

# 輕型車微觀油耗模式之發展與驗證： 以實車上路資料為基礎<sup>1</sup>

## DEVELOPING AND VALIDATING MICRO FUEL CONSUMPTION MODELS FOR LIGHT DUTY VEHICLES BASED ON REAL DRIVING DATA

鍾易詩 Yi-Shih Chung<sup>2</sup>

林欣慧 Shin-Hui Lin<sup>3</sup>

(105 年 9 月 13 日收稿，106 年 3 月 1 日第 1 次修改，  
106 年 6 月 2 日第 2 次修改，106 年 9 月 11 日定稿)

### 摘 要

隨著車載排放量測設備技術的演進，以及歐盟輕型車輛實車道路測試程序即將規劃上路，利用實車上路瞬時油耗與行車資料發展微觀油耗模式，將是未來幾年的趨勢。本研究利用工業研究院蒐集之實車上路資料，發展並比較常見之輕型車微觀油耗模式，同時驗證其模式預測力。除普通最小平方迴歸，本研究亦發展分量迴歸，以了解重要變數在不同油耗分量下對油耗的影響。研究結果發現，國內外常用之速度加速度油耗模式，其型態雖然簡單且具一定配適程度，但模式交互作用項多，易產生共線問題，導致模式校估值較為敏感，其配適結果亦容易受資料取樣頻率影響。若以車輛比功率替換速度與加速度之高次與交互作用項，不但可保有類似的模式配適度，且能避免共線問題，亦可同時考量坡度與空氣動力的影響，應用

- 
1. 本文為財團法人工業技術研究院與交通大學運輸研究中心合作計畫「針對道路即時耗能碳排濃度進行建檔與處理」之部分研究成果。
  2. 國立交通大學運輸與物流管理學系副教授（聯絡地址：10044 臺北市忠孝西路 1 段 118 號 4 樓 國立交通大學運輸與物流管理學系；電話：02-23494963；E-mail：yschung@nctu.edu.tw）。
  3. 工業技術研究院機械與機電系統研究所環保與能源部經理。

範圍較有彈性。油門開度與引擎轉速是車載量測設備蒐集訊號中對油耗影響最為顯著的變數，為有效降低油耗，當車輛具一定行駛速度時，駕駛人不宜大幅改變油門開度，而在交通壅塞時，則應特別注意控制引擎轉速。

**關鍵詞：** 油耗；車輛排放量測設備；輕型車；分量迴歸

## ABSTRACT

*The introduction of portable emission measurement system (PEMS) and the proposal of European Union real driving emission regulations (i.e., (EU) 2016/427 and (EU) 2016/646) have made micro fuel consumption investigations based on real driving data an oncoming issue. This study develops and compares three popular micro fuel consumption models based on real driving data collected by the Industrial Technology Research Institute using both ordinary least squares and quantile regression. The analysis results showed that although the most commonly adopted speed and acceleration models were simple and provided certain model fitting performance, the results were easily affected by sampling frequency. The models also suffered multicollinearity issues due to its complicated interactive terms. When high-order and interactive terms of speed and acceleration variables were replaced with vehicle specific power, the aforementioned issues could be resolved. Additionally, throttle and rpm (revolutions per minute) were found to be the most influential variables among the collected PEMS variables. To effectively reduce fuel consumption, drivers are recommended to avoid changing their throttles abruptly in non-congested traffic, and to carefully control their rpm in congested traffic.*

**Key Words:** Fuel consumption; Portable emission measurement system; Light duty vehicle; Quantile regression

## 一、前言

運輸部門為大部分國家排放溫室氣體的主要來源之一，其中又以公路運輸的占比最高。由於機動性 (mobility) 是現代都市經濟發展不可或缺的要害，在可預見的未來，機動車輛在都市交通運輸將持續扮演著必要的角色。如何兼顧經濟發展與環境保護，是國家、社會與個人須共同面對的課題，而了解車輛油耗與碳排的關鍵影響因素，則是發展永續交通規劃、管理、控制以及教育的必要程序。

車輛的油耗與碳排受到許多因素的影響，包括駕駛行為、車輛特性、環境特性以及車流特性等。早期車輛油耗與碳排的研究受限於資料來源，多以巨觀 (macro) 的角度建立模式，例如將駕駛行為分作數個駕駛循環 (driving cycles)，再分析各個循環的油耗與碳排特

性 (Barlow 等人<sup>[1]</sup>)。此等巨觀模式雖然簡單，且實驗測試亦顯示同樣的駕駛循環有著類似的車輛動力需求，但由於影響車輛油耗與碳排的因素眾多，相同的駕駛循環不一定有類似的油耗與碳排型態 (Alessandrini 等人<sup>[2]</sup>)。另一方面，巨觀模式通常只能獲得較為簡化的結論 (例如行駛速度在何範圍內更為省油)，以瞬時 (instantaneous) 油耗與碳排的資料來捕捉影響因素與關係，可提供更多有用的資訊 (Ahn 等人<sup>[3]</sup>)。

過去已有少數研究以瞬時油耗與碳排資料發展微觀模式，但礙於量測設備的限制，車輛油耗與碳排資料蒐集多在實驗室內進行；亦即在一定的環境溫度、溼度等條件下，以車體動力計模擬車輛於實際道路行駛之阻力，藉以測量不同行駛速度、加速度下，對車輛碳排、油耗或其他空氣污染物的影響。實驗室內的資料蒐集雖可有效控制外在因素，但其分析出之結果在實際道路駕駛上的適用性則無法明確得知。有鑑於近期國外陸續發生的幾起實驗室油耗與污染測試值與實際上路數據差異過大的事件，自今 (2017) 年起，歐盟也將對輕型車輛 (light duty vehicle, LDV)，逐步導入車載量測系統 (portable emission measurement system, PEMS) 實車測試的管制法規，即是利用 PEMS 設備量測設備裝設於車輛上，進行實際上路油耗與污染排放 (real driving emission, RDE) 的測試規定。由此可見實際上路量測油耗與碳排是未來幾年重要的趨勢，如何應用車載排放量測系統建立微觀油耗與碳排模式亦成為重要課題。

國內在近年已有少數以車載排放量測系統進行之油耗與碳排實驗，包括交通部運輸研究所自 2007 年起針對小客車、國道客運、市區公車以及機車之車輛動態能源消耗與溫室氣體排放特性之研究 (林國顯等人<sup>[4]</sup>)，以及行政院環境保護署 (以下簡稱環保署) 委託財團法人車輛研究測試中心 (ARTC) 以及工業研究院機械與系統研究所 (以下簡稱工研院機械所) 所進行之研究 (林欣慧<sup>[5]</sup>)。前述研究皆利用車載排放量測系統蒐集實驗資料、發展油耗與碳排模式，亦獲得不錯之模式配適度；然而，微觀油耗及碳排模式尚在發展階段，近年較常被提出之 VT-Micro (virginia tech microscopic model) 模式，雖已在林國顯等人之研究<sup>[6]</sup>獲得部分驗證，但其他如美國環保署建議之車輛比功率 (vehicle specific power, VSP) 模式，或以車上診斷系統 (on-board diagnostic, OBD) 訊號為主之模式，並未見應用於國內車載排放量測系統之大規模蒐集資料，國外文獻亦未見較為完整之微觀油耗模式比較分析。因此，本研究以工研院機械所蒐集之資料為基礎，分析常見微觀輕型車油耗模式應用在國內資料之適用性並比較其差異，同時找出影響輕型車油耗之關鍵因子與其關係，研究結果有助於政府部門研擬減少車輛油耗之相關對策。

本研究的文章架構如下，第二節首先回顧常見之輕型車微觀油耗模式，第三節則介紹本研究所使用之工研院機械所資料，第四節發展不同微觀油耗模式並驗證其預測能力，最後在第五節提出本研究之結論與建議。

## 二、常見之輕型車微觀油耗模式

過去已有許多學者或政府機構提出不同的輕型車油耗與碳排模式，常見的模式如美國環保署的 MOVES (motor vehicle emission simulator) 以及加州政府的 EMFAC (emission factor) 模式，此類模式較適用於大規模區域之油耗與碳排估算，然不一定適用於微觀油耗與碳排分析 (Rakha 等人<sup>[7]</sup>)。目前已有部分研究提出輕型車微觀油耗模式，通常採用的變數包括速度與加速度、車輛比功率 (vehicle specific power, VSP) 以及車上診斷系統 (on-board diagnostic, OBD) 訊號等 3 類，本節即依此 3 類模式進行回顧。

### 2.1 速度加速度模式

速度與加速度為車輛駕駛最直接的行為績效表現，亦是交通工程與控制的重要變數，因此過去有部分學者提出以速度與加速度為主之油耗與碳排分析模式，其中最著名的當屬 Ahn 等人<sup>[3]</sup>提出之 VT-Micro 模式 (virginia tech microscopic model)。VT-Micro 模式認為速度加速度與油耗或碳排的關係並非線性，且除了速度的影響外，加速度亦扮演重要角色；該模式除了考量速度與加速度的主效果，亦包含各階的交互作用效果，如式 (1) 所示：

$$MOE_e = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (K_{i,j}^e \times s_i \times a_j) \quad (1)$$

其中  $MOE_e$  為油耗或碳排等測量值、 $K_{i,j}^e$  為校估之參數、 $s_i$  為瞬時速度、 $a_j$  為瞬時加速度。Ahn 等人<sup>[3]</sup>為此模式對油耗或碳排具一定解釋力，但在少數情況下可能產生負的被解釋變數估計值。為避免此一不合理現象，其另建議式 (1) 之對數轉換 (log-transformed) 模式，如式 (2)：

$$\ln(MOE_e) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (K_{i,j}^e \times s_i \times a_j) \quad (2)$$

Ahn 與 Rakha 在以式 (2) 分析油耗與污染物發現，由於車輛在正向加速時輸出馬力而負向加速時不會輸出馬力的差異，造成式 (2) 在高速段對污染物 (包括 HC、CO 與 NOx) 的配適有相對顯著的誤差，因此 Rakha 等人<sup>[7]</sup>另建議可依加減速行為不同，分開建立模式；亦即依式 (2)，分別建立非負加速度 ( $a \geq 0$ ) 與負加速度 ( $a < 0$ ) 模式。

