

# 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

## 捷運地下空間火災避難安全模式分析

### --子計畫四：捷運地下空間人流與氣流實測

計劃編號: NSC 89-2122-E-002-146

執行時間: 89/08/01 ~ 90/07/31

主持人: 陳發林教授 研究生: 林恆旭先生

執行單位: 國立台灣大學 應用力學所

### 摘要

本文針對公館捷運站發生緊急火災時的煙流情形做模擬，探討不同火源大小配合不同火車進站速度對於車站濃煙飄散的影響。本文中也針對現行捷運站內發生緊急狀況的煙控模式做模擬，其中包括隧道通風風扇的運作模擬。另外我們也在各樓梯出入口架設風機，觀察風機運作對於煙流的影響，最後提出一整合性的避難建議，提供捷運局做一參考比較，以期能對捷運避難有所幫助。

### 1. 導言

台北捷運的完成，帶動了其鄰近地區的蓬勃發展，每天使用捷運上下班的人數高達數十萬人次，其便捷快速的特色吸引著趕時間的民眾。在未來數年中，搭乘捷運的人數有增加的趨勢，為了滿足運輸的需求，擴增捷運的路線是必須的。

在捷運運量如此龐大的情況下，會有些隱含的問題發生，例如捷運火災。一旦發生火災，捷運中龐大數量

的乘客疏散問題便是一個難題。所以了解發生火災時濃煙的擴散情形，使乘客循著最安全、最簡短的路徑逃生，是必須研究的一個重點。

### 2. 車站濃煙的飄散特性

這裡我們將探討車站內發生緊急火災時，不同大小的火源位於不同位置，配合不同的列車進站速度所造成濃煙的飄散特性。

我們的架構以公館捷運站的模型為主體，此模型依照真實公館捷運站的比例，區分為大廳層以及月台層。在大廳層分別有四個通往地面層的逃生出口，我們的目的在於了解當濃煙發生時，各個逃生出口的煙流情形，首先我們分別將 1MW, 10MW 以及 20MW 的火源放置在四個不同的位置，分別是月台左側、月台中央、大廳左側、以及大廳右側，此時又假設列車進站以及沒有列車進站時的兩種情況。以下逐一以圖示分析其速度向量、溫度場以及濃煙場的分佈情形。這裡我們列舉火源 10MW 發生在月台中央的情形。

圖 1 火源大小為 10MW，位置是月台中央，無列車進站的情況下，0 到

50 秒的速度向量分佈圖。速度向量在火源附近呈現向上。由於火源很大，造成捷運站內的風速流動較快，這可以從向量的密集度及其長度看出。

圖 2 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，列車進站速度 5m/s 的情形下，在時間 0 到 50 秒的速度向量分佈圖。火源處向上的速度向量明顯的減小，但是往兩側月台以及大廳的速度向量增大，造成濃煙飄散的不規則性更高。

圖 3 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，列車進站速度 10m/s 的情形下，在時間 0 到 50 秒的速度向量分佈圖。由於火車進站的速度更快，使得火源附近空氣往上飄昇的現象更不明顯，同時更多氣流流向月台另一側。

圖 4 為火源大小 10MW，火源位置在月台中央，無列車進站的情形下，在時間 0 到 50 秒的溫度變化圖。熱空氣跟火源 1mw 的情況一樣，都是往上竄升直達天花板再往兩側擴散。熱空氣在 40 秒的時候，就可以達到通往地面層的樓梯口，熱空氣擴散的速度遠大於在火源 1MW 時的擴散速度。此時可以注意到火源附近的熱空氣已經到達 800K 了，足以對人員造成極大的傷害。

圖 5 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，列車進站速度 5m/s 的情形下在時間 0 到 50 秒的溫度分佈圖。熱空氣先飄升到大廳天花板再往兩側擴散，擴散的情形跟沒有列車進站的

