

農業設施環境因子量測與紀錄

方煒

台大生物產業機電工程學系教授

目 錄

一.	光.....	3
二.	溫度.....	6
2.1.	溫度計.....	7
2.2.	熱電偶 (Thermocouple).....	8
2.2.1.	席貝克效應.....	8
2.2.2.	熱電偶使用限度.....	8
2.2.3.	熱電偶三大定律.....	9
2.2.4.	熱電偶實體圖.....	12
2.2.5.	熱電偶溫度計回路之組成.....	13
2.3.	白金測溫電阻體(RTD).....	15
2.3.1.	白金測溫電阻體種類.....	15
2.3.2.	阻抗元件之溫度相對應容許差.....	15
2.3.3.	白金測溫電阻體之接線方式.....	16
2.3.4.	白金測溫電阻體構造與實體圖.....	16
2.4.	熱敏電阻(Thermistor).....	17
2.5.	感溫 IC.....	18
2.6.	非接觸式溫度感測儀器：紅外線溫度計.....	18
三.	濕度.....	19
四.	空氣成份.....	21
五.	風.....	22
六.	水.....	22
6.1.	水逆境.....	22
6.2.	水質.....	23
6.2.1.	DO.....	23
6.2.2.	pH.....	23
6.2.3.	EC.....	24
七.	土壤含水率.....	25
八.	複合環境因子.....	26
8.1.	蒸發散量 (輻射量與溼度的函數).....	26
8.2.	其他複合環境因子.....	27
8.3.	複合環境因子感測儀器.....	27
九.	數據紀錄系統.....	28
9.1.	CR-10 與 21X 系列產品.....	28
9.2.	HOBO 系列產品.....	28

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。

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：

1. 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。
2. 靈敏度：感測器輸出變化對輸入變化的比。
3. 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。
4. 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。
5. 輸出訊號：電阻、電流、電壓、脈波值等。

表 1 列出幾種感測器的種類與特性，本文僅討論與環境與水質因子量測相關的感測原理與儀器，機械性質的感測則列於附錄中。附錄一為光電開關與近接開關，附錄二為繼電器，附錄三為計數器與計時器，附錄四為微動開關與限動開關。

表 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	處理方式	
環境	溫度	熱電偶	電壓 mV	放大及線性化	
		白金測溫阻體	電阻	電橋	
		熱敏電阻	電阻	電橋及線性化	
	相對溼度	感溫 IC	電流	串聯電阻	
		高分子膜阻抗式	電阻	電橋	
		感濕 IC	電流	串聯電阻	
		熱熱敏電阻	電阻	電橋及線性化	
	絕對溼度	石膏塊	電容片	電容	AC 電橋
		含水率	石膏塊	電阻	電橋
輻射	光二極體	電流	串聯電阻		
	照度	光二極體	電流	串聯電阻	
	光量子數	光二極體	電流	串聯電阻	

	風速	光編碼器加葉片	脈波	計數(附錄 3)
		熱熱敏電阻	電阻	電橋及線性化
	風向	電位計	電壓	
	雨量	微動開關	脈波	計數(附錄 4)
	二氧化碳	光二極體/紅外線	電流	電晶體電路
水質	酸鹼度	pH 電極	電位差	高阻抗電壓計
	溶氧	DO 電極	電壓或電流	電壓或電流計
	導電度	EC 電極	電阻	電阻計
機械性質	力	荷重元	電橋輸出	差動放大
	壓力	半導體應變計式	電橋輸出	差動放大
		金屬應變計式	電橋輸出	差動放大
	加速度	應變計式	電橋輸出	差動放大
		壓電型	電橋輸出	差動放大
	位置	電位計	電壓	
		LVDT	差壓	相位鎖定解調
		光編碼器	脈波	計數
	有無	微動開關	電壓	(附錄 4)
		近接開關	電壓	(附錄 1)
		光電開關	電流	電晶體電路(附錄 1)

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。

一. 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(圖 1)，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)。