Ahn 等人<sup>[3]</sup>使用 Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 在實驗室蒐集之資料，發現上述以瞬時速度與加速度為解釋變數之多項迴歸式，其判定係數可達 0.7 以上。Ahn 之研究團隊進一步利用美國環保署在 1997 年分別在俄亥俄州 (Ohio) 及密西根州 (Michigan) 蒐集之實驗室資料驗證 VT-Micro 模式，其研究結果亦發現模式預測誤差率可保持在 17% 以內 (Rakha 等人<sup>[7]</sup>)。

國內最常見的微觀油耗與污染源排放模式，可能為中華經濟研究院接受交通部運輸研究所委託之研究成果 (林國顯等人<sup>[4,6]</sup>)。該研究參考 VT-Micro 模式提出一個純粹以車輛

行駛速度為解釋變數之模式：

$$MOE_e = \sum_{i=0}^3 (K_i^e \times s_i) \quad (3)$$

$$\ln(MOE_e) = \sum_{i=0}^3 (K_i^e \times s_i) \quad (4)$$

其變數與參數定義同前述之 VT-Micro 模式，由式 (3) 及式 (4) 可發現，中華經濟研究院發展之模式，如同 VT-Micro 模式為 3 次多項式模式，但並未包含加速度項，模式較為簡潔。其以國道 1、2 號、省道 1、74 號以及臺北市建國高架道路實測蒐集資料發展油耗與不同空氣污染排放物之模式，分析結果發現油耗、二氧化碳以及 NO<sub>x</sub> 適合式 (3) 之線性模式，而一氧化碳與 THC 則適合式 (4) 之對數轉換模式，除了一氧化碳之配適度 (即迴歸  $R^2$  值) 約介於 0.6~0.7，其餘模式之配適度皆可到達 0.7 或以上。在其次年 (2009) 計畫中，亦針對市區道路 (臺中市文心路、文心南路) 進行測試，並同樣採用式 (3) 的型式發展模式，其在全國道路之油耗模式配適度亦有 0.61 (林國顯等人 [6])。

由以上回顧可知，速度加速度為一簡便但具一定解釋力之模式，然而 Ahn 等人 [3] 與 Rakha 等人 [7] 的模式驗證皆使用實驗室蒐集之資料，而中華經濟研究院則更進一步採用實際上路排放 (RDE) 的方式蒐集與分析資料；相對於以實驗室資料為基礎之研究成果 [3,7]，中華經濟研究院建議之純粹速度多項式配適略差，但與 Ahn 等人 [3] 建議之配適值相去不遠。

## 2.2 車輛比功率模式

速度加速度模式雖簡單且直接與交通管理連結，但並未考慮道路特性 (尤其是坡度) 對油耗與碳排的影響，因此有專家提出車輛比功率概念，其通常定義為每單位車重之車輛引擎功率，單位為每公斤 (或噸) 千瓦。大部分研究計算車輛比功率都是採用美國環保署建議之公式 (Wang 等人 [8])：

$$VSP(\text{kW/ton}) = 2.73 \times \sin(\text{slope}) \times v + 0.085 \times v \times a + 0.0593 \times v + 0.0000653 \times v^3 \quad (5)$$

其中 slope 代表道路坡度 (%)，v、a 分別是速度 (英哩/每小時) 與加速度 (英哩/每小時/每秒)。

Wang 等人 [8] 於中國大陸蒐集 10 台車的實路排放資料，並以蒐集到之速度、加速度與坡度資料計算車輛比功率，其研究發現車輛比功率與油耗的關係可分成低 ( $VSP \leq 15$ )、中 ( $15 < VSP \leq 32$ )、高 ( $VSP \geq 32$ ) 等 3 群。就此 3 群分別以車輛比功率對油耗進行迴歸分析，其配適度 ( $R^2$  值) 皆在 0.9 以上。國內則曾有鼎環顧問工程公司接受行政院環保署委託，蒐集 2002 年出廠的 Camry、2004 年 Altis、2006 年 Focus、2008 年 Lancer 以及 2010 年 Camry 等 5 台車輛在臺北市區主要幹道之排放資料，該研究將計算出之車輛比功率分成 22 群 (VSP mode)，再將每群內之資料進行平均後，利用車輛比功率作為解釋變數，尋找車輛

比功率與油耗碳排的關係。其研究結果發現，車輛比功率對油耗與一氧化碳排放的解釋力，皆可達 0.83 以上(潘一誠等人<sup>[9]</sup>)。

相對於速度加速度模式，以車輛功率比為主的模式具有考慮道路坡度、空氣動力牽引力、輪胎轉動阻力等因素的優點(Frey 等人<sup>[10]</sup>)，在以車輛比功率進行分群後所建立之模式，亦有不錯的配適結果，然而車輛比功率的分群方式，必須依地區與車輛特性不同進行客製化，始具有較佳的解釋能力(Xu 等人<sup>[11]</sup>；蔡承祐<sup>[12]</sup>)，其他地區研究所建議之分群方式是否適用於國內仍屬未知。

### 2.3 車上診斷系統訊號模式

除了速度加速度以及車輛比功率模式外，微觀之油耗碳排模式，亦常以車上診斷系統訊號所抓取之資料進行分析，例如 Ericsson<sup>[13]</sup> 除了使用速度、加速度外，亦利用車上診斷系統找出 62 個可能影響油耗的參數項，其中 44 種與速度、加速度有關、18 種與引擎速度及檔位選擇有關，最後再利用因子分析萃取出對油耗有顯著影響的 16 個指標。

相對於 Ericsson<sup>[13]</sup> 使用大量的 OBD 訊號，亦有研究提出車上診斷系統中與油耗最相關的訊號為油門開度與引擎轉速。油門(throttle，或稱節氣閥)開度對駕駛人而言，即類似油門踏板的深度，駕駛人透過油門踏板控制節氣閥開度，再由行車電腦根據內建之程式與感應器回傳之眾多回饋訊號(例如水溫、空氣流量、引擎轉速、含氧感知器等)來決定噴油量；由此可知油門開度與油耗具有直接相關，但各家廠牌車種的行車電腦控制程式與參數設定不同，對油耗的影響亦會不同。目前大部分車輛已使用電子油門來控制其開度，車輛速度與油門開度的關係，並不如使用傳統拉線油門的車輛直接，此也隱含以速度為主要變數的傳統微觀油耗模式(包括 VT-Micro 模式與車輛比功率模式)，在分析電子油門車輛油耗時有一定的限制。Browne<sup>[14]</sup> 將引擎轉速與行車速度作為影響即時行車油耗的主要變數，並建議對油耗取自然對數，以二階多項式的模式發展型式；其以實驗室資料蒐集結果進行分析，迴歸模式整體配適度( $R^2$  值)可達 0.9。Lee 等人<sup>[15]</sup> 利用 OBD II 蒐集車輛於實際道路行駛資料，並發展以油門開度與引擎轉速為主要解釋變數的迴歸模式；其研究結果發現，單純以油門開度為解釋變數的簡單線性迴歸模式，即可讓整體配適度( $R^2$  值)高達 0.88，而以引擎轉速為解釋變數的二階多項式模式，亦可解釋 76% 的油耗變異。

### 2.4 小結

由以上文獻回顧可知，速度加速度、車輛比功率以及車上診斷系統訊號等 3 類模式，在過去研究皆有不錯的解釋能力，但各類模式亦有其限制，例如速度加速度模式的型式簡單，但未考慮坡度等環境因素，其適用路段可能有一定限制；歐盟的實車測試法規草案即明定，測試路段必須包含都市、郊區及快速道路等不同路型，單純的速度加速度模式可能無法完全適用。車輛比功率的分群門檻值必須依地區與車輛特性調整，國內卻少有研究，而美國環保署建議之車輛比功率轉換公式是否適用國內環境亦較少被探討。車上診斷系統

訊號眾多，何者更適合解釋國內的駕駛行為與油耗型態；而國內外文獻較少有採用同一資料比較分析各類微觀油耗模式，對於各類模式的預測績效亦少有著墨，同樣值得探討。

### 三、實驗設計與分析方法

為分析速度加速度、車輛比功率以及車上診斷系統訊號與車輛油耗的關係，本研究採用工研院機械所於 2015 年 8 月 3 日至 8 月 7 日實車駕駛蒐集之資料，其實車資料蒐集過程、車型、本研究使用變數以及分析方法介紹如下。

#### 3.1 測試路段與時間

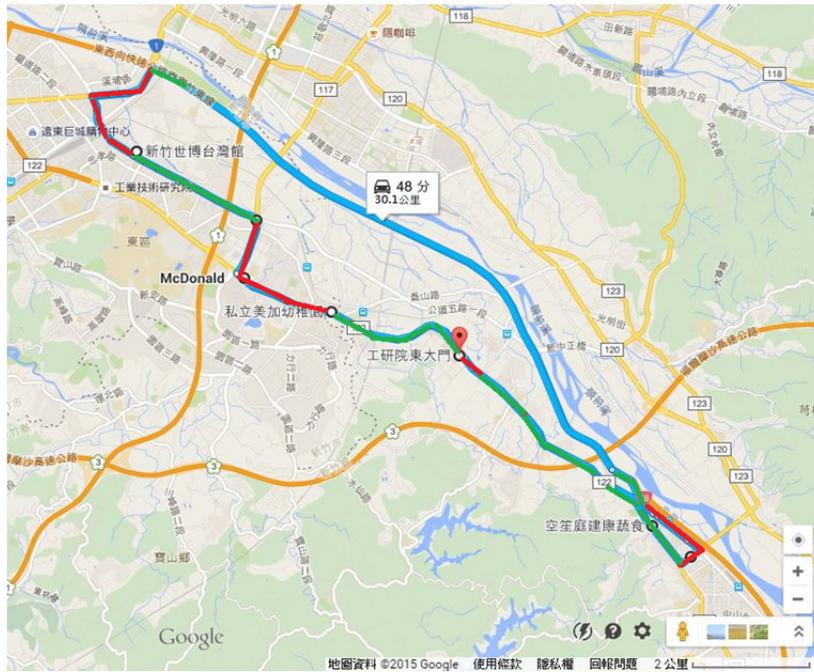
工研院機械所於 2015 年 8 月 3 日至 8 月 7 日實車駕駛蒐集之資料，駕駛路線之設計依據歐盟實車測試草案 Regulation (EC) No.692/2008 Annex IIIA-Appendix 1 Draft 規範，在都市 (urban)、郊區 (rural) 與高快速公路 (motorway) 行駛路段長度各約占 1/3，占比誤差為上下 10%。該規定定義輕型車測試車輛在都市 (urban)、郊區 (rural) 與高快速公路 (motorway) 的測試速度範圍分別為 60 kph 以內、60 至 90 kph 之間以及高於 90 kph。在此規定下，本研究參考公路總局之路線設計標準分類，以都市計畫區 4 級路 (最高設計車速 50 kph) 代表都市區段、平原區 3 級路 (最高設計車速 80 kph) 代表郊區區段、平原區 2 級路 (最高設計車速 100 kph) 代表快速公路區段，並於非尖峰時段蒐集測試資料。

