

依據熱舒適模型之空調節能控制技術

一、摘要

空調節能控制技術以 ASHRAE 新有效溫度(Effective Temperature, ET*)做為人體熱舒適評估指標，並以符合台灣舒適區間之 27.5ET*作為基準，使用最小焓差法來進行控制，透過控制器主系統和數個具有無線傳輸功能的子系統作為硬體架構，主系統負責接收溫濕度感測器資料，並透過演算法計算出該場域適合之溫溼度，再以紅外線控制器進行空調設備節能控制。目前已應用在國內某知名連鎖鞋業以及咖啡店進行實際商業場域節能效益驗證，並在室內環境維持在 26°C 以上、濕度 50%-80%、CO₂ < 1,000ppm 之下空調設備節能達 28% 以上。

二、熱舒適模型

ASHRAE 目前採用新有效溫度(ET*)做為人體熱舒適評估指標，此指標考量五項參數：溫度(°C)、濕度(%)、風速(m/s)、衣著量(clo)與活動量(met)，在風速、衣著量與活動量相同的情況下，同樣的新有效溫度會有同樣的冷熱感受。新有效溫度為不同溫度與濕度的組合，例如新有效溫度 26 度時等於溫度 26°C、相對濕度 50%；也等於溫度 25°C、相對濕度 72%。在這兩種不同的溫濕度組合下，人們會有同樣的冷熱感受。ASHRAE 以此為基礎，建立了不同環境條件下人們會感到舒適的區間[1]。但有許多研究指出，ASHRAE 提出之熱舒適區間不太適用於熱帶與亞熱帶地區。如圖 1 所示，Q. J. Kwong 等人整理了數篇研究人體熱舒適區間的論文，結果顯示大部分都不符合 ASHRAE 所定義的熱舒適區間[2]。

Year	Researcher (s)	Location	ASHRAE comfort range
1993	Tham [68]	Singapore	Yes
1994	Yang and Su [74]	Taiwan	No
2000	Khedari et al. [18]	Thailand	No
2004	Yamtraipat et al. [25]	Thailand	No
2007	Aynsley [55]	Australia (Brisbane and Townsville)	Yes
2007	Hwang et al. [8]	Taiwan	No
2008	Wan et al. [32]	Southern China	No
2008	Yang and Zhang [28]	Southern China	No
2012	Chiang et al. [76]	Taiwan	No

圖 1 熱舒適區間比較

(資料來源：Q. J. Kwong et al., Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review, Energy and Buildings 68 (2014) 547–557.)

圖 2 為 R.L. Hwang 等人調查台灣人熱舒適區間與 ASHRAE 熱舒適區間之差異，調查內容包含 10 間自然通風與 26 間使用空調之大學教室，共 1294 組樣本數據，其中僅有 12% 位於 ASHRAE 熱舒適區間，可見台灣人感到舒適的範圍與 ASHRAE 的定義有很大的不同[3]。有鑑於此，本計畫決定採用 R.L. Hwang 等人研究之結果。如圖 3 所示，在 80% 的人員可接受的條件下，台灣人感到舒適之區間為 24.2ET*~29.5ET*，比起 ASHRAE 定義之 23.2ET*~26.5ET* 上限高出了不少。這是因為台灣人已習慣高溫高濕的亞熱帶氣候，對於溫度上限容忍度較歐美國家高。