情形很像，所以火車速度 5m/s 不會對熱空氣飄散的情形造成太大的影響。

圖 6 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，列車進站速度 10m/s 的情形下，在時間 0 到 50 秒的溫度分佈圖。在列車進站如此高速的情況下，造成熱空氣貼著月台地面飄散，對月台乘客安全造成極大威脅。除了火源中心外，飄散到月台以及大廳的熱空氣大約在 400K 左右。

圖 7 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，無列車進站的情形下，在時間 0 到 50 秒的濃煙分佈圖。跟熱空氣的分佈很類似，因為熱空氣幾乎伴隨著濃煙發生，濃煙也是升至天花板再開始擴散。

圖 8 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，火車進站速度 5m/s 的情形下，在時間 0 到 50 秒的濃煙分佈圖。同樣跟熱空氣的分佈類似。

圖 9 是火源大小 10MW，火源位置在月台中央，火車進站速度 10m/s 的情形下，在時間 0 到 50 秒的濃煙分佈圖。濃煙貼地而行，大廳濃煙的濃度要略比月台處高一些，此時大廳層的人員應該盡快疏散，以免造成更大的傷亡。

### 3. 公館捷運站的煙控分析

在這一章裡面，我們將試著作一些煙流控制，提供現行的捷運煙控模式作一個參考，並提出一些建議。

目前捷運車站所採用的煙控模式，是將月台以及大廳分為若干個區

劃。一旦月台或大廳發生火災時，濃煙感測器會感測到某一個區劃發生火災，接著打開此一區劃中的排煙機(位於天花板中)，將濃煙吸到通風井中再排放出去。這種方法對於能。較小的火源蠻有效，因為火源小，其濃煙所擴散的速率也不高，濃煙先上升到天花板，再加上捷運站內都有防煙垂壁的設計，可以有效阻擋少量濃煙的擴散，濃煙很容易可以被排除。但是一旦火源太大，產生的濃煙過多，這個方法就不見得有效。另外捷運車站內

會利用隧道通風系統(Tunnel Ventilation Fan, TVF)排煙，因此在這裡我們除了模擬 TVF 運作時的排煙情況，也嘗試研究是否有另一個更好的排煙模式可以適用於火源較大時的情形。我們所採用的方法是在每個樓梯口架設風機，探討風機打開的情形下，會如何阻擋濃煙的行經路線。

### (1) TVF 對隧道煙流的影響

我們先探討開啟隧道通風風扇(Tunnel Ventilation Fan, TVF)這樣的排煙機制對整個車站的影響。我們假設列車已經進入車站，並且造成月台中央發生火源大小 10MW 的火災，這時打開 TVF，運作模式為兩側皆往隧道方向的排煙井排風，這裡探討 TVF 抽風速度 3m/s 的情形。

圖 10 為大廳層切面的速度向量分佈圖。列車進站後在月台中央產生火源大小 10MW 的火災，TVF 運作的模式是將空氣由月台層內往隧道方向通風

並排氣，TVF 的排氣速度為 3m/s。受到月台層 TVF 排氣的影響，外部的空氣由 4 個樓梯口進氣，進入的風量有隨時間增加的趨勢。圖 11 為同樣條件下大廳層切面的濃煙分佈圖。因為 TVF 抽氣的結果使樓梯口附近會引入地面層的新鮮空氣，所以可以看到大廳層濃煙還是有擴散的現象，但是不至於排出任一樓梯口。只是濃煙依然充滿整個大廳層，是蠻危險的情況。但是跟 TVF 排氣速度 1m/s 的情形比起來，地面層進入樓梯口的風量明顯比較大，所以濃煙更不容易往樓梯口處排出，而集中在大廳中央附近的位置。

圖 12 為月台層切面的速度向量分佈圖。可看到氣流被 TVF 抽到位於隧道口的通風井，而且速度向量明顯比 TVF 排氣速度 1m/s 的情形來得大。圖 13 為同樣條件下月台層切面的濃煙分佈圖。因為 TVF 往外抽氣，所以濃煙往隧道處通風井擴散，大概在時間 30 秒的時候，濃煙已經佈滿整個月台層。同樣在月台通往大廳層的樓梯口附近的濃煙有滯留的現象。