本研究設計之詳細駕駛路線為工研院東大門起始，在行駛約 30.1 公里、共花費約 50 分鐘後回到工研院東大門。行駛路線中，都市路段包含新竹中學路口起始至右轉縣道 117、縣道 117 至公道五路左轉、臺灣世博館接往 68 號快速道路以及北興路至縣道 123 右轉，共計約 9.6 公里、占總路程 (32.8%)；郊區 (rural) 路段包含工研院東大門至新竹中學路口、公道五路至臺灣世博館以及自強路口往縣道 122 抵達工研院東大門，共計約 9.5 公里、占總路程 (32.4%)；高快速公路 (motorway) 路段則為 68 號快速道路至該道路之竹東與北興路匝道 (11.0 公里)、占總路程 (34.8%)。整體行車路線請參閱圖 1，其中紅色線為都市路段、綠色線為郊區路段、藍色線為高快速路段。在本研究測試路段中，中華路、公道五路及縣道 117 號為雙向六線道，具實體中央分隔及快慢分隔之道路；快速道路 68 號及縣道 122 號為雙向四線道，同樣具實體中央分隔及快慢分隔之道路；而縣道 123 號及北興路雙向四線道，具中央標線分隔及快慢分隔之道路。每日測試起始時間為早上 10 點與下午 2 點，共蒐集 10 筆資料，惟其中 3 筆資料之天候為下雨，本研究僅取其中於晴天環境蒐集之 7 筆資料。

在所使用的 7 筆資料中，本研究主要以前 5 筆資料作為模式發展之訓練資料，後兩筆資料則作為模式驗證資料。工研院機械所之原始資料每筆約 2 萬 6,000 至 2 萬 9,000 筆，每筆資料內皆含少數 (約占 0.52%~0.97%) 資料的油耗為負值，視作異常資料並予以刪除，最後使用之資料樣本數綜整如表 1。

表 1 資料樣本數

	訓練資料					驗證資料	
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
原始資料	27,798	27,609	26,735	28,066	26,254	28,141	29,041
篩選後資料	27,529	27,436	26,530	27,871	26,025	27,995	28,904
刪除筆數 (%)	0.97	0.63	0.77	0.69	0.87	0.52	0.47



資料來源：林欣慧 [5]。

圖 1 測試路線

### 3.2 測試車型與駕駛

本研究所稱之輕型車，乃是參考美國訂定排放標準（即 corporate average fuel economy, CAFE）對車輛之分類標準，為車輛全負荷最大允許重量（gross vehicle weight rating, GVWR）小於或等於 8,500 磅（約 3,855.5 公斤）之車輛。本研究在選定測試車輛時，考慮以下 4 因素：(1) 在法規對應上是否符合國內污染 5 期排放標準；(2) 是否能符合車載量測系統（PEMS）之安裝空間限制；(3) 是否可在不改裝車體的原則下安裝管線；以及 (4) 車型代表性。根據以上 4 個考量因素，本研究選擇 2012 年 10 月以後販售之休旅車型，其中國瑞 Toyota Wish 2.0 在 2013 至 2014 年共銷售 32,959 輛，為同型車款市占率排名最高之

車輛，應具一定市場代表性。根據國內能源局 2012 年 10 月所公布之資料，本研究採用之測試車型 Toyota Wish 2.0 之參考車重為 1,560 公斤（即車輛淨重加上測試標準模擬載重，美規為 136 公斤，歐規為 100 公斤），符合 CAFE 對輕型車之能源法規定義。本研究使用之 Toyota Wish 2.0 車型為 2015 年出廠之車輛，最大扭矩為 3,600 轉輸出 19.1 公斤米，首次測試前里程為 2,189 公里，使用油品為車輛實驗室之測試用油（其油品密度：0.75 公斤／升、淨熱值：42,249.5 千焦耳／公斤），該車型亦符合國內汽油汽車污染 5 期排放標準，所有測試資料皆由同一部車輛及同一位駕駛者實驗蒐集而得。

### 3.3 測試設備與程序

本研究使用之資料乃利用車載排放量測系統（型號為 HORIBA OBS One）以及車上診斷系統（OBD）蒐集而得。HORIBA 為英國文獻主要之選用廠牌，亦為中華經濟研究院研究（林國顯等人<sup>[4,6]</sup>）選擇使用之廠牌，而 OBS One 為其目前最新之產品，符合美國聯邦法規 CFR Part 1065 subpart J 以及歐盟法規 EC NO 582/2011 與聯合國規範（UN ECE R83）等規範要求。在進行實驗時，空調設備依歐盟規範，測試時全程開啟並設定為 25 度恆溫。在實車測試前後該車輛同時也於實驗室進行設備驗證測試，比較實測前後的差異，以確保設備穩定度，並可驗證本研究所使用之資料具備一定準確度。

### 3.4 資料變數

本研究所使用之油耗變數即為 HORIBA OBS One 每 1 秒蒐集 10 次之燃油消耗重量（克），而解釋變數則包括：

1. 環境變數：溫度（攝氏）、濕度（%）、大氣壓力（千帕斯卡）、海拔高度（公尺）、經緯度；
2. 車輛變數：車速（公里／小時）、排氣流率（立方公尺／分）、排氣溫度（攝氏）、排氣壓力（千帕斯卡）、引擎轉速（rpm）、進氣溫度（攝氏）、空氣流量（公克／秒）、油門開度（%）。

上述變數資料在 HORIBA OBS ONE 的原始取樣頻率也皆為 10 HZ；本研究分析車輛比功率所需要的坡度資料，乃是利用 GPS 內記錄的經緯度與高度，以 R 軟體內的“geosphere”套件計算求得。

### 3.5 分析方法

過去文獻在發展 VT-Micro、車輛比功率以及 OBD 訊號模式時，大多採用普通最小平方方法（ordinary least squares, OLS），普通最小平方估計為基本之計量經濟方法，在此不再贅述。由於許多與油耗相關的解釋變數都與行駛速度、加速度有關，為了解所發展模式是否有共線的問題，本研究發展最小平方迴歸時，皆有檢測其變異膨脹因子（variance inflation factor, VIF），若所有變數值之 VIF 值的平方根在 2 以下，則稱該模式無共線問題。

由於最小平方迴歸僅估計解釋變數在條件平均數下對油耗的影響，本研究亦發展分量迴歸（quantile regression）進一步分析解釋變數在不同油耗分量（quantile）下與油耗的關

係；而了解不同油耗程度下各變數與油耗的關係，有助於提供更明確的節能駕駛建議。另一方面，瞬時資料因取樣頻率大、時間間隔短，實車上路環境稍有變動可能造成資料數據相對大幅變動，而分量迴歸的估計較不受被解釋變數異常值的影響 (Koenker 與 Hallock<sup>[16]</sup>)，因此亦適用於本研究欲發展之微觀油耗模式。

假設油耗 (Y) 的累積分配函數為  $F(Y) = Prob(Y \leq y)$ ，其  $\tau^{th}$  的分量可定義為  $Q(\tau) = \inf\{y: F(y) \geq \tau\}$ ，其中  $0 < \tau < 1$ 。假設一組油耗觀察值  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  的  $\tau^{th}$  分量為  $\xi(\tau)$ ，則分量迴歸即在求解以下最佳化問題：

$$\min_{\xi \in R} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(y_i - \xi)$$

其中  $\rho_{\tau}(z) = z(\tau - I(z < 0))$ ， $I(\cdot)$  為指示函數 (indicator function)。在特定分量的迴歸係數值即為：

$$\hat{\beta}(\tau) = \operatorname{argmin}_{\beta \in R^p} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(y_i - x_i' \beta)$$

在誤差 (error) 獨立且相同機率分布 (即 i.i.d.) 的假設之下， $\hat{\beta}(\tau)$  服從常態分配且其共變異矩陣為  $\omega^2(\tau)(X'X)^{-1}$ ，其中  $\omega^2(\tau) = \tau(1 - \tau)/f^2(F^{-1}(\tau))$  而  $f(F^{-1}(\tau))$  為在第  $\tau^{th}$  分量之誤差分配的機率密度；此共變異矩陣與最小平方迴歸結果類似，唯一差別在於分量迴歸之  $\omega^2(\tau)$  在最小平方迴歸為  $\sigma^2$  (Koenker 與 Hallock<sup>[16]</sup>)。本研究在發展分量迴歸時，共發展 81 個分量： $\{\beta_{\tau}, \tau = 0.10, 0.11, 0.12, \dots, 0.9\}$  之迴歸，並以 R 軟體套件 “quantreg” 校估分量迴歸。此套件之參數校估程序乃是植基於專門校估最小離均差迴歸 (least absolute deviation, LSD 或稱 L1 norm condition) 的 Barrodale and Roberts 演算法，而特定分量迴歸係數信賴區間之估算，乃是使用反推等級檢定 (inversion of rank tests) 的方法 (Koenker<sup>[17]</sup>)，此估算方法亦適用於誤差非 i.i.d. 的情況。