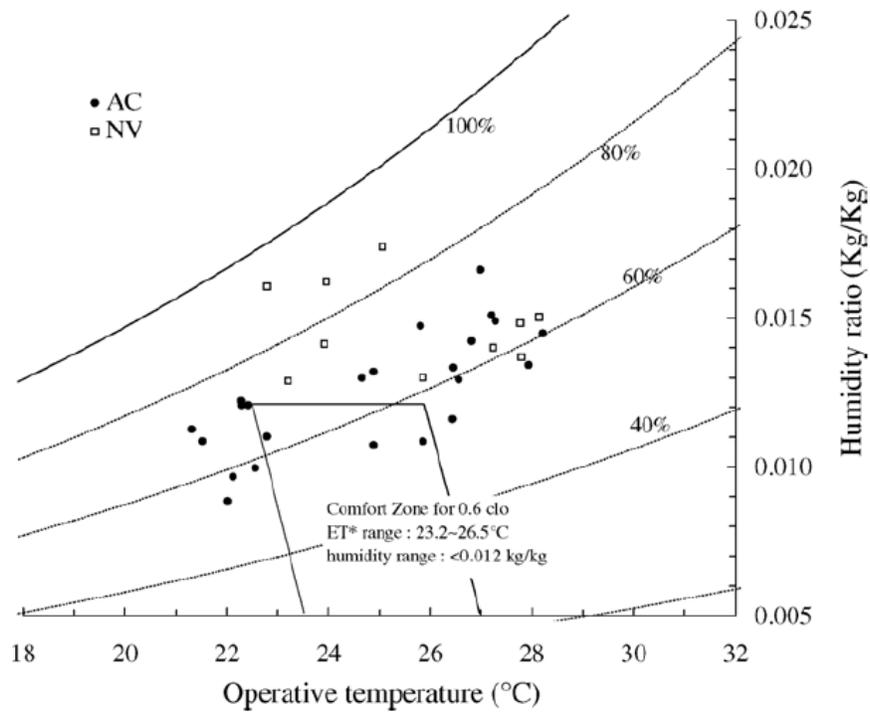


圖 2 台灣與 ASHRAE 熱舒適區間比較

(資料來源：R.L. Hwang et al., Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan, Journal of Energy and Buildings 38 (2006) 53–62.)

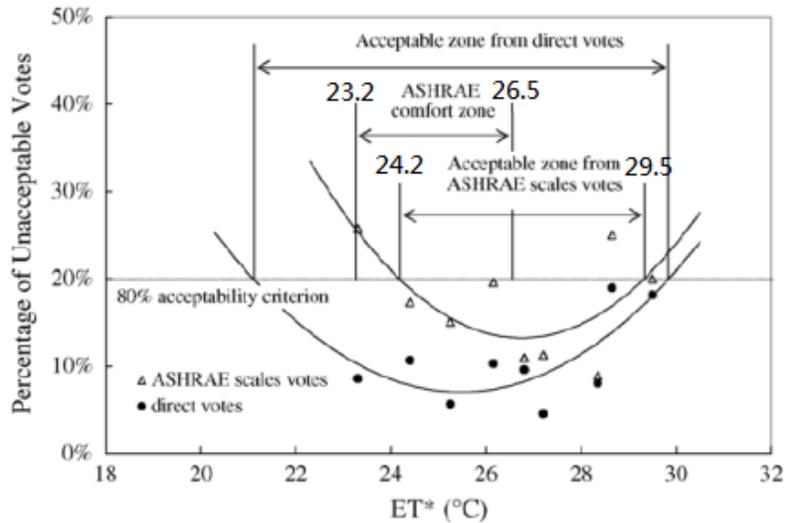


圖 3 台灣適用之熱舒適區間

(資料來源：R.L. Hwang et al., Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan, Journal of Energy and Buildings 38 (2006) 53–62.)

R.L. Hwang 等人的研究也提出新有效溫度與著名的熱舒適評估指標 PMV(Predicted Mean Value)之間的關係，如式 1 所示。當 PMV 等於零時，表示人們感到不冷也不熱，最為舒適。以式 1 進行換算，得出 PMV 等於零時相對應的新有效溫度為 27.5ET*，將以此做為控制目標新有效溫度。

$$PMV = 0.2805ET^* - 7.717 \dots \dots \dots (式 1)$$

27.5ET*相對應之溫濕度組合可由 A. Auliciems 等人提出之公式計算，如式 2 所示，其中 w 為絕對濕度(g/kg)，T_{db}為乾球溫度(°C)。計算出溫濕度組合如表 1 所示，將以這些溫濕度組合做為後續控制之目標溫濕度。

$$w = -3.220612 \times (T_{db} - 31.0464) \dots \dots \dots (式 2)$$

表 1 27.5ET*溫濕度組合

乾球溫度(°C)	相對濕度(%)	絕對濕度(g/kg)
25.0	97	19.47
25.5	87	17.86
26.0	78	16.25
26.5	69	14.64
27.0	59	13.03
27.5	50	11.42
28.0	43	9.81

(資料來源：本計畫整理)

