

# 以溫濕度動態模式設計實現一混合控制系統 適用於嫁接苗癒合室內模擬環境控制

**Using the Temperature-Humidity Dynamic Model to  
Design and Implement a Hybrid Control System  
Suitable for Use in Simulated Environmental Control  
in an Acclimatization Chamber of Grafted Seedlings**

國立宜蘭大學  
生物機電工程學系  
教授

邱奕志

Yi-Chich Chiu

國立宜蘭大學  
生物機電工程學系  
副教授

楊江益

Chiang-Yi Yang

國立宜蘭大學  
生物機電工程學系  
碩士班學生

李柏緯

Po-Wei Lee

國立宜蘭大學  
生物機電工程學系  
教授

周立強\*

Li-John Jou

## 摘要

本研究以混合控制系統為控制架構，以空氣熱力性質、濕空氣線圖及質能平衡論點為理論基礎，建立一泛用型室內溫濕度動態行為模型，結合片段線性函數及離散擬合論點再整合至混合式邏輯動態系統，採用模態時間作為數位時鐘輸出實現一具時變性之仿真控制器，對一連續系統進行控制。在控制法則中為解決溫濕度環境控制過程中所衍生的多目標衝突問題，本研究整合物理定律、邏輯規則及操作限制，演繹嫁接苗癒合室內溫濕度環境有限狀態機。運用布林代數演算及線性不等式之併用方法定義控制系統中輸出操作機制，將溫濕度環境控制程序中存在的複雜邏輯規則以有系統方式轉譯為 LabVIEW 程式編程，建構嫁接苗癒合室溫濕度環境之虛擬儀錶控制系統。本研究根據 2002 年發表歷史資料，採用當時的外界溫濕度條件及溫溼度環境操作程序(條件序控法)模擬嫁接苗癒合養生室之溫溼度歷程與用電情況之控制結果。在系統模擬準確性驗證中，對照已發表研究中夏、冬及春季溫濕度環境調控試驗與本研究模擬之結果可得兩者之間的趨勢變化一致。在此模擬系統評估部分，夏、冬及春季的用電量模擬結果顯示本研究提出之環境控制程序及輸出操作機制下之用電量相較於原調控操作各減少 24%、37% 及 29%。本研究確信在設施建造或改建擴充之前運用此虛擬儀表控制技術可實現嫁接苗癒合室內溫濕度環境控制的仿真分析，並由模擬的控制結果及用電量情況作為比較評估，可降低系統建構過程的開發成本、時間及錯誤。

\*通訊作者，國立宜蘭大學生物機電工程學系教授，26047 宜蘭縣宜蘭市神農路一段 1 號，ljou@niu.edu.tw

關鍵詞：溫濕度環境控制，有限狀態機，嫁接苗，混合控制系統

## ABSTRACT

This study adopts a hybrid control system as a modeling scheme for a universal type of indoor temperature–humidity dynamic model. It is based on mass–energy equilibrium principles, the properties of air, and psychrometric charts. In the model, a combination of piecewise linear functions and discrete approximation theory are integrated into a mixed logical dynamic system to implement a time-variant emulating controller in order to approach a continuous system by using the output of a digital clock to simulate real-time behavior. To solve multi-objective conflict control problems arising from temperature–humidity environmental control procedures in the control rules, this study integrates physical laws, logic rules, and operational constraints to deduce the temperature–humidity environment in the form of a finite state machine for an acclimatization chamber for grafted seedlings. With the combined use of a Boolean algorithm and linear inequalities to define the operational mechanism for the output of the control system, the complex logical rules underlying temperature–humidity environmental control procedures are systematically transformed into compiled LabVIEW programming to construct a virtual instrumental control system for the temperature–humidity environment in an acclimatization chamber for grafted seedlings. Based on a study published in 2002, this study adopts current outdoor climate conditions and temperature–humidity environmental operating procedures (the condition-sequence control method) to simulate the control outcome of temperature–humidity processes and power consumption in an acclimatization chamber for grafted seedlings. To verify the precision of the simulated control system, the results of temperature–humidity environmental control experiments in summer, winter, and spring from the published study are compared with the simulated results from this study that display the corresponding trends. Compared with the results of the published study, the results for the simulated control system show power consumption reductions of 24%, 37%, and 29% in summer, winter, and spring (autumn), respectively, using the environmental control procedures and output operational mechanisms developed in this study. This study confirms that virtual instrumental control techniques can be used to implement the emulation analysis to achieve temperature–humidity environmental control in an acclimatization chamber for grafted seedlings before expansion or construction of the structure. The simulated control outcomes and power consumption can be used to reduce development costs, time, and errors in systemic construction procedures in comparison to other methods of evaluation.

**Keywords:** Temperature-humidity environmental control; Finite state machine; Grafted seedling; Hybrid control system.

## 一、前 言

古云：「移花接木」，正是過去農業為了增加作物對於不同土壤、環境與病害的耐受性，或是改變作物生理提高產量所發展嫁接技術的寫照。近年來由於蔬果苗嫁接裝置自動化的蓬勃發展，其嫁接成功率與固著率皆達 90%以上，使得在日本、韓國及台灣等地將嫁接苗栽種於溫室及田間已相當普及(Chen *et al.*, 2010)。綜觀嫁接後存活率、生長品質及產量，其影響因素不單僅限於對於各種植物生理配合(接穗及根砧)之研究，連帶地嫁接裝置開發與設計及嫁接術後癒合期環境控制技術更是一項關鍵程序。

在嫁接後癒合環境管理結合自動化技術案例中，邱等(1999)設計實現提供蔬菜嫁接苗癒合養生裝置，以提高西瓜、番茄苗嫁接後癒合存活率及日後馴化用途；周等(2002)根據濕空氣熱力特性配合空調原理，設計並驗證一嫁接苗癒合養生室之環境控制系統；張等(2003)針對富寶二號品種之西瓜進行嫁接苗癒合其環境條件之進行癒合品質以及生育狀況評估研究，其結果顯示經由調整室內環境可提高嫁接苗存活率，並使嫁接苗品質較佳；Jou *et al.* (2005)結合空調程序與濕空氣原理，以布林代數演算法實現嫁接苗癒合室之溫濕度聯控設計，相較於傳統覆蓋式棚架在嫁接後癒合環境管理上，該研究驗證可提高嫁接苗術後癒合存活率。綜合上述所論，自動化環境控制技術運用於作物栽培環境管理，是可以調節作物生長期各種目標需求及穩定作物品質及產量，在商業應用上也可達到調節產期及穩定市場價格之效果。

在自動化控制系統沿革，Stiver *et al.* (1996)提出一混合控制系統模型，以邏輯式離散事件系統(Logical Discrete Event System, LDES)擬合方法設計一混合控制動態系統(Hybrid Control Dynamic System, HCDS)，該系統模型主要以連續與離散事件系統組成，透過介面進行資訊相互溝通。Vassilyev (1997)也提出以邏輯方法分析及模擬離散時間下受控系統並應用至即時控制及自動機之動態非線性分析。Bemporad and

Morari (1999)提出可以建立一以非時變混合式邏輯動態系統(Mixed Logical Dynamic System, MLDS)架構為基礎採用模態時間作為數位時鐘輸出的具時變性之仿真控制器，能發展成一有限狀態機(Finite State Machine, FSM)對真實連續系統調控。

然而過去設施農業環境控制技術主要將各環境因子及設備交互作用下所產生的物理行為視為黑盒子系統，對於系統內能源使用考量甚低，僅偏重功能導向為目標的被動式控制策略來解決問題，且皆必須在實體建造完成後投入大量時間進行操作調整與電量消耗數據測試分析，才能了解設施內部運作狀況歷程及控制結果。對於不同實務案例(設施、環控設備及操作條件)的應用上皆必須重新建立測試數據，最後可能面對實際操作結果是不適當，形成一種資源(成本)浪費的風險問題。隨著國際間環保公約組織及環保政令愈趨嚴格，使得產業及消費者對於碳足跡及食物里程等環保意義已日趨重視(陳等，2011)。過去在設施環控發展中所使用的舊型設備及調控策略皆無法滿足當今對能源使用效能的規範，並且於經營管理方面也因為能源耗費在成本佔比過高，降低該產業發展的經濟效益。

歸納上述原因，本研究擬以濕空氣線圖(馮與方，1986)作為理論基礎、併用空氣調節控制程序與質傳、熱傳能量論點，結合 2012 年 Zeng 等提出之設施室內溫濕度動態質能平衡方程組，建立一泛用型室內溫濕度動態行為模型。在環境控制法則定義中採用邏輯式離散事件系統(Logic discrete event systems, LES)演繹一室內溫濕度環境之有限狀態自動機，而系統輸出機制則以布林邏輯及線性不等式方式併用，作為描述溫濕度聯結控制程序中複雜邏輯規則，並以系統化方式轉譯為 LabVIEW 程式編程實現主動式儀錶模擬控制技術。最後導入硬體規格及設備容量參數進行模擬控制，根據當下溫濕度環境及對應環控操作預測未來狀態歷程。

本研究於此階段將擷取過去歷史資料文獻(周等，2002)中外氣溫濕度條件，第一步驟以該文獻之調控策略重現溫溼度歷線控制結果及能

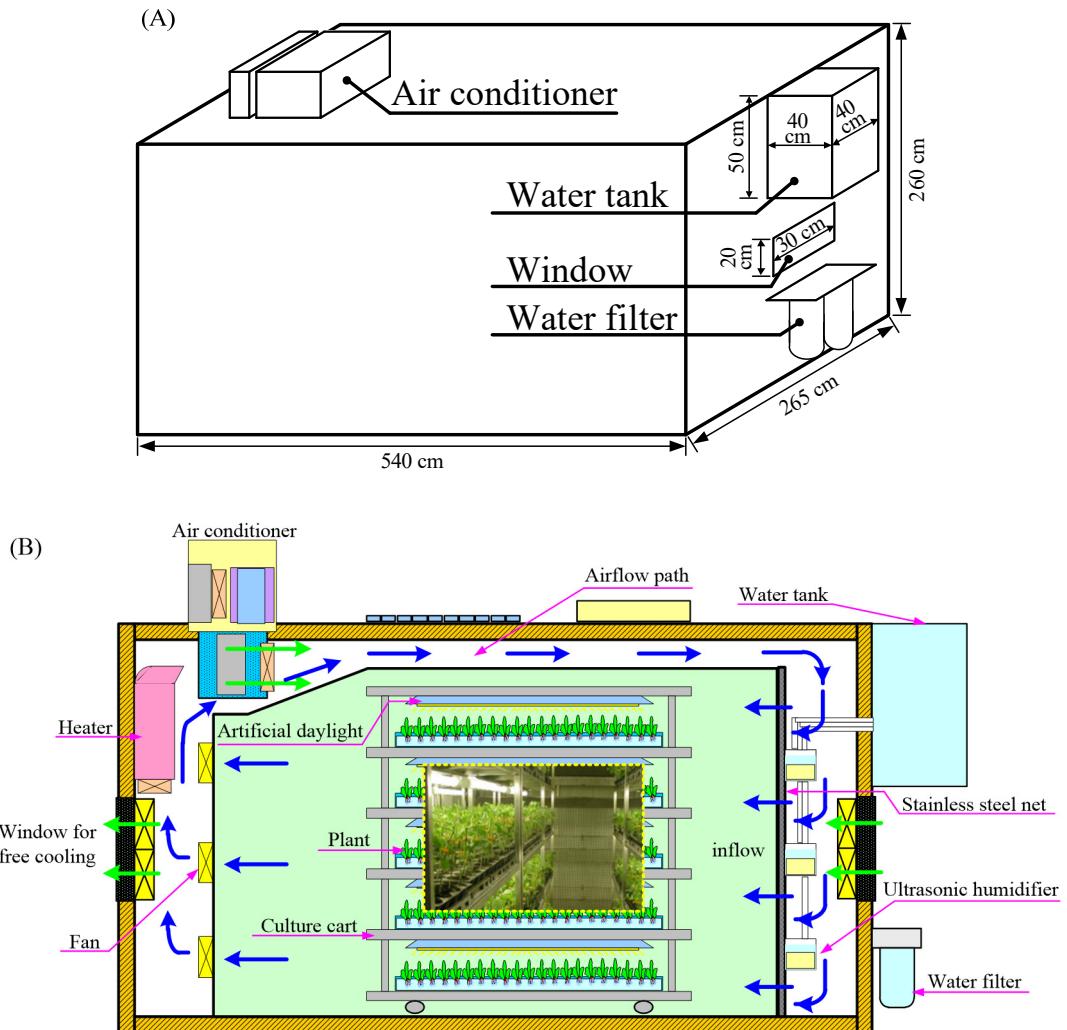


圖 1 嫁接苗癒合室之(A)幾何尺寸立體圖及(B)硬體配置側視圖

源消耗情形，作為本系統預測及實測之仿真度及等效性模擬驗證，第二步驟則根據該論文之外氣條件配合本文提出之調控策略模擬溫溼度歷線控制結果及用電量情況作為對照組評估此系統。

## 二、材料與方法

### 2.1 控制標的物

本研究之控制標的物為嫁接苗癒合室，圖 1A 為其幾何尺寸立體圖，室內容積約  $30.576\text{ m}^3$

( $5.2\text{m} \times 2.45\text{m} \times 2.4\text{m}$ )，面積  $12.74\text{ m}^2$  (約 4 坪)，室內可放置 9 部 5 層架台車及每層可放置 5 只苗盤。每一只苗盤約 70 格，每次可同時進行約 19,000 株苗的癒合管理。每批嫁接苗在癒合室內留置 3 天，使嫁接部位傷口進行初步癒合，待嫁接苗存活後，再移至田間馴化管理。圖 1B 為嫁接苗癒合室硬體配置側視圖，由於嫁接苗癒合室係以 10 公分厚之冷藏庫改裝建置，基本上外界對於室內之熱交換現象在此甚低可視為零，而室內溫濕度擾動因素僅考慮來自人工照明、電機設

表 1 嫁接苗癒合室之環控設備容量規格

名稱	功能	規格
加熱器	降濕加溫	電源：1ψ220V/60HZ，消耗電功率：2000W。
循環扇	空氣循環	電源：1ψ220V/60HZ，4 吋可調速風扇 12 只，消耗電力：每只 17W 共 204W。
抽排風扇	空氣混合	電源：1ψ220V/60HZ，消耗電力：140W。
加濕器	加濕降溫	超音波加濕振盪子，18 個，電源：1ψ110V/60HZ，總消耗電力：270W，噴霧量：每組 0.5 L/hr 共 9 L/hr。
冷氣機	除溼降溫	東元冷凍機，電源：1ψ220V/60HZ，消耗電力：2250W，排熱能力：5000 J·sec <sup>-1</sup> ，除濕率：3400 cc/hr
植物生長燈	人工光源	旭光牌(FL-40SBR/38)，電源：1ψ110V/60HZ，消耗電力：40W/盞(單管)，25 盞。