圖 14 分別為整個車站側視的速度向量分佈圖。由圖可看出在月台火源附近的氣流都是流向火源處並往上竄升到大廳層。而大廳層的氣流狀況則是接近天花板處的氣流會往大廳兩側擴散，而地面層經由樓梯口流入的氣流則貼著地面流進站體內。但是因為 TVF 排氣速度更大，所以地面層進入的風量更多。同樣圖 15 為整個車站站體側視的濃煙分佈圖。這裡相同的狀況

就是濃煙會往上升到大廳層的天花板在往兩側擴散，在 30 秒時已經有濃煙接近樓梯口，但是並不會由樓梯口排出。尤其濃煙被地面層進入的大量空氣壓制在大廳中央附近的天花板，擴散程度遠不如 TVF 排氣速度  $1\text{m/s}$  的情形。

#### (2) 分別在各樓梯口架設風機的煙控模式

以下模擬假設火源大小  $20\text{MW}$  的火源發生在月台中央時，此時列車進站速率  $5\text{m/s}$  的情形下煙流的情形，這裡我們探討樓梯口 1 風機打開的情形。

##### (a) 風機出口速度 $5\text{m/s}$ 的情形

由圖 16 來看，當樓梯口 1 的風機打開時，持續由樓梯口 1 外部抽進定速  $1\text{m/s}$  的風量。可看到樓梯口 2 的出風量越來越大，而在大廳另一側的樓梯口 3 以及樓梯口 4 的流量則無變化，維持定量排風。這個結果說明了，當月台中央發生  $10\text{mw}$  大小的火源，同時有速度  $5\text{m/s}$  的火車進站時，打開樓梯口 1 的風機，抽風速度  $1\text{m/s}$ ，此時會把空氣推擠到樓梯口 2。在逃生的觀點來說，固然樓梯口 1 不會有濃煙排出，但相對的空氣往最近的出口樓梯口 2 飄散，也就是由月台中央產生的空氣以及濃煙也會往大廳左側飄散，在這情況下大廳左側的人員也處於危險的狀態下。

接下來看到圖 17 的情形，這是樓梯口 1 風機打開，風機風速  $1\text{m/s}$  的溫度分佈圖。時間 10 秒時，熱空氣慢慢擴散，時間 20 秒時，熱空氣首先到

達樓梯口 2。可看出由於樓梯口 1 風機打開的關係，有效的阻止熱空氣進入樓梯口 1，一直到時間熱空氣 50 秒都未曾從樓梯口 1 流出，但是熱空氣在 20 秒時就已經充滿整個大廳層。在時間 30 秒時，整個大廳層已經瀰漫了溫度大約  $400\text{K}$  的熱空氣了，是極危險的情況。

圖 18 是樓梯口 1 風機打開，風機速度  $1\text{m/s}$  的濃煙分佈圖。跟熱空氣的分佈很類似，樓梯口 1 的風機有效阻止濃煙往樓梯口 1 排出。但是飄散到大廳左側的濃煙卻被樓梯口 1 進入的空氣壓迫到樓梯口 2 排出。此時濃煙的濃度大約在  $8000\text{ppm}$  左右，對於人員的傷害很大，另外濃煙也會往大廳層的另一側排出，所以在樓梯口 1 風機打開風速  $1\text{m/s}$  的情況下，樓梯口 2、樓梯口 3、樓梯口 4 都是危險的出口。

##### (b) 風機出口速度 $5\text{m/s}$ 的情形

接著我們增大樓梯口 1 風機抽風速度的大小，看看對流場有何影響。圖 19 很明顯的看到，樓梯口 2 的排風量明顯的隨著時間減小，在時間 50 秒時甚至變成了進風。而由流量圖看來樓梯口 4 的排風量越來越大，由這個趨勢我們得知，一旦樓梯口 1 風機抽風速度為  $5\text{m/s}$ ，由於進風量大，空氣會漸漸的集中往大廳另外一側宣洩。

