

設施省能源技術之發展現況與展望

黃煥祺、李信宏、呂文斌

工業技術研究院 量測技術發展中心

摘要

自 1902 年開利博士(Willis Haviland Carrier)發明冷氣以來，熱泵技術即已存在並廣泛運用於建築空調。然而台灣農業氣候的特殊性與熱泵高昂的投資成本，造成農業人士持續對熱泵保持觀望的態度。為發展並推廣國內熱泵節能技術的運用，本研究進行：(1) 比較柴油熱風機與複合式加溫系統(熱泵為主、熱風機為輔)的冬季加溫成本。(2)加溫策略耗能比較。實測結果顯示，(1) 2011/01/01 00:00 AM ~ 2011/09/15 23:59 PM 期間，單獨採用柴油熱風機的溫室加溫能源成本 530.1 元/坪；採用複合式加溫系統的溫室加溫能源成本 216.9 元/坪，較前者省下 59.1%的溫室加溫能源成本。(2)建議依據盤床種類、灌溉方式，以及植株密度決定溫室加溫策略。

關鍵詞：氣源熱泵、蝴蝶蘭溫室、性能係數

1. 緒論

氣源熱泵具有結構簡單、施工方便、風險分攤，以及低運轉能耗等優點，適合推廣運用於蝴蝶蘭溫室以期節能減碳之效。然而氣源熱泵的投資成本約較柴油熱風機貴了 2~3 倍，同時存在著寒流期間熱泵 COP 值下降等疑慮，因此多數農民對於採用氣源熱泵作為溫室加溫的設施仍保持觀望的態度。

為了發展國內設施園藝的節能技術，同時消弭農民對氣源熱泵的疑慮，遂於 2010 年參考日本 Greenpackage 方案，在嘉義大學技藝中心 B 棟溫室建置複合式加溫系統進行實驗，期望藉由實際的架構與營運數據作為未來台灣設施園藝的設計參考。2011 年 NEPON 福田晴久社長參觀嘉義大學，對於進行中之溫室加溫成本實驗感到認同，慷慨捐贈 2 套氣-氣熱泵原型機並安裝於 A 棟溫室參與實驗。

因此，本文將分別說明：1.柴油熱風機與複合式加溫系統測試；2.熱泵溫室加溫策略耗能比較。

2. 實驗設備與方法

嘉義大學技藝中心 A/B 棟溫室屬於已經使用 10 多年的中古溫室，壁面以 C 型槽鋼支撐並披覆雙層塑膠薄膜以產生 10 公分的空氣間隔進行保溫。A/B 棟溫室栽種蝴蝶蘭小苗，原來皆使用柴油熱風機進行加溫，夜間溫度設定 24℃。溫室管理員、栽種作物、環境參數都屬同一人，適合進行對照比較。

表 1.A/B 棟溫室資料表

	A 棟	B 棟
長(m, 風扇/水牆方向)	32	32
寬 (m)	20	25
高(m, 地面至保溫膜)	2.5	2.5
面積(m ²)	640	800
坪數(坪)	193.6	242.0
座向(風扇/水牆方向)	西北/ 東南	西北/ 東南
等效表面積 (m ² , 不含地面)	900	1,085

為了紀錄加溫方式以及外部氣候造成 A/B 棟溫室耗能差異，使用一套美國 Onset

公司 ZW 系列無線資料蒐集系統，分別紀錄 A/B 棟溫室各項參數，作為後續分析的依據。資料參數如表 2。

表 2. 資料蒐集系統參數表

日期時間
室外溫度 (°C)
室外濕度 (%)
室外 PAR($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)
室內溫度 (°C)
室內濕度 (%)
室內 PAR($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)
營養液流量(gal)
消毒水流量(gal)
抽風扇電流(Amps)
內循環風扇電流(Amps)
熱風機電流(Amps)
熱泵電流(Amps)

2.1 複合式加溫系統節能測試實驗

表 3.A/B 棟溫室實驗條件與結果

	A 棟	B 棟
加溫設備	柴油熱風機	複合式加溫系統(柴油熱風機+氣源熱泵 7.5RT/套*3 套)
溫度設定	24°C	熱泵啟動溫度 24°C； 柴油熱風機啟動溫度 22°C
加溫策略	風管經由盤床下方將熱風導至溫室各處	風管經由盤床下方將熱風導至溫室各處
作物	蝴蝶蘭 1.5 吋小苗	蝴蝶蘭 1.5 吋小苗
加溫費用	530.1 元/坪	216.9 元/坪

本實驗保留 A 棟原有柴油熱風機加溫系統作為對照比較，溫度設定維持 24°C。B 棟溫室增設氣源熱泵共 3 套（千附實業股份有限公司出品，每套 7.5RT），形成以熱泵為主、柴油熱風機為輔的複合式加溫系統。熱泵啟動溫度設定為 24°C，柴油熱風機的溫度設定

