

第五章 設施內環境控制

5.1 通論

在過去，高緯度地區於寒冷季節多使用溫室來生產高經濟價值的花卉與蔬果，露地栽培基本上不可能。最主要的環境因子當然就是溫度，通常是透過加熱系統來提供適當的溫度。但是，環控系統也可以包括以通風或冷卻方式來移走多餘的熱量，以遮蔭或使用人工光源來調節光量與光週期，設施內二氧化碳濃度，相對溼度，水分，營養等的控制與病蟲害防治等。在某些特殊用途的溫室中，譬如：動植物檢疫站使用的溫室與基因重組植物的栽培溫室，避免生物污染也是環控系統設計的重點。透過生物技術所生產的無特定病毒（pathogen free）的組織培養苗目前雖然多做為研究之用，但其作為商業應用的日子已經來臨。作者認為無特定病毒組織培養苗的種苗繁殖溫室會愈來愈多，其對環境控制系統的品質要求也會愈來愈高。

設施內環境控制涉及的設備與相關管理策略，由簡便的至涉及多種因子的極度複雜的整合系統，可說是種類繁多。就溫室業者而言，選擇某種作物栽培，選擇某類環控系統，事先的評估作業是最重要的。需評估所有環控系統的投資，能確保維持於適當的設施內環境，所生產的商品能有適當的回收，在扣除初始成本與操作成本之後，還能有可接受的利潤。一般而論，高單價商品允許較高金額的投資於較複雜的環控系統；較複雜的環控系統也多半能提供較佳的生長環境，最終生產較高品質的商品，所以有較高的售價。有時，簡單、廉價的環控系統，或許就可滿足業者的需求。

1) 溫室建築

溫室建築提供內部作物一個免於受風、雪、雨等天然災害的有利栽培環境，溫室建築亦提供最基本的環境調節功能，諸如：光量的穿透、熱量的進出、內外空氣的交換等均與建築的設計有關，前二者主要受到外部結構中被覆資材的影響，後者直接影響溫、溼度，二氧化碳濃度甚至病菌、昆蟲的數量等。

最傳統也最普及的溫室被覆資材為玻璃，其功能主要在隔絕內外的空氣環境，使得內部的空氣環境為可以控制的。被覆資材隔絕了內外空氣環境的質量傳遞，但熱量傳遞仍可進行，換言之，沒有溼度的交換，但熱量仍可透過熱傳遞進行內外交換，對內外溫度差異仍具影響力。被覆資材應依據需求提供不同的功能，譬如：高緯度地區的溫室，在寒冷季節，被覆資材應具備延緩熱量逸出的功能，同時，高的光線穿透性也是期望的需求。

在熱帶與亞熱帶地區，有些農業設施的被覆資材只是一層遮蔭網，如照片 5-1a,b 所示，雨水仍能進入設施內，但大雨滴會被打破，所以對作物的傷害可減少。有些簡易溫室只具備屋頂的結構，四週則全為開放，連棟的簡易溫室可能連集水的天溝都省下，直接讓雨水落於支撐溫室屋頂的立柱旁的水溝中，如照片 5-1c 所示。更簡易的被覆資材則有只是將土壤包覆的地面鋪蓋（mulch）與隧道（tunnel）式設施（照片 5-1d），前者常見於草莓，後者則見於瓜果類的田間栽培。雖然簡易，但前者對土層溫度，後者對設施內空氣溫度溼度與土層溫度的影響均頗大。地面鋪蓋使用不同顏色的資材尚

提供不同反光率，對土壤垂直方向的熱量分布亦有明顯影響。有關各種被覆資材對各種設施內與土壤層中溫度與水分含量影響的電腦模擬，可參見本文第二作者參與編寫的另一本著作（Takakura and Fang, 2002）。另有主要提供防蟲功能的被覆資材，溫室的進出口與通風口也都需安裝防蟲網。被覆資材除了可提供擋風、擋雨、透光、保溫、防蟲等功能之外，另一個功能則是可將噴藥時藥液/粉/氣的有效範圍限制於設施內，降低對室外環境的影響。

被覆資材的結構強度必須足夠將動負荷（如風力）與靜負荷（如積雪）傳遞到支撐結構上，一般透過結構分析可透過模擬了解受力狀況。玻璃與PVC, PC等硬質塑膠材料結構分析的方法與軟質材料如PE, PEEP等不同，北美地區溫室結構設計的規範已由國家溫室製造業者協會（National Greenhouse Manufacturers Association, NGMA）出版，並發表於該協會網站，如下：<http://www.ngma.com/>。這些標準（standards）與指導方針（guidelines）內含北美地區風力與積雪狀況的數據，相同準則與建議應可適用於全球各地。Mears等（1976）針對塑膠膜被覆的溫室結構進行設計與應力分析，一些常見造成此類結構受風力或積雪造成損害的設計缺失請參考Roberts（1978）的報告。

光線照射到任何材料，除了穿透之外，就是被反射或吸收。對溫室而言，被覆資材的光學性質是非常重要的，不同材料有不同的穿透率，穿透率、反射率與吸收率三者之和為1。穿透率大小與入射光線的波長與入射的角度有關，相同材料在不同波長的穿透率亦可能不同。一般而言，吸收率隨入射角的變化不大，但是，入射角愈大，反射率愈大，穿透率愈小。常用溫室被覆資材的光學性質在文獻中多有詳述，多侷限為單層的資料，方（1992）曾經推導雙層至多層被覆材料光學性質的理論計算公式，一些較新被覆資材的詳細資料，如今仍然未有系統化的整理。這些新的資材多數為多種資材的複合體，有些有添加化學藥劑如紅外線阻絕、抗紫外線、抗流滴與抗霧等，有些則純粹為多種材料共擠壓的多層膜。較新的被覆資材加入色素分子，有些甚至能改變光譜，將部分紅外線轉移為可見光（方等，1999）。

在過去，溫室常被認為就是以玻璃為被覆資材，現代則有許多溫室以軟質或硬質塑膠資材為被覆材料，並有許多可與玻璃的高穿透率與耐久使用性相競爭。紫外線、短波與長波的穿透率是選擇被覆資材的重要依據，玻璃的短波穿透率高，紫外線與長波穿透率均低。短波係泛指可見光部分的波長範圍，其中400至700奈米（nanometer）為對光合作用有明顯影響的波段，以光合作用有效光（Photosynthetically Active Radiation, PAR）稱之。長波則泛指輻射熱的部分，屬紅外線的波段，由800奈米以上至數百毫米（micron 或 micrometer）均屬之。紫外線為小於400奈米波段的光線。在過去，多半只有短波與長波受到明顯重視，現在已知設施內紫外線的有無對生物也有明顯的影響。聚乙烯（polyethylene, PE）塑膠布為常用的溫室被覆資材，有短波穿透率略低於玻璃，但紫外線與紅外線的穿透率均高。

被覆資材提供阻隔紅外線（輻射熱）的功能在保溫與設施內加熱系統的設計上有很大的影響，在能源危機發生的70年代，美國紐澤西州羅格斯大學（Rutgers Univ.）在節能的研究上發現在一棟雙層充氣式PE塑膠布溫室中有1/3的熱能損失係透過熱輻射方式，尤以在無雲的冷天為最嚴重（Simpkins et al, 1976）。基於此發現，研究人員開始研發在PE塑膠布中添加會反射或吸收紅外線的材料。與廠商的合作始於1981年，至1984年成品經測試後問世（Simpkins et al, 1984），隨即被大量採用。

目前最常見的溫室軟質塑膠被覆資材為含添加劑改善性質的低密度聚乙烯膜 (LDPE)，抗紫外線添加劑是全球溫室用 LDPE 的必備品，使用壽命可因此而延長，摺疊處亦可因此避免抗脆化。其他如紅外線吸收劑的添加 (減小長波穿透率) 可減少冷天的熱損失，此種塑膠膜在溫帶與寒帶地區日漸普及；抗流滴添加劑減小塑膠膜的表面張力，使得設施內水氣無法在被覆資材內表面凝結成水滴掉落到植株上，而改為沿著被覆資材的內表面向屋簷下方處集中。在高緯度地區，LDPE 通常以雙層方式安裝，中間夾層透過小馬力鼓風機連續送風，使兩層 PE 至少有 10cm 的間隔。此設計加強了設施結構的抗風性，加強了設施的保溫效果，降低加熱成本，也連帶減少加熱的設施內上方冷凝水滴的形成。

在過去，硬質塑膠被覆資材以玻璃纖維為常見，目前則是含紫外線保護外層的單層擠壓成型的 PC (polycarbonate) 有後來居上的發展趨勢。近年來，亦有一些 PC 或壓克力材質的雙層硬質被覆資材上市。在北美，有許多連棟溫室在側面立牆上使用硬質塑膠資材，在屋頂則使用軟質 PE。在溫帶地區，獨棟的不具加熱系統的塑膠布隧道 (tunnels) 常被用來延長作物的產期，有些亦被用來栽培種苗。當資材具備高輻射熱穿透率時，種苗的葉表面溫度基於輻射熱損失，可能會比空氣溫度還低幾度，在寒冷季節，種苗可能因此遭受寒害。所以基於對保溫功能的需求，比 PE 更能吸收紅外線的軟質塑膠資材如聚氯乙烯 (poly vinyl chloride, PVC) 與乙基醋酸乙烯 (ethyl vinyl acetate, EVA) 為常用資材，

在過去，從植物園到農場種苗生產使用的溫室多為使用玻璃覆蓋在金屬、水泥或木材結構上。近年來，從事商業生產的溫室業者基於成本的考量與對還控的需求，多使用單棟的橫截面為山形/三角形 (gable)、拱形 (arch) 或環狀 (hoop) 的設計。以環狀的初始施工成本為最低。此類設施多採自然通風方式，通風口分布在側邊或同時在側邊與屋頂，如圖照片 5-2 所示。當溫室建地超過 1,000 平方米時，以多跨距的連棟溫室在造價與日後使用的方便性上均屬較佳。環狀獨棟溫室多由農友以鍍鋅水管彎成拱狀自行搭建，內外示圖分別如照片 5-3a 與照片 5-3b 所示。較寬的獨棟溫室則多由專業溫室廠商提供部分關鍵零件，再由農友自行搭建，如照片 5-3c 所示。如照片 5-4a,b 所示為大型連棟溫室由專業廠商使用適當設計的鋼質、鋁質等建材，在現場組裝搭建。

在連棟溫室建築的設計中，愈來愈高的內部空間以允許新的環控設施與新興設備的安裝為重要的發展趨勢。對大面積連棟溫室而言，提高溫室高度所需的額外成本只佔總成本的極小部分。其相對的優點是設施內有足夠的空間允許安裝可收放的保溫布幕或遮蔭網，對某些需有暗處理的作物尚需安裝可收放的遮光布幕。另外也允許安裝人工燈光，自走式灌溉設施與自動化搬運設備等精密環境控制與自動化所必須的設備。針對此類溫室設施高度提高是利多於弊，作物的高度可不予以考慮。在熱帶、亞熱帶地區的溫室，遮蔭為必須的設備，室外遮蔭需考慮到結構的耐風性，室內遮蔭通常為首選。當設施內的環境可做到允許全年生產，有愈來愈多品種的作物需要人工補光以維持全年穩定的產量，這也是發展中的趨勢。

在溫室產業頗為成熟的地區，業者通常認知在溫室中應用到愈多複雜的技術，可以讓他們更具競爭力且獲利程度愈高，當然單位溫室面積的投資成本也愈高。研究此些成功的業者發現建築成本只佔總成本的約 10%。在溫室產業剛剛起步的地區，人們多半認為溫室建築成本為最大的支出，於是常常計較於建築的單價，而忽略了便宜

的建築是否能發揮需要的功能，也忽略了最重要的是生產成本與市場上產品售價與所生產產品的品質是否符合市場需要。

雙層充氣PE 塑膠布溫室有較高抗風性的說法不僅可透過結構力學的計算予以證明，我們在多年前(1978)與位於日本松山市(Matsudo)的千葉大學(University of Chiba)合建的一棟雙層充氣PE 塑膠布溫室正蓋於許多單層塑膠布溫室之中。後來一次颱風掃過該區，結果其他單層溫室不是嚴重受損就是完全被吹掉，只有我們的溫室完整無缺。十年後(1988)，有另一次中美合作計劃，我們與台灣的農機中心合作，也在北部與中部各蓋一棟，當1990年台灣遭遇一次嚴重颱風時，我們的雙層充氣PE 塑膠布溫室為受損壞，其他單層PE 塑膠布溫室則受損嚴重(Wu et al, 1991)。此兩棟溫室在現在(2002)仍然能夠正常運轉。這些實例說明了雙層充氣PE 塑膠布的中間空氣層，在受力時提供緩衝的作用，減少結構本體所受的應力，使得溫室有較高的抗風能力。

2) 加熱

在高緯度地區，溫室加熱技術是最重要，也是被最廣泛研究的溫室環控方法，從工程設計的角度來看，加熱系統的設計在調控諸多環境因子的方法中是最直接的。首先計算在最冷天候下透過結構本體的最大熱損失，以此值為所需的加熱負荷就可設計加熱系統的容量。進一步設計熱量的傳輸方式在商業化溫室也是非常重要的，不是溫室內的平均溫度能達到設計上的需求就可以，整棟溫室內溫度分布的一致性也是很重，因為關係著溫室內產品品質的一致性 (Roberts and Mears, 1984a)。

目前市面上存在多種的熱量傳輸方式，以下介紹其中幾種較能確保設施內溫度分布的方法。空氣可由小開口噴出的Fan-Jet系統使用風扇與塑膠軟管強制送風，軟管在截面4點鐘與8點鐘方向有開孔，照片5-5a,b所示為相關配件，是較便宜的安裝方式。有兩側加裝加熱單元機者(照片5-5c)，一般使用燃油或瓦斯。加熱單元機(照片5-5d,e)亦有採接力方式，連續安裝於溫室內。照片5-5f,g所示為Fan-Jet系統的彈性操作方式，高緯度國家的系統多懸吊在空中(照片5-5a,b,c)在必要時提供溶雪功能，台灣的系統則多置於地上(照片5-5h,i)。

需長時間加熱者仍以燃燒鍋爐為較經濟，在溫室內上層空間使用蒸氣或熱水管能提供較為一致的溫度分布；蒸氣或熱水在管內循環，熱源來自各自專用的鍋爐(照片5-6a,b)，有些設計同時將燃燒過程產生的二氧化碳導入溫室內，亦有與熱電共生系統連結。照片5-4b所示的溫室蓋在垃圾掩埋場的舊址，利用沼氣發電並提供鍋爐燃燒。透過水溫的控制能補足由結構本體的熱量損失率，所以溫室內能長時間維持恆定的溫度且溫室內各點也能有良好的一致性。溫室內上方安裝的熱水/蒸氣管為一般的圓管(plain pipe, 照片5-6c)，較新改良的為散熱能力提高的星形圓管有安裝於溫室上方者(照片5-6d)，亦有安裝於植床下方者(照片5-6e)。在靠近外圍的四周則多使用有鱗片的散熱管(fin pipe, 照片5-6f)。

在設施內使用許多小風扇來加強水平方向的空氣流動(horizontal airflow)在目前也頗為普及，當加熱系統無法達到熱量傳輸的一致性時，此方法可提供輔助；反之，若加熱系統中熱量傳輸方式有經過適當的設計，溫室內熱量的分布可以保持一致，此類在室內安裝的小風扇就不需要了。此類小風扇的另一個優點是有助於作物區內氣體的交流，譬如上層作物受光量大，光合作用旺盛，二氧化碳濃度變小，若室內缺乏空

氣流動，則日出幾小時後，作物區的二氧化碳量就會降低至光合作用補償點以下，植物生長勢必減緩。

將熱水管輸送加熱系統分成兩部分，一部份仍然保留在設施內作物區上方（被覆蓋資材下方），另一部份安裝於作物區附近或下方，此種方式提供了在作物區微氣候控制上的彈性。地底（照片 5-7a,b）或植床面（照片 5-7c,d,e）加熱系統提供了調節作物區尤其是根系溫度的方法，在多種作物的栽培上有明顯的成效（Roberts and Mears, 1984b）。另外也有一物兩用的設計，譬如植床架下方的縱向鋼管或供搬運車行走的鋼管（照片 5-8a,b）兼作熱水的輸送管。在亞熱帶地區，加熱的需求大為減少，上述植床面或地底加熱系統通常已足夠提供全年所需的加熱量，熱量輸送系統所需的安裝成本事實上已經涵括在植床支撐或搬運系統的成本之內。相同管路如果改供應冷水，則成為地底或植床面的降溫系統。

在 70 年代能源危機之前，高緯度地區溫室加熱所需的成本在比例上並不受到重視，當時，雙層充氣式塑膠布溫室會普及的主要原因在於容易安裝與低成本。其優點包括加強抗風性與減少室內滴水，另外與單層玻璃溫室比較可節約 1/3 的加熱用燃油成本。最末一項優點是在能源危機發生，燃油成本大幅高漲之後才突顯出來的。

對於可幫助節約能源的設計需求大增，於是雙層充氣式塑膠布溫室更廣為流行，雙層硬質塑膠資材也應運而生，其他尚有室內可收放的保溫、遮蔭布幕的研發與大量使用與後來被稱為微氣候加熱系統（microclimate heating）的地底與床面加熱系統的研發與推廣。業界之間也普遍由低成本但也低效率的單機式加熱機系統轉而朝向使用更有效率的熱水循環系統。現在回顧這些研發的腳步可看到溫室內產品品質與產量提昇與環境控制能力的提昇與使用能源的節約有明顯的關係。