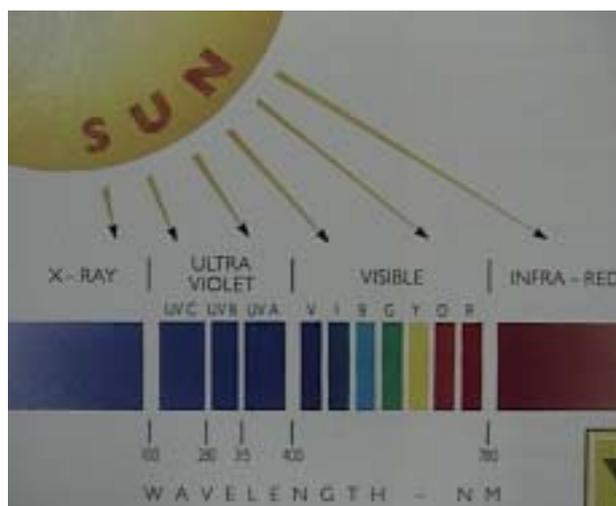


Figure 1. Solar Spectrum

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(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 $\mu\text{mol}/(\text{s m}^2)$ 或 $\mu\text{E}/(\text{s m}^2)$ ；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(圖 2a，波峰為 555 nm)，植物體對光線的敏感度則有另一曲線(圖 2b，波峰為 675 nm)，兩者不同。

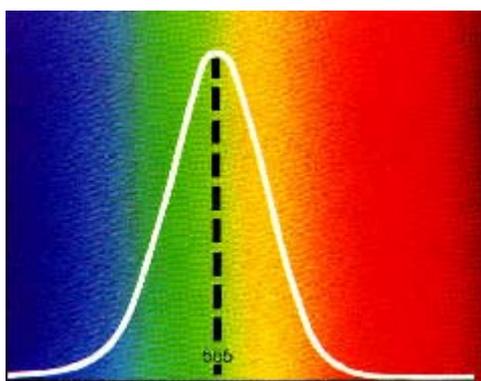


圖 2a. 人類眼睛之比視敏感度曲線

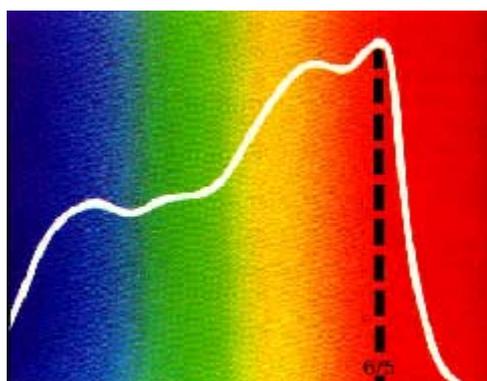


圖 2b. 植物體對光線之敏感度曲線

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 3 所示：



圖 3a. 照度計



圖 3b. 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)與訊號讀取儀器



圖 3c. 散射計

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 4 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 4. 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。

二. 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。詳細商品規格可參見附錄五的溫度控制器。

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。

2.1. 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 5a 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 5b）。

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 5a. 乾濕球溫度計

圖 5b. 手搖式乾溼計

2.2. 熱電偶 (Thermocouple)

2.2.1. 席貝克效應

如圖 6 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」。

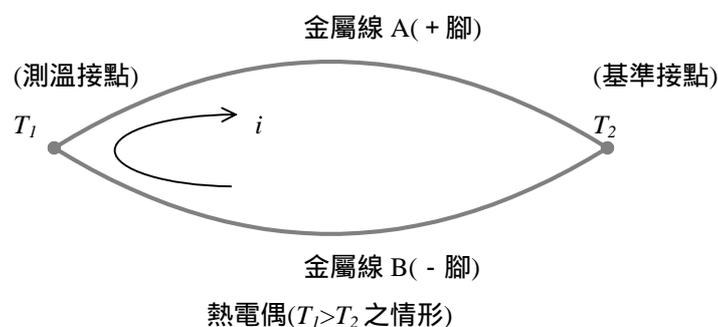


圖 6. 席貝克效應

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°C)，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 $0^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ 與 $200^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$)之熱電動勢值是不一樣的。

2.2.2. 熱電偶使用限度

如表 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 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

2.2.3. 熱電偶三大定律

1. 均質回路定律

如右圖所示，由單一均質金屬所形成之封閉迴路，沿迴路上每一點即使改變溫度也不會有電流產生。亦即， $E = 0$ 。

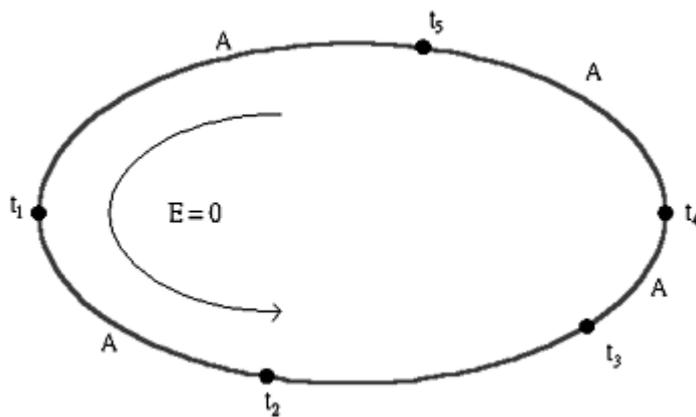


圖 7a. 均質回路定律之 1

如右圖所示，在由 2 種類均質金屬 A 與 B 所形成之熱電偶迴路，E 為 A 與 B 的接合點之溫度 t_1 與 t_2 相關之關係函數，不受 A 與 B 之中間溫度 t_3 與 t_4 之影響。