改為 22°C。當夜間氣溫逐漸下降的時候，期望熱泵優先啟動進行加溫。在寒流來襲或熱泵不足以維持溫室氣溫 22°C 以上的情況下，柴油熱風機將啟動並提供熱量。

不論 A 棟柴油熱風機或 B 棟複合式加溫系統，皆以風管經由盤床下方將熱風導至溫室各處，希望在盤床與地面之間建立一個充滿熱空氣的腔體，再藉由熱空氣往上升的原理對作物進行均勻加溫。

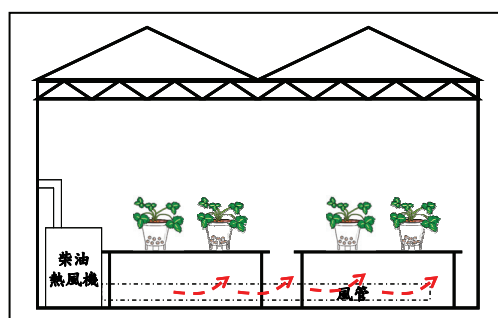


圖 1.A 棟溫室柴油熱風機加溫系統示意圖

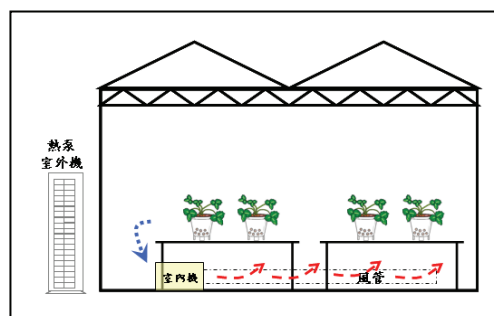


圖 2.B 棟溫室熱泵系統示意圖

擷取 2011/01/01 00:00 AM ~ 2011/09/15 23:59 PM 的 A/B 棟溫室油、電資料進行能源費用計算。其中，油價以平均柴油價格 27 元/公升估計，電價以 3 元/度作為計算依據。關於耗電量的計算，A 棟包含了熱風機；B 棟包含了熱風機與熱泵(室外機+室內機)。因為 A/B 棟溫室柴油熱風機共用一只油桶，無法分開統計耗油量，因此以耗油總量與 A/B 棟熱風機啟動時數進行分攤計算。

結果顯示，單獨採用柴油熱風機進行加溫的 A 棟溫室單位面積加溫能源成本 530.1 元/坪；採用複合式加溫系統的 B 棟溫室單位

面積加溫能源成本 216.9 元/坪，較 A 棟省下 59.1%。

2.2 加溫策略耗能比較實驗

表 4.A/B 棟溫室實驗條件與結果

	A 棟	B 棟
加溫設備	複合式加溫系統 (煤油熱風機+氣源熱泵 10RT/套 *2 套)	複合式加溫系統 (柴油熱風機+氣源熱泵 7.5RT/套 *3 套)
溫度設定	熱風機與熱泵整合型控制，維持溫室 24℃	熱泵啟動溫度 24℃；柴油熱風機啟動溫度 22℃
加溫策略	利用循環風扇在盤床上方將熱風導至溫室各處	風管經由盤床下方將熱風導至溫室各處
作物	蝴蝶蘭 1.5 吋小苗	蝴蝶蘭 1.5 吋小苗
熱泵 COP	4.50	4.58
注入熱量	3,340,371 kJ	6,229,148 kJ
表面積熱散失	3,711.52 kJ/m ²	5,741.15 kJ/m ²

A 棟溫室於 2011 年 9 月安裝 NEPON 所捐贈之複合式空調系統，共計氣源熱泵 (10RT/套) 2 套、循環風扇 8 台、煤油熱風機 1 台、CO₂ 生成機 1 台(實際運作僅熱泵與循環風扇，煤油熱風機與 CO₂ 生成機並未啟動)。至此，A/B 棟溫室皆以熱泵進行加溫。

為了比較 A/B 棟熱泵性能與溫室能耗，除了持續蒐集溫室氣候與能耗資料，也針對熱泵室內機組進行風量、回風溫度與出風溫度的測量與蒐集，並計算熱泵能源效率值 (coefficient of performance, COP)。

