

第四章 空調系統

修訂日期：4/29/2017

空調包括冷氣，暖氣，除濕，增溼。主要是進行室內的溫度與溼度控制。

(4.1)、空氣中的濕度

空氣是由乾空氣與水蒸汽所組成。乾空氣的成分相當穩定，但空氣中水蒸汽的比例則隨時在改變，與氣候，天氣，季節，早晚都有關係。

$$m = m_a + m_w$$

$$P = P_a + P_w$$

絕對溼度：每 1 kg 乾空氣中水蒸汽的重量。

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} \quad (\text{kg/kg dry air})$$

絕對溼度又稱為溼度比(humidity ratio)

假設乾空氣與水蒸汽都是理想氣體，而且乾空氣與水蒸汽均勻混合，有相同的溫度與體積。

$$P_a = \frac{m_a R_a T}{V}, \quad m_a = \frac{P_a V}{R_a T}$$

$$P_w = \frac{m_w R_w T}{V}, \quad m_w = \frac{P_w V}{R_w T}$$

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} = \frac{P_w V}{R_w T} \frac{R_a T}{P_a V} = \frac{P_w}{P_a} \frac{R_a}{R_w} = \frac{M_w}{M_a} \frac{P_w}{P - P_w} = 0.622 \frac{P_w}{P - P_w}$$

例：空氣的絕對溼度為 0.015，請計算水蒸汽的壓力。大氣壓力為 101.3 kPa。

相對溼度：空氣中水蒸汽的壓力與該溫度下水蒸汽飽和壓力之比值，代表空氣中水蒸汽飽和的程度。

$$\phi = \frac{P_w}{P_v}$$

P_v ：空氣溫度下的水蒸汽飽和壓力。

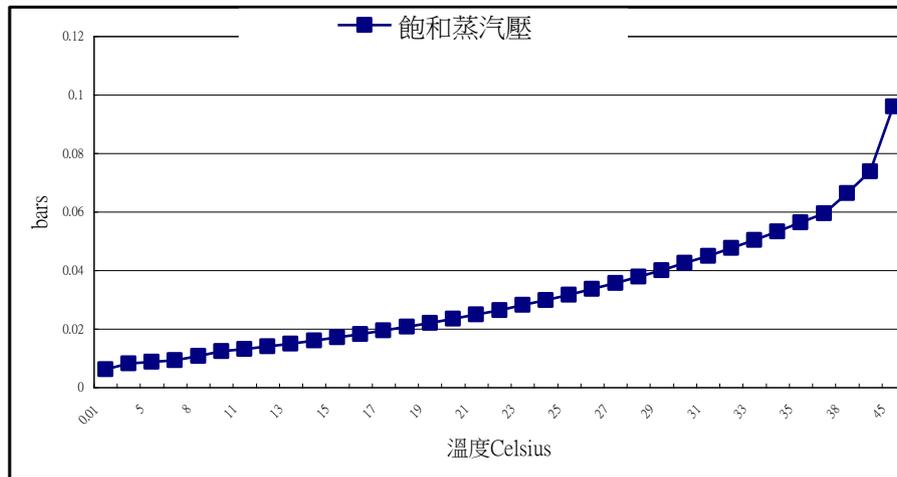


圖 4.1： P_v 與 T_s 的關係

$$P_w = \phi P_v$$

$$\omega = 0.622 \frac{\phi P_v}{P - \phi P_v}$$

空氣溫度下降時，絕對濕度不變，相對濕度則會逐漸升高。但相對溼度最高為 100%，當空氣中的絕對濕度過高，使相對濕度超過 100% 時，水蒸汽便開始凝結，使空氣中的相對濕度都維持為 100%。

例：空氣的絕對溼度為 0.015，請計算相對溼度。大氣壓力為 101.3 kPa。

- (1). 40°C ， (2). 25°C ， (3). 10°C ， (4). 5°C

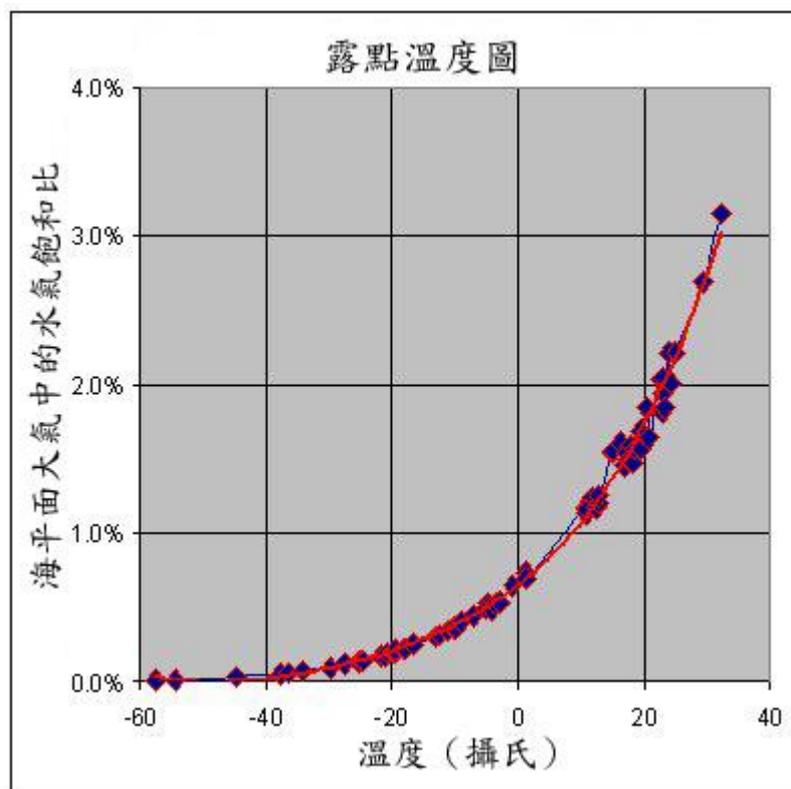
例：北極地區的氣溫為 -40°C，請計算其絕對溼度。大氣壓力為 101.3 kPa，相對溼度為 100%。