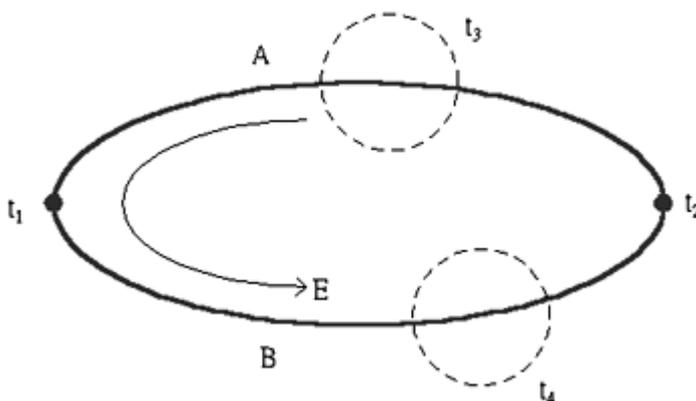


圖 7b. 均質回路定律之 2

2. 中間金屬定律

如右圖所示，在由 A 與 B 所形成之熱電偶迴路兩接合點以外的任意點插入均質的第三金屬 C，C 之兩端接合點之溫度 t_3 若為相同的話，E 不受 C 插入之影響。

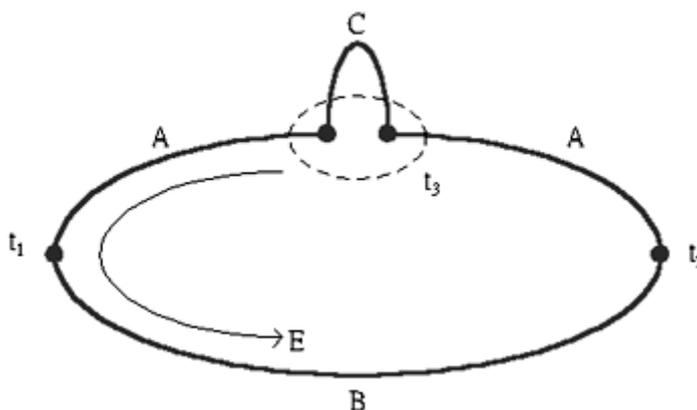


圖 8a. 中間金屬定律之 1

如右圖所示，在由 A 與 B 所形成之熱電偶迴路，將 A 與 B 的接合點打開並插入均質的金屬 C 時，A 與 C 接合點的溫度與打開前接合點的溫度相等的话，E 不受 C 插入的影響。

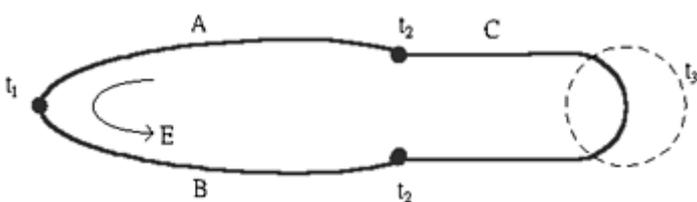


圖 8b. 中間金屬定律之 2

如右圖所示，對由 A 與 B 所形成之熱電偶插入第 3 之中間金屬 C，形成由 A 與 C、C 與 B 之 2 組熱電偶。接合點溫度保持 t_1 與 t_2 的情況下，