無疑的，北美與歐洲地區溫室內加熱系統的研發歷程可作為其他地區加熱系統設計的參考，這些系統不僅技術上可行且早已證實為經濟上可行。諸多設計方案中有關節約能源的設計與對於產品品質的掌握允許精確細緻能力的提昇，在現代更具時代意義。

3) 降溫

溫室內加熱技術的研究比起降溫技術而言要早多也成熟多了，理由很簡單，因為溫室的發展是由高緯度需要加熱的地區開始的。在那些地區溫室通常是在天冷季節使用，熱季則多半棄置不用。基於溫室單位面積投資的提昇，終年使用變為必須，另外，熱帶與亞熱帶地區基於栽培品質的提昇與天災的避免，使用溫室的趨勢也逐年日增，有效的溫室降溫技術的建立就成為研發的重點。

自然通風為溫室降溫的第一步，一般而言，在溫帶或更高緯度地區，只透過自然通風多半已經足夠。具備自然通風能力的溫室，屋頂通風口的面積與位置是室內降溫程度的最大影響因子。此類設計的降溫性能在理論與實務上均已頗有豐碩的成果。在無風或低風速下，空氣進出口高度差與溫差所造成的密度差是室內空氣對流的驅動力，也是熱氣排出、新鮮空氣吸入的形成原因（照片 5-9 上）。入射太陽能愈大，造成溫差愈大有助於此現象的提昇。在較大風速下，風向、溫室座落、通風口與風速為空氣浮力之外的決定因子（照片 5-9 下）。

自然通風溫室有關通風口開口大小、開啟位置與開啟方法有多種設計，有的為屋

脊上的連續開口(照片 5-10a,b)或間斷開口(照片 5-10c),有的為在屋簷的固定連續開口(照片 5-10d)或活動的連續開口(照片 5-10e,f),亦有位於屋脊與屋簷中間的連續(照片 5-10g)。垂直鋸齒狀屋頂(照片 5-10h)亦可適用於獨棟或連棟溫室,此設計在垂直立面提供開口。另有雙層屋頂框架的設計,也提供熱氣由上方逸出的開口(照片 5-10i,j)。照片 5-10i 之溫室下層屋頂中央有開口,開口上方的上層屋頂框架上有塑膠布,設計理念與太子樓溫室相同,施工上便宜許多。照片 5-10j 之溫室下層屋頂使用防蟲網,上層則為塑膠布,上層沒有開口。以上溫室上方開口面積通常不足溫室面積的 1/3。

Albright (2002) 的研究指出屋頂開口面積佔溫室面積的比例(照片 5-11 的 X 軸)影響室內空氣溫度(照片 5-11 的 Y 軸)極大,假設進入室內太陽能輻射量為 $500\text{W}/\text{m}^2$, 其中的 65% 提供室內水分蒸發/蒸散使用(潛熱),其餘 35% 由室內空氣吸收(顯熱),結果造成室內空氣溫度的上升。溫室愈高,室內空氣溫度愈低;屋頂開口面積愈小,室內空氣溫度愈高,當屋頂開口面積佔溫室面積 1/10 以上時,室內、外溫差可維持在 5 以內。當室內植物少,水分不足,大多數進入的熱量表現於顯熱的比例會增加,一般擺滿植物的溫室,進入的熱量轉換於顯熱上的比例多在 30% 至 50%。

較高比例屋頂開啟面積的設計如照片 5-12a 與照片 5-12b 所示,分別可開啟達 1/2 與 2/3。另一種較新的設計是屋頂完全開放的溫室,此種溫室多半沒有使用強制通風系統,全部仰賴自然通風來散熱。如照片 5-12c 與照片 5-12d 所示分別為美國羅格斯大學(Both et al, 2001)與日本千葉大學的試驗用屋頂可開啟式溫室(照片 5-12e,f),兩者的開啟設計明顯不同。前者為由屋脊處向外張開,後者由一側屋簷處向另一側屋簷水平滑動造成開口。兩系統均有商品化規格問世,前者的施工較簡單,較為普及。

強制通風為在溫暖地區或季節較常使用的方法,當未使用遮蔭且溫室高度約為 2.5 米時,一般建議的通風量為至少提供每分鐘一次的同溫室體積的空氣交換量。通風量應採分階段控制,第一階段提供滿載時 8-10% 的風量,中間階段為 60%,滿載時當然為 100%。有關雙層塑膠布溫室配合強制通風系統的設計準則請參見 Roberts 與 Mears (1984a)。

不少業者由於已經安裝前述加熱系統使用的有孔塑膠軟管(perforated tube),所以第一階段的通風多使用該設備,只是在風機前增加一個緩衝空間,允許送入塑膠軟管內的空氣為加熱後空氣或溫室內回風或由室外吸入的新鮮空氣。在第二與第三階段的通風控制才使用安裝於溫室牆面的風扇。上述第一階段方式的優點在於可提供整棟溫室較均勻的通風。

強制通風系統中,風扇安裝於溫室之一側,空氣由另一側的通風入口進來,沿途吸熱的結果,使得空氣不斷加溫,入、出口的空气溫度差以溫度梯度稱之,設計良好的溫室,其溫度梯度不應超過 4°C 。通風入口最好是連續的,避免有降溫的死角。在台灣的夏天,光靠強制通風病無法使溫室溫度降到 30°C 以下,此時需仰賴的就只有蒸發冷卻的降溫方法,水簾片安裝於風扇的另一側,如照片 5-13a,b,c 分別為由溫室內,水簾後方與由溫室外觀察安裝水簾片之一側,由照片 5-13b, 照片 5-13c 可知,水簾片後方有可調整開口面積大小的擋板,擋板後方尚有防蟲網。此類負壓式的通風系統中,維持溫室的氣密性是非常重要的,必須使所有進來的空氣都經過水簾片才能發揮降溫的效果。此類系統在使用上需留意上方流水管路中是否阻塞,需留意清除。如果水槽

不清理，後果如照片 5-13d 所示，照片 5-13e 與照片 5-13f 所示為長滿青苔與積垢延嚴重的水簾片。

蒸發冷卻系統在高溫低濕環境的降溫效果最好，台灣的平均溼度高，還好一天中午後的高溫期間溼度正好最低。蒸發冷卻系統的降溫極限為空氣溫度的乾球與濕球溫度差，以濕球降（Wet bulb depression, WBD）稱之。不同溫、溼度下的濕球降請參見第四章濕空氣熱力特性之介紹。空氣通過水簾的降溫幅度等於室外空氣的濕球降乘上水簾系統的效率（70-80%），一般在 5（含）以內。有關水簾降溫系統的設計，降溫極限，使用上需注意事項與在台灣適用性的探討等，請參見方（1994）的論文。

常見的水簾片是以白楊木質纖維紙板製成，在單位體積內可提供足夠大的空氣與水的接觸面積與不大的壓降。如照片 5-14a 與照片 5-14b 所示水簾片厚度愈厚，降溫效率愈高，但是空氣通過的壓力損失（簡稱壓降）也愈大。通過水簾的風速增加，降溫效率會降低，壓降也會增加。壓降影響風扇所能輸送的風量，如照片 5-14c 所示為在台灣使用量頗大的 Euroemme 廠牌的四種尺寸風扇的性能曲線。

結構鬆散、耐濕與單位體積內表面積大為做為水簾片資材的基本需求，在各地均有相關替代材料的研究，前人試驗過的包括：菜瓜布、棕櫚樹纖維與塑膠網等。照片 5-15a 所示為在科威特的水簾溫室，使用棕櫚樹纖維，此系統雖然造價便宜，但使用壽命不長需常更換。塑膠網的使用就本文第二作者認為應是最具潛力的，不僅使用壽命長，維護方便，也可以使用高壓水槍清洗。荷蘭有由塑膠網捲成捆狀堆疊的商業產品問世（照片 5-15b），在台灣的售價幾乎為習用水簾片的兩倍，但使用壽命也在兩倍以上。照片 5-15c 與照片 5-15d 為本文第二作者參與研發的塑膠網系統，使用 6 層直立的塑膠網取代水簾片方式（方與賴，2001）。此系統原來使用低壓洒水方式（照片 5-15c），亦有使用模仿水簾系統的上方流水方式（照片 5-15d），後來改為使用高壓微霧方式，降溫效率可達 92%。

細霧系統在溫室的使用頗為普及，但需留意病蟲害問題，勿使溫室內過濕。通風系統的配合是必要的，當細霧系統的目的在降溫時，必須將水分蒸發才有明顯的降溫效果。作者在多年前曾經見過某園藝專家直接將細霧系統的水霧噴灑於番茄植株的葉片上，提供良好的散熱效果。需注意的是，細霧系統必須在天黑前就提早關閉，同時必需配合通風使植物體表面的水分在天黑前就完全蒸發。需留意午後快速形成的雲層以避免入夜後植物體表面的水分未能蒸發，致使病害問題發生。

如照片 5-16a 所示的高壓微霧系統日漸普及，因為能提供顯著的降溫與減輕作物水逆境的效果，照片 5-16b 所示為噴嘴的操作情形。細霧與微霧系統在商業經營的種苗溫室中也日漸普及，尤其在嫁接苗，扦插苗與組培苗移植入溫室後的栽培。此些系統在熱帶、亞熱帶地區會更為盛行（Mears, 1990），尤其是其可應用於四周均開放的簡易溫室內或網室的特性（方，1994）。通風系統、可收放遮蔭系統與細霧或微霧系統的整合控制，提供控制溫室設施內微氣候的彈性，此種整合控制能力的提昇可做為未來努力的方向。

微霧系統優於細霧系統的地方在前者有非常細微的霧粒尺寸，此小顆粒的水分子不會停留在結構本體或植物葉面上，可以在空氣中漂浮直到完全蒸發，大幅降低病蟲害感染機率。微霧系統使用高壓迫使水流通過極小的噴孔，其效率、性能與水壓大小、噴嘴孔徑、安裝高度與角度相關，系統使用壽命則與系統維護息息相關，舉凡水質，

使用濾材的孔徑與品質等。造霧系統（包含微霧與細霧）的效率包含噴嘴效率與整體的水量，有關各種蒸發冷卻降溫系統降溫效果量化指標的討論，請參見方（1995）之論文。

遮蔭可降低室內空氣溫度，但更重要的降低了植物體在陽光下所受到的熱緊迫與水逆境。在過去，大多數的遮蔭系統的考量多認為其屬季節性問題，譬如像 whitewash 的遮蔭塗料可以在春末或夏初塗佈在被覆資材上（照片 5-17a）來減低室內日照量。固定的外遮蔭（遮蔭網與屋頂有適當距離）外覆蓋（遮蔭網直接鋪在屋頂上，照片 5-17b）或內遮蔭亦可在夏季來臨前才安裝。室內可自動收放式遮蔭系統的研究於 70 年代開始，多元化的遮蔭網材質也開始出現，有些甚至允許做遮蔭網的同時，亦可發揮保溫功能。自動遮蔭系統（照片 5-17c）的問世允許在室內溫度過高前就遮蔭，大多數時間可維持溫室內有最大光量。系統的動作可以完全自動化，但感測部分應安裝在內遮蔭網之上，且應有觸發延遲的設計，避免一時的雲層或鳥類飛過的陰影即造成遮蔭網的誤動作。室外可自動收放的外遮蔭系統是較新的設計（照片 5-17d），在溫室屋頂上方需有支架來承擔遮蔭網與所有纜繩的重量，包括支架與遮蔭網本身結構的耐候性與抗風強度是設計上的重點。

作者認為在溫室降溫領域尚有極大的發展空間（Mears, 1990），有些系統可能降溫效能不錯，但現階段或許太貴了，此些系統在應用上，或許尋找適合栽培的高單價產品是首要之務。適當的投資提昇降溫能力後，有哪些作物原來無法在溫室內全年栽培，現在可以了呢？降溫能力提昇所需的成本與可能增加的產值，諸如此類的研究值得做進一步探討。作者在 1995 年三月受科威特農工協會之邀發表有關太陽能冷卻於溫室的應用，當時有一個有關使用太陽能電池提供風扇所需電力的討論，溫室最需風扇通風之時正是太陽能最旺盛之時，兩者可充分互補。當然現在仍受限於太陽能電池的效率與價位，但未來仍值得隨時留意此構想的可行性。

4) 其他環控因子

溫度是溫室內最主要的環境控制因子，除此之外，要進一步提高產量或產品品質，尚其他的環境控制因子需要加以留意。光量與光質主要受到建築本體與所選擇使用的資材影響，可收放的溫室內或外遮蔭與完全遮光系統（照片 5-18a,b）進一步提供光量與光週期控制的彈性。遮蔭系統可減少熱緊迫（thermal stress）與水逆境（water stress），在菊花栽培中常見的將光線全部遮掉的系統旨在進行光週期的調節以促進開花。如照片 5-19 所示為溫室內用於延長日照時數與加強光量的人工光源，此系統旨在透過加強光合作用的進行以增加作物的生長速率與提高品質。人工光源的投資成本較高，所以常用於高單價且高密度栽培的作物，如花卉（照片 5-19a, 照片 5-19d）、結球萵苣（照片 5-19b）與種苗（照片 5-19c）等。溫室內安裝人工光源在北美與歐洲已是非常普遍，最常用的為高壓鈉燈（照片 5-19a,b,c），亦有使用螢光燈管者（照片 5-19d）。

高壓鈉燈為最普及的溫室內人工光源，常見使用的為 250, 400, 甚至 1000W。除了安裝成本之外，操作電費當然是主要考量。不少地方都有尖峰與離峰用電的價差，充分利用廉價的離峰電力可節約成本。我們過去曾有經驗與電廠簽約使用離峰電力且允許需要時優先斷電的策略，可降低電價達 30% 以上，這不失為頗具競爭力的決策。熱電共生（cogeneration）是北美地區較大規模溫室業者所採取的做法，多餘的電力可

回銷給電廠。有關用電的策略應該看各個地區用電、買電定價的標準而定，此標準在不同地區可能差異頗大。若允許臨時優先斷電有明顯的價差，人工補光部分的用電量不妨採此策略，通常需要臨時斷電的機會多半一年內不會發生幾次。

溼度控制對某些作物特別重要，譬如插穗的種苗（root cutting）、嫁接苗與剛由組織培養瓶移植到溫室的組織培養苗等。溼度控制通常透過細霧（misting）系統來加濕，有些也使用高壓微霧（high pressure fog）系統，後者有使用日增的趨勢。透過除濕來降低病蟲害發生機率是理論上可行，但很難落實執行，除濕多半只透過通風來達成，但受限於室外濕度與通風量。同時加熱與通風可進一步降低溼度，但成本高。在某些地區，已有商品化的除濕系統可以使用，譬如熱邦浦（heat pump）與乾燥劑吸濕系統（desiccant absorption systems），但並不普及且成本亦高。

二氧化碳是光合作用之所需，提高溫室內二氧化碳濃度有助於作物生長與分化為已知的事實。高緯度地區在天冷時，溫室緊密關閉完全密不通風以保溫，此時必須補充二氧化碳。二氧化碳施肥的成本不低，所以一般用於高經濟價值的作物。對一般 C3 與 C4 作物而言，且僅在天冷時的白天或開啟人工燈光的夜間。對 CAM 作物而言，二氧化碳施肥的時機在晚上。較便宜的大面積二氧化碳施肥的做法是燃燒天然氣，有些溫室業者將白天燃氣的熱量透過儲熱系統予以儲藏，提供晚上天冷時使用。亦有研究利用相變材料（phase change material）或其他方式來吸收部分熱量，降低溫室所需的通風，以避免二氧化碳施肥時二氧化碳的流失。

5) 灌溉與肥培管理

如何提供水分與營養給溫室內作物是能否成功栽培的關鍵之一，目前在溫室業者之間，針對不同作物有許多種不同的做法，水耕法（hydroponic）將水分與營養混合，一起提供給作物的做法日趨普及。穴盤苗的灌溉也是至關緊要的問題，基於每穴盤內容積小，介質少，容錯的機會也小。如照片 5-20a,b 所示，能精確控制灌溉量的自動洒水系統的使用日趨增加，此系統也可附掛噴灑養液或殺蟲劑。此設備在國外有多家大廠進行量產，較先進機型具備供水速率、行進速率與每日灌溉頻度可調的智慧型功能，同一機器行進至不同區域時允許有不同的設定，有些尚能透過條碼或影像系統偵測有無作物而停止洒水/施肥/噴藥。本地業者在此方面的研究也頗積極，除了單軌懸臂的常見設計之外，較特殊的有多用途的雙軌天車型的設計（照片 5-20c），可兼作搬運與洒水/施肥/噴藥等功能。農業委員會台中區農業改良場（龍與田，2001）在農業自動化十年計劃期間所研發的自走式洒水系統尚兼具自動換行的功能（照片 5-20d），可節省大面積溫室內所需台數。

溫室產業先進國家目前對溫室內任何營養液與藥劑的排放可能造成地下水污染的問題都頗為重視，所以系統的研發傾向將排放減至最小甚至達零排放。研發分兩大方向進行，其一為只提供作物適當量的必須水分與養分，其二為使用灌溉水與養液循環使用（water recirculating）。雖然此些系統的研發動力來自於民眾對環保的要求，但同時也是一個契機，讓我們可以更了解作物的需要，使水分與營養的供應可精確控制。如照片 5-21a,b,c,d 所示為日益普及的循環水淹灌系統（ebb and flood）主要用於盆栽作物（Both et al., 2001, 照片 5-21a），類似系統在台灣亦有用於豌豆苗生產（照片 5-21b）茄科作物側芽生產（Hsiao et al., 2001; 馮等，2002, 照片 5-21c）與蝴蝶蘭小苗栽培（方

