

# 第八屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA8 -277

作品名稱：單面開口空氣對流模式分析與應用

姓名：梁楷鈞

關鍵詞：通風、對流、浮力效應

## 摘要

本研究探討單面開口的空氣對流模式與通風換氣的相互關係。影響通風換氣的條件包括熱源累積的速率、室內外溫度、開口位置與型態、環境風速與風向等等，目前工程上的通風研究多建立在雙邊開口的通風條件上，但單面開口條件下會產生和雙開口不一樣的空氣運動模式，譬如冷熱空氣不均產生的浮力效應及空氣壓縮所產生的振盪。

維持良好室內空氣品質必須使空氣產生對流，但在現實生活裡，通風狀況常常不如預期；隔音與氣密性的高度要求，更造成屋內換氣率不足。目前全球因應暖化推動節能減碳，被動式節能的自然通風再度受到重視。現實生活中門窗開口無法配合最佳通風條件的狀況比比皆是，本實驗設計一系列的溫度及風洞實驗，分析單面開口的空氣對流模式，尋求單面開口在自然通風條件下如何獲得最佳通風效果，提出理想的單面通風型態與設計的建議。

## 壹、研究動機

維持良好室內空氣品質必須空氣能對流，讓室外新鮮空氣替換室內汙濁空氣，空調雖可改善溫濕度條件，但因密閉循環，容易累積二氧化碳與廢氣，無法改善空氣品質。從建築物理與綠色建築的文獻中，接觸到正負壓通風原理及冷熱空氣對流與浮力效應的關係。

我的高一地科課程研究報告曾探討都市微氣候及建築風場的關係，發現都市風場時常微弱紊亂，建築也因為過度密集，開口的設計限制重重。建築物的門、窗及各式開口是交換空氣的管道，開口的方式與位置會影響通風效能，但現實生活中開口狀況並無法配合最佳通風條件。這是現實生活中經常出現的狀況，尤其在擁擠的都市建築環境，無法雙邊開口的狀況比比皆是，為了配合私密性及隔音性，房門又必須緊閉，嚴重影響通風。

物理課程提到熱力學與空氣動力學，發現可應用於對流通風的研究。我希望探討開口與通風的關係，特別是單面開口在風壓與浮力通風模式下的通風狀況，並借研究結果數據建議開口設計方式，研究利用自然通風的可行性，改善室內空氣品質、節約空調耗能。

## 貳、研究目的

- 空間通風模式的分析與整理
- 分析單面開口型式、位置與自然通風的關係
- 探討環境風場與通風效應的關係
- 單面通風空氣對流模式的深入分析
- 建立通風模式的分析方法及可比較通風效率的數據
- 模擬單面通風的理想型態
- 單面開口對流通風的理想型態的設計與建議

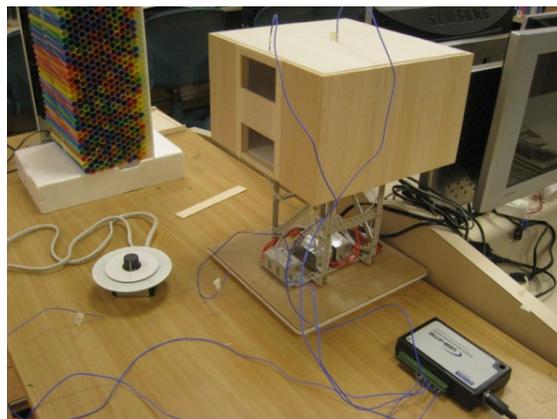
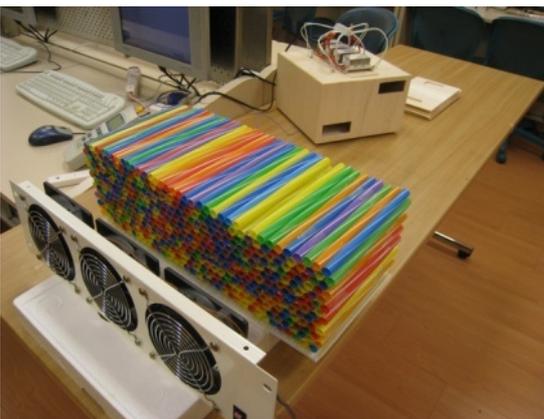
### 參、研究設備及器材

- 風扇（模擬風場）及吸管（穩定風場）
- 溫度計及熱線式風速計兩用儀（測量溫度及風速變化）
- 8 Channel 紀錄器（測量及記錄溫度數據變化）
- 煙霧產生器（煙流實驗的煙霧製造）
- 鹵素燈泡（模擬熱源）
- 遙控開關及計時器
- 巴沙木、珍珠板、壓克力（製作實驗模型）
- 電腦、分析軟體（處理數據）



圖（ 1 ）記憶式溫度計及可兼溫度計的熱線式風速計

圖（ 2 ）8 Channel 溫度紀錄儀



圖（ 3 ）模型與儀器

# 肆、研究過程與方法

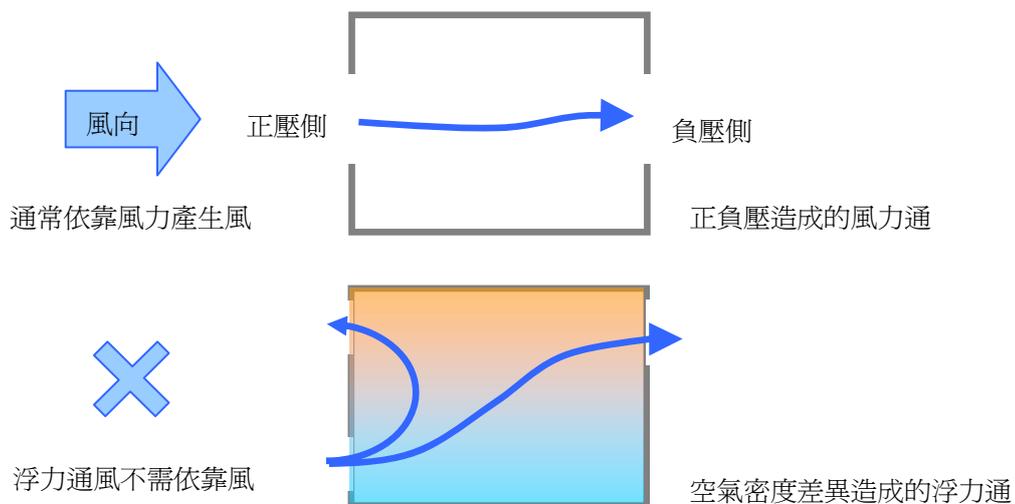
## 一、問題探討

通風是指風的流動與交換，風的有效流動可讓冷熱的交流加快，快速降溫。通風的型態主要分為風壓通風（風力通風）與浮力通風（重力通風）。

典型的通風為風壓通風，風壓通風是依靠建築物內外的氣壓差異所造成的空氣流動，但理想的狀況必須讓風穿越兩個以上的開口。風壓通風可藉由自然或人為的方式，製造開口的正負壓落差，讓風從正壓往負壓處流動。建築的迎風面與背風面開口就是因為風壓不同，所以風會在兩個開口間流動。

而浮力通風則是依靠冷空氣與熱空氣的對流，也有人稱之為重力通風。根據熱的定律，任何環境若有溫差，一定會有熱交換的狀況產生，熱的地方會降溫，冷的地方會增溫，即使沒有外部風壓的情況，因為冷熱空氣重量不同，冷熱也會交流。熱空氣上升，冷空氣下沉，由於冷與熱空氣產生的空氣對流所引發的效應稱之為浮力通風。

但不管那一種通風方式，都一定要有空氣進入與排出的管道。我們從文獻中得知，利用風壓通風時進入與排出最好是在空間的相對側，而浮力通風則最好是在最低與最高處，但現實生活常遇到單面或對稱的開窗的狀況，我們認為浮力通風應該可以有效改善室內通風，也就是開口或窗戶，應該設計高低差，讓室內利用浮力通風原理快速排出蓄熱，但我們看到目前的建築環境，似乎很少運用高低差設計的窗戶。



圖（ 4 ）風壓通風與浮力通風示意圖

## 二、換氣理論

通風表示空間產生換氣，所以評估通風的狀況，可以從換氣量的知，計算換氣量必須同時考慮產生風力通風的風壓與產生重力通風的浮力壓：

### (一) 風力換氣

迎風面產生正壓，背風面產生負壓，壓力差即可產生換氣效果，依此原理達成之換氣為風力換氣，風力換氣的風壓計算式如下：

$$P_w = \frac{r}{2}(C_1 - C_2)v^2 \quad (\text{N/m}^2)$$

式中：P<sub>w</sub> = 風壓 (N/m<sup>2</sup>)

r = 空氣密度 (Kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>1</sub> = 迎風面之風壓係數

C<sub>2</sub> = 背風面之風壓係數

v = 風速 (m/sec)

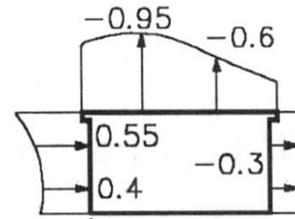


圖 ( 5 ) 平頂建築的風壓分布示意圖

資料來源：今井與藏，《建築物理學概論》

### (二) 重力換氣

熱空氣密度小，懸浮於室內上方，密度較大的冷空氣由下方流入，依此原理達成之換氣為重力換氣，由浮力所引起的壓力差計算式如下：

$$P_g = ghr \left( \frac{t_i - t_o}{T_i} \right) \quad (\text{N/m}^2)$$

式中：P<sub>g</sub> = 壓力差 (N/m<sup>2</sup>)

g = 重力加速度 (9.8m/sec<sup>2</sup>)

h = 進氣口與排氣口的高度差 (m)

r = 空氣密度 (Kg/m<sup>3</sup>)

t<sub>i</sub> = 高處氣溫 (°C)

t<sub>o</sub> = 低處氣溫 (°C)

T<sub>i</sub> = t<sub>i</sub> + 273 (K)

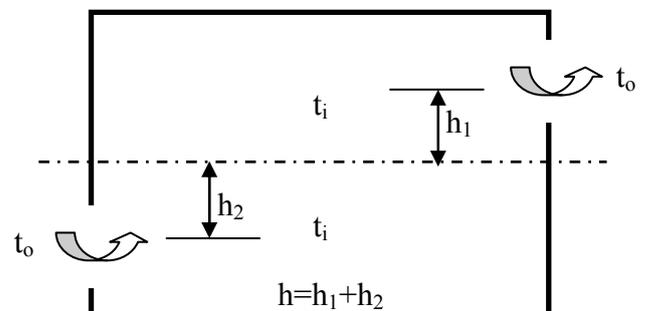


圖 ( 6 ) 重力換氣示意圖

### (三) 換氣量計算

計算換氣量，應同時考慮風力及重力兩因素：

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2Pt}{\rho}} \quad (\text{m}^3/\text{sec})$$

式中：Q = 換氣量 (m<sup>3</sup>/sec)

$\alpha$  = 流量係數

A = 開口部面積 (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = 空氣密度 (Kg/m<sup>3</sup>)

Pt = 視換氣路徑而計算之壓力 (N/m<sup>2</sup>)

式中有關  $\alpha$ 、A、Pt 值的敘述如下

#### (a) Pt 值

Pt 值可以考慮幾種狀況：

僅風力換氣 (風壓通風)：Pt = Pw

僅重力換氣 (浮力通風)：Pt = Pg

兩種換氣同時產生效果時則要看風力換氣與重力換氣兩著是互補還是抵銷，Pt 等於 Pg + Pw，或是 Pt 等於 Pg - Pw，或是 Pt 等於 Pw - Pg，必須依通風環境實際狀況而定，這也是真實世界的複雜狀況。

