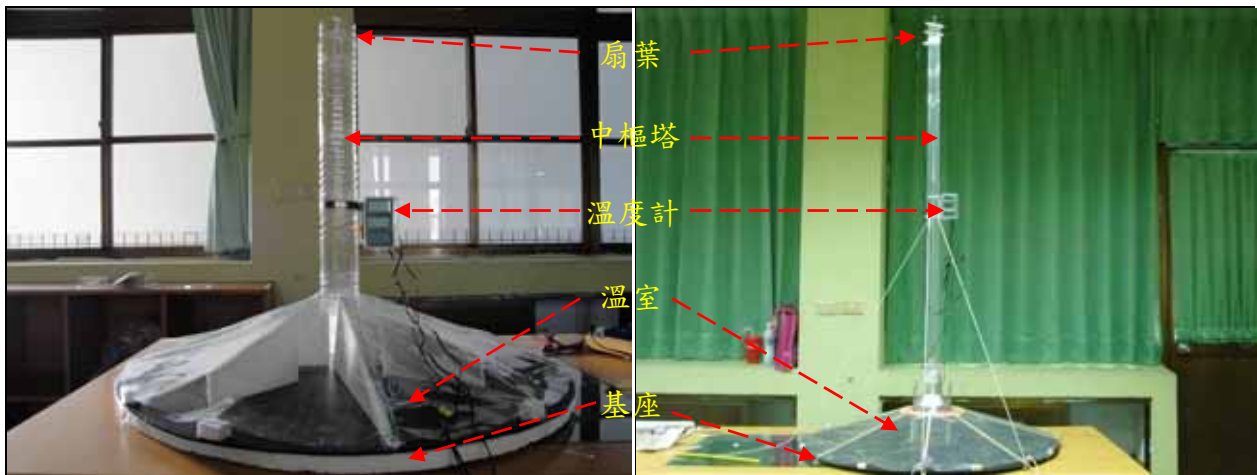
三、實驗規畫

(一) 實驗模型：

基於材料取得、組裝難易及實驗環境的考量，我們打算製作簡易型、改良型兩種版本的太陽能塔模型，其運作原理相同，但結構上略有差異：

1. 輕便版：如圖四所示，利用寶特瓶做為管身，以保麗龍板支撐管身及集熱棚，可快速組裝、拆卸、搬運；管身、底座可隨意加長、加大，適合規格、尺寸等內部變因的操控。但支撐性差，容易歪斜、變形。

2. 定置版：如圖五所示，以鐵支架支撐硬質 PVC 管身及集熱棚，抗變形能力佳，適合管頂溫度、氣流等外部變因的操控；但組裝非常耗時，尺寸固定，較難隨意改變。



圖四、實驗模型—輕便版(內部變因實驗)

圖五、實驗模型—定置版(外部變因實驗)

(二) 實驗儀器／輔助設備：

1. 因學校沒有扇葉轉速計，所以每個實驗的扇葉轉速均須以攝錄影機先行拍攝，再搭配 Avidemux 影像編輯軟體逐一判讀。下列為自管頂拍攝扇葉之連續畫面及計速方法：

0.000 秒(計速開始)	0.033 秒	0.066 秒	0.100 秒
0.133 秒	0.166 秒	0.200 秒	0.233 秒(計速完成)
扇葉轉速=1 轉/0.233 秒≈258 轉/分			

附表一、扇葉轉速之測量方法示例

2. 原本打算利用線香的輔助來呈現氣流的移動，但因模型塔內的微弱氣流並無法如預期將外部煙霧「吸入」棚內而作罷。

3. 考量學校的用電容量，固定以三具 150W 的鹵素燈當作實驗光源，避免日照量變動及不均的情形。

(三) 實驗場地：

1. 在光遮良好的暗室中進行實驗，測試過程中務必關窗，拉上遮光窗簾；也不打開日光燈和電扇，力求實驗室內光照量及氣流的恆定。

2. 實驗室內的溫、溼度變化都有可能干擾實驗的準確性。但因國小的實驗室內要進行恆溫控制有其實行上的困難，且冷房內的空氣對流一樣會產生干擾。因此，在溫度方面僅實施監測，避開溫差太大的日程；溼度的控制則以除濕機調控在適濕（50~65%）的範圍。

四、實驗限制及因應

(一) 實驗全程若能利用自然的太陽光源當然最好，因為太陽光源是平行光束，集熱棚內的光通量較為均勻；但其缺點是實驗會受天候限制(如陰雨、寒冬)或日照強弱變動的影響，再現性不佳。所以除了【實驗一—1】的集熱板面積實驗中，因牽涉到集熱板上光照度的一致性，決定採用太陽光源外，其餘的實驗光源均以實驗室內的鹵素燈調控為主。

(二) 太陽能塔的實際高度動輒數百公尺，中樞塔兩端的氣壓差是非常可觀的；但在實驗室中我們當然不可能模擬出這樣的氣壓條件。所以，在【實驗二—3】的塔頂氣流（氣壓差）實驗中，我們只能間接以操控模型中樞塔塔頂氣流的方式來呈現微小的氣壓差變化。

(三) 試運轉階段發現中樞塔內的上升氣流比想像中微弱，無法驅動一般的迷你扇葉，必須將扇葉改良為更靈敏、摩擦阻力更小的高感度扇葉。且製作時必須將規格（如葉片材質、角度、軸承尺寸等）標準化，以控制誤差在一定範圍內。

(四) 同一具模型若在短時間內重複加熱，可能會使得集熱板殘留前次實驗的餘熱（記憶效應）而影響實驗結果。所以實驗與實驗之間，應以電風扇驅熱，使集熱板的溫度復歸原點。

五、模型製作流程及說明

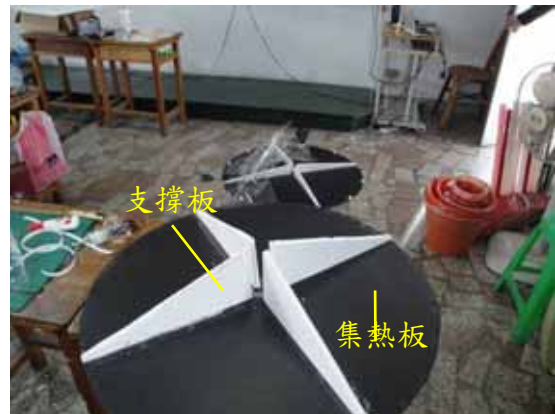
(一) 高靈敏度扇葉之製作→以針尖和螺絲十字凹槽組成軸承，微弱氣流即可驅動



(二) 中樞塔裁接→利用寶特瓶身數段，裁接至所需高度



(三) 支撐板固定→依設定之底角裁切支撐板，並固定於集熱底板上



(四) 集熱棚黏合→裁切透明塑膠布並黏貼於支撐板上，完成溫室組裝



(五) 完成組裝→裁切保麗龍板作為底板基座，再將中樞塔固定於溫室中心處，完成了！



六、實驗設計

(一) **研究一**：主要在**探究太陽能塔的內在（尺寸）結構對於塔內氣流的影響**。以輕便版的太陽能塔模型進行實驗。操作變因涵蓋了塔徑、塔高、集熱板面積、集熱棚底角、入口間隙等五種變項的操控。

(二) **研究二**：**探究外在變因對於其運轉性能的影響**。以定置版的太陽能塔模型來進行實驗。操作變因則涵蓋光源強弱、管端溫差和管端氣壓差等三種變項的操控及測試。

(三) **研究三**：本階段主要目的在**嘗試利用其它物理方法（如增設導流錐、改變管口造型、改變集熱板鋪面材質、採光篩選等變項的操控）來改良太陽能塔的性能**，並進行「最佳化尺寸比例」的測試、驗證，希望在太陽能塔的設計方面能提供些許建議。

七、實驗方法及研究結果

《研究一》太陽能塔的結構特性及相關變因探討

本系列的實驗針對太陽能塔的溫室、中樞塔等兩大部分進行內部變因的探究：

【實驗一—1】集熱板面積大小是否和太陽能塔的扇葉轉速有關？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

(1) 操作變因：集熱板表面積→0.2 m²、0.4 m²、0.6 m²、0.8 m²、1.0 m² 黑中空板

(2) 控制變因：塔徑→6.5 cm 塔高→50 cm 棚底角→20° 入口間隙→2.0 cm
光源→戶外陽光

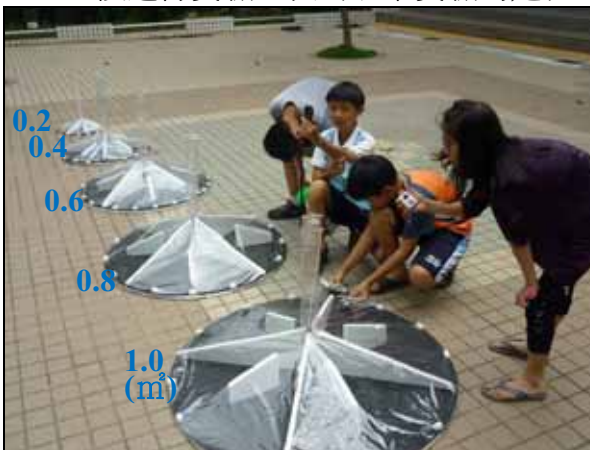
2. 為求光照度之均等，將上述四具太陽能塔模型於早、中、下午同時同地移置戶外（如圖六 a）。

