

大客車應用節能輪胎之成效及適用路線分析

陳學恆¹、溫蓓章²、陳欣怡³、廖慶復⁴

¹ 中華經濟研究院(輔佐研究員)

² 中華經濟研究院(副研究員)

³ 中華經濟研究院(分析師)

⁴ 車輛研究測試中心(副工程師)

²E-mail:hsuehcheng@cier.edu.tw

經濟部能源局編號：100-D0406

摘要

自1990年以來，輪胎技術進步已經降低車輛滾動阻力約50%，未來滾動阻力技術雖然難以再有大幅進展，但目前採用低滾動阻力輪胎已可以節省4~11%的燃油消耗。回顧2015~2020年間各車款之節能效率與導入技術成本，尤以輪胎及車輪相關技術為各類別車輛均可受惠的節能技術。加上國內節能輪胎的技術成熟、成本相對不高，亦因不涉及車輛動力系統故不需重新進行安全審驗。因此，國內已有部份客貨業者正試行此項技術中。

有鑑於此，本研究將以節能輪胎技術為標的，嘗試建構節能輪胎成效評估模式，並分別估算在行駛型態為市區公車以及國道客運之節能效益，以探討節能輪胎技術導入國內大客車之合適性。研究結果顯示，節能輪胎導入國道客運路線，對於客運業者、政府以及社會皆帶來正面效益；但若節能輪胎技術導入市區公車路線，其節能效益則無法填補一般輪胎與節能輪胎成本差額，亦即市區公車業者並無誘因主動導入此項技術。因此，對於客運業者而言，節能技術導入國道客運路線，其節能效益將較市區公車路線佳；另一方面，政府可加強宣導節能輪胎技術觀念，亦或研擬相關政策，協助輔導客運業者導入節能輪胎技術。

關鍵詞：節能輪胎、滾動阻力、成本效益

1. 前言

由國內外相關文獻可知，國際間之各項節能技

術，大致可依技術是否涉及車輛的動力系統區分為動力系統之節能技術與車輛系統之節能技術二大類[10]。其中，車輛系統的節能技術體系又可分為：(1) 空氣動力相關技術；(2) auxiliary load 相關技術；(3) 滾動阻力相關技術；(4) 車重相關技術；(5) 減少惰轉(idle reduction) 相關技術；(6) 智慧車輛(intelligent vehicle) 技術等。

重型車輛高速行駛之能源消耗中，50%用於indicated closed cycle efficiency；其中制動(Brake Power)占總能耗之42%，包括空氣阻抗22.3%、滾動摩擦13.4%、auxiliary load 3.3%、Drivetrain Losses 2.4%[1]。此類之相關節能技術包含低阻抗輪胎、擾流板等，屬於車輛系統技術，與車輛動力系統相關性較低。由上述能耗占比可知，對於高速行駛的重型車輛而言，減少空氣阻力之能源消耗是最關鍵的一項節能技術；不過空氣動力相關技術的節能優勢，隨行車速度降低而快速消失；低速行車狀態下，無法仰賴空氣動力相關技術產生節能效益。另外，對於不同的車種而言，2015~2020年期間聯結車(tractor-van trailer vehicle) 高速行駛狀態下應用新導入之空氣動力相關技術將可以節省15%的能源消耗(與2008年類似車款相比)；但在其他車種方面，空氣動力相關技術的節能效率則低得多。

另一方面，自1990年以來，輪胎技術進步已經降低車輛滾動阻力約50%，未來滾動阻力技術雖然難以再有大幅進展，但目前採用低滾動阻力輪胎已可以節

省4~11%的燃油消耗。此外，在綜合考慮2015~2020年間車款之節能效率與導入技術成本應用於不同類別車輛上可能發揮成本效益的節能技術，結果也顯示輪胎及車輪相關技術為各類別車輛均可受惠的節能技術為之一。