## 四、輕型車微觀油耗模式之發展與驗證

### 4.1 資料基本樣態

#### 4.1.1 主要變數基本統計

本研究使用之 7 筆資料主要變數基本統計綜整如表 2。由表中可以發現，7 筆使用資料中駕駛行為變數的平均值與標準差差異不大，包括車輛行駛速度平均保持在每小時 37 公里、加速度為 0、油門開度平均在 20%，以及引擎轉速平均在 1,300 轉左右，僅第 5 筆資料之平均速度略高於而加速度略低於其他筆資料。在環境變數部分，第 1、3 與 6 筆的平均環境溫度相對較高，而第 2、3 與 6 筆的平均環境溼度相對較低；雖然此 7 筆資料蒐

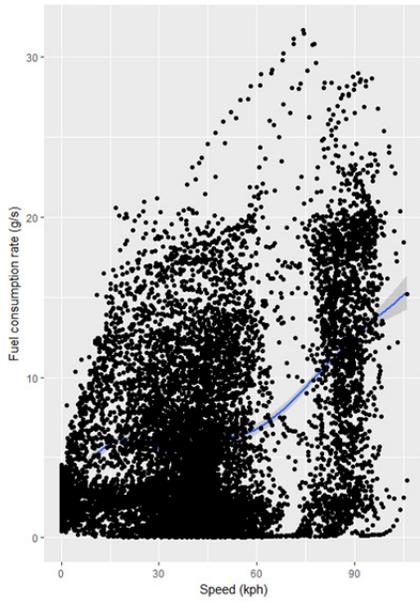
集時間相近，但環境溫度與溼度仍具些微變化，此變異對發展油耗模式具一定助益。在油耗方面，此 7 筆資料的平均油耗約介於每秒 5.9 至 6.1 克，僅第 7 筆資料的平均油耗為每秒 6.4 克，略高於其他筆資料。

表 2 主要變數基本統計：平均值與標準差

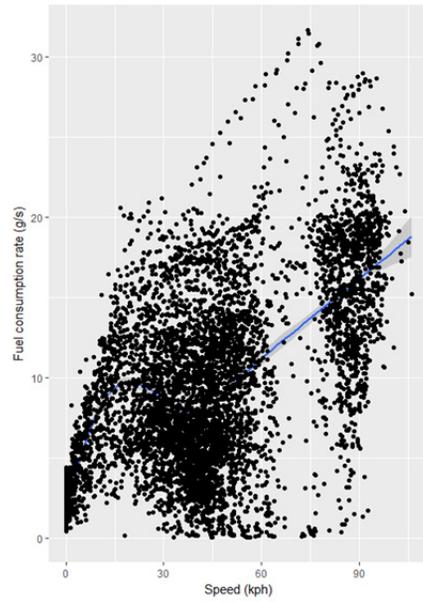
	訓練資料					驗證資料	
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
油耗 (克/秒)	5.963 (6.089)	5.879 (5.576)	5.958 (5.687)	6.071 (5.619)	6.156 (5.832)	6.180 (5.705)	6.421 (5.980)
速度 (公里/小時)	37.644 (29.868)	37.888 (28.836)	39.140 (28.125)	37.285 (29.173)	39.835 (28.530)	37.124 (29.281)	36.033 (30.040)
加減速度 (公里/小時 /秒)	0.002 (1.720)	0.001 (1.787)	0.002 (1.652)	0.003 (1.675)	-0.004 (1.749)	0.000 (1.685)	0.003 (1.668)
油門開度 (%)	20.370 (5.245)	20.616 (5.204)	20.585 (5.183)	20.284 (4.978)	20.497 (5.258)	20.469 (5.305)	20.491 (5.642)
引擎轉速 (1000 rpm)	1.309 (0.457)	1.341 (0.421)	1.343 (0.436)	1.298 (0.432)	1.348 (0.448)	1.315 (0.462)	1.319 (0.478)
環境溫度 (攝氏)	36.587 (1.771)	34.997 (0.982)	37.964 (1.370)	34.736 (1.470)	33.173 (1.402)	37.015 (0.933)	35.446 (1.332)
環境溼度 (%)	44.791 (4.676)	42.325 (2.475)	38.184 (2.466)	46.749 (4.216)	56.556 (4.977)	41.409 (2.859)	48.287 (3.141)

註：此表資料皆以 1HZ 取樣頻率計算而得。

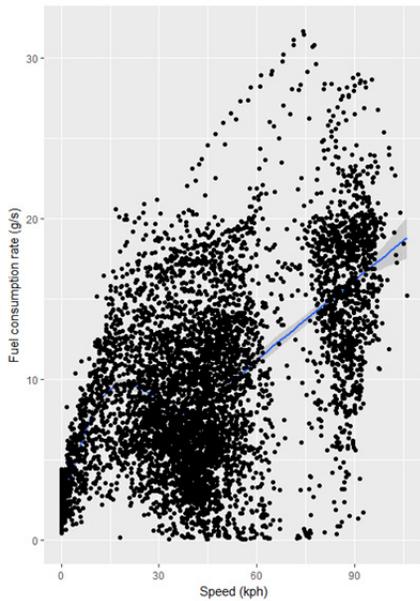
本研究進一步繪製主要變數與油耗之間的關係如圖 2。圖 2(a) 顯示，速度與油耗呈現正向的關係，速度愈快，耗油率愈高，但在時速約每小時 40 公里時耗油率略為下降，在約每小時 50 公里時再繼續上升。本研究進一步依加速度的正負向進行拆解，結果如圖 2(b) 與圖 2(c) 所示。由圖 2(b) 可看出，在非負加速度時，速度與油耗的關係約略為正向；而由圖 2(c) 可看出，在負加速度時，速度與油耗的正向關係僅出現在高速段（約速度大於 60 kph）。前述的正向關係雖因本研究的樣本數大，其 95% 信賴區間狹窄，但其散布點仍顯示出一定的變異，且此變異隨速度增加而擴大。加減速度與油耗的關係基本上也是正向關係（圖 2(d)），且在加減速為零左右迅速變化；減速時油耗急劇下降，加速時油耗急劇上升。油門開度與耗油率亦呈正向關係（圖 2(e)），且線性趨勢十分明顯。引擎轉速與耗油率的正向關係則呈現類似 S 曲線之非線性關係（圖 2(f)），且在 1,000 至 1,600 轉之間呈現較不規則的變化。



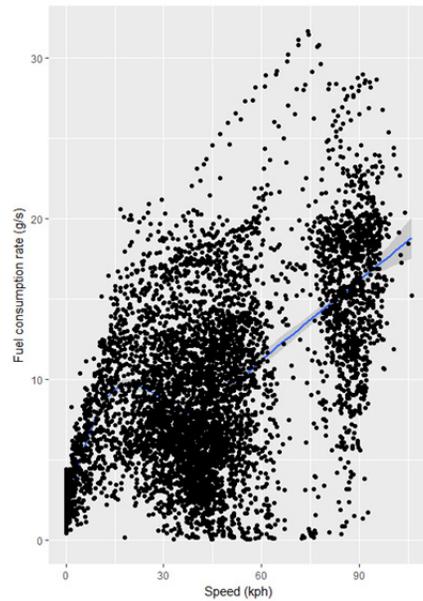
(a) 速度 (kph)：整體資料



(b) 速度 (kph)：非負加速度



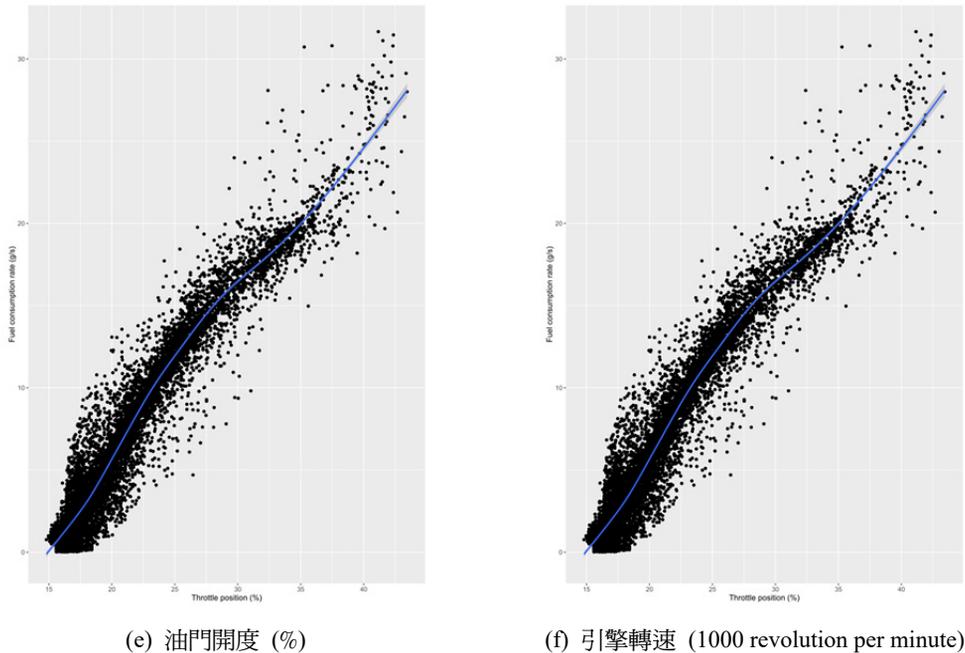
(c) 速度 (kph)：負加速度



(d) 加減速度 (km/hr/sec)：油耗取對數

註：以 5 筆訓練資料 (1HZ) 綜整後之繪圖。

圖 2 主要變數與耗油率 (克/秒) 的關係



(e) 油門開度 (%)

(f) 引擎轉速 (1000 revolution per minute)

註：以 5 筆訓練資料 (1HZ) 綜整後之繪圖。

圖 2 主要變數與耗油率 (克/秒) 的關係 (續)