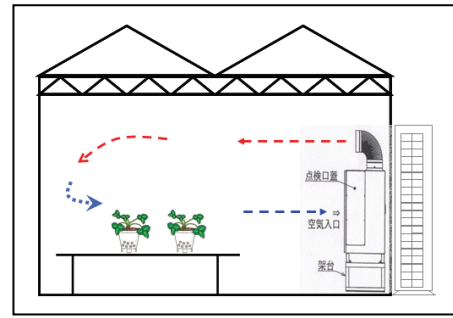


圖 3.嘉義大學 A 棟溫室熱泵系統示意圖

在 2012/03/24 00:00 AM ~ 2012/03/25 07:00 AM 期間，戶外溫度介於 13.1℃~18.6℃之間。A 棟熱泵與 B 棟熱泵 COP 值各為 4.50、4.58，顯示 A/B 棟熱泵性能接近。

$$Q_{evap} = \sum_i \frac{V_{chw} \times (T_{chwrt} - T_{chwt}) \times \rho_{wi} \times c_{pwi}}{60 \text{ sec/min}} \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{P_{ch}}$$

其中：

- V_{chw} : 出/回風流量 (LPM)
- T_{chwrt} : 回風溫度 (℃)
- T_{chsr} : 出風溫度 (℃)
- ρ_{wi} : 水的密度 ($i=1$); 空氣密度 ($i=2$)
- c_{pwi} : 水的比熱 ($i=1$); 空氣比熱 ($i=2$)
- P_{ch} : 總耗電 (KW)

進一步觀察兩棟溫室的總耗能，在戶外溫度 13.1℃~18.6℃的條件下，A 棟溫室注入熱量共 3,340,371 kJ，B 棟溫室注入熱量 6,229,148 kJ，亦即 A 棟溫室總耗能僅 B 棟溫室總耗能之 68.2%。

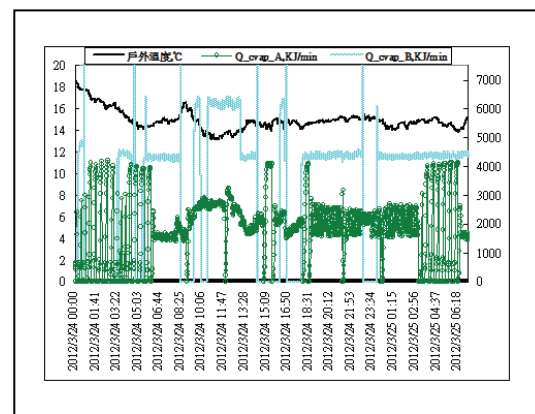


圖 4.嘉義大學 A/B 棟溫室能耗曲線圖

從 A/B 溫室能耗曲線可以發現，A 棟溫室熱泵具有變頻功能，部分時段(例如 06:44~08:25)處於穩定的比例控制狀態，然而大部分時間處於 on-off 控制的狀態，可能是溫度感測器與出風口距離過短，或者控制器 p-gain 過大造成震盪；B 棟溫室所採用的 3 套熱泵採用 on-off 控制，隨著溫室需求進行 3 段控制。

A/B 棟熱泵性能接近，但是 A 棟溫室總耗能僅 B 棟溫室總耗能之 68.2%。因此，並不建議單獨以熱泵主機 COP 值預期加溫系統的節能效果。由於 A/B 棟溫室仍然具有相同的管理員、栽種作物以及環境參數，而且資料蒐集期間 A/B 棟溫室皆以熱泵進行加溫，柴油熱風機並未啟動。因此從溫室能源動態平衡的角度來看，B 棟溫室總和熱散失($Q_{Glazing}$)較 A 棟為大。

$$Q_{Glazing} = \text{conduction loss} + \text{radiation loss} + \text{convection loss} \quad (2)$$

$$\text{conduction loss} = KA_w(T_{in} - T_{out})$$

其中：

K ：溫室批覆材料的熱傳常數

A_w ：溫室牆壁與屋頂面積

T_{in} ：溫室內部溫度

T_{out} ：溫室外部溫度

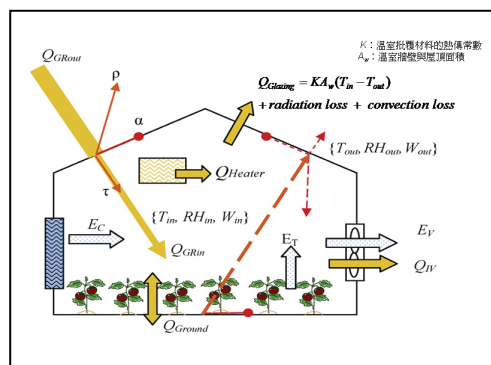


圖 5.溫室能源動態平衡示意圖

為了找出 A/B 棟溫室 $Q_{Glazing}$ 差異，以熱

像儀進行觀察，發現 A 棟溫室呈現熱分布均勻的現象，溫室各處溫度差異在 1℃ 以內；B 棟溫室熱分布呈現較不均勻的現象。進一步詢問關於 A/B 棟溫室蝴蝶蘭生長差異，溫室管理人員回答並無顯著差異。