3. 為避免戶外氣流干擾之影響，實驗前先以風速計確認當時為無風狀態；拍攝扇葉轉速時則以防風罩遮擋於管口上方，並以風速計監測外部干擾氣流（如圖六 b）。

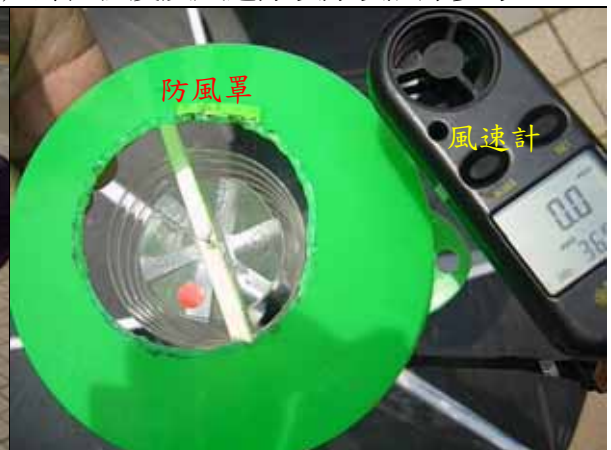
4. 轉速若超過 500 rpm 時會造成影像檔判讀上的困難，故加熱時間以 5 分鐘為準。

5. 以攝錄影機分別記錄各組扇葉之轉速，並求出其早、中、下午平均值。

6. 重複進行實驗三次（以下實驗均是），戶外溫溼度及風速亦須亦須記錄參考。

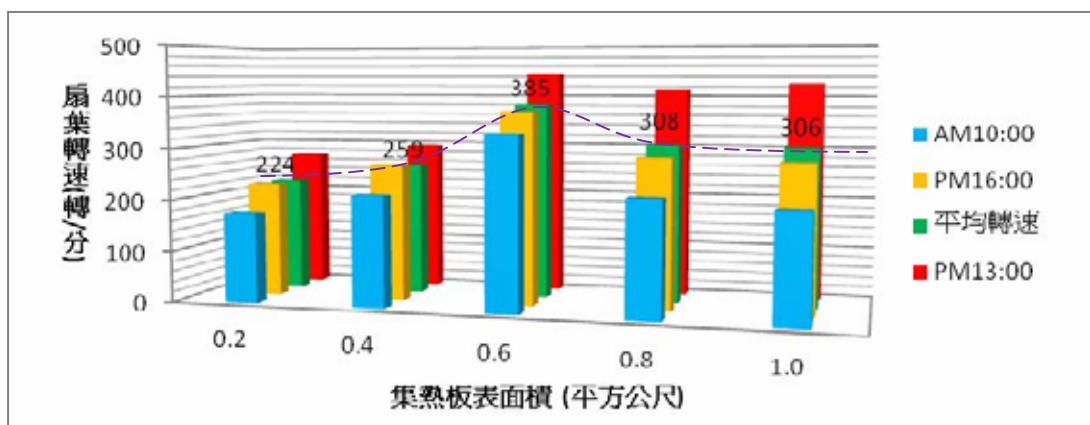


圖六(a)、不同集熱面積之太陽能塔



圖六(b)、簡易防風罩避免戶外氣流干擾

(二) 實驗結果：



表一、不同集熱板表面積之太陽能塔扇葉轉速

(三) 探討：

1. 我們原先預測集熱板表面積愈大，集熱愈快，塔內氣流理應愈強才對；但實驗結果卻顯示： 0.6 m^2 組扇葉轉速最快，而非最大的 1.0 m^2 組。
2. 上述的結果，我們推論可能是因為中樞塔管徑大小固定，並未隨著集熱板表面積的增加而擴大，造成溫室內的氣流相互擾動，而無法加速升抬所致。
3. 集熱板面積大，在日照充裕的情況下依然佔有優勢（如 PM13:00 之紅色長條所示）
4. 綜合以上可知：太陽能塔的集熱板面積並非愈大愈好，而是應採取「適大化」的設計。至於要多大才算「適大」呢？…這個問題還有進一步探討的空間。

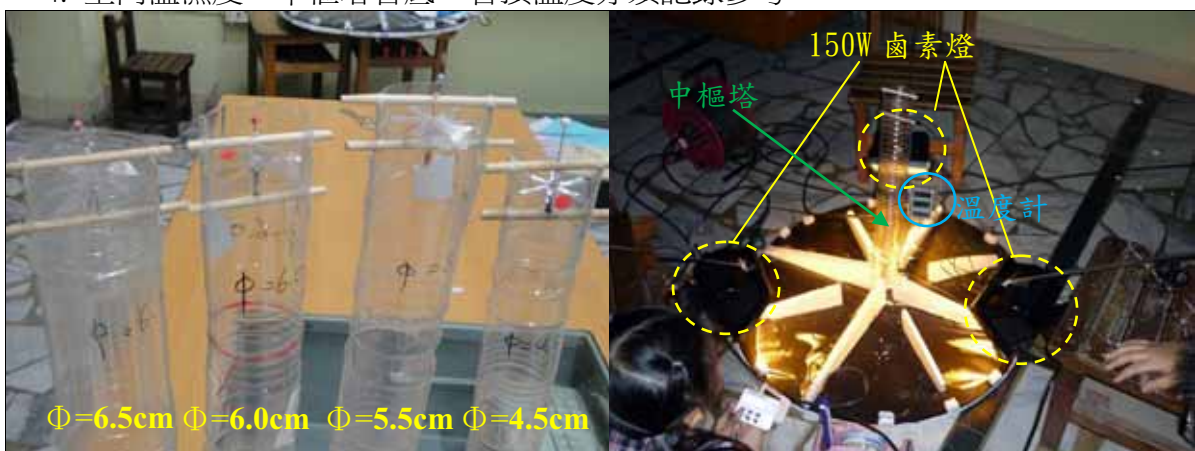
【實驗一—2】中樞塔的管徑大小是否和太陽能塔的扇葉轉速有關？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

- (1) 操作變因：中樞塔管徑→ 6.5 cm 、 6.0 cm 、 5.5 cm 、 4.5 cm 四種寶特瓶身，扇葉受風面積均為瓶身截面積的 0.64 倍（即扇葉半徑為瓶身半徑 0.8 倍）
- (2) 控制變因：集熱板面積→ 0.4 m^2 塔高→ 50 cm 棚底角→ 10° 入口間隙→ 2.0 cm 光源→鹵素燈 $150\text{ W} \times 3$ 具（呈 120° 環繞配置，等距離、等照度）

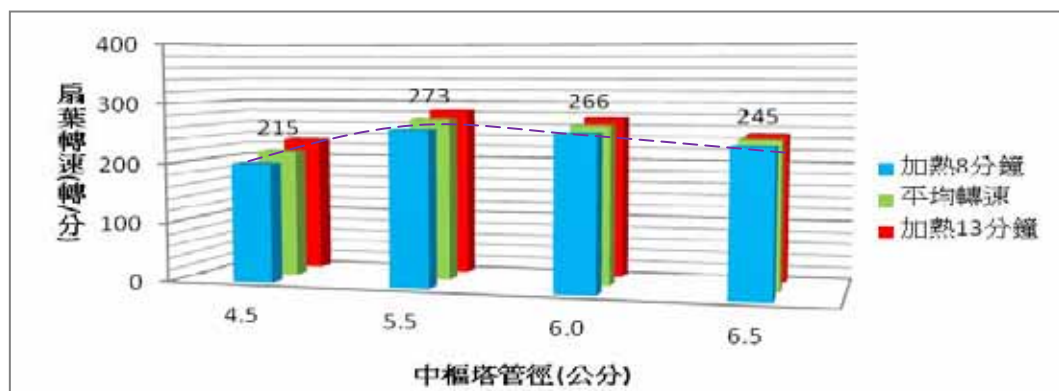
2. 依設定架妥太陽能塔模型，關閉其它光源，以三具鹵素燈同時加熱。
3. 預留 1~3 分鐘不等的預熱起動時間，以開始加熱 8 分鐘、13 分鐘為轉速取樣點，記錄各組扇葉的平均轉速。
4. 室內溫濕度、中樞塔管底、管頂溫度亦須記錄參考。



圖七(a)、不同管徑的中樞塔(扇葉管)

圖七(b)、6.5cm 管徑模型實驗情形

(二) 實驗結果：



表二、不同塔徑之太陽能塔扇葉轉速

(三) 探討：

1. 原先預測 4.5 cm 塔徑最小，氣流速度會比較快，但結果顯示：4.5 cm 組表現明顯較差，5.5、6.0、6.5 cm 三組差異不大，但以 5.5 cm 管徑組轉速最快。
2. 參考【實驗一—1】的實驗結果，表現最佳的兩組太陽能塔模型，其中一組是 0.6 m²組（半徑 43 cm，搭配 6.5 cm 塔徑）；另一組是 5.5 cm 塔徑搭配 0.4 m²板面積（半徑 36 cm），我們發現到：這兩組數對—(43, 6.5)和(36, 5.5)有著相當接近的比值（以下簡稱 R/Φ比）—6.54~6.60。純屬巧合？還是真如網站所說的，太陽能塔存在著「最佳化比例」？這個有趣的問題或許是解答如何讓太陽能塔「適大化」的關鍵哦！