#### 4.1.2 車輛比功率

本研究進一步分析含有綜整坡度、空氣動力拉力與阻力等因素的車輛比功率變數。本研究使用美國環保署建議的公式 (即式 (7), Wang 等人<sup>[8]</sup>) 進行轉換, 並依美國環保署建議以每秒 (1HZ) 為單位進行分析。由圖 3(a) 之散布圖可以發現, 車輛比功率與耗油率為正向關係, 並可粗分為低 VSP 與高 VSP 兩群資料; 亦即當 VSP 增加時, 耗油率亦隨之增加, 然增加至一門檻值後, 其耗油率即迅速下降, 並再次爬升 (如圖 3(a) 之平滑曲線), 此結果與 Wang 等人<sup>[8]</sup> 研究結果類似。

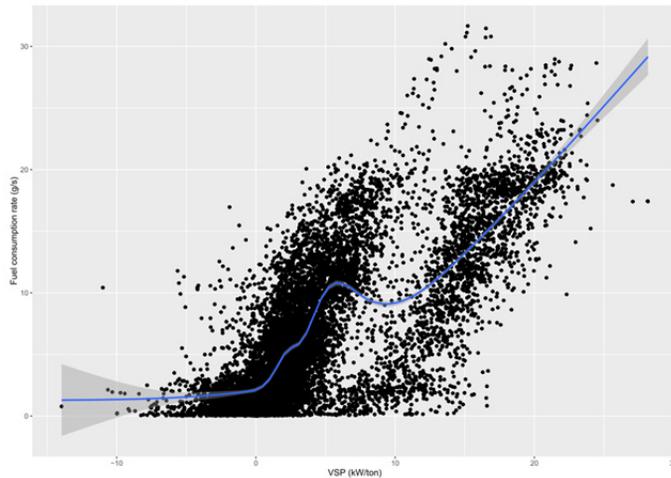
為更進一步了解車輛比功率與耗油率的關係, 本研究以車輛比功率進行資料分群。依據 Frey 等人<sup>[10]</sup> 的建議, 車輛比功率的分群門檻值設定有以下兩個原則: (1) 分群後之各群平均耗油率必須彼此具有差異; 以及 (2) 沒有任何單一分群可以支配油耗量的預測; 本研究以 Xu 等人<sup>[11]</sup> 的級距為基礎, 根據分群結果進行微調, 結果如表 3 所示。Xu 等人<sup>[11]</sup> 建議分群是以 VSP 及行車速度級距兩因素進行分群, 本研究資料在低行駛速度 (< 40 kph) 時, 部分高車輛比功率的資料被合併為一群; 而在高行駛速度 ( $\geq 80$  kph) 時, 部分低車輛比功率的資料被合併為一群, 此結果與 Xu 等人<sup>[11]</sup> 類似。分群後之車輛比功率與耗油率的關係如圖 3(b) 所示, 低中高速度 3 群資料分別以簡單對數線性模式分析耗油率與車輛比功率的關係, 其  $R^2$  分別是 0.979、0.974 以及 0.814, 僅在高速度時配適略差, 其餘結果

與 Wang 等人 [8] 類似。由式 (8) ~ 式 (10) 可以發現，車輛比功率對油耗的影響隨著速度的提升而增加。

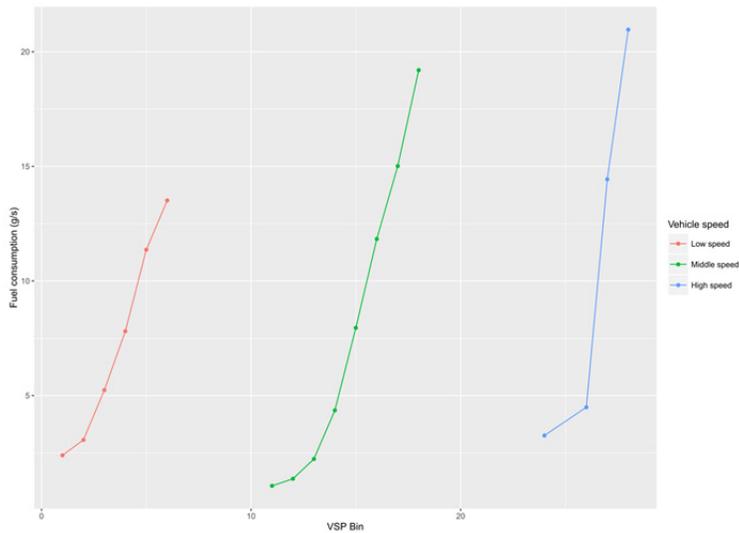
$$\text{低速：} \log(fc) = -1.807 + 0.370 \times vsp, R^2 = 0.979 \quad (8)$$

$$\text{中速：} \log(fc) = -7.147 + 0.446 \times vsp, R^2 = 0.974 \quad (9)$$

$$\text{高速：} \log(fc) = -13.078 + 0.491 \times vsp, R^2 = 0.814 \quad (10)$$



(a) 車輛比功率與油耗關係：未依 VSP 分群



(b) 車輛比功率與油耗關係：依 VSP 分群

圖 3 車輛比功率與耗油率的關係

表 3 車輛比功率分群門檻值及平均油耗 (克/秒)

VSP (kW/ton)	行車速度 (公里/小時)					
	[0,40)		[40,80)		[80,+∞)	
	VSP 分群	油耗率	VSP 分群	油耗率	VSP 分群	油耗率
$[-\infty, 0]$	Bin01	2.393	Bin11	1.060		
(0,1]	Bin02	3.065	Bin12	1.370		
(1,2]	Bin03	5.238	Bin13	2.232		
(2,4]	Bin04	7.807	Bin14	4.355		
(4,6]	Bin05	11.362	Bin15	7.954	Bin25 <sup>b</sup>	3.257
(6,9]	Bin06 <sup>a</sup>	13.512	Bin16	11.832	Bin26	4.489
(9,13]			Bin17	15.011	Bin27	14.435
(13,+∞]			Bin18	19.195	Bin28	20.965

註： a 此分群之耗油率亦包含 VSP > 9 之耗油數值。

b 此分群之耗油率亦包含 VSP ≤ 4 之耗油數值。

若將上述的車輛比功率模式改以實驗資料#1~#5 建立訓練模式，而以#6 及#7 驗證其預測績效，並以平均絕對誤差 (mean absolute deviation, MAD)、均方差 (mean square error, MSE) 以及絕對誤差平均值 (mean absolute percentage error, MAPE) 作為驗證指標，結果如表 4 所示。

由表 4 可以發現模式配適度與式 (8) ~ 式 (10) 相似，以低速及中速模式的配適較佳，至少可達約 0.97；高速模式的配適略低，約在 0.84 左右。至於模式的預測力部分，其 MAD 在低、中、高速模式的值分別為 5.14、6.38 及 9.43，略低於訓練資料各分群下的油耗平均值 (低速：7.37；中速：7.83；高速：10.47)；除低速外，中、高速模式的 MSE 則略高於各群油耗平均值的平方；各群的 MAPE 則是相對穩定，介於 73%至 78%之間。綜合言之，不論是模式的配適或預測，以低速模式的表現最佳。

表 4 車輛比功率模式以#1~#5 建模、#6 與#7 預測

	指標	低速	中速	高速
模式配適度	調整後 $R^2$	0.983	0.969	0.842
模式預測績效	MAD (秒/克)	5.141	6.380	9.428
	MSE	32.955	70.764	137.321
	MAPE (%)	73.182	78.303	76.45

## 4.2 輕型車微觀油耗模式之發展

### 4.2.1 VT-Micro、VSP 與 OBD 訊號模式

表 5 綜整以工研院機械所實車測試資料為基礎之 3 類輕型車微觀油耗模式，包括 VT-Micro 模式、VSP 模式以及 OBD 訊號模式，各類模式並依取樣頻率不同驗證其配適度（即調整後之  $R^2$ ）。

表 5 中之 VT-Micro 模式包含速度與加速度的 3 次多項式及交互作用項（見式(1)），VT-Micro 加減速模式的模式型式與 VT-Micro 模式同，但資料內容僅各取加速 ( $a \geq 0$ ) 或減速 ( $a < 0$ ) 部分；然本研究發現 Ahn 等人<sup>[3]</sup>所建議之油耗對數轉換（即式(3) 與式(4)）的模式配適度不如原本的線性型式，因此本研究僅呈現原本油耗型式之加減速模式。VSP + VT-Micro 模式則是在 VT-Micro 模式再加上車輛比功率變數，另考量 VT-Micro 模式內含複雜交互作用項，易產生共線問題，本研究亦發展 VSP + 加速度模式；此模式僅包含加速度主效果 (main effect)，不使用交互作用項。OBD 訊號模式則包含本研究從眾多 OBD 訊號裡，利用迴歸模式篩選出對油耗解釋力較高的訊號。分析結果發現，油門開度單一變數對各筆訓練資料（即#1~#5）的配適度至少可達 0.931，而車輛轉速單一變數對各筆訓練資料的配適度亦至少可達 0.611，是 OBD 訊號中與油耗最相關的兩個變數；其餘變數如環境溫度與溼度雖亦與耗油率顯著相關，然配適度並不如油門開度與引擎轉速，因此以下分析僅選擇油門開度與引擎轉速與速度加速度合併建模。另由於速度與引擎轉速具高度相關，因此發展 OBD 訊號模式時，兩變數中僅取解釋力較高的引擎轉速。

由表 5 可以發現，本研究發展之 VT-Micro 模式在取樣頻率 1 HZ 的水準下，模式配適度（調整後之  $R^2$ ）約介於 0.66~0.71 之間（模式 M1），與 Ahn 等人<sup>[3]</sup>所建議之配適水準（0.7）及中華經濟研究院實車上路資料模式的配適水準（0.6 以上）相近，顯示本研究資料之有效性及 VT-Micro 模式的穩定度與配適特性。然而 VT-Micro 模式若以 10 HZ 資料進行配適，其配適績效僅在 0.33~0.39，遠低於文獻建議之水準。另由 VT-Micro 加減速模式（模式 M2 與 M3）可以發現，將資料拆分成加速及減速資料，並不會增加模式配適度；而比較 VT-Micro 加減速模式在取樣 1 HZ 與 10 HZ 結果發現，在 1 HZ 取樣頻率遠優於 10 HZ 取樣頻率下之模式。