三、最小焓差法

空調設備冷卻空氣的過程實際上是一種減少空氣焓值(Enthalpy)的過程，空氣的焓值可由式 3 計算，其中，h 為焓值(kJ/kg)、h_a為乾空氣之焓值(kJ/kg)、T_{db}為乾球溫度(°C)、w 為絕對濕度(kg/kg)。

$$h = h_a + w \times h_w = 1.006 \times T_{db} + w \times (2501 + 1.805 \times T_{db}) \dots \dots \dots (式 3)$$

冷卻空氣過程中降低的焓值越少，或是說前後焓差越小，空調設備能耗就越

低。本計畫基於此概念，使用最小焓差法來進行控制。透過比較27.5ET*之各溫濕度組合以及實際量測點之溫濕度組合，找出焓差最小的狀態點，做為目標控制點。控制邏輯如圖 4 所示，為符合目前國內法規之空調設定 26°C 以上之規定，在控制邏輯中僅設定 27.5ET*位於乾球溫度 26°C-28°C 的點作為控制依據，如圖 5。舉例來說，假設目前環境下量測狀態點乾球溫度為 27°C、相對濕度 65%，經計算後得知 27.5ET*溫濕度組合中與目前環境狀態焓值相差最小的點為 26.5°C、69%，控制器便會以 26.5°C、69% 為目標點進行控制。

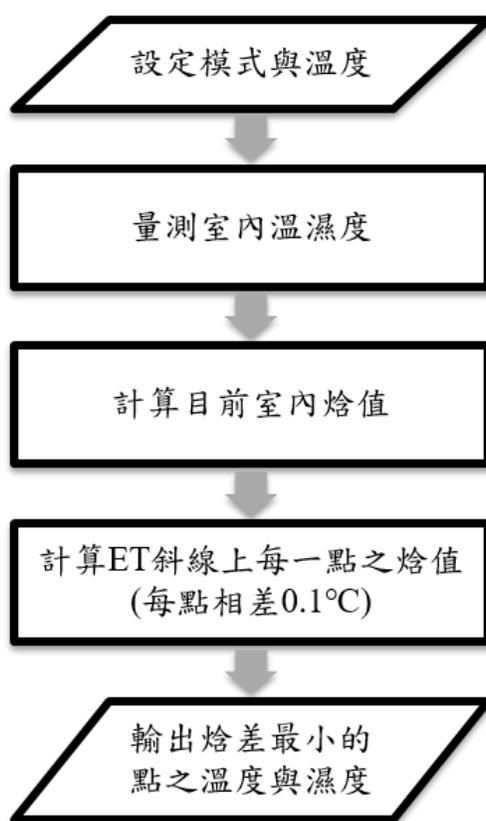


圖 4 最小焓差法控制邏輯

(資料來源：本計畫繪製)

Psychrometric Chart 與 27.5ET*

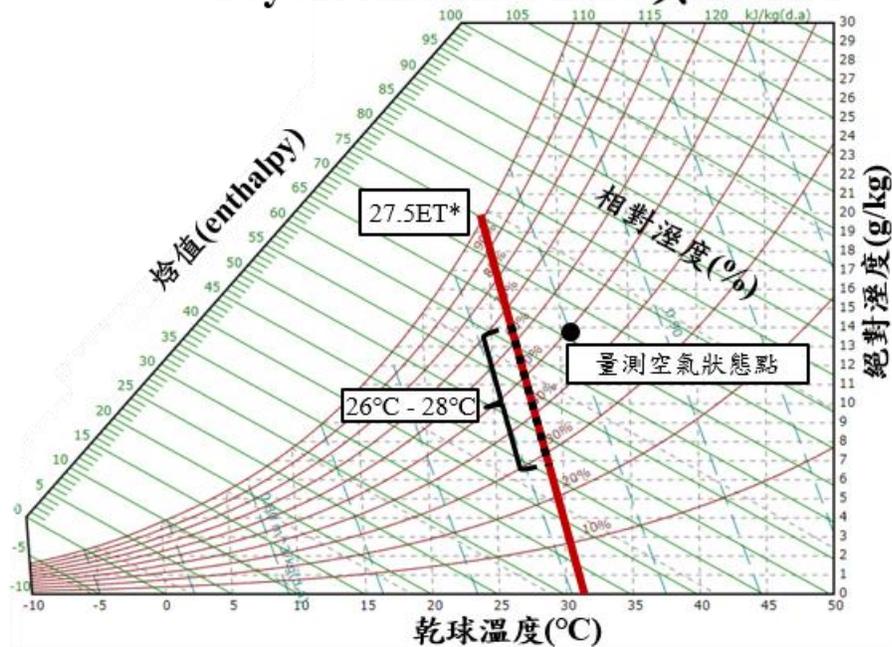


圖 5 最小焓差法示意圖

(資料來源：本計畫繪製)