露點溫度(dew point)：溫度下降，相對濕度會增加，當溫度下降到使相對濕度達到 100%時，空氣中的水蒸汽便會開始凝結，此時之溫度稱為露點溫度。

露點溫度與大氣的絕對溼度有關，絕對溼度越高，則露點溫度越高。

例：空氣的絕對溼度為 0.015，大氣壓力為 101.3 kPa。請計算露點溫度。

例：空氣的相對溼度為 50%，大氣溫度為 35°C。請計算露點溫度。



作業 4.1：空氣的露點溫度為 15°C，大氣溫度為 25°C，壓力為 101.3 kPa，請計算絕對溼度與相對溼度。

討論：為什麼冷飲杯子外圍會有小水滴？



討論：為什麼夜間地表的花草樹木會有露珠？



討論：為什麼瓦斯爐煮開水時，水壺外面會有一層小水滴。



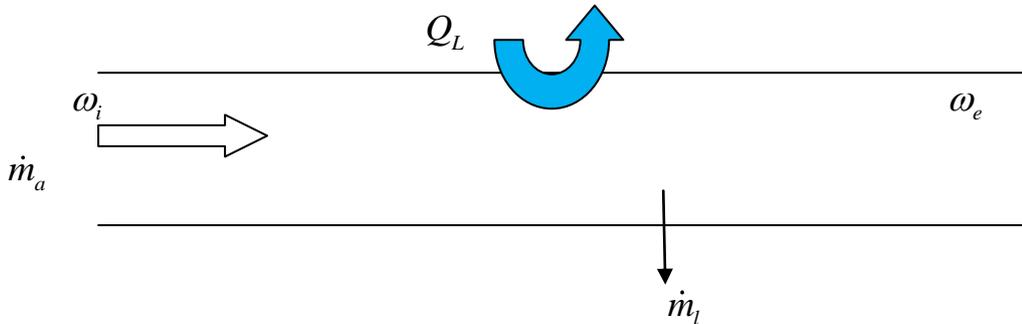
例：家用天然器瓦斯爐的燃燒反應為



請計算已燃氣體的露點溫度。

(4.2)、冷氣機

空氣流經冷氣機的蒸發器，乾空氣與水蒸汽的溫度一起下降。當空氣溫度低於露點溫度時，水蒸氣會開始凝結，由質量平衡可得。



質量平衡

$$\dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_i = \dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_e + \dot{m}_l$$

凝結的水量為

$$\dot{m}_a (\omega_i - \omega_e) = \dot{m}_l$$

能量平衡

$$Q_L + \dot{m}_a h_{ai} + \dot{m}_a \omega_i h_{wi} = \dot{m}_a h_{ae} + \dot{m}_a \omega_e h_{we} + \dot{m}_l h_l$$

Q_L 為空氣所釋放的熱量，也就是冷氣所吸收的熱量。

$$Q_L = \dot{m}_a (h_{ae} - h_{ai}) + \dot{m}_a (\omega_e h_{we} - \omega_i h_{wi}) + \dot{m}_a (\omega_i - \omega_e) h_l$$

q_L 為 1 kg 乾空氣所釋放的熱量，負值表示此為放熱。

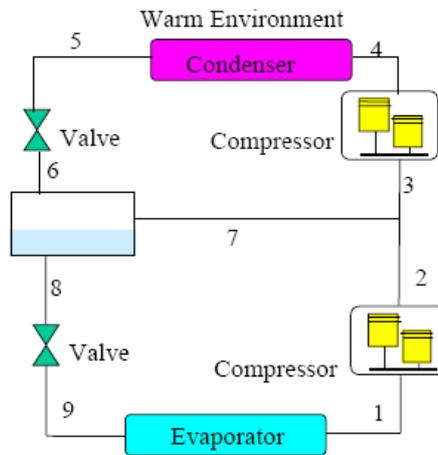
$$q_L = \frac{Q_L}{\dot{m}_a} = c_{pa} (T_e - T_i) + (\omega_e h_{we} - \omega_i h_{wi}) + (\omega_i - \omega_e) h_l$$

例：空氣的溫度為 35°C，相對溼度 60%，大氣壓力為 101.3 kPa。空氣流經冷氣機的蒸發器後，溫度下降為 20°C。

- (1). 請計算 1 kg 乾空氣所釋放的熱量。
- (2). 若空氣的流量為 3000 LPM，請計算所需冷氣的噸數。
- (3). 請計算流經冷氣機後空氣的相對溼度與絕對溼度。

