

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

公路隧道內氣流與實際動態車流間之遲滯效應研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-034-002-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中國文化大學機械工程學系

計畫主持人：張鴻明

計畫參與人員：李博文

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

公路隧道內氣流與實際動態車流間之遲滯效應研究

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2212-E-034-002-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

計畫主持人：張鴻明

共同主持人：

計畫參與人員：李博文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：中國文化大學機械工程學系

中華民國 94 年 10 月 31 日

## 中文摘要

公路隧道內車輛總數目實際上是瞬息萬變，忽高忽低。一般之隧道通風系統設計是以預估之總體車流量來概略估算隧道內之車流引致風速，估算時皆忽略實際車流之時刻變動特性的影響。這可能會造成車流引致風速的錯估。由於隧道內氣流對時刻變動的車流存在著遲滯反應。對此現象之發生機制的釐清，應可改善我們對公路隧道車流引致風速的估算精度以及有助於評估縱流式通風系統之廢氣濃度分佈的精準度。

關鍵詞：公路隧道、遲滯效應。

## ABSTRACT

The total number of vehicles in a highway tunnel varies frequently. However, as the traffic induced flow rate of air in a highway tunnel is being estimated, the frequent variation of the traffic flow is always ignored. The ignorance of the dynamic feature of the traffic flow in a road tunnel will neglect the hysteresis effect existing between the flow of air and the flow of realistic highway traffic and will cause inaccurate estimation of the induced wind speed. This project aims at revealing the mechanism behind the hysteresis phenomena and searching the hysteresis effects for different daily traffic situations. Hopefully, the hysteresis phenomena and its effects would be known to the related professional societies, and the ventilation status of highway tunnels could be estimated more accurately.

Keywords : Highway Tunnels, Hysteresis Effect

## 一、前言

隨著交通建設的推展，臺灣區國道中隧道的數量逐年增加，未來中橫和南橫快速道路中更不乏長隧道的建造，屆時 1033km 國道上之隧道總長將達 172.8km 佔 16.73%。由於地狹山多人稠，未來公路隧道勢必與眾多國人日常生活息息相關。在平時狀況下，車輛排放廢氣聚積在隧道中，對用路人有著潛在威脅[1]，包括立即誘發某些用路人氣喘病之發作和長期累積吸入某些碳氫化合物而致癌等。因此，隧道通風量的正確估算相當重要。其通風相關之任何問題皆不可等閒視之。

在白天實際公路車流量總體而言相當穩定，但瞬間看之則是不斷變化。當我們要據以推測其引致氣流時究竟該以穩態或暫態數理模式看待之。一般之隧道通風系統設計是以預估之總體車流量來概略估算，估算時皆忽略實際車流之時刻變動特性的影響。本研究將就此點重新思考探討。由於車流引致風速是縱流式通風系統維持平時運作之主力，其對隧道內廢氣濃度會有一定之影響。本計畫旨在探討遲滯效應之發生機制，將此一隧道通風相關的課題研究清楚。

## 二、研究方法

本計畫擬以一維暫態數理模式和三維暫態數理模式為依據，來了解遲滯效應發生機制、和探討相關基礎重要參數(例如:週期性車流量之平均值、變動幅度、頻率、車速、隧道長度、隧道段面積等)與遲滯效應之關係。

### 2.1 一維數理模式

依牛頓第二運動定律我們可以寫出描述車行隧道內氣流動態速度的方程式如下

$$\sum_{i=1}^2 F_i = \rho A L \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

在一維模式中，我們將該段隧道內空氣的流動從入口到出口視為完全發展流(fully developed flow)，以便列出隧道壁經由空氣的黏性對隧道內空氣所施加的總摩擦力

$$F_1 = -\frac{\rho}{2} f \frac{L}{D_h} A V^2, \text{ 其中 } f \text{ 為隧道摩擦因子、} L \text{ 為隧道長度、} D_h \text{ 為隧道水力直徑、} A \text{ 為隧道斷面積。}$$