四、小型空調智慧溫控器系統

智慧溫控器含有控制器主系統和數個具有無線功能的子系統組成，其相互通訊為 2.4G 無線傳輸。控制器主系統內建 Wi-Fi 傳輸模組，接收溫濕度感測器與空調機耗電資訊並上傳至雲端資料庫。智慧溫控器的硬體架構有控制器主系統、空調控制器模組、溫濕度感測器與三相電表模組如圖 6 所示。控制器主系統使用 ARM Cortex-M3 之 32 位元高性能微控制器為主要處理器，同時並搭載多功能介面之 ARM Cortex-M0 作為感測器管理，可達到多種感測器與多種週邊聯結功能。智慧溫控器的感測器規格，溫度感測誤差範圍 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ；濕度感測誤差範圍 $\pm 3\%$ ；二氧化碳濃度偵測範圍 0~3000ppm 誤差範圍為 $\pm 5\%$ ；

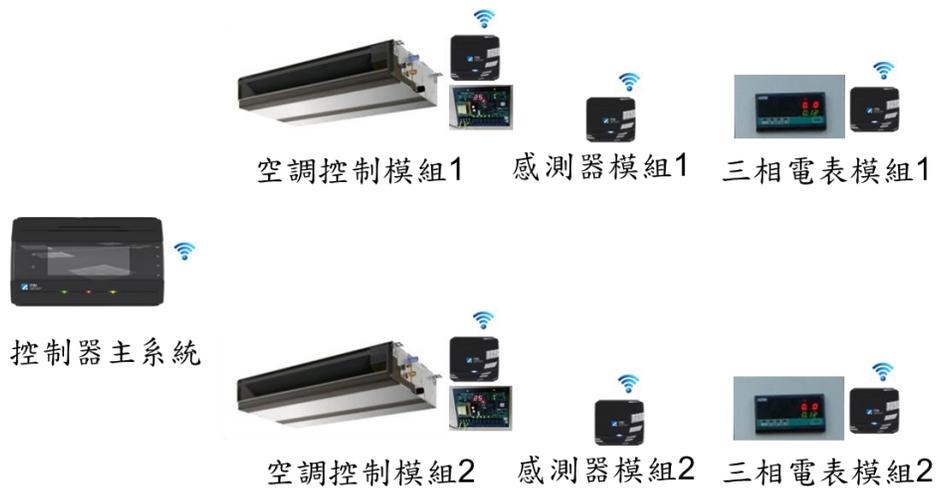


圖 6 智慧溫控器的硬體架構圖

(資料來源：本計畫整理)

五、實際場域節能效益驗證

空調節能控制技術目前已實際於兩類場域進行節能效益驗證，其一為辦公室類型場域，另一種為連鎖小型商業場域，並以一天控制一天不控制的方式作為實驗組以及對照組，除針對所有測試日期之平均用電量進行驗證外，亦挑選出外氣較為相近之兩日進行比對其節能效益。

目前於工研院中興院區 62 館之一辦公室作為驗證節能效益之實際場域，其場域設備與溫控器配置圖如圖 7 所示，本辦公室主要有一空調室外機連接兩組空調室內機，因此於此場域裝設一溫控器主系統以及紅外線子系統與感測子系統各兩組，詳細設備清單列於表 2。

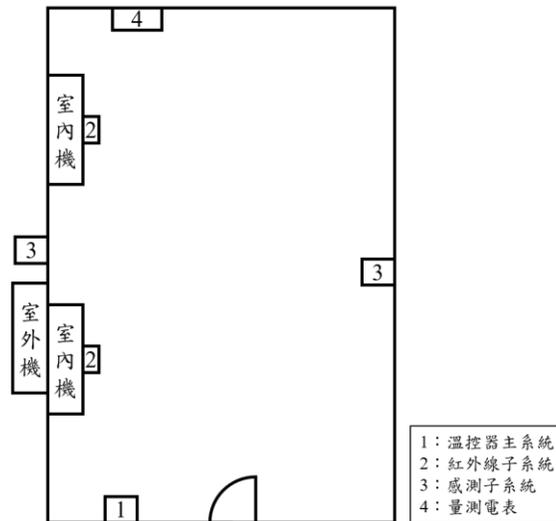


圖 7 辦公室設備配置示意圖

(資料來源：本計畫繪製)