在車輛功率比模式方面，模式 M4 顯示在 VT-Micro 模式加入車輛功率比變數後，其  $\Delta R^2$  約增加 0.1，可見車輛比功率變數對 VT-Micro 模式具有顯著額外的解釋力。若以車輛比功率變數再加上加速度的主效果，其在 1 HZ 取樣頻率下，亦接近原本 VT-Micro 模式具複雜交互作用變數之模式配適度。

在 OBD 訊號模式（M6）中，不論是 10 HZ 或 1 HZ 的取樣頻率，其模式配適度皆可到達 0.92 以上，顯示此模式的配適不受取樣頻率影響，其模式配適度亦較其他模式佳。

表 5 VT-Micro、VSP 與 OBD 訊號模式在不同取樣頻率下之配適績效 (調整後之  $R^2$ )

模式種類	取樣頻率	實驗編號				
		#1	#2	#3	#4	#5
VT-Micro 模式 (M1)	10 HZ	0.391	0.373	0.351	0.381	0.326
	1 HZ	0.710	0.695	0.678	0.660	0.669
VT-Micro 加速模式 (M2)	10 HZ	0.371	0.363	0.343	0.379	0.323
	1 HZ	0.721	0.707	0.678	0.660	0.698
VT-Micro 減速模式 (M3)	10 HZ	0.330	0.320	0.307	0.330	0.280
	1 HZ	0.550	0.572	0.575	0.507	0.472
VSP + VT-Micro 模式 (M4) <sup>a</sup>	1 HZ	0.811	0.796	0.788	0.750	0.796
VSP + 加速度模式 (M5)	1 HZ	0.681	0.691	0.688	0.653	0.641
OBD 訊號模式 (M6) <sup>b</sup>	10 HZ	0.940	0.929	0.925	0.920	0.924

註：a 美國環保署建議 VSP 以秒為單位，因此僅發展 1HZ 模式。

b 此 OBD 訊號模式包含油門開度、引擎轉速與加速度等 3 個變數。

模式 M1、M4、M5 及 M6 之校估結果綜整如表 6，由分析結果可以發現，主要模式大部分參數之校估結果皆達顯著水準，少數未達顯著水準之參數為 VT-Micro 模式 (M1 及 M4) 內之速度與加速度交互相乘項，然而速度與加速度之主效果以及大部分之交互相乘項皆呈現顯著效估結果。除具統計顯著性外，主要模式之參數校估結果，亦具實務顯著性 (practical significance) 且正向影響車輛油耗；相對於被解釋變數的平均值在每秒 6 克左右 (見表 2)，包括車輛比功率 (模式 M4)、加速度 (模式 M5) 以及油門開度 (模式 M6) 之邊際效果皆在 +1 左右，模式 M1 之速度與加速度之主效果雖相對較低，但若速度改變幅度為加減 10 kph 或加速度改變幅度為加減 3 kph/sec，則其邊際效果亦分別有 +1.02 與 +1.13。

為進一步了解上述模式的績效，本研究進一步以 #1~#5 實驗資料 1 HZ 建模，並以 #6 及 #7 的資料驗證，驗證結果綜整如表 7。由表 7 可以發現，以速度與加速度為主的模式 M1、M4 及 M5 之預測績效相對較差，而以油門開度與引擎轉速為主之 OBD 訊號模式的預測績效較佳。

本研究進一步分析各模式之預測正確性，發現模式預測的誤差來源主要出現在高速段。以 OBD 模式 (M6) 為例，其在預測第 6 及 7 筆資料時，當速度在 40 kph 以下時之 MAPE 為 47.52%，但在 40 kph 以上時為 114.06%。OBD 模式之殘差及預測誤差與速度之關係如圖 4 所示，其殘差與預測誤差值隨速度增加而擴大，具有異質變異 (heteroskedasticity) 的特徵。為修正前述問題，本研究將資料以速度 40 kph 分群，並以穩健迴歸 (robust regression) (Huber<sup>[18]</sup>) 減少異質變異對校估結果的影響；以低速 (速度 ≤ 40 kph) 資料發展一穩健迴歸模式，中高速部分 (速度 > 40 kph) 再參考 Rakha 等人<sup>[7]</sup> 依正負向加速度各發展一穩健迴歸模式，其校估結果如表 8 所示，預測第 6 及第 7 筆資料之績效如表 9 所示。由表 8 可看出，大部分的參數校估結果與原本之 OBD 訊號模式 M6 相仿，

表 6 模式校估結果：以#1~#5 建模

	VT-Micro (M1)	VSP + VT-Micro (M4)	VSP + 加速度 (M5)	OBD 訊號 (M6)
油門開度				0.936***
引擎轉速				0.001***
加速度			1.189***	0.356***
<i>VSP</i>		1.164***	0.628***	
<i>v</i>	0.102***	0.043***		
<i>v</i> <sup>2</sup>	-0.001***	-0.001*		
<i>v</i> <sup>3</sup>	<0.001**	<0.001***		
<i>a</i>	0.378***	0.634***		
<i>a</i> <sup>2</sup>	0.020***	0.037***		
<i>a</i> <sup>3</sup>	0.001	-0.002**		
<i>v</i> × <i>a</i>	0.050***	-0.002		
<i>v</i> × <i>a</i> <sup>2</sup>	0.005***	0.003***		
<i>v</i> × <i>a</i> <sup>3</sup>	<0.001	<0.001***		
<i>v</i> <sup>2</sup> × <i>a</i>	<0.001	<0.001		
<i>v</i> <sup>2</sup> × <i>a</i> <sup>2</sup>	<0.001***	<0.001***		
<i>v</i> <sup>2</sup> × <i>a</i> <sup>3</sup>	<0.001**	<0.001***		
<i>v</i> <sup>3</sup> × <i>a</i>	<0.001***	<0.001***		
<i>v</i> <sup>3</sup> × <i>a</i> <sup>2</sup>	<0.001***	<0.001***		
<i>v</i> <sup>3</sup> × <i>a</i> <sup>3</sup>	<0.001***	<0.001***		
截距	2.165***	2.578***	3.903***	-14.879***
樣本數	13,648	11,356	11,356	13,648
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.672	0.781	0.670	0.947
調整後之 <i>R</i> <sup>2</sup>	0.671	0.781	0.670	0.947
VIF (最大值)	> 10	> 10	1.100	3.041

表 7 模式預測績效：以#1~#5 建模、預測#6 與#7

模式	MAD (秒/克)	MSE	MAPE (%)
VT-Micro (M1)	2.413	11.662	159.88
VSP + VT-Micro (M4)	2.195	9.589	150.08
VSP + 加速度 (M5)	2.574	11.732	166.67
OBD 訊號 (M6)	1.115	2.232	75.67

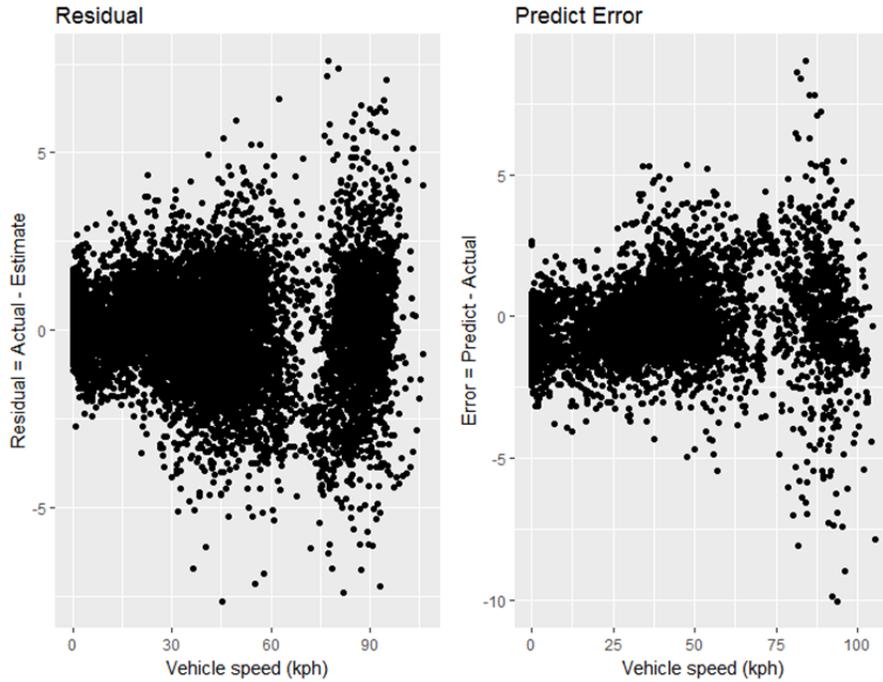


圖 4 模式 M6 殘差及預測誤差與車輛速度關係

僅引擎轉速變數在高速減速段模式 (M9) 由顯著變為不顯著。另由表 9 可發現低速段及中高速加速段模式之預測績效，已較原始模式改善許多，其中低速段的 MAPE 低於 50%，而高速加速段的 MAPE 亦接近 50% (為 54.69%)；惟中高速減速段模式的 MAPE 值仍然超過 50%，模式預測力不佳。

表 8 修正後之 OBD 訊號模式

解釋變數	原始 OBD 訊號	低速 (速度 ≤ 40 kph)	中高速－加速段 (速度 > 40 kph)	中高速－減速段 (速度 > 40 kph)
	(M6)	(M7)	(M8)	(M9)
油門開度	0.936 <sup>***</sup>	0.991 <sup>***</sup>	0.623 <sup>***</sup>	1.074 <sup>***</sup>
引擎轉速	0.001 <sup>***</sup>	0.001 <sup>***</sup>	0.006 <sup>***</sup>	0.00002
加速度	0.356 <sup>***</sup>	0.237 <sup>***</sup>	0.240 <sup>***</sup>	0.271 <sup>***</sup>
截距	-14.879 <sup>***</sup>	-15.558 <sup>***</sup>	-14.871 <sup>***</sup>	-16.355 <sup>***</sup>
樣本數	13,648	7,246	3,444	2,958
VIF (最大值)	3.041	4.726	3.690	1.759