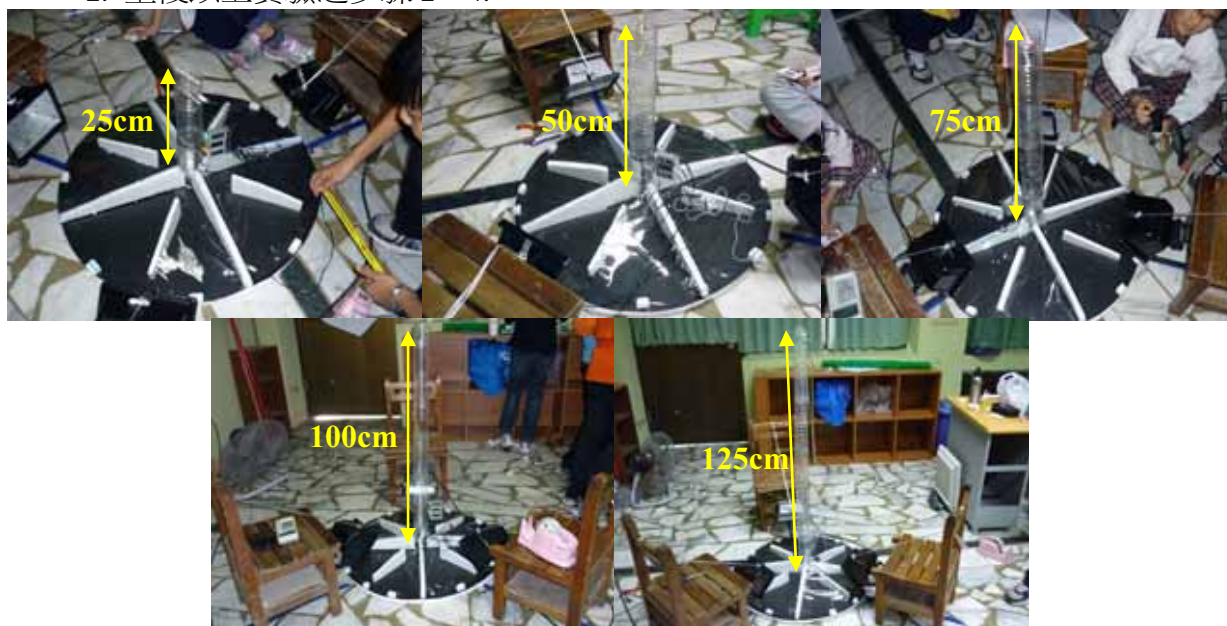
【實驗一—3】 **中樞塔的高度是否和太陽能塔的扇葉轉速有關？**

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

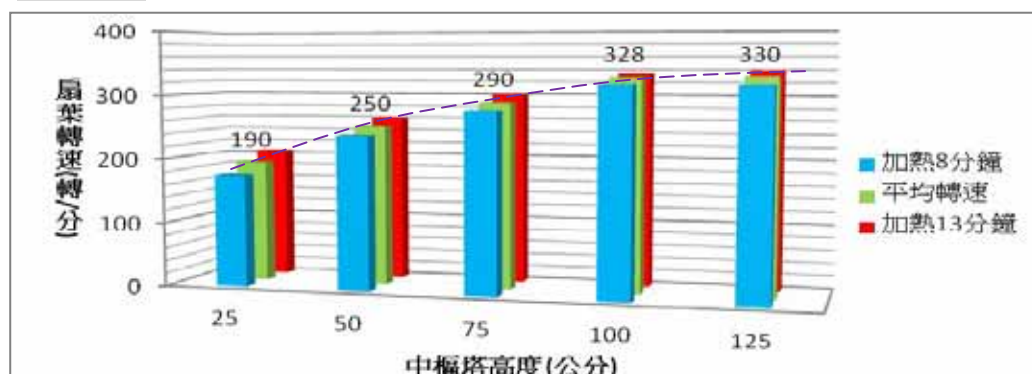
- (1) 操作變因：中樞塔高度→25 cm、50 cm、75 cm、100 cm、125 cm 寶特瓶管五組
- (2) 控制變因：集熱板面積→0.4 m² 塔徑→6.5 cm 棚底角→10° 入口間隙→2.0 cm
光源→鹵素燈 150W*3 具（120° 環繞配置，平均照度約為 5000Lux）

2. 重複以上實驗之步驟 2~4.



圖八、不同高度的太陽能塔

(二) 實驗結果：



表三、不同塔高之太陽能塔扇葉轉速

(三) 探討：

1. 太陽能塔的實際海拔高度都在數百公尺以上，塔內的上升氣流強弱與大氣壓力差有關，這是我們早就知道的。不過，模型塔身最多只有 1 公尺高，不可能有明顯的大氣壓差，所以我們原先並不認為各組轉速會有明顯的差異。
2. 實驗結果顯示：上升氣流的強弱和中樞塔本身的高度呈現正相關；**塔高愈高，愈有利於塔內氣流的快速流動**。但當塔高超過一定高度時(以本實驗為例，為 100 cm 之模型)，上升氣流的增強幅度則趨於平緩。
3. 本實驗結果僅能說明：**在不考量大氣壓差的情形下，「上升氣流的強弱」仍和中樞塔本身的「高度」有關**；至於「氣流強弱」與「大氣壓差」之間的直接關聯性，仍有待進一步的實驗設計來驗證。

【實驗一—4】集熱棚的底角大小是否和太陽能塔的扇葉轉速有關？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

- (1) 操作變因：集熱棚底角→ 0° 、 10° 、 20° 、 30° 四種保麗龍支撐板(如圖九)
- (2) 控制變因：集熱板面積→ 0.4 m^2 塔徑→ 6.5 cm 塔高→ 50 cm 入口間隙→ 2.0 cm
光源→鹵素燈 $150\text{ W} \times 3$ 具(呈 120° 環繞配置，燈具距離集熱棚面約 20 cm ，平均照度約為 5000 Lux)