表 2 辦公室場域設備清單

名稱	型號	數量	功能
溫控器主系統	本計畫開發	1	量測 CO ₂ 濃度，將資料傳輸至雲端資料庫，並經由演算法計算後下達控制指令給紅外線子系統。
感測子系統	本計畫開發	2	量測室內外溫溼度並回傳給溫控器主系統。
紅外線子系統	本計畫開發	2	接收溫控器主系統指令以控制空調機設定溫度。
電功率計	ADTEK MWH-10A	1	量測空調機耗電量並回傳至主系統。
空調室內機	HITACHI RAS-50NB	2	
空調室外機	HITACHI IPX0	1	

(資料來源：本計畫整理)

此場域於 107 年九月第二旬之上午 10:00 至下午 17:00 進行測試，其測試結果如下表 3 所示，有進行控制的 6 天依據本計畫所設計之演算法將室內溫度維持在 26°C 以上已符合有效溫度 27.5*之舒適範圍，其空調設備總用電量為 19.45kWh，每日平均用電量約為 3.2kWh；未進行控制之 4 天則將空調設定溫度固定在 24°C 以模擬一般辦公室之空調使用習慣，空調設備總用電量則為 18.15kWh，每日平均用

電量約為 4.5kWh。依據上述測試時間內所測得之空調平均節電量約為 28.6%。於測試數據中選擇外氣平均溫度較接近的 9 月 12 日、9 月 14 日呈現其實際量測之數據，其當日之測試數據如下圖 8 所示。

表 3 工研院 62 館辦公室場域實際節能量測結果

模式	日期	外氣均溫 (°C)	外氣均濕 (RH)	室內均溫 (°C)	室內均濕 (RH)	空調總用電 (kWh)
有控制	9/11	27.5	70.7	26.2	74.3	2.87
無控制	9/12	27.0	84.8	24.5	70.4	4.06
無控制	9/13	28.5	72.7	23.9	70.1	4.58
有控制	9/14	27.0	78.5	26.9	71.9	2.32
有控制	9/16	29.1	71.4	26.6	72.4	3.60
有控制	9/17	29.2	79.4	26.4	76.8	3.77
無控制	9/18	28.4	85.0	24.0	74.5	4.40
無控制	9/19	29.8	72.3	24.4	67.5	5.11
有控制	9/20	27.6	63.4	26.2	59.7	3.17
有控制	9/22	28.4	79.1	26.3	71.2	3.72

(資料來源：本計畫整理)

另一實驗場域選用開放型小型商業店鋪，空間約 22 坪，場域配置如圖 9 所示，每日營業時間由 12:00 到 22:00，該場域裝有 2 台吊隱式空調機。空調控制器模組 1 與 2 調整空調機 1 與 2 的溫度設定值。溫濕度感測器 1 與 2 置於靠近櫃台與大門的兩側牆上，擷取空調機附近的溫濕度值。三相電表模組 1 與 2 放置於配電盤附近，擷取空調機 1 與 2 的耗電量。使用最小焓差控制器並實施群控將場域溫度控制到設定值並與前一年同月比較。

實驗結果顯示感測器 1 與感測器 2 的每日平均濕度如圖 10(a)與圖 10(b)所示。6 月份感測器 1 平均濕度於 2017/2018 年是 82.3/74.4%，所以 6 月濕度減少 7.9%。7 月份感測器 1 平均濕度於 2017/2018 年是 81.6/72.8%，所以 6 月濕度減少 8.8%。空調機 6 月、7 月每日耗電量如圖 11(a)與圖 11 (b)所示。空調機 6 月份日平均耗電量於 2017/2018 年是 81.7/57.2 kWh，所以 6 月節能率為 30.0%。空調機 7 月份日平均耗電量於 2017/2018 是 80.3/58.2 kWh，所以 7 月節能率為 27.5%如表 4 所示。