$$E_{AC} + E_{CB} = E_{AB}$$

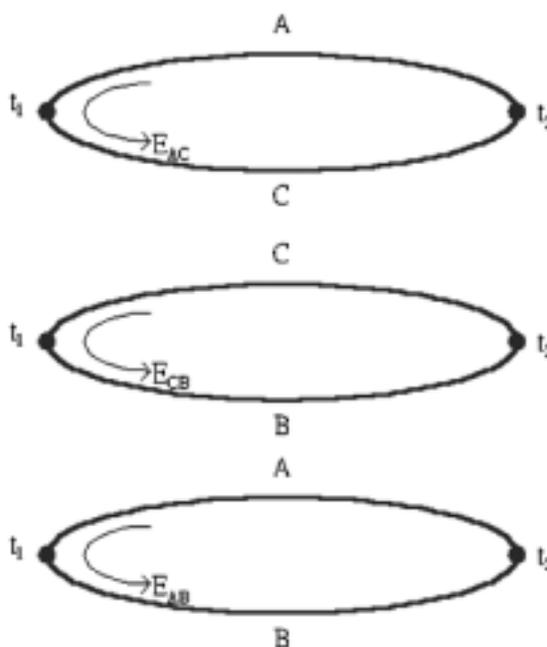


圖 8c. 中間金屬定律之 3

2. 中間溫度定律

如右圖所示，任意數的異種金屬 A、B、C、G 所形成的封閉迴路，封閉迴路之全體或是全部的接合點保持在相等的溫度時，此迴路的 $E=0$ 。

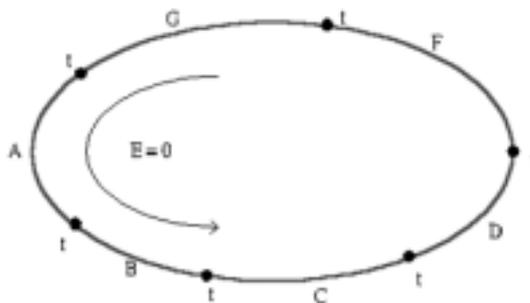


圖 9a. 中間溫度定律之 1

如右圖所示，A 與 B 所形成之熱電偶，兩接合點之溫度為 t_1 與 t_2 時之 E 為 E_{12} ， t_2 與 t_3 時之 E 為 E_{23} 的話，

$$E_{12} + E_{23} = E_{13}$$

此時，稱 t_2 為中間溫度。

以中間溫度 t_2 選擇如 0 這樣的標準溫度，求得相對 0 任意的溫度 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_n 之熱電動勢，任意兩點間之熱電動勢便可以計算求得。

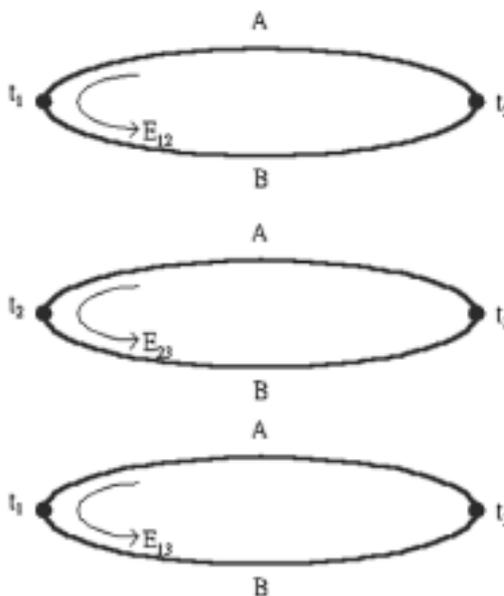


圖 9b. 中間溫度定律之 2

如右圖所示，對於使用補償導線之熱電偶迴路適用以上之觀念。A 與 B 為熱電偶，C 與 D 為 A、B 用之補償導線，M 為數位電壓計，計算後可得下面關係式：

$$E = E_{AB}(t_1) - E_{AB}(t_3)$$

也就是說，M 所測定之電位差是由 t_1 、 t_3 所決定，不受 t_2 之影響。

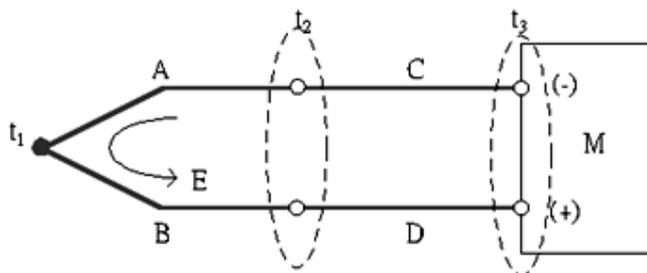
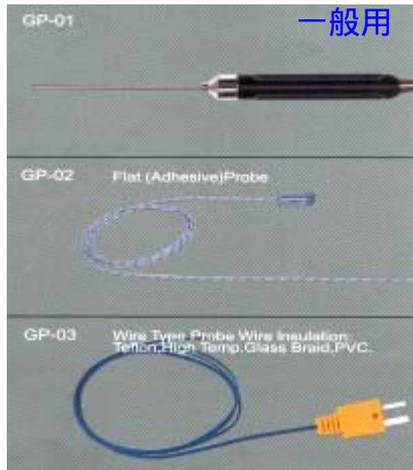
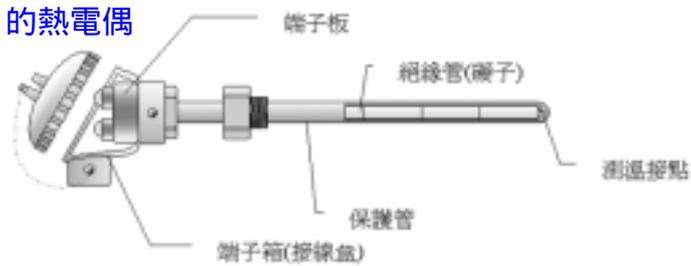