備熱散失及植物生理因素。室內設置風路，藉由內循環扇調整風速及改變數量位置，使室內空氣流速不超過 0.2 m/s 之基準作為最佳循環並確保室內溫濕度是均勻混合(邱等，1999)。本研究之嫁接苗癒合室環控設備包含加熱器、循環扇、抽排風扇、加濕器、冷氣機及植物生長燈，可由冷氣機、加濕器、抽排風扇及加熱器進行各項環控組合操作以調整室內溫濕度環境，亦能由抽排風扇及換氣門之組合操作導入室外空氣達到外氣調節功能(周等，2002)，而表 1 為本研究之嫁接苗癒合室環控設備容量規格一覽表。

## 2.2 環境系統模型

嫁接苗癒合室是一個綜合冷藏庫、機電設備及作物生理調養構成的一種人工環境系統，此設施主要目的係利用機電設備及環控策略調節室內微氣候，提供作物苗株在嫁接後之癒合時期有更適合恢復生長的環境。嫁接苗癒合室內部溫濕度分布變化實際上為一空間(x,y,z)及時間(t)之狀態函數可表示為  $T_r(x,y,z,t)$  及  $h_r(x,y,z,t)$ ，由於該空間經假設與實驗將溫濕度場之梯度變化描述為近似均一空間，故室內溫度與濕度變化狀態可簡化僅為時間函數  $T_r(t)$  及  $h_r(t)$  (邱等，1999)。圖 2 為本研究建構嫁接苗癒合室環境系統模型之流程架構，基於上述嫁接苗癒合室內溫度場與濕度場之空間變化為均一狀態作為建構環境系統模型之前置條件，其溫度混合體積  $V_T$  及濕度混合體積  $V_H$  可視為癒合室總體積  $V$  之完全混合即  $V =$

$V_T = V_H$ ，本研究以質能平衡理論為基礎，修改 Hu et al. (2011)及 Zeng et al. (2012)提出之溫室溫濕度動態模型，建構一嫁接苗癒合室溫濕度動態模型：

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho_{air} \cdot S_{air} \cdot V} \cdot [\alpha \cdot Q_{heater} + \beta \cdot Q_{light} - \delta \cdot \lambda \cdot Q_{fog} + E(Q_{dark})], \quad (1)$$

$$\frac{dh_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho_{air} \cdot V} \cdot [\delta \cdot Q_{fog} + E(Q_{light}, h_{in}(t))], \quad (2)$$

式(1)及式(2)中各參數單位及物理意義描述呈現於表 2。在上述室內溫濕度動態變化僅考慮加熱器、加濕器、人工光源及植物行呼吸作用之能量與質量交換平衡。對於抽排風扇設備於室內環境調節過程中產生之內外空氣混合問題，本研究採用 Zhang (2004)完全混合模型(Completely mixed model)修正方式，將系統內部動態變化視為均勻混合過程，根據其輸入輸出關係建立一階微分方程式組描述式：

$$\left. \frac{dT_{in}}{dt} \right|_{vr} = [T_{in}(t) - T_{out}] \cdot \left( \frac{-\varepsilon \cdot Q_{vr}}{V} \right) \cdot e^{\left( \frac{-\varepsilon \cdot Q_{vr} \cdot t}{V} \right)}, \quad (3)$$

$$\left. \frac{dh_{in}}{dt} \right|_{vr} = [h_{in}(t) - h_{out}] \cdot \left( \frac{-\varepsilon \cdot Q_{vr}}{V} \right) \cdot e^{\left( \frac{-\varepsilon \cdot Q_{vr} \cdot t}{V} \right)}. \quad (4)$$

廖(1990)提出一封閉型農業環境之溫濕度動態行為分析，其根據農業環境系統內乾空氣、

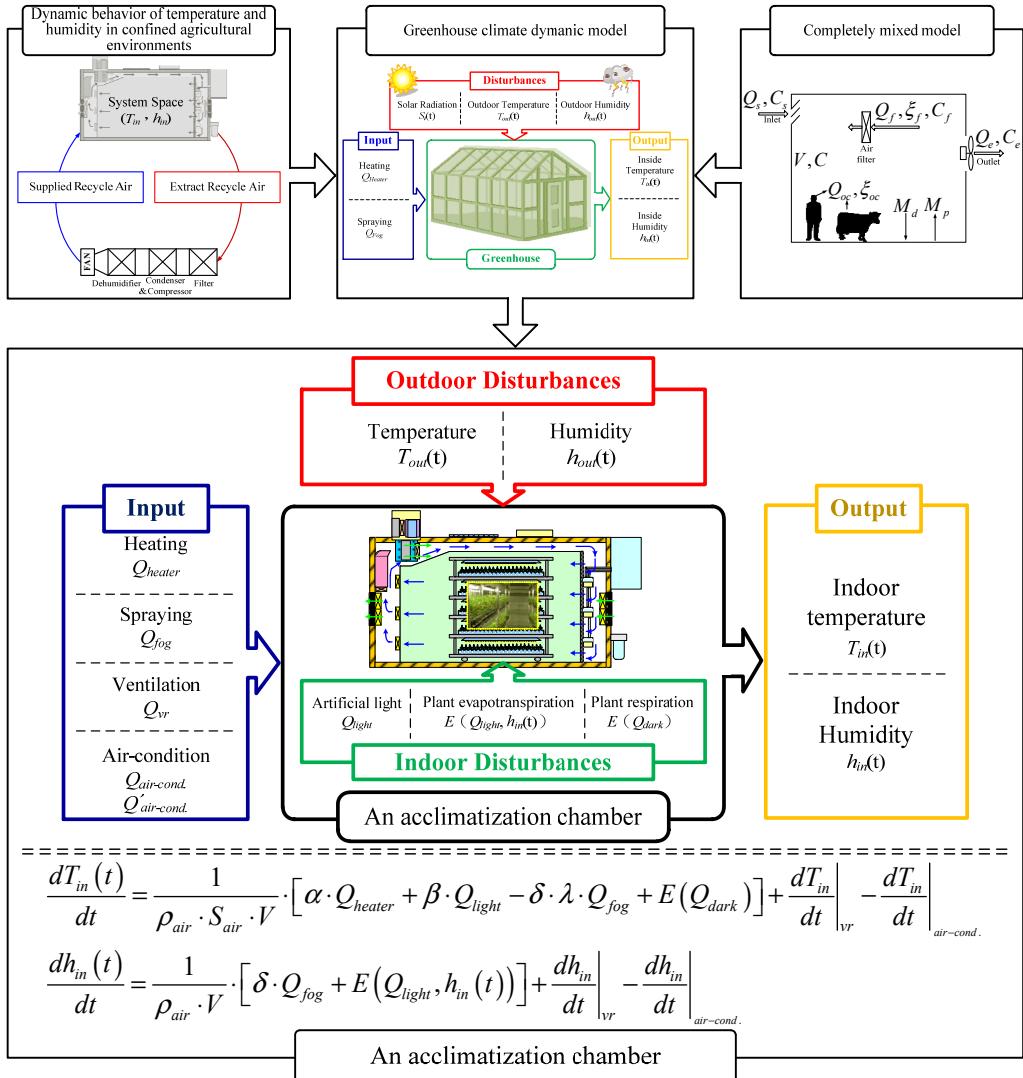


圖 2 建構嫁接苗癒合室環境系統模型之流程

水份及濕空氣焓之聯立物質平衡式所推導的動態非線性方程式組，可擬合封閉型農業環境中溫度與濕度之動態行為，並有效地將外界熱負荷、系統空間中之熱負荷與水份負荷同時併入考慮。本研究為能精確地描述冷氣機性能對於室內環境調節過程中熱焓及濕度變化的相互關係，仍以質能守恆定律、空氣熱力性質(馮與方，1986)及團塊理論為基礎，修改廖(1990)所提出封閉型農業環境中溫度與濕度之動態非線性方程式組，以擬合嫁接苗癒合室溫溼度狀態變化，以式(5)及(6)

表示，

$$\begin{aligned} \left. \frac{dT_{in}}{dt} \right|_{air-cond.} &= \frac{1}{(\rho_{air} \cdot V) \cdot (1012 - 417.75242 \cdot h_{in}(t))} \\ &\{ F_{input} \cdot \left[ \frac{\mu \cdot Q_{air-cond.}}{(\rho_{air} \cdot V)} - \frac{\sigma \cdot \dot{Q}_{air-cond.}}{(\rho_{air} \cdot V)} \cdot (\lambda + 1968 \cdot \right. \\ &\left. T_{in}(t)) \right] + m_1 \} , \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dh_{in}}{dt} \right|_{air-cond.} &= \frac{1}{(\rho_{air} \cdot V)} \cdot \left[ \frac{\sigma \cdot F_{input} \cdot \dot{Q}_{air-cond.}}{(\rho_{air} \cdot V)} \right] + \\ &m_2 . \end{aligned} \quad (6)$$

表 2 系統模型參數

符號	單位	解釋
$\frac{d(\ )}{dt}$	$min^{-1}$	單位時間物理量變化
$t$	$min$	系統取樣時間
$T_{in-k}(t)$	$^{\circ}K$	室內氣溫
$T_{in}(t)$	$^{\circ}C$	室內氣溫
$T_{out}(t)$	$^{\circ}C$	室外氣溫
$h_{in}(t)$	$Kg_{[H_2O]} \cdot Kg_{[Air]}^{-1}$	室內絕對濕度
$h_{out}(t)$	$Kg_{[H_2O]} \cdot Kg_{[Air]}^{-1}$	室外絕對濕度
$\rho_{air}$	$Kg_{[Air]} \cdot m^{-3}$	室內空氣密度
$S_{air}$	$J \cdot Kg_{[Air]}^{-1} \cdot ^{\circ}K^{-1}$	室內空氣比熱
$V$	$m^3$	室內體積
$\lambda$	$J \cdot g^{-1}$	室內蒸發潛熱
$\alpha$	無因次單位轉換	加熱器輸出之操作係數
$\beta$	無因次單位轉換	人工光源干擾之操作係數
$\delta$	無因次單位轉換	加濕器輸出之操作係數
$\varepsilon$	無因次單位轉換	風扇輸出之操作係數
$\mu$	無因次單位轉換	冷氣機排熱能力之操作係數
$\sigma$	無因次單位轉換	冷氣機除溼能力之操作係數
$m_1$	$J \cdot min^{-1}$	冷氣之溫度度變動補償基底值
$m_2$	$Kg_{[H_2O]} \cdot Kg_{[Air]}^{-1} \cdot min^{-1}$	冷氣之絕對溼度變動補償基底值
$Q_{heater}$	$J \cdot min^{-1}$	加熱器的加熱功率率
$Q_{vr}$	$m_{[Air]}^3 \cdot min^{-1}$	風扇的通風速率
$Q_{light}$	$J \cdot min^{-1}$	人工光源之總功率率
$E(Q_{light}, h_{in}(t))$	$Kg_{[H_2O]} \cdot min^{-1}$	植物行光合作用之水分蒸散率
$E(Q_{dark})$	$J \cdot min^{-1}$	植物行呼吸作用之逸散熱能
$Q_{fog}$	$Kg_{[H_2O]} \cdot min^{-1}$	加濕器的加濕速率
$Q_{air-cond.}$	$J \cdot min^{-1}$	冷氣機的排熱能力
$\dot{Q}_{air-cond.}$	$Kg_{[H_2O]} \cdot min^{-1}$	冷氣機的除溼能力
$F_{input}$	$Kg_{[Air]} \cdot min^{-1}$	進入之循環空氣質量流率

綜合上述(詳細推導過程見附錄 I),本研究整合(1)–(6)式重新建構一描述嫁接苗癒合室溫溼度狀態變化之環境系統模型式(7)及(8)：

$$\begin{aligned} \frac{dT_{in}(t)}{dt} = & \frac{1}{\rho_{air} \cdot S_{air} \cdot V} \cdot [\alpha \cdot Q_{heater} + \beta \cdot Q_{light} - \\ & \delta \cdot \lambda \cdot Q_{fog} + E(Q_{dark})] + \left. \frac{dT_{in}}{dt} \right|_{vr} - \\ & \left. \frac{dT_{in}}{dt} \right|_{air-cond.}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dh_{in}(t)}{dt} = & \frac{1}{\rho_{air} \cdot V} \cdot [\delta \cdot Q_{fog} + \\ & E(Q_{light}, h_{in}(t))] + \left. \frac{dh_{in}}{dt} \right|_{vr} - \left. \frac{dh_{in}}{dt} \right|_{air-cond.}. \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.3 控制系統模型

本研究所採用之控制系統模型(圖 3)係修改自 Stiver *et al.* (1996)提出之混合控制系統(HCS),在此本研究整合 MLDS 及 LDES 之方法為標的架構,運用科學演繹定律、邏輯規則及操作限制,建構一溫溼度動態模型為基礎之混合控制系統(HCS)模型運用於嫁接苗癒合室微氣候模擬控制之設計與實現(圖 3)。混合控制系統運用於嫁接苗癒合室溫溼度動態環境控制架構內容(圖 3)包括受控對象(嫁接苗癒合室本體於圖 3A)、系統動態行為(嫁接苗癒合室溫濕度環境系統動態模型於圖 3B)、連結介面(對溫濕度環境偵測之感測器及輸出之環控設備於圖 3C)及控制器(控制法則