摩擦因子  $f$  通常隨著雷諾數  $Re \left( \frac{\rho V D_h}{\mu} \right)$ 、和壁面相對粗糙度  $e / D_h$  而變化。

但其氣流一般皆在紊流狀況，其摩擦因子  $f$  為一常數，約 0.025。假設此時隧道內共有  $N(t)$  輛車(前視面積  $A_v$  和阻力係數  $C_d$ )以平均車速  $U(t)$  通過隧道，則在此時該隧道內所有這些車輛對空氣的總推力或阻力(視車速與風速的相對大小而定)可以下式表示

$$\begin{aligned} F_2 &= N(t) \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U(t) - V) |U(t) - V| \\ &= \text{Coeff}(t) \cdot (U(t) - V) |U(t) - V| \end{aligned} \quad (2)$$

隧道內氣流之主要誘發因素為隧道內車流總推力 由上式可看出該車流對氣流之推力與隧道內車流速度呈二次方關係，而車流對氣流之推力與隧道內車輛總數和車型(阻力係數與前視面積)的變動則呈一次方關係。由以上分析可知，可能影響氣流與車流間

之遲滯效應的主要因素為隧道內車輛型式和總數以及車流速度。因此，研究主要在於以一維和三維流場數理模式分開探討這兩因素所各別誘發之遲滯效應。

## 2.2 三維數理模式

除了上述一維數理模式外，本研究亦以三維暫態流場數理模式來探討氣流對週期性變動車流量之遲滯效應。隧道內三維暫態流場中，流體之流動遵守質量守恆、牛頓第二運動定律、與紊流特性傳輸方程式，其通式如下：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (3)$$

其中等號左邊第 1 項代表物理量  $\phi$  (每單位空氣質量所具有之質量、動量、或紊流特性量) 在流場中某處隨時間之增長率，等號左邊第 2 項所代表的是物理量  $\phi$  之移流通量梯度，等號右邊第 1 項所代表的是擴散通量梯度，等號右邊第 2 項所代表的是該物理量  $\phi$  於每單位體積空間中之淨生成率。

由於隧道內三維暫態流場中混合著車流，其中車流對所經之處之氣流施予推力(等同於動量源)。則車流所經之處的動量方程式宜改寫成

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi + S_\phi^P \quad (4)$$

上式末項即代表車流施加予氣流之動量，可表示成：

$$S_\phi^P = \frac{F_2}{\Delta V} \quad (5)$$

在本研究中，此一動量源之計算將簡單以一維數理模式中所使用的隧道內車流推力  $F_2$  ((2)式) 為之。(5)式中的  $\Delta V$  代表的是隧道內車流所經處之空間體積，亦即在本研究中，每時刻隧道內總車流對氣流之推力被平均分散於車流所經之空間中。

方程式(3)&(4)代表在動態流場中，某物理量  $\phi$  在任何地方每單位體積中的生成率與供應率加上在該處經由擴散與移流之淨傳入率應等於該物理量  $\phi$  在當處每單位體積內的增加率。簡言之即是各物理量皆得遵守守恆定律。有了這些統禦方程式後，我們尚需依據隧道空間範圍和隧道出入口的狀況資料來設定適當的邊界條件，如此即構成了隧道流場之數理模式。該模式之求解，則擬經由目前發展得相當成熟且普遍的流場模擬軟體(CFX)來完成，該軟體所引用的方程式解法為有限體積法(finite volume method)。

## 三、結果與討論

由 2.1 節討論可知，隧道內車流速度變動和車輛型式和總數變動乃是兩種個與遲滯效應相關的重要因素。茲討論如下：

### 3.1 車流速度變動的遲滯效應

由於以一維模式(方程式(2))來看隧道內車流速度對推力的影響效應屬二次方關係。單純探討此因素之效應，我們可以只考慮某一型車輛，亦即採用固定阻力係數( $C_d$ )