(4). 請計算凝結的水量。

例：上題中的冷氣採用兩段式壓縮系統，如圖所示。冷媒為 R-134a，第一級壓縮壓力為 6.0 bar，第二級壓縮壓力為 14 bar，蒸發室溫度為 -8°C ，壓縮機效率為 85%。



兩段式壓縮系統

- (1). 請計算流經第一級壓縮機的冷媒流量。
- (2). 請計算流經第二級壓縮機的冷媒流量。
- (3). 請計算冷氣機的散熱量。
- (4). 請計算冷氣機的 COP 值。

作業 4.2：冷氣機入口空氣的溫度為 38°C ，相對溼度 70%，壓力為 101.3 kPa。空氣的流量為 1000 LPM，空氣流經冷氣機的蒸發器後，溫度下降為 15°C 。冷氣機以 R410a 為冷媒，已知高壓為 3000kPa， $T_L = -5^{\circ}\text{C}$ ，壓縮機效率為 85%，請計算壓縮機功率。

(4.3)、家用空調

冷氣機之四個主要配件：壓縮機、冷凝器、膨脹閥、蒸發器等組合而成。

窗型冷氣機：

窗型冷氣機為在臺灣最普遍採用之機種，其壓縮機、冷凝器、蒸發器、風扇集中於一機體內。優點為可直接裝設於建築物之冷氣孔或窗台，安裝簡便，且價格較低。缺點為運轉噪音大。冷氣能力一般在 1800~7000 kcal/h 之間。



分離式冷氣機：

分離式冷氣機的構造跟窗型是差不多，與窗型冷氣最大的不同在於其將蒸發器、送風扇與冷凝器、壓縮機、排熱風管分別裝置於獨立的機箱中，即所謂的室內機與室外機，兩機間以粗細不同的冷媒管連接，形成封閉的冷媒工作迴路。此外並連接控制線路，以便由室內機傳送控制訊號至室外機，控制室外機之運轉。

分離式冷氣機優點為將壓縮機置於室外，可降低室內噪音、可裝設於窗型機無法裝設之房間、室內機外型美觀可配合裝潢選擇室內機型式（嵌入、懸吊、壁掛）、可一具室外機搭配多具室內機。缺點為安裝複雜費時、價格較高、安裝技術性高，若冷媒管太長或彎曲過多將使效率降低。一般家庭用冷氣能力在 2000~10000Kcal/h 之間。