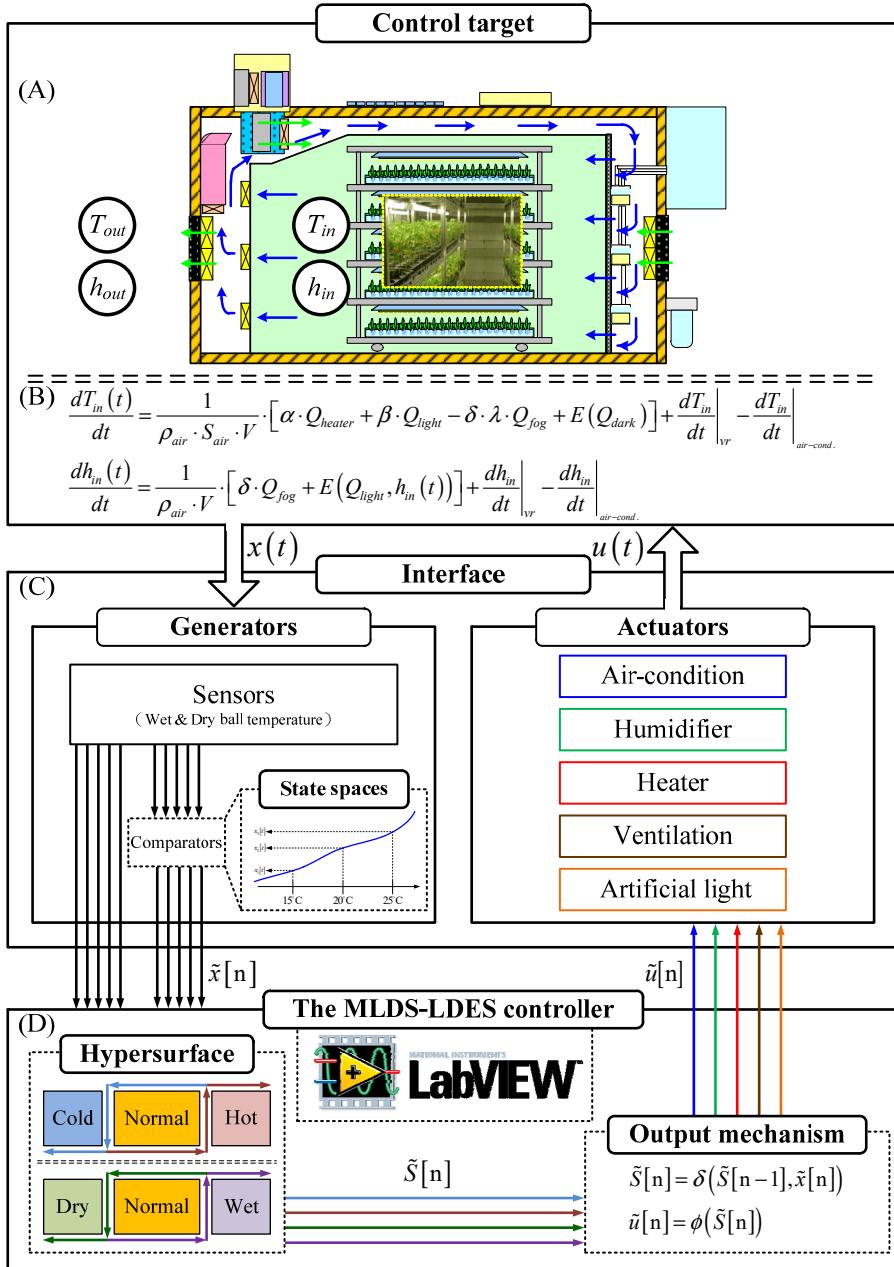


圖 3 混合控制系統應用於嫁接苗癒合室溫溼度動態環境控制架構

及輸出操作機制於圖 3D)四個部分。本研究係採用撰寫 LabVIEW 儀控軟體程式進行微氣候模擬控制之設計與實現於控制器部分，室內外溫溼度經過狀態區間(State partition)定義輸入於控制器，

而由當前溫溼度狀態通過超曲面(即離散事件發生)及控制目標設定，使控制器依據 MLDS 及 LDES 方法建置之程式機制，輸出對應的操作至環控設備，進而調控並感測回授室內溫濕度狀態

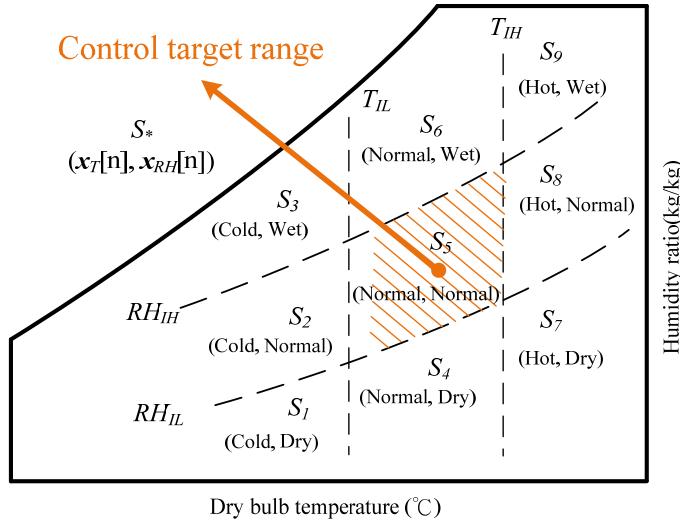


圖 4 室內溫濕度 9 種組合有限狀態及控制標的的範圍呈現

達到模擬操作功能。而控制器之行為機制由方程式(9)及(10)描述：

$$\tilde{S}[n] = \delta(\tilde{S}[n-1], \tilde{x}[n]), \dots \quad (9)$$

$$\tilde{u}[n] = \phi(\tilde{S}[n]), \dots \quad (10)$$

式中顎化符號~表示為一符號變數之值組或序列， $\tilde{S}$ 為狀態組； $\tilde{x}$ 是產生自受控物中離散事件標記； $\delta$ 為狀態轉移機制函數；[n]為類比於時間指標； $\tilde{u}$ 為控制器輸出組； $\phi$ 為輸出決定之機制函數。

模型中 MLDS-LDES 控制器之設計關鍵在於如何分別獲得 $\delta$ (狀態轉移)及 $\phi$ (輸出操作)的機制函數並加以程式化。因此本文採用 Bemporad and Morari (1999)提出離散區間狀態之論點，將嫁接苗癒合室內外溫溼度環境以有限狀態機(FSM)論點，結合布林函數邏輯演算(Boolean Algorithm)及線性不等式(Linear inequalities)之算術法則，設計一仿真控制器以區域片段線性調控方法擬合空間中溫濕度非線性動態環境，演繹實現一嫁接苗癒合室環境控制之混合控制系統模型，本文於以下各節分別敘述。

#### 2.4 控制法則演繹

本研究採用狀態區間之論點，將非線性溫濕

度狀態空間離散後視為複數個片段線性狀態空間所組成，以作為定義輸入狀態並呈現於濕空氣線圖。根據輸入狀態、濕空氣熱力性質、空氣調節程序與超曲面論點，本文演繹設計控制器之輸出操作機制必須符合物理定律、合理邏輯規則及操作限制下之條件，最終以布林函數邏輯演算式(Boolean Algorithm)併用線性不等式(Linear inequalities)之算術法則演繹數位控制器內的輸出操作機制，完成有限狀態自動機內狀態之間的操作邏輯。上述細節分述於 2.4.1 定義輸入狀態、2.4.2 環境控制操作、2.4.3 演繹控制程序、2.4.4 輸出操作機制。

##### 2.4.1 定義輸入狀態

本研究採用狀態區間之論點，將室內外溫度同時以二界限( $T_{IL}/T_{IH}$ )及( $T_{OL}/T_{OH}$ )各分為三個狀態區間(Cold、Normal、Hot)；而室內外濕度亦同時以二界限( $RH_{IL}/RH_{IH}$ )及( $RH_{OL}/RH_{OH}$ )各分為三個狀態區間(Dry、Normal、Wet)，其中室內溫濕度閾值 $T_{IL}$ 、 $T_{IH}$ 、 $RH_{IL}$ 及 $RH_{IH}$ 交集區域即為本研究控制標的範圍(Control target-range)。並於 LabVIEW 儀錶控制介面之內建程式比較器進行閾值設定，以擬真感測器至控制器之間的輸入狀態關係，圖 4 為室內溫濕度 9 種組合有限狀態及

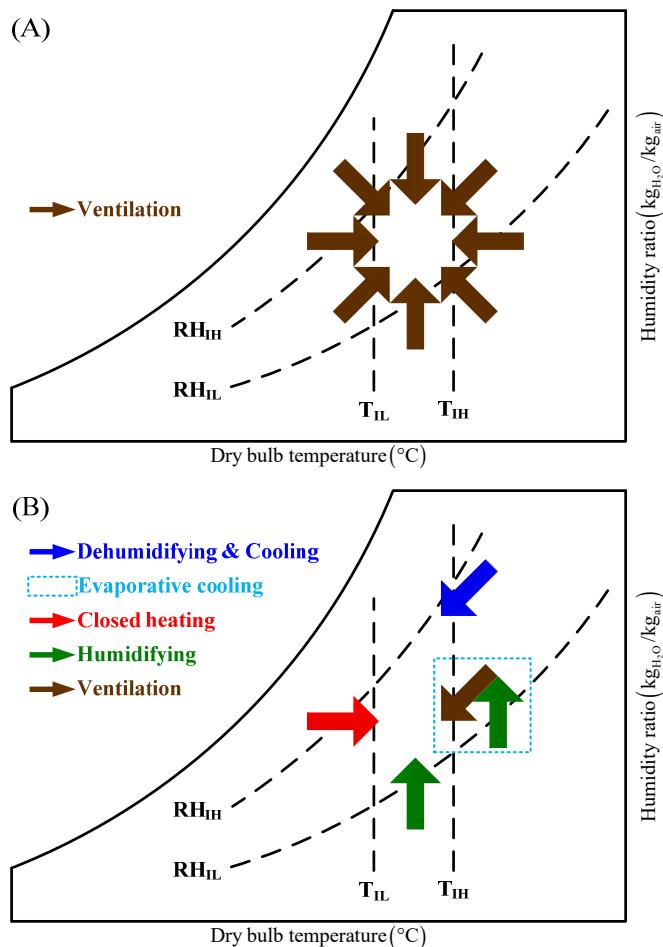


圖 5 濕空氣線圖上的(A)外氣調節(室內外空氣混合)及(B)四種環境控制操作之歷程路徑呈現

其對應符號  $S_1 - S_9$  與控制標的  $S_5$  的範圍呈現。

#### 2.4.2 環境控制操作

圖 5A 及 5B 為根據濕空氣線圖上室內外溫濕度環境條件，運用環境控制設備結合空氣調節原理所發展各項環境控制操作歷程路徑呈現，其中包含密閉加溫(Closed heating)、噴霧加濕(Humidifying)，而針對降溫程序可根據室內外不同溫溼度狀態進行三階段環境控制程序，分別為外氣調節(Ventilation)、蒸發冷卻(Evaporative cooling)及除濕降溫(Dehumidifying and Cooling)。對於各項環境控制操作所對應的溫溼度狀態呈現及操作狀況描述如下：

- 密閉加溫

由嫁接苗癒合室溫濕度動態模型中，在僅操作密閉加溫時，升溫過程中絕對濕度不變，隨著加熱器( $Q_{heater}$ )加溫時間增加，使室內溫度上升及相對濕度降低。

- 噴霧加濕

當室內溼度低於控制標的或接近作物生長障礙時，在僅噴霧( $Q_{fog}$ )加濕操作上。

- 外氣調節

外氣調節主要作為室內降溫由抽排氣風扇( $Q_{fan}$ )實施第一階段環境控制操作，當導入室外空氣進行室內混合操作時會立即對溫濕度造成連動影響，因此必須同時考慮當下室內外溫濕度狀態之操作邏輯條件。

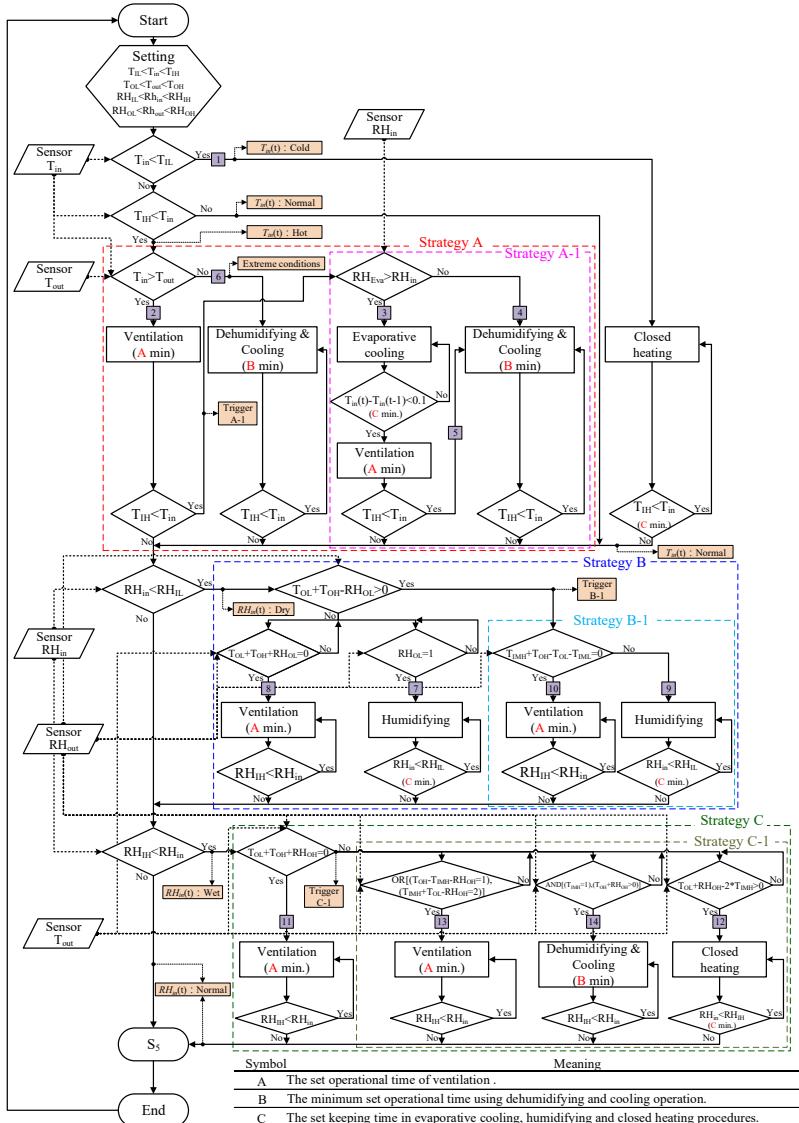


圖 6 養生室溫濕度環境控制系統之操作策略流程

#### ●噴霧降溫(蒸發冷卻)

當外氣調節操作後，不足以使室內溫濕度狀態變化達到溫度控制標的範圍時，將採用第二階段環境控制程序(Evaporative cooling) ( $Q_{Evaporative}$ )，先操作「噴霧蒸發加濕( $Q_{fog}$ )」，間歇一段時間後，再執行「換氣排熱( $Q_{fan}$ )」。