#### (b) $\alpha$ 值

依進出風口的長寬比、形狀、開口細部和與排列會有不同的值，這部分已經有實驗數據，可以從建築技術手冊中查知。但複雜的開口還是必須依賴風洞實驗。

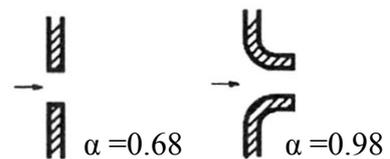


圖 ( 7 ) 不同開口的  $\alpha$  值

資料來源：今井與藏，《建築物理學概論》

#### (c) $\alpha A$ 值

$$\text{單面開口的 } \alpha A = \frac{\alpha_i A_i}{2\sqrt{2}} \quad (\text{m}^2)$$

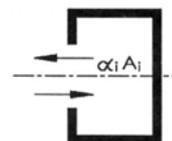


圖 ( 8 ) 單面開口的  $\alpha A$  值

資料來源：今井與藏，《建築物理學概論》

### 三、實驗構想

影響室內通風換氣率的因素，包括室內熱源累積速率、室外風速與方向、窗戶開口的形態、大小、位置與面積比值等等。我們固定熱源，只改變開口與風場。

空氣對流可以帶走熱量，所以可以從溫度變化的情況，也就是降溫的速度來比較通風狀況。先設計一個可測量溫度變化的模型，在模型內部設置溫度感應點，然後依適當的比例設置各種開口形態，模擬各種不同的單面開窗條件，藉實驗探討空氣對流模式及通風效果。

室內熱源以體積小熱量高的鹵素燈泡來模擬，加熱到一定的溫度之後，關閉燈泡，量測過程中溫度的變化，依溫度變化的狀況判定通風的狀況。我們先用比較小的模型簡單進行一系列實驗，分析實驗數據，藉以瞭解風壓風力通風與浮力重力通風，驗證基本通風原理及縮尺模型實驗的可行性，然後開始正式實驗模型的製作。

### 四、第一階段模型：

#### (一) 第一階段模型製作

我們用俗稱飛機木的巴沙木，製作房間的模型，初期實驗，須比較風壓與浮力通風，我以模型固定兩側，另外兩側設計為活動式，然後製作各種不同的窗戶開口型態，房間開口也利用巴沙木製作模組化小零件調整高低大小。模型屋的每個面都加厚並設計卡榫，讓保溫性能儘可能不受到影響。

初期模型在底部開細孔固定感溫線，屋頂板裝設四個加熱用的燈泡，我們利用俗稱豆燈的 12V / 35W 鹵素燈泡，豆燈的發熱量夠，相對又比較小，可以減少空氣對流時的阻力。



圖 ( 9 ) 第一階段模型的加熱燈與感溫線

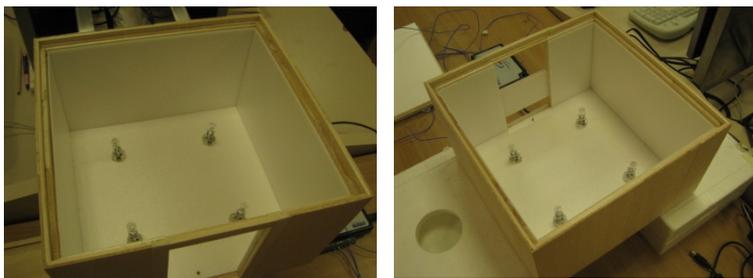


圖 ( 10 ) 第二階段加熱燈移至下面

## (一) 第一階段實驗設計

1、**在模型內部設置溫度感應點**：我們用一台附感溫線的記憶式熱電偶溫度計，感溫線的末端的感溫點延伸到模型內部。溫度計可將讀數存入記憶體，然後匯入到電腦處理，我們設定每五秒鐘記錄一次溫度。



圖(11) 初期實驗環境

2、**模擬無風的狀況**：在有空調的實驗室，並不是真正完全無風的環境，空調系統會產生微弱的空氣對流效果，但風速計無法偵測，但我們固定實驗場地，以控制我們的實驗。

3、**模擬有風的狀況**：使用風扇及整流的蜂巢管模擬風場並用熱線式風速計測量風速，取風速由大到小為 A、B、C、D、E。模擬風場的實驗，都是依這幾個風速為準。為了實驗風速的穩定，我們讓風扇在實驗進行中以設定的轉速持續運轉，但模型在加熱過程中用一個檔板隔開，關燈開始量測時，快速把檔板移開，馬上可得到穩定的風力。

4、**溫度紀錄**：我們用加熱燈加熱模型屋到 40°C，然後關閉加熱燈、開始計時，共計時兩分鐘，記憶式溫度計自動紀錄這段時間的溫度變化。

5、實驗時，室溫相當穩定，約攝氏 21 度上下，我們發現模型加熱後，要快速把溫度降回室溫，有一定的困難度，所以每次實驗之後，我們用風扇直吹模型，降低模型的溫度，然後才進行下一次的實驗。

## 五、第二階段模型：

### (一) 針對第一階段改良的第二階段模型設計

從實驗的過程，我們很快發現，未預熱的模型實驗結果不穩定，實驗過也要讓模型冷卻。經過幾次的改良，發現我們的模型可達到相當的精密程度，這可以從我們同樣條件的實驗，取得數據的一致性看出，如過將窗戶細節設計，製作成縮小模型，應該可以測出窗戶設計是否有利於自然浮力通風。



圖(12) 有中空層的改良模型

經由初期實驗的經驗，我們改進模型，巴沙木牆體加厚，但中間以中空空氣層隔開，內部襯一層白色珍珠板，盡量讓模型內側牆體不要吸入太多熱量。

考慮熱空氣上升，燈泡改裝設在底板，頂板改為活動式，方便實驗及修改，因為上下溫差是浮力通風的重要因子，我在改良模型的開口側上下設感溫點，測量開口上下溫差。

## (二) 針對第一階段改良的第二階段實驗設計

1、改用 8-Channel USB 紀錄儀，可連接 8 條感溫線記錄 8 個點的溫度，並連結電腦直接讀取感溫點數值並顯示於電腦螢幕。藉由即時數據及溫度變化圖快速掌握溫度改變狀況，紀錄頻率可以到一秒四次，數值可匯入其他分析軟體。

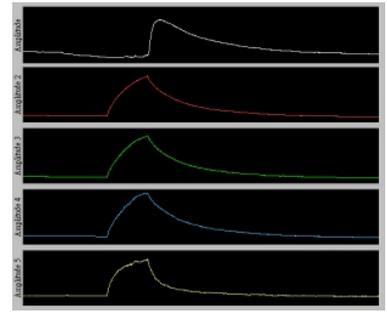


圖 ( 13 ) 即時溫度記錄圖

2、初期實驗，加溫至 40 度，推測感溫線的感溫點會受到燈光直接照射所影響，並不是真正空氣的溫度，經過驗證，的確會發生這個狀況。所以我改進實驗，先加溫至超過 60 度（靠上的感溫點約 65 度），然後關閉加熱燈，再把模型中心的感溫線插入，待穩定後，溫度差不多都從 40 餘度穩定開始下降，這時感測到的才是真正的空氣溫度。

3、依分析的需要，設定每秒紀錄一次數據，從開始加熱到關燈，溫度穩定後開始記錄，記錄 10 分鐘的溫度變化，圖表數據取降到 40 度以下開始往後的 8 分鐘。

下圖為實作範例：

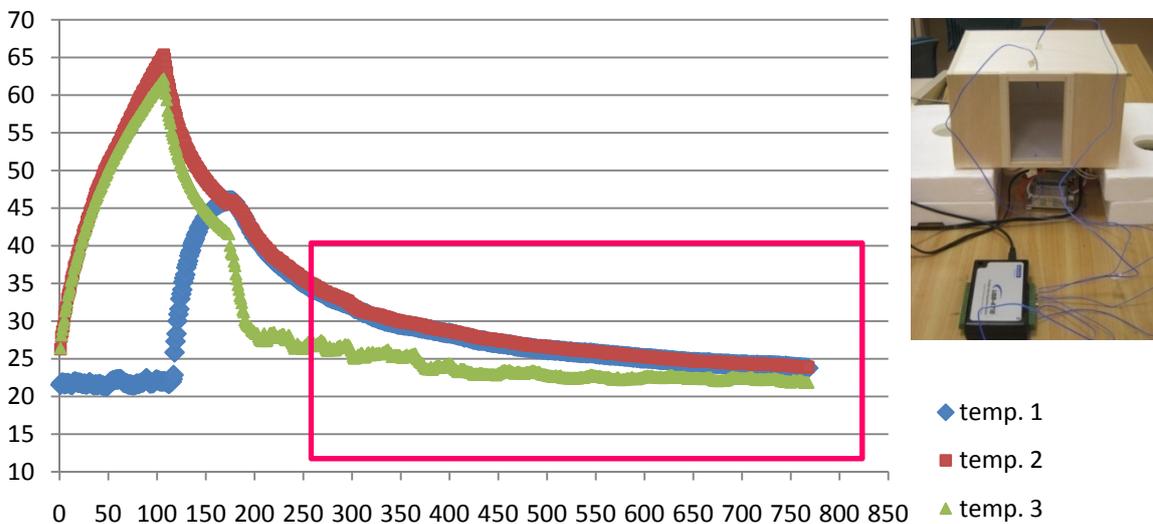


圖 ( 14 ) 溫度實驗過程圖

Temp. 1 是量測室內正中心的溫度，於加溫完成，關燈後才放入

Temp. 2 是量測窗口上方的溫度，於實驗初即放入

Temp. 3 是量測窗口下方的溫度，於實驗初即放入

開始實驗時，我先將窗口密閉，加溫到內部溫度(temp. 2)顯示 65 度左右，關閉燈泡使其自然降溫，並放入中央溫度計。待其顯示溫度接近時，打開窗口，進行通風換氣。

### (三) 第二階段的數據分析

由於前段的加溫曲線，以及兩溫度計剛達到一致的點，溫度起伏不定，我取模型中間的 1 號感溫點在 40 度之後的量測值進行分析。即紅色框框中的藍色曲線。取出 40 度以後的數據，我用 Origin 進行分析。除了畫出圖形，我套入公式

$$y = y_0 + Ae^{R_0x}$$

理想的情況下，高低溫差一樣，而不同實驗應可得到不同的 R 值，並藉此值鑑別窗口通風效率之優劣。

理想的情況下，高低溫差一樣，而不同實驗應可得到不同的 R 值，並藉此值鑑別窗口通風效率之優劣。實驗的重點就是在 R，他的絕對值越大，降溫效果應該就越佳。透過 Origin 的分析加上更精準的模型，就可以得出定量分析的結果。

		Value	Standard Error
B	y0	24.16637	0.03837
	A	14.44377	0.07745
	R0	-0.00755	9.25305E-5

圖 ( 15 ) 「單面全開口」的公式化範例

### (四) 第二階段的實驗步驟

1. 設計溫度實驗裝置，藉助溫度紀錄儀器，以溫度的改變模擬通風效果。
2. 製作保溫性能良好的縮尺房間模型，讓溫度變化盡可能是因為開口條件變化的影響。
3. 在每次實驗時以相同條件，相同模型建立參考數據，原則上以密閉不開口為參考組，並記錄實驗時的環境溫度。
4. 比較單面各種不同開口模式的通風效能，驗證通風原理，並確立影響通風的因子。
5. 製作各式不同之開口的模型，以風壓、溫度及煙流，探討開口型態與通風的關係。
6. 藉由縮小模型與風場相互關係的實驗，探討風場對不同開口的通風效應。