看到圖 20 很清楚的告訴我們：在樓梯口 1 風機速度到達  $5\text{m/s}$  時，熱空氣很成功的被壓制住，不會有飄到

大廳左側的情形產生。

圖 21 是樓梯口 1 風機打開，風速 5m/s 的濃煙分佈圖。因為樓梯口 1 風機的高進氣量，使得我們很有效的抑制了往大廳左側擴散的濃煙，就圖來看，樓梯口 1 以及樓梯口 2 一直到時間 50 秒的時候，還未有濃煙飄散到此處。相對於這兩個出口，樓梯口 3 以及樓梯口 4 就顯得危險多了。

圖 1 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 0 m/s 的速度向量分佈圖



圖 3 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 0 m/s 的濃煙分佈圖

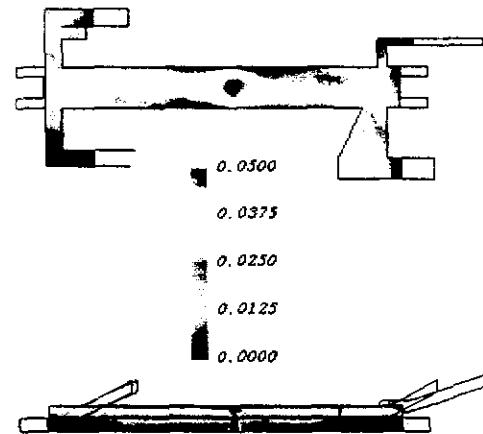
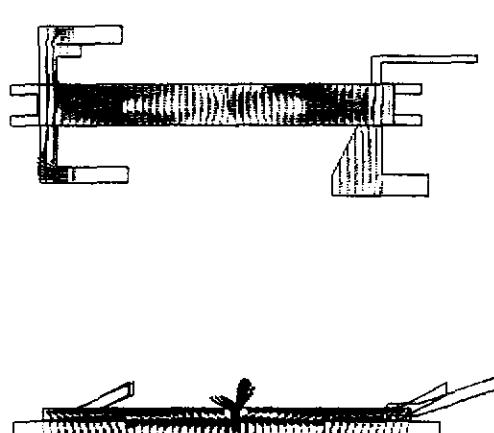