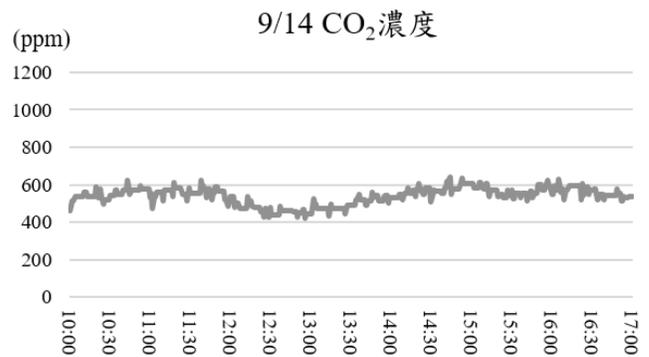
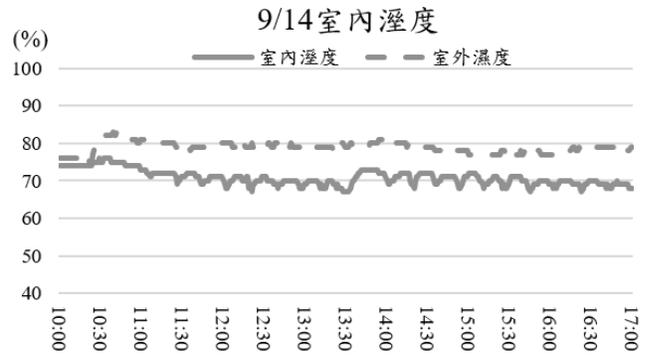
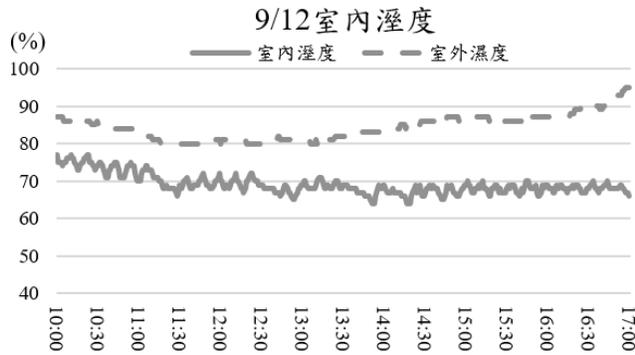
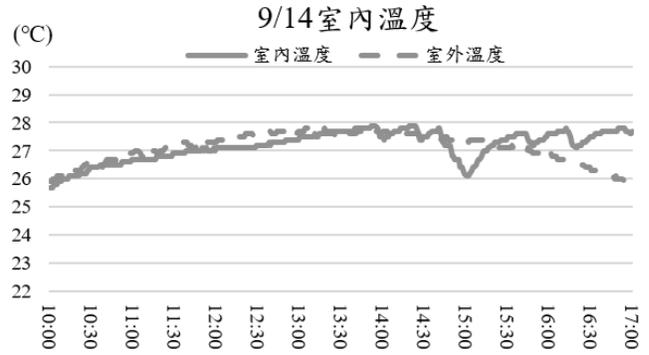
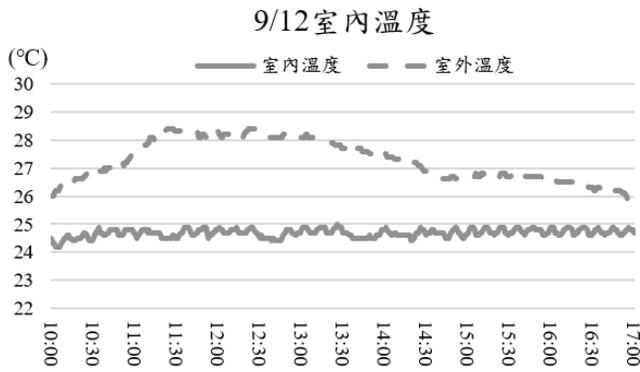


圖 8 辦公室測試場域 9/12、9/14 室內量測數據

(資料來源：本計畫整理)