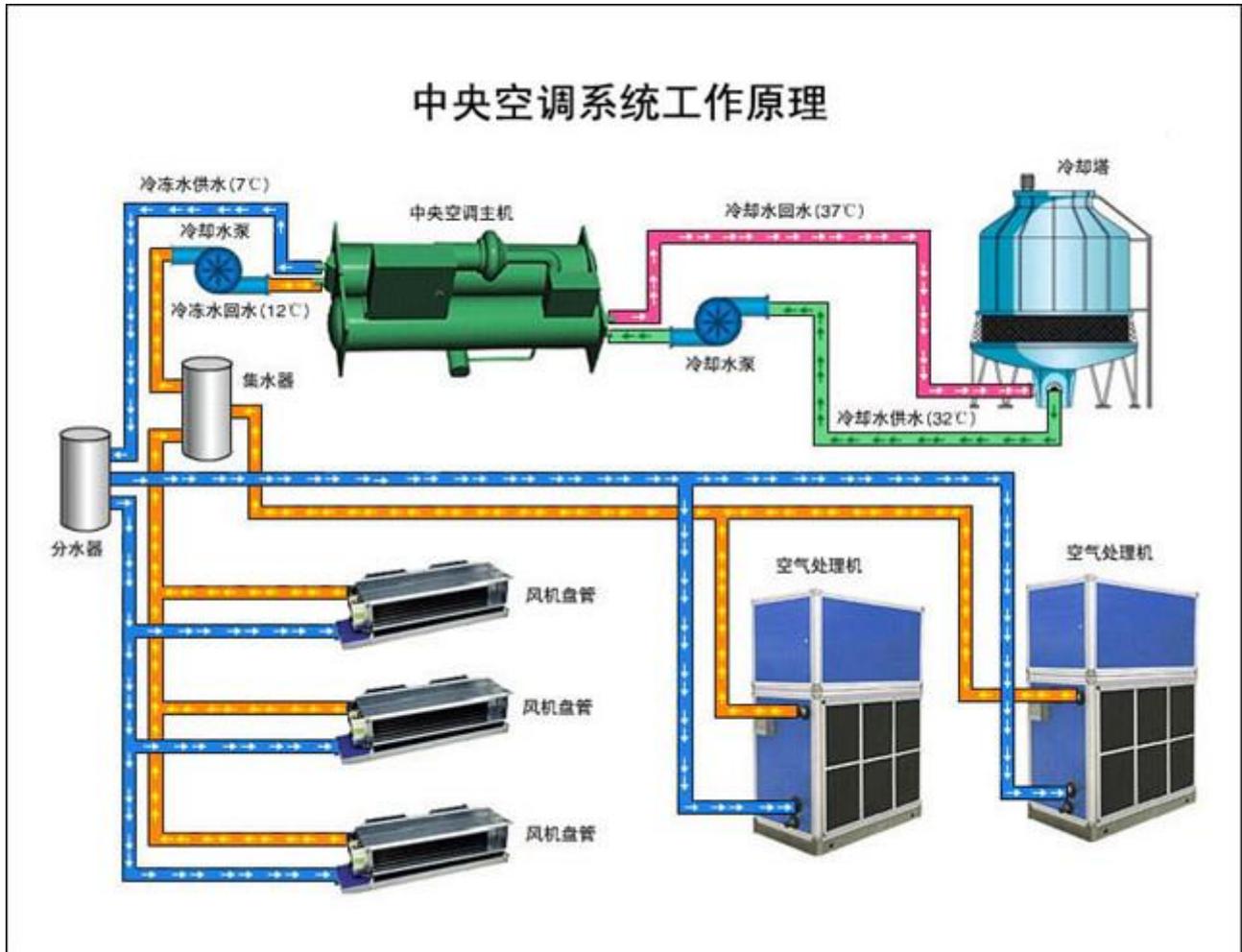
箱型冷氣機：

箱型冷氣機可分為氣冷式與水冷式兩種。氣冷式與分離式冷氣機類似，差別僅在氣冷式箱型機冷氣能力較強，故室內、外機體積較龐大，其冷氣能力一般在 3.8 冷凍噸間。而水冷式則與上述機型有較大差異，此機型由於冷氣能力一般在 5-30 冷凍噸之間，故採用水冷式，以有較佳的排熱效果，其排熱方式為將水導入冷凝器吸收熱能後，利用水泵將之送至冷卻水塔散熱，然後再送回冷凝器吸熱而成一冷卻循環回路。通常使用於商場、辦公室等空間較大之地點。



中央空調系統：

中央空調系統為使用大型空調主機，再以風管將冷氣輸送到各不同場所。對於辦公大樓、廠房等大型空間之建築物多採中央空調系統。



型冷氣機能源效率比值標準對照表

單體式	低於 2.3kW	2.71
	2.3kW~4.1kW	2.77
	高於 4.1kW	2.60
分離式	4.1kW 以下	2.97(一般型)
		2.77(變頻式)
	高於 4.1kW	2.73

性能係數 COP 與能源效率比值 EER

能源效率比值標準(energy efficiency rating, energy efficiency ratio, EER)

EER 有三種單位：(Btu/hr/W)，(kcal/hr/W)，(Btu/hr/W))

COP(kW/kW)

1 Btu/hr = 0.293 W，1 W=3.412 Btu/hr

1 W/W= 3.412 Btu/hr/W

1 kcal/h= 1.163 W，1 W=0.860 kcal/hr

1 W/W=0.860 kcal/hr

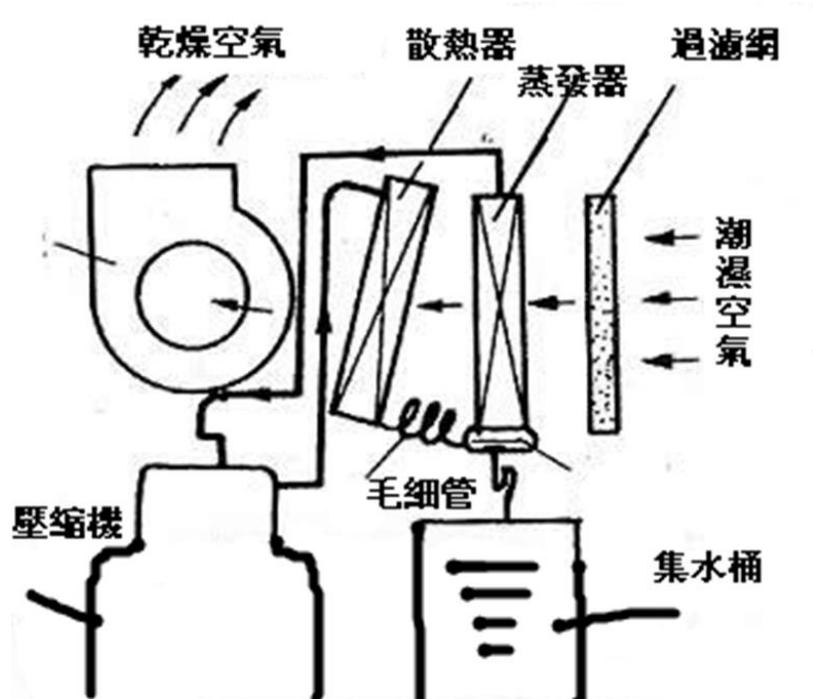
EER 2.77 W/W = 2.38 kcal/hr/W = 9.45 Btu/hr/W

CSPF是『Cooling Seasonal Performance Factor』的縮寫。中文稱為『冷氣季節性能因數』，以國內冷氣使用季節的外氣溫度條件，測試計算冷氣機滿足建築物所需的製冷量與其對應的耗電量，精確評估空調機的能源效率。並自中華民國一百零五年一月一生效。