圖 2 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 0 m/s 的溫度分佈圖

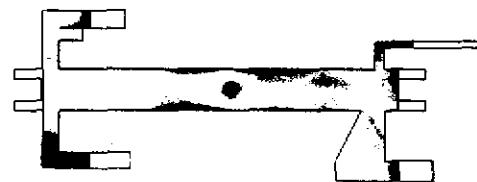


圖 4 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 5 m/s 的速度向量分佈圖

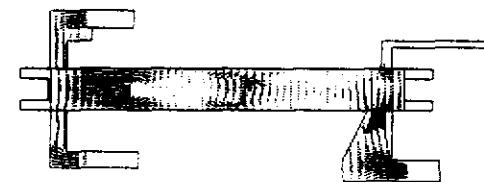




圖 5 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 5 m/s 的溫度分佈圖



圖 7 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 10 m/s 的速度向量分佈圖

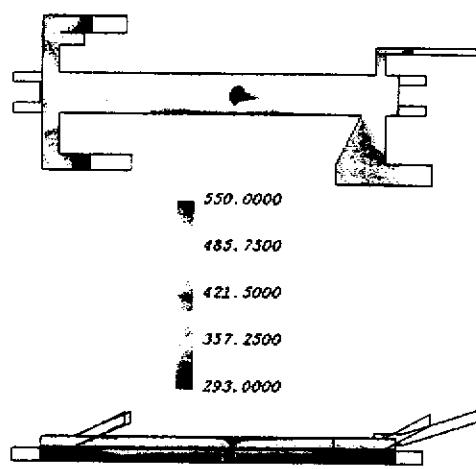


圖 6 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 5 m/s 的濃煙分佈圖

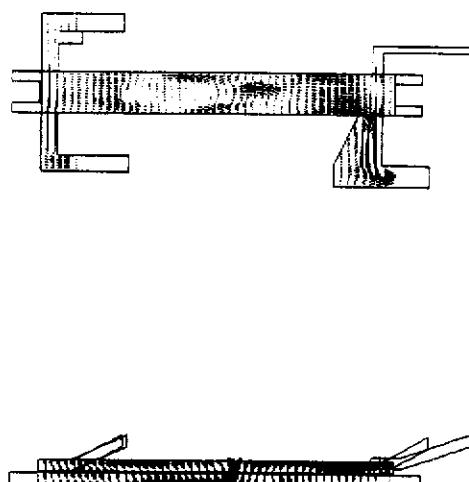
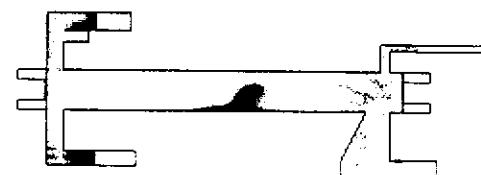


圖 8 火源 10mw 位於月台中央 列車  
速度 10 m/s 的溫度分佈圖



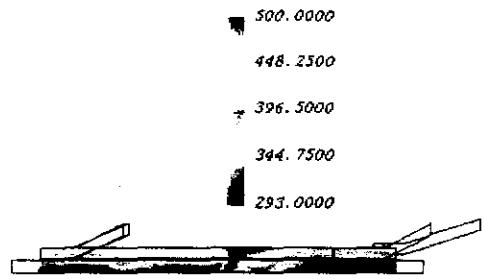


圖 9 火源 10mW 位於月台中央 列車  
速度 10 m/s 的濃煙分佈圖

圖 11 TVF 往隧道通風井排氣，速度  
3m/s，大廳層切面的溫度分佈圖

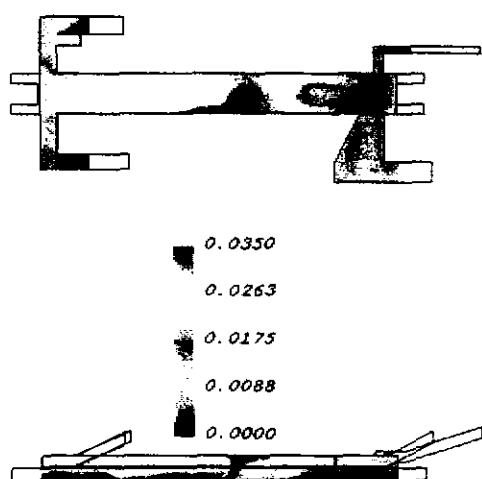
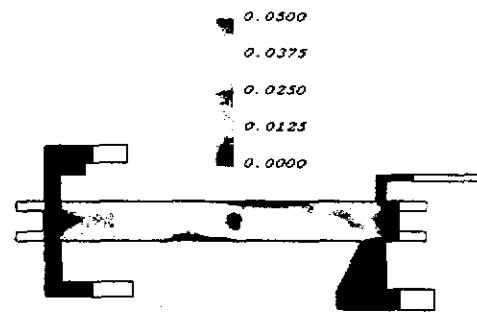


圖 10 TVF 往隧道通風井排氣，速度  
3m/s，大廳層切面的速度向量分佈圖

圖 12 TVF 往隧道通風井排氣，速度  
3m/s，月台層切面的速度向量分佈圖

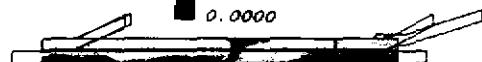
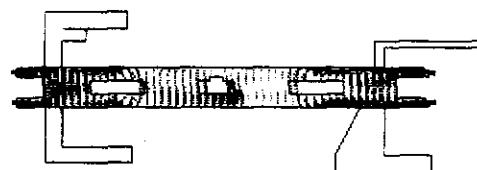