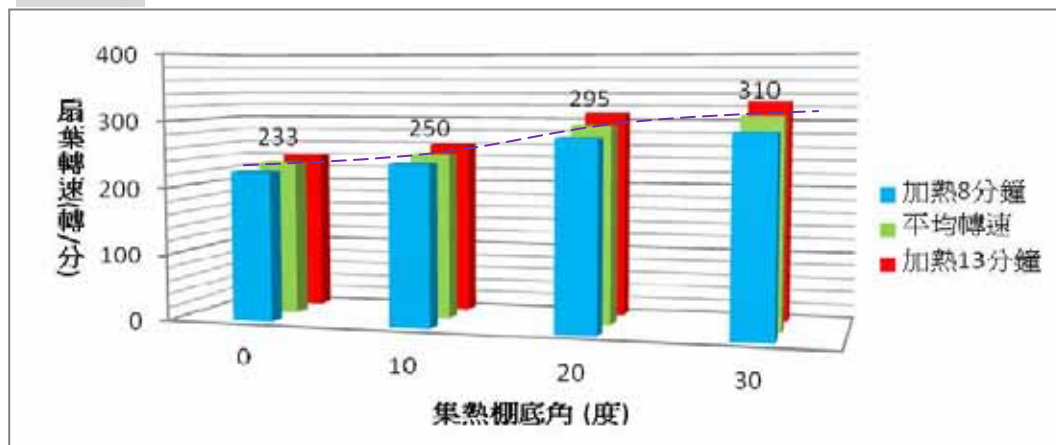
2. 重複以上實驗之步驟 2~4。

3. 測量並記錄各組停止加熱後的持續運轉時間。

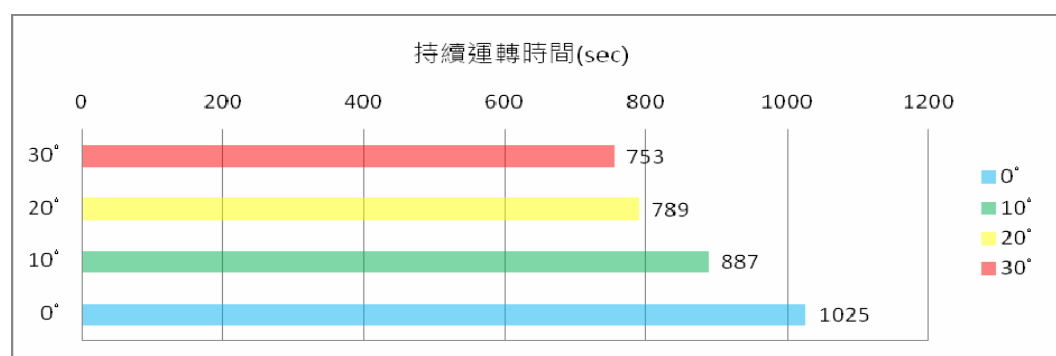


圖九、不同集熱棚底角之太陽能塔

(二) 實驗結果：



表四(a)、不同集熱棚底角之太陽能塔扇葉轉速



表四(b)、不同棚底角之太陽能塔持續運轉時間

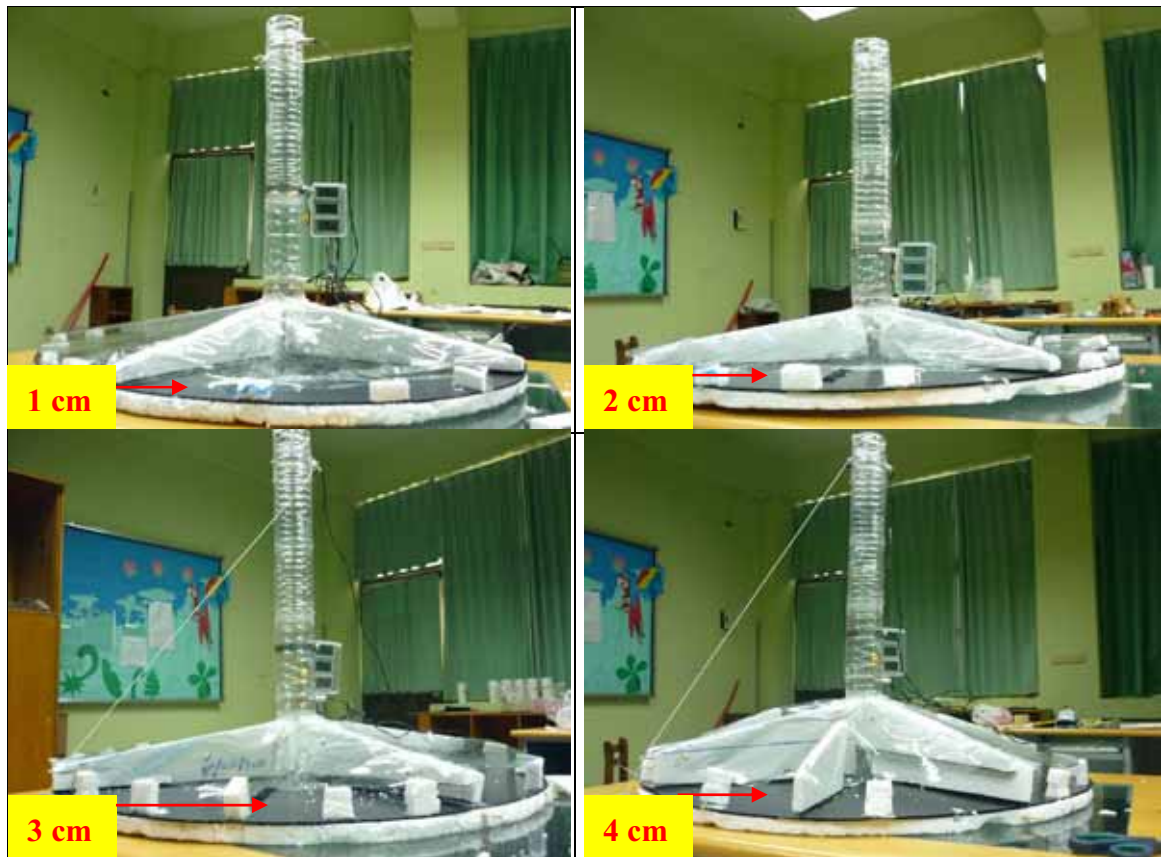
(三) 探討：

1. 表四(a)顯示：太陽能塔的氣流和溫室集熱棚的底角有關，大致呈正相關。不過，棚架斜度加大，雖有利於熱氣流的升抬，但卻也可能同時加速溫室儲熱的釋放，導致持續運轉時間縮短（如表四(b)所示）。我們猜想，這可能也是真實版的太陽能塔溫室要採取低角度、扁平化設計的理由。
2. 切斷光源後，各組扇葉均能維持 12 分鐘以上的持續運轉，證明其動能絕非來自本身的慣性矩，而是來自溫室的餘熱以及儲存於集熱板的輻射熱。

【實驗一—5】集熱棚的入口間隙是否和太陽能塔的扇葉轉速有關？

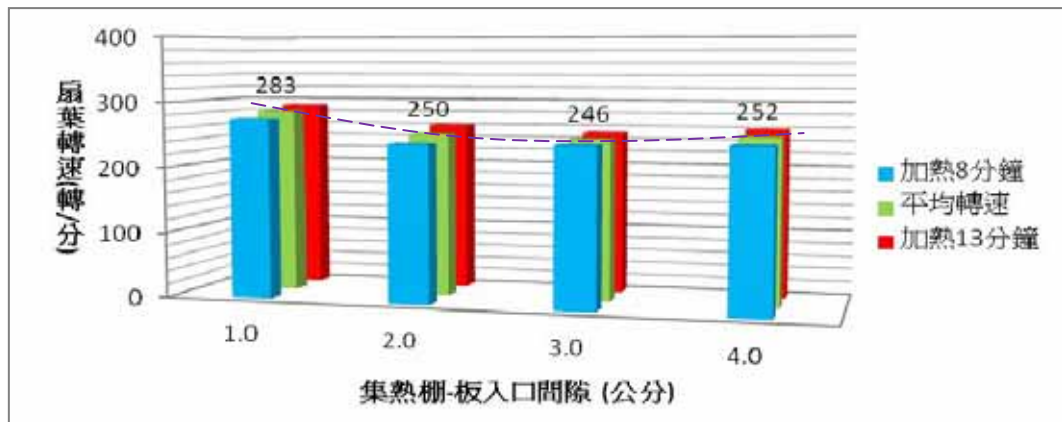
(一) 實驗方法：

1. 變因設定：
 - (1) 操作變因：集熱棚入口間隙→取 1.0 cm、2.0 cm、3.0 cm、4.0 cm 四組（如圖十）
 - (2) 控制變因：集熱板面積→0.4 m² 塔徑→6.5 cm 塔高→50cm 棚底角→10°
光源→鹵素燈 150W*3 具（呈 120° 環繞配置，燈具距離集熱棚面約 20 cm，照度約為 5000Lux）
2. 依設定架妥太陽能塔模型，關閉其它光源，以三具鹵素燈同時加熱。
3. 因各組扇葉起動需約 1~3 分鐘不等的預熱時間，故以開始加熱 8 分鐘、13 分鐘為轉速取樣點，記錄各組扇葉平均轉速。
4. 測量並記錄各組停止加熱後的持續運轉時間。

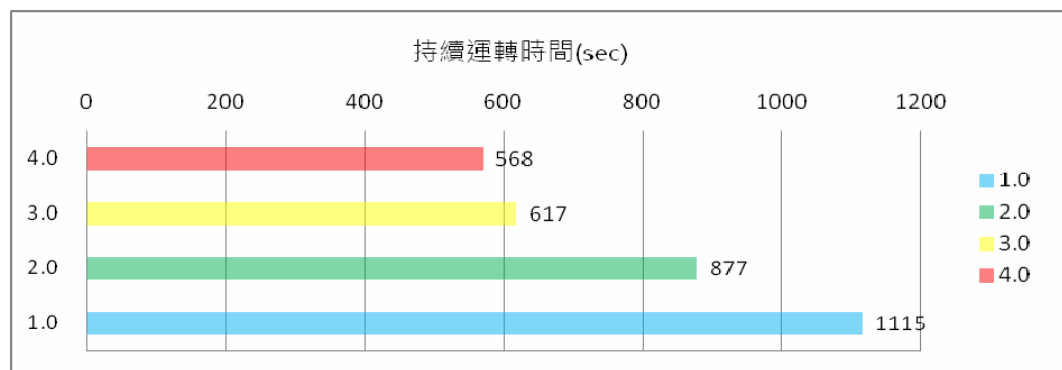


圖十、將集熱棚調整成不同大小之入口間隙

(二) 實驗結果：



表五(a)、不同入口間隙之太陽能塔扇葉轉速



表五(b)、不同入口間隙之太陽能塔持續運轉時間

(三) 探討：

1. 表五(a)顯示：不同入口間隙之四組太陽能塔在扇葉轉速方面雖無顯著差異，但 1.0 cm 組仍優於其它三組約 10%。表五(b)則顯示：4.0 cm 組的持續運轉時間僅達 1.0 cm 組的一半；相較於集熱棚的底角因素，入口間隙的大小對於太陽能塔持續運轉時間的影響更大。
2. 綜合以上兩點，我們研判：太陽能塔的入口間隙不宜過大，否則會不利於集熱且造成溫室內儲熱的快速散逸。

《研究二》探究影響太陽能煙囪效能的外在變因有哪些？

【實驗二-1】光源強弱對於太陽能塔效能的影響？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

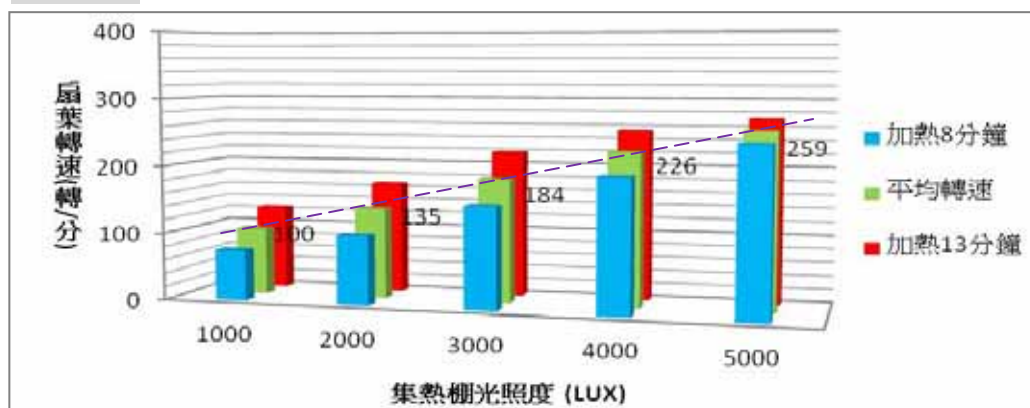
- (1) 操作變因：光源→鹵素燈 150W*3+調光器（調整平均照度→1000Lux~5000Lux）
- (2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、塔徑、塔高、棚底角、入口間隙、加熱時間均維持恆定