與前視面積( $A_v$ )以及固定其在隧道內的車輛總數目，以便檢視車流速度變動所產生之遲滯效應。由於隧道內車流速度變動以局部時段看是呈往復式的，我們在此為分析方便將假設其依下列關係而變

$$U(t) = U_0 + U_a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (6)$$

從中我們主要可以檢視變動週期( $T$ )與變動幅度( $U_a$ )的影響效應。研究中我們以建立其三維和一維流場數值模式來探討。在此以三維流場數值模式為例討論如下：

在三維流場數值模式中，我們以一到三部公車( $2.4m \times 2.94m \times 12m$ )行駛於  $100m$  到  $200m$  長的隧道為研究案例，其中隧道剖面引用福德隧道者。流場網格採非結構型式，近車身與地面附近之網格劃分得較密，如圖 1 所示，以期得到較正確之計算解。以車行速度  $10m/s$  所解得公車對稱面上流場之靜壓分佈，如圖 2 所示。車頭前方為高壓區，車尾則為低壓區，前後壓差與車身磨擦力共同行成車流對氣流的推力。經計算求得此公車之阻力係數  $Cd = 1.5$ 。

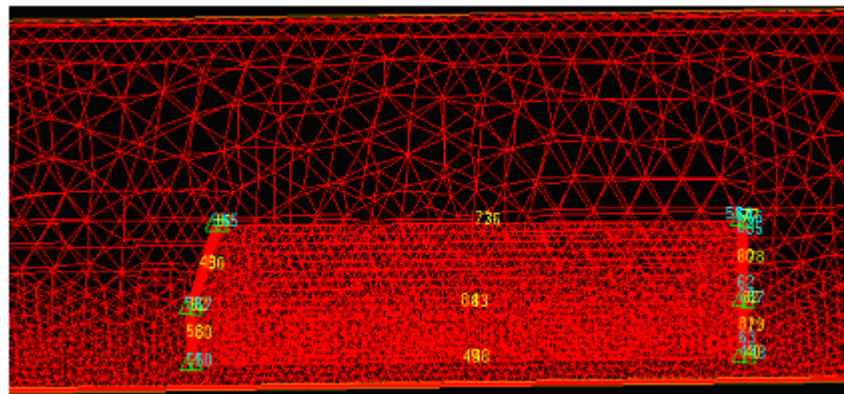


圖 1 車身附近之網格分佈

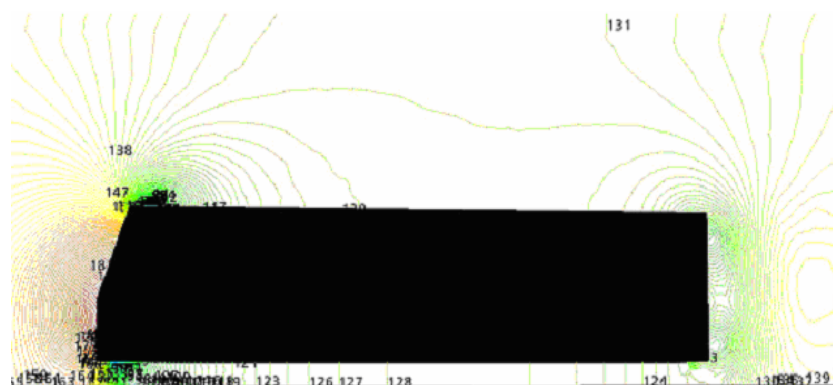


圖 2 公車對稱面上流場之靜壓分佈

接下來假設公車按(6)式改變其速度，其中假設  $U_0 = 10m/s$ ， $U_a = 10m/s$ ， $T = 8s$ 。將這些相關數據代入(2)和(5)式即得此部公車行駛於隧道內所產生動態動量源，以此動量源代入三維模式計算所得作用於氣流的合力與隧道內引致風速隨時間的變動如圖 3 所

示。在一週期間氣流所受作用力大部分為正值僅再一小部份時段為負值。這表示在這種行車狀況或因素下，氣流大部分時候會處於加速狀態。因此，隧道內之引致風速在所計算的七週期期間不斷升高的趨勢。若我們換個角度以一維動量方程式來看，也可得到合理的解釋，茲討論如下。若車流以具有平均速度( $U_0$ )看待，則其推力可寫成  $F_2 = N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U_0 - V) |U_0 - V|$ ，但若考慮其動態本質而以週期性變動看待，則其推力可寫成  $F_2 = N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U(t) - V) |U(t) - V|$ 。假設車速變動如(6)式所示，若以穩態模式(忽略動態特性)和暫態模式來考量每經一週期 $T$ 氣流所取得的有效功將會不同。分別詳述如下：