(4.4)、除濕機

所有的冷氣機都有除濕的功能。

除濕機則無冷氣機功能。



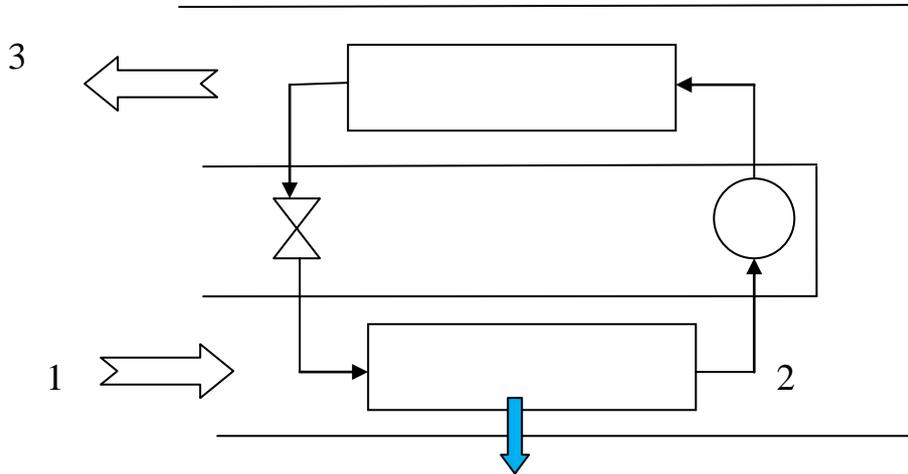
專用除濕機



除濕機性能分析

1 → 2 : 降溫除濕

2 → 3 : 增溫降濕



1 → 2 : 降溫除濕

已知入口空氣的濕度與溫度 T_1 , ω_1 。

$$\dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_1 = \dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_2 + \dot{m}_l$$

凝結的水量為

$$\dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2) = \dot{m}_l$$

由能量平衡可得

$$Q_L + \dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_a \omega_1 h_{w1} = \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_a \omega_2 h_{w2} + \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2) h_l$$

$$Q_L = \dot{m}_a c_{pa} (T_{a2} - T_{a1}) + \dot{m}_a c_{pw} (\omega_2 T_{w2} - \omega_1 T_{w1}) + \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2) h_l$$

2 → 3 : 增溫降濕

$$\omega_2 = \omega_3$$

$$Q_H + \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_a \omega_2 h_{w2} = \dot{m}_a h_{a3} + \dot{m}_a \omega_3 h_{w3}$$

$$Q_H = \dot{m}_a c_{pa} (T_{a3} - T_{a2}) + \dot{m}_a \omega_3 c_{pw} (T_{w3} - T_{w2}) = \dot{m}_a (c_{pa} + \omega_3 c_{pw}) (T_3 - T_2)$$

$$Q_H = Q_L + W_C = Q_L \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$Q_L \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = \dot{m}_a (c_{pa} + \omega_3 c_{pw}) (T_3 - T_2)$$

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_L}{\dot{m}_a(c_{pa} + \omega_3 c_{pw})} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

例：空氣的溫度為 35°C，相對溼度 60%，大氣壓力為 101.3 kPa。空氣流經除濕機的蒸發器後，溫度下降為 20°C。若除濕機的 COP 為 3.0，請計算流經除濕機後空氣的相對溼度與溫度。

作業 4.3：除濕機入口空氣的溫度為 35°C，相對溼度 70%，壓力為 101.3 kPa。空氣的流量為 100 LPM，空氣流經除濕機的蒸發器後，溫度下降為 15°C。冷氣機以 R410a 為冷媒，已知高壓為 3000kPa， $T_L=0^\circ\text{C}$ ，壓縮機效率為 85%，請計算除濕機出口的相對溼度與溫度。。

房間內的濕度變化

$$\frac{d(m_a \omega)}{dt} = m_a \frac{d\omega}{dt} = \dot{m}_a (\omega - \omega_e)$$

$$\frac{d\omega}{dt} - \frac{\dot{m}_a}{m_a} (\omega - \omega_e) = 0$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\dot{m}_a}{m_a}, \quad \Omega = \omega - \omega_e$$

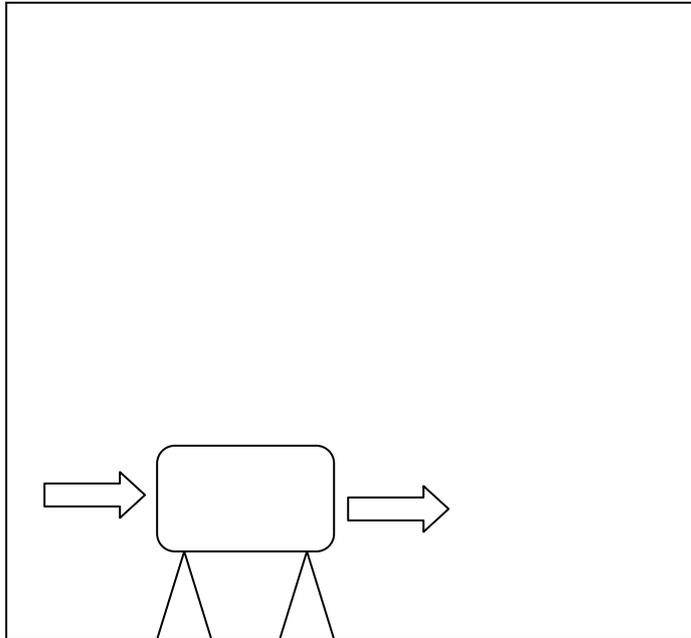
$$\frac{d\Omega}{dt} + \frac{\Omega}{\tau} = 0$$

$$\Omega = \Omega_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\Omega_e = \Omega_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

$$\dot{m}_l = \dot{m}_a (\omega - \omega_e)$$

$$m_l = \int \dot{m}_l dt = \dot{m}_a \Omega_0 (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})$$