圖 13 TVF 往隧道通風井排氣，速度  
3m/s，月台層切面的溫度分佈圖

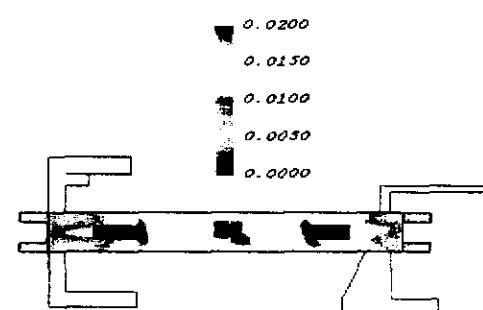


圖 14 TVF 往隧道通風井排氣，速度  
3m/s，站體側視的速度向量分佈圖

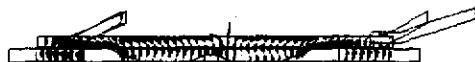


圖 15 TVF 往隧道通風井排氣，速度  
3m/s，站體側視的溫度分佈圖

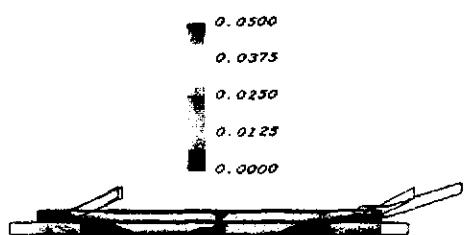


圖 16 樓梯口 1 風機打開，風速  
1m/s，大廳層切面的速度向量分佈圖

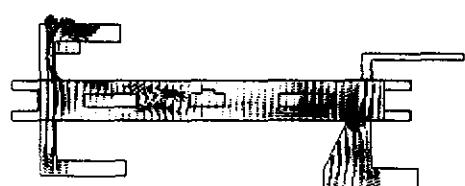


圖 17 樓梯口 1 風機打開，風速  
1m/s，大廳層切面的溫度分佈圖

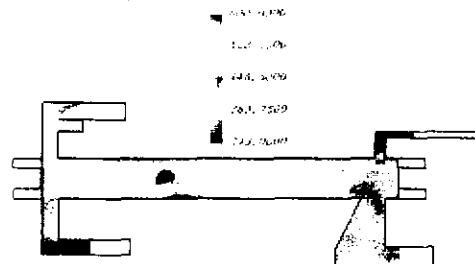


圖 18 樓梯口 1 風機打開，風速  
1m/s，大廳層切面的濃煙分佈圖

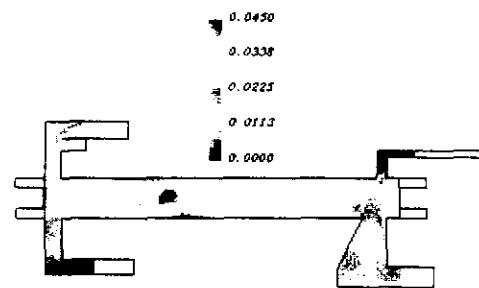


圖 19 樓梯口 1 風機打開，風速  
5m/s，大廳層切面的速度向量分佈圖



圖 20 樓梯口 1 風機打開，風速  
5m/s，大廳層切面的溫度分佈圖

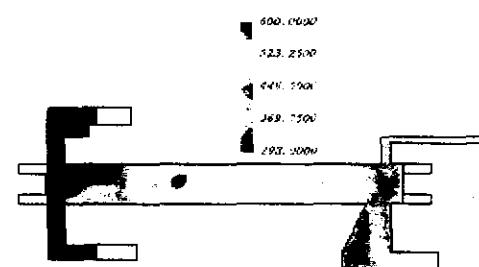
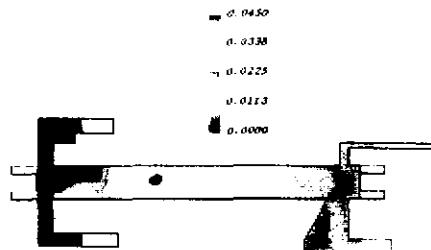