圖 9c. 中間溫度定律之 3

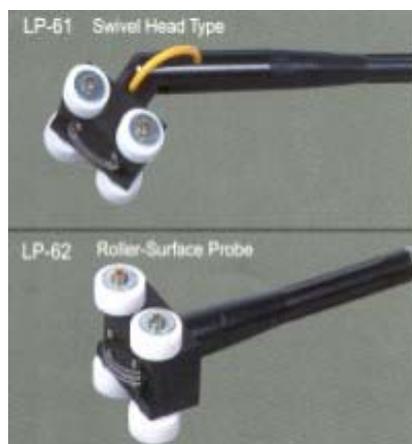
2.2.4.熱電偶實體圖



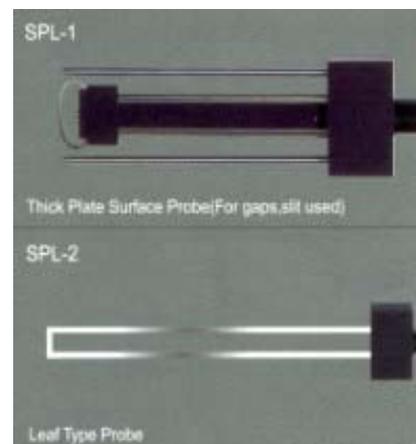
狀似 PT-100 的熱電偶



移動
表面
用



薄片式



表面用

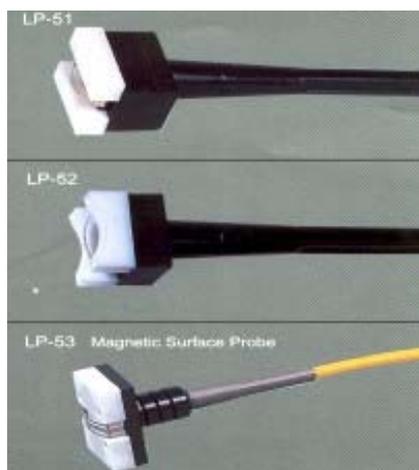


圖 10. 各種熱電偶

2.2.5. 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。

1. 熱電偶直接連接計測器

此為將熱電偶直接連接計測器之接續方式，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 11. 熱電偶直接連接計測器