2. 架妥太陽能塔模型，關閉其它光源；先以調光器逐一調整好三具鹵素燈的設定照度，一段時間後同時開啓加熱（如圖十一）。
3. 因各組扇葉起動需約 2~3 分鐘不等的預熱時間，故以開始加熱 8 分鐘、13 分鐘為轉速取樣點，記錄各組扇葉平均轉速。
4. 室內溫濕度、中樞塔管底、管頂溫度亦須記錄參考。



圖十一、光源強弱的測定及調整

(二) 實驗結果：



表六、光源強弱對於太陽能塔的影響

(三) 探討：

1. 表六顯示：光源強弱對於太陽能塔氣流的影響確實是非常直接，且呈線性的關聯。
2. 1000Lux 組的光源已調降至非常微弱，但其熱能仍足以驅動扇葉運轉，證明未來版太陽能塔所宣稱的「即使在低日照狀態，仍能維持基本運轉」是有可能的。
3. 本實驗所定義的「光源強弱」僅能涵蓋「可見光」的波段；原因是光照度計只能偵測到鹵素燈所散發的可見光強弱，並無法判定其紅外線輻射量的多寡。

【實驗二-2】 中樞塔端口溫差對於太陽能塔的影響？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

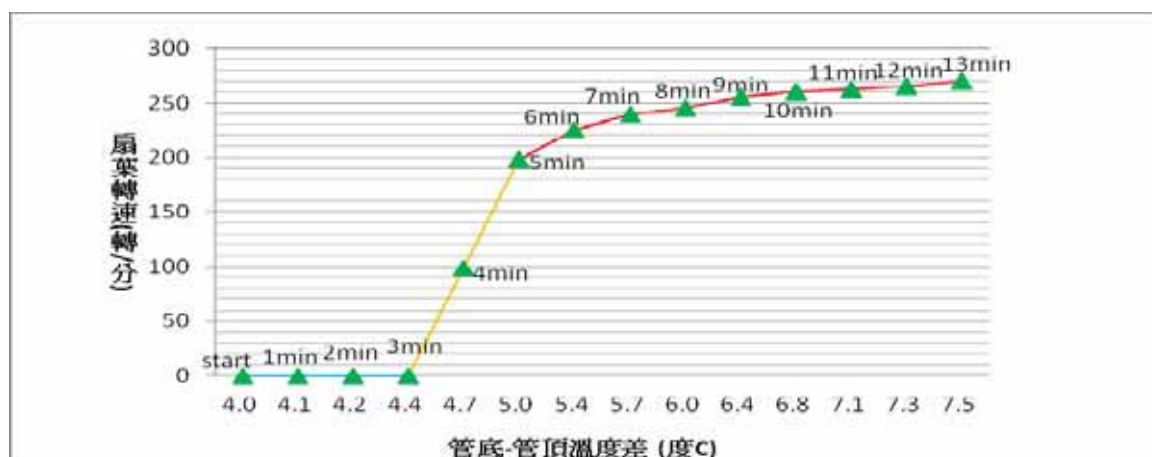
- (1) 操作變因：塔頂溫度先利用冰水降溫，再加熱太陽能塔模型，將中樞塔端口溫差控制在 $4^{\circ}\text{C} \sim 7.5^{\circ}\text{C}$ 的區間
- (2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、塔徑、塔高、棚底角、入口間隙、光源強度

2. 如圖十二，塔頂先以油性黏土固定一只保麗龍杯，再倒入冰水或冰塊加水冷卻塔頂，直到塔底（ T_2 溫度計）與塔頂（ T_1 溫度計）溫差達 4°C 時，開始實驗。
3. 關閉其它光源，開啓鹵素燈加熱，以攝影機全程攝錄，Avidemux 軟體每間隔 1 分鐘讀取一次扇葉轉速，並加以記錄。



圖十二、塔頂溫度之調控

(二) 實驗結果：



表七、中樞塔端口溫差對扇葉轉速之影響

(三) 探討：

1. 由表七可知：中樞塔上下端口必須在達到相當的溫差條件下，太陽能塔扇葉才能開始起動並持續運轉。以本模型及實驗環境而言， 4.4°C 即為起動扇葉的最小端口溫差；當此溫差達 5°C 以後，扇葉轉速隨溫差擴大而穩定加速。

【實驗二-3】管頂背風氣流（氣壓差）對於太陽能塔運轉效能的影響？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

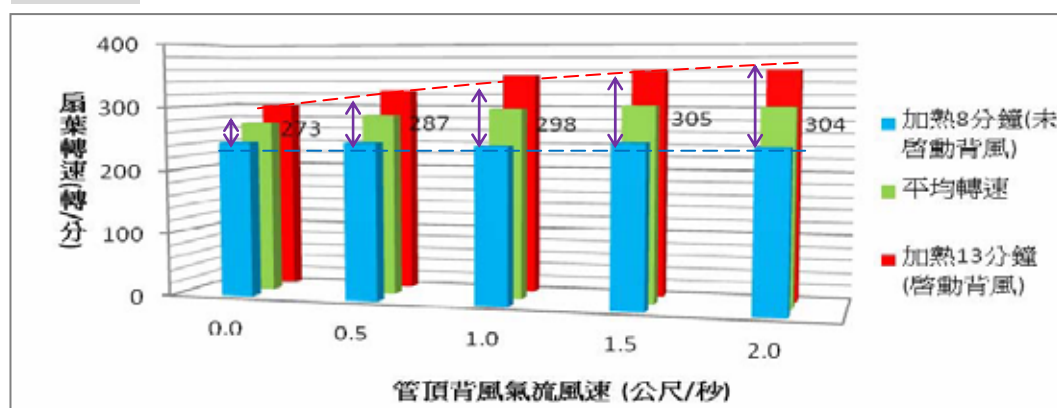
- (1) 操作變因：DC.12V 小型鼓風機(加裝簡易氣流整流器)+調速器+風速計→控制塔頂背風風速在 $0\sim 2.0\text{m/s}$ 之間，使塔頂上空形成不同程度的低氣壓
- (2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、管徑、管高、棚底角、入口間隙、光源強度、加熱時間均維持恆定

2. 為了使塔頂上空形成低氣壓區，應用伯努利原理，將小型鼓風機出風口架設在距中樞塔頂部約 30 cm 之斜下方處（如圖十三），並以調速器及風速計調整出風至設定之背風氣流。
3. 架妥實驗平台後，關閉其它光源，開啓鹵素燈加熱。
4. 加熱至 8 分鐘時，記錄各組扇葉轉速。
5. 至加熱 13 分鐘時，起動小型鼓風機，記錄各組扇葉轉速。
6. 求取上述步驟 5、6 兩個取樣點的平均數值，即為平均扇葉轉速。



圖十三、塔頂背風氣流之調控

(二) 實驗結果：



表八、塔頂背風氣流對扇葉轉速之影響

(三) 探討：

1. 表八顯示：在加熱 8 分鐘但未啓動背風的情況下（藍色長條所示），各組間並無顯著差異；但在加熱 13 分鐘且開啓背風的情形下（紅色長條所示），各組間開始有了相當明顯的差異。證明：背風氣流愈強（即塔頂氣壓愈低），轉速增幅隨之擴大。
2. 雖然我們無法直接操縱塔頂的大氣壓力，但利用調控背風壓的方法，仍能間接證明中樞塔兩端口之間的壓力差與氣流強弱確實有著正向關聯。

《研究三》太陽能煙囪的改良構想及相關變因探討

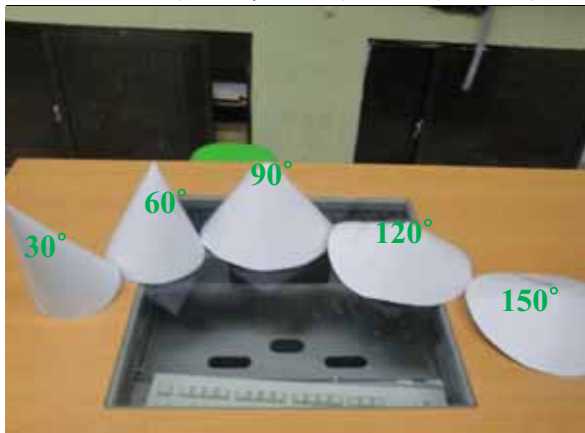
【實驗三-1】塔底加裝導流錐是否能有效提升太陽能塔的效能？

(一) 實驗方法：

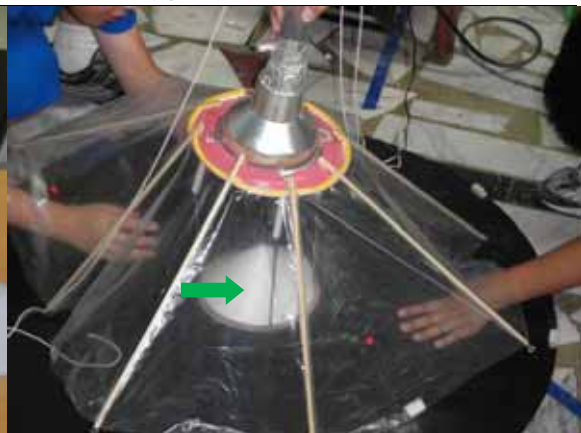
1. 變因設定：

- (1) 操作變因：加裝導流錐→錐頂角 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° VS. 無導流錐對照組（以 180° 表示）
- (2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、管徑、管高、棚底角、入口間隙、光源強度、加熱時間均維持恆定