與賴，2001；Fang and Lai, 2001; Lai et al, 2002，照片 5-21d)。

6) 病蟲害防治

每一種作物都有其特定的病蟲害，溫室內栽培作物受病蟲害影響的機率較低，但仍需要控制防治。防治手段在過去多由使用化學藥劑著手，近年來，環保意識抬頭，人們不僅留意這些藥劑的排放造成短期污染，更留心長期對環境的影響，所以整合式蟲害防治方法 (integrated pest management) 強調生物防治與其他非藥劑的做法受到諸多重視。

一般言之，病蟲害的問題在熱帶、亞熱帶地區較為嚴重。可預期的是將來受到環保需求的壓力，藥劑的使用會被限制到最少，向外排放幾乎會被完全禁止。所以研發的重點應是要防止病蟲害的傳播媒介進入溫室，而非等進來之後造成問題再予以防止。防蟲網的安裝，衛生習慣的培養，溫室內部最低條件不容積水、長青苔，更不能長雜草，人員進出的管制與出入口使用雙重進出門的設計 (照片 5-22a,b) 等可將感染機會降至最低。雙重進出門的使用需嚴格執行前後兩個門不能同時開啟的規定，此些正確的管理措施將會成為基本的需求。

種苗的培育使用經過殺菌消毒的介質與種子，組織培養生物技術可提供無特定病毒種苗。簡言之，在開始階段可以是完全沒有病蟲害感染的。就現階段而言，後續的栽培階段則頗難有效地維持於無病蟲害感染危機的環境內。生物技術可培養具備抗病或抗蟲基因的種苗，這是其中一種對策，就工程技術而言，仍有許多研究需要進行。

為考慮噴藥時人身安全，溫室內已有業者使用自走車進行噴藥 (照片 5-23a)，亦有子母車的設計，允許子車進入走道間進行噴藥，子車回到母車後允許換行 (龍等，2000；盛，1998)。另外，台糖公司引進的植床搬運系統中，由於可輸送式植床 (transportable bench) 可輸送至工作屋內的集中噴藥區再進行噴藥，人員的管制與廢液的回收均頗方便 (照片 5-23b) (龍等，2000)。

在通風入口處安裝防蟲網是減少化學藥劑使用量的有效方法，本文第一作者在 1989 年應印度政府委託，分別針對其境內四個不同天候區設計檢疫溫室時開始深入了解防蟲網的影響 (Mears and Kahn, 1999)。防蟲網孔目大小的選擇決定於由病蟲害專家所決定的所欲防治的昆蟲種類，孔目需小於昆蟲飛舞翅膀時的橫截面寬度。防蟲網選定之後，剩下的就只是工程問題了。防蟲網會減少空氣入口面積，會增加系統壓降，降低相同風扇所能提供的通風量。所以防蟲網的安裝最好是能減輕空氣入口面積的減少問題。基本設計原則為空氣經過通風口的風速應該要低，總壓降不應超過 2.6 mm 水柱壓力，其中空氣通過未安裝防蟲網的通風入口壓降為 0.8 mm 水柱壓力，通過新的防蟲網壓降不超過 0.8 mm，防蟲網積塵則為另外的 1 mm。Sase 與 Christianson (1990) 曾針對防蟲網對自然通風溫室的影響進行試驗，發現超細孔目的防蟲網雖可防止小昆蟲進入溫室，但對自然通風的空氣產生的阻力過高。一般言之，超細孔目的防蟲網適合配合強制通風的溫室使用，由於風阻與風速平方成正比，防蟲網安裝於通風開口的面積應加大使得到適當風速是很重要的 (照片 5-24a,b)。

現階段使用的負壓式通風系統均是將外面空氣引入室內，如此也增加了感染的機會，使用通風之外的任何可降溫的方法均可降低昆蟲進入溫室的機率。另一個可行的方案是改採正壓式通風系統，將空氣吹向防蟲網再進入溫室 (Mears and Both 2001)，

示意照片如照片 5-25 所示。正壓式通風系統若能提供溫室內一個足夠的正壓力，則由所有開口出去空氣流速均能大於昆蟲的飛行速率，則自然可有效阻絕昆蟲進入溫室。傳統使用的負壓式通風系統正好相反，在溫室附近飛行，無欲進入溫室的昆蟲都有可能被吸入。正壓式通風系統在熱帶、亞熱帶地區的溫室應該具有高度的發展潛力，目前，單棟溫室之實驗已證實此概念之可行，連棟溫室之測試仍有待進行。

7) 管理

在溫室產業成熟發展的地區，作業效率與產品品質的改善是決定業者在同行間競爭力的關鍵因素。幸運的是，市場範圍與售價可隨著品質提昇而擴大，大家努力的結果，整個產業因此更為興盛；業者對於其可用資源的管理與可用知識、技術的取得能力更顯重要。參與由國家農業部門或農民自主發起的生產合作社組織，透過開會甚至簡單的聊天達到經驗交流的目的，參加農會、學校與技藝訓練中心提供的訓練課程達到知識、技術傳播等都是提昇業者競爭力的辦法。

許多業者使用電腦作財務與資材的管理，亦有使用專用電腦作環境控制。在管理策略中已有不少研究發表，包括溫室內小單元的使用至整個系統的管理等。亦有單位研發專家系統與多種決策支援系統來協助業者面對每天發生的管理問題（Ting, 1991, 1992）。進一步討論請參見本書第 8.2 節。

結語

溫室設施在過去多集中在溫帶與寒帶地區使用，目前由於在經濟效益上已證實可行，在熱帶、亞熱帶地區的使用也日益普及。過去的環境控制多只針對溫度一項環境因子，目前針對其他環境因子的控制，只要證實能增加收益，自然受到重視。檢疫用途、研究用途與需要順化處理的組織培養苗於溫室栽培等，都需要更高品質環控技術的溫室設計，此類溫室的需求也會日增。對高品質觀賞與蔬果作物的全球市場需求會不斷擴大，下一個十年，全球溫室面積仍會不斷擴充，尤其是在熱帶與亞熱帶地區的發展中國家。在溫室工程領域的研究發展上，在舊有技術中尋求改善，多半會針對減輕原有技術的環保問題，新技術的發展更不能忽略對環境的影響。

引進技術的落實須留意並掌握所有的技術環節，需知道別人為何做如此的設計，需檢討我們是否需要一樣的設計。高緯度地區的溫室在結構上多會考慮積雪的負荷，其使用結構立柱的截面積多半較大，加熱管路也安裝於溫室內上方以及早溶雪，避免被覆資材上積雪嚴重，壓垮溫室。部分台灣的溫室業者只知其然，不知其所以然，在不曾下雪地區所蓋的溫室也將加熱管路安裝於溫室內上方，結構上也使用國外的設計以致使用過粗的立柱，卻承受不住大風來臨產生的拉拔力量。凡此種種，均明顯代表教育的不足。在溫室產業新興的地區，栽培研發人才與培訓現場作業人員的努力是需要持續注重的。

(Mears, D.R. 方煒)

引用 參考文獻

1. 方煒。1992。多層透明被覆材料太陽能輻射性質之理論探討：I. 使用光跡追蹤法。
農業機械學刊 1(4)：31-41。
2. 方煒。1994。水牆設計與使用。農業機械學刊 3(4)：57-70。

3. 方煒。1995。溫室蒸發冷卻系統降溫效果量化指標之建立。農業機械學刊 4(2):15-25
4. 方煒、李光軒、饒瑞佶。1999。使用有色固態及液態透明資材調整光質。農業機械學刊。農業機械學刊 8(2) : 63-73。
5. 方煒、賴建洲。2001。網式水簾結構。中華民國新型專利第 171021 號。
6. 方煒、賴建洲。2001。植物量產工程在台灣的實現。生物科技在農業上的應用研討會論文集。楊盛行主編。台灣大學。pp295-311
7. 盛中德。1998。設施內施藥作業自動化。馮丁樹編輯。種苗生產自動化技術專輯第三輯。國立台灣大學。
8. 馮丁樹、蕭瑋炯、方煒。2002。潮汐灌溉式側芽育苗系統及裝置。中華民國發明專利第 150021 號。
9. 龍國維、田雲生。2001。設施栽培之灌溉自動化。林達德、李桂芝編輯。農業自動化叢書第十一輯：設施栽培自動化。國立台灣大學。
10. 龍國維、張金發、蔡致榮。2000。設施內施藥與灌溉自動化。廖苓姿、盧福明、林達德編輯。農漁牧產業自動化十年成果專輯-農業自動化篇。國立台灣大學。
11. Albright, L.D. 2002. Controlling greenhouse environment. *Acta Horticulturae* 578, ISHS. 12. Anonymous. 1994. National greenhouse manufacturers association standard for design loads in greenhouse structures. NGMA. St. Paul, Minnesota.
13. Both, A.J., E. Reiss, D.R. Mears and W.J. Roberts. 2001. Open-Roof Greenhouse Design with Heated Ebb and Flood Floor. ASAE Paper No. 01-4058 Presented at ASAE Annual International Meeting, Sacramento, California. July 30-August 1, 2001.
14. Fang, W. 1994. Greenhouse Cooling in Subtropical Regions. *Acta Horticulturae*. 399: 37-48.
15. Fang, Wei and Chien-Chou Lai. 2001. Successful implementation of ACESYS in a commercialize controlled environment plant production system. The 2nd International Symposium on Biotechnology of Tropical and Subtropical Species. Nov. 5-9. Institute of Botany, Academia Sinica, Taipei, Taiwan.
16. Hsiao, W.J., D.S. Fon and W. Fang. 2001. Producing tomato transplants from lateral shoots using ebb and flow system. Proceedings of "International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical And Subtropical Greenhouses". April 15-18, Taichung, Taiwan, ROC.
17. Lai, C.C., W. Fang and S.F. Chang. 2001. Plant Factory in Taiwan Using Moving Light. Proceedings of "International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical And Subtropical Greenhouses". April 15-18, Taichung, Taiwan, ROC.
18. Mears, D.R., M.K. Kim and W.J. Roberts. 1976. Structural analysis of an experimental cable-supported air-inflated greenhouse. *Trans. ASAE* 19:5
19. Mears, D.R. 1990. Greenhouse environmental control for Indian conditions. in *Horticulture – New Technologies and Applications*. J. Prakash and R.L.M. Pierik ed's. Kluwer, Dordrecht.
20. Mears, D.R. and R.P. Kahn. 1999. Concepts and New Designs for Quarantine

- Greenhouses. Published in Kahn, R.P., S.B. Mathur et al. Exotic Pest and Pathogen Exclusion: Containment Facilities and Safeguards for Imported Seeds, Plants and Biological Control Organisms. APS Press, St. Paul, MN, Chapter 11, p74-92.
21. Mears, D.R. and A.J. Both. 2001. A Positive Pressure Ventilation System with Insect Screening for Tropical and Subtropical Greenhouse Facilities. Keynote talk and Proceedings of The International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. ISHS, Taichung, Taiwan. April 15-18 2001.
 22. Roberts, W.J. 1975. Energy saving greenhouse. Extension Publication, NJAES. New Brunswick, NJ.
 23. Roberts, W.J., 1978. Greenhouse failures during winter of 1977-1978. Extension Publication, NJAES, New Brunswick, NJ.
 24. Roberts, W.J. and D.R. Mears. 1984a. Heating and ventilating greenhouses. Extension Publication, NJAES. New Brunswick, NJ.
 25. Roberts, W.J. and D.R. Mears. 1984b Floor heating and bench heating for greenhouses. Extension Publication, NJAES. New Brunswick, NJ.
 26. Sase, S. and L.L. Christianson. 1990. Screening greenhouses - some engineering considerations. ASAE Paper No. NABEC 90-201.
 27. Simpkins, J.C., D.R. Mears and W.J Roberts. 1976. Reducing heat losses in polyethylene-covered greenhouses. Trans. ASAE 19:4
 28. Simpkins, J.C., D.R. Mears, W.J Roberts and H.W. Janes. 1984. Evaluation of an experimental greenhouse film with improved energy performance. ASAE Paper No. 84-4033.
 29. Takakura T. and W. Fang, 2002. Climate Under Cover. Second Edition. Digital dynamic simulation in plant Bio-Engineering. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
 30. Ting, K.C. and G.A. Giacomelli. 1990. Robotics applications to transplanting of plug seedlings. in Horticulture - New Technologies and Applications. J. Prakash and R.L.M. Pierik ed's. Kluwer, Dordrecht.
 31. Ting, K.C. 1991. Overview of controlled environment plant production systems. in Proceedings of International Symposium on Applied Technology of Greenhouse. Knowledge Publishing House. Beijing.
 32. Ting, K.C. 1992. Mechanization, automation and computerization for greenhouse production. In Proceedings of Symposium on Automation of Seedling Production and Transplanting for Horticultural Crops. Taoyuan District Agricultural Improvement Station. Taiwan.
 33. Wu, C.H., H.S. Chang, J.Y Shaw and T.C. Kao. 1991. Engineering protected cultivation systems in Taiwan. Report to OICD/IRD, USDA by TAMRC, Taipei, Taiwan.

5.2 環境控制系統

全球的溫室產業已邁入環控農業 (Controlled Environment Agriculture, CEA) 的範疇，CEA 的實踐在於控制動、植物生長的環境以利於其量產，並提高產品品質與提高單位面積與單位時間之產能。CEA 已廣泛運用在養殖漁業、食用菇類、肉雞、蛋雞生產與溫室花卉與種苗等。運用在溫室花卉與種苗生產者以環控園藝 (Controlled Environment Horticulture, CEH) 稱之。CEH 的目標在了解環境與其他關鍵因子對作物生長與生育等生理上的影響，從而調控此些因子，達到提高產能，縮短產程，提高品質等多元的目的。要達到此目的，電腦化控制系統的使用勢在必行，國內目前仍偏向統的機電控制箱，且均未含控制策略，尚有不小的發展空間。

進階的控制系統必須整合多種數學模式，包括能量守恆模式、質量守恆模式、作物生長模式與經濟效益評估模式等。依據溫室使用的資材，其結構本身的散熱與保溫能力可以預估，根據溫室所在地的氣象資料，栽培作物的需求與所執行的控制策略，加熱與降溫的成本等可以評估。根據作物生長模式與市場銷售行情，上述控制條件下的作物產能與產值等也可以預估。

環境控制系統包括感測單元與控制單元，前者為系統的感官，後者則為系統的心臟與大腦，每一環節都是系統成敗的關鍵，每一單元也可自成系統。常見可偵測的環境因子包括：

輻射：淨輻射 (全光譜)、光合作用有效光量 (400-700 nm)、太陽能 (100-4000 nm)。

溫度：空氣乾球與濕球溫度、葉溫、介質/養液溫度。

溼度：相對溼度。

養液：pH、導電度、流量率、鈣、硝酸根、磷離子濃度、溶氧量等。

其他：二氧化碳濃度、大氣壓力、風速、風向、雨量。

上述環境因子的量測允許管理者針對量測地點進一步了解以下的各項現象，包括：

- 空氣的蒸氣壓
- 空氣的絕對溼度與露點溫度
- 空氣的乾球與濕球溫度差，又稱濕球降 (wet bulb depression)
- 設施內植物體與濕潤表面的水分蒸發散量 (evapotranspiration)
- 顯熱通量與潛熱通量
- 空氣的熱焓變化
- 二氧化碳變化量
- 水平衡 (water balance) 與能量平衡 (energy balance)

透過環境因子的量測與對環境的解析，結合對作物的了解，我們可以評估以下諸項反應的進行速率，從而作為進一步評估產能與風險的依據。這些反應速率包括：

- 水分蒸散與二氧化碳濃度變化 (Transpiration and Carbon dioxide fluxes)
 - 氣孔阻力
 - ◆ 根系狀況

- ◆ 光量
- ◆ 植物含水狀況
- 葉片邊界層阻力
 - ◆ 空氣流量、風速與擾流狀態
- 空氣與葉片氣孔間的蒸氣壓差 (vapor pressure deficit)
- 空氣中二氧化碳濃度
- 淨能量變化
- 光合作用 (Photosynthesis)
 - 光合作用有效光量
 - 細胞內二氧化碳濃度
 - 葉溫
- 轉流/移轉 (Translocation/Allocation)
 - 光量
 - 組織溫度
 - 植物含水狀況
- 同化作用 (Assimilation)
 - 組織溫度
 - 植物含水狀況
 - 可吸收的營養鹽狀況

包含上列一項或多項反應速率的簡單或複雜的植物生長模式，都必須透過環境因子的量測與實際偵測植物的生長狀況，來驗證模式是否具代表性。控制策略中可加入上述經驗證的模式，透過環境因子的控制來求得最佳的產能，品質或收益。Rutgers 大學有關單果串番茄的栽培是很好的範例，透過量測每日累計光量，過低則在夜間補充人工光源，維持整日的光量在適當範圍，可準確預測每株番茄的產量，正確預估始花至收穫所需日數 (Ting et al., 1993)。Cornell 大學有關萵苣栽培是另一個範例。在正常大氣二氧化碳含量 345ppm 時，每日控制光量在 17 mol/m^2 ，與每日光量維持在 12 mol/m^2 ，但是補充二氧化碳含量至 1200 ppm 可得類似生長速率 (Both, 1995)。

1) 控制系統

溫室內的環境對控制系統而言有著高度的挑戰，因為全年中室內溫度、溼度、光度等的變化範圍頗大，且一日之間的變化也頗劇烈。影響室內溫度變化的因子眾多，舉凡太陽輻射的大小，室外溫度與溼度，風速與風向，室內栽培植物種類與數量，灌溉頻度與用水量等。在如此動態變化的環境中要做好控制確實是不容易，但是做好控制後所能獲得的好處是物超所值的。