2. 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。

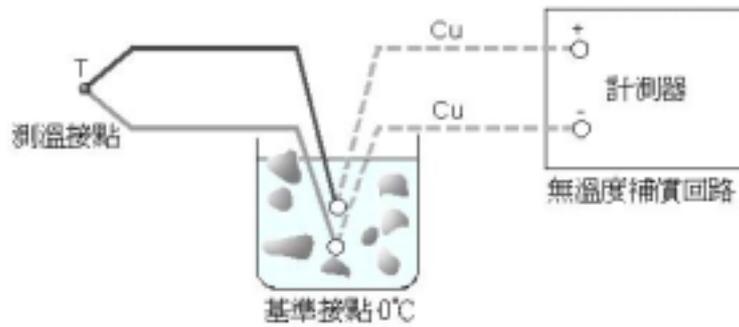


圖 12. 冰點式基準接點接法

3. 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。

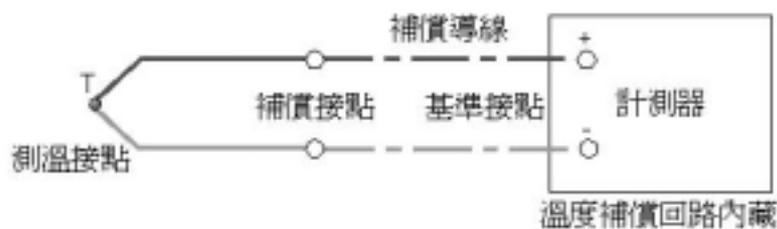


圖 13. 使用熱電偶與補償導線

4. 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。

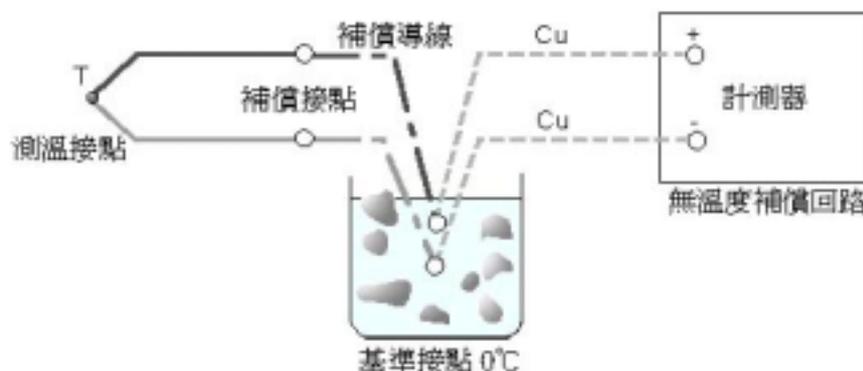


圖 14. 使用熱電偶、補償導線與冰點式基準接點接法

2.3. 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	使用溫度範圍()
低溫用	-200 +100
中溫用	0 350
高溫用	0 650
超高溫用	0 850

2.3.1. 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 ,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,R100/R0=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。

2.3.2. 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。

種類	規格	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
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

2.3.3. 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，有兩線、三線與四線式之別。

- 2 導線式：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 導線式：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知兩臂，可相互抵銷。
- 4 導線式：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。

2.3.4. 白金測溫電阻體構造與實體圖

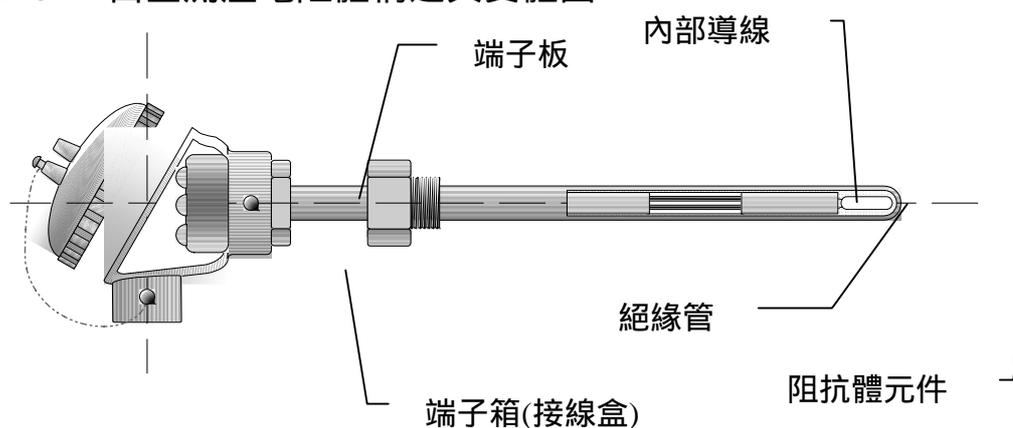


圖 15. 白金測溫電阻體之構造



圖 16. 白金測溫電阻體實體圖



圖 17. 白金測溫電阻體之頭部構造實體圖

2.4. 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 18 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)熱敏電阻以氧化鈣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_3 等複合燒結體



圖 18. NTC 熱敏電阻

2.5. 感溫 IC

另有使用積體電路(IC)的感溫元件，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 19a, Analog Digital 公司)，感測範圍為-55 +150 ，提供 5 30V 直流電，可得 $1 \mu A/K$ 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 $1 \mu A$ 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 19b)，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。

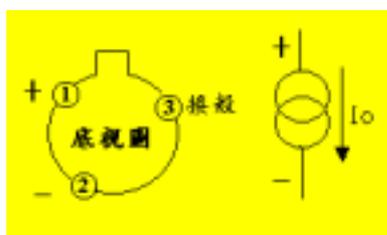


圖 19a. AD590 感溫 IC 的接腳圖及零件符號

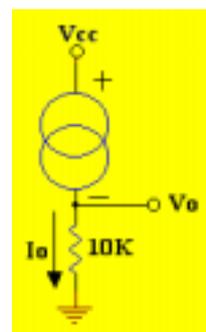


圖 19b. AD590 感溫 IC 基本應用電路

2.6. 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°C 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(thermal pile)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。有些儀器只能量測單點(圖 20a)，有些則可量測整個表面(圖 20b)。