(1) 穩態模式

$$W_c \cong (N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U_0 - V) |U_0 - V| - F_1) \cdot V \cdot T \quad (7)$$

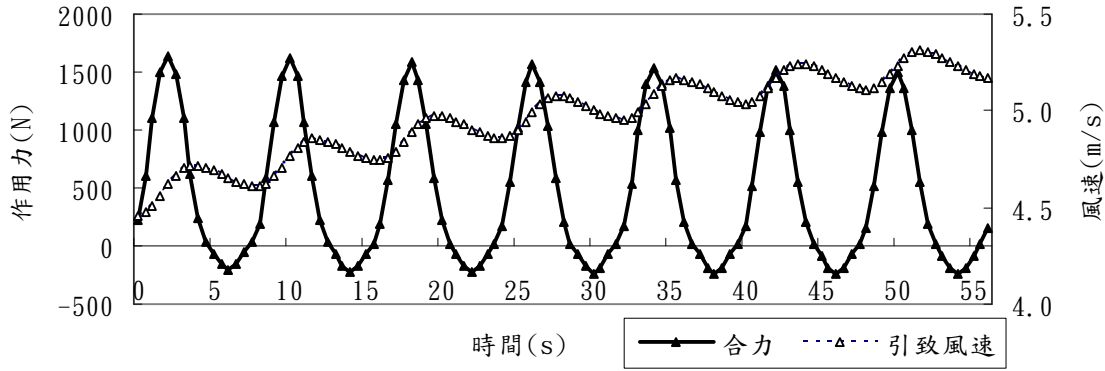
(2) 暫態模式

$$\begin{aligned} W_p &\cong \int_0^T (F_2 - F_1) V dt \\ &= \int_0^T (N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U_0 + U_a \sin(\frac{2\pi}{T}t) - V) |U_0 + U_a \sin(\frac{2\pi}{T}t) - V| - F_1) \cdot V \cdot dt \end{aligned} \quad (8)$$

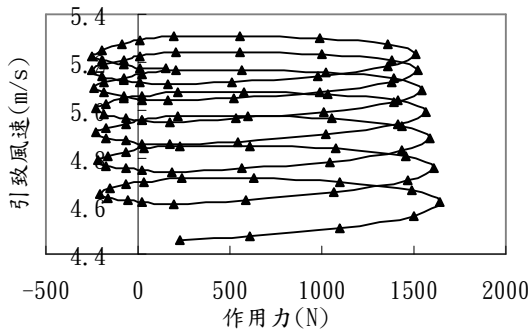
若在整個週期 $U(T) > V$ (一般隧道內的情形是如此)則上式可再簡化如下

$$\begin{aligned} W_p &\cong \int_0^T (N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot [(U_0 - V)^2 + 2(U_0 - V)U_a \sin(\frac{2\pi}{T}t) + U_a^2 \sin^2(\frac{2\pi}{T}t)] - F_1) \cdot V \cdot dt \\ &= W_c + N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot V \cdot \int_0^T [2(U_0 - V)U_a \sin(\frac{2\pi}{T}t) + U_a^2 \sin^2(\frac{2\pi}{T}t)] dt \\ &= W_c + N \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot V \cdot U_a^2 \cdot \frac{T}{2} > W_c \end{aligned} \quad (9)$$