基本上從事商業生產的溫室業者都希望能降低生產所需耗用的資源與投資成本，同時希望能提高產量與/或產品品質。所有新的投資都會增加成本，有些在設備上的投資可能只能在其他一兩個項目上節約成本或增加效率或提高品質，僅有在環控系統上的投資是全面有益的。溫室業者由實際使用的經驗上已證實全面的控制系統 (Integrated control system, ICS) 可帶來獲利。以下簡單說明 ICS 帶來的好處：

- 能源使用效率提高:設備之間協調性高與控制精確度提高可降低加熱系統所耗成本與使用電費。能節約多少則看原來的管理是否上軌道。
- 現場工人工作效率提高:自動環境控制系統的使用可讓工人不需時時留意是否溫度太高需開風扇,溫度太低需啟動鍋爐燒水等雜務。改將時間花在其他更有價值的工作項目上,可提高工人的產值。
- 改善管理效益:好的環境控制系統所能帶來的最大好處在於可提供溫室業者/管理者充分的資訊,以做為決策之參考。同時讓管理者可花更多時間來檢視並真正的管理作物生產過程的種種,而不是只能接受作物生長的結果。
- 降低耗水量:較先進的灌溉系統均能提供更及時與精確的灌溉量,有些溫室可減少總耗水量與排放量達70%。
- 降低肥料使用量:持續的監測與控制可提供精確的資訊,配合精確有效的灌溉系統,
- 肥料的使用在用量上也可更精確,使用總量可大幅減少,使用效益大幅提昇。
- 減少化學藥品使用量:對溫度的更精確控制與透過日夜溫差控制植株高度方法的有效使用,使得各種化學藥劑如生長調節劑等的使用可大幅減少。溫度、溼度與灌溉等的適當管理也可減少植物的逆境,病害發生機率可降低,殺菌劑與其他化學藥品的使用可減少。
- 減少殺蟲劑使用量:有較佳環控系統與精確灌溉系統者可生產較健壯的作物,較不易受病菌或昆蟲感染。溫室業者發現昆蟲數量與用藥量都有顯著減少。
- 提高作物品質與整體的均勻性:較少病蟲害發生,較有效的灌溉與施肥,業者也可得到更精確的資訊,管理獲得改善,作物本身也因而較健康,品質也較一致。品質一致的作物在操作與行銷上可提供不少便利性。
- 減少設備磨耗與故障:不好的控制系統常使設備啟動次數過於頻繁,增加設備的磨耗,增加故障發生機率。好的控制系統允許較精確的控制並提供警報系統,可持續偵測設備的使用狀況,可防患於未然。
- 減少栽培過程的損失:好的控制系統提供數據紀錄,使用圖形顯示出溫室狀況與預警與中央警報監控的功能可使業者免於遭受重大損失。

(1)選擇溫室控制系統的一般考量

最有資格評估溫室控制系統優劣的人應該是溫室業者本身或每天需要操作與維護該系統的人,而不是一般的電腦專家。辦公室電腦使用者以 GHz 評估 CPU 速度,以 GB, MB 評估硬碟大小,在環控電腦的使用者立場看來,這些數字反而不是那麼重要。溫室控制屬即時的程序控制範疇,有關其軟、硬體的需求,成本,應用與廠商的支援等均屬辦公室電腦有很大的差別。環控電腦的評估首重可靠性、準確度與提供的控制功能。速度、硬碟空間、記憶體大小與軟體介面的使用是否友善等才是次要的考量,有時,可能跟本不納入考量。

(2)溫室與一般建築環境控制之比較

設計給人類使用的一般建築通常有絕熱設計,與栽培作物用的溫室相比較,前者的室內環境受太陽與室外環境狀況等的影響要小多了。兩種設施的環境控制系統在發展沿革上也有頗大的差異。前者著重於溫度與風速的控制,使室內環境長期維持於人體覺得舒適的範圍 (comfort zone) 內。溫室環控則涵括目標作物生長過程中所有涉及

的因子，項目更多，範圍也更廣。溫室控制系統涉及使用專用程式控制專屬設備，這些設備在一般建築中是看不到的，譬如：噴霧系統，二氧化碳施肥系統，遮蔭網與全黑布幕（blackout curtain）系統，屋頂或側牆通風系統，水簾降溫系統，灌溉系統與養液控制系統等。

基於溫室對光線的需求，在設計上多半不會使用絕熱性佳的材料，熱量的進出通常頗為容易且快速。就加熱與降溫系統而言，需要在短時間內補充散失的熱量或帶走進入的多餘熱量，以維持接近於室內設定溫度，加熱與降溫系統本身的設計就是極大的挑戰，此挑戰不僅在差額熱量的提供或移出，還包括大面積範圍下溫度分布均勻度的維持。以下簡單列出溫室產業先進國家溫室中已有的控制項目：

- 溫度控制：加熱與降溫
- 鍋爐系統管理
- 空氣循環與內外空氣交換：室內水平風扇（HAF），風扇配備塑膠軟管（Jet Fan），
- 通風口百葉與開口面積大小
- 溼度控制：微霧、細霧系統，通風除濕，加熱除濕
- 遮蔭系統
- 光量控制：人工燈光、全黑處理布幕
- 二氧化碳施肥管理：二氧化碳產裝置，監測與輸送
- 灌溉系統：幫浦，容量，水壓，閥門
- 施肥管理：養液供應/混合
- 供水系統與儲存
- 熱能儲存系統
- 熱電共生系統管理

(3)控制三層次

完整的控制系統包含了三個層次，分別為設備、功能與系統層次，各有不同的需求與設備。

1 設備層次（Equipment Level）

涉及直接控制各個設備的儀器與介面，關如控制通風口大小的馬達與啟動風扇的馬達，啟動水簾系統的抽水幫浦等控制。控制系統必須能針對每一項設備依據需求進行控制。

2 功能層次（Function Level）

允許針對某一項目標，控制所有相關的設備。譬如控制溫室於一設定溫度範圍內，控制灌溉系統提供固定的水量，控制養液系統提供固定比例的營養成分、供應量與頻度等。以溫度控制為例，可能涉及加熱、通風、有些系統可能涉及熱水產生與輸送等。控制器可能為類比多階段式（Analog step controller），可能涉及單晶片或更高等級的工業級電腦。

3 系統層次（System Level）

溫室中每一種環控相關設備的使用通常都會影響到不只一項的環境因子，譬如加熱不僅提高溫度也會降低溼度，通風不僅影響溫度溼度也影響室內空氣成分之比例，遮蔭不僅降低光量也會改變光質（不同波長範圍的光的光量比例）等。這些影響都是同

時發生的，有些也可能重疊或互斥。完整的系統層次的控制系統可將上述的種種控制設備予以整合，只有透過電腦時時監測所有的必須環境要因，才可能達成整合的控制功能。

(4)中央監控警報系統

當馬達故障、電力異常、溫度異常、動作異常、連線異常時，中央警報顯示器可發出警報聲，並可連通自動撥號器通知系統管理者，系統允許設定多組號碼，內建電池且內含電池自動檢測功能。電力異常包括三相、四相電源相位的偵測，相位差異太大時可停止對部分較靈敏設備的供電以免對設備造成損壞。有些較進階的警報系統尚能設定在斷電復電後，設備開啟的時序，而不是一次全開。在斷電時與輔助發電機的自動跳接與供電時自動跳脫功能是業界必備。

依賴強制通風降溫的溫室應具備斷電時與輔助發電機的自動跳接功能，否則也應具備在斷電時，屋頂處能自動提供熱氣逸出的開口，避免在設施內蓄積的熱量對作物造成傷害。立體化飼養的環控水簾雞舍的側窗多半會使用由下而上的帆布捲簾，一旦斷電，捲簾可自動緩緩落下，提供上方開口。太子樓式與鋸齒狀溫室屋頂的垂直面也可仿此設計，提供緊急通風口。

(5)溫室業界使用的控制系統

業界使用的控制系統頗為多樣化，現階段國內仍以使用獨立作業的傳統配電箱方式為最多，如新台灣溫室公司與花王溫室公司等。台糖公司以電腦程式配合介面卡方式進行監控，由於主要研發人員已退休，在控制系統的維護與研發傳承上未見理想。國外的業者由單純的單項因子至整合多種感測因子的控制系統均有，知名廠牌諸如荷蘭的 Priva，美國的 Q-COM 與 Aerotech，紐西蘭的 Autogrow Systems 等。如圖 5-1 新台灣溫室公司環境控制系統架構，圖 5-2 為相關硬體配電箱外觀。圖 5-3a,b,c,d 所示為 Autogrow Systems 的 AutoVent 3 (AV III) 控制器，能提供與電腦連線與網路連線功能，允許遠程監控與遠程修改程式。本文引用各相關儀器之圖片版權為各家廠商所有，在此僅為介紹方便之用，並無推銷或廣告宣傳之意義。

同一公司的控制系統多半也有依控制項目的多寡而有多種版本。譬如，有的只針對溫度進行控制，如 Autogrow 的 AV II 版本與 AeroTech 公司 ST4026R 控制系統，後者允許最多與 8 個溫度感測器連接，通風量曲線透過 8 個風量值 (ventilation stage) 來設定加熱、通風、啟動水牆等時機。如圖 5-3a 所示的 AV III 除了包括加熱與風扇的多階段控制之外，亦含遮陰、二氧化碳、天窗、側窗與光照等控制。更複雜的版本尚且整合土壤含水率的量測與灌溉等控制。

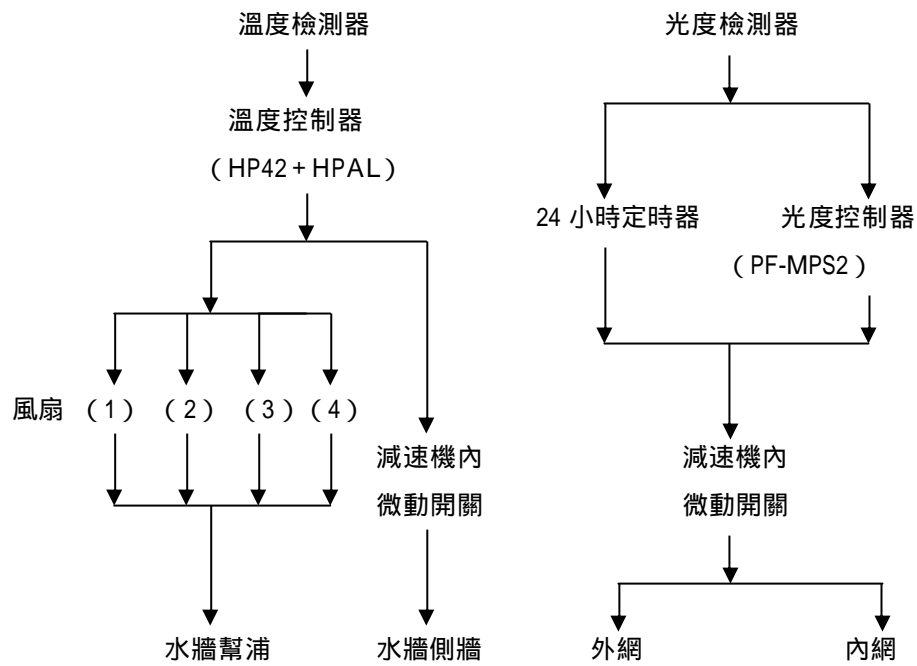


圖 5-1 新台灣溫室公司（改組前為三易公司）環境控制系統架構圖

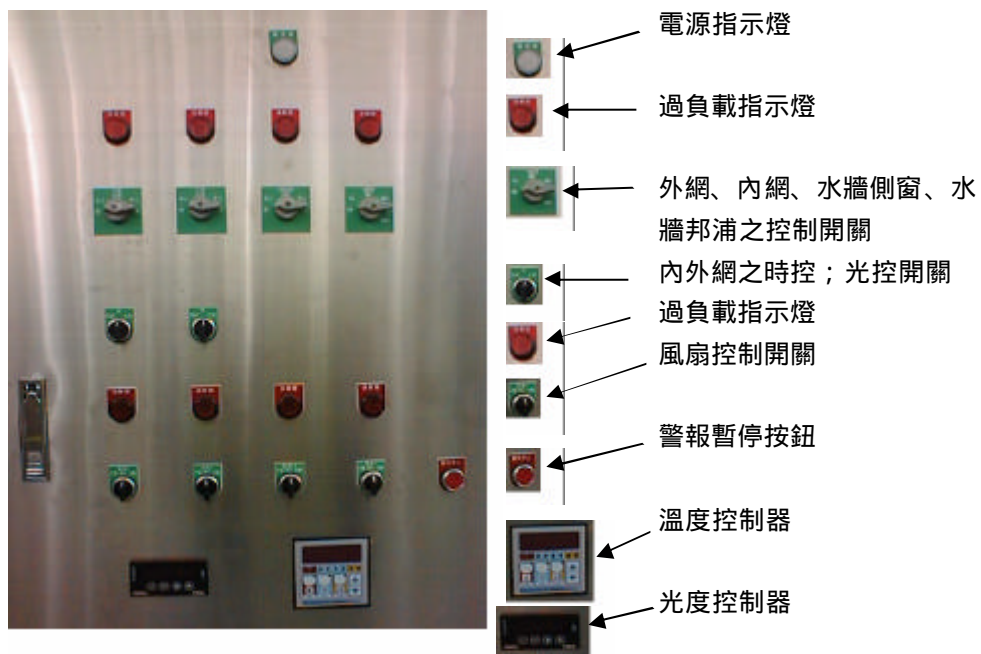


圖 5-2 新台灣溫室公司所使用的溫室控制箱



圖 5-3a 紐西蘭 AutoGrow Systems 公司所用的控制器 (AutoVent 3)

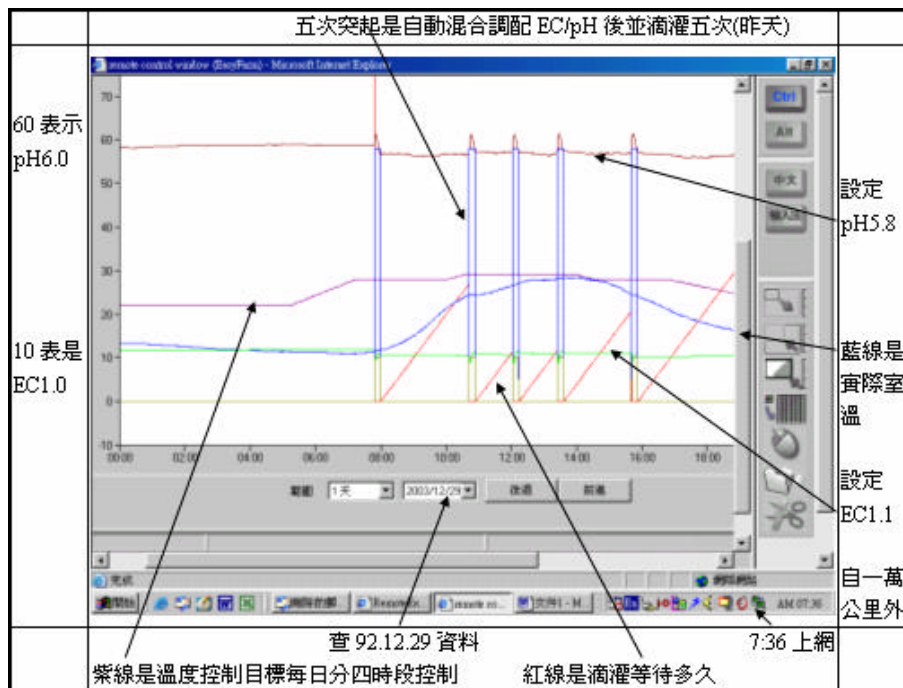


圖 5-3b 自紐西蘭撥接上網監視與控制農試所溫室環控與滴灌實例 (92.12.30)