圖 20a. 紅外線溫度計



圖 20b. 紅外線熱像儀

三. 濕度

溼度有兩種，分別為相對溼度(%)與絕對溼度(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。相對溼度表示空氣中之含水比例，絕對溼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。知道「密度」是什麼嗎？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體積，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，溼度對作物生育的影響比溫度小，但是溼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，高溼度下，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，多溼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，當然屬於陰溼的作物則在 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 21 所示為常見的幾種相對溼度感測器與紀錄器。



圖 21a. 溫度濕度記錄器 圖 21b. 溫度/濕度記錄器 圖 21c. 溫度濕度(露點)計

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。

四. 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。文獻中一般認為二氧化碳保持在 500-1000 ppm 為適宜之濃度, 若高達 3000 ppm 將對人體有害。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。

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紅外線輻射吸收儀(圖 22)，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)。



圖 22. 二氧化碳感測器

五. 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性刺激，造成所謂 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 23 所示：

<p>圖 23a. 熱球式風速測棒 0 to 10.0m/s</p>	<p>圖 23b. 熱線式風速測棒 0 to 20.0m/s</p>	<p>圖 23c. 葉片式風速測棒 0.4 to 60m/s</p>

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 24 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。



圖 24. 差壓計

六. 水

6.1. 水逆境

水逆境(water stress)包括浸水與缺水；引起植株浸水則多半是雨量太大且排水不良所造成；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。

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(Kawase,1978)、ABA(Hiron and Wright,1973)含量的增加，乙醇的產生(Fulton and Erickson,1964)，乙醇去氫醇素(ADH)活性增加(Francis et al.,1974)，GA(Reid and Crozier,1971)、Cytokinins (Ltai and Vaadia,1965)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(Barni and Costa,1976)。

引起植物缺水的原因不同，所產生的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，旨在調整水中透壓，使水份無法被根系吸收。

6.2. 水質

6.2.1. 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。

6.2.2. 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(如圖 25 所示)，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。一般土壤介質 pH 值 6.2 ~ 6.8 或無土介質 5.4 ~ 6.0 可適應大多數的花卉作物。因為在此等 pH 範圍內，介質中養分的有效性最高。

Mo Cu B Mn Fe Mg Ca S K P N
pH 鉬 銅 硼 錳 鐵 鎂 鈣 硫 鉀 磷 氮

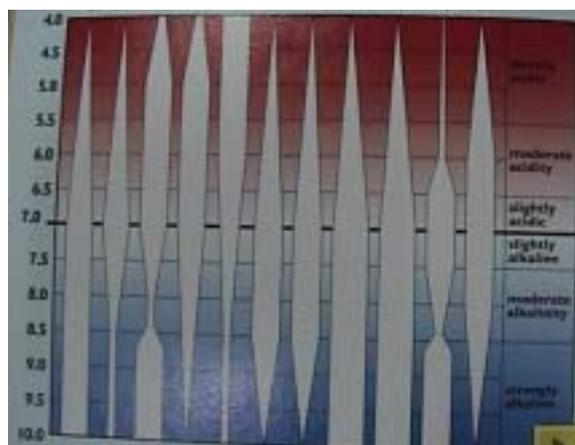


圖 25. 不同 pH 範圍內介質中營養元素的有效性

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）、洩酸爐渣等。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 26a）。近來以發展出多種攜帶型的簡易 pH 計操作簡便（下圖 26b），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。

6.2.3. 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「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 27），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°C ）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。



圖 26a. 桌上型玻璃電極
酸鹼度計



圖 26b. 攜帶型玻璃電極
酸鹼度計



圖 27. 電導度計

七. 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（ $\text{水重}/\text{乾土塊重}$ ）與濕基（ $\text{水重}/(\text{水}+\text{乾土塊重})$ ）。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。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 28a,b）感知木質部內液體的流動情況，2. 使用氣孔阻力計（Porometer，圖 29）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 30）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 28a. 木液流速感測器



圖 28b. 木液流量感測器



圖 29. 氣孔阻力計



圖 30. 線性差動轉換器

八. 複合環境因子

8.1. 蒸發散量 (輻射量與溼度的函數)