總結來看，節能輪胎不僅在能源消耗中占有一定的比例，並可應用於各類別的車輛上。加上國內節能輪胎的技術成熟、成本相對不高，亦因不涉及車輛動力系統故不需重新進行安全審驗。因此，國內已有部份客貨業者正試行此項技術中。對此，本研究將以節能輪胎為研究標的，採用成本效益方法，估算國內大客車應用節能輪胎技術於市區公車路線與國道客運路線的成效。同時，考量節能輪胎的節能效益需視行駛型態而定，本研究亦會進一步比較節能輪胎應用於不同路線的成效，以找出國內大客車導入節能輪胎技術之適用路線。本研究可分為三大部分。首先，針對節能輪胎技術作一綜整回顧，包含技術描述與國際既有之測試結果。其次，將以國內大客車為例，建構節能輪胎成效評估模式以計算其節能成效。最後，則研提政策建議方案，加速節能輪胎此項技術的導入，以期促成客運業者實施自主節能管理與運用節能技術。

2. 節能輪胎文獻回顧

車輛行駛時，由引擎產生的動力約有15%-30%是用來克服輪胎與地面的滾動阻力，若可以降低此部分的阻力，則將有助於增加車輛行駛里程，提升燃油經濟。此種降低輪胎滾動阻力以減少能量的損失，稱為節能輪胎。事實上，一般所謂之節能輪胎，其範疇包含符合由輪胎廠商自行認證（各家廠商標準不一）的節能輪胎，以及由國際公信力單位認證之生態輪胎（Eco Tire）。

目前已有多家國際輪胎廠商自行研發節能輪胎。以固特異為例，該輪胎廠在轎車節能輪胎的材料與設計結構方面（胎面膠配方與胎體結構）均有進行調整，特別是胎面膠的輪胎，係採用矽膠與一般膠料的混和比，透過高矽膠成分具低滾動阻力的特性，可提升節能效果。若以卡車胎而言，由於本身用生膠的量較多，

因此主要是改變輪胎本身的結構設計，以達到低滾動阻力的目的[2]。

藉由文獻回顧可發現降低5%的輪胎滾動係數約可改善1.3%~1.7%的燃油經濟[3]。此外，本研究亦實際訪查國內輪胎廠商，得知固特異以其節能輪胎進行測試，約可減少1.9%的油耗（試行車隊包含國光客運與亞通客運）。另國內米其林與Bridgestone等輪胎廠亦有節能輪胎實際測試的節能數據。其中，米其林之測試結果詳見表1與表2[4]。

在節能輪胎成本效益評估方面，Air Initiative for Asian Cities Center推動的綠色卡車試行計畫中，基於降低油耗成本、空氣汙染與因應氣候變化為動機，期望找出各車輛技術所對應的能源效率。節能輪胎為其探討的技術之一，試行對象包括3個車隊，分別為Star of the City Logistics、Xinbang Logistics、The garbage fleet of Guangzhou Municipality。而實際測試的成本效益結果，Star of the City Logistics投資成本約14,800(美元)，回本年期2.7年，每天約可節省10.83公升的油。Xinbang Logistics投資成本約5,261(美元)，回本年期4年，每天約可節省2公升的油。The garbage fleet of Guangzhou Municipality投資成本約6,320(美元)，回本年期0.65年，每天約可節省6.9公升的油[5]。

表1 大陸實地測試低滾動阻力輪胎之方法與成效

測試車種	測試地點	測試里程	測試環境	省油效果
大貨車	北京 - 山海關 - 北京	548km	<ul style="list-style-type: none">● 使用兩部同款車輛，並固定車輛行駛條件(車輪軸位等機械情況、載重、胎壓、行駛路線與里程)，同時將油箱加滿。● 兩部車輛裡，一部使用節能輪胎，另一部則使用一般輪胎，以進行比較。● 每位駕駛分別行駛兩趟。第二趟出發時須交換輪胎，以屏除駕駛行為因素。此外，亦採用電腦控制系統，以使兩車的駕駛只需要掌握方向盤並踩油門，且踩油門的噴油量也由電腦控制。● 省油計算方式為當測試完成後，以加滿油箱的油量計算。	3-3.5%
巴士	京沈高速	236km		4%以上