由於 B 棟溫室在側牆、上方保溫膜，以及走道空間可以觀察到較高的熱輻射量，而盤床上方的作物則呈現較低的熱輻射。因此推斷，B 棟溫室擁有較高的室內外溫度差，造成較大的熱傳導散失。

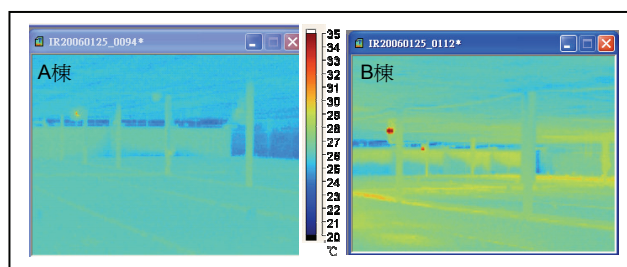


圖 6.A/B 棟溫室熱輻射影像圖

3. 結論

從複合式加溫系統節能測試的結果證實了以氣源熱泵取代柴油熱風機進行夜間加溫，可以省下 59.1% 的能源費用。同時，在實驗期間也發現由熱泵(電壓 380V)與熱風機(電壓 220V)所組成的複合式加溫系統因採用不同電源迴路，對於單一異常事件(例如機台故障、停電)具有較強的風險抵抗力。

在加溫策略耗能實驗中，從 A/B 棟溫室熱輻射影像圖可以發現，A 棟溫室的加溫策略是先以循環風扇建立一組均勻的循環風場，然後利用熱泵室內機上方出風的方式在循環風場的任一位置注入熱量，並藉由循環風場將熱量帶往溫室各角落。

而 B 棟溫室希望在盤床與地面之間建立一個充滿熱空氣的腔體，再藉由熱空氣往上升的原理對作物進行均勻加溫。然而熱空氣受到盤床、托盤與密植作物的阻擋，熱空氣無法均勻上升，造成溫室熱分布不均勻的現象。將此一想法對國內其他採用盤床下方加熱的溫室進行驗證，發現採用淹灌的溫室也有相同的現象；而部份採用澆灌且植株密度

約僅 5 成的溫室在適當地氣流擾動之下，溫室則呈現均勻加熱的效果。

未來，除了建議依據盤床種類、灌溉方式，以及植株密度決定溫室加溫策略，也建議溫室工程應該採用系統性 COP (System Coefficient of Performance)的觀念，清楚表達從熱源到植物的總合能源效率(包含熱泵、管路、空氣等熱能傳遞路徑)。

誌謝

本研究由行政院農業委員會科技計畫提供經費。研究期間承蒙嘉義大學與一心蘭園提供各種支援和寶貴意見，使本研究得以順利完成，特此一併致謝。

參考文獻

1. 蔡致榮、吳有恆。2011。農業設施節能技術與系統研發，<http://210.69.150.18:8080/>。
2. 2.NEPON 製品情報 . 網站：
<https://www.nepon.co.jp/new/gp/>
3. PJM Forward Market Operations. 2011. Energy Efficiency Measurement & Verification. PJM Manual 18B.
4. Hemming, S., and Bakker, J.C. 2008. Sustainable greenhouse design. Istanbul : Wageningen UR Greenhouse Culture, Presentation during International Trade mission The Netherlands to Turkey, Istanbul, 2008-11-24.
5. Weissel,A. and F. Bellosa. 2004. Dynamic Thermal Management for Distributed Systems. Proc. First Workshop Temperature-Aware Computer Systems.
- 6.Srinivasan, J. and S. Adve. 2003. Predictive Dynamic Thermal Management for Multimedia Applications. Proc. 17th Int'l Conf. Supercomputing, pp. 109-120.

Current Status and Future Outlook of Sustainable Greenhouse Technology

Chico Huang, Chih-Chun Lai and Wen-Bin Lu

Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute

Abstract

Heat pump is a well designed and correctly installed for building's cooling in Taiwan. But the high investment and specific culture difference keep growers away from heat pump. For the demonstration of heat pump in horticulture greenhouse, this project compares (1) running cost of a gas burner and a hybrid heating system that consist heat pump and gas burner; (2) heating strategies of greenhouses equipped with heat pumps. The experiment results show that (1) the running cost is NTD160.4/m² for a gas burner and NTD 65.6/m² for a hybrid heating system during 2011/01/01 00:00 AM ~ 2011/09/15 23:59 PM. (2) Optimal heating strategy should base on types of moving bench, irrigation system, and plant density.

Keywords: Air source heat pump, *Phalaenopsis* greenhouse, coefficient of performance