#### ●除濕降溫

在上述外氣調節及噴霧降溫操作於控制結果上受限時(例如作物生長環境與外在氣候差距

甚大時；室內部相對濕度過高且室內熱累積是無法汽化霧滴時；室內外氣溫已近似平衡時，在這上述三種情況下實施外氣調節與噴霧降溫操作不會有顯著效果)，即採用第三階段環境控制程序即冷氣機( $Q_{air-condition}$ )除濕降溫操作，使室內乾球溫度及濕度降低。

#### 2.4.3 演繹控制程序

圖6是本研究嫁接苗癒合養生室溫濕度環境控制系統的操作策略流程圖，目標就是將內部溫

溼度狀態控制在標的區域內(即常溫常濕  $S_5$  狀態)採取以溫度為主(流程前半部)濕度為輔(流程後半部)的操作策略，在調整控制的歷程設計上是採取循序漸進方式進行耗能最少的環境控制操作為控制程序的法則。當輸入目標區域的溫溼度狀態標定後，若室內溫度為低溫狀態時(即  $T_{in} < T_{IL}$ , Cold；有限溫溼度狀態  $S_1 - S_3$ )，採取密閉加溫操作將室內溫度提升至常溫狀態(圖 6 方塊 1；有限溫溼度狀態  $S_4 - S_6$ )；若室內溫度處於高溫狀態時(即  $T_{in} > T_{IH}$ , Hot；有限溫溼度狀態  $S_7 - S_9$ )，即開啟控制策略 A，為了降低高耗能環境控制設備使用時間及頻率，在控制策略 A 內則導入室外溫度條件進行邏輯判斷。當室內溫度高於室外溫度時，優先採用抽排風扇導入外部氣候條件進行空氣混合調整室內微氣候至常溫狀態(圖 6 方塊 2)；倘若上述空氣混合操作性能不足以改善室內溫度至常溫狀態時，將觸發控制策略 A-1 之微精度控制階段。此階段將導入最佳蒸發效率  $RH_{Eva}$  論點，若室內相對濕度  $RH_{in}$  低於最佳蒸發效率  $RH_{Eva}$  值時，則優先採用噴霧降溫(蒸發冷卻)操作至常溫狀態(圖 6 方塊 3)；若室內相對濕度高於最佳蒸發效率  $RH_{Eva}$  值(圖 6 方塊 4)或上述操作無法使室內溫度調控至常溫狀態(圖 6 方塊 5)時，則採用降溫除濕操作(冷氣機以降溫為目的操作至常溫狀態)。若室內外溫度狀態皆為極端條件且室內溫度已低於室外溫度仍高於室內溫度設定上限，則冷氣機降溫除濕為首要操作—目的以操作降溫至常溫狀態即有限溫溼度狀態  $S_4 - S_6$  (圖 6 方塊 6)。

在上述達成室內溫度調控在常溫狀態後即執行室內濕度的控制程序，若室內溼度為乾燥狀態時(即  $RH_{in} < RH_{IL}$ , Dry；有限溫溼度狀態  $S_4$ )，即執行控制策略 B 及 B-1 並導入室外溫溼度條件進行邏輯判斷，以執行噴霧加濕與外氣調節的組合操作(圖 6 方塊 7–10)直至室內溼度調控到非乾燥狀態(有限溫溼度狀態  $S_5$  或  $S_6$ )；若室內溼度為潮濕狀態時(即  $RH_{IH} < RH_{in}$ , Wet；有限溫溼度狀態  $S_6$ )，即執行控制策略 C 及 C-1 必須根據室外溫溼度條件進行各項邏輯判斷，以決定密閉加溫、外氣調節與降溫除濕(冷氣機)

操作之執行(圖 6 方塊 11–14)。綜合上述各環境控制操作之組合策略，不論是密閉加溫( $Q_{heater}$ )、噴霧加濕( $Q_{fog}$ )、外氣調節( $Q_{ventilation}$ )、噴霧降溫–蒸發冷卻( $Q_{evaporative}$ )及降溫除濕–冷氣機( $Q_{air-condition}$ )操作，皆必需根據圖 8 與溫濕度環境控制輸入狀態與輸出操作真值表(表 3 至表 6)中，各狀態下之輸出操作決定機制以轉換為機器之邏輯語言。因此，本文根據室內外溫濕度狀態定義及環境控制操作組合策略之決定機制，結合布林代數演算及線性不等式，以解決溫濕度聯控產生的複雜邏輯問題，其邏輯算數式演繹結果於下節詳述。

#### 2.4.4 輸出操作機制

依照本研究嫁接苗癒合養生室溫濕度環境控制系統的操作策略流程圖(圖 6)，流程前半部目標就是採取以溫度調控為主，而流程後半部目標即採取濕度調控的操作策略。以溫度調控目標作為輸出操作邏輯是很直覺，可見於圖 6 之溫度比較。接著本研究要解決的是溫濕度聯結控制所衍生的複雜邏輯問題，因此對室內當下溫溼度狀態組合、輸入變數、各項環境控制輸出及其下一個狀態推演，以真值表方式呈現(表 3 至表 6)並依據演算各項環境控制輸出操作機制之邏輯算數式。

表 3 為室內 9 種有限溫溼度組合，欄位 1) 狀態下，輸入邏輯變數(室內溫溼度上下限狀態，欄位 1)對應輸出邏輯變數(各項環境控制操作，欄位 2)及其下一個狀態推演(欄位 3)之真值表。在此階段目標先將室內溫溼度狀態調控在常溫區域內(即  $S_4 - S_6$  狀態)，將室內 9 種有限溫溼度狀態組合區分在  $S_1 - S_3$  時採取密閉加溫( $Y_{heater}$ )操作，在  $S_7 - S_9$  時採取操作策略 A 開啟觸發變數( $Y_{trigger} = 1^A$ )，在  $S_4$  時採取操作策略 B 開啟觸發變數( $Y_{trigger} = 1^B$ )，在  $S_6$  時採取操作策略 C 開啟觸發變數( $Y_{trigger} = 1^C$ )，在  $S_5$  時即達到目標範圍內不需要輸出操作。根據表 3 真值表各項環境控制輸出操作機制有上述 5 種情況，其邏輯算數式(線性不等式)演算結果(以 Excel 電子試算表已帶入表 3 驗證其正確性)如下：

表 3 室內 9 種有限溫溼度狀態下，室內溫溼度狀態對應各項環境控制輸出操作及狀態推演之真值表。

(1) Indoor present state						(2) Output variables					(3) Indoor next state						
$S_n$	$T_{in}(t)$	$RH_{in}(t)$	$T_{IL}$	$T_{IH}$	$RH_{IL}$	$RH_{IH}$	$Y_{heater}$	$Y_{ventilation}$	$Y_{fog}$	$Y_{evaporative}$	$Y_{air-cond.}$	$Y_{Trigger}$	$T_{IL}(t+1)$	$T_{IH}(t+1)$	$RH_{IL}(t+1)$	$RH_{IH}(t+1)$	$S_n(t+1)$
$S_1$	Cold	Dry	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	$S_4$
$S_2$	Cold	Normal	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0 / 1	0	$S_4 / S_5$
$S_3$	Cold	Wet	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 / 1	$S_4 / S_6$
$S_4$	Normal	Dry	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1 <sup>B</sup>	0	0	1	0	$S_4$
$S_5$	Normal	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$S_5$
$S_6$	Normal	Wet	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1 <sup>C</sup>	0	0	0	1	$S_6$
$S_7$	Hot	Dry	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1 <sup>A</sup>	0	1	1	0	$S_7$
$S_8$	Hot	Normal	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1 <sup>A</sup>	0	1	0	0	$S_8$
$S_9$	Hot	Wet	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1 <sup>A</sup>	0	1	0	1	$S_9$

$n$  : Type of state 、 $1^A$  : Control Strategy A 、 $1^B$  : Control Strategy B 、 $1^C$  : Control Strategy C

表 4 在室內高溫 3 種有限溫溼度狀態下，室內溫溼度上下限狀態對應於室外溫度條件狀態與環境控制輸出及次狀態推演之真值表

(1) Indoor present state				(2) Logical conditions			(3) Outdoor presect state			(4) Control strategy and Output variables			(5) Indoor next state					
$S_n$	$T_{IL}(t)$	$T_{IH}(t)$	$RH_{IL}(t)$	$RH_{IH}(t)$	$T_{in}(t) \geq T_{out}(t)$	$T_{in}(t) < T_{out}(t)$	$S_n$	$T_{OL}(t)$	$T_{OH}(t)$	$Y_{ventilation}$	$T_{in}(t) + \Delta Y_{ventilation} < T_{IH}$	$Y_{air-cond.}$	$Y_{Trigger}$	$T_{IL}(t+1)$	$T_{IH}(t+1)$	$RH_{IL}(t+1)$	$RH_{IH}(t+1)$	$S_n(t+1)$
$S_7$	0	1	1	0	1	$S_4 \sim S_6$	$S_1 \sim S_3$	1	0	1	1	0	0	0	0	0 / 1	0	$S_4 / S_5$
							$S_4 \sim S_6$	0	0	1	1	0	0	0	0	0 / 1	0	$S_4 / S_5$
					0	$S_7 \sim S_9$	$S_1 \sim S_3$	0	1	1	0	0	1 <sup>A-1</sup>	0	1	0 / 1	0 / 1	$S_7 / S_8 / S_9$
							$S_7 \sim S_9$	0	1	0	1	0	1 <sup>A-1</sup>	0	0	0	1	$S_4$
$S_8$	0	1	0	0	1	$S_4 \sim S_6$	$S_1 \sim S_3$	1	0	1	1	0	0	0	0	0 / 1	0 / 1	$S_4 / S_5 / S_6$
							$S_4 \sim S_6$	0	0	1	1	0	0	0	0	0 / 1	0 / 1	$S_4 / S_5 / S_6$
					0	$S_7 \sim S_9$	$S_1 \sim S_3$	0	1	1	0	0	1 <sup>A-1</sup>	0	1	0 / 1	0 / 1	$S_7 / S_8 / S_9$
							$S_7 \sim S_9$	0	1	0	1	0	1 <sup>A-1</sup>	0	0	0	1	$S_4 / S_5$
$S_9$	0	1	0	1	1	$S_4 \sim S_6$	$S_1 \sim S_3$	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0 / 1	$S_5 / S_6$
							$S_4 \sim S_6$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0 / 1	$S_5 / S_6$
					0	$S_7 \sim S_9$	$S_1 \sim S_3$	0	1	1	0	0	1 <sup>A-1</sup>	0	1	0 / 1	0 / 1	$S_7 / S_8 / S_9$
							$S_7 \sim S_9$	0	1	0	1	0	1 <sup>A-1</sup>	0	0	0	0 / 1	$S_5 / S_6$

$1^{A-1}$  : Control Strategy A-1

$$T_{IL} - T_{IH} > 0 \Rightarrow Y_{heater} = 1, \dots \quad (11.1)$$

$$T_{IL} + T_{IH} + RH_{IL} + RH_{IH} = 0 \Rightarrow Y = 0, \quad (11.2)$$

$$T_{IH} - T_{IL} > 0 \Rightarrow Y_{Trigger} = 1^A, \dots \quad (11.3)$$

$$RH_{IL} - T_{IL} - T_{IH} = 1 \Rightarrow Y_{Trigger} = 1^B, \quad (11.4)$$

$$RH_{IH} - T_{IL} - T_{IH} = 1 \Rightarrow Y_{Trigger} = 1^C. \quad (11.5)$$

當式(11.3-5)成立時開啟觸發變數  $Y_{Trigger}$  可執行對應之調控策略。以溫度為主的調控流程，若室內溫濕度有限狀態為  $S_7 - S_9$  時，即開啟觸發( $Y_{Trigger} = 1^A$ )變數接著導入外在溫度條件進行邏輯判斷，表 4 為在室內高溫 3 種有限溫溼度狀態下，室內溫溼度上下限狀態(欄位 1)對應於室外溫度條件狀態(欄位 2 及 3)與環境控制輸出(通風、

冷氣機及觸發策略  $1^{A-1}$ ，欄位 4)及次狀態推演(欄位 5)之真值表。根據表 4 真值表環境控制輸出操作機制有上述 3 種情況，其邏輯法則如下：

$$T_{IH} - T_{IL} > 0 \text{ and } T_{in} - T_{out} > 0 \Rightarrow Y_{ventilation} = 1, \dots \quad (12.1)$$

$$T_{IH} - T_{IL} > 0 \text{ and } T_{in} - T_{out} \leq 0 \Rightarrow Y_{air-cond.} = 1, \dots \quad (12.2)$$

$$T_{IH} - T_{IL} > 0 \text{ and } T_{in} + \Delta Y_{ventilation} > T_{IH} \Rightarrow Y_{Trigger} = 1^{A-1}. \dots \quad (12.3)$$

當執行通風操作後，其操作性能不足以將室溫調控至標的區域時(式 12.2)，則採取第二階段調控策略進行溫度控制程序(表 4.1)。表 4.1 為在室內高溫 3 種有限溫濕度狀態下，室內溫濕度上下限狀態(欄位 1)對應於室內濕度條件狀態(欄位

表 4.1 在室內高溫 3 種有限溫溼度狀態下，室內溫溼度上下限狀態對應於室內濕度條件狀態與環境控制輸出及次狀態推演之真值表

Control Strategy A-1											
(1) Indoor present state $S_n T_{IL}(t) T_{IH}(t) RH_{IL}(t) RH_{IH}(t)$				(2) Logical conditions $RH_{Eva} \geq RH_{in}(t)$		(3) Control strategy and Output variables $Y_{evaporative} T_{in}(t) + \Delta Y_{evaporative} < T_{IH} Y_{air-cond.}$			(4) Indoor next state $T_{IL}(t+1) T_{IH}(t+1) RH_{IL}(t+1) RH_{IH}(t+1) S_n(t+1)$		
$S_7 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0$				1		1	0	1	0	0 / 1	$S_4 / S_5 / S_6$
						0	0	1			
$S_8 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0$				1		1	0	1	0	0 / 1	$S_4 / S_5 / S_6$
						0	0	1			
$S_9 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1$				1		1	0	1	0	0 / 1	$S_4 / S_5 / S_6$
						0	0	1			