2. 如圖十四，於定置版模型中央黏貼不同頂角的導流錐進行分組測試。
3. 架妥實驗平台，關閉其它光源，開啓光源鹵素燈。
4. 以開始加熱 8 分鐘、13 分鐘為轉速取樣點，分別記錄各組平均轉速。
5. 室內溫濕度、中樞塔管底、管頂溫度亦須加以記錄參考。

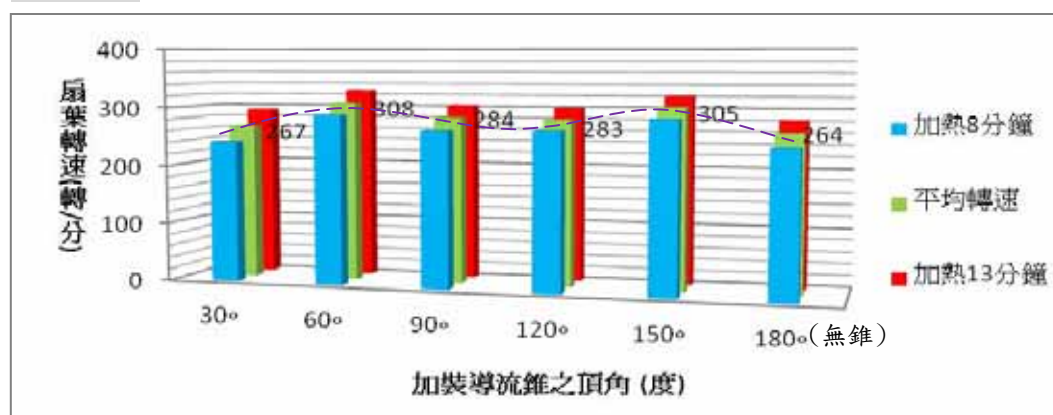


圖十四(a)、不同錐頂角的導流錐



圖十四(b)、導流錐安裝

(二) 實驗結果：



表九、不同導流錐頂角對扇葉轉速之影響

(三) 探討：

1. 以塔內氣流強弱而言，除 30° 導流錐的效果較不明顯外，其餘各加裝組的效果都優於無導流錐組。證實導流錐的安裝確實有助於溫室內熱氣流的升抬，使得塔內氣流更加流暢。
2. 由表九的轉速分布來看，大致呈現 M 字形雙峰對稱（頂角 60° 及 150° 導流錐可提升扇葉轉速至 300 rpm；120° 及 90° 反而不如預期的理想），至於為什麼會這樣的結果？以我們目前有限的的能力，還無法提出合理的解釋。

【實驗三-2】改變中樞塔管口造型是否也能提升太陽能塔的效能？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

- (1) 操作變因：管口造型→如圖十五(a)：細腰管、粗腰管、漸縮管、漸擴管 VS.直管（對照組）
- (2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、管徑、管高、棚底角、入口間隙、光源強度、加熱時間均維持恆定

2. 如圖十五(b)，於中樞塔頂端安裝不同造型的管口進行分組測試。
3. 架妥實驗平台，關閉其它光源，開啓光源鹵素燈。
4. 以開始加熱 8 分鐘、13 分鐘為轉速取樣點，分別記錄各組平均轉速。
5. 室內溫濕度、中樞塔管底、管頂溫度亦須加以記錄參考。

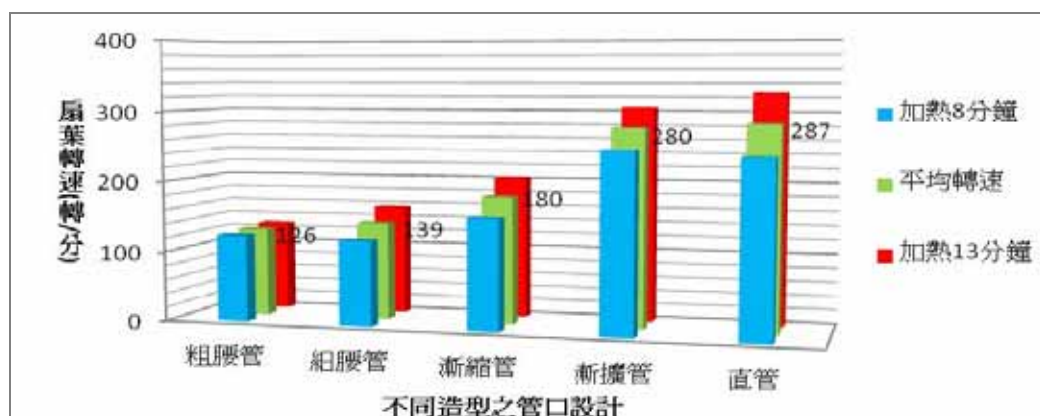


圖十五(a)、不同造型的管口



圖十五(b)、造型管口之安裝及實驗

(二) 實驗結果：



表十、不同管口造型對扇葉轉速之影響

(三) 探討：

1. 原先預測各組間不會有太大差異，卻發現：中樞塔若採用不同的管口造型，所獲致的扇葉轉速也大不相同。在平均轉速方面，粗腰管 < 細腰管 < 漸縮管 < 漸擴管 = 直管。
2. 漸擴管在加熱初期有最佳的轉速表現，但加熱持續一段時間後，則以直管表現最優。雖然兩者性能相近，但若考量建造成本和難易度，中樞塔的管口造型仍應以直管設計為優先。

【實驗三-3】集熱板若採用不同鋪面材質是否能提升太陽能塔的效能？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

(1) 操作變因：集熱板鋪材→依外觀分為兩組（如圖十六）

- 平面組：黑絨布、粗砂紙、鋁箔紙、黑中空板(對照組)
- 顆粒組：相同鋪面積的竹炭渣、咖啡渣、貓砂、洗衣粉

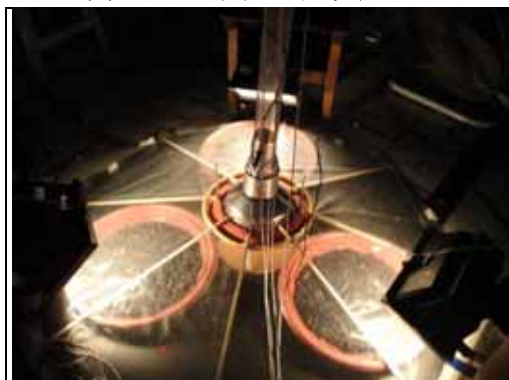
(2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、管徑、管高、棚底角、入口間隙、光源強度、加熱時間均維持恆定

2. 如圖十七，將收集的粉渣或布面分別平鋪於集熱板板面上，架妥太陽能塔及光源。

3. 以開始加熱 8 分鐘、13 分鐘為轉速取樣點，分別記錄其平均轉速。

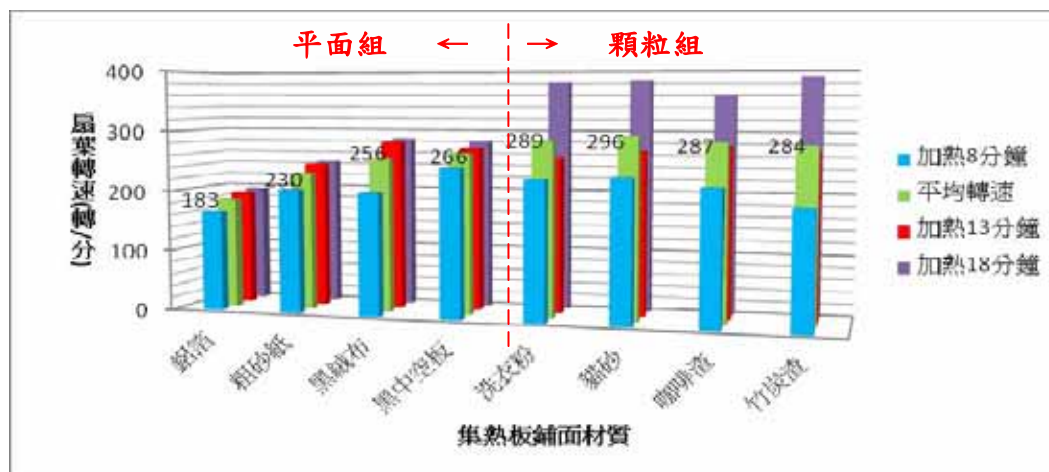


圖十六、不同的集熱板鋪材(上排為平面組，下排為顆粒組)



圖十七、集熱板鋪材的熱效能實驗

(二) 實驗結果：



表十一、不同鋪面材質對扇葉轉速之影響

(三) 探討：

1. 如表十一所示，圖表左側為平面組鋪面，右側為顆粒組鋪面。加熱 8~13 分鐘時，各組間的差異並不大，但平面組鋪面在加熱 13 分鐘之後轉速便很快趨於穩定；而顆粒組在加熱 13 分鐘之後轉速仍然持續竄升。
2. 平面組只有黑絨布、黑中空板兩組最高轉速超過 250 rpm；顆粒組的最高轉速均逼近 400 rpm。
3. 鋁箔紙鋪面始終維持在低轉速狀態，說明其光滑表面雖容易反射、容易導熱，卻不利於熱量的儲存。
4. 黑絨布具有交織的孔網結構，容易留住表面的熱空氣；而黑中空板雖然不具此種結構，卻一樣可以藉由中空夾層將加熱後的空氣留困在板面下。兩者均有較佳的儲熱容量，所以是平面組中表現較為突出的材質。
5. 洗衣粉、貓砂色澤淡，理論上是較不吸熱的；但實驗結果，儲熱能力比起黑褐色系的咖啡渣、竹炭渣竟然毫不遜色，此點和我們的預測有些出入。
6. 顆粒組鋪面質地粗糙，使得吸熱表面積大幅增加（表面積效應）；顆粒與顆粒之間又相互堆疊，形成無數的孔隙，儲熱容量自然更勝於平面組的黑絨布及黑中空板。
7. 綜合上述的觀察，我們可以推斷：太陽能塔的運轉效能和集熱板鋪面的選擇有著密切關聯。以儲熱容量而言，採用顆粒層疊的方式是最好的選擇；以材質而言，孔隙結構優於平滑結構；交織結構或中空夾層結構優於單層結構。