表 3 感測器 1 與感測器 2 的 6 月與 7 月份平均濕度

	感測子系統 1 平均濕度(RH)	感測子系統 2 平均濕度(RH)
2017/6	82.3%	74.6%
2018/6	74.4%	76.0%
	溼度降低 7.9%	
2017/7	81.6%	73.5%
2018/7	72.8%	76.3%
	溼度降低 8.8%	

(資料來源：本計畫整理)

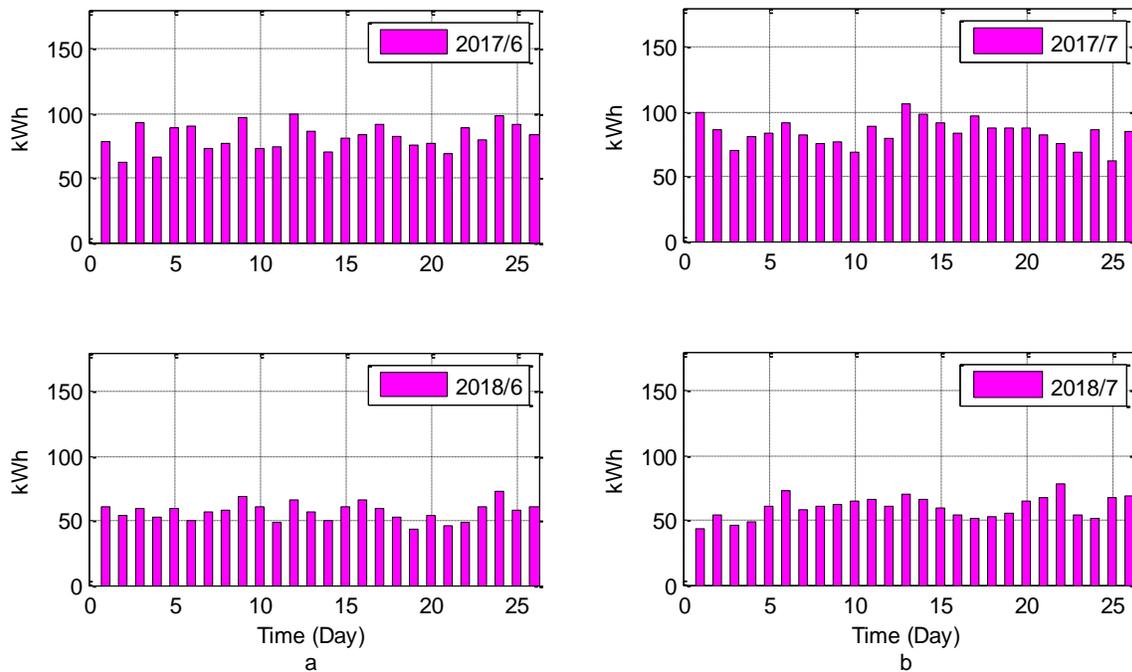


圖 11 空調機每日耗電量(a) 6 月與(b) 7 月

(資料來源：本計畫整理)

表 4 空調機 6 月與 7 月份日平均耗電量

	空調總用電量 (kWh)	日平均用電量 (kWh)
2017/6	2125.1	81.7
2018/6	1486.7	57.2
	節電 24.5kWh (節能率 30.0%)	
2017/7	2088.7	80.3
2018/7	1513.8	58.2
	節電 24.5kWh (節能率 27.5%)	

(資料來源：本計畫整理)

六、結論與建議

目前已於國內知名連鎖鞋業以及工研院 62 館辦公室完成空調節能控制驗證，於場域中裝設溫控器並依據室內即時濕度值進行空調舒適控制，並在室內溫度 26 °C 以上、CO₂ < 1,000 ppm 的控制下達節電量 22% 以上。目前僅針對小型商辦空間進行節能效益評估與驗證，並以小型空調如一般分離式或吊隱式空調室內機做為控制對象，該類型之空調皆具有紅外線無線控制之功能。未來亦可針對中央空調系統之商辦建築大樓，進行各空間之舒適節能控制，以創造更高效益。

七、參考文獻

1. ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, "Thermal Environment Conditions for Human Occupancy," Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineer Inc, 2010.
2. Q. J. Kwong et al., "Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review," Energy and Buildings 68, pp547–557, 2014.
3. R.L. Hwang et al., "Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan," Journal of Energy and Buildings 38, pp53–62, 2006.