### 九、風的模擬與實驗場地：

我們實驗的場地是有中央空調的房間，室溫約攝氏 21 度，中央空調風量大，風速低，相當穩定，我們以這個空調房間的原始狀態模擬

實驗中無風的環境，有風的風場我們則用工業風扇模擬，參考過去有關通風的實驗，密集排列的吸管可以讓風場穩定，所以我們將吸管堆疊排列成蜂巢狀。

我們用可調式開關，改變風扇的轉速，以獲取實驗設計所需風速。模型和吸管面（出風口）距離 40 公分，以風速計量測，在這個距離，可以得到穩定的風量。

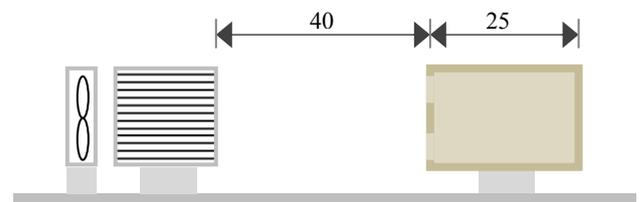


圖 ( 16 ) 模型風場示意圖

## 伍、研究結果

### 一、第一階段實驗分析（使用第一階段實驗模型）：

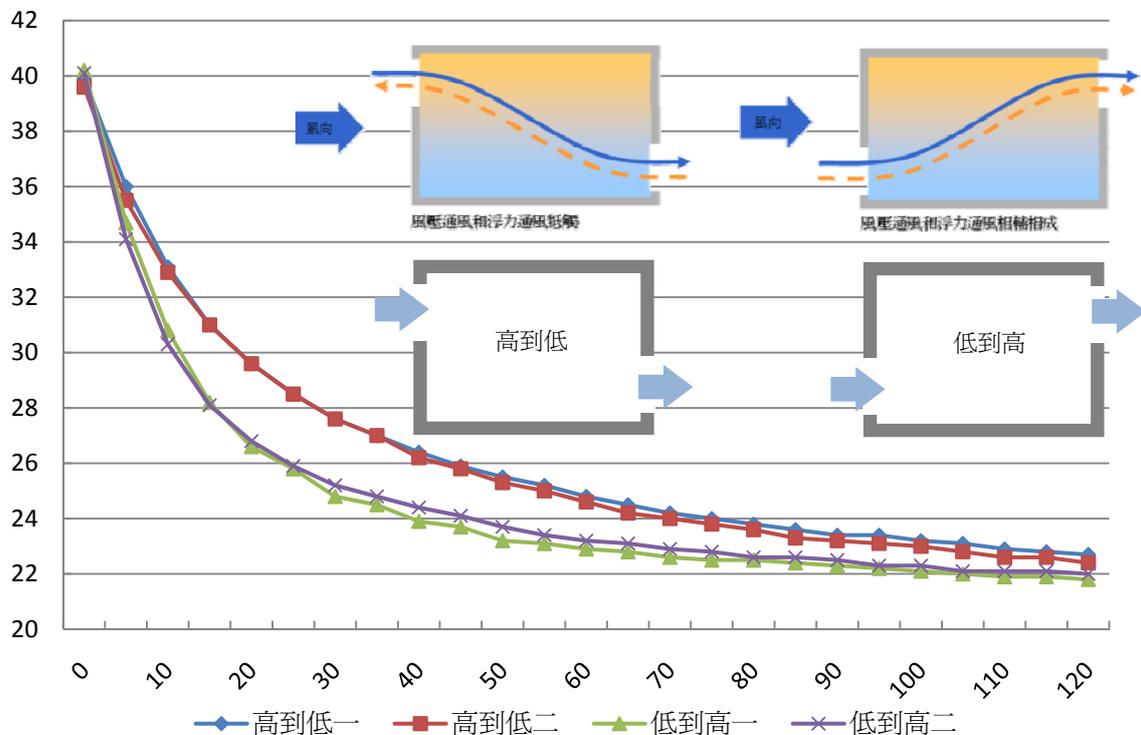
#### （一）、通風模式驗證

利用文獻中已知的結果證明模型的準確性：由於過去書中多半強調雙面開口之通風效果，我就以此為方向切入，先從事結果較易預測的實驗研究，主要是驗證通風模式，藉此確認縮尺模型可以正確呈現一般房間的氣流模式，再以此為基準針對單面窗戶做研究。

- (a)、風壓通風的開口型態與通風效果，以各種不同大小開口測試風壓通風
- (b)、雙邊開口的浮力通風效應，以浮力通風為主軸，但還是維持兩面有開口的形態
- (c)、風壓通風與浮力通風交互影響，探討風壓通風和浮力通風的交互影響

從換氣理論得知，風力通風時，主要影響因素是開口大小（A）及風速（v），浮力通風時開口大小（A）、溫度差（ $t_i - t_o$ ）及開口高低差（h）是影響因子，都可從實驗結果驗證。

舉一代表性的例子，下圖是風壓和浮力通風同時作用的實驗：（所有圖表橫坐標是秒，縱座標是溫度）



數據圖清楚呈現風壓（藍色箭頭表示風向）和浮力通風交互影響的結果，高到低是兩種通風模式衝突的情形，通風效果明顯比低到高的通風效果差

## (二)、單面通風實驗

### (1)、無風狀態下，不同開口模式的實驗

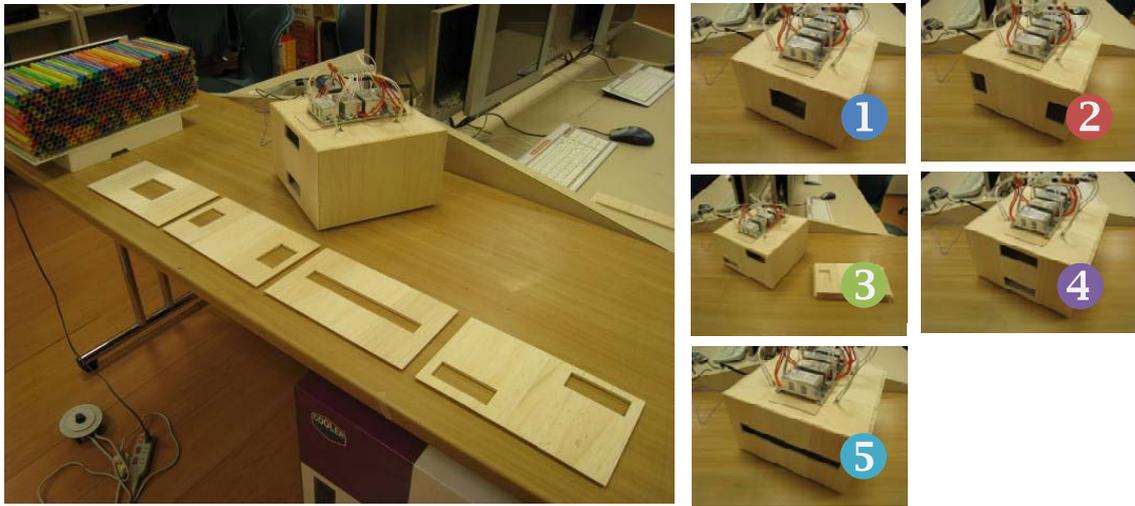
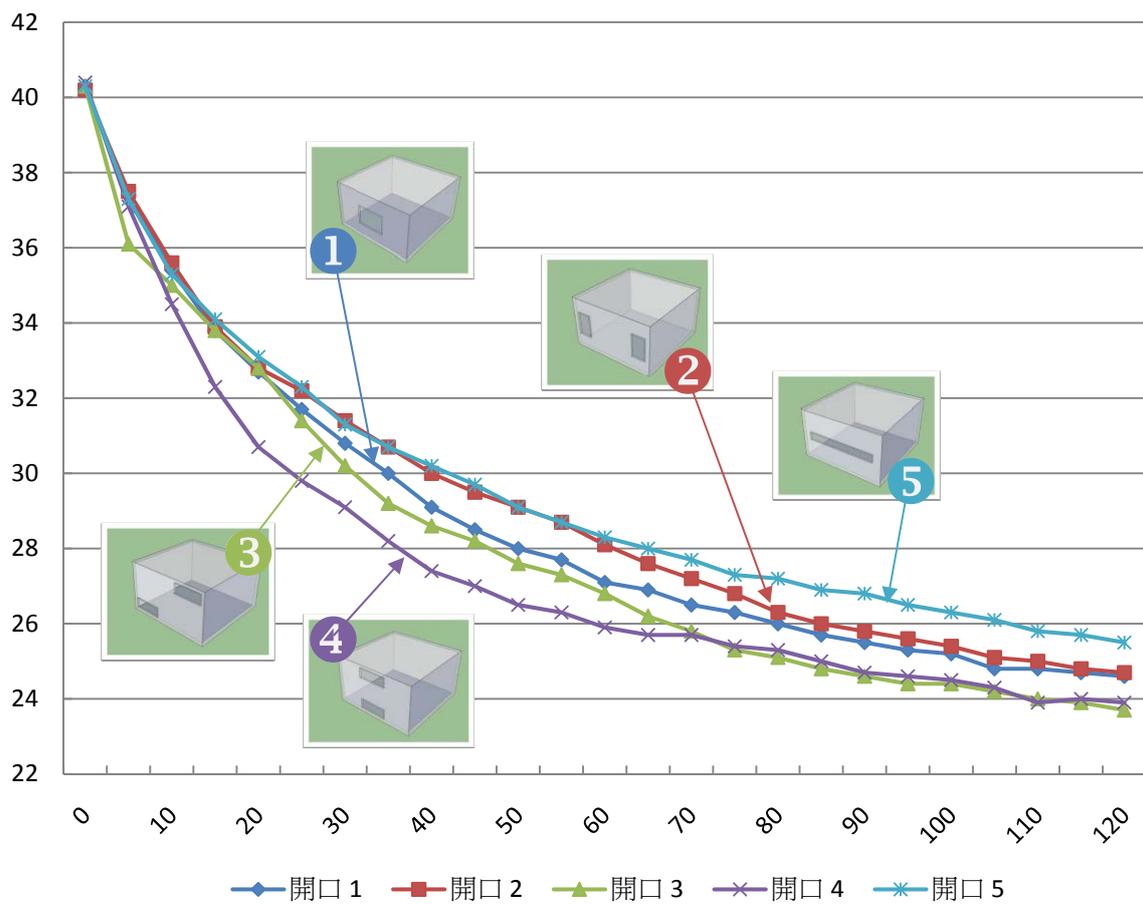
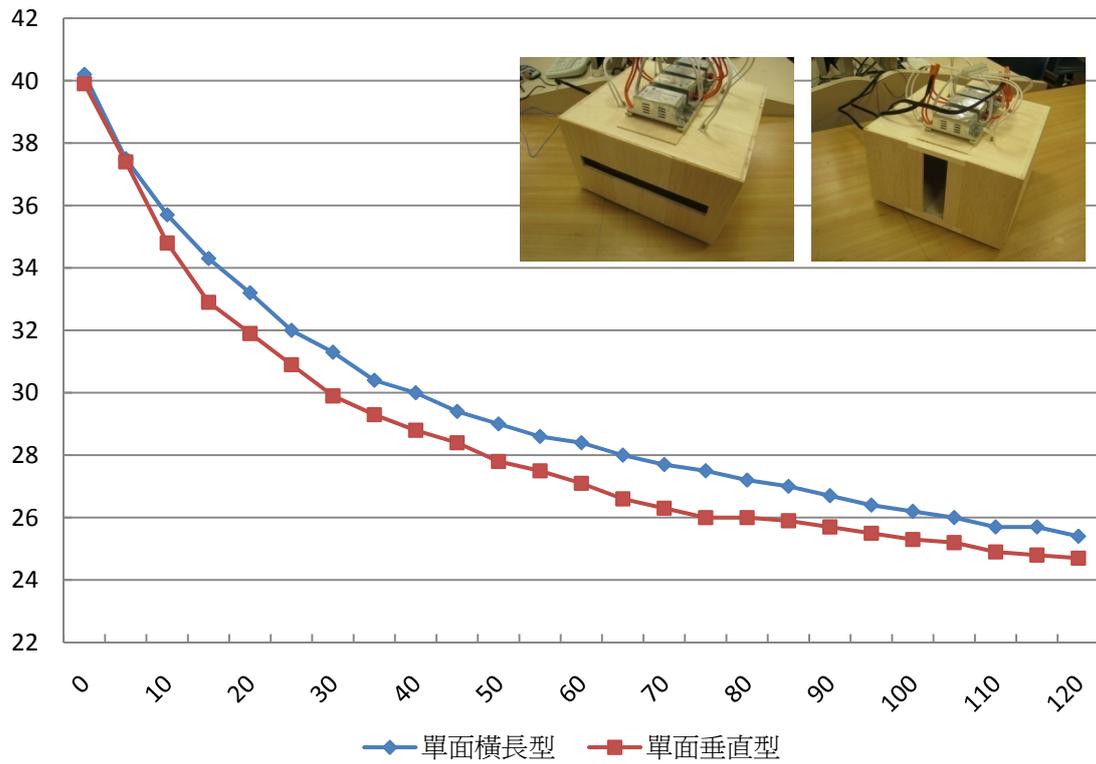