表 9 修正後之 OBD 訊號模式預測績效

模式	MAD (秒/克)	MSE	MAPE (%)
低速 (速度 $\leq$ 40 kph) (M7)	0.823	1.143	49.52
中高速 (速度 $>$ 40 kph)–加速段 (M8)	0.962	1.968	54.69
中高速 (速度 $>$ 40 kph)–減速段 (M9)	1.380	3.401	132.61
原始 OBD 訊號模式 (M6)	1.115	2.232	75.67

本研究建立之微觀油耗模式中，包含速度加速度交叉相乘項的模式 M1 與 M4 之最大 VIF 值遠大於 10，明顯具有共線的現象，而模式 M5 (VSP+加速度)、模式 M6 (OBD 訊號) 以及修正後之 OBD 訊號模式 (M7~M9)，均無明顯共線的現象。由於本研究的樣本數大，模式 M1 與 M4 之共線現象並未造成參數校估不顯著的問題；然高度共線迴歸模式的型式，其參數校估之顯著性較易受資料品質影響，此亦顯示 VT-Micro 模式的限制。

#### 4.2.2 分量迴歸模式

此節發展分量迴歸 (quantile regression) 模式，以了解在不同油耗分量 (quantile) 時，各變數與油耗的關係。本研究共檢視兩個微觀油耗模式，其一為國內外常用之 VT-Micro 模式，另一為本研究發展之最佳 OBD 訊號模式。

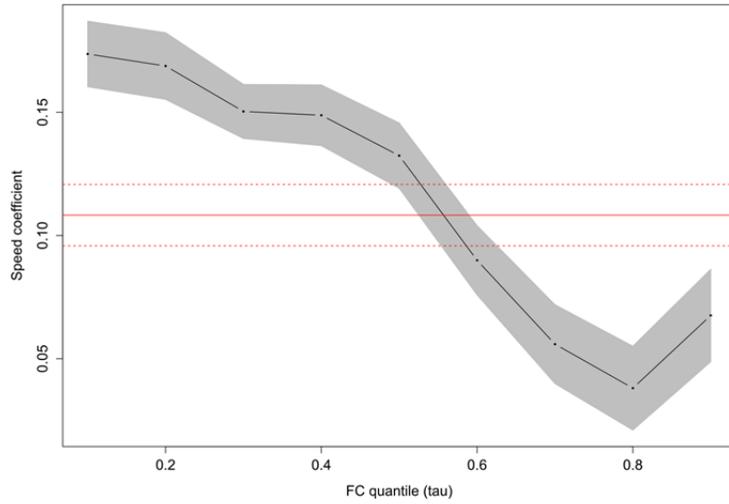
##### 1. VT-Micro 模式 (M1)

VT-Micro 模式內含主效果與眾多交互效果，本研究僅呈現速度與加速度的校估結果，繪如圖 5 所示。圖 5 之橫軸代表不同油耗分量，而縱軸為各變數之迴歸係數值；紅線為最小平方迴歸校估出之參數值，虛線區間為 95% 信賴區間；黑線為分量迴歸校估出在油耗各分量時之變數參數值，其灰底區間為 95% 信賴區間帶 (confidence interval band)。

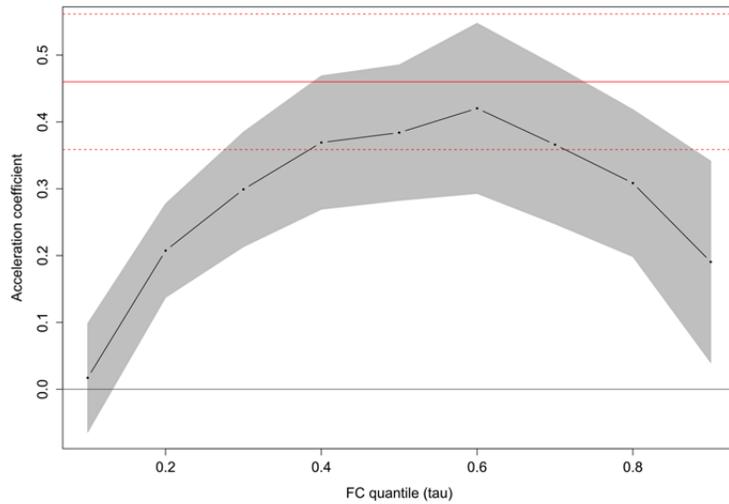
由圖 5 可以發現，不管油耗是在低或高的分量，速度對油耗的影響一直保持正值 (圖 5(a))，亦即速度愈高油耗愈高，然而速度對油耗的正向影響，在高油耗時相對低油耗時弱，可見交通擁擠時，速度的確對油耗有十分顯著的影響；而加速度對油耗的正向影響則呈現倒 U 型態 (圖 5(b))，但大體是隨著油耗增加而增加。另比較分量迴歸與最小平方迴歸估計結果可發現，最小平方迴歸估計之行駛速度在條件平均值下的影響效果，在低油耗分量時低估、高油耗分量時高估行駛速度的影響力；而對加速度的估計，最小平方方法則是在低油耗分量時高估其影響力。

##### 2. OBD 訊號模式 (M6)

OBD 訊號模式的分量迴歸估計結果繪如圖 6。由圖 6 可以發現，OBD 訊號模式分量迴歸之信賴區間帶與最小平方迴歸的信賴區間重疊部分有限，亦即各變數在不同油耗分量時與油耗的關係，顯著異於最小平方估計出各變數在條件平均數對油耗的影響。其中，油門開度 (圖 6(a)) 與油耗的關係在低油耗時被低估、在高油耗時被高估；引擎轉速



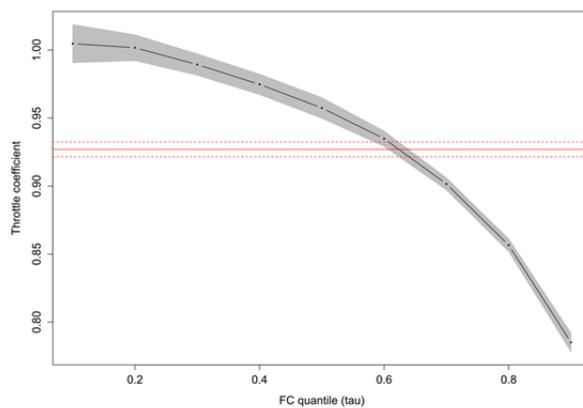
(a) 速度



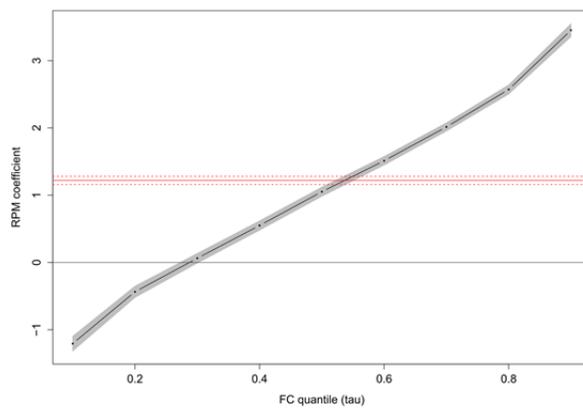
(b) 加速度

圖 5 VT-Micro 模式分量迴歸校估之參數值及與最小平方迴歸之比較

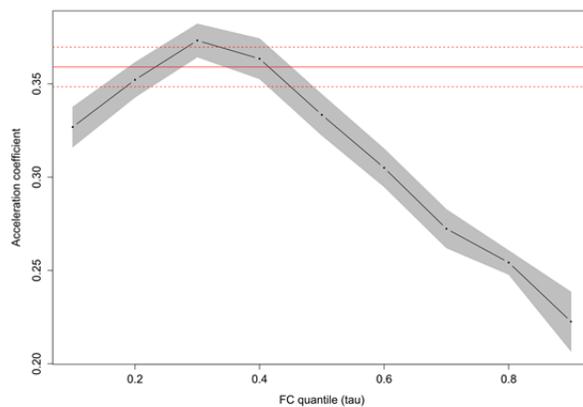
(圖 6(b)) 則是在低油耗時被高估、高油耗時被低估；而行車加速度 (圖 6(c)) 在中低油耗時與最小平方估計結果相近，但在高油耗時被高估。易言之，油門開度對油耗的影響在低油耗分量時更為顯著，引擎轉速則在高油耗分量時相對顯著，而加速度對油耗的影響在高油耗時較低。