表 5 在室內常溫低濕狀態下所對應的室外溫濕度狀態與環境控制輸出及次狀態推演之真值表

Control Strategy B												
(1) Indoor present state $S_n T_{IL}(t) T_{IH}(t) RH_{IL}(t) RH_{IH}(t)$				(2) Outdoor preselect state $S_n T_{OL}(t) T_{OH}(t) RH_{OL}(t) RH_{OH}(t)$		(3) Output variables $Y_{heater} Y_{ventilation} Y_{fog} Y_{evaporative} Y_{air-cond.} Y_{trigger}$			(4) Indoor next state $T_{IL}(t+1) T_{IH}(t+1) RH_{IL}(t+1) RH_{IH}(t+1) S_n(t+1)$			
$S_4 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0$				$S_1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0$	0	0	1	0	0	0	0	$S_5$
				$S_2 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0$	0	0	0	0	0	1 <sup>B-1</sup>	0	$S_4$
				$S_3 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1$	0	0	0	0	0	1 <sup>B-1</sup>	0	$S_4$
				$S_4 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0$	0	0	1	0	0	0	0	$S_5$
				$S_5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$	0	1	0	0	0	0	0	$S_5$
				$S_6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1$	0	1	0	0	0	0	0	$S_5$
				$S_7 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0$	0	0	1	0	0	0	0	$S_5$
				$S_8 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0$	0	0	0	0	0	1 <sup>B-1</sup>	0	$S_4$
				$S_9 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1$	0	0	0	0	0	1 <sup>B-1</sup>	0	$S_4$

1<sup>B-1</sup> : Control Strategy B-1

2)與環境控制輸出(欄位 3)及次狀態推演(欄位 4)之真值表。在控制策略 A-1 中必須導入當下室內濕度狀態與最佳蒸發效率  $RH_{Eva}$  值進行邏輯判斷(式 13.1-2)，其環境控制輸出操作邏輯法則如下：

$$\begin{aligned} T_{IH} - T_{IL} &> 0, \quad T_{in} + \Delta Y_{ventilation} > \\ T_{IH} \text{ and } RH_{Eva} - RH_{in} &> 0 \Rightarrow Y_{evaporative} = 1, \end{aligned} \quad \dots \quad (13.1)$$

$$\begin{aligned} T_{IH} - T_{IL} &> 0, \quad \Delta Y_{ventilation} + T_{in} > \\ T_{IH} \text{ and } \frac{RH_{Eva} - RH_{in}}{T_{in} + \Delta Y_{evaporative}} &\leq 0 \quad \left\{ \Rightarrow \right. \\ Y_{air-cond.} &= 1. \end{aligned} \quad \dots \quad (13.2)$$

風、噴霧及觸發策略 1<sup>B-1</sup>，欄位 3)及次狀態推演(欄位 4)之真值表。根據表 5 真值表環境控制輸出操作機制上述 3 種情況及導入室外溫濕度條件進行邏輯判斷，其邏輯算數式(線性不等式)演算結果(以 Excel 電子試算表已帶入表 5 驗證其正確性)如下：

$$\begin{aligned} RH_{IL} - T_{IL} - T_{IH} &= 1 \text{ and } T_{OL} + T_{OH} + \\ RH_{OL} &= 0 \Rightarrow Y_{ventilation} = 1, \end{aligned} \quad \dots \quad (14.1)$$

$$\begin{aligned} RH_{IL} - T_{IL} - T_{IH} &= 1 \text{ and } RH_{OL} = 1 \Rightarrow \\ Y_{fog} &= 1, \end{aligned} \quad \dots \quad (14.2)$$

$$\begin{aligned} RH_{IL} - T_{IL} - T_{IH} &= 1 \text{ and } T_{OL} + T_{OH} - \\ RH_{OL} &> 0 \Rightarrow Y_{trigger} = 1^{B-1}. \end{aligned} \quad \dots \quad (14.3)$$

表 5 為在室內常溫低濕狀態下(欄位 1)所對應的室外溫濕度狀態(欄位 2)與環境控制輸出(通

當上述式(14.3)條件成立時，代表既有邏輯變數無法有效地對當下室內溫濕度狀態進一步

表 5.1 在室內常溫低濕狀態下所對應的室外溫濕度狀態與環境控制輸出及次狀態推演之真值表

Control Strategy B-1																						
(1) Indoor present state				(2) Outdoor presest state			(3) Output variables		(4) Indoor next state													
$S_{t-n}$	$T_{IL}(t)$	$T_{IML}(t)$	$T_{IMH}(t)$	$T_{IH}(t)$	$RH_{IL}(t)$	$RH_{IH}(t)$	$S_n$	$T_{OL}(t)$	$T_{OH}(t)$	$RH_{OL}(t)$	$RH_{OH}(t)$	$Y_{heater}$	$Y_{ventilation}$	$Y_{fog}$	$Y_{evaporative}$	$Y_{air-cond}$	$T_{IL}(t+1)$	$T_{IH}(t+1)$	$RH_{IL}(t+1)$	$RH_{IH}(t+1)$	$S_n(t+1)$	
$S_{t-1}$	0	0	0	0	1	0	$S_2$	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	$S_5$
	$S_3$	1	0	0	1	0	$S_3$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
	$S_8$	0	1	0	0	0	$S_8$	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	$S_5$
	$S_9$	0	1	0	1	0	$S_9$	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
$S_{t+2}$	0	0	1	0	1	0	$S_2$	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	$S_5 / S_{t+1}$
	$S_3$	1	0	0	1	0	$S_3$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5 / S_{t+1}$
	$S_8$	0	1	0	0	0	$S_8$	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
	$S_9$	0	1	0	1	0	$S_9$	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
$S_{t+3}$	0	1	0	0	1	0	$S_2$	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
	$S_3$	1	0	0	1	0	$S_3$	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	$S_5$
	$S_8$	0	1	0	0	0	$S_8$	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5 / S_{t+1}$
	$S_9$	0	1	0	1	0	$S_9$	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5 / S_{t+1}$

表 6 在室內常溫高濕狀態下所對應的室外溫濕度狀態與環境控制輸出及次狀態推演之真值表。

Control Strategy C																						
(1) Indoor present state				(2) Outdoor presest state			(3) Output variables			(4) Indoor next state												
$S_n$	$T_{IL}(t)$	$T_{IH}(t)$	$RH_{IL}(t)$	$RH_{IH}(t)$	$S_n$	$T_{OL}(t)$	$T_{OH}(t)$	$RH_{OL}(t)$	$RH_{OH}(t)$	$Y_{heater}$	$Y_{ventilation}$	$Y_{fog}$	$Y_{evaporative}$	$Y_{air-cond}$	$Y_{Trigger}$	$T_{IL}(t+1)$	$T_{IH}(t+1)$	$RH_{IL}(t+1)$	$RH_{IH}(t+1)$	$S_n(t+1)$		
$S_6$	0	0	0	1	$S_1$	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	1	$S_5$	
	$S_2$	1	0	0	$S_2$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	1	$S_5$	
	$S_3$	1	0	0	$S_3$	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	1	$S_5$	
	$S_4$	0	0	1	$S_4$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$S_5$	
	$S_5$	0	0	0	$S_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$S_5$	
	$S_6$	0	0	0	$S_6$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	0	1	$S_5$
	$S_7$	0	1	1	$S_7$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	0	1	$S_5$
	$S_8$	0	1	0	$S_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	0	1	$S_5$
	$S_9$	0	1	0	$S_9$	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	$1^{C-1}$	0	0	0	0	1	$S_5$

$1^{C-1}$  : Control Strategy C-1

調控時(即狀態解析度資訊不足)，在這樣常溫低(或高)濕狀態條件下的濕度控制程序中，為降低濕度調控後對於溫度影響擾動，此階段於  $T_{IL}$  至  $T_{IH}$  之間增設  $T_{IML}$  及  $T_{IMH}$  輸入變數進行溫度微精度有限狀態邏輯判斷，表 5.1 為在室內常溫低濕狀態(含增設室溫上下限狀態(欄位 1))下所對應的室外溫濕度狀態(欄位 2)與環境控制輸出(通風及噴霧，欄位 3)及次狀態推演(欄位 4)之真值表。在控制策略 B-1(表 5.1)中導入當下室外空氣狀態進行邏輯判斷(式 15.1-2)，其邏輯算數式(線性不等式)演算結果(以 Excel 電子試算表已帶入表 5.1 驗證其正確性)如下：

$$T_{IMH} + T_{OH} - T_{OL} - T_{IML} = 0 \Rightarrow Y_{ventilation} = 1, \dots \quad (15.1)$$

$$T_{IMH} + T_{OH} - T_{OL} - T_{IML} \neq 0 \Rightarrow Y_{fog} = 1. \dots \quad (15.2)$$

表 6 為在室內常溫高濕狀態下(欄位 1)所對應的室外溫濕度狀態(欄位 2)與環境控制輸出(通風及觸發策略  $1^{C-1}$ ，欄位 3)及次狀態推演(欄位 4)之真值表。根據表 6 真值表環境控制輸出操作機制 2 種情況及導入室外溫濕度條件進行邏輯判斷，其邏輯算數式(線性不等式)演算結果(以 Excel 電子試算表已帶入表 6 驗證其正確性)如下：

$$RH_{IH} - T_{IL} - T_{IH} = 1 \text{ and } T_{OL} + T_{OH} + RH_{OH} = 0 \Rightarrow Y_{ventilation} = 1, \dots \quad (16.1)$$

$$RH_{IH} - T_{IL} - T_{IH} = 1 \text{ and } T_{OL} + T_{OH} + RH_{OH} \neq 0 \Rightarrow Y_{Trigger} = 1^{C-1}. \dots \quad (16.2)$$

表 6.1 在室內常溫高濕狀態下所對應的室外溫濕度狀態與環境控制輸出及次狀態推演之真值表。

Control Strategy C-1																				
(1) Indoor present state					(2) Outdoor presect state			(3) Output variables		(4) Indoor next state										
$S_{6-a}$	$T_{BL}(t)$	$T_{IML}(t)$	$T_{IMH}(t)$	$T_{HL}(t)$	$RH_{BL}(t)$	$RH_{OH}(t)$	$RH_{OL}(t)$	$Y_{heater}$	$Y_{ventilation}$	$Y_{fan}$	$Y_{evaporative}$	$Y_{air-cond}$	$T_{BL}(t+1)$	$T_{IML}(t+1)$	$T_{IMH}(t+1)$	$T_{HL}(t+1)$	$RH_{BL}(t+1)$	$RH_{OH}(t+1)$	$S_{a(t+1)}$	
$S_{6-a}$	$T_{BL}(t)$	$T_{IML}(t)$	$T_{IMH}(t)$	$T_{HL}(t)$	$RH_{BL}(t)$	$RH_{OH}(t)$	$RH_{OL}(t)$	$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	$S_5$	
								$S_2$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
								$S_3$	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
								$S_6$	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
								$S_7$	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	$S_5$
								$S_8$	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	$S_5$
								$S_9$	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	$S_5$
								$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_2$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
$S_{6-2}$	$T_{BL}(t)$	$T_{IML}(t)$	$T_{IMH}(t)$	$T_{HL}(t)$	$RH_{BL}(t)$	$RH_{OH}(t)$	$RH_{OL}(t)$	$S_3$	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$	
								$S_6$	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_7$	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_8$	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_9$	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_1$	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_2$	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_3$	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_6$	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
$S_{6-3}$	$T_{BL}(t)$	$T_{IML}(t)$	$T_{IMH}(t)$	$T_{HL}(t)$	$RH_{BL}(t)$	$RH_{OH}(t)$	$RH_{OL}(t)$	$S_7$	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$	
								$S_8$	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$
								$S_9$	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	$0/1 S_5 / S_{6-1}$

當上述式(16.2)不為零時，則觸發在室內常溫高濕狀態下第二階段溫度微精度控制程序(策略1<sup>C-1</sup>)，表 6.1 為在室內常溫高濕狀態(含增設室溫上下限狀態(欄位 1))下所對應的室外溫濕度狀態(欄位 2)與環境控制輸出(加熱、通風及冷氣機，欄位 3)及次狀態推演(欄位 4)之真值表。在操作策略 C-1(表 6.1)中導入當下室外空氣狀態進行邏輯判斷(式 17.1-3)，其邏輯算數式(線性不等式)演算結果(以 Excel 電子試算表已帶入表 6.1 驗證其正確性)如下：

$$(T_{OH} - T_{IMH} - RH_{OH} = 1) \cup (T_{IMH} + T_{OL} - RH_{OH} = 2) \Rightarrow Y_{ventilation} = 1 \dots \dots \dots (17.1)$$

$$(T_{IMH} = 1) \cap (T_{OH} + RH_{OH} > 0) \Rightarrow Y_{air-cond.} = 1, \dots \dots \dots (17.2)$$

$$T_{OL} + RH_{OH} - 2 \cdot T_{IMH} > 0 \Rightarrow Y_{heater} = 1. \dots \dots \dots (17.3)$$

綜合上述根據室內外濕空氣有限組合狀態採用布林代數演算及線性不等式兩種併用方式進行邏輯運算，可決定癒合養生室環境控制設備輸出操作機制及易於程式編譯，也解決溫濕度聯結控制所衍生複雜邏輯問題。

## 2.5 程式架構

圖 7 為本研究採用 LabVIEW 程式編程進行癒合養生室溫濕度環境調控之架構。本研究控制器之 LabVIEW 程式架構係根據環境系統模型、控制系統模型及控制法則整合編譯，其架構主要分為六個部份，包含(1)室內外溫濕度當前狀態輸入、(2)設定溫溼度標的範圍、(3)經由比較器將室內外溫濕度狀態條件轉化邏輯變數及設定操作限制條件、(4)根據表 3 欄位 1(9 種溫溼度組合狀態)及欄位 2(6 項操作輸出)之邏輯變數演繹各項環境控制設備之操作邏輯、(5)各項環境控制設備操作(由 LabVIEW 程式編程進行環境控制設備操作室內溫濕度動態行為)及(6)操作響應變化。本文 LabVIEW 虛擬儀表控制程式架構對應於混合控制系統模型包含(B)虛擬系統機制、(C)虛擬硬體介面及(D)虛擬控制器。而 LabVIEW 程式虛擬儀表控制作業是藉由輸入之溫濕度狀態與設定之界限或區間閾值比較，判斷當前室內外空氣有限狀態點，運用線性不等式及布林邏輯作為環控策略輸出機制判斷。運用各環境控制策略操作及對應的溫溼度動態模式機制即可得到單位時間內溫濕度變化量( $\Delta T$  及  $\Delta h$ )，以疊加於前一時刻之溫濕度  $T_{in}(t)$  及  $h_{in}(t)$  形成下一個離散時間之溫濕度狀態  $T_{in}(t+1)$  及  $h_{in}(t+1)$  歷程，完成模擬室內溫溼度環境動態系統調控。