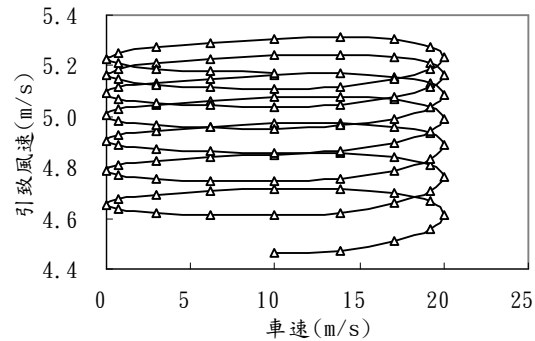
由此可見將具有動態本質的車流取其平均速度然後視為穩態車流將會低估隧道內之車流引致風速。以上分析時我們可以暫時將引致風速視為定值，此乃由於隧道內空氣總質量頗大(以福德隧道為例，其值約為198500Kg)風速的變動量比車速者小很多。



(a) 作用於氣流的合力與隧道內引致風速之時間系列



(b) 作用於氣流的合力與引致風速的關係



(c) 車速與引致風速的關係

圖 3 變動車速對隧道內引致風速的影響效應

圖 3 (b) 和(c)顯示車速的高低變化與作用力者完全一致。然而圖 3 (a)則顯示引致風速的高峰低谷約落後作用其上之力的高峰低谷  $1/4$  週期，這顯示氣流對車流狀況的變化總存在著遲滯反應。另外，圖 3(b)顯示引致風速逐漸升高後作用力整體亦將隨之下降，因而每經一週期風速的增加量則逐漸縮小。

### 3.2 隧道內車輛型式和總數變動的遲滯效應

實際上隧道內車輛總數和型式是隨機變動。由一維模式所含的方程式(2)來看，隧道內車輛總數( $N$ )和型式( $C_d$ 和  $A_v$ )對推力的影響效應同屬一次方關係，其總效應可以  $Coeff(t)$  係數來代表。本節將以考慮此一係數對引致風速的效應為主。為了便於思考，我們可以只考慮某一型車輛，亦即採用固定阻力係數與前視面積，以便檢視車輛總數變動所產生之遲滯效應。由於隧道內車輛總數的變動通常是動態的，我們將假設其依下列關係而變

$$N(t) = N_0 + N_a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (10)$$

此時我們將假設所有車輛以定速  $U_0$  通過隧道，從中我們可以單純檢視車輛總數之變動週期( $T$ )與變動幅度( $N_a$ )的影響效應。若我們將隧道內車輛總數以平均值  $N_0$  看待，則其

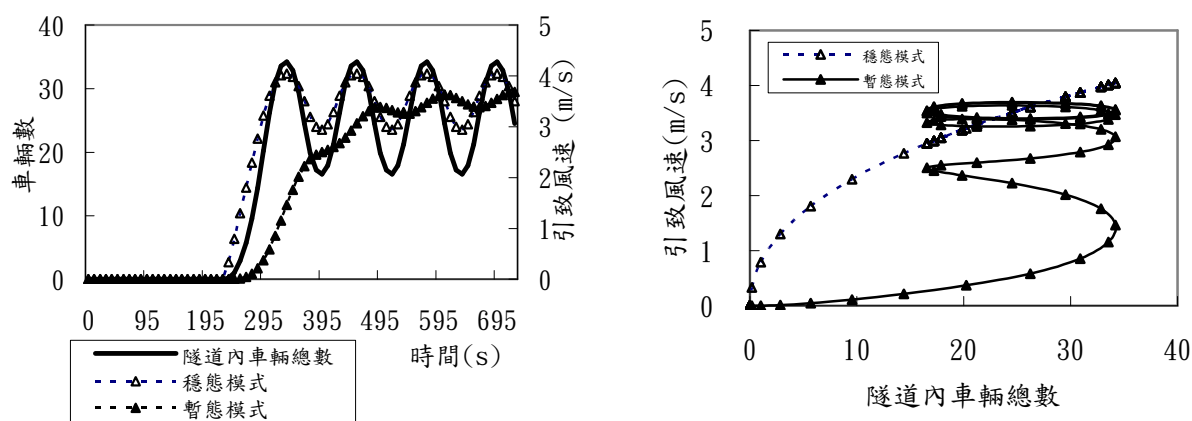
推力可寫成  $F_2 = N_0 \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U_0 - V)|U_0 - V|$ 。但若考慮其動態本質，而以週期性變動