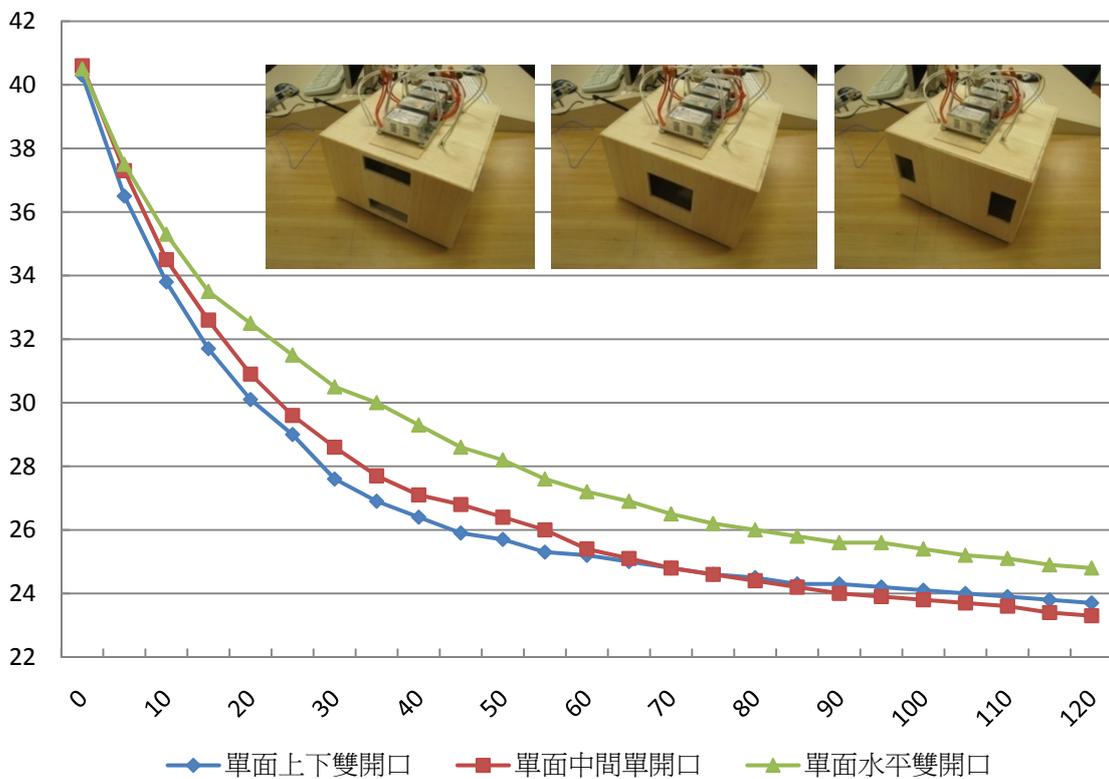
圖 ( 17 ) 五種開口模式的無風實驗



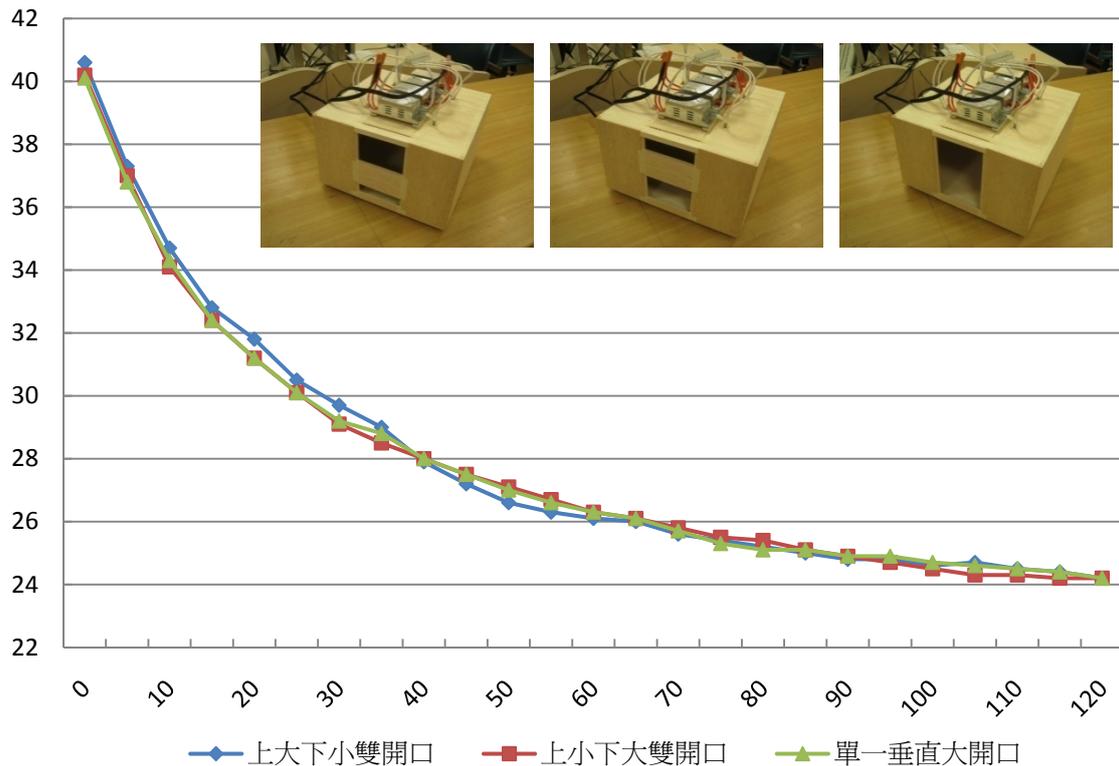
(2)、無風狀態下、同面積，橫長開口與垂直開口之比較



(3)、風直吹、單面上下開口、單面中間雙開口及單面水平雙開口



#### (4)、無風狀態，單面高低上下開口與垂直大開口的比較

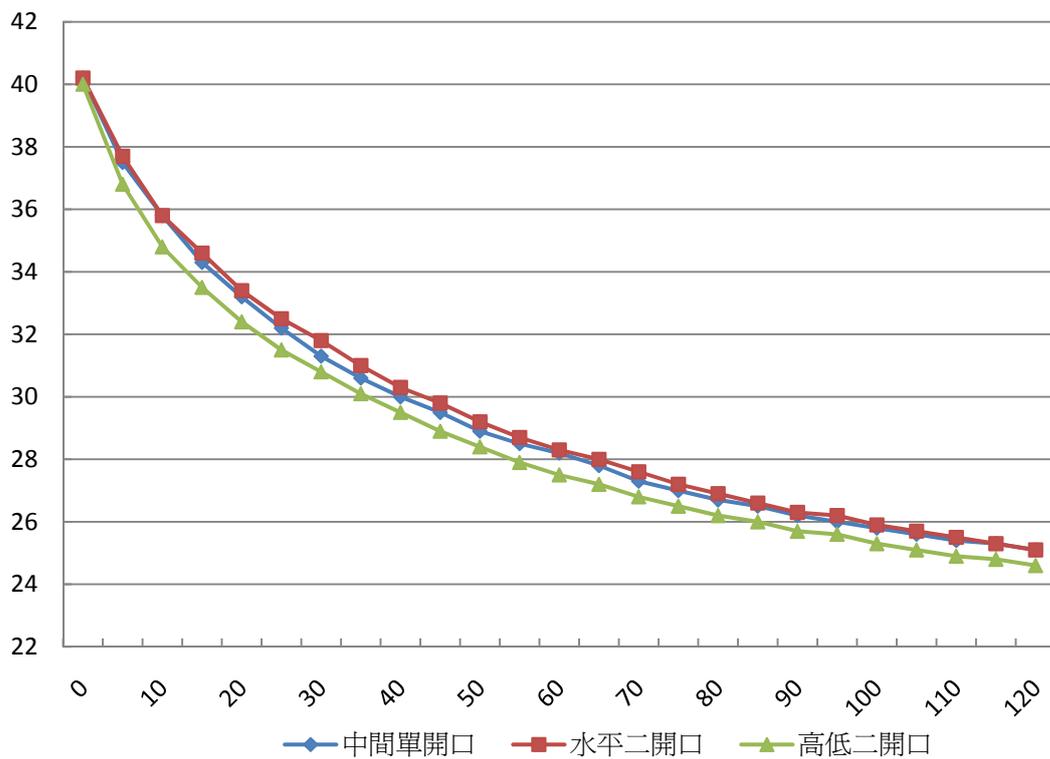


從單面開口通風實驗（1）到實驗（3），可以發現，單面開口的情況下，浮力通風效應是影響通風的重要因子，同面積開口，不論有風或無風，垂直開口一定優於水平開口。兩個開口的情況下，單面上下雙開口的通風效果優於單面水平雙開口。但我從實驗（4）的結果，發現浮力通風作用時，重要的是最高點和最低點開口的高度差，改變中間檔板的位置甚至無檔板（開口面積加大）都不影響通風。

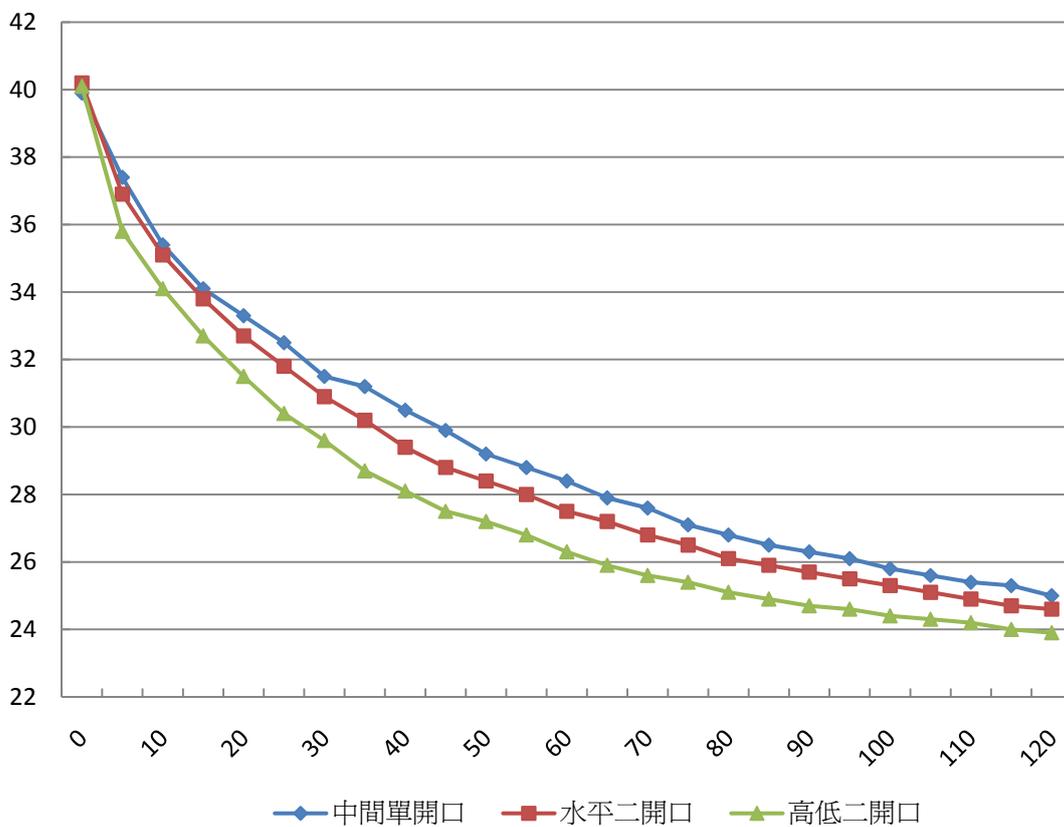
但實驗（4）是無風的情況，我的後續研究，有風壓的情況測試，希望能找出單面開口浮力通風效應在風壓同時作用下的空氣對流變化。