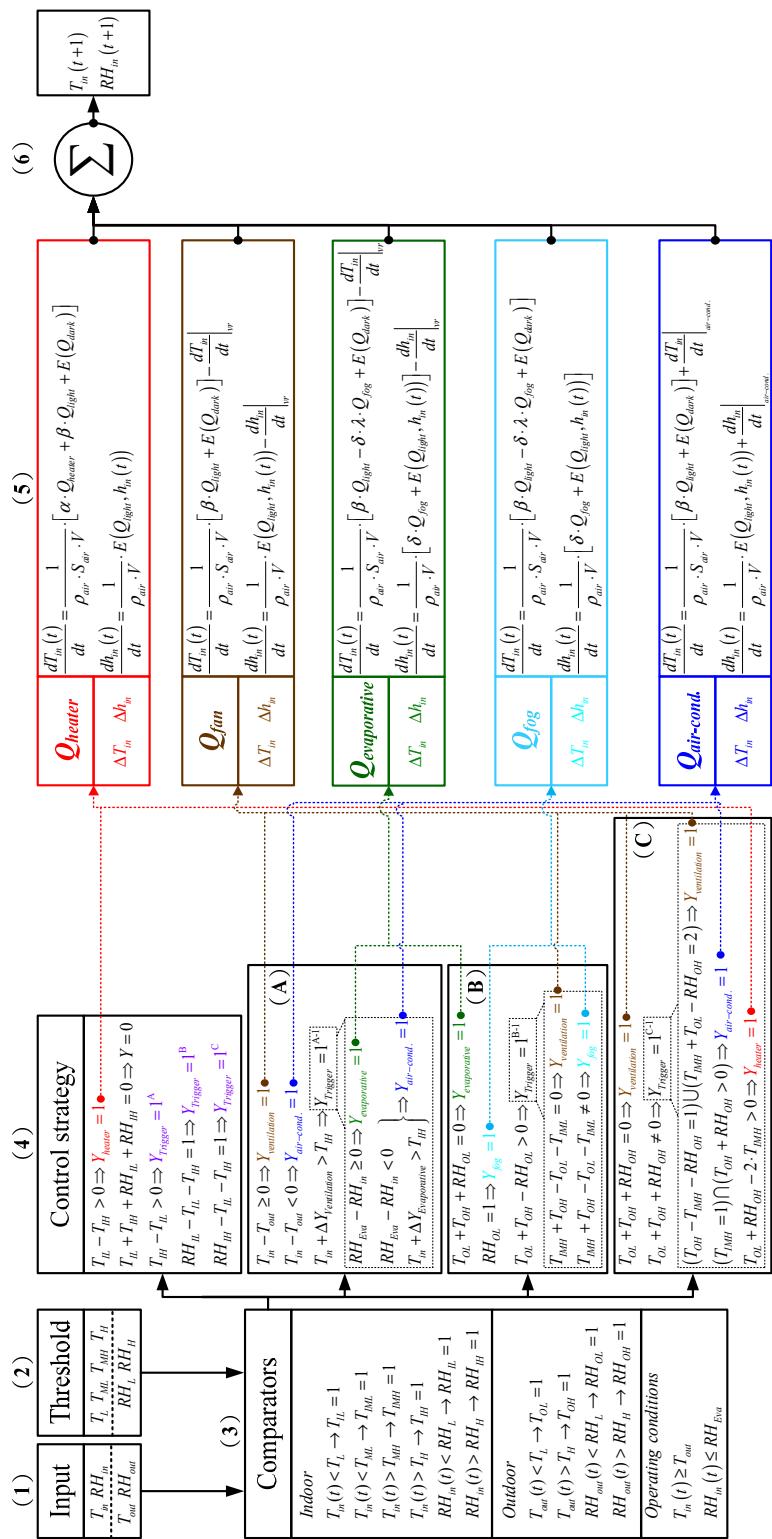


圖 7 以 LabVIEW 程式編程進行癒合養生室之溫濕度模擬控制架構

## 2.6 模式驗證

本研究所發展環境控制操作模式最終是以實體人工氣候室之設備容量進行模擬程式之參數設定，模擬之時間比例係以1:60(即程式執行1秒為實際時間1分鐘)，室內環境控制設備容量設定參照表1，其中抽排風扇通風量 $Q_{vr}$ 設定為26.4 ( $m^3/min$ )。模式驗證首先根據周等(2002)發表之

「嫁接苗癒合養生室之環控系統演譯及試驗研究」之外氣溫濕度數據及當時採行之黑盒子溫溼度調控方式進行操作模擬並比對耗電量。第二階段仍根據上述同樣的外氣溫濕度數據，而採行本研究所發展環境控制操作模式及策略進行操作模擬並比對耗電量。本文所述模擬之室內溫濕度閾值均根據瓜果嫁接苗癒合時期之氣候條件需求，根據過去瓜果嫁接苗之文獻(梁，1990 及林與洪等，1992)可知，一般瓜果嫁接在癒合期間的環境溫度宜維持在25 – 30°C左右，相對濕度則

保持在80%以上，光照度不宜太強，約為日照的40%，據張等(2003)研究指出，西瓜嫁接後之癒合時期，溫度維持在 $27.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 、相對濕度80 – 90%及平均光度 $25.12 - 49.12 (\mu\text{mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ 的環境下，可提高嫁接苗之品質及存活率。因此本文模式及策略驗證之室內外溫濕度閾值範圍於過去及當前研究是沒有改變的。

## 三、結果與討論

### 3.1 驗證系統模擬準確性

本研究首先根據已發表期刊之溫溼度歷線控制結果(周等，2002)，擷取外氣溫濕度條件，以當時條件序控法(condition-sequence control)溫溼度環境控制操作流程模擬溫溼度歷線控制結果、能源消耗與前後兩者對照之判定係數( $r^2$ )及均方根誤差(root mean square error, RMSE)作為比較(圖8-10)。對照圖8-10中夏、冬及春(秋)季溫濕

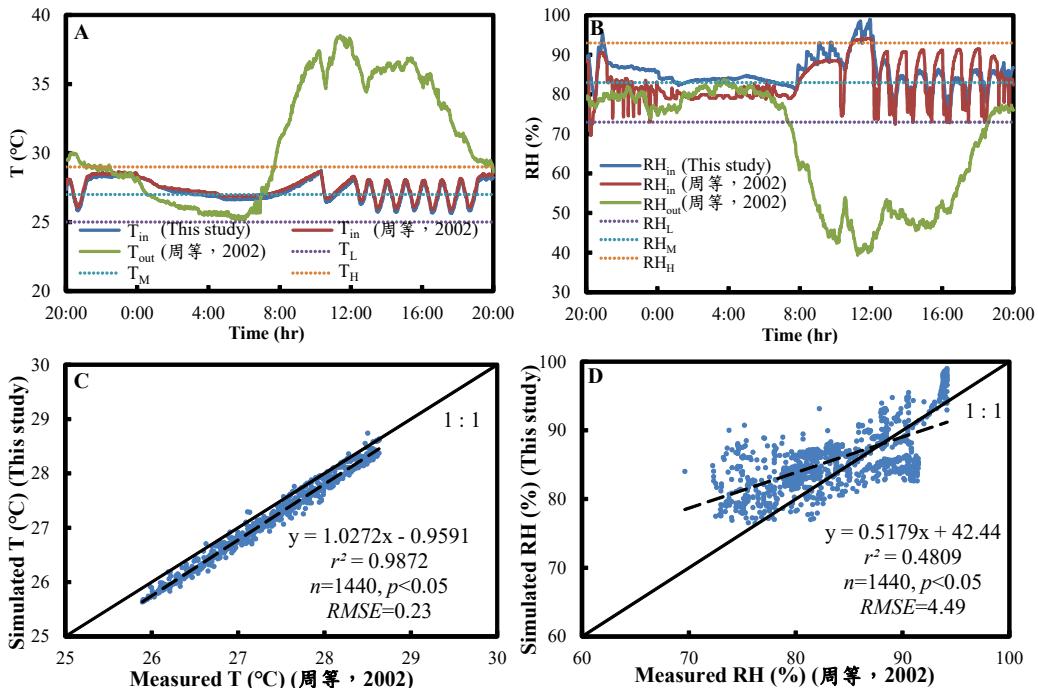


圖 8 夏季氣候溫濕度環境調控試驗(周等，2002)與本研究模擬結果：(A)及(B)分別是室內外溫度及相對濕度的歷線變化及調控界限範圍，(C)及(D)分別為室內溫度與相對濕度調控試驗與模擬結果兩者之間的 $r^2$ 及RMSE

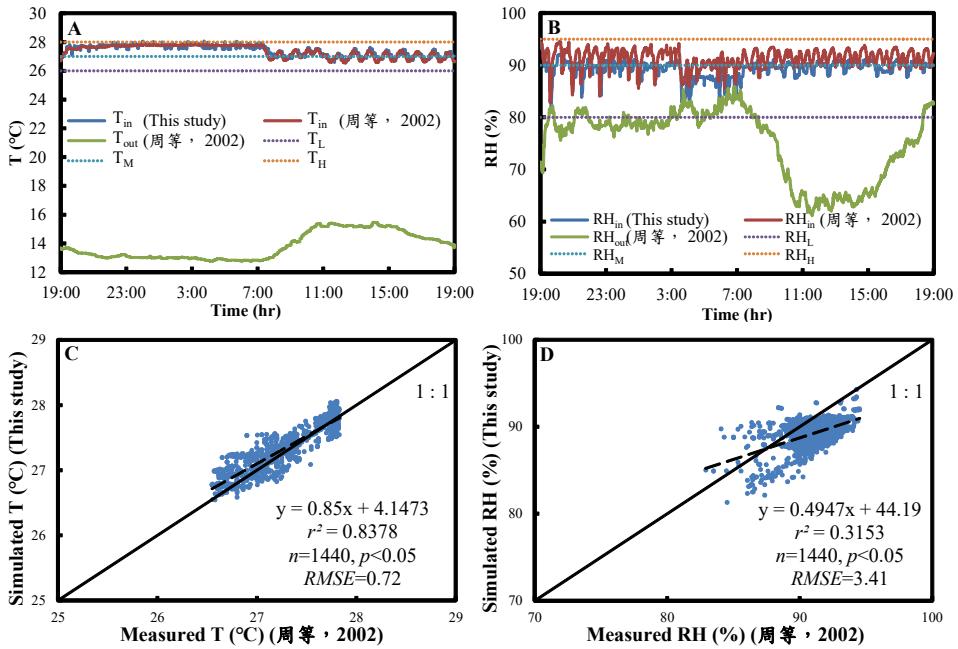


圖 9 冬季氣候溫濕度環境調控試驗(周等, 2002)與本研究模擬結果：(A)及(B)分別是室內外溫度及相對濕度的歷線變化及調控界限範圍，(C)及(D)分別為室內溫度與相對溼度調控試驗與模擬結果兩者之間的  $r^2$  及 RMSE

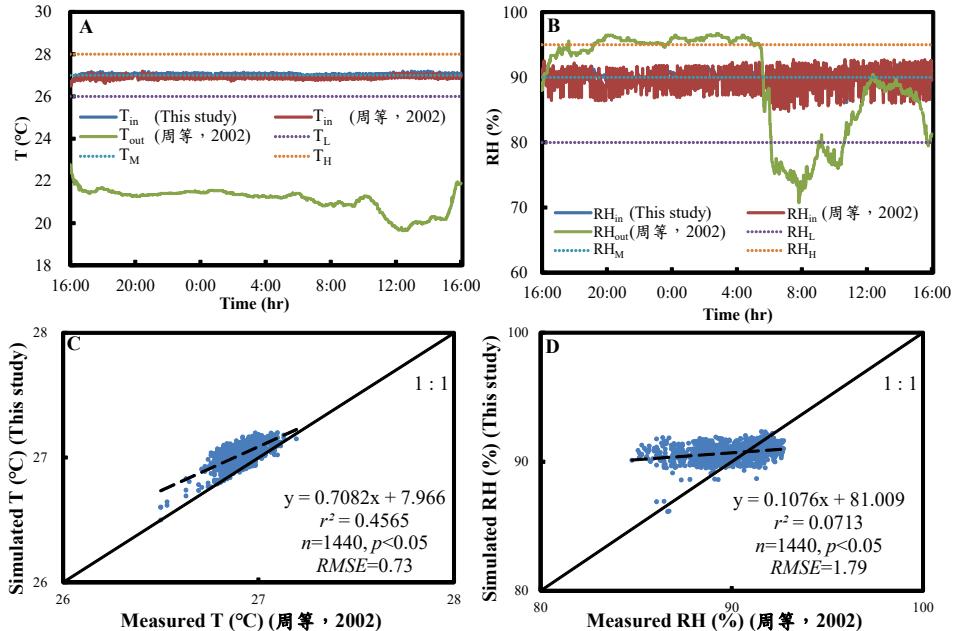


圖 10 春季氣候溫濕度環境調控試驗(周等, 2002)與本研究模擬結果：(A)及(B)分別是室內外溫度及相對濕度的歷線變化及調控界限範圍，(C)及(D)分別為室內溫度與相對溼度調控試驗與模擬結果兩者之間的  $r^2$  及 RMSE

度環境調控試驗(周等，2002)與本研究模擬結果可得兩者之間的趨勢變化是一致，溫度歷線之  $r^2$  分別為 0.987、0.84 及 0.457，RMSE 為 0.23、0.72 及 0.73 (°C)，相對濕度歷線之  $r^2$  分別為 0.48、0.32 及 0.07，RMSE 為 4.49、3.41 及 1.79 (%)。在周等(2002)研究中溫濕度環境調控試驗所用溫度儀表(MC3831 及白金電阻體 PT100)的量測精度為  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，相對溼度儀表(MC3831 及濕度感測器 HS8001)的量測精度為  $\pm 5\% \text{ RH}$ 。對照於當時實際量測控制(周等，2002)與本研究模擬控制系統所獲得的 RMSE 結果來看，都在上述可接受量測精度範圍之內。再對照此實際量測控制(周等，2002)與本模擬控制系統所獲得的判定係數  $r^2$  結果來看，尤其相對溼度的差異甚大，其原因的確是實際量測控制(周等，2002)相較於本研究模擬控制結果之震盪情況甚為明顯。進一步探究原因有 2 點：第 1 點是實際量測與模擬仿真控制的固有差異，實際量測控制系統會因操作時硬體設備(加熱、加濕、冷卻降溫及通風)存在本身固有的慣性行為反應及系統實際存在的時間延遲(time delay)，而此模擬仿真控制系統一般假設條件為理想狀態(例如操作時的慣性反應與系統實際時間延遲視為零)，在模擬計算時，自然地不會產生實際量測狀況下的震盪現象。第 2 點是周等(2002)研究中受限於當時硬體量測控制技術程度影響及環控設備採取非開即關(ON/OFF)界限設定程序控制，使得實際量測控制結果的振盪程度至為明顯。在過去這類系統的硬體建置與調控程序上僅以黑盒子控制法則與功能導向設計行之，因此上述兩因素是在實際量測控制下產生明顯振盪的潛藏原因。在周等(2002)研究中實際電子式相對濕度元件量測上相較於溫度量測的誤差精度與振盪情況甚為明顯，而本研究模擬結果就不會有這樣因為實際感測器、系統設備之固有慣性反應及實際時間延遲造成量測誤差精度的不確定性。在周等(2002)研究中癒合室溫濕度環境調控試驗於夏、冬及春(秋)季的實際用電量分別是每天 32.36、36.33 及 33.26 千瓦小時，本研究模擬結果的計算用電量是 33.046(夏)、38.035(冬)及 31.79(春)。比較此實際與計算用電量差異分