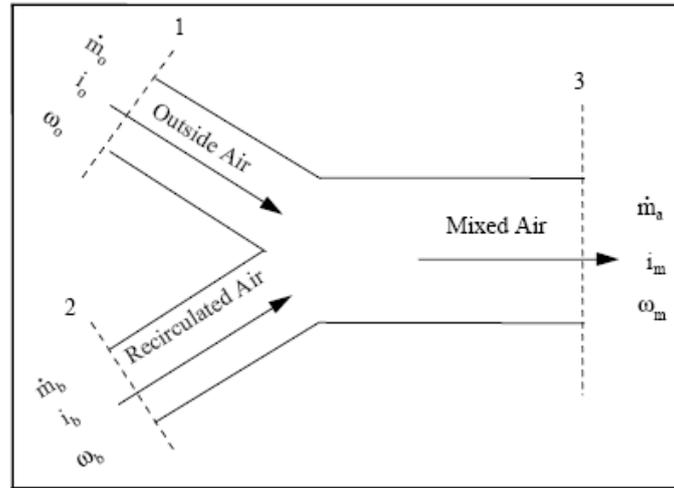


例：有一間教室，長 15m，寬 10m，高 4m，室內空氣的溫度為 35°C，相對溼度 60%，壓力為 101.3 kPa。今以除濕機來除濕，空氣進入蒸發器後，溫度下降為 20°C。若除濕機的容量為 2 噸，COP 為 3.0，請計算需多少時間可以將教室的溼度降為 30%？

(4.5)、絕熱混合過程

兩股不同溫度與濕度的空氣混合，計算混合後的溫度與濕度。

冷氣的外氣與內部循環氣混合的過程。



絕熱混合過程

管路內空氣質量平衡

$$\dot{m}_{ma} = \dot{m}_{ea} + \dot{m}_{fa}$$

其中 \dot{m}_{ma} 為混合後的空氣流量， \dot{m}_{fa} 為由外界補充的空氣流量， \dot{m}_{ea} 為由回流的空氣量。

管路內水蒸氣質量平衡

$$\dot{m}_{ma} \omega_m = \dot{m}_{ea} \omega_e + \dot{m}_{fa} \omega_a$$

其中 $\dot{m}_{ma} \omega_m$ 為混合後空氣所含有的水蒸氣流量， $\dot{m}_{fa} \omega_a$ 為由外界補充空氣所帶進來的水蒸氣流量， $\dot{m}_{ea} \omega_e$ 為回流空氣所帶進來的水蒸氣量。

管路內能量平衡

$$\dot{m}_{ma} h_{ma} + \dot{m}_{ma} \omega_m h_{mw} = \dot{m}_{fa} h_a + \dot{m}_{fa} \omega_a h_{aw} + \dot{m}_{ea} h_{ea} + \dot{m}_{ea} \omega_e h_{ew} \quad (7)$$

其中 $\dot{m}_{ma} h_{ma} + \dot{m}_{ma} \omega_m h_{mw}$ 為混合後空氣所含有的焓值， $\dot{m}_{fa} h_a + \dot{m}_{fa} \omega_a h_{aw}$ 為由外界補充空氣所帶進來的焓值， $\dot{m}_{ea} h_{ea} + \dot{m}_{ea} \omega_e h_{ew}$ 為回流空氣所帶進來的焓值。

至於回流空氣所佔的比例可定義如下， β 為內部循環回流量的比例，是系統的

重要控制參數。

$$\beta = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_m} = \frac{\dot{m}_{ea}(1 + \omega_e)}{\dot{m}_{ma}(1 + \omega_m)} \approx \frac{\dot{m}_{ea}}{\dot{m}_{ma}} \quad (8)$$

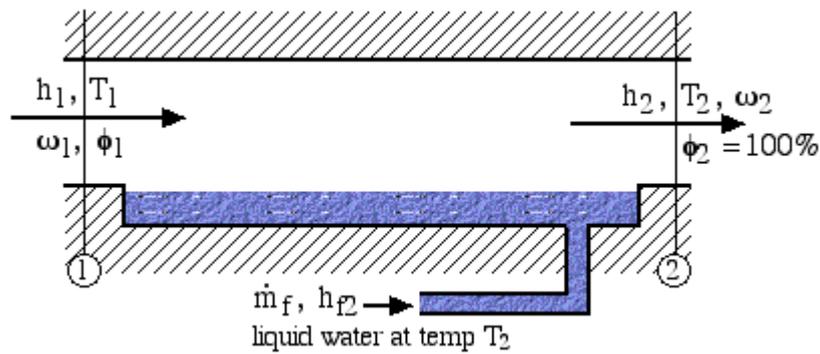
例：戶外空氣的溫度為 35°C，相對溼度 60%，室內空氣的溫度為 25°C，相對溼度 40%，大氣壓力為 101.3 kPa。若外界補充空氣與內部回流空氣的流量為 1:2，請計算混合後的溫度與相對溼度。

例：上題之空氣總流量為 3000 LPM，流經冷氣機的蒸發器後，溫度下降為 20°C。請計算所需冷氣的噸數。

作業 4.4：將兩股空氣混合，一股空氣溫度為 35°C，相對溼度 60%，另一股空氣溫度為 15°C，相對溼度 30%，壓力都是 100 kPa。若混合後的溫度為 25°C，請計算混合後的溼度。