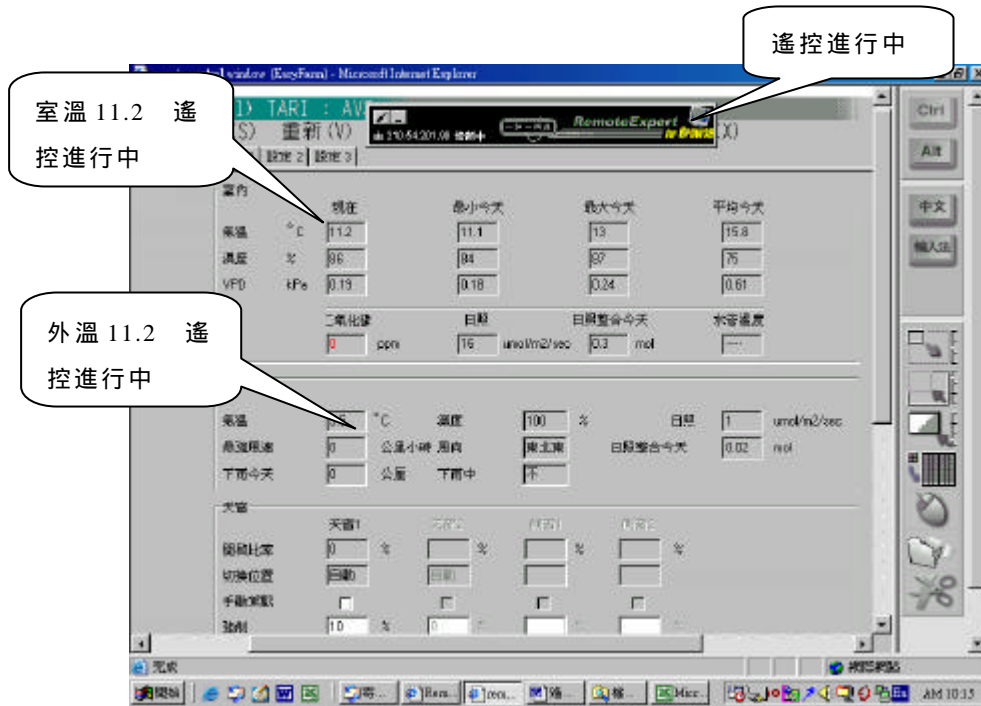


圖 5-3c Remote Expert 執行遙控時的畫面

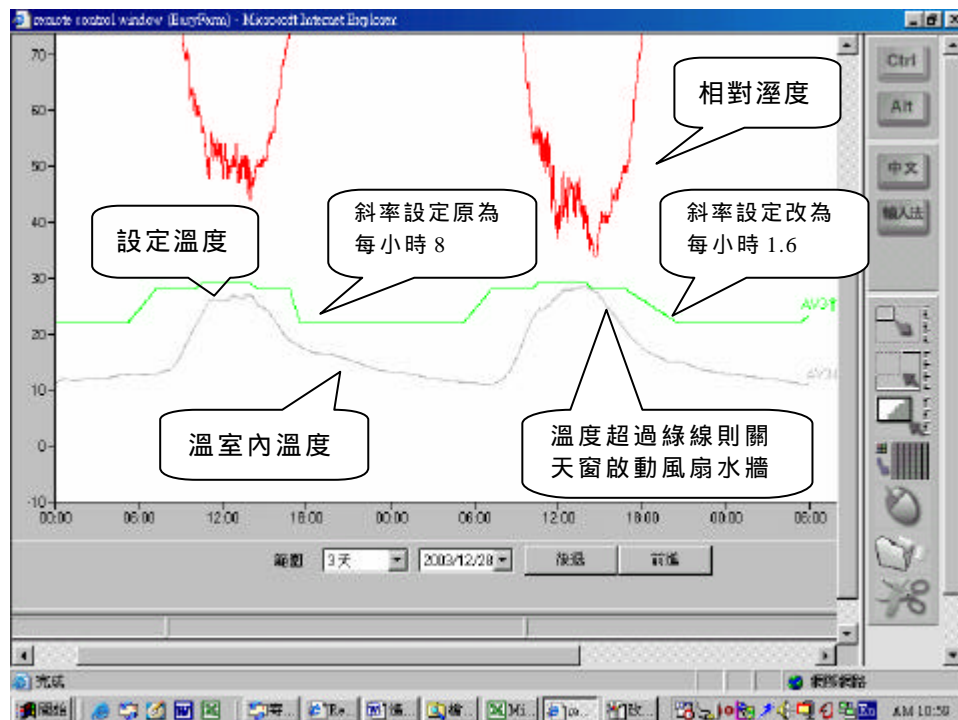


圖 5-3d 過去兩天溫室內的溫度，溼度與設定溫度資料畫面

(6)遠程監控

如圖 5-3a 所示的 AVIII 系統或其他相容性產品，不僅能提供與電腦連線的功能，在網路盛行且資訊科技蓬勃發展的今日，多半也具備透過電話線或網路連線功能，允許遠程監控與遠程修改控制策略或修改程式。如圖 5-3b 與 5-3c 所示的圖面即為透過網路由紐西蘭監測位於台中霧峰的農試所內的溫室內環境參數與動作紀錄級執行遠端設定時的畫面；圖 5-3d 為過去兩天的溫度與溼度與設定溫度資料畫面。

2)感測系統

感測系統包括感測器、訊號處理和訊號收集三個部分，感測器是一種將外來物理（熱、光、聲等）、化學刺激（味道等）轉換為電子訊號的裝置。在感測應用上常用的訊號處理技術包括：DC 與 AC 電橋、放大（一般、差動與電荷）、濾波、線性化電路、溫度補償、電壓轉電流、電流轉電壓、類比轉數位、調變與解調等。訊號收集的設備則包括電錶、示波器、計數器、紀錄器與電腦等。一般感測儀器至少具備前兩項功能，有些尚提供輸出、紀錄甚至通訊功能。

感測器性能的衡量，一般包括以下因素：

- 量測範圍 感測器量測範圍應包括所需測定範圍，但不應超過太多，以免降低精確度。
- 靈敏度 感測器輸出變化對輸入變化的比。
- 誤差 誤差係由精確度、非線性反應、遲滯與漂移等因素累積而成，廠商的產品出廠規格單應明列不準度。
- 反應速率 此係感測器的「慣性」，譬如，水銀溫度計要數十秒才能反應溫度變化，所以不適合溫度快速變化時的量測。
- 輸出訊號 電阻、電流、電壓、脈波值等。

表 5-1 列出幾種感測器的種類與特性，本章僅討論與環境和水質因子量測相關的感測原理與儀器。

表 5-1 感測器的種類與特性

感測分類	量測對象	感測器種類	訊號性質	感測器種類	訊號性質
環境	溫度	熱電偶	電壓 mV	白金測溫阻體	電阻
		熱敏電阻	電阻	感溫 IC	電流
	相對溼度	高分子膜阻抗式	電阻	感濕 IC	電流
	絕對溼度	熱熱敏電阻	電阻		
	含水率	石膏塊	電阻	電容片	電容
	輻射	光二極體	電流		
	照度	光二極體	電流		
	光量子數	光二極體	電流		
	風速	光編碼器加葉片	脈波	熱熱敏電阻	電阻
	風向	電位計	電壓		

(接下頁)

(續表 5-1)

感測分類	量測對象	感測器種類	訊號性質	感測器種類	訊號性質
	雨量	微動開關	脈波		
	二氧化碳	光二極體/紅外線	電流		
水質	酸鹼度	pH 電極	電位差		
	溶氧	DO 電極	電壓或電流		
	導電度	EC 電極	電阻		
機械性質	力	荷重元	電橋輸出		
	壓力	半導體應變計式	電橋輸出	金屬應變計式	電橋輸出
	加速度	應變計式	電橋輸出	壓電型	電橋輸出
	位置	電位計	電壓	LVDT	差壓
		光編碼器	脈波		
	有無	微動開關	電壓	近接開關	電壓
		光電開關	電流		

當環境因子改變時，生物體會隨之變化並適時的表現出不同的反應，所謂適時則視生物種類或同種但不同的生態型之間、改變的環境因子種類、改變的強弱程度與持續時間等不同而有不同的反應，但一些較廣泛的普遍性原則，經由對模式植物/動物的研究，仍是有脈絡可尋的。

(1)各項環境因子

影響植物反應的環境因子有：光（光質、光量）、溫度、濕度、空氣成份（CO₂、乙烯等）、風速、水份、土壤等。影響動物反應的環境因子有：輻射、光、溫度、濕度、空氣成份（O₂，CO₂，NH₃，粉塵等）、風速、水質等。以下簡介各環境因子之影響，感測方式及相關儀器。

1 光

光為植物生長中重要的環境因子之一，主要來自於太陽的輻射。太陽的輻射自極長之無線電波（radio wave）、遠、中、近紅外線、可見光、紫外光 A、B、C、X 射線至極短之宇宙線（cosmic ray），為一種連續光譜（照片 5-26），其性質與電波相同，一般稱為電磁波。在太陽輻射電磁波中只有三種輻射對植物生長發育最為重要。除了可見光（visible light, 380 - 780 nm）外，尚有紫外線（ultra violet, UV, 100 - 380 nm）和紅外光（infra-red, IR, 780 - 10⁵ nm）。

光強度、光質與光照時間三者對植物影響所及的反應包括：光合作用、葉綠素的合成、趨光性、光敏素參予的反應、光週性等。對動物影響所及的反應包括：泌乳量、產蛋率、增肉量等。

植物的生長、發育和光合作用不僅受光強度的控制，同時也受光質的控制；此外照光的時間亦有所影響，因此造成光控制植物生長發育相當複雜的過程。植物利用可見光行光合作用，利用紅外光，特別是 700 - 800nm 控制植物形態的發育（morphogenesis），而紫外線可被生物蛋白質吸收引起傷害。這些反應的產生主要是經過三個主要接光系統（receptor system）。葉綠素吸收近於 660nm 波長進行光合作用，

光敏素 (Phytochrome) 吸收 660、730nm 波長控制許多形態發生的反應；而類胡蘿蔔素 (carotenoid) 吸收 450nm 引起屈光性 (tropism) 以及高能量光形態發生 (high-energy photomorphogenesis)。

波長在 300 - 400nm 的紫外光與 700 - 800 nm 的近紅外線 (遠紅光) 會影響作物的生化反應及其外觀。在 400 - 700 nm 的光線與光合作用有很密切的關係，此光帶的光稱為光合作用有效光量 (Photosynthetically Active Radiation, 簡稱 PAR)。吾人有興趣的是 PAR 範圍內光子的數量而非 PAR 範圍內光之照度；是以較佳之測量應是量測光合作用光子通量 (簡稱 PPF)，此為單位時間內落到單位面積的平面上波長範圍在 400-700 nm 的光子的數量，其常用單位為 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 或 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ ；使用的感測器為光量子感測器 (Quantum Sensor)。

光量的多寡除了以光量子數 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) 表示之外，尚有照度 (lux) 與光能 (W/m^2)。感測器亦分為此三大類。照度感測器 (Photometric Sensor) 用來量可見光 (380-780 nm)，使用單位為 Lux (=lumen/ m^2)，或燭光 (fc=lumen/ ft^2)。照度感測器一般並不在溫室中使用，因為係依據人眼對光線的比視感度曲線而設計出來 (照片 5-27a，波峰為 555 nm)，植物體對光線的敏感度則有另一曲線 (照片 5-27b，波峰為 675 nm)，兩者不同。

輻射感測器 (Pyranometer，或稱日射計，Solar meter)，可用以量測來自太陽與其它所有來自天空之輻射，其量測之波長範圍較廣，視廠牌不同，常見的有 400 -1100nm，320-4200 nm 及 280-2800 nm，其量測的為此波長範圍內的能量，單位為 W/m^2 。日射計之主要感測元件為熱電堆 (Thermopile) 或光電池 (Photo Cell)。熱電堆由特殊之熱偶線堆積製成，藉溫差產生電壓差；準確度高，但非常昂貴；Eppley 公司之 Pyranometer 為熱電堆應用之代表，其量測之波長範圍為 280-2800 nm。光電池係藉光電效應引起之電流產生電場，以電流輸出；光電池之反應光譜為 400-1100 nm，LI-COR 公司之 Pyranometer 為光電池應用之代表。以上三種感測器的誤差範圍一般在 $\pm 5\%$ 。

光強度部分可量測直射、散射 (加光追蹤擋光器)、全輻射、淨輻射 (含上下兩側) 的光量。常見光感測儀器如圖 5-4a,b,c 所示。較進階的設備內含光柵可量測光譜中各小波段，並允許透過軟體進行運算，求出各不同波段，譬如：藍光 B (400-500 nm)，紅光 R (600-700 nm)，遠紅光 FR (700-800 nm)，PAR (400-700 nm) 等的累積光量子數或輻射能或照度值。圖 5-5 所示 LI-COR 公司之可攜式光譜量測儀器 (Portable Spectroradiometer) 為此類設備之代表。



圖 5-4a 照度計



圖 5-4b 輻射感測頭 (Py 字首)、照度感測頭 (Ph 字首)、光量子數感測頭 (Q 字首) 與訊號讀取儀



圖 5-4c 散射計

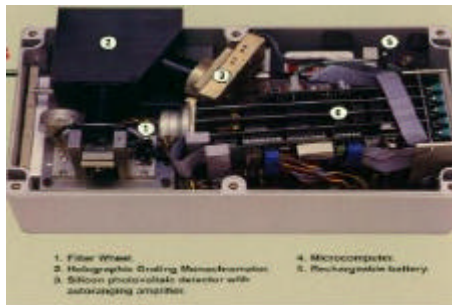


圖 5-5 可攜式光譜儀 Spectroradiometer (LI-1800, LI-COR)

以上各類型光感測儀器中主體元件為光二極體 (photo diode)，常見的有平板 (Planar) 型 (Sharp 的 BS120, BS520)、針 (Pin) 型 (NEC 的 PH302 與 PH302B) 與 Avalanche 雪崩型。前者主要使用於低速，後二者適用於高速量測。製作照度計時，若使用矽 (Si) 二極體，要加上比視感度補正濾光器，若使用砷化鎵 (GaAs) 光二極體，因其分光感度特性與人眼近似，所以不需要比視感度補正濾光器。日本 Moririka 株式會社的 MBC2014CF 即為泛用型光二極體。濱松 Photonics 株式會社的 S5821 為針 (Pin) 型高速光二極體，配合可見光濾光器，常用來偵測紅外線，多見於遙控器的應用。濱松 Photonics 株式會社的 G5842 與 G3614 為磷砷化鎵 GaAsP 材質，感測範圍可達紫外線領域，配合可見光濾光器可偵測 260 – 400 nm 範圍的紫外線。

光二極體與一般二極體同樣為 PN 接合構成，當接受光能時會產生許多電洞與電子對，若將 PN 接合短路，則產生短路電流，若將之開路，則產生開路電壓。者的直線性與溫度特性不佳，所以使用上一般利用電流輸出 (BS120: 0.16 μ A/100 lux, BS520 : 0.55 μ A/100 lux, PH302 and 302B : 5 μ A/100 lux, G3614 : 600 mA/W)。

光電晶體 (Photo Transistor) 為在光二極體的後段加上電晶體，可將光二極體的輸出電流放大數十至數百倍，但頻率特性卻被犧牲了。光電晶體的代表性產品有光遮斷器 (Photo Interrupter) 與反射型光感測器，大量應用於照相機、印表機、影印機等。東芝株式會社的 TPS601B 為此類產品的代表。

2 溫度

溫度對植物之影響包括：水分潛勢、蒸散作用、經過膜的運送、光合產物的運移、新陳代謝、所有的酵素參予的系統、生長與發育、休眠、生物時鐘、光週性、光型態發生（Photomorphogenesis）。溫度對動物之影響包括：新陳代謝、所有的酵素參予的系統、生長與發育、產能（泌乳量、長肉率、產蛋量、繁殖）等。

低溫逆境所造成的植物體的傷害，一般稱為寒害（chilling injury），和一般凍害（freezing injury）不同。寒害就是溫度足以導致植物發生傷害但未達到結凍的程度。當溫度降低至 10 以下時就會產生寒害，因此 10 常被用為植物發生寒害的起始點。但有些植物特別是熱帶性植物在 10 以上亦會遭受寒害，例如水稻或蝴蝶蘭等在開花期時，溫度到 15 即會發生寒害。是故對大部分植物而言，寒害是指在 10-15 溫度範圍以下及 0 以上的低溫所造成的傷害。

高溫傷害最常見的為高溫所造成植物器官的灼傷，樹皮灼傷後變乾脫落，一些果實如葡萄、番茄灼傷後變乾脫落，甚至造成整個果實死亡。乾果亦能發生傷害，只是對高溫容忍能力較高。植物的莖葉對高溫也極敏感，尤其是溫室生長的植物或陰生植物（shade plant），其癥狀包括黃綠色斑紋、葉軟腐病等。

植物遭受高溫常與缺水的癥狀相連，植株凋萎，葉片灼傷，葉片捲曲或脫落。若減少土壤水分含量則可以增加高溫傷害的癥狀，特別是當葉片快速生長和伸展之時。例如美國西南部，生長在砂土的棉花較生長在黏土的棉花容易發生萎凋。砂土保水力差，土壤中溫度上升迅速，當夏日中午空氣超過 45 時常引起葉片凋萎。

溫度控制器可分電子機械式與電子式。前者包括感測器本身及一控制開關；後者則以改變本身之電阻值或產生微小電壓或電流來代表量測得的溫度。若選用後者，則仍需配以一硬件以接收訊號並執行開關動作。電子機械式溫度控制器較常見且便宜，但精確度不高，誤差在 ± 2.5 ，常見的有雙金屬片型（Bi-metallic strip, Thermostats），波登管型（Bourdon Tube）與流體（酒精或水銀）膨脹型（Fluid Expansion）。電子式溫度控制器之尺寸較小，較精確也較貴，誤差在 ± 0.3 至 ± 1.0 間。

溫度感測器可分為接觸式與非接觸式兩類，前者常見的有熱偶線（Thermocouple），白金測溫電阻體（Resistance Temperature Detector, RTD），熱敏電阻（Thermister）及感溫積體電路（IC）；後者以紅外線溫度感測器為主。

a. 溫度計 人們口中常說的氣溫指的就是空氣的乾球溫度，也就是一般的溫度計所量測出來的讀值。事實上，除了乾球溫度之外，尚有濕球溫度與露點溫度。乾、濕球溫度感測一般使用溫度計，如圖 5-6a 所示為並排的 2 支溫度計，其中一支就是乾球溫度計；濕球溫度計的本體與乾球溫度計相同，但其水銀球或酒精球以吸水性良好的白色脫脂紗布包覆，並連繫一棉線至一水盒內的蒸餾水中，蒸餾水因毛細作用會經棉線至紗布處，浸溼感溫球部。

乾、濕球溫度計都需放在通風良好且有適當遮陰的地方，水份蒸發帶走熱的結果使得濕球溫度計量到的濕球溫度值比乾球溫度為低。當空氣的相對濕度已達飽和，空氣無法吸水時，乾球溫度值與濕球溫度值相等。當空氣溫度降至該狀態的露點溫度以下時會開始有水分凝結。在非飽和狀態下，乾球溫度大於濕球溫度大於露點溫度，飽和時三者溫度相同。