接來的的實驗（5）到實驗（8）是測試不同建築風場對單面通風的影響。大樓風與巷道風都是都市風場常見的現象，我們以平行巷道風為例，發現平行風是十分不利於風壓風力通風的情況，這一點可從實驗（7）看出來，實驗（7）中我發現單面開口，有側向風時，通風反而比無風時差。但浮力通風則比較不受影響，從實驗（8）的結果可以看出完全平行的風最不利於單面通風。所以垂直高低開窗仍然是改善通風的最佳方式，後續實驗會加強不同風場的模擬，找出在特殊風場條件下，單面開口的空氣對流模式。

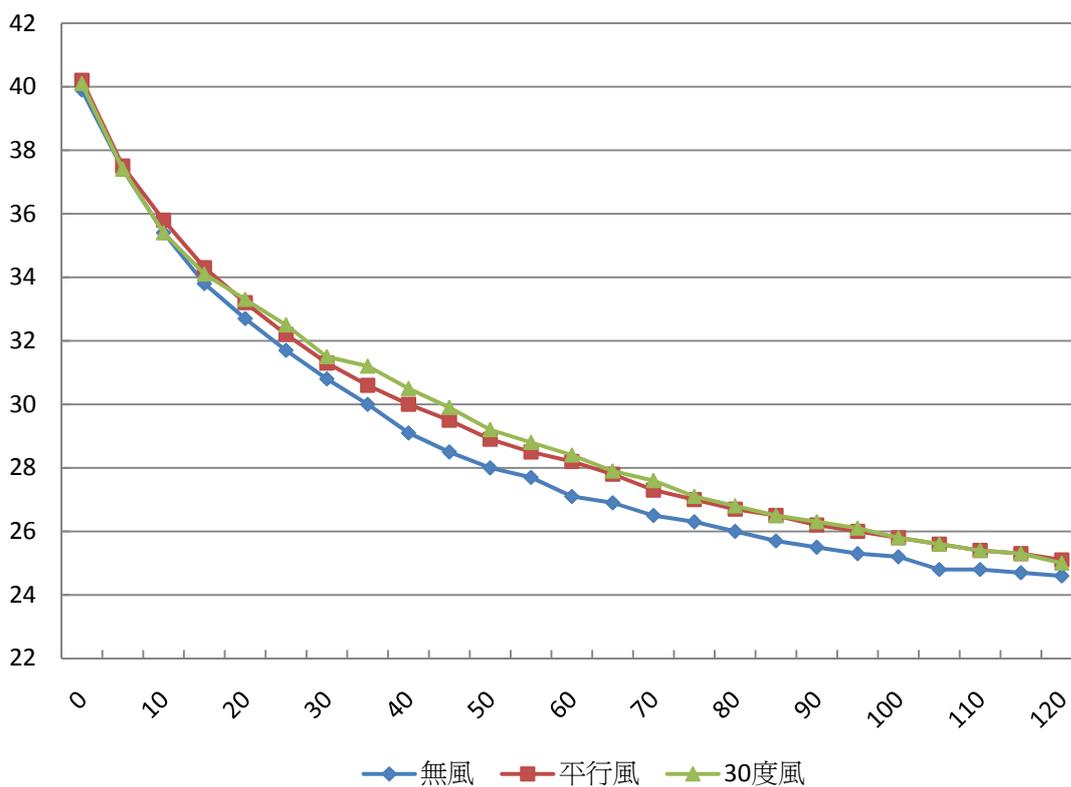
(5)、風與牆面平行的單面通風



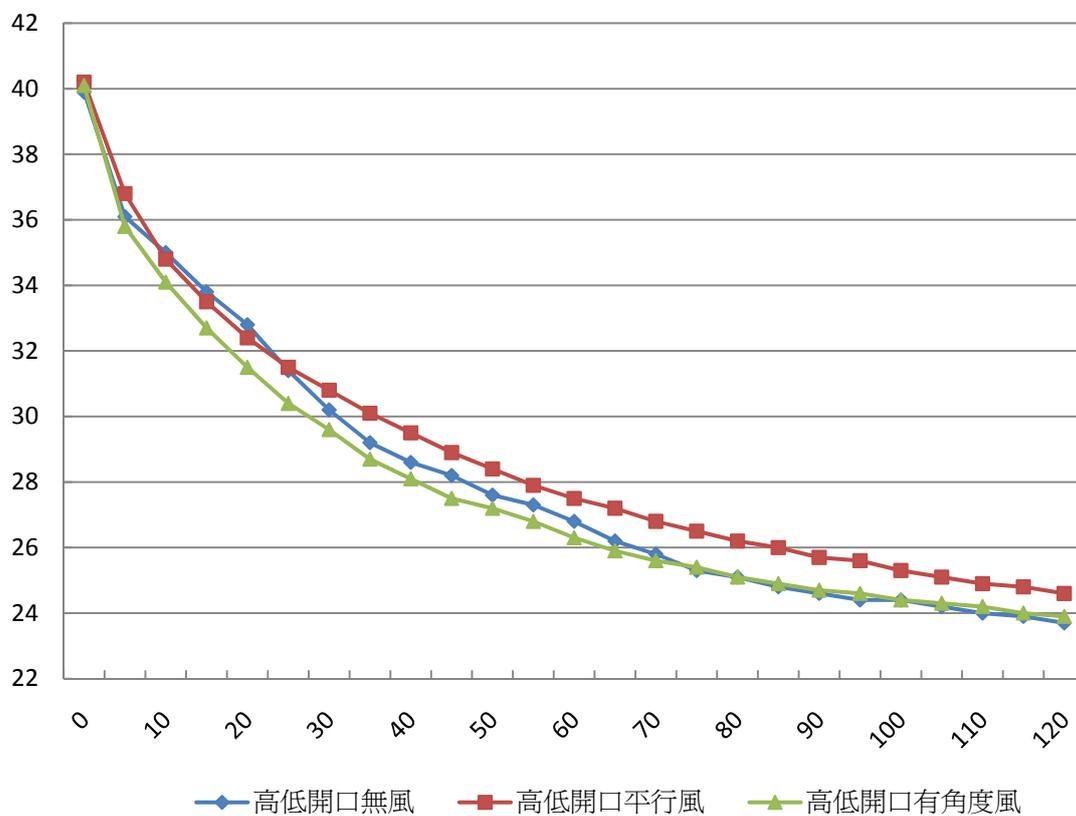
(6)、風與牆面 30° 的單面通風



(7)、比較單一開口在不同風場條件的狀況



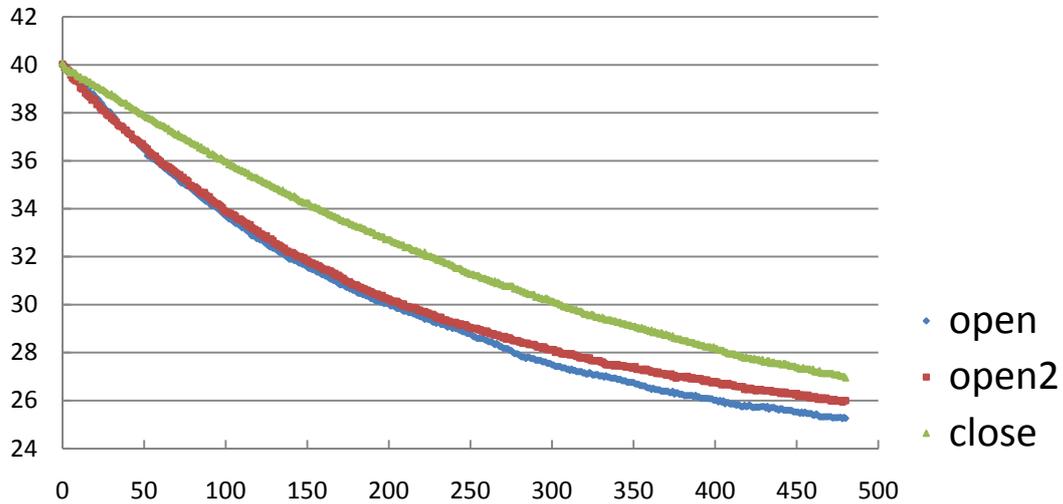
(8)、比較高低開口在不同風場條件的狀況



## 二、第二階段實驗分析

### 一、全密閉及單面開口實驗

對照組：open（全開） open2（上下開） close（全閉）

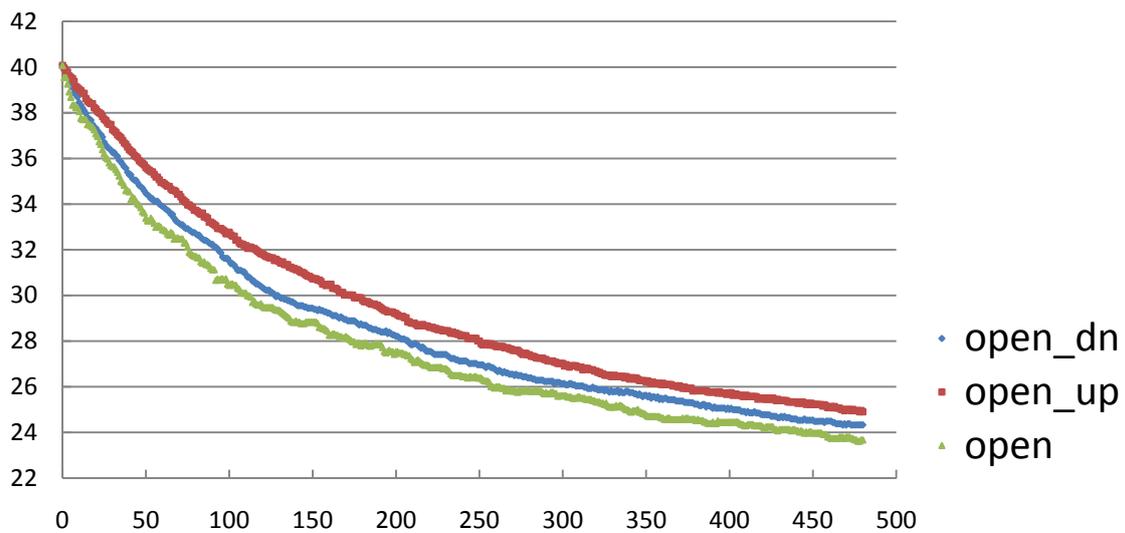


結果：全開最好，但上下開已接近全開的通風效果

### 二、固定開口總面積但上下開口不同大小，

下大上小、下小上大，兩種不同開口方式對單面開口浮力通風的影響