【實驗三—4】何種顏色的色光對於提升太陽能塔的溫室效能最有利？

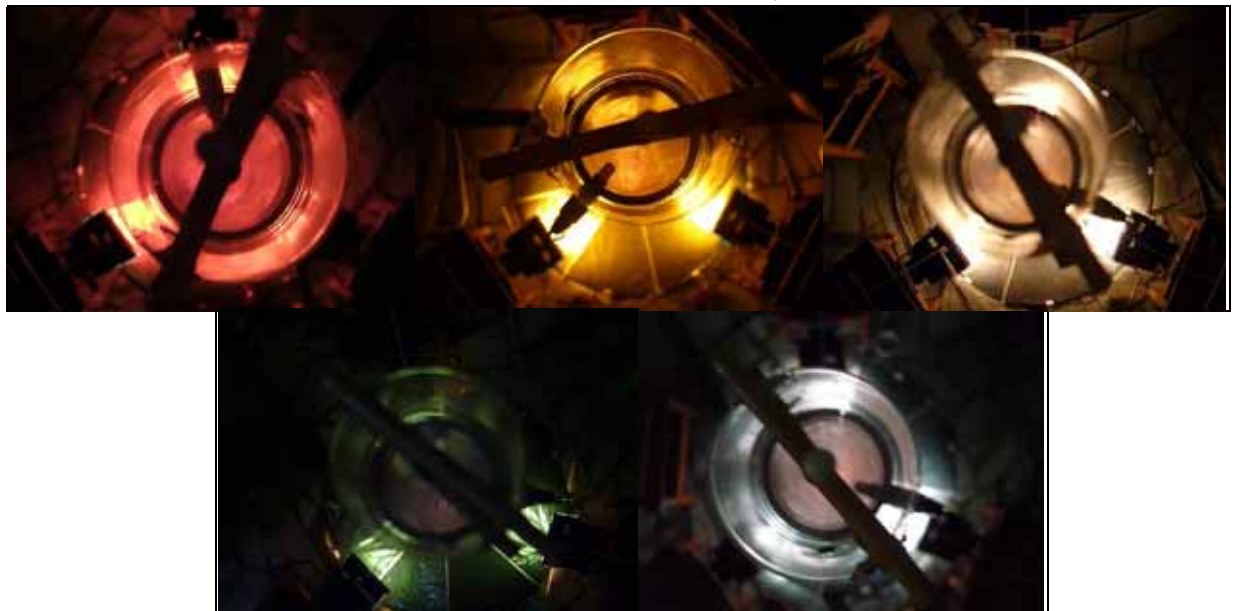
(一) 實驗方法：

1. 變因設定：
 - (1) 操作變因：光源以雙層玻璃紙濾光→依顏色分為紅、橙、黃、綠、藍五組
 - (2) 控制變因：定置版模型→集熱板面積、管徑、管高、棚底角、入口間隙、光源強度、加熱時間均維持恆定
2. 依上述設定架妥太陽能塔模型，將玻璃紙以中空板雙面黏貼並固定於鹵素燈燈罩平面上，關閉其它光源，開啓鹵素燈（如圖十八~十九）。

3. 因扇葉起動時間遲滯（均在 8 分鐘以上），故以 13 分鐘、18 分鐘為轉速取樣點，分別記錄各組平均轉速。

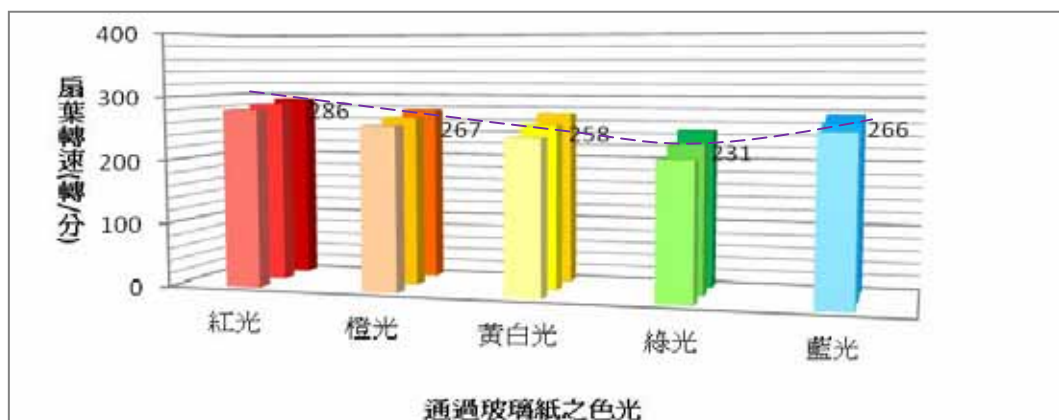


圖十八(a)(b)、光源以彩色玻璃紙簡易濾光



圖十九(a)~(e)、各種色光(管頂俯視圖，依序為紅橙黃綠藍)

(二) 實驗結果：



表十二、不同色光對扇葉轉速之影響

(三) 探討：

1. 原本我們預測黃光組轉速表現最佳，但由表十二可看出：五組可見的色光中，紅、

橙、黃、藍光四組雖無顯著差異，但以紅光組轉速表現最為突出；綠光組的反應則與其餘四組有相當落差。

2. 太陽能塔的溫室集熱棚顏色以透明偏紅或透明偏藍為佳，若過於偏綠則溫室的熱效能會大打折扣。

【實驗三-5】太陽能塔的尺寸是否存在所謂的「最佳化比例」？

(一) 實驗方法：(本實驗為【實驗一-1】、【實驗一-2】的延伸)

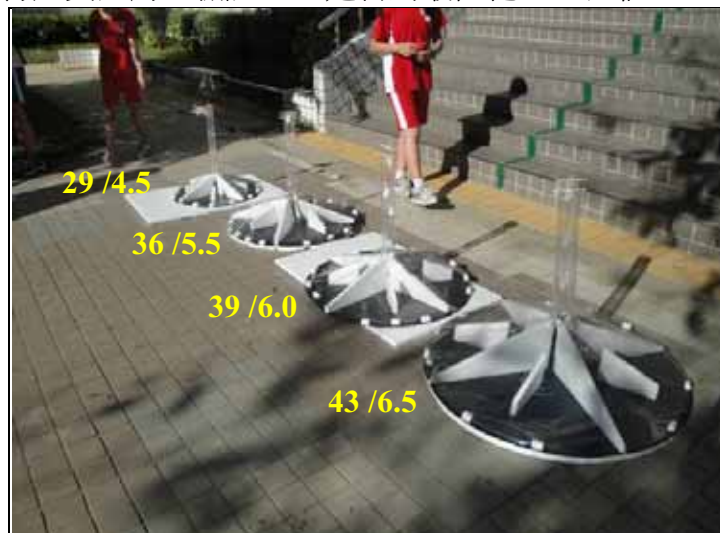
1. 變因設定：

- (1) 操作變因：調整集熱板半徑/管徑比例，使 R/Φ 比值同為 6.54 (最佳化假設值)
→ 除原先表現最佳的 43 cm/6.5cm、36 cm/5.5 cm 兩組外，再追加 39cm/6.0 cm 及 29 cm/4.5 cm 之太陽塔模型兩組 (如圖二十)

- (2) 控制變因：塔高→50 cm 棚底角→ 20° 入口間隙→2.0 cm 光源→戶外陽光

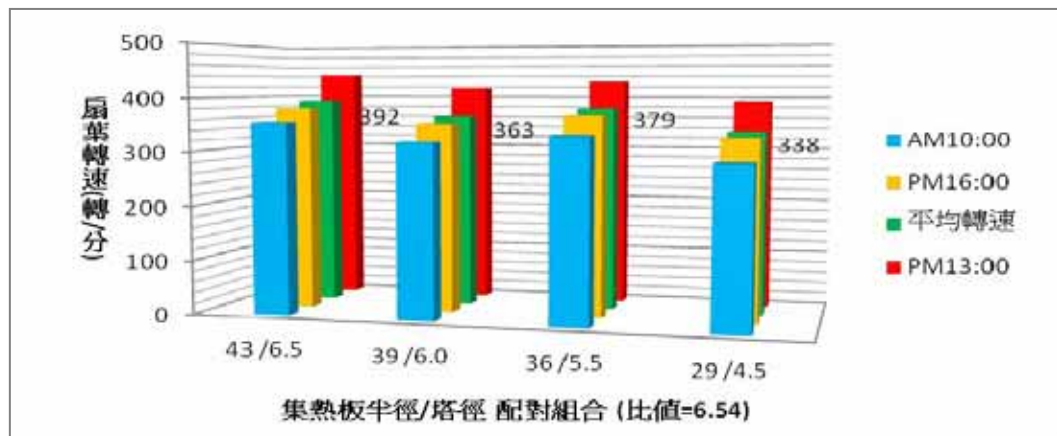
2. 重複【實驗一-1】步驟 2~5，記錄各組早、中、下午三個時段加熱 5 分鐘後的平均轉速。