一般懸掛式的乾溼計有一個問題，就是當溼球在蒸發時，同時也改變了四周大氣的

溼度，因而觀測會有誤差。所以會有手搖式乾溼計的設計，以手搖操作方式擴大溼球的蒸發空間，以減小誤差（圖 5-6b）。乾、溼球的溫度差可透過公式的換算而求出相對溼度。實務上為求方便，多將公式結果製成換算表，量出乾、溼球的溫度後，就可以直接查表找出相對溼度。一般懸掛式乾溼計的換算表繪於二支溫度計之間的空間，而手搖式乾溼計若無繪表空間，就會附在外盒上或另附

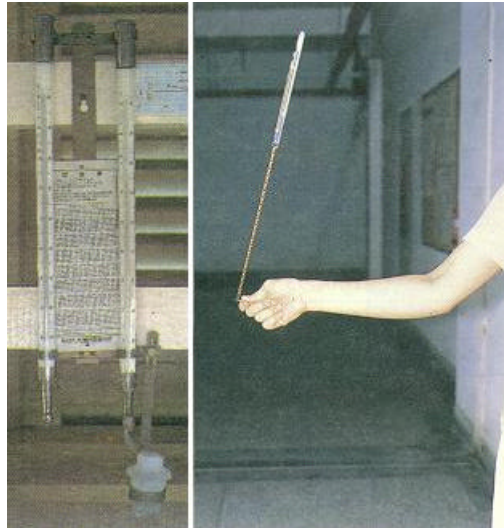


圖 5-6 兩種乾濕球溫度計 (a)左圖為壁掛式，(b)右圖為手搖式

b.熱電偶 (Thermocouple)

a)席貝克效應 如圖 5-7 所示，利用兩種均質之金屬導體 A 與 B 所製作形成之封閉迴路，當兩接合點之溫度為 T_1 與 T_2 時，若 $T_1 > T_2$ 時回路內產生電流 i ，若 $T_1 = T_2$ 時無電流產生，當 $T_1 < T_2$ 時電流 i 之方向會相反。此種現象在 1821 年由 T.J. Seebeck 發現，因此被稱之為「席貝克效應 (Seebeck effect)」。將基準接點打開後之端子所量測之電動勢被稱為「熱電動勢」。利用席貝克效應以兩種金屬與兩端接合點所形成之測定溫度感應裝置稱為「熱電偶」。

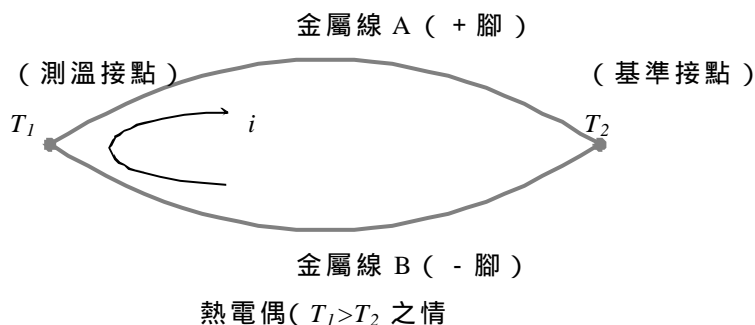


圖 5-7 席貝克效應

對於兩個接合點，將基準接點固定保持在某一已知之固定溫度（通常為0℃），便可以利用基準接點所量測到之測溫接點產生之熱電動勢換算成溫度值。此處要注意的是，雖然熱電動勢是由 T_1 與 T_2 所決定，但熱電動勢值並不是由兩溫接點之溫度差 ($T_1 - T_2$) 所決定，等溫度間距但不同區間（比如說 0 ~ 200 與 200 ~ 400℃）之熱電動勢值是不一樣的。

b)熱電偶使用限度 如表 5-2 所示為依據 JISC 1602，在清淨空氣中使用時各型熱電偶之連續使用時間與熱電動勢之變化情形。此種情形是熱電偶在無保護管狀態下，只有絕緣礙子之裸線熱電偶。熱電偶在實際上使用限度，必須要依使用之保護管、實際使用液、氣體環境等因素考量之。

表 5-2.在不同使用情況下各型熱電偶之連續使用時間與熱電動勢

種類	連續使用時間 (hr)		各溫度下之熱電動勢 (%)
	溫度在常用限度情形下	溫度在過熱使用限度情形下	
B	2000	50	±0.5
R	2000	50	±0.5
S	2000	50	±0.5
K	10000	50	±0.75
E	10000	250	±0.75
J	10000	250	±0.75
T	10000	250	±0.75

c)熱電偶實體圖 如圖 5-8a,b 所示為各種熱電偶，有些具備快速接頭，接頭種類亦有多種，熱偶線也有不同粗細，甚至隨量測物的不同而有不同的應用設計，譬如移動表面專用的薄片或具滾輪配件的設計。

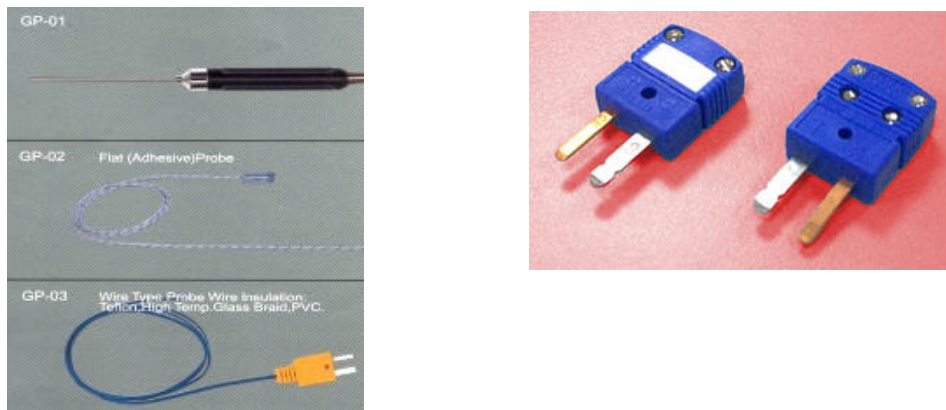


圖 5-8a 常見熱電偶與快速接頭

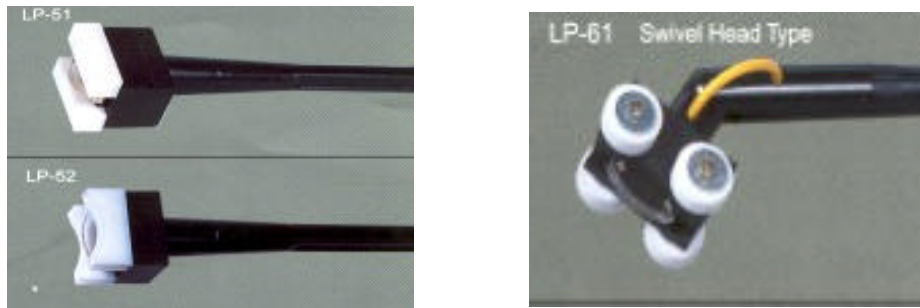


圖 5-8b 表面用薄片式與移動表面用熱電偶

d)熱電偶溫度計回路之組成 熱電偶溫度計之測定回路，是由熱電偶、補償導線、基準接點、銅導線 (Cu) 及計測器 (微伏計、DCV 電表或是溫度表) 所組成。其構成方式總計有以下四種方式，一般雖然將基準接點保持在 0 為原則，但是依量測回路之接線方式之不同，亦有由量測基準接點之溫度計算與 0 間的差值加以補正或是依基準接點補償回路將量測值自動補償之兩種補償方式。補償接點為熱電偶與補償導線之接合點，兩腳 (正負腳) 的接合點必須要保持在同一溫度。

(a)熱電偶直接連接計測器 此為將熱電偶直接連接計測器(圖 5-9)之接續方式，從量測對象到計測器之短距離使用，適用於實驗室等簡易裝置。其基準接點為計測器的輸入端子。若計測器本身內部設有補償式基準接點 (溫度補償回路) 可利用自動補償功能將基準接點的溫度修正至 0 以求出正確的測溫接點溫度。但如果計測器本身不具有補償式基準接點時，必須要量測輸入端子的溫度，將此溫度值修正基準接點至 0 才能得到正確的測溫接點溫度。此種方式精確度並不高，約有 $\pm 1\%$ $\pm 2.5\%$ 的誤差。



圖 5-9 熱電偶直接連接計測器

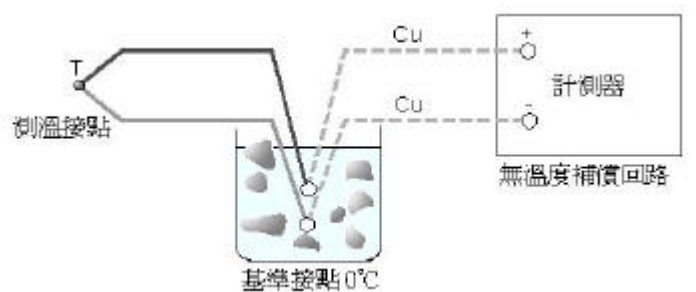


圖 5-10 冰點式基準接點接法

(b)冰點式基準接點(熱電偶 銅導線 計測器) 將計測器與熱電偶間插入銅導線，基準接點置放於冰點槽中，以冰與水的熱平衡點將基準接點保持在0℃，使用於高精確度之溫度量測。適用於計測器本身不具補償式基準接點或是熱電偶溫度校正。

(c)使用熱電偶與補償導線(熱電偶 補償導線 計測器) 一般最常使用的連線方式，從測定物到設置於遠端之計測器之情形最常被使用。補償導線長度可及數百公尺，但必須選定符合性能要求(機械強度、電氣性能、耐久性)、不受環境影響之適用線材。其基準接點要求與第1項相同。

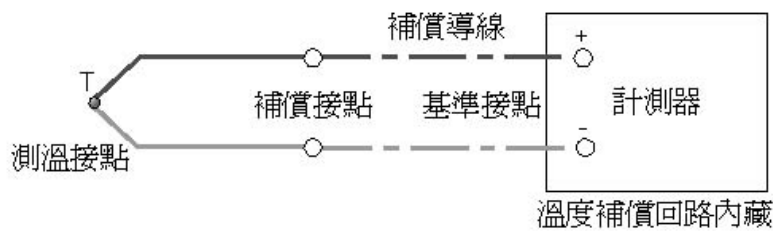


圖 5-11 使用熱電偶與補償導線

(d)使用熱電偶、補償導線與冰點式基準接點(熱電偶 補償導線 銅導線 計測器)

此為一般不使用的方方式，附有補償導線之熱電偶與不具有補償式基準接點之計測器之組合時所使用。但是精確度與第1種方式差不多。

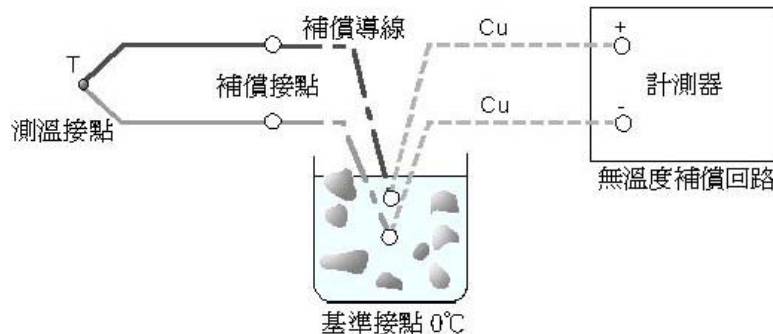


圖 5-12 使用熱電偶、補償導線與冰點式基準接點接法

c.白金測溫電阻體 (RTD) 白金測溫電阻體是以高純度的白金製成的溫度感測元件，白金熔點高達1867℃，化學與電氣性質穩定，線性度佳。常用量測範圍在-200至650℃，亦有可量測超過1000℃的產品問世。農業設施中使用白金測溫電阻體量測溫度是相當適當的，雖然單價比熱電偶與熱敏電阻高，但考慮耐久性，仍是值得的。下表所示為各型RTD之使用溫度範圍。

區分	低溫用	中溫用	高溫用	超高溫用
使用溫度範圍℃	-200 +100	0 350	0 650	0 850

- a) 白金測溫電阻體種類 在 0-100 範圍內，Class A 與 B 的白金測溫電阻體的溫度係數分別為 0.3851 / (有時表示為 3851ppm/ 或 0.3851%/) 與 0.3916 / ，此代表電阻值隨溫度上升而上升，0 時電阻值為 100 (此為俗稱 PT100 之原因)，溫度係數以 0.39 估算，10 時，電阻增加至 103.9 ，20 時，電阻增加至 107.8 ，100 時，電阻增加至 139 。換言之， $R_{100}/R_0=1.39$ ，如下表最右藍所示。另外，為避免自體發熱影響量測，需限制通過的電流在 2mA 以內。

JIS C1064-1997

0 時公稱阻抗值	等級(CLASS)	規定電流	R100 / R0
Pt100	A	2mA 以下	1.3851
	B		(1.3916)

註 1：R100 為在 100 時阻抗元件之阻抗值。註 2：R0 為在 0 時阻抗元件之阻抗值。

- b) 阻抗元件之溫度相對應容許差 白金測溫電阻體的精密度頗高，由下表所示的歐洲與日本的規定計算公式可知，A 級品在 0 時只容許有 0.15 的誤差，600 時也只有 1.35 的誤差。

規 格 種 類	JIS C1604-1997		IEC Pub.751-1983	
	等級 CLASS)	容許差	等級 (CLASS)	容許差
Pt100 (R100 / R0 = 1.3851)	A	$\pm(0.15+0.002 t)$	A	$\pm(0.15+0.002 t)$
	B	$\pm(0.3+0.005 t)$	B	$\pm(0.3+0.005 t)$

註 1：容許誤差為阻抗元件之量測阻抗值依標準阻抗值表所換算之值 (溫度) 減去測定溫度所得到值，該差值最大限度之容許值之稱為容許誤差。

註 2：t 為無關 +、- 符號以溫度 () 表示之測定溫度。

測定溫度 ()	容 許 誤 差			
	CLASS A		CLASS B	
-200	± 0.55	± 0.24	± 1.3	± 0.56
-100	± 0.35	± 0.14	± 0.8	± 0.32
0	± 0.15	± 0.06	± 0.3	± 0.12
100	± 0.35	± 0.13	± 0.8	± 0.30
200	± 0.55	± 0.20	± 1.3	± 0.48
300	± 0.75	± 0.27	± 1.8	± 0.64
400	± 0.95	± 0.33	± 2.3	± 0.79

(接下頁)

(續上頁)

測定溫度 ()	容 許 誤 差			
	CLASS A		CLASS B	
500	±1.15	±0.38	±2.8	±0.93
600	±1.35	±0.43	±3.3	±1.06
650	±1.45	±0.46	±3.6	±1.13
700			±3.8	±1.17
800			±4.3	±1.28
850			±4.6	±1.34

c)白金測溫電阻體之接線方式 白金測溫電阻體在量測時通常置於電橋電路中，使電阻變化轉換為電壓變化。根據其導線接線方式，有 2 線、3 線與 4 線式之別。

- 2 線式 量測點與儀器距離很近，導線阻抗值小至可忽略其影響時使用。
- 3 線式 在長距離傳輸時一般最常被採用的型式。此種型式各導線之材質、線徑、長度與線阻抗要相等，且全長之溫度分佈必須要等溫，導線電阻分配於電橋之兩臂，可相互抵銷。
- 4 線式 在長距離傳輸且要求高精度時使用。感測器的電流與輸出配線可完全獨立，故完全不受配線電阻的影響。稱為 Kelvin 連接法。

d)白金測溫電阻體構造與實體圖 圖 5-13 所示為白金測溫電阻體構造，左側頭端內含端子板，右側尾端內含阻抗體元件。圖 5-14 與圖 5-15 為實體圖。

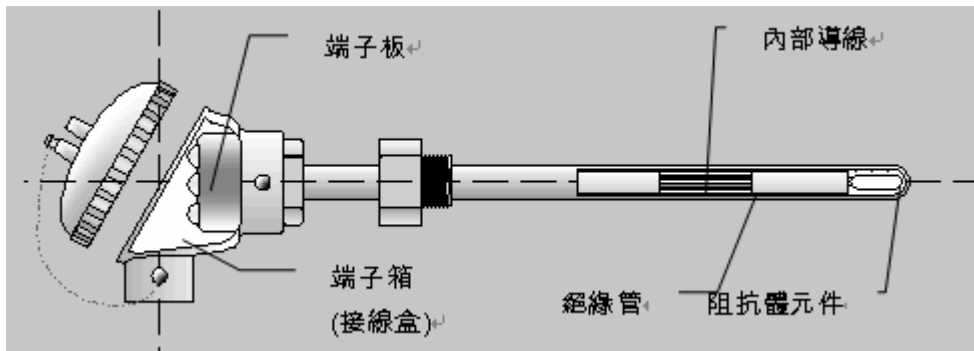


圖 5-13 白金測溫電阻體構造

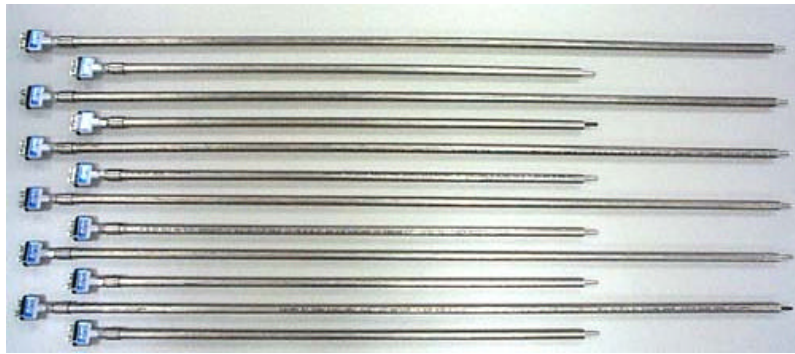


圖 5-14 白金測溫電阻體實體圖



? 5-15 ? 摠? ? ? ? 浣? ? 捷?
担? 浣?