(4.6)、絕熱飽和過程與乾濕球濕度計

未飽和的空氣與水接觸，水會蒸發成水蒸汽，與空氣混合。若空氣與水接觸的時間夠久，則空氣中的水蒸氣會達到飽和狀態。此過程為絕熱，水蒸汽的蒸發熱需由空氣提供，故空氣的溫度會下降。



絕熱飽和過程

由水蒸氣的質量平衡可得

$$\dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_l = \dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_2$$

蒸發的水量為

$$\dot{m}_l = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$

若水分蒸發所吸收的熱量由空氣來提供，由能量平衡可得

$$\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_a \omega_1 h_{w1} + \dot{m}_l h_l = \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_a \omega_2 h_{w2}$$

$$h_{a1} + \omega_1 h_{w1} + (\omega_2 - \omega_1) h_l = h_{a2} + \omega_2 h_{w2}$$

入口的絕對濕度由入口溫度及相對濕度可知

$$\omega_1 = 0.622 \frac{\phi_1 P_{v1}}{P - \phi_1 P_{v1}}$$

出口已達飽和，相對濕度為 100%。

$$\omega_2 = 0.622 \frac{P_{v2}}{P - P_{v2}}$$

若已知入口的相對濕度，可計算出口的温度。

例：戶外空氣的溫度為 35°C，相對溼度 60%，大氣壓力為 101.3 kPa。經過絕熱飽和過程後，請計算出口溫度與絕對濕度。

若已知出口溫度，則可計算入口的相對濕度。可利用此程序來量測空氣的相對溼度。

$$\omega_2(h_{w2} - h_f) = c_{pa}(T_{a1} - T_{a2}) + \omega_1(h_{w1} - h_f)$$

$$\omega_2 = \frac{c_{pa}(T_{a1} - T_{a2}) + \omega_1(h_{w1} - h_f)}{h_{w2} - h_f}$$

例：戶外空氣的溫度為 35°C，大氣壓力為 101.3 kPa。經過絕熱飽和過程後，溫度降為 27°C，請計算入口相對濕度。

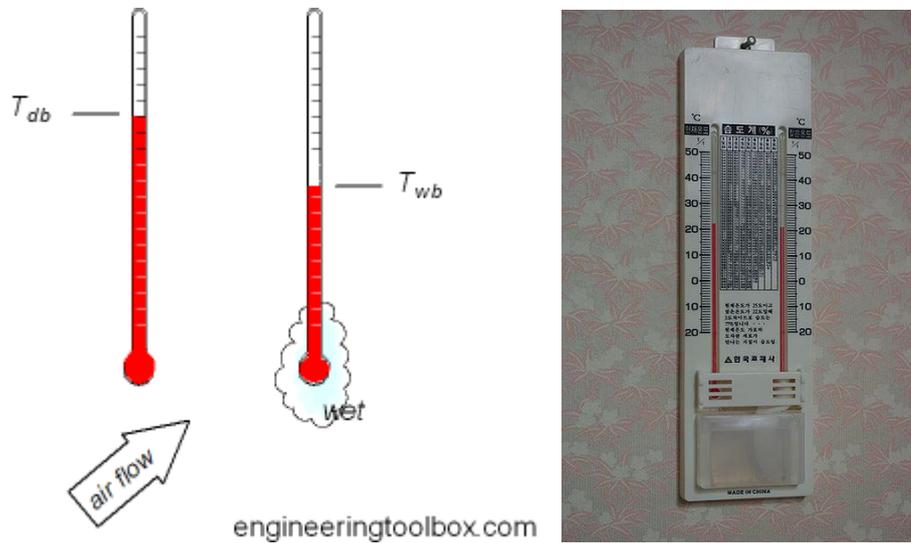
若水分蒸發所吸收的熱量部分由空氣來提供，部分由水體來提供，由能量平衡可得

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_a \omega_1 - \dot{m}_a \omega_2$$

$$Mc \frac{dT}{dt} + u \frac{dM}{dt} = \dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_a \omega_1 h_{w1} - \dot{m}_a h_{a2} - \dot{m}_a \omega_2 h_{w2}$$