別是 2.12(夏)、4.69(冬)及 4.4(春)%，亦是在業者可接受準確度範圍 5%內。此可驗證本研究模擬結果的方式是可作為癒合室溫濕度環境控制設備操作的預測評估與計算用電量。

### 3.2 模擬系統適用性

本階段仍根據已發表期刊之溫溼度歷線控制結果(周等，2002)，擷取外氣溫濕度條件，以本文提出之環境控制程序及輸出操作機制模擬此嫁接苗癒合養生室之溫溼度歷線控制結果及用電量情形。圖 11 為此嫁接苗癒合養生室在夏、冬及春(秋)季氣候溫濕度環境調控試驗(周等，2002)與本研究提出之控制法則下的溫濕度環境系統模擬結果分別呈現於圖之(A)、(B)及(C)，上述所對應各季節氣候的實際及計算用電量情形呈現於(D)。圖 11 的結果是為了評估此模擬仿真控制系統的適用性以獲得在相同(夏、冬及春季)外氣溫濕度條件下，採用本研究所提出之控制法則輸出機制的模擬操作，獲得模擬系統的計算用電量相較於過去採行之黑盒子溫濕度調控方式(周等，2002)實際用電量減少 24、37 及 29%。這也表示過去(周等，2002)採行之黑盒子溫濕度調控方式(圖 8 至 10)，在當今科技及節能減碳潮流已不適用作為本研究嫁接苗癒合室模擬或未來實體的環境控制系統中的模式策略(圖 11)。

### 3.3 討論及應用

本研究改變過去系統以黑盒子控制法則方式採取功能導向為目標的控制策略，在嫁接苗癒合養生室內溫濕度模式能根據質能平衡定理及空氣熱力性質，建立一泛用型設施溫濕度環境模型。本研究在溫溼度環境的調控策略中納入目標區域控制論點取代過去點或線的目標控制是一種趨勢並考量設備用電使用狀況及外界氣候條件儘可能減少能源使用，在 2011 年 Hu 等在溫室控制中亦提出類似論點，利用區域或區間控制法則可解決存在於環境控制中多目標衝突問題，增加系統穩定性使設備操作頻率降低可間接減少營運及維護成本。

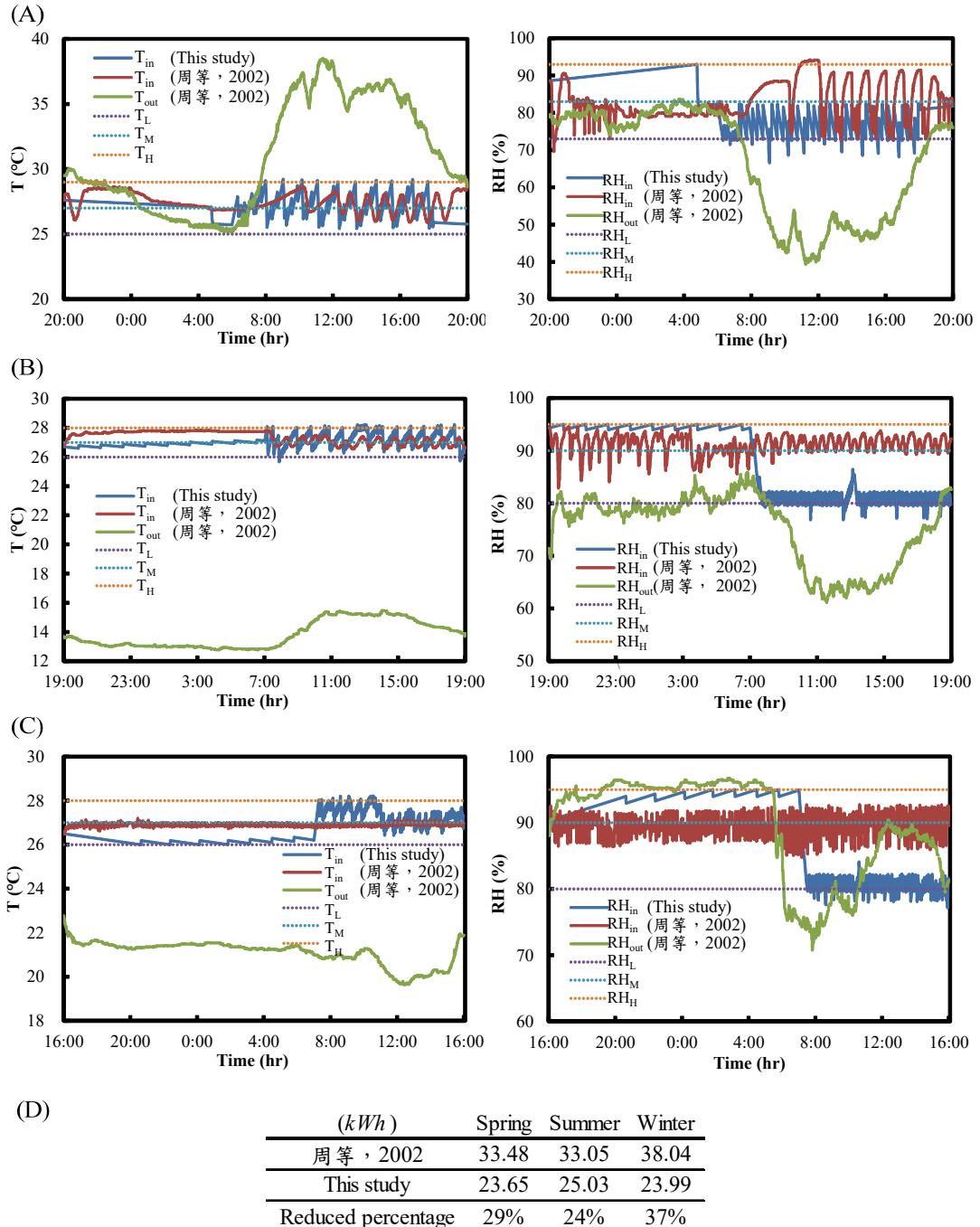


圖 11 嫁接苗癒合養生室在夏、冬及春(秋)季氣候溫濕度環境調控試驗(周等, 2002)與本研究提出之控制法則下的溫濕度環境系統模擬結果分別呈現在(A)、(B)及(C)，上述所對應各季節氣候的實際及計算用電量狀態呈現於(D)

本研究中所發展仿真控制器的混合控制系統不會因採用文獻之控制條件及硬體技術背景之時間久遠使模擬結果產生大幅度之變化，因為本研究在此混合控制系統架構之MLDS-LDES控制器是執行當時提出之條件序控法操作，僅有可能是無法將過去存在於系統擾動因素(硬體實際操作慣性與系統延遲)參數化及量化納入系統考量，造成模擬結果與實際量測的差異。此一研究課題並不在目前本研究主要範圍。鑑於目前本研究難以量化當時硬體操作慣性與系統延遲效應，為了探討系統中潛在擾動因素造成控制結果產生的振盪變化，在 Stiver (1996)混合控制系統中亦探討真實系統、控制系統與轉換介面三者經交互作用產生的延遲與系統反應時間的關聯性，

$$\tau_c[n] = \tau_e[n] + \tau_d, \tau_e[n] < \tau_c[n] < \tau_e[n+1].$$

其中 $\tau_c[n]$ 為控制器反應時間； $\tau_e[n]$ 為在n時間點發生的離散事件； $\tau_d$ 為系統總延遲時間， $\tau_e[n+1]$ 為在n+1時間點所發生的離散事件。Stiver *et al.* (1996)透過此論點闡述並界定在控制系統設計中，必須考量所有可能造成系統延遲因素，而控制器反應時間須介於 $\tau_e[n]$ 至 $\tau_e[n+1]$ 區間內(即小於兩事件發生之時間間隔  $\Delta t$ )，其控制才有實質意義。在控制系統中由於感測與控制訊號轉換所產生的反應時間是必然存在的，而極小化及最佳化已經不是系統設計唯一考量，然成本與適用性也藉由硬體選用找到相容規格匹配組件整合設計，使其足以達成控制系統中所要的整體效能(例如本研究中溫溼度範圍及用電量)。總結來說，在未來研究課題將硬體設備實際特性參數化後一併納入模擬系統條件中，更可以提高此模擬系統在控制結果的等效性及仿真度。

在此階段研究中我們發現系統內會造成干擾或不確定性因素主要兩項為植物蒸發散量，及設備操作係數。植物蒸發散量對於室內溫濕度動態調控是直接影響，現階段本文僅以定值計算並未考慮隨作物生理改變的蒸發散量。在未來可將嫁接苗水份蒸發散量視為一動態變化，依據作物栽培資訊(光強度、溫度、濕度、生長期及需水量)之交互作用機制建立作物蒸發散量動態模式

(Carmassi *et al.*, 2013; Ilahi, 2009; Jolliet and Bailey, 1992; Katsoulas *et al.*, 1999; Lorenzo *et al.*, 1998; Sánchez *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2010; Zeng *et al.*, 2012；周等，2015)，並將其納入此溫濕度動態模型中，提升模型擬合實體環境的仿真度及預測準確度。而設備操作係數則與設施施工及硬體材質有很大關聯性，例如設施氣密度及操作慣性等。現階段本文僅根據已發表期刊之溫溼度歷線控制結果(周等，2002)一一地以試誤法調整各硬體及設備操作係數進行模型擬合實體環境的仿真度，在未來能夠取得實體於實際操作環境下資訊，能建置一更符合科學原理之溫濕度環境控制系統模型以提升預測準確度。

本模型的延伸可根據作物各生長週期所需條件，增設多階段時變(例如日夜溫)溫溼度閾值設定的調控條件功能，使室內溫濕度環境更符合作物生長生理需求或產期調節，縮短嫁接苗癒合期及提升癒合存活率(Jou *et al.*, 2005)。本模型的延伸應用對於興建設施，可根據規畫之硬體及栽培各種條件，以客製化方法進行控制結果量化預測評估，降低設施於初期建造或改建擴充時可能造成的各項資源浪費風險，提升硬體控制條件與作物生長環境控制性能的適配性。除此之外，對於目前既有設施可進行升級或改善的硬體及設備評估。本模型發展之程式架構可轉譯為各種控制器(例如 PLC)之程式編程即可實現對應實體的儀表控制。

## 四、結 論

本研究演繹之溫濕度環境調控程序中採溫度為主，濕度為輔的操作策略，為能有效使用可獲得的自然資源(外部氣候)及提升系統整體能源使用效能，減輕高耗能環境控制設備使用頻率及時間(節能)。在調整控制的歷程設計上是採取循序漸進方式進行耗能最少的環境控制操作為控制程序法則。在 3.1 節系統驗證模擬準確性中，本研究所演繹之模式化調控策略能模擬控制癒合室溫溼度環境至預設標的，並且在 3.2 節電量消耗結果也顯示出運用外部可獲得的自然資源導入控制歷程之方法，不會對系統造成擾動且較

過去採行的調控策略更減少能源使用。

## 參考文獻

1. Bemporad, A. and Morari, M., "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints," *Automatica*, Vol. 35, No. 3, pp. 407-427, 1999.
2. Carmassi, G., Bacci, L., Bronzini, M., Incrocci, L., Maggini, R., Bellocchi, G., Massa, D. and Pardossi, A., "Modelling transpiration of greenhouse gerbera (*Gerbera jamesonii* Bolus) grown in substrate with saline water in a Mediterranean climate," *Scientia Horticulturae*, Vol. 156, No. 7, pp. 9-18, 2013.
3. Chen, S., Chiu, Y. C. and Chang, Y. C., "Development of a tubing-grafting robotic system for fruit-bearing vegetable seedlings," *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 26, No. 4, pp. 707-714, 2010.
4. Hu, H. G., Xu, L. H., Zeng, B. K. and Wei, R. H., "A compatible control algorithm for greenhouse environment control based on MOCC strategy," *Sensors*, Vol. 11, No. 3, pp. 3281-3302, 2011.
5. Ilahi, W.F.F., "Evapotranspiration Models in Greenhouse," Master thesis Irrigation and Water Engineering submitted in partial fulfillment of the Master of Science degree Agricultural and Bioresearch Engineering at Wageningen University, the Netherlands, 2009.
6. Jolliet, O. and Bailey, B.J., "The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison," *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 58, No. 1-2 , pp. 43-62, 1992.
7. Jou, L. J., Liao, C. M. and Chiu, Y. C., "A Boolean algebra algorithm suitable for use in temperature-humidity control of a grafted seedling acclimatization chamber," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 48, No.1, pp. 1-18, 2005.
8. Katsoulas, N., Kittas, C. and Baille, A., "Estimating transpiration rate and canopy resistance of a rose crop in a fan-ventilated greenhouse," *Acta Horticulturae*, Vol. 548, pp. 303-310, 1999.
9. Lorenzo P., Medrano, E. and Sánchez-Guerrero M.C., "Greenhouse crop transpiration: an implement to soilless irrigation management," *Acta Horticulturae*, Vol. 458, pp. 113-122, 1998.
10. Sánchez, J.A., Rodríguez, F., Guzmán, J.L. and Arahal, M.R., "Virtual Sensors for Designing Irrigation Controllers in Greenhouses," *Sensors*, Vol. 12, No. 11, pp. 15244-15266, 2012.
11. Stiver, J. A., Antsaklis, P. J. and Lemmon, M. D., "A logical DES approach to the design of hybrid control systems," *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 23, No. 11, pp. 55-76, 1996.
12. Vassilyev, S. N., "Logical approach to control theory and applications", *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Application*, Vol. 30, No.4, pp. 1927-1937, 1997.
13. Yu, W. J., Ryo, K., Katsuhiko, K., LI, L. H. and Hirokazu, F., "A Computer Program for Automatic Watering Based on Potential Evapotranspiration by Penman Method and Predicted Leaf Area in Miniature Pot Rose Production," *Agricultural Sciences in China*, Vol. 9, No. 3,, pp. 370-377, 2010.
14. Zeng, S., Hu, H., Xu, L. and Li, G., "Nonlinear adaptive PID control for greenhouse environment based on RBF network," *Sensors*, Vol. 12, No. 5, pp. 5328-5348, 2012.
15. Zhang, Y., *Indoor Air Quality Engineering*, Chapter 9, pp. 249-277, CRC PRESS, Boca Raton, Fla, 2004.
16. 周立強、邱奕志、范力達：「設計泛用型滴灌控制器適合於設施內盆栽植物灌溉管理需求」，農業工程學報，第 61 卷第 2 期，pp. 28-46，2015。
17. 周立強、邱奕志、陳世銘：「嫁接苗癒合養生室之環控系統演譯及試驗研究」，農業機械學