d.熱敏電阻 (Thermistor) 熱敏電阻 (Thermistor) 的英文源自 Thermally Sensitive Resistor 的縮寫，其意為對溫度敏感的電阻。白金測溫電阻體的 R 與 T 之間的線性化程度很高。熱敏電阻也是利用電阻值 (R) 與本身溫度 (T) 成比例之關係所發展的感測器，惟，其材質為半導體，其比例關係為 $R = R_0 \times \text{EXP} (B \times (1/T - 1/T_0))$ ，其中 R_0 為基準溫度 T_0 時之標稱電阻值，B 則代表熱敏電阻的感度，兩者均與材料相關。下表所示為各熱敏電阻之 R_0 與 B 值 (JIS C1611)。

使用溫度範圍，	標稱電阻值， R_0 ，	標稱 B 常數，K
-50 - 100	6k ($T_0=0$)	3390
0 - 150	30k (0)	3450
50 - 200	3k (100)	3894
100 - 250	0.55k (200)	4300
150 - 300	4k (200)	5133
200 - 350	8k (200)	5559

如圖 5-16 所示為負溫度係數 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 熱敏電阻，代表溫度升高，電阻值下降的關係。NTC 型使用 Mn、Co、Ni、Fe、Cu 等金屬氧化物製成的半導體，另有 PTC (Positive TC) 熱敏電阻，代表溫度升高，電阻值上升，以鈦酸鋇系 (BaTiO_3) 半導體為代表；CTR (Critical TR) 熱敏電阻以氧化釩系燒結的半導體為代表，在臨界溫度有急驟的電阻變化，一般應用在溫度警報器、溫度開關、火災

感知器與過熱防止裝置等。

熱敏電阻的優點是溫度係數大，感度佳，反應快，耐濕，耐酸鹼，耐震動，便宜。缺點是非線性，溫度範圍小，缺乏互換性。使用溫度範圍可達-200 至 700 ，通常為-100 至 300 。高溫用熱敏電阻使用 ZrO_2 及 Y_2O_2 等複合燒結體。



e.感溫 IC 另有使用積體電路 (IC) 的感溫元件， 5-16 NTC ? ? ? ? 會依本身之溫度高低產生對應大小的微小電壓或電流，AD590 為常見線性感溫 IC (圖 5-17a, Analog Digital 公司)，感測範圍為-55 +150 ，提供 5 30V 直流電，可得 1 μ A/K 的線性度。AD590 的輸出電流是以絕對溫度零度 (-273) 為基準，每增加 1 ，它會增加 1 μ A 輸出電流，因此在室溫 25 時，其輸出電流為 $(273 + 25) = 298 \mu A$ ，配合 10K 歐姆電阻 (圖 17b)，以室溫 25 而言，輸出值為 2.98V ($10K \times 298 \mu A$)。其他類似產品包括：Analog Digital 公司 AD594 (J 熱電偶專用放大 IC) 與 AD595 (K 熱電偶專用放大 IC)，National Semiconductor 公司 LM35D，Analog Device 公司的 TMP35，AD22100 等。



圖 5-17a AD590 感溫 IC 的接腳圖及零件符號

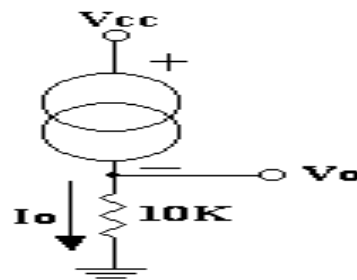


圖 5-17b AD590 感溫 IC 基本應用電路

f.非接觸式溫度感測儀器紅外線溫度計 輻射測溫器為非接觸性溫度感測器，紅外線感測器為典型代表。紅外線感測器有兩種：量子型與感熱型。前者包括光二極體及光導電元件等，係利用入射光能量激勵電子，產生導電率變化及電動勢，其感度與反應速率較佳；後者基於黑體放射原理，透過對紅外線的吸收產生溫度變化，進而產生電荷變化 (焦電效應)，感度較低，反應較慢。焦電型紅外線感測器被大量應用在家庭自動化、安全防護、省能源設計與人體檢知等領域。焦電型紅外線感測器是微分型溫度感測器，固不適用於靜止物體，除非加裝紅外線截波器 (chopper)。

紅外線測溫法 (Infrared Thermometry) 的基本原理在於可量測物體表面放射出來的能量與物體表面的溫度存在一比例關係。電磁波光譜中波長由 0.72 至 100 公忽 (或稱毫米，micron， μm) 均屬紅外線的範圍，但對量測溫度有用的紅外線強度只有界於 0.72 至 20 公忽者才為有效。波長長者，其能量小的幾乎量測不到。物體表面溫度分別為 200 與 1000 者其輻射出之紅外線之波長分佈曲線之波峰分別在 6.5 與

2.5 公忽，溫度愈高，其波長愈短，但能量愈大。

熱電堆 (thermopile) 為熱電偶堆積而成，亦屬感熱型紅外線感測器，一般建議只應用在放射率 (Emissivity) 大於 0.5 的表面。光澤金屬的表面溫度因放射率低，可噴灑黑體噴液或黏貼黑體膠帶，可改善量測精度。需知道待測表面的放射率才能精確量測，一般採放射率=0.95 進行量測。以熱電堆感應的多半只能量測單點 (圖 5-18a)，可量測整個表面 (圖 5-18b) 者感測原理不同，係透過晶片感應。筆者在 1993 年採購圖 5-18b 所示的設備時，尚需要簽訂不會用於國防應用上的使用同意書，售方才願意輸出。如今這已是普遍的產品，已無上述限制。



圖 5-18a 紅外線溫度計



圖 5-18b 紅外線熱像儀

3 濕度

針對溼度的討論一般常用相對濕度 (%) 或絕對濕度 (kg 水汽/kg 乾空氣)。當空氣與水面接觸時，空氣會吸收水分，吸收水分之程度，視空氣中已存在有多少水分而定。相對濕度表示空氣中之含水比例，絕對濕度表示空氣中之含水量。將空氣視為一種海綿，海綿愈乾燥，能吸收的水分愈多。水的密度是 1 g/cm^3 ，表示 1 立方公分體積的水，它的質量剛好是 1 克。我們把物質的質量除以它的體積所得到的商，就叫做這個物質的密度。

同樣道理，如果我們取某體積的空氣，秤一秤它裡面所含的水蒸氣的質量，把水蒸氣質量除以空氣的質量，所得到的商，就叫做「絕對溼度」。也就是說，「絕對溼度」相當於空氣中的水蒸氣密度。「相對溼度」就是把實際的水蒸氣密度，拿來和該溫度下的飽和水蒸氣密度做比較。假設 25 時，某體積的空氣最多可以容納 100 個水蒸氣分子，但是實際上只有 50 個水蒸氣分子，那麼，「相對溼度」就是 $(50 \div 100) \times 100\% = 50\%$ 。這種狀況下，空氣還可以再容納 50 個水蒸氣分子，因此，晾曬的衣服就比較容易乾了！所以，我們可以說空氣是比較乾燥的！相反地，如果實際上的水蒸氣分子已經有 90 個了，相對溼度是 90%，那麼，因為只能再容納 10 個水蒸氣分子，溼衣服也就不容易變乾，因此，空氣就是比較潮溼的。

但是，就像我們不能在一杯水中無限制地溶解鹽巴一樣，空氣所能含有的水蒸氣也是有限的，不可能無限制地增加。當某一個溫度之下，空氣所能含有的水蒸氣已經達到最大量，再也沒辦法增加了，我們就說空氣中的水蒸氣已經「飽和」了！在這種情況之下，晾溼衣服是絕對晾不乾的，因為水分已經無法再蒸發到空氣中了。

空氣能含有多少水蒸氣，和當時的氣溫有關係：溫度越高，能容納的水蒸氣就越多。因此，到底空氣是乾燥還是潮溼，不但和空氣中所含的水蒸氣的質量有關，也和當時的氣溫有關。光由「絕對溼度」，我們並不能知道空氣是乾燥或潮溼，因此，氣象上比較常使用「相對溼度」來表示空氣的乾溼程度。如空氣之含水量已達其容量 20% 時，即表示相對溼度為 20%。如空氣之含水量已達其容量之 100% 時，表示相對溼度為 100%，又稱為已達飽和狀態。溫度愈高，飽和含水量愈高。相對溼度愈低，則空氣之載水容量愈大，亦即可蒸發的水量愈大；也就是說，相對溼度愈低時，蒸發冷卻系統愈能降低環境的溫度。自然法則是：空氣之持水量在溫度增加情況下可以急速增加。換句話說，一天之中較高溫時段，也就是大氣中相對溼度較低的時段。因此，每天較高溫時段之蒸發冷卻效果最能發揮。

相對溼度的最大值是 100%，這種情況下，水分都不會再蒸發，溼掉的東西也不會變乾。對人體來說，最舒服的相對溼度是 60% 70%，比這數值高，會覺得溼悶難耐（因為汗液不容易蒸發）；比這數值低，則容易造成皮膚乾燥龜裂（因為皮膚水分容易散失）。

相對溼度對植物之影響包括：蒸發與蒸散、氣孔開閉、二氧化碳吸收、光合作用、根系體積、成長速率（細胞至整株）等。相對溼度亦影響動物體對熱緊迫之忍耐程度。一般而言，濕度對作物生育的影響比溫度小，但是濕度愈低則植物蒸散量則愈大，根部須吸水來滿足需要，當作物體內水分狀態不足則氣孔開度減少，細胞縮小生育不良。相反的，高濕度下，體內水分過多，莖葉過於繁茂，根部活動力、吸水及養分減少。病原菌與相對溼度有莫大的關係，乾燥時易發生紅蜘蛛類為害及白粉病等為害，多濕有些病害易發生如軟腐病、灰黴病等。因此相對溼度的影響除了植物本身生育外，與病虫害的控制亦有莫大的關聯。空氣流動可減緩相對溼度的影響。

溫室內空氣相對溼度之變化，主要因作物的蒸散、灌溉至植床或植鉢之水分，通道積水蒸發，室內溫度下降，及濕潤空氣的流入而增加。當加溫及光照所引起溫度上昇，換氣時乾燥空氣之流入而降低，溫室栽培需保持相對溼度 60% 以上，當然屬於陰濕的作物則在 80% 以上。

台灣的蝴蝶蘭移到美國去種，兩地相對溼度不同，所需灌溉頻度不同，連帶的養液調配方式也應該改變。原則上，採總量管制方式，灌溉頻度高者，營養鹽比例應調低。

使水分蒸發，必須供給熱量（能量），稱為汽化熱。這些熱量來自何處呢？此種熱來自水本身或與水接觸之物體。當水蒸發時，與水接觸之物體為空氣，空氣本身提供蒸發熱給水分子後，這些提供者將失熱，其溫度也會降低，這就是蒸發冷卻的原理。噴霧與水牆系統可降低空氣溫度就是這個道理；灑水到動物體再予以吹乾則是另一種方式，因為此時與水接觸的是動物體的皮膚，是屬更直接的降溫作法。

相對溼度感測方式包括使用乾濕球式儀器再透過換算求得，或直接以電容式感測器如 H204C 感濕 IC 或電阻式感測器如 HS12 或 HS15 系列的感濕 IC（SIMAREC 株式會社）等量測並透過電路調整亦可得 RH% 與電壓輸出呈線性關係，感測範圍為 10 至 90%。圖 5-19,a,b,c, 所示為常見的幾種相對溼度感測器與紀錄器。

絕對溼度感測器可以用熱（hot）熱敏電阻製作。此乃利用濕空氣與乾空氣的熱傳導差異以判別絕對溼度值。日本芝浦電子株式會社的 HS5 與 HS6 為典型代表 IC；另外，

亦有可應用在微波爐的耐高溫的設計，如 HS11。芝浦電子 CHS-1 與 CHS-2 也是可量測絕對溼度的感測 IC。



圖 5-19a 溫度濕度記錄 圖 5-19b 溫度/濕度記錄 圖 5-19c 溫度濕度（露點）

4 空氣成份

空氣成分中以涉及光合作用所需的二氧化碳為影響最大，另外乙烯的含量只要有些微變化，對植物體也有頗為明顯的影響。為提高植物產能，補充二氧化碳為慣見的方法，在補助人工燈光的控制環境下若幾乎完全密閉或僅有微量的通風，則二氧化碳的不足是可預見的。光線與二氧化碳在植物的光合作用中是相輔相成的，二者中任一不足都將限制整體光合作用之進行。

現階段大氣的二氧化碳濃度約為 345 ppm（524 mg/kg air），文獻中一般溫室內二氧化碳保持在 500-1000 ppm 為適宜之濃度，依據 OSHA 有關工作環境安全的規定，5000 ppm 是上限。由於地球溫室效應的惡質化，二氧化碳這第一號的溫室氣體並不被鼓勵使用，但若有自然的二氧化碳產生來源，譬若：酒廠酒精發酵過程、家禽家畜養殖場、堆肥處理中心、菇類栽培等，其自然產生的二氧化碳均可收集再予利用，不僅可提高產量且可保護環境。動物體產生的二氧化碳主要基於呼吸作用，動物體由於新陳代謝所產生的總熱量與產生的二氧化碳量成正比，大約是每產生 24.6 kJ 的熱量會產生 1 公升的二氧化碳。



圖 5-20a 可攜式二氧化碳感測器



圖 5-20b 安裝於溫室的二氧化碳感測器(Cole12)



圖 5-20c 安裝於溫室的二氧化碳感測器(Horiba)

對禽畜舍而言，室內濕氣、粉塵、二氧化碳與氨氣等不良氣體累積至某一程度亦對動物體不利，尤以氨氣的危害為最大。氨氣會降低日增重率與飼料利用率，亦會傷害眼睛，影響呼吸道，造成豬的萎縮性鼻炎或支氣管炎、肺炎，甚至造成動物的反社會行為，譬如啄食癖等。國際農工委員會（ICAE, 1984）建議氨氣的安全上限應維持在 20ppm 以下，但考慮其他有害物質的堆積，Urbain 等（1994）建議應維持在 15 ppm 以下。一般為了降溫而有的換氣量已足夠帶出所有的不良氣體，所以一般不需擔心。

欲瞭解植物光合作用之速率，空氣中之二氧化碳濃度是必需量測的；其一般使用的儀器為攜帶式紅外線輻射吸收儀（圖 5-20a），二氧化碳會阻礙紅外線，感測儀器依照樣本中接收到 LED 光源發射出的輻射量產生毫伏特的電壓訊號，精確度可達 ± 1 ppm（在此，ppm 為體積比，1% = 10000 ppm）。一般溫室中安裝的則為如圖 5-20b 與圖 5-20c 所示的指針式二氧化碳感測器，其感測機制仍是紅外線方式。

5 風

風速影響通風量，影響水牆的效率，影響降溫效果，影響動植物體表水分之蒸散等。風速高對植物亦可能產生機械刺激的效應（Tigmomorphogenetic effect）。風速對幼小動物產生的風冷效應影響亦頗大。

常用的風速感測器有三大類，如圖 5-21,a,b,c 所示：

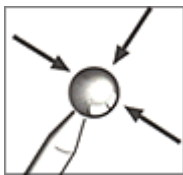


圖 5-21a 熱球式風速測
棒 0 to 10.0m/s



圖 5-21b 熱線式風速測
棒 0 to 20.0m/s

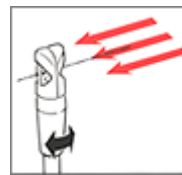


圖 5-21c 葉片式風速測棒 0.4
to 60m/s



熱球與熱線式風速計均採用會自行加熱至 150-200 的熱（hot）熱敏電阻，風速大時，熱敏電阻被強力冷卻，為了維持定溫必須加強電流，由電流變化得知風速。葉片式風速計則多半有光編碼器，透過脈波方式經由計數來決定風速。

負壓式設施內使用風扇抽風，風扇所能提供的風量受系統壓差影響，後者的量測可透過如圖 5-22 所示的差壓計。簡易者可拿一細水管，兩端分置於室內、外，由水面的高度差可推導求出系統壓差。0.1 inch 水柱高度差相當於 25 Pa 的壓差，設施內系統壓差一般不應超過 50 Pa，如此可維持大多數風扇仍保持至少 90% 的風量。

6 水

a.水逆境 Stress 一詞在工程上為受外力時物體所感受的應力，但用於動植物的應用，則不能以應力來翻譯，動物體所受的 thermal stress 譯為熱緊迫，植物體所受的 water stress 譯為水逆境，包括浸水與缺水。引起植株浸水則多半是雨量太大、澆水過多且排水不良所造成；引起植株缺水的原因則多半是由於植物本身過分失去體內的水分或是自土壤中吸收水分不足，或者二者兼具而造成植物體內水分無法平衡所引起。



? 5-22 ? ? ?