(4.7). 乾球溫度與濕球溫度

乾球溫度即為大氣溫度，濕球溫度即為絕熱飽和溫度，若已知乾球溫度與濕球溫度，即可知道大氣濕度，此為乾濕球濕度計。



乾球溫度，濕球溫度，與乾濕球濕度計

乾濕球濕度表 Psychrometric Chart

由已知的乾球溫度與濕球溫度，可直接查表，找出所對應的相對濕度。

例：乾球溫度為 30°C，濕球溫度 20°C，請計算相對濕度。

例：乾球溫度為 30°C，相對濕度 60%，請計算濕球溫度。

例：濕球溫度為 30°C，相對濕度 60%，請計算乾球溫度。

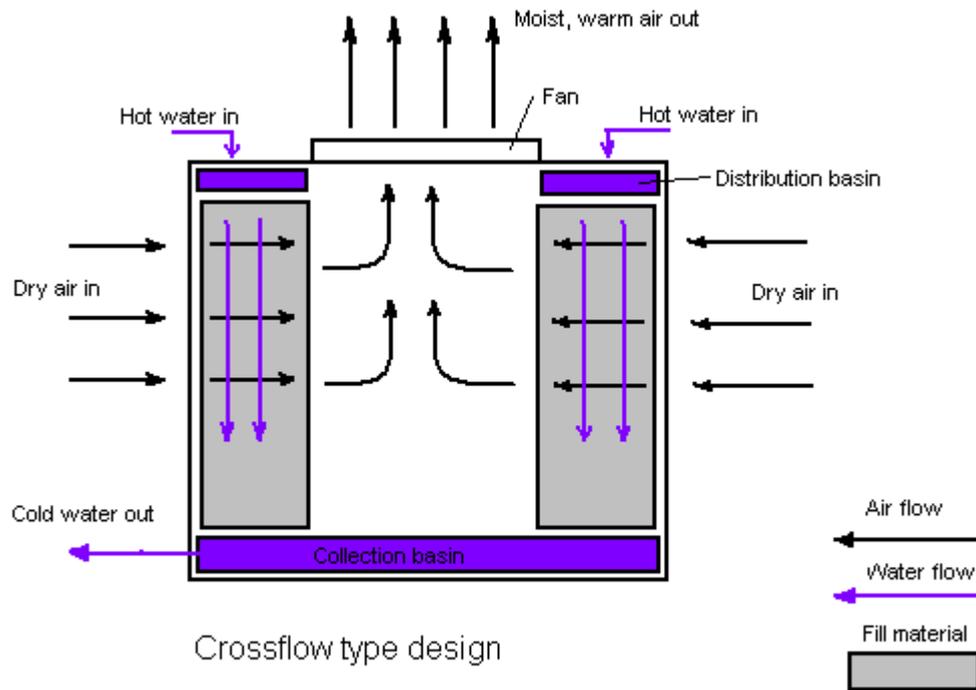
例：濕球溫度為 20°C，相對濕度 40%，請計算乾球溫度。

(4.8)、冷卻水塔

利用水氣蒸發所吸收的蒸發潛熱來進行冷卻，常用於中央空調系統，大型動力廠。



冷卻水塔的應用



冷卻水塔的原理

空氣側入口： $\dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_1$

空氣側出口： $\dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_2$

水側入口： \dot{m}_{l1}

水側出口： \dot{m}_{l2}

質量平衡：

$$\dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_{l1} = \dot{m}_a + \dot{m}_a \omega_2 + \dot{m}_{l2}$$

$$\dot{m}_{l1} - \dot{m}_{l2} = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$

水量的損失量為空氣中水蒸汽的增加量，必須補充水量。

$$\dot{m}_{ls} = \dot{m}_{l1} - \dot{m}_{l2}$$

能量平衡：

$$\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_a \omega_1 h_{w1} + \dot{m}_{l1} h_{l1} + \dot{m}_{ls} h_{ls} = \dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_a \omega_2 h_{w2} + \dot{m}_{l2} h_{l2}$$

已知條件： ω_1 ， T_{a1} ， \dot{m}_{l1} ， T_{l1}

未知參數： ω_2 ， T_{a2} ， \dot{m}_{l2} ， T_{l2} ， \dot{m}_a

只有兩個方程式，必須設定三個條件，才能解兩個未知數。

可計算冷卻水塔的冷卻量及補充水量。

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{l1} c_l (T_{l1} - T_{l2})$$

例：已知冷卻水塔的冷卻水流量為 1 kg/sec。冷卻水入口溫度為 40°C，出口溫度為 35°C，而冷卻水塔的入口空氣乾球與濕球溫度分別為 30°C 與 20°C。而出口空氣為 100 kPa，36°C，相對濕度 100%。

(1). 請計算冷卻水塔的空氣流量。

(2). 請計算冷卻水塔補充的水量。

例：已知冷卻水塔的冷卻水流量為 1 kg/sec。冷卻水入口溫度為 30°C，出口溫度為 40°C，而冷卻水塔的入口空氣乾球與濕球溫度分別為 30°C 與 20°C。而出口空氣為 100 kPa，36°C，相對濕度 100%。

(1). 請計算冷卻水塔的空氣流量。

(2). 請計算冷卻水塔補充的水量。

若已知空氣與水的出口與入口溫度，可計算水的損失量，空氣所帶走的熱量，以及冷卻水塔的效率。

$$\eta = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{T_{a1} - T_{aw}}$$

作業 4.6：繼續作業 4.5 的題目。此空調系統的主機採用兩段式壓縮式冷氣機，冷媒為 R-134a。已知蒸發室溫度為 -12°C ，中間直接接觸式熱交換器的壓力為 5 bar，而冷凝器的壓力為 16 bar。假設兩具壓縮機的效率均為 0.85。

- (1). 請計算蒸發室冷媒的流量。
 - (2). 請計算冷凝器冷媒的流量。
 - (3). 請計算兩具壓縮機的功率。
 - (4). 冷凝器的冷媒是利用冷卻水來冷卻，已知冷凝器的熱交換器中冷卻水入口溫度為 30°C ，出口溫度為 40°C ，請計算冷卻水流量。
-

作業 4.7：繼續作業 4.6 的題目。此冷卻水則再用冷卻水塔來冷卻。假設管路中沒有熱損失，而冷卻水塔的入口空氣為大氣，即壓力為 100kPa，乾球與濕球溫度分別為 30°C 與 20°C 。而出口空氣為 100 kPa， 36°C ，相對濕度 100%。

- (1). 請計算冷卻水塔的空氣流量。
 - (2). 請計算冷卻水塔補充的水量。
-