- 刊，第 11 卷第 4 期，pp. 85-104，2002。

18. 林天枝、洪溢堂：「苦瓜嫁接於絲瓜之栽培技術」，台中農業專訊，第一期，pp. 9-13 頁，1992。

19. 邱奕志、周立強、陳世銘：「蔬菜嫁接苗癒合養生裝置之研製」，農業機械學刊，第 8 卷第 3 期，pp. 9-20，1999。

20. 張允瓊、邱奕志、陳世銘：「西瓜‘富寶二號’嫁接苗癒合期環境條件之研究」，中國園藝學報，第 49 期，pp. 275-288，2003。

21. 梁呆：「西瓜嫁接經驗談」，園藝之友，第 22 卷，pp. 50-52，1990。

22. 陳世銘、方煒、羅筱鳳、曹幸之、張耀乾、廖國基、顏炳郎、蔡兆胤：「台灣植物工廠現況與發展策略之分析」，農業機械學刊，第 20 卷第 4 期，pp. 95-106，2011。

23. 馮丁樹、方煒：「個人電腦應用之三一空氣線圖之電腦模擬」，農業工程學報，第 32 卷第 2 期，pp. 49-63，1986。

24. 廖中明：「封閉型農業環境之溫溼度動態行為分析」，農業工程學報，第 36 卷第 4 期，pp. 39-48，1990。

## 附 錄

## 附錄 I

假設室內空氣為完全混合，即任何瞬間的室內溫濕度為均勻的；假設室內環境無其他對溫濕度干擾因素，即忽略室內周圍邊界及室內物體之熱容量並將熱負荷及水分負荷視為零。

為推導系統方程式，室內之乾空氣、水份、及濕空氣焓的平衡關係式由下列基本物質平衡式表示。

### 乾空氣之平衡式：

### 水份之平衡式：

### 濕空氣焓之平衡式：

$$\frac{d}{dt} [(V \cdot \rho_{air}) \cdot H_{in}] = F_{input} \cdot H_{input} - F_{in} \cdot H_{in} \quad ..... (20)$$

方程式(19)之左式可表示為，

$$\frac{d}{dt}(V \cdot \rho_{air} \cdot h_{in}) = V \cdot \rho_{air} \cdot \left( \frac{dh_{in}}{dt} \right) + h_{in} \cdot \left[ \frac{d}{dt} \cdot (V \cdot \rho_{air}) \right]$$

利用方程式(18)及(19)之關係，可得下式，

$$(V \cdot \rho_{air}) \cdot \frac{dh_{in}}{dt} + h_{in} \cdot (F_{input} - F_{in}) = F_{input} \cdot h_{input} - F_{in} \cdot h_{in}$$

上式可再簡化為，

$$\frac{dh_{in}}{dt} = \left( \frac{1}{V \cdot \rho_{air}} \right) \cdot [F_{input} \cdot (h_{input} - h_{in})] . \quad (21)$$

經由相同的方程式推導程序，由方程式(18)及(20)的關係，亦可得下式，

$$\frac{dH_{in}}{dt} = \left( \frac{1}{V \cdot \rho_{air}} \right) \cdot [F_{input} \cdot (H_{input} - H_{in})] \quad (22)$$

由於濕空氣焓為溫度及濕度的函數  $H_{in} = H_{in} \cdot (h_{in}, T_{in})$ ，將  $H_{in}$  做對時間的全微分後經整理可得，

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{(\partial H_{in}/\partial T_{in})} \cdot \left( \frac{dH_{in}}{dt} - \frac{\partial H_{in}}{\partial h_{in}} \cdot \frac{dh_{in}}{dt} \right) \dots \dots (23)$$

將方程式(21)與(22)代入方程式(23)，經整理後可得式(24)，

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{\rho_{air} \cdot V_T}{(\partial H_{in} / \partial T_{in})} \cdot \left\{ F_{input} \cdot \left[ (H_{input} - H_{in}) - \frac{\partial H_{in}}{\partial h_{in}} \cdot (h_{input} - h_{in}) \right] \right\} \dots \dots \dots \quad (24)$$

上述式(21)與(24)即為室內溫濕度之動態行為。根據嫁接苗癒合室之冷氣機額定除濕能力  $\dot{Q}_{air-cond}$  及額定排熱能力  $Q_{air-cond}$ ，將其分別代入式(21)與(24)等效轉換  $(h_{input} - h_{in})$  及  $(H_{input} - H_{in})$  可得式(25)及式(26)

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho_{air} \cdot V \cdot (\partial H_{in} / \partial T_{in})} \cdot \left\{ F_{input} \cdot \left[ \frac{Q_{air-cond}}{\rho_{air} \cdot V} - \frac{Q_{air-cond.}}{\rho_{air} \cdot V} \cdot \frac{\partial H_{in}}{\partial h_{in}} \right] \right\} \quad \dots \quad (25)$$

$$\frac{dh_{in}}{dt} = \frac{1}{(\rho_{air-in} \cdot V)^2} \cdot F_{input} \cdot \dot{Q}_{air-cond.} \quad \dots \dots \dots (26)$$

根據空氣熱焓關係式  $H_{in}(T_{in}, h_{in}) = 1012 \cdot T_{in}(t) + h_{in} \cdot \{\lambda + 1968 \cdot T_{in}(t)\}$ ，其中 1012 為乾空氣比熱  $S_{air} (\text{J} \cdot \text{kg}_{[Air]}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1})$ ；1968 為水蒸氣平均比熱  $S_{vapor} (\text{J} \cdot \text{kg}_{[H_2O]}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1})$ ； $\lambda$  為蒸發潛熱  $(\text{J} \cdot \text{kg}_{[H_2O]}^{-1})$  亦為溫度之函數  $2502535.259 - 2385.75242 \cdot T_{in}(t)$ 。為了簡化

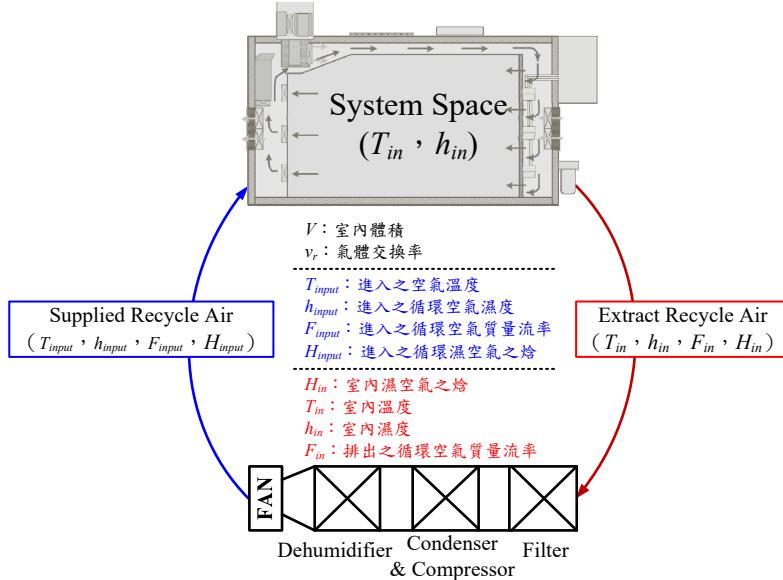


圖 A 封閉空間中空調設備之溫濕度環境系統狀態示意

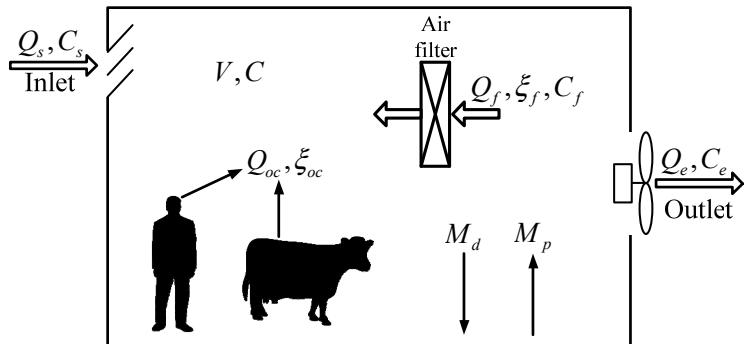


圖 B 在一通風空間內微粒混合狀態示意

式(25)中  $(\partial H_{in}/\partial T_{in})$ 、 $(\partial H_{in}/\partial h_{in})$ ，將偏微分算術式  $(\partial H_{in}/\partial T_{in}) = (1012 - 417.75242 \cdot h_{in}(t))$  及  $(\partial H_{in}/\partial h_{in}) = (\lambda + 1968 \cdot T_{in}(t))$  帶入等效轉換  $(\partial H_{in}/\partial T_{in})$ 、 $(\partial H_{in}/\partial h_{in})$  得式(27)

$$\left. \frac{dT_{in}}{dt} \right|_{air-cond.} = \frac{1}{[1012 - 417.75242 \cdot h_{in}(t)]} \cdot F_{input} \cdot \left\{ \frac{Q_{air-cond.}}{(\rho_{air} \cdot V)^2} - (\lambda + 1968 \cdot T_{in}(t)) \cdot \left[ \frac{Q_{air-cond.}}{(\rho_{air} \cdot V)^2} \right] \right\} \quad (27)$$

綜合上述方程式推導，(26)及(27)用來描述冷氣機性能與室內溫濕度調節過程之相互關係。

$$\left. \frac{dT_{in}}{dt} \right|_{air-cond.} = \frac{1}{[1012 - 417.75242 \cdot h_{in}(t)]} \cdot F_{input} \cdot$$

## 附錄 II

根據圖 B 中在一通風空間內微粒混合狀態示意，空間中懸浮微粒總質量隨時間的變化可表示為

表 A 11 至 13 式及圖 B 中各項符號之物理意義及單位表示

Symbol	Unit	Definition
$C$	$mg \cdot m^{-3}$	Particle concentration within the airspace
$C_e$	$mg \cdot m^{-3}$	Particle concentration of the outlet air
$C_f$	$mg \cdot m^{-3}$	Particle concentration passing a recirculation or an filter
$C_{oc}$	$mg \cdot m^{-3}$	Particle concentration of occupants within the airspace
$C_s$	$mg \cdot m^{-3}$	Particle concentration of the supply air
$C_\infty$	$mg \cdot m^{-3}$	Steady-state particle concentration in the airspace
$C_0$	$mg \cdot m^{-3}$	Initial particle concentration in the airspace
$A$	$m^2$	Deposition area of airspace
$\tau_c$	$s$	Distinguish this time constant from the particle relaxation time
$V$	$m^3$	Volume of the airspace
$V_d$	$m \cdot s^{-1}$	Particle deposition velocity
$Q_f$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Airflow rate passing a recirculation or an filter
$Q_s$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Air exchange rates for supply air and exhaust air
$Q_e$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Exhalation rate of occupants within the airspace
$Q_{oc}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Inspiration rate of occupants within the airspace
$M_p$	$mg \cdot s^{-1}$	Production rate of particles
$M_d$	$mg \cdot s^{-1}$	Particle deposition rate
$\xi_f$		Particle removal efficiency of the recirculation or an filter
$\xi_{oc}$		Particle removal efficiency of the respiration systems of the occupants

假設空間內條件濃度均勻混合(即可視 $C_e = C_f = C_{oc} = C$ )，及通風操作不改變室內氣壓壓力(即可視 $Q_e = Q_s = Q$ )，將條件帶入式(28)可獲得一描述空間中通風操作造成懸浮微粒濃度變化之質量平衡方程式，

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = M_p + Q \cdot C_s - Q \cdot C - \xi_f \cdot Q_f \cdot C - \xi_{oc} \cdot Q_{oc} \cdot C - V_d \cdot A \cdot C,$$

假設懸浮微粒的生成率( $M_p$ )、通風率( $Q$ )、循環率( $Q_f$ )與吸氣率( $Q_{oc}$ )均為系統中非時變參數，因此以變數分離法將上式以積分算術運算後可得式(29)

$$\int_{C_0}^C \frac{dc}{\left( C - \frac{M_p + Q \cdot C_s}{Q + \xi_f \cdot Q_f + \xi_{oc} \cdot Q_{oc} + V_d \cdot A} \right)} = \int_0^t \frac{-(Q + \xi_f \cdot Q_f + \xi_{oc} \cdot Q_{oc} + V_d \cdot A)}{V} \cdot dt \quad \dots \dots \dots (29)$$

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = M_p + Q_s \cdot C_s - Q_e \cdot C_e - \xi_f \cdot Q_f \cdot C - \xi_{oc} \cdot Q_{oc} \cdot C_{oc} - M_d \quad \dots \dots \dots (28)$$

對上式之懸浮微粒濃度 $C$ 求解可得在任意時間( $t$ )之空間中微粒濃度(30)

$$C(t) = C_\infty + (C_0 - C_\infty) \cdot e^{(-\frac{t}{\tau_c})} \quad \dots \dots \dots (30)$$

且

$$C_\infty = \frac{M_p + Q \cdot C_s}{Q + \xi_f \cdot Q_f + \xi_{oc} \cdot Q_{oc} + V_d \cdot A}, \quad \tau_c = \frac{V}{Q + \xi_f \cdot Q_f + \xi_{oc} \cdot Q_{oc} + V_d \cdot A}.$$

方程式(30)便可用來描述一空間中懸浮微粒濃度之均勻混合模型。式(28-30)及圖 B 中各項符號之物理意義及單位表示，整理列於表 A。

收稿日期：民國 107 年 8 月 11 日

修正日期：民國 107 年 8 月 26 日

接受日期：民國 107 年 9 月 27 日