看待，則其推力可寫成  $F_2 = (N_0 + N_a \sin(\frac{2\pi}{T}t)) \frac{\rho}{2} C_d \cdot A_v \cdot (U_0 - V)|U_0 - V|$ 。比較前兩式可輕易發現，以變動車流量來看待車流推力時，車流推力所多出的變動項以一週期計算時並不會有功的淨輸入到氣流中。因此，當我們將實際隧道內變動中的車輛總數以其平均值  $N_0$  看待應不至於在總體效應上有偏差。由於此種流場之直接三維模式建構尚不可行，我們僅以一維模式來探討。

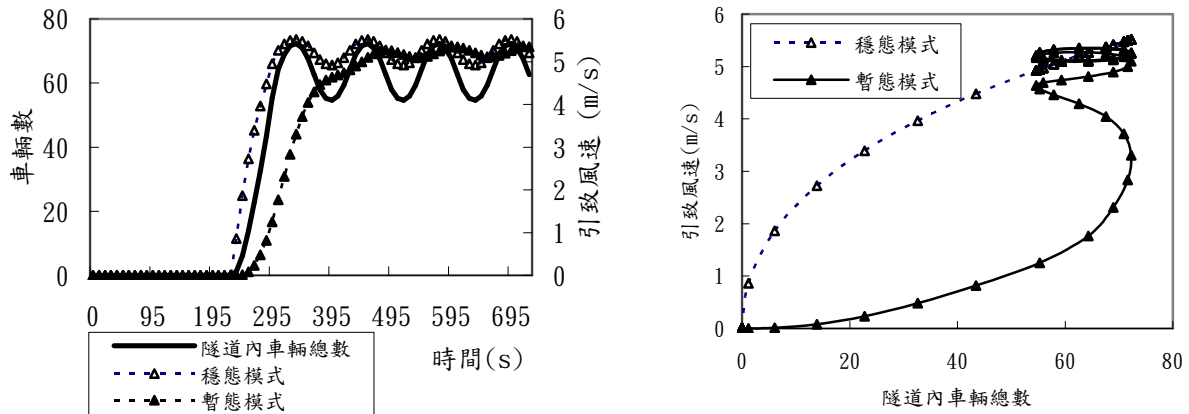
以福德隧道(長1762m,斷面積93.88m<sup>2</sup>,  $f=0.025$ )為例，假設隧道原本淨空，然後一系列小型車(前視面積2.5m<sup>2</sup> 阻力係數0.2)依次按每隔10秒有1輛、2輛、3輛、4輛、5輛、6輛、7輛、6輛、5輛、4輛、3輛、2輛、1輛、2輛、3輛、4輛、5輛、6輛、7輛.....以定速100km/hr進入此隧道。此時隧道內車輛數將由0逐漸增加到34輛然後介於34-18輛之間變動，如圖4(a)所示。在第四週期以前引致風速尚未完全發展仍會隨時間續增加，此後引致風速則隨隧道內車輛總數而呈週期變動，此風速平均值並不隨時間增加。圖4(b)則顯示以穩態模式與暫態模式所算得之引致風速在起初階段有著很大的差異(此時遲滯效應很明顯)，等到達動態穩定後兩者有著相同之平均值，其理如前段所分析。當我們假設一系列小型車依次進入此隧道的方式同前只是每10秒皆再加6輛(提高總量但變動幅度不變)。此時隧道內車輛數將由0逐漸增加到72輛然後介於72-56輛之間變動，如圖5(a)所示。結果顯示除了引致風速較高外，其他特徵大致與前例相似。

圖4(a)和5(a)顯示引致風速的高峰低谷約落後隧道內車輛數目(亦即作用力)的高峰低谷1/4週期，這再度顯示氣流對車流狀況的變化總存在著遲滯反應。另外，圖4(b)和5(b)顯示引致風速逐漸升高到上限後即呈現在一定範圍內進行穩定循環變動。