坡地開發常利用草類進行敷地，蓋因草類植生有綠美化之功效外，更能防止水土流失及兼作牧草用，魏與蔡(1998)針對百喜草 (*Paspalum notatum*)、盤固拉草 (*Digitaria decumbens*) 及奧古斯丁草 (*Stenotaphrum secundatum*) 等三塊草地進行蒸發散量之觀測，獲致結果如下：

1. 日射量及相對溼度與草地蒸發散量的關係較為顯著，期中各草地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。
2. 各草地之夜間蒸發散量佔全天之蒸發散量之 -10%~10%。
3. 比較各草地蒸發散量之大小，得知其結果：
盤固拉草>百喜草>奧古斯丁草地
4. 比較不同季節下各草地蒸發散量與日射量之關係直線斜率，其大小依序為：冬季>秋季>夏季>春季。
5. 各草地日蒸發散量之推估式分別如下所示：

$$Y_1 = -6.671 + 0.392 X_1 + 0.083 X_2, r=0.896, df=59$$

$$Y_2 = -1.331 + 0.273 X_1 + 0.029 X_2, r=0.852, df=59$$

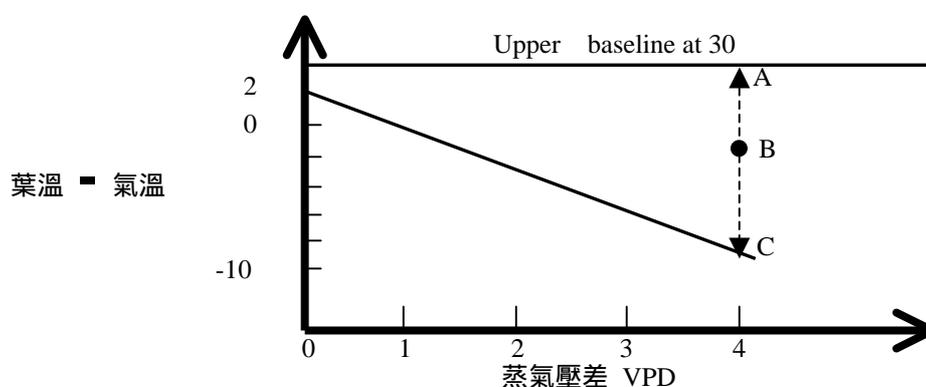
$$Y_3 = -4.007 + 0.414 X_1 + 0.058 X_2, r=0.732, df=57$$

式中， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分為奧古斯丁草、百喜草及盤固拉草之蒸發散量 (mm)， X_1 、 X_2 則為日射量和相對溼度，單位為 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) 及 (%)。

8.2. 其他複合環境因子

本節內容請參見「濕空氣相關之工程基礎」講義。

1. 乾濕球溫差 WBD (乾球與濕球溫度的差值)
2. 蒸氣分壓差 VPD (空氣與葉片蒸氣分壓的差值)
3. 溫溼度指標 THI (結合溫度與溼度的指標)
4. 風冷溫度 Twind-chilled(結合溫度與風速的指標)
5. 黑球溫度 BGT (結合溫度、輻射與風速的指標)
6. 濕黑球溫度 WBGT (結合溫度、溼度、輻射與風速的指標)
7. 作物水分逆境指數 CWSI (結合空氣與葉片溫度與蒸氣分壓的指標)



8.3. 複合環境因子感測儀器

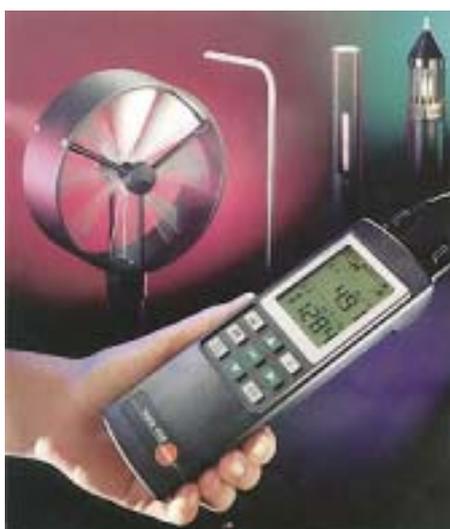


圖 31. 風速/風量/溫度/溼度/壓力
多功能測量儀



圖 32. 乾球/黑球/濕球溫度量測儀
(熱緊迫測量儀)

九. 數據紀錄系統

9.1. CR-10 與 21X 系列產品

本節內容請參見「21X/CR10 使用手冊」講義。



圖 33. 21X 紀錄器與周邊感測器

9.2. HOBO 系列產品

詳見課堂上說明