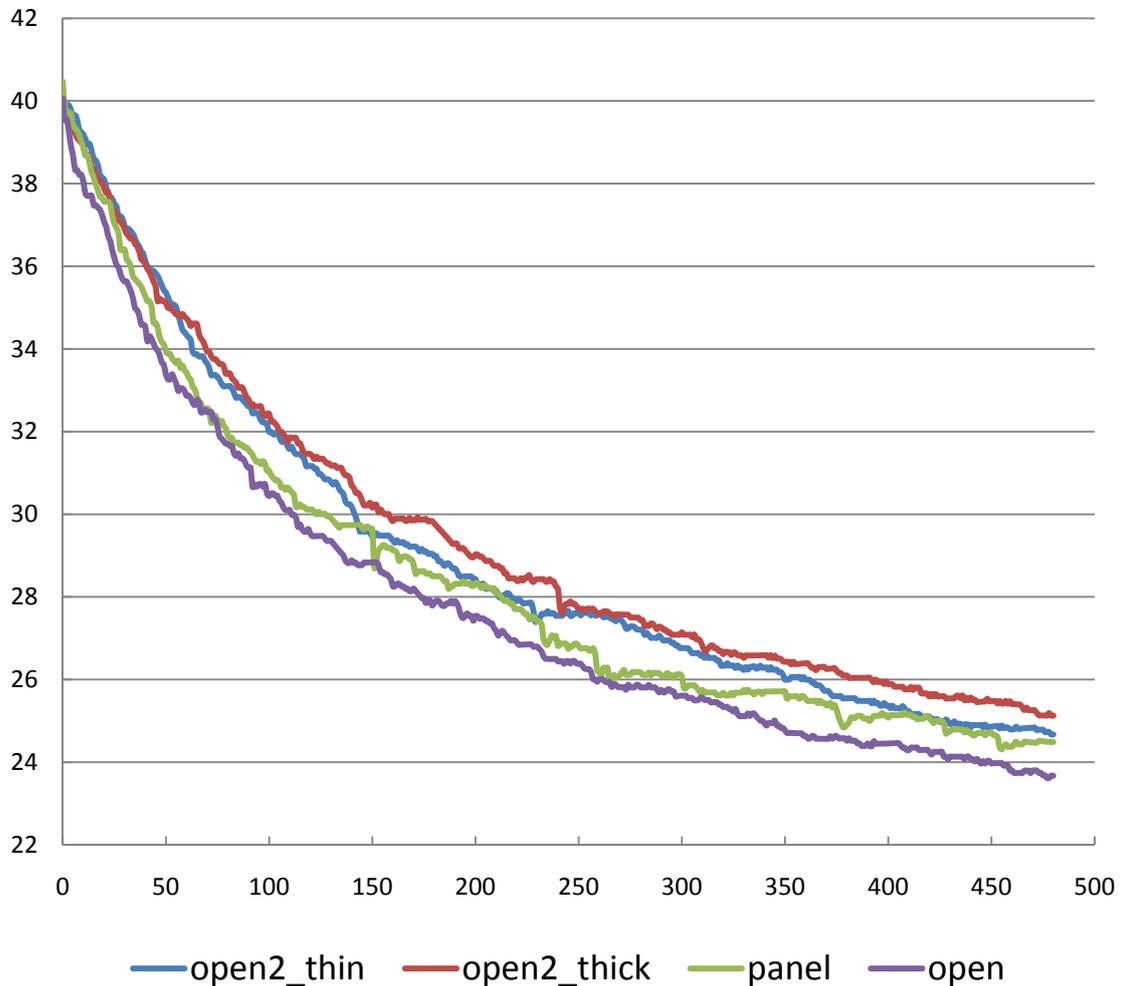
open\_dn（下大上小） open\_up（下小上大） open（全開）



結果：下大上小較佳，也就是氣流入口大於出口比入口小於出口好。

### 三、上下開口固定，中央檔板改變厚度及形狀

open2\_thin (中薄檔板) open2\_thick (中厚檔板) panel (水平中隔板) open (全開)



結果：上下開口的浮力通風，空氣流動效應會影響通風，中間薄檔板通風效果優於厚檔板，厚檔板有加深開口的效果（改變開口  $\alpha$  值），加深開口會降低通風效果，水平中隔板的通風效果無法比全開好，開口構件會影響對流，讓隔板降低風阻是讓對流好的方法之一。

#### 四、不同風速直吹單面開口

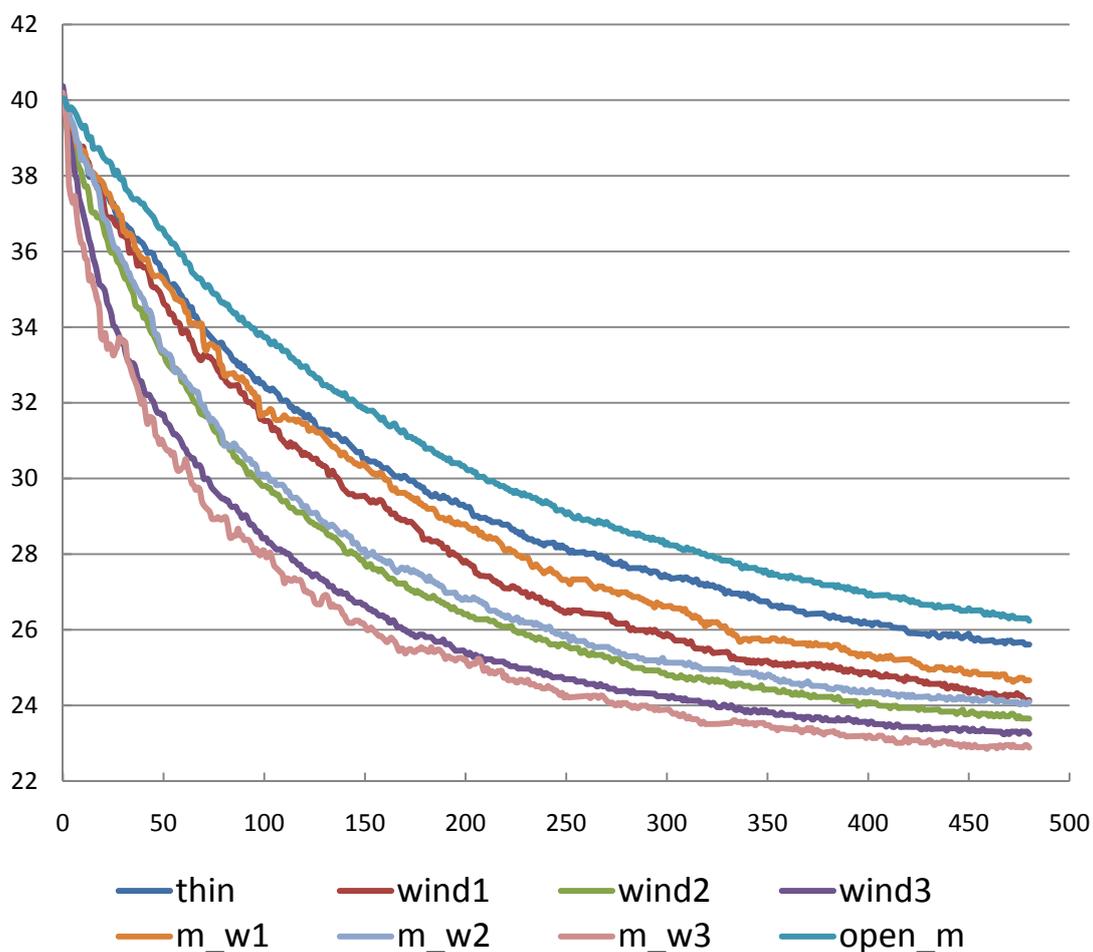
比較不同風速對上下開口通風的影響：

thin (上下開口中薄檔板無風) wind1 (上下開口中薄檔板風速低)

wind2 (上下開口中薄檔板風速中) wind3 (上下開口中薄檔板風速高)

m\_w1 (單一開口風速低) m\_w2 (單一開口風速中) m\_w3 (單一開口風速高)

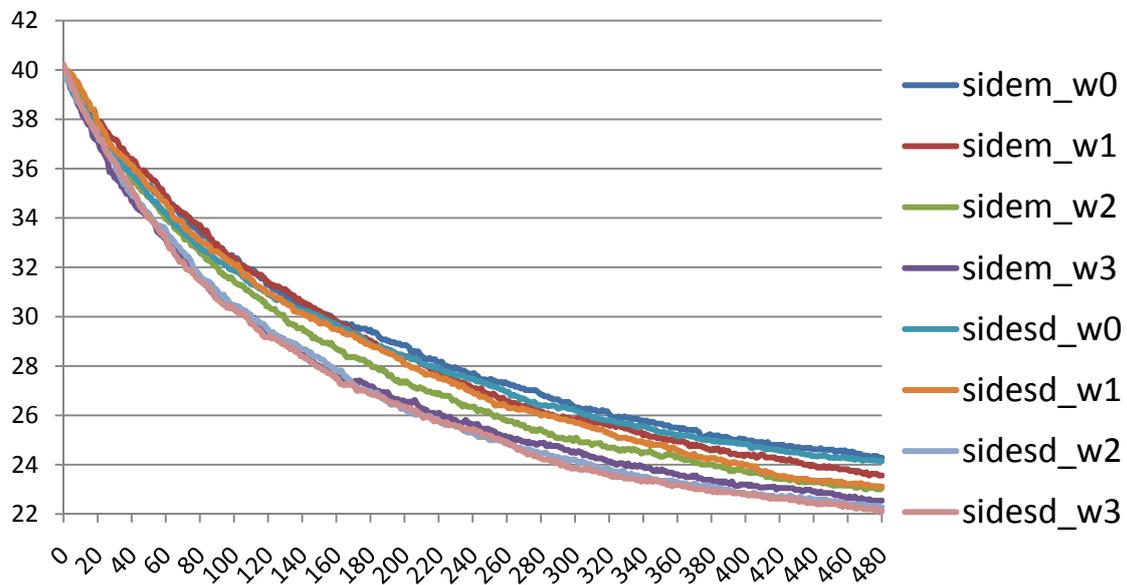
open\_m (單一開口無風)