(a) 隧道內車輛數目與引致風速之時間系列 (b) 變動車輛數目對引致風速之效應

圖4 福德隧道內低車流量下，變動車輛數目對引致風速之效應



(a) 引致風速之時間系列

(b) 變動車輛數目對引致風速之效應

圖 5 福德隧道內較高車流量下，變動車輛數目對引致風速之效應

#### 四、結論與建議

隧道內車流速度變動和車輛型式和總數變動乃是兩種個與遲滯效應相關的重要因素。本研究顯示隧道內車輛型式和總數的變動的遲滯效應在車流型態轉變的過渡期間很明顯，此時穩態模式與暫態模式所得結果會有很大差異。一旦系統流達到動態穩定後，暫態模式所得結果會顯現遲滯效應而穩態模式則無。除此以外，兩模式所算得之引致風速平均值會相同。由於車流速度通常遠高於風速，當車速在其週期性變動時會造成引致風速的逐漸提高(其風速平均亦然)，然後整個系統將非常緩慢地趨近動態平衡狀態。因此，穩態模式與暫態模式通常會有較大差別。實際公路隧道內的車流速度的變動可以由不同車輛以不同速度通過隧道或同一部車以變動車速通過隧道所造成，這些雖是隨機的現象，卻是實際存在。由以上討論可知，在系統狀態轉換的過渡期若我們忽略動態現象時通常會造成引致風速的高估。而當系統在動態平衡狀態下，若我們忽略車速的動態效應時將造成引致風速的低估。隧道內氣流對車流遲滯效應的進一步完整分析與探討應以採用求解以非慣性座標所列的流場數學模式或是採用變動網格的途徑較直接與嚴謹。

#### 五、參考文獻

1. Gunnar Barrefors, 1996, "Air pollutants in road tunnels", The Science of the Total Environment 189/190 pp.431-435.

#### 計畫成果自評

本研究藉由隧道一維與簡易三維氣流場模式來分析解釋隧道內氣流對車流的遲滯效應。主要釐清車速週期性變動和車輛型式和總數的週期性變動兩因素所造成的氣流遲滯反應現象。目前研究僅及於遲滯現象的總表現，至於發生於其三維流場之細部現象則有待進一步以更完整的模式來分析才能顯現。本研究所得概念與結果可提供隧道設計或管理單位的參考。

# 可供推廣之研發成果資料表

可申請專利

可技術移轉

日期：94 年 10 月 31 日

<b>國科會補助計畫</b>	計畫名稱：公路隧道內氣流與實際動態車流間之遲滯效應研究 計畫主持人：張鴻明 計畫編號：NSC 93-2212-E-034-002          學門領域：E2
<b>技術/創作名稱</b>	公路隧道內變動中的車流速度對其引致氣流速度的效應
<b>發明人/創作人</b>	張鴻明
<b>技術說明</b>	實際公路隧道內的車流速度的變動主要是因不同車輛以不同速度通過隧道所造成，這些雖是隨機的現象，卻是實際存在。在系統狀態轉換的過渡期若我們忽略動態現象時通常會造成引致風速的高估，而當系統在動態平衡狀態下，若我們忽略車速的動態效應時將造成引致風速的低估。
	Actually, the average speed of vehicles in a highway tunnel always varies with time due to the different speeds between vehicles traveling through the tunnel. As the traffic flow shifts to different status, ignoring the dynamic nature would make us over predict the induced wind speed. However, under periodic steady state, ignorance of the dynamic nature of the vehicle speed would make us under predict the induced wind speed.
<b>可利用之產業 及 可開發之產品</b>	交通建設；隧道通風工程 公路隧道引致風速的估算新概念
<b>技術特點</b>	當公路隧道通風系統在動態平衡狀態下，若我們忽略車速的動態效應時將造成引致風速的低估。
<b>推廣及運用的價值</b>	隧道通風量的正確估算對用路人的建康相當重要，而當我們以車流量估算公路隧道內之引致氣流速度時，若忽略其實際存在的動態變動，將會使估算結果有偏差。本案所提概念有助於我們正確認識該估算值。

- ※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
- ※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
- ※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。