資料來源：米其林，2011。

表 2 歐洲實地測試低滾動阻力輪胎之方法與成效

測試項目	測試環境	測試結果
溼地煞車距離測試	<ul style="list-style-type: none"> ● 使用兩部同款車輛，並固定車輛行駛條件（車輪軸位、載重、胎壓、行駛路線與里程）。 ● 兩部車輛裡，一部使用省油輪胎，另一部則使用競爭對手的輪胎，以進行比較。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 時速 45km/hr 下同時踩煞車，待兩部車同時停下後，比較兩部車的煞車距離。結果顯示：節能輪胎較一般輪胎可減少約 20.6% 的煞車距離。
溼地抓地力	<ul style="list-style-type: none"> ● 在一個圓形的溼地試車場，分別以兩輛車在試車場以時速 60km/hr 相互進行追逐。在進行到第 10 圈時，使用節能輪胎的車輛始追上另一部使用一般輪胎的車輛（因抓地力較差，所以不穩會混，以致速度變慢）。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 相同速度下，在同樣的停止線放空檔，節能輪胎較一般輪胎約可多行駛 9.6% 的距離。
滾動阻力測試		<ul style="list-style-type: none"> ● 相同速度下，在同樣的停止線放空檔，節能輪胎較一般輪胎約可多行駛 9.6% 的距離。

資料來源：米其林，2011。

3. 模式與方法

本研究建立一套節能輪胎技術之成效評估模式，可協助客運業者估算導入節能輪胎之節能成效。對於客運業者而言，在評估是否導入節能技術時，其所關切的是：節能技術導入後是否可以帶來節能效益。準此，本研究參考節能技術成本績效模式[6]，研擬出導入節能輪胎之成效評估模式架構，如圖 1 所示。其中，模式主要可分為四個部分，分別為參數輸入與計算、成本效益整合計算、評估指標與結果產出。

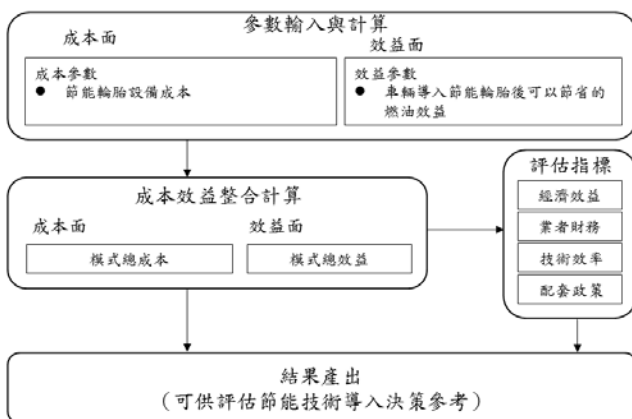


圖 1 導入節能輪胎之成效評估模式架構

3.1 節能輪胎成本項目

由於節能輪胎屬於後裝式的節能技術，客運業者需要額外購買節能輪胎並加裝於車輛。因此，本研究將節能輪胎成本設定為一次性成本，亦即節能輪胎與一般輪胎在輪胎達到使用里程後皆須更換，使用期間並無保修成本。

3.2 節能輪胎效益項目

本研究採用車輛之車年度行駛里程、節能輪胎技術的節能效益以及每公升燃油可行駛公里數，據以求得車輛導入節能輪胎技術於第 i 年可以節省的燃油量如式 (1)。接著再將節省的燃油量換算為貨幣化節能金額 (元)，即可求得車輛導入節能輪胎技術於第 i 年的貨幣化節能效益，如式 (2)。

然而，式 (1) 與式 (2) 僅可求得節能輪胎技術單一使用年之節能效益。欲求得節能輪胎技術於使用期間 T 年的節能效益，必須將逐年節省的貨幣化節能效益累積加總，如式 (3)。

$$(1)$$

$$(2)$$

$$(3)$$

其中：

FS_{techei} ：第 i 年導入單一節能技術後，可以節省的燃油量 (公升/年)。

MTM_i ：第 i 年度行駛里程 (公里/年)

FST_{teche} ：節能技術的節能效益 (%)

CM_i ：第 i 年每公升燃油可行駛公里數 (公里/公升)

MP_{techei} ：第 i 年導入單一節能技術後，可以節省的貨幣化節能效益 (元/年)。

FP_i ：第 i 年每公升燃油價格 (元/公升)

TMP_{ss} ：單一車輛導入單一節能技術後，在使用期間 T 可以節省的貨幣化節能效益 (元/ T 年)。

3.3 節能輪胎效益項目

在評估指標的部份，本研究為將導入節能輪胎技

術後，對於各利益相關人（如政府、客運業者）可能造成的影響納入考量，初步列出下列的評估指標，包含經濟效益指標、業者財務指標、技術效率指標以及配套政策指標，詳如表3。