3. 四組結果進行差異比對，驗證 6.54 是否為最佳化 R/Φ 比值。



圖二十、檢驗最佳化 R/Φ 比值的四具模型
(鋪保麗龍板者為追加之模型)

(二) 實驗結果：



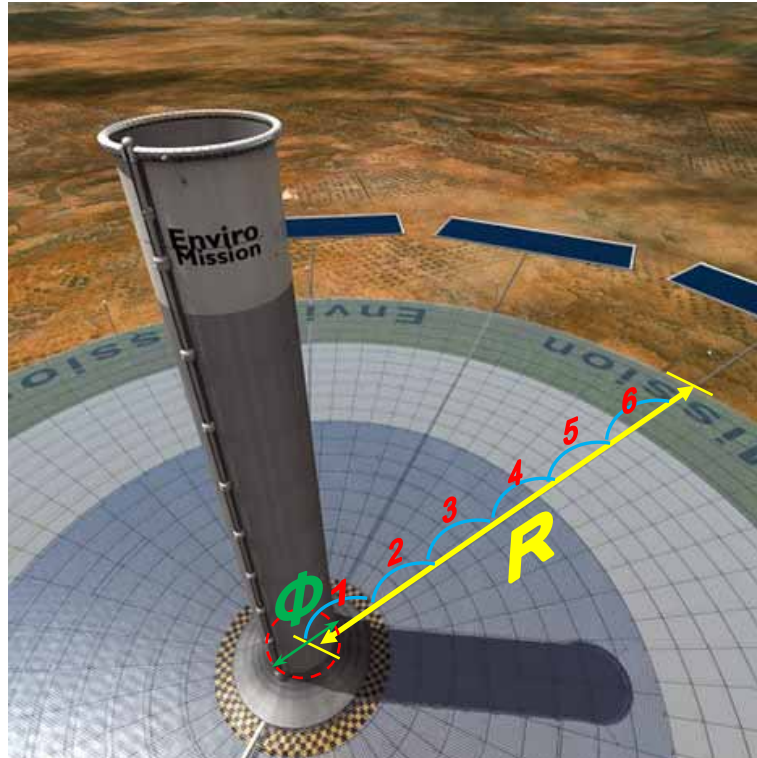
表十三、最佳化 R/Φ 比值之檢驗結果

(三) 探討：

1. 因實驗日期不同，日照量也不一樣，所以本結果無法直接與【實驗一—1】進行組間比較。但組內比對發現：四具「最佳化」的太陽能塔置於同一日照環境下，扇葉轉速都與【實驗一—1】性能最優的 43/ 6.5 組相當接近（29/ 4.5 組落差較大，約 14%），證明太陽能塔若採用 R/Φ 比值為 6.54 的設計，確實能達到頗為理想的熱效能。
2. 但此一比值能不能稱之為「最佳化」？事實上是有待商榷的，因為我們在篩選尺寸變因的過程中排除了「塔高」、「棚底角」的可能影響程度。所以，嚴格說來，6.54 應該稱之為「相對較佳化」比值較為貼切。

伍、討論

- 一、為了力求實驗的再現性和可控制性，我們的實驗光源大多以鹵素燈進行模擬，然而鹵素燈的頻譜特性和自然光源並不全然相同；此點可能會造成本研究在類推上的限制。
- 二、我們的模型可能是因為尺寸太小、熱能不足的緣故，端口溫差平均只能達到 5°C 左右（真實版據載可達 70°C）。我們曾嘗試在扇葉軸上套接直流小馬達，希望可以發電，但因氣流太微弱，扇葉的扭力實在不足以驅動馬達；這是我們感到遺憾的，也是未來值得我們努力的目標。
- 三、回顧【實驗一—1】—「集熱板表面積」的實驗結果（0.6 m²組優於 1.0 m²組），實在和我們原先的認知差距太大。我們也曾懷疑：是不是扇葉製作上的誤差導致這樣「不合理」的結果？於是嘗試將 0.6 m²、0.8 m²、1.0 m²三組扇葉進行對調，不過，實驗結果仍然和原先的一致。
- 四、在【實驗二—2】—「中樞塔端口溫差對於太陽能塔的影響」的實驗中，我們原本打算利用冰塊加鹽來冷卻塔頂，試圖營造出更大的溫差條件。但實驗時便發現此構想並不可行，因為冰塊加鹽的冷卻方式降溫太快，會造成下沉氣流（扇葉逆轉），導致模型加熱後久久無法啟動。修正冷卻方式為冰水降溫後，實驗才得以順利進行，但管端溫差也只能增加到 7°C 左右。
- 五、【實驗二—3】用來操控塔頂氣流的直流鼓風機不能採斜向下吹或平吹塔頂的方式，否則也會產生上述的氣流沉降或擾動。
- 六、關於「最佳化比值」的問題，不同「集熱板半徑」、不同「塔徑」甚至不同「塔高」、「棚底角」這四種尺寸比值的配對組合有太多太多種可能，除非逐一去進行匹配、測試、比對，否則，我們很難保證不會出現另一組更優的「最佳化比值」。事實上，建築或工程設計的最佳化是一門研究、分析變項因果的大學問，我們也不確定這樣的檢證方法是否充分符合科學原則，只是抱著試一試的想法，看看能不能有什麼新奇的發現。日前，我們無意中在網路上找到一張 EnviroMission 公司所發布的未來版太陽能塔鳥瞰 3D 照片，從圖中標註的提示，你發現了什麼？……又是個耐人尋味的巧合！你說，是不是？



圖二十一、未來版太陽能塔鳥瞰 3D 模擬照片(彩色線條為自行標註)，原圖引用自：
<http://www.treehugger.com/renewable-energy/think-big-arizona-solar-tower-2x-taller-than-the-empire-state-building-will-produce-200-megawatts.html>

陸、結論

- 一、在塔徑固定的情形下，太陽能塔集熱板面積並非愈大愈好，應採取「適大化」的設計。
- 二、太陽能塔的塔徑 Φ 應與集熱板表面積大小相互匹配，才能使溫室內的熱氣流發揮最大的效能。
- 三、中樞塔內上升氣流的強弱和塔本身的高度呈現正相關；塔高愈高，愈有利於塔內氣流的快速流動。但當塔高超過一定高度時，上升氣流的增強幅度則趨於平緩。
- 四、集熱棚斜度（底角）加大，有利於熱氣流的升抬，但也可能同時加速溫室儲熱的釋放，導致持續運轉時間的縮短。
- 五、太陽能塔的入口間隙不宜過大，否則會不利於集熱且造成溫室內儲熱的快速散逸。
- 六、太陽能塔的塔內氣流正比於光照量的強弱。
- 七、太陽能塔的塔內氣流正比於中樞塔兩端口的溫度差。
- 八、太陽能塔的塔內氣流正比於中樞塔兩端口的氣壓差以及背風氣流的強弱。
- 九、中樞塔底安裝導流錐有助於溫室內熱氣流的升抬，使得塔內氣流更加流暢。以本模型而言，頂角 60° 及 150° 之導流錐為最適角。
- 十、中樞塔的管口設計以傳統的直管造型最佳，漸擴管造型次之。
- 十一、太陽能塔的集熱板鋪面以儲熱容量而言，採用顆粒層疊的方式是最佳選擇；以材

質而言，**孔隙結構**優於平滑結構；**交織結構或中空夾層結構**優於單層結構。

十二、綜合以上第六～十點結論，我們可以證明：太陽能塔的運轉除了取決於**光的穿透、吸收**之外，也和**熱的對流、輻射**等效應有著密切關聯。

十三、太陽能塔的溫室**集熱棚顏色若採透明偏紅或透明偏藍均可獲得較佳的熱效能**，若偏綠則溫室的熱效能會大打折扣。

十四、太陽能塔的尺寸有存在「最佳化 R/Φ 比值」的可能；在不考量太陽能塔高度和棚底角的影響下， **$6.54\sim 6.60$ 是尺寸設計上一個「相對合理」的 R/Φ 比值**。

柒、參考資料

- 一、王美芬（民 98、2）。國小自然與生活科技第六冊(五下)。康軒文教事業。
- 二、施惠（民 101、2）。國民小學自然與生活科技第八冊(六下)。南一書局。
- 三、牛山泉（2010、11）。圖解風力發電入門。世茂出版有限公司。
- 四、范振光（民 100、10、4）。熱氣發電塔 號稱供電 10 萬戶。聯合報，國際 A14 版。
- 五、比 101 還高的亞利桑那太陽能塔，一支可以發電 200 百萬瓦（2011、7、26）。取自：
<http://miketsai.fixy.com.tw/node/1945>
- 六、美欲建千米太陽能塔發電 供 20 萬戶使用（2008、7、4）。新華網。取自：
http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/news.xinhuanet.com/tech/2008-07/04/content_8487214.htm
- 七、美國擬建巨型太陽能塔 將成世界第二高建築（2011、7、28）。中奢網。取自：
<http://ep.chinaluxus.com/Ste/20110728/35256.html>

【評語】 080107

1. 題目取自媒體報導，能由外觀及簡略報導，進而自行設計內部構造，創意佳。
2. 能利用影像分析軟體，資訊技能佳。
3. 能提出及確認各項重要變因，分別進行變因控制實驗，考慮周詳。
4. 能由實驗結果得出最佳化結構，邏輯推理能力強。