作物長久處於浸水逆境下，根部因缺氧而壞死，造成根系失去吸水功能致使地上部萎凋，嚴重傷害時甚至造成植株的死亡，使栽培者蒙受嚴重的損失。生理上亦產生種種異常變化，諸如：乙烯、ABA 含量的增加，乙醇的產生，乙醇去氫酵素（ADH）活性增加，GA、Cytokinins 含量的減少，醣類的變化等等。浸水對作物之影響和作物的種類、浸水時植株大小及浸水時間的長短有關。

引起植物缺水的原因不同，所產生的凋萎性質亦不相同。一些旱性作物經過暴風雨後立即接受陽光的照射亦可能發生凋萎，並不是由於土壤中水分缺少所直接引起，而是由於土壤通氣性不良所造成根的傷害，引起根部吸水能力降低所造成的。所以一個良好的土壤不僅能供給適當水分、養分於植株，並且需要有良好的通氣性與排水性。

番茄栽培之末期要強迫增加甜度，一般採斷水栽培方式，水耕系統則採灑鹽的方式，旨在調整水中滲透壓，使水份無法被根系吸收。西瓜或其他果實在採收末期若逢雨天則甜度降低，若逢乾旱則甜度增加為相同道理。

b.水質

a)溶氧量 DO 與水相關的感測因子包括：水溫、電導度、溶氧、酸鹼度、氧化還原電位、濁度等。水中電導度可代表水中各類可溶性鹽類的濃度，濃度愈大，滲透壓愈高，水份及溶於水中的營養鹽愈難被根系吸收。海水（3%鹽水）中飽和溶氧量也比同溫度下的淡水中飽和溶氧量低。水中溶氧的多寡則影響根系的呼吸作用，水溫愈高則水中所能溶入的氧氣則愈少。

b)酸鹼度 pH 無論是有土或無土栽培，測定栽培介質的 pH 值猶如測量人體的體溫一樣，可瞭解介質或人體是否正常。pH 值最主要的作用為影響介質中營養元素的有效性，因此作物必須在合適的 pH 範圍的介質中，才能生長良好而不致造成養分的過多或缺乏現象。如圖 5-23 左圖為土耕栽培適用，所示依序為氮、磷、鉀、硫、鈣、鎂、鐵、錳、硼、銅與鋅、鋁。圖 5-23 右圖為水耕栽培適用，依序為氮、磷、鉀、鈣、鎂、鐵、錳、硼、鋅、銅。一般土壤介質之 pH 值以 6.2 6.8 為最適當，無土介質（水耕栽培）之 pH 值以 5.4 6.0 為最適當，可適應大多數的花卉作物。組織培養苗的培養基也必須調整其 pH 值，可採無土介質之範圍，一般調為 5.65 5.7。一般土壤介質 pH 低於 5.5，大多數營養鹽均失效。無土介質（水耕栽培）pH 值超過 5.5，磷與錳的有效性會減少。

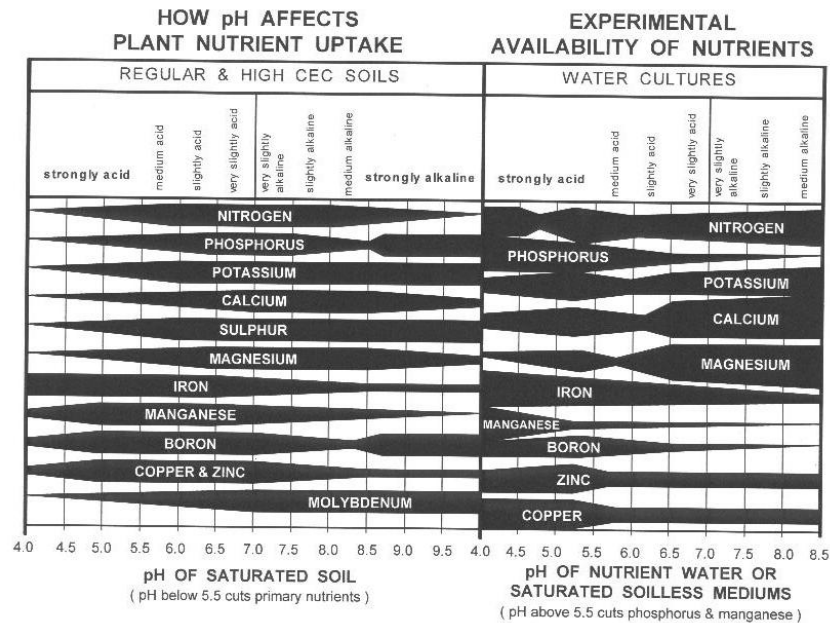


圖 5-23 不同 pH 範圍內介質中營養元素的有效性，左圖：土耕，右圖：水耕

介質過酸或過鹼，pH 值不適當，當然對植物生育有不良影響。例如在 pH 低的介質，鈣、鎂含量少，作物亦呈鈣、鎂缺乏症狀，又因鋁從介質中大量溶出，會發生根系受傷現象，使很多營養要素吸收受阻；此外酸性介質下，鐵、錳、鋁等元素易與磷結合而使磷有效性降低，凡此均不利作物生長。而在 pH 值高的介質下，亦造成鐵、錳、硼的缺乏，而且鹼性環境下，鈣、鎂活性高，會與鉀抵抗使鉀的吸收受阻，鈣、鎂也易與磷結合使磷的有效性降低；此外銨態氮在 pH 高時會化為氨氣而散逸。因此在不適 pH 情況下，有必要調整改進以提高作物生產。

酸性介質可使用石灰質材或其他鹼性質材改進，例如石灰石（碳酸鈣）、生石灰（氧化鈣）、消石灰（氫氧化鈣）、苦土石灰（及白雲石，碳酸鎂鈣）、矽酸爐渣等。鹼性介質可施用酸性質材，如硫磺粉、硫酸鋁等加以改進，但也應注意不宜過量施用。

常用測定 pH 值之方式大略有以下三種：試紙呈色反應法、試劑比色測定與玻璃電極法。前兩種比色法測定結果均不夠精確，只能獲知土壤 pH 值的大概。電極法則可以精確地讀取 pH 數值，早期電極 pH 計價格昂貴攜帶不便，只適合在實驗室使用（圖 5-24a）。近來以發展出多種攜帶型的簡易 pH 計操作簡便（圖 5-24b），價格合理，精確程度雖不如實驗室機種，已足以在田間有效運用。一般簡易攜帶型係採電極原理，其電極之先端有非常薄的玻璃膜，若保養不良將嚴重影響其準確度。



圖 5-24a 桌上型玻璃電極酸鹼度計



圖 5-24b 攜帶型玻璃電極酸鹼度計



圖 5-25 電導度計

c)導電度 EC 介質中可溶性鹽類 (Soluble Salts) 越多，則介質溶液濃度越大，滲透壓越高，作物越難以吸收水分和養分，當濃度超過作物的忍受限度時，即對作物產生毒害，造成根部受損、地上部葉片萎凋、生產緩慢等症狀，此種現象稱為「鹽害」，早期多依含鹽百分率衡量土壤鹽害程度，然而此種方式易造成誤差，因為真正決定鹽害的因子為介質溶液濃度及甚產生的滲透壓，而含鹽百分率相同的土壤，其介質溶液濃度會隨鹽分種類和介質質地而有所差異。因此科學家才發展出以「導電度」或稱「電導度」(Electrical Conductivity, 簡稱 EC) 直接表示可溶性鹽類存在於介質溶液中的濃度。所以應用 EC 值以表示介質的鹽度是最切合實際的。

介質 EC 值的測定原理是基於介質中電解質的濃度越高者，在特定水分含量下其導電性也越好，因此將電流通過兩電極間所產生的電阻之倒數 (及導電度)，可用來表示介質 EC 的強度。電阻的單位為歐姆 (mho) 電阻的倒數，即導電度單位為姆歐 (ohm)，目前漸以 "S" (Siemens) 代替 mho。實際製造測定 EC 的儀器，即 EC 計 (圖 5-25)，是設計一支電極棒，內含兩片等面積的白金電板，置於 1.0x1.0x1.0 立方公分的小空間中，一旦電極棒上方通電，則浸置於介質溶液中的白金板會形成一電橋，電橋的強度即代表電導度 (EC) 的大小。單位以 mmho/cm 或 mS/cm 表示 (註：第一個 "m" 為 milli 之意，代表 1/1000)。電導度 (EC) 之量測值受溫度影響頗大，一般在定溫 (25) 下量測，否則需做溫度補償，使量測之訊號值與溶液中之總鹽濃度成正比。

EC 值的改變可能與作物對養份、水份之吸收有關，也可能由於調整溶液酸鹼度造成，譬如過度使用磷酸容易造成鐵離子之欠缺；長期使用硫酸或鹽酸來降低溶液之鹼度也會造成硫酸根離子或氯離子之增加而提高 EC 值。如前所言，EC 值代表的是全體鹽類的濃度，其並不能測知養液中那一種變多或減少，所以下一型的養液控制系統即應針對各元素作偵測，擇真正之所需來作適量供給。

7 灌溉

a.土壤含水率 土壤旨在提供水與空氣、礦物元素與固持作用。土壤含水率的表示方式有兩種基準：乾基 (水重/乾土塊重) 與濕基 (水重/(水+乾土塊重))。土壤含水率量測方式包括使用蒸發盤、張力計、電阻 (石膏) 塊、電容片、熱分散法、時

域反射法、中子熱化法與重量變化等方法。更多說明請參見第八章有關灌溉管理之內容。

b.量測植物體的缺水緊迫 量測土壤含水率旨在決定灌溉的時機，近年來開始朝向直接量測植物體的缺水緊迫狀況，透過了解植物是否處於水逆境（water stress）來決定灌溉時機。一般採用的方法包括 1.) 使用木液流速/流量感測器（sap velocity/flow meter，圖 5-26a,b）感知木質部內液體的流動情況，2.) 使用氣孔阻力計（Porometer，圖 5-27）量測氣孔阻力係數（單位 m/s ），亦有稱此設備為蒸散計，3.) 量測葉溫與氣溫與溼度計算蒸氣壓差，並推導作物水分逆境指數（Crop Water Stress Index, CWSI），4.) 使用線性變化差分轉換器（LVDT，圖 5-28）量測莖幹直徑的每日變化。LVDT（Linear Variable Differential Transformer）可以將一個物件之直線運動轉換成相對應的電子信號，亦有人稱之為位移感測器（displacement sensor）。

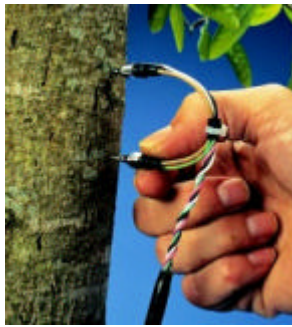


圖 5-26a 木液流速感測器



圖 5-26b 木液流量感測器



圖 5-27 氣孔阻力計



圖 5-28 線性差動轉換器

(2)複合環境因子量測

能量以光線的方式進入溫室，被反射出去的約有 10%，被植物光合作用吸收的約有 2%，被室內植物之外的物體吸收的約有 13%，能量轉為用於水分的蒸發散的約有 25%（潛熱），剩餘的則用來加熱室內空氣，仍有約 50%（顯熱）。顯熱部分會造成溫度上升，若水蒸氣含量不變，則相對溼度會減小。若要找一個指標來描述，則空氣與植物氣孔內的蒸氣分壓差會是比單獨日射量，溫度或溼度更好的指標。複合環境因子代表整合多個環境因子而得出的新的參數，空氣與植物氣孔內的蒸氣分壓差(VPD1)

就是一個新的參數，其為空氣的蒸氣分壓(相當於露點溫度的飽和蒸氣分壓)減去等同於葉片溫度的飽和空氣的蒸氣分壓，假設葉片內氣孔內相對溼度已達飽和。

1 蒸發散量

蒸發散 (evapotranspiration) 為蒸發 (evaporation) 與蒸散 (transpiration) 兩種現象的總稱，後兩者分別代表水分子由水面與由植物體表面揮發為氣態的現象。一般言之，蒸發散量隨著日射量增加而遞增，並隨相對溼度增加而遞減。前述的 VPD1 可視為作物對於灌溉水的需求面，VPD1 值愈大代表作物失水速率愈快，愈接近需水狀態。更多討論請參見第八章中有關灌溉管理的內容。

在控制溫室內溼度來防治病蟲害的研究與實務上，蒸氣分壓差(VPD1)也是比相對溼度更好的指標；在控制上 VPD 控制也是比結露控制更能及早偵測溫室內的高濕狀態。

蒸發散量對溫室內溫度的影響是不容忽略的。夏季增加溫室內栽培密度，增加灌溉頻度，遮陰等都有助於設施內的降溫。

2 複合環境因子

乾濕球溫差(WBD)為乾球與濕球溫度的差值，其代表蒸發冷卻系統的降溫極限。蒸氣分壓差(VPD)有兩類，VPD1 為空氣與葉片蒸氣分壓的差值，代表葉片中水分向外蒸散的難易；VPD2 為相同溫度下飽和空氣與空氣的蒸氣分壓的差值，代表該狀態下的空氣還能有多少吸收水蒸氣的能力。

溫溼度指標(THI)為結合溫度與溼度的指標，用來表示空氣的狀態；風冷溫度為結合溫度與風速的指標；黑球溫度(BGT)為結合溫度、輻射與風速的指標；濕黑球溫度(WBGT)則為結合溫度、溼度、輻射與風速的指標。前述四個指標一般用在熱緊迫與環境對動物生理影響之研究。作物水分逆境指數(CWSI)為結合空氣與葉片溫度與蒸氣分壓的指標。

此些指標值均有商品化產品提供量測，但事實上僅需要知道其基本理論，透過一般的溫、溼度等感測器量測基本數值之後，可使用濕空氣熱力特性計算軟體進行計算，並推導出最終的參數值。兩種方法涉及的感測器成本差異是相當大的。

3 複合環境因子感測儀器

有些廠商提供可量測多項環境因子的儀器，可大致分為兩大類，其一為各環境因子之間各自獨立，如圖 5-29 所示，透過不同感測頭，可量測風速、風量、溫度、溼度與壓力等；其二為具備前者可量測各因子之功能外，尚利用內建的韌體，計算其他環境因子。如圖 5-30 所示的儀器除了可顯示乾球(Tdb) 濕球(Twb)與黑球溫度(BGT)之外，也可顯示濕黑球溫度(WBGT)，其為前者之函數，被用為量測熱緊迫之指標。計算公式分室內與室外兩類，二者均為 °C 單位。

$$WBGT_indoor = 0.7 * Twb + 0.3 * BGT$$

$$WBGT_outdoor = 0.7 * Twb + 0.2 * BGT + 0.1 * Tdb$$



圖 5-29 風速/風量/溫度/溼度/壓力
多功能測量儀

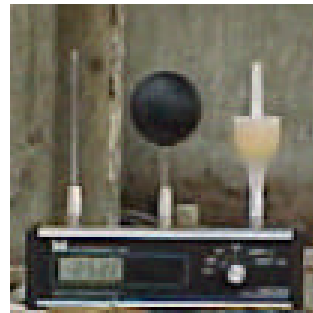


圖 5-30 乾球/黑球/濕球溫度量測儀
(熱緊迫測量儀)

結語

日本東京大學高倉直 (Tadashi Takakura) 教授在多年前曾提出 Speaking Plant 的理念，現階段透過各種感測器進行非破壞的量測正是此理念的落實。本章未提到與影像相關的內容，但無疑的影像也是極為具有發展潛力的感測系統，此方面的應用也正方興未艾，包括紅外線影像、多光譜影像、核磁共振造影等。另外，透過雷射或紫外線照射，誘導植物產生螢光以了解植物受逆境狀況之影響亦是近來光電科技在植物應用研發的重點。

植物本身雖然無法說話，我們可透過感測器與植物間接或直接的溝通，從而控制植物生產系統的產能於最佳的目標範圍，感測器無疑是此控制系統中相當重要的一個環節。

本章由通論開始，其次介紹控制系統的心臟與大腦，並介紹各種控制系統涉及的各項感官，有些感測器允許針對地上、地下、土中、水中環境因子的量測，提供吾人對作物生理受環境因子影響程度之了解，也有些感測器則直接針對植物生理進行量測，譬如樹液流速、氣孔阻力或水逆境指數 (CWSI) 相關的感測器、光合作用感測儀器，葉綠素計等，後二者在本文中雖未介紹，但也是廣被學術界使用的設備。本文介紹的內容除了溫室產業界環境控制相關的控制系統與感測設備之外，亦涵括植物栽培研究相關的儀器設備，期能提供產學界完整的參考。

(方煒)

引用 參考文獻

1. 王焜瑜。2003。Email 聯絡。紐西蘭 AutoGrow System Ltd.
2. 方煒。1998。溫室環境控制工程。種苗生產自動化技術通訊。第三期第 98008 號。種苗生產自動化技術服務團。台北：財團法人農業機械化研究發展中心。
3. 方煒。1998。溫室環控之常識、設計原則與控制策略。溫室環控入門研習班。台灣糖業股份有限公司訓練中心講義。台南 pp12。
4. 方煒。1999。溫室環控因子之物理特性。溫室環控入門研習班。台灣糖業股份有限公司訓練中心講義。台南 pp34。
5. 方煒、饒瑞估。2000。溫室降溫原理與環境感測示範。溫室環控實務研習班。台灣糖

業股份有限公司訓練中心講義。台南。

6. 方煒、黃昌揚。2000a。環境調節設備操作調整與維修。溫室環控實務研習班。台灣糖業股份有限公司訓練中心講義。台南。
7. 方煒、黃昌揚。2000b。溫室維修實務。溫室環控實務研習班。台灣糖業股份有限公司訓練中心講義。台南。
8. 各家廠商型錄資料與相關網站。
9. Both, A.J. 1995. Dynamic simulation of supplemental lighting for greenhouse hydroponic lettuce production. Cornell University.
10. Ting, K.C., G.A. Giacomelli and W. Fang. 1993. Decision Support Systems for Single Truss Tomato Production. Proceedings of XXV CIOSTA-CIGR V Congress. Wageningen, The Netherlands. 70-76.