結果：風速增加，通風效果也提升，雖然單面單開口的通風效果也會因風速增加而提高，但以同樣風速來比較，上下開口一定優於單一開口，尤其風速低時特別明顯。

## 五、上下開口風側吹

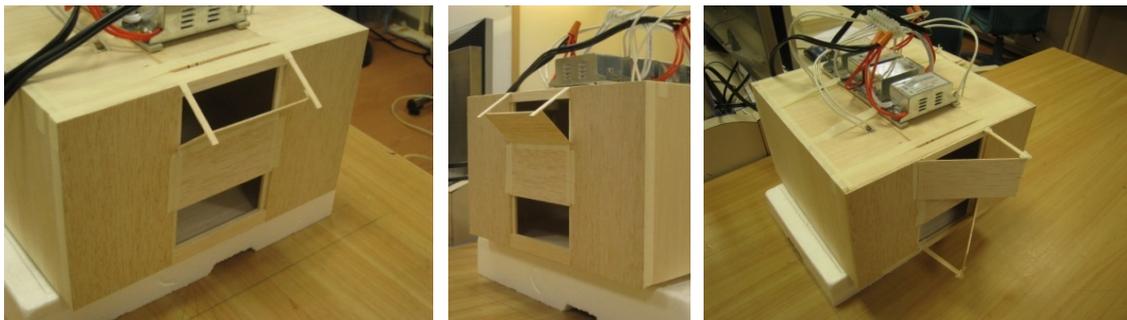
側吹是都市巷道風的典型模式，研究側吹風對單面開口的影響



結果：側吹模式下，上下雙開口通風優於同面積單開口，若增加導風構件，可提升通風效果。

## 六、增加導風構件

測試導風構件對單面通風的影響（詳數據分析檢討）：



圖（ 18 ）搭配導風板的單面開口

結果：配合浮力通風的對流模式，製造對流出口負壓，通風效率顯著提升。

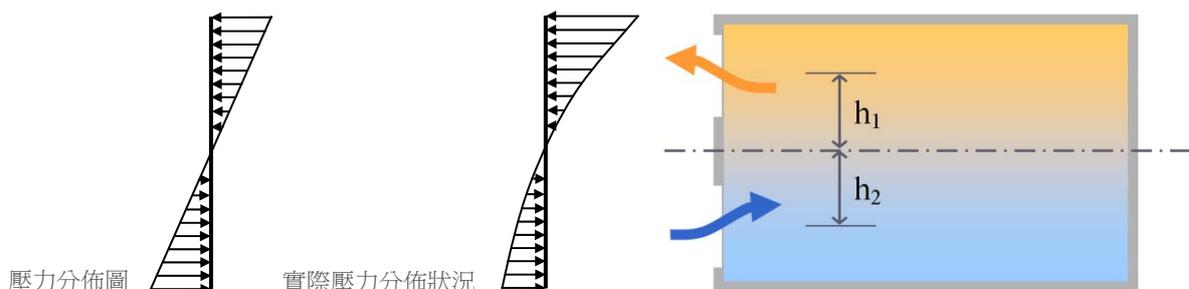
## 陸、數據分析檢討

### 一、通風模式分析—第一階段

我先藉由初步實驗瞭解各種通風的模式，一系列浮力通風相關實驗結果發現，除了我們一般認知的穿越通風之外，浮力通風的效應相當明顯。無風的狀況，浮力通風是推動換氣的助力，而浮力通風必須靠空間有不對稱的高低開口，或有最大高低落差的垂直開口。

在無風的條件下，浮力通風是對流的主要動力，從各種開口模式的數據可以看出，一高一低上下開窗的模式，降溫效率最佳，應該是浮力通風的作用。同面積開兩個口，水平向開兩個口效果比上下開兩個口差。開一個水平狹長開口效果也比同面積方形單開口與垂直單開口差，證實垂直向開口的通風效果優於水平向的開口，表示有垂直落差的開口形態比較有利於通風。由實驗印證運用浮力通風時，最重要的是開口最高點與最低點的落差。與高低點落差相比，開口的大小比較不那麼重要。

綜合現階段的研究結果發現，空間兩對側開口而且有風時，風壓通風是通風的主要模式，但無風或側風（譬如都市常見的巷道風）時，浮力通風的重要性就浮現出來。而單面通風的情況，不論有風或無風都一樣，浮力通風是通風的主要推力，初期實驗結果，充分利用高低差的垂直開窗，通風效果優於開口設計不良的雙邊開口。



圖（ 19 ）  $h_1+h_2$  越大，浮力通風效應越強

實驗也發現風的方向與角度會影響通風效能。我也嘗試一些不同的窗戶設計，發現窗戶的開窗方式、角度確實能影響通風效果。

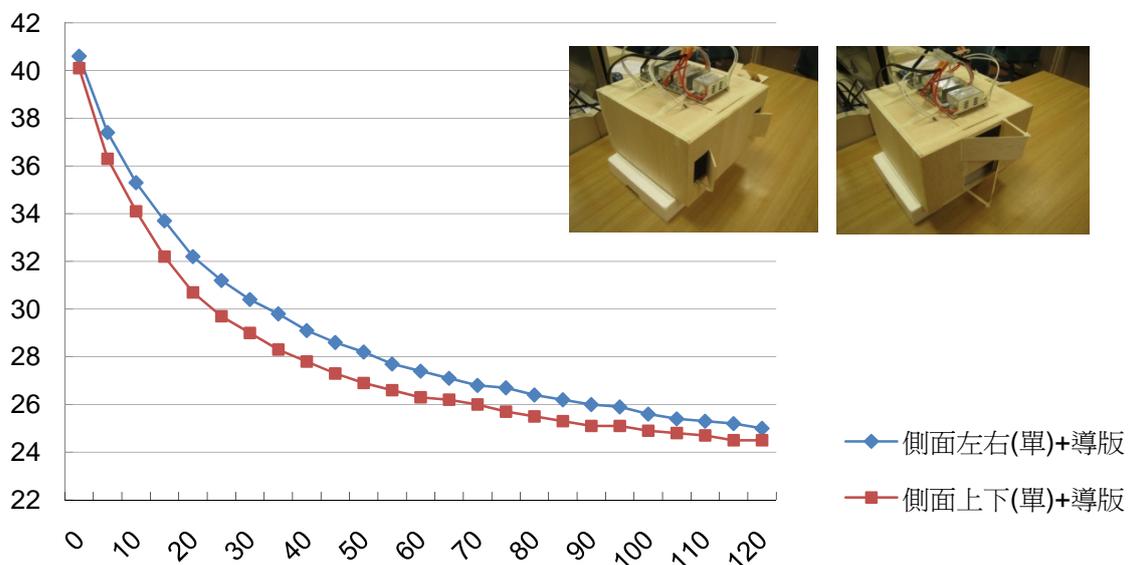
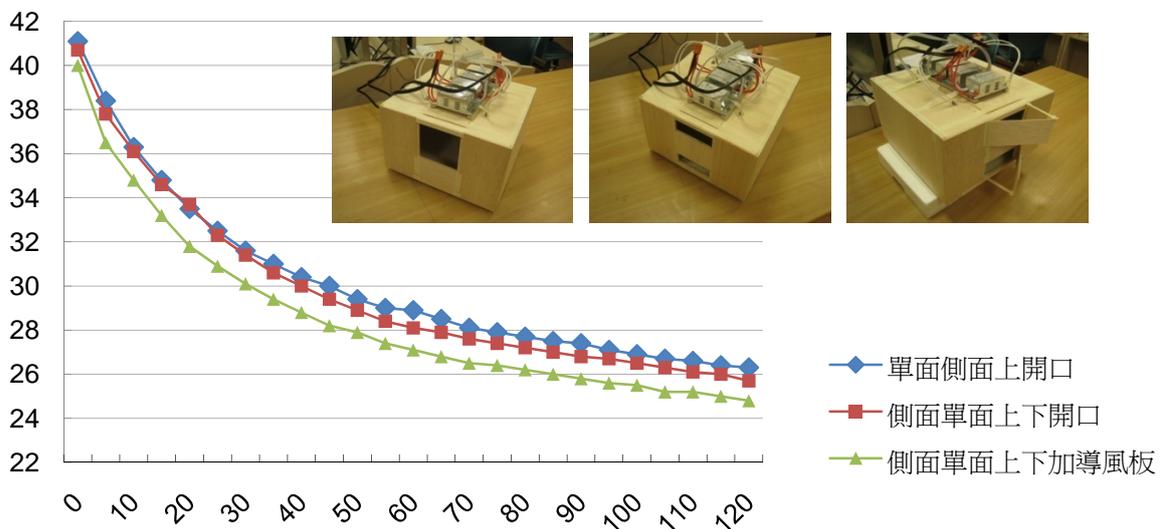
一系列的實驗，證實開口型態會對通風造成顯著的影響，從數據中可以看出，運用浮力通風確實可以有效改善通風效能，尤其是常常無法有效取得穿越通風條件的都市環境，更顯出運用浮力通風的重要性，開口設計同時應考慮穿越通風與浮力通風。

室外風速大，風壓通風較重要，室外風速小，浮力通風的影響大。

運用浮力通風時，要靠垂直方向的對流，單面開窗時垂直開口優於水平開口，雙邊開窗時，高低差的開口設計是必要的條件。

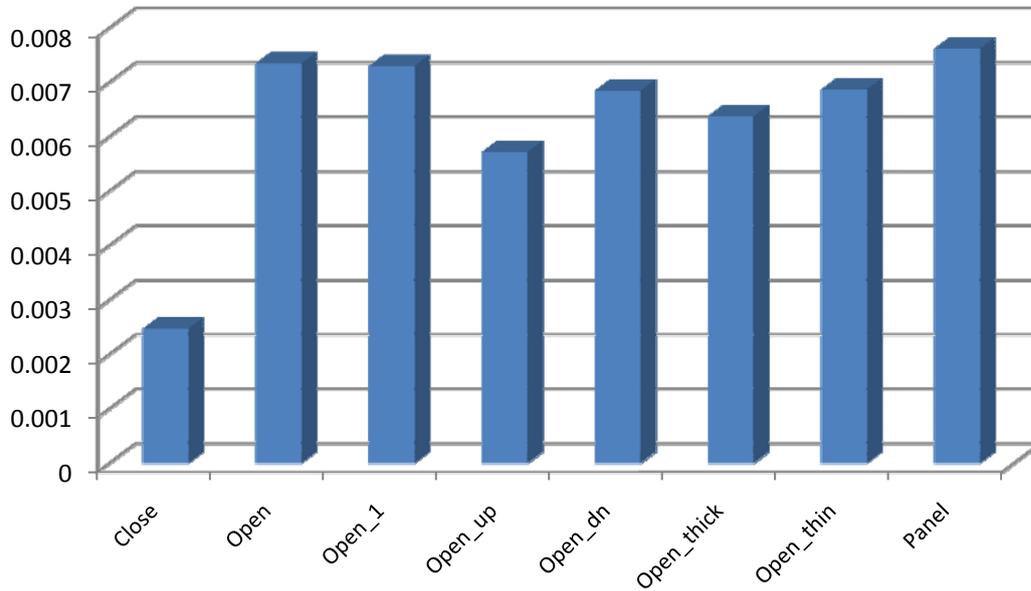
室內高溫時，由於室內外溫差大，浮力通風效果最明顯，一旦室內外溫差接近，浮力通風效應降低，但只要有溫差，浮力通風效應就會啓動，對於常常無法取得有效風力的都會地區，浮力通風應受重視；還有房門緊閉的睡眠時間，及避免寒風刺骨的冬季，單面浮力通風正是取得舒適對流的重要手段。而改善窗戶開口設計是運用浮力通風的重要手段。

下頁圖表，表示 0.8 m/s 平行風條件下，比較各種開口從實驗結果，實驗結果發現改變一下窗戶開口設計，在側風條件下應用導風板，就可明顯提升通風效果，讓風壓和浮力效應相輔相成。

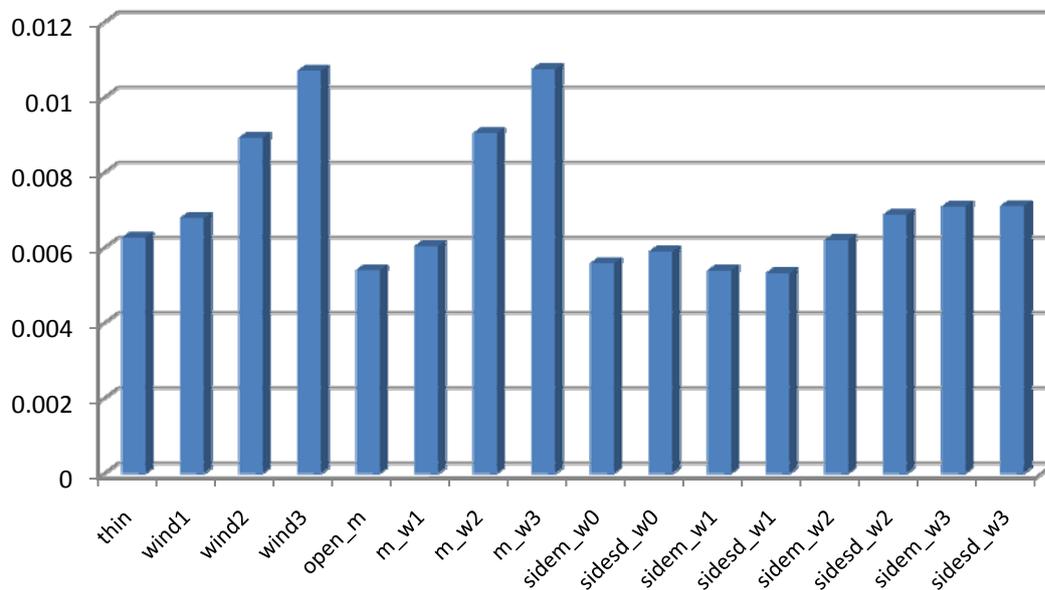


## 二、通風模式分析－第二階段

### 一、全密閉及無風單面開口實驗



### 二、直吹及側風單面開口實驗



利用 Origin 軟體分析，取得不同開口條件的 R 值，數值大表示通風好，依同樣條件重複實驗，數據非常一致，我們可以利用這分析很清楚看出不通開口的通風效能。

# 柒、結論與延伸應用

## 一、單面通風模式分析

單面開口，必須利用浮力通風才能有效對流，兩個開口的情況下，浮力通風的作用會讓空氣從低溫處往高溫處流動。

無風或風力極弱時的單面開口通風模式，和開口形態有關。開口必須有足夠高低差，而且有足夠溫差，才能產生有效對流。爭取最大高低差的垂直開口，效果最好，但若上下開口，中間不開口（中間對浮力通風影響小），中間固定造型的厚度及形狀，也會影響空氣對流及通風。