圖 21 樓梯口 1 風機打開，風速  
5m/s，大廳層切面的濃煙分佈圖



## 6. 結論

(一) 火源大小 10MW 位於月台中央的情況

### (1) 無列車進站的情況

濃煙一升到大廳就迅速地往兩側擴散。從上視圖看到在時間 30 秒時濃煙已經到達大廳的左右兩側，時間 40 秒的時候繼續往樓梯口 2、樓梯口 3 以及樓梯口 4 前進。樓梯口 2 跟樓梯口 4 都是持續排風的狀況，樓梯口 3 的趨勢是持續少量的進風。而從側視圖來看，濃煙從火源處開始發生就一直往上飄，並不會流向月台處。綜合以上三點所提出的避難建議為：位於大廳層的人員必須在 30 秒以前離開大廳的左右兩側，大廳左側的人員可以選擇樓梯口 1 逃生，因為濃煙不會排出樓梯口 1。而位於大廳右側的人員可以選擇樓梯口 3 逃生，因為濃煙也不會排出樓梯口 3。而在月台層的乘客則應在 30 秒內就近逃到大廳兩側，從建議的逃生出口逃生。

### (2) 列車進站速度 5m/s 的情況

此時濃煙的流向是迅速地往兩側大廳擴展。從上視圖看到在時間 30 秒時濃煙已經到達大廳的左右兩側，4 個出口皆排煙。樓梯口 4 的流量情形是

隨著時間增多，其他 3 個出口的流量變化則是隨著時間減少。樓梯口 1 在時間 50 秒時甚至變成進氣，所以濃煙地往樓梯口 4 擴散。從側視圖來看，濃煙在 40 秒以前沒有飄到月台層的趨勢，在 50 秒時有些微下降到月台層的情況發生，所以基本上月台層的人員所受的威脅並不會很大。綜合以上 3 點來說，位於大廳層的人員必須在 30 秒以前離開大廳的左右兩側，大廳左側的人員可以選擇樓梯口 1 逃生，因為濃煙受到出口進氣的影響，不會飄到此處，而位於大廳右側的人員則必須盡快在時間 40 秒以前逃到地面層，因為濃煙在 40 秒時已經飄到大廳右側的兩個出口。而在月台層的乘客則應在 30 秒內就近逃到大廳左側，從建議的逃生出口逃生。

### (3) 列車進站速度 10m/s 的情況

此時濃煙的流向也是迅速地往兩側大廳擴展。從上視圖看到在時間 20 秒時濃煙已經到達大廳的右側。在 30 秒時濃煙已經到達右側的樓梯出口，同時也到達了大廳左側，濃煙在時間 50 秒時已經入侵到樓梯口 2、樓梯口 3 以及樓梯 4，而樓梯口 1 則看不出有煙到達的傾向。樓梯口 4 的流量情形是隨著時間增多，其他 3 個出口的流量變化則是隨著時間減少，樓梯口 1 在時間 50 秒時幾乎已經不再排氣，所以濃煙往樓梯口 4 擴散。從側視圖來看，濃煙在 30 秒時已經飄散到月台左側，到時間 50 秒時幾乎已經佔滿整個月台

層。綜合以上 3 點來說，位於大廳右側的人員必須在 20 秒以前離開大廳，否則時間越久，大廳右側的兩個出口都有濃煙到達，而大廳左側的人員則必須在 30 秒前離開大廳左側，選擇樓梯口 1 逃生，因為樓梯口 1 不會有濃煙由此排出。而位於月台的人員則必須盡快在時間 30 秒以前離開月台，選擇月台兩側的緊急逃生梯逃生，因為在 30 秒時大廳也已經處於濃煙密佈的狀態了。

### (二)若採取在樓梯口處裝設風機的煙控方法：

風機的開啟模式皆為將地面層的新鮮空氣引入站內，此時風機的抽風速度對煙流方向有極大的影響。在這裡我們設定風機以 1m/s 以及 5m/s 的速度運作，發現任一風機打開時，若風機速度為 1m/s，僅能阻止濃煙排出此出口，但是濃煙依然佈滿位於同側的大廳層。而改變風機的速度為 5m/s 時，除了可以有效的阻止濃煙排出此一風機開啟的樓梯出口外，甚至還能有效的將濃煙控制在大廳的中央附近，不會到達同側的另一個樓梯出口。