評估年期、 FS_t ：節能技術第t年可以節省的燃油量、FC：節能技術可以節省的燃油消耗、TFC：總燃油消耗、FP：燃油價格、VMT：車輛行駛里程、 $\%FCR_{package}$ ：多節能技術之綜合節能效益

資料來源：本計畫整理。

4. 節能輪胎成效評估

4.1 模式參數設定與車輛資訊

本研究用以評估節能輪胎技術成效之基本假設參數值及選用依據，可分為輪胎特性參數、政府政策參數以及車輛行駛參數。根據文獻指出，節能輪胎節能效益在不同行駛型態（Duty-Cycle）下，對應本研究建構節能輪胎成效評估模式投入參數值亦不相同。本研究以國內大客車為例，嘗試估算節能輪胎行駛於市區公車與國道客運之節能效益分析，相關參數逐項說明如表4。本研究以2011年為評估基礎年第1年，評估期間為節能輪胎使用里程。

本研究挑選市區公車車輛與國道客運車輛均配備EGR 汙染排放控制系統，且皆為4期環保車。國道客運使用的車輛排氣量約在12,000-13,000c.c.之間，而市區公車則在7,000-8,000c.c.之間。在油耗表現方面，國道客運一般可達3.75公里/公升以上，而市區公車則為1.63公里/公升。詳細車輛資訊如表5。

表4 節能輪胎技術導入之投入參數表

假設與參數類別	使用參數			資料來源或假設依據	
	市區	台北 台中	台北 高雄		
輪胎特性參數	評估基礎年（幣值基年）	2011年			依據本計畫規劃設定
	評估期間	節能輪胎使用里程			
	節能輪胎成本	18,000元/個			[2]
	一般輪胎成本	10,000元/個			客運業者
	節能輪胎節能效益	1.5%	3%		[1]
期望報酬率	節能輪胎行駛里程	100,000公里	320,000公里		[2]
	期望報酬率	3.73%			公路客運合理報酬率（公路汽車客運路線費率調整機制）
政府政策參數	燃油價格	29.3元/公升 (2011/01/01-2011/09/03)			[7]
	社會折現率	1.88% (2007-2010)			[8]
缺行	車輛平均每日行駛里程(公里)	34.5	715.8	726.3	客運業者

表3 評估指標與決策判準

評估指標類別	指標	定義	計算公式（註）	決策判準
經濟效益	淨現值 (NPV) Net Present Value	估計每期淨現金流量以適當折現率將各期現金流量折現並加總	$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{(B_t - C_t)}{(1+i)^t}$	NPV ≥ 0 or 最大接受 NPV < 0 拒絕
	經濟益本比 (B/C ratio) Benefit-Cost Ratio	產出效益總額/投入成本總額 投入成本之單位效益	$B/C \text{ Ratio} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}}$	B/C ≥ 1 接受 B/C < 1 政策決定
	內部報酬率 (IRR) Internal Rate of Return	使NPV=0的折現率 評估互斥計畫時，可能會與NPV法相反	$IRR = \sum_{t=0}^T \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} = 0$	IRR > RRR 接受 IRR < RRR 拒絕 RRR: 最低可接受報酬率（企業要求報酬率）
業者財務	技術還本期 (Payback Period Method, PPM)	追求投入節能技術之總成本等於總效益所需的時間		$L_t > T$ 接受 $L_t < T$ 拒絕 L_t : 節能技術使用期間
技術效率	單位百分點節能效率之投資成本 (Capital Cost Per Percent Reduction, CCPPR)	每一個百分點之節能效率所需的投資成本	$CCPPR = \frac{C}{FC/TFC}$	CCPPR 越小，表示節能技術之邊際本益比越低，其邊際效率越高，當CCPPR由最低點反轉時，此為節能技術之最適社會技術規模。
配套政策	損益兩平的油價 (Breakeven Fuel Price, \overline{FP})	在一個固定的油價下，其投入節能技術的總成本等於總效益時，此一固定的油價即為損益兩平的油價		$\overline{FP} > FP_T$ 接受 $\overline{FP} < FP_T$ 拒絕 FP_T : T年燃油價格
	節省的油耗成本 (Dollars per Gallon Saved per Year, DGSY)	節能技術可以節省的油耗成本	$DGSY = \dots$	DGSY 越大，表示節能技術可以節省的燃油成本越大，對於社會整體的效益也越大。