(a) 油門開度



(b) 引擎轉速



(c) 加速度

圖 6 OBD 訊號模式分量迴歸校估之參數值及與最小平方迴歸之比較

## 五、結論與建議

根據以上分析結果，本研究獲致之主要結論整理如下：

1. VT-Micro 模式雖然簡單且具一定配適績效，但由於內含複雜交互作用項，易產生共線性高的現象，導致估計值的變動十分敏感。若考量以速度與加速度為主的模式，可採用速度、加速度以及車輛比功率等 3 個變數的主效果，其配適度即可達到 VT-Micro 模式的績效水準，同時又能避開共線性的問題。
2. 車輛比功率模式內含速度、加速度以及坡度變數，其轉換公式的參數設計亦考量了空氣動力拉力與阻力等因素。本研究以美國環保署建議之公式，對國內實車上路蒐集資料計算車輛比功率，其車輛比功率對油耗的型態與文獻類似，顯示該公式具一定適用性，而以車輛比功率分群再發展迴歸模式之配適度與預測力亦達一定績效。
3. OBD 訊號中以油門開度與引擎轉速對油耗的影響最為緊密，其搭配加速度所發展之模式，配適度與預測力皆優於 VT-Micro 與車輛比功率模式，且其模式配適績效並不會受到取樣頻率的影響。惟精確的油門開度與引擎轉速資料必須由 OBD 訊號擷取，並無法直接由外部觀測，因此無法直接使用在交通管理與規劃中，但可作為個人駕駛行為參考之用。
4. 由於影響油耗的因素非常多，不論是 VT-Micro、車輛比功率或是 OBD 訊號模式，皆無法完全捕捉油耗的變異；文獻上常使用迴歸發展油耗模式，僅能呈現變數在條件平均數下對油耗的影響效果，但由分量迴歸分析結果可看出，各變數對油耗的影響在不同油耗程度下有明顯差異。
5. 由預測績效分析結果發現，所發展之 OBD 訊號模式之平均絕對預測誤差 (MAD) 在每秒 1 克左右，而平均平方誤差 (MSE) 則在 2 左右；相對於平均每秒約 6 克油耗值而言，模式預測力具有一定績效。然而，此模式之平均絕對百分比誤差 (MAPE) 卻無法有效降低，尤其高速行駛減速段之 MAPE 仍遠大於 50%；此結果除因 MAPE 受到本研究被解釋變數之量測尺度相對較小所影響外，亦顯示本研究所發展模式之預測績效仍具改善空間。
6. 市面上大部分車輛雖已使用電子油門來控制其開度，但油門開度並無法完全解釋電子油門車輛的油耗變異；由本研究校估出的 OBD 訊號模式 (M6) 即可發現，就算控制住油門開度，引擎轉速與加速度仍有其獨特且顯著的解釋能力。事實上，若將模式 M6 的油門開度移除，僅含引擎轉速與加速度兩個變數的模式，亦可解釋 71.43% 的變異；易言之，由於行車電腦對電子油門控制的運算能力日益精進，加上速度的高低易受外在行車環境 (例如車流、道路幾何等) 所影響，駕駛人更應注重轉速與加速度的控制，以節省油耗。
7. 本研究檢測之油耗變數中，速度、加速度、車輛比功率、油門開度以及引擎轉速皆呈現顯著正向影響，其中又以油門開度 (即油門踏板深度) 的影響力最大，且其影響在低油

耗時更為顯著；換句話說，當車流順暢時，駕駛人若能避免突然改變油門踏板深度，應可有效降低油耗。引擎轉速為次要之油耗影響變數，且與行駛速度呈現高度相關；當油耗程度愈高時，引擎轉速對油耗的影響愈高，亦即當車流擁擠時，駕駛人應特別注意引擎轉速的控制。

針對本研究之限制以及對未來研究的建議整理如下：

1. 本研究分析結果發現，單以油門開度一個解釋變數，即具有非常高的模式配適度，顯示該變數與油耗有密切的相關。然本研究僅針對單一車輛廠牌進行研究，各家車輛廠牌在行車電腦以及油耗控制技術可能有所差異，建議進一步蒐集不同車型廠牌資料驗證油門開度是否足以作為油耗之代理變數 (proxy variable)，並可更深入了解以迴歸模式為基礎之油耗預測模式的限制。
2. 本研究僅分析連續數個晴天蒐集之資料，環境溫度與溼度變化不大；此兩變數在本研究中雖對油耗有顯著影響，但影響力相對其他變數弱，未來亦可比較不同外在環境對油耗的影響。
3. 本研究所建立之模式為微觀油耗模式，油耗變數的單位為每秒油耗重量 (公克)；相對於巨觀油耗模式，其預測難度較高。本研究雖利用資料分群，嘗試提高模式預測力，然而 OBD 模式在中、高速的油耗預測績效仍不佳，顯示以傳統迴歸模式進行油耗之建模與預測確有其限制。回顧相關文獻時亦發現，在少數有提供預測驗證的微觀油耗模式研究中，MAPE 大於 50% 的結果並不少見；例如 Lei 等人<sup>[19]</sup> 的研究中，18 筆預測驗證中有 12 筆分析結果之 MAPE 大於 50%，而 Ma 等人<sup>[20]</sup> 亦約有半數預測驗證分析之 MAPE 大於 50%。未來或可考慮採用能模化非線性、高維度變數交互關係之模式，例如類神經網路 (neural networks) 或支援向量迴歸 (support vector regression)；在可蒐集之資料限制下，最大化提升預測績效。
4. 在本研究所使用之資料中，由 HORIBA OBS One 車載量測系統所蒐集之資料，皆有明確的資料精度規範，然而其他外接的量測設備 (例如全球定位系統) 卻無此規範，其資料精度可能會影響資料分析結果。未來國內訂定實車上路測試程序相關規範時，宜一併納入外接量測設備的精確度。
5. 本究使用美國環保署的公式進行車輛比功率的換算，並依 Xu 等人<sup>[11]</sup> 的建議將車輛比功率進行分群，所得之分析結果雖與文獻相符，且模式亦具一定之配適度與預測力。未來仍應發展適合國內資料之車輛比功率分群方式，以對資料進行更細緻且有效的拆分，對油耗的預測會更加準確。
6. 油耗影響變數大部分都有互相關聯，本研究雖透過變數篩選過程，避免同時放入高度相關變數，然仍有變數內生性的疑慮。未來研究或可考慮使用工具變數等方法，改善普通最小平方迴歸未考慮內生性問題；而分量迴歸考慮內生性的理論為近年計量經濟研究的主要議題，待理論成熟，亦可應用於本研究主題。
7. 本研究實驗環境設計時，僅考量須符合歐盟與美國之車輛能耗與排放之實際道路測試法

規要求，並未針對不同道路幾何條件與交通狀況進行實驗設計與測試分析；實車上路時間皆為非尖峰時間，盡量避免周遭車流影響測試車輛之行駛。然道路幾何條件、路線特性（例如號誌控制）與車流狀況皆有可能影響測試結果，未來可進一步研究，以了解前述因素對車輛油耗型態的影響。

本研究僅針對油耗進行分析，但車載量測系統亦有蒐集 CO、NO<sub>x</sub> 等重要的環境污染源，未來可進一步研究。

## 參考文獻

1. Barlow, T., Latham, S., McCrae, I., and Boulter, P., *A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions*, TRL Published Project Report, 2009.
2. Alessandrini, A., Filippi, F., Orecchini, F., and Ortenzi, F., “A New Method for Collecting Vehicle Behaviour in Daily Use for Energy and Environmental Analysis”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 220, Issue 11, 2006, pp. 1527-1537.
3. Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., and Van Aerde, M., “Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, 2002, pp. 182-190.
4. 林國顯、蘇振維、張瓊文、楊幼文、溫蓓章、鍾慧諭、莊志偉、陳韋伶、張耿宗、陳佳良、楊智凱、江岳翰、高祥富、宋皇勳、周諺鴻，**能源消耗、污染排放與運輸規劃作業關聯分析之研究（1/2）**，交通部運輸研究所，臺北，民國 97 年。
5. 林欣慧，**車輛二氧化碳排放管制、環保駕駛與綠色運輸推廣計畫**，行政院環境保護署，臺北，民國 105 年。
6. 林國顯、蘇振維、張瓊文、楊幼文、溫蓓章、鍾慧諭、莊志偉、陳韋伶、張耿宗、陳佳良、陳欣怡、江岳翰、楊智凱、高祥富、宋皇勳、周諺鴻，**能源消耗、污染排放與運輸規劃作業關聯分析之研究（2/2）**，交通部運輸研究所，臺北，民國 98 年。
7. Rakha, H., Ahn, K., and Trani, A., “Development of VT-Micro Model for Estimating Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 9, 2004, pp. 49-74.
8. Wang, H., Fu, L., Zhou, Y., and Li, H., “Modelling of the Fuel Consumption for Passenger Cars Regarding Driving Characteristics”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 13, 2008, pp. 479-482.
9. 潘一誠、莊裕霖、胡以琴、陳柏君、莊沅融、黃心華、陳依琪、林明弘、陳家修、李昶松、周泰銘、吳宗祐，**移動污染源排放總量推估、管制策略擬訂與縣市執行成效考評**，行政院環境保護署，臺北，民國 100 年。
10. Frey, H. C., Roupail, N. M., Zhai, H., Farias, T. L., and Gonçalves, G. A., “Comparing Real-World Fuel Consumption for Diesel and Hydrogen-Fueled Transit Buses and Implication For Emissions”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 12, 2007, pp. 281-291.
11. Xu, Y., Yu, L., and Song, G., “Improved Vehicle-Specific Power Bins for Light-Duty

- Vehicles in Estimation of Carbon Dioxide Emissions in Beijing”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2191, 2010, pp. 158-165.
12. 蔡承祐, 「應用車載排放量測系統於汽油小客車行駛實際道路空氣污染物排放之研究」, 國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文, 民國 99 年。
  13. Ericsson, E., “Independent Driving Pattern Factors and Their Influence on Fuel-Use and Exhaust Emission Factors”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 6, 2001, pp. 325-345.
  14. Browne, G., “Design of Experiments to Determine Factors Contributing to Fuel Economy”, Faculty of Engineering, Memorial University, NL, Canada, 2008.
  15. Lee, M. G., Park, Y. K., Jung, K. K., and Yoo, J. J., “Estimation of Fuel Consumption Using in-Vehicle Parameters, International Journal of U- and E- Service”, *Science and Technology*, Vol. 4, No. 4, 2011, pp. 37-46.
  16. Koenker, R. and Hallock, K., “Quantile Regression: An Introduction”, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 15, No. 4, 2001, pp. 43-56.
  17. Koenker, R., *Quantile Regression*, Cambridge University Press, New York, 2005.
  18. Huber, P. J., *Robust Statistics*, Springer, New York, 2011.
  19. Lei, W., Chen, H., and Lu, L., “Microscopic Emission and Fuel Consumption Modeling for Light-Duty Vehicles Using Portable Emission Measurement System Data”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.66, 2010, pp. 918-925.
  20. Ma, X., Lei, W., Andréasson, I., and Chen, H., “An Evaluation of Microscopic Emission Models for Traffic Pollution Simulation Using On-Board Measurement”, *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 17, No.4, 2012, pp. 375-387.