加上風機後的避難策略就是往風機開啟的方向逃難，當然風機的開啟速度必須在一個標準值之上。在我們的模擬結果中發現，風機速度 5m/s 是一個理想值，任一風機打開且速度達到 5m/s 以上的煙控模式就已經足夠控制濃煙不往樓梯口發展。當然真正運

作的情況下應該是同時打開 4 個風機，可以達到更好的效果。此時大廳層的人員只要在濃煙上升到大廳層之前朝大廳兩側移動，就可確保不受濃煙的侵襲，而月台層的人則應該盡快逃入位於兩側的逃生梯。

### (三)若採取開啟 TVF 的排煙方式：

基本上 TVF 皆往隧道方向的通風井排煙的運作模式的優點為：一旦開啟 TVF 將站內空氣由隧道口附近的通風井排出，這可將地面層新鮮空氣吸入車站內，造成部份大廳是無濃煙可到達的安全空間。反觀月台層則容易佈滿濃煙，對於月台層人員來說，必須在極短時間內離開月台，否則會遭受濃煙的侵襲。

由 TVF 不同的運作速度來比較，較小的運作速度對於月台的排煙較無效果。拿運作速度 1m/s 來說，雖說 TVF 排氣會吸引地面層的空氣進入，但在這一速度下所造成的效果卻不明顯，大部分的空氣流動受到火源的影響。再比較 TVF 速度 3m/s 以及 5m/s 的情形，可以明顯發現，由於 TVF 速度增大，因此吸引地面層進入的風量相對變大，使得大廳層不受濃煙影響的區域面積更大。這個結果告訴我們，TVF 往隧道方向通風井排氣的運作模式可使大廳層呈現將較安全的情況，但是前提是 TVF 的運作速度必須達到一個定值，才能有效達到這個煙控的目的。不過這種運作模式的缺點就是造

成月台層佈滿濃煙，呈現極危險的狀況。

此時的避難策略為大廳層的人員盡快移動到大廳層兩側，但是 TVF 的運作速度必須在一個有效值之上，至少需 3m/s 才可以有效的吸引地面層的新鮮空氣達到壓制濃煙的效果，當然此時配合樓梯口風機打開的煙控策略更能確保大廳層人員的安全。而月台層的人員因為濃煙迅速擴散，所以應立即逃入位於月台兩側的逃生梯內。

排煙模式的探討，台北捷運 10 週年工程研討會專輯，台北捷運工程局，民 86 年。

(5)黃弟勝，我國捷運系統地下車站避難安全性評估的研究，民 89 年

(6)林同棟，台北都會區大眾捷運系統，環控模擬(包括 1D&3D)分析報告，民 89 年。

(7)周湘魁，環控控制系統概述，捷運車站規劃講習教材(一)，台北市政府捷運局，民 82 年。

(8)台北市政府捷運工程局，台北都會區大眾捷運系統規手冊，民 87 年。

## 7. 參考文獻

- (1) S. Simcox, N. S. Wilkes&I. P. Jones , "Fire at King's Cross Underground Station, 18<sup>th</sup> November, 1987: Numerical Simulation of the Buoyant Flow and Heat Transfer, AERE-G 4677, Computer Science and Systems Division , Engineering Science Division, Harwell Laboratory, Oxon 0 x 11 0 R A , July , 1988
- (2) S. Simcox, N. S. Wilkes&I. P. Jones , "Fire at King's Cross Underground Station, 18<sup>th</sup> November, 1987: Numerical Simulation of the Effect of Train Movements, AERE-G 4677, Computer Science and Systems Division , Engineering Science Division, Harwell Laboratory, Oxon 0 x 11 0 R A , July , 1988
- (3) 楊冠雄，期末論文，台北都會區捷運系統火災煙控策略與緊急運轉程序分析，民 86 年。
- (4) 周湘魁，陳景池，捷運地下站適用