**單面通風及微弱風場，浮力通風的作用力相對變得非常重要**，有風的條件下，在風力微弱時，上下開口通風效果較佳，但隨著風力轉強，單面單一開口的效果就和同面積的上下開口不相上下。

參考 Origin 的分析結果，單面開口條件下，上下開口的效率明顯高於同面積單一開口，有風的條件下，不論直吹、側吹，風力越強，上下開口的通風效率就越不明顯；但微風及無風時，上下開口的 R 值較高，確實有利於通風。

製作各種不同窗戶開口的縮小比例模型，可以用本模型實驗的溫度記錄加上 Origin 的分析，測試在單面窗戶開口模式下的通風效能。

## 二、溫度實驗與通風研究的延伸

若改變實驗方式，配合 8-Channel 紀錄儀，在模型內外設 8 個感溫點，增加外部加熱燈，並調整內外加熱燈到適當瓦數，模擬外部環境與室內熱源，紀錄單面開口通風模式的溫度變化，我們也可以從溫度變化看出，單面通風運作的狀況。

將模型內部貼上黑紙，利用連續攝影拍攝單面開口在浮力通風作用下的對流模式。

## 三、針對單面通風模式窗戶開口的設計建議

目前大多數的建築開口，似乎並未針對浮力通風來設計，若把建築外牆比擬為生物的表皮，建築物開口就像植物的氣孔或人類的皮膚，氣孔與皮膚會隨著外部環境自動調整，以適應外部環境的變化，外牆開口應該效法生物的調節本能，設計更有效率的開口，在減少機械通風使用率的前提下維持良好的空氣品質，這也正是綠建築的核心精神。

只要有效控制開口的正負壓，就可在單面開口條件下獲得有效的通風。

開口建議爭取垂直落差，且應該上下都能開啓，而且針對風向紊亂且風速微弱的都市微氣候，窗戶建議開口可開向不同方向，譬如一個左開、一個右開，對於水平巷道風可以得到最佳的通風效果。貼著建築表面上開口效果優於凹入的開口，陽台內的開口通風較差，尤其許多陽台設計密閉式，如果能兼顧安全性，陽台牆應該可透氣。

建築爲了外觀，外牆開口常常整齊排成一直線，其實利用把窗戶開口錯開的方式，可以獲得比較好的通風條件，若再配合空氣動力，可強化引進外氣的能力，錯開的窗戶還可在需要時，獲取充足的光線。

上下兩個開口，因浮力通風產生由下到上的對流，我們可以用導風構件改善對流。

外牆應該輕量化，可保持設計的彈性，科技可改善遮陽及熱輻射，不應爲了減少陽光曝曬，讓厚重的牆體阻絕換氣的管道。外牆及柱應退縮，讓換氣面和外氣有最大的接觸面積，窗戶開口可設計爲側推全開式或外推全開式，確保能提供足夠換氣率的開窗面積比例。目前的建築物樑柱都貼著外牆，大樓的樑又特別深，常使開口無法向上延伸，難以爭取最大的開口高低差。

但由於台灣是季風旺盛及有颱風肆虐的地方，窗戶開口必須考慮防風、防颱的功能，而且台灣冬季也會有從氣密不佳的窗戶滲入刺骨寒風的狀況，所以我們的開口設計無法仿照潮濕炎熱無風的熱帶地方，採完全開放式的設計。而且由於國民生活水平提高、空調設備價廉，能源也不算昂貴的狀況下，所有建築開口似乎都朝向機械空調的方向走，窗戶開口的創意設計因此沉寂了多年。

適當的導風設備，可以不影響通風，或以符合流體力學的設計改善通風效果；若把導風設備結合太陽能板，還可提供窗戶機械強制換氣及自動調整遮陽百葉所需的電力。

窗戶開口設計，應考慮空氣動力的效應，符合空氣動力的開口造型，可適當導引氣流，達到最佳通風效果。

活動百葉是炎熱氣候帶非常有用的建築元素，不是裝在窗戶裡側的百葉窗簾，而是在窗戶外的百葉，過去是木質，現在多爲金屬材質，百葉應能 360 度旋轉，配合採光與通風的雙重需求。活動百頁是都市微氣候條件下，非常有效的設備，但裝設在窗戶外才能達到應有的效果，尤其在高樓層，只能開和關的窗戶無法像活動百葉一樣，抵擋強風的同時，又可適度引入光線與空氣對流所需的風力。

### 三、研究應用及研究展望

藉由不必昂貴設備及儀器的溫度實驗，探討單面通風適合的窗戶開口形態，研究結果清楚的傳遞一個事實就是目前多數建築開窗設計，很少考慮浮力通風，許多新建築，明明有大面積的開窗設計，但根據通風原理，應該可以開啓的部分常被固定玻璃取代，或許是成本的考量。但應該節省其他昂貴裝飾性建材的經費，提升窗戶開口設計的機能性，把窗戶開口融入生態設計的思維，不必侷限於制式的傳統開窗方式，牆面也是開口、開口也是牆面，整個建築外殼應該像會呼息的皮膚。

機械空調全面占據我們工作與居住環境，為提升冷房效率而降低換氣率，在二氧化碳含量過高的室內環境生活，成為文明人逃不開的宿命，麻煩的是很多人並不自覺，提供充分的新鮮空氣與氧氣，才是改善生活品質與工作效率的必要條件。引進新鮮空氣是健康生活的首要條件，過敏病及大樓症候群，都應靠有效通風換氣來解決，而非空氣濾清設備。

空調建築最忌諱開窗，因為開窗會讓室內好不容易達到的適溫被外氣溫度干擾，可引進外氣又可預冷或預熱室外空氣的換氣設備就是針對這個需求而設計，一般稱之為全熱換氣機。建議窗戶應結合全熱換氣機，當窗戶為了空調或噪音的需求緊閉時，還可適度提供預冷或預熱的新鮮空氣。

坊間窗戶廣告都以氣密、水密為訴求，大家想到的是都是隔音及防颱，但氣密就是阻絕新鮮空氣進入的管道，我們可以把可預冷的空氣交換機（全熱交換機）和窗戶結合，彎曲的管道若加上吸音材，應可有效阻隔噪音的進入，但又可適度引進新鮮空氣。

另外據我觀察，目前建築的開窗方式，常常違背空氣流體動力的原則，原本外推窗應有導風效果，但軸心在外側的方式，讓開口反而阻礙了空氣的流動。

其實開口窗戶的所有構件都可賦與額外的用途，譬如把遮陽板結合太陽能板、窗框就是換氣的管道，或是結合其他功能的夾層玻璃等等。但無論如何，被動式才是節能減碳的極致，動用其他能源與措施的主動式節能，由於設備的製造過程及運作方式可能產生額外的耗能，常常無法真正減少二氧化碳的排放。節能屋不一定要用到尖端科技，除了改善建築對惡劣環境的隔絕能力，只要簡單改善開口形態，就可節省可觀的能源。

建築應該像先進工業設計一般，在運作效能和散熱之間取得平衡，把建築當成一個和環境互動的生命體，外牆則應該仿照生物皮膚或葉子的構造，能有效交換新鮮外氣，淨化室內汙濁空氣。生態設計強調廢物即食物，一環扣一環的能量循環是永續的基礎，全空調建築用強制手法將人們本身及使用的器具製造的熱量取走，結果就進入以熱制熱、加倍耗能的循環，如果讓熱量自動啟動浮力通風，只要能降低一度兩度，省下的能源都很可觀。

以目前自動化控制技術加上環境感應科技的發展，只要有效整合並導入正確的觀念，零碳屋應該不是夢想。就算不考慮節能減碳，大家爲了利用陽台的空間，避免日曬雨淋，都把陽台用窗戶圍封起來，如果在熱水器旁，設計一個垂直細長的百頁，利用熱水器本身製造的溫度，就可啓動浮力通風，自然減少一氧化碳中毒的機會。

碎形理論應用在生態設計是最近許多生態設計學者討論的熱門話題，應用在設計上，從細胞到生物體到地球，不管小單元或大範圍，都應符合生態設計的原則，**每個部門都使用能源，但也都能適當處理能源**，最高境界的生態設計是一個環節產出的廢棄物，必須是另一個環節的食物，套用在生態建築上，就是**小至一個們一扇窗，大至一棟建築、一個社區都是生態與能源自給自足的小圈圈，沒有任何一個環節把廢棄物交給另一個環節，廢熱就是建築應該積極回收利用的產物**。生態窗戶的設計就應積極面對原本衝突的訴求，用節能全功能窗取代氣密窗。



圖（ 20 ）無空調規畫又有結構及技術限制的老建築，都採用垂直向的三段式開窗，符合通風原則



圖（ 21 ）依賴空調、技術先進的現代建築，大面積的開窗，該開口的部位卻用固定玻璃，不符合通風原則

## 捌、參考資料

- Arvind Krishan /等主編，2001，劉加平等譯，《建築節能設計手冊》，北京，中國建築工業出版社
- David Gissen，《BIG&GREEN 邁向二十一世紀的永續建築》，2003 年 8 月
- Dianna Lopez Barnett, William D. Browning，1999，劉安平譯，《永續建築入門》，台北市，田園城市
- Michael Wigginton & Jude Harris，2002，高杲/等譯，《智能建築外層設計》，大連，大連理工大學出版社
- Serge Salat /主編，2006，《可持續發展設計指南》，北京，清華大學出版社
- Sim Van der Ryn & Stuart Cowan，郭彥銘譯，《生態設計學》，台北市，馬可孛羅文化
- William McDonough & Michael Braungart，2008，中國 21 世紀議程管理中心譯，《從搖籃到搖籃：綠色經濟的設計提案》，台北縣，野人文化
- William P. & Mary Ann Cunningham，白子易、莊順興編譯，《環境科學概論—結合全球與在地永續發展》，台北市，麥格魯·希爾出版集團
- 今井與藏/著，吳啓哲/編譯，《建築物理學概論》，台北市，胡氏圖書
- 朱佳仁，2005，《工程流體力學》，台北市，科技圖書
- 朱佳仁，2006，《風工程概論》，台北市，科技圖書
- 林憲德 / 主編，2005 年更新板，《綠建築設計技術彙編》，內政部建築研究所
- 林憲德，2006，《綠色建築》，台北市，詹氏圖書
- 楊經文，1996，施植明譯，2004 年 3 月，《摩天大樓---生物設計氣候入門》，台北縣，木馬文化