註：其中 B_t ：第t年之效益、 C_t ：第t年之成本、 i ：折現率、 T ：

駕駛員休息天數 (天/月)	4			[9]
燃油效率(公里/公升)	1.63	3.82	3.78	

資料來源：本研究整理。

表 5 車輛資訊彙整表

行駛路線	市區公車	國道客運	
		台北台中	台北高雄
廠牌	大宇	順益	順益
車型	BS120CN	RP51JP3L3	RP51JP3L3
出廠年份	2009	2007	2007
排氣量 (c.c.)	7640	12882	12882
車重 (公噸)	16.09	14.10	14.10
最大馬力 (hp/rpm)	296hp/ 2200rpm	375hp/ /2000rpm	375hp/ 2000rpm
最大扭力 (kg-m/rpm)	115kg-m /1200rpm	175kg-m /1100rpm	175-kg-m/ 1100rpm
污染排放控制系統	SCR	EGR	EGR
污染排放標準	4期	4期	4期
平均耗油 (km/l)	1.63	3.82	3.75

資料來源：本研究整理。

4.2 節能輪胎技術導入前後之成本效益分析

本研究假設節能輪胎技術要求係指當車輛全車輪胎更換為節能輪胎，才可以達成節能效益。當考慮成本差額時，依據表 4 與表 5，可估算出一般輪胎與節能輪胎成本差額為 48,000 元（詳見表 6）。此成本差額在於節能輪胎本身的原料與胎體設計所增加的成本。

對於客運業者而言，節能輪胎導入的成功與否取決於一般輪胎與節能輪胎成本差額，是否可於輪胎使用里程期間，藉由節能輪胎的節能效益填補此差額，並進一步可以創造額外的效益。由表 6 可得市區公車的節能效益（17637.50 元）小於成本差額（48,000 元）；而國道客運的節能效益（台北台中 51517.11 元，台北高雄 52825.96 元）則皆大於成本差額（48,000 元），且技術還本期皆為第 14 個月（詳如表 7 與圖 2）。因此，本研究推論節能輪胎技術導入於國道客運，其成本效益較市區公車佳，對於客運業者較為可行。

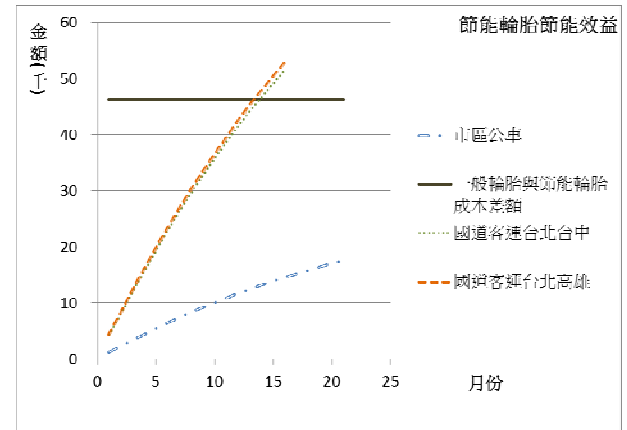
表 6 一般輪胎與節能輪胎設備成本與節能效益

行駛型態	設備成本			節能效益
	一般輪胎	節能輪胎	差額	
市區公車	60,000	108,000元	48,000	17637.50元

國道客運 (台北台中)	元		元	51517.11元
國道客運 (台北高雄)				52825.96元

註：節能效益依據式 (3) 計算。

資料來源：本研究整理。



資料來源：本研究整理。

圖 2 節能輪胎技術還本期

4.3 節能輪胎技術導入之評估指標與決策準則

本小節從政府及社會角度，以經濟效益、技術效率與配套政策進行節能輪胎技術導入之可行性探討。由表 7 可得，從政府的角度而言，節能輪胎導入國道客運之 NPV、B/C Ratio 與 IRR 皆大於市區公車，顯示節能輪胎技術導入國道客運，其經濟效益大於市區公車。另外，國道客運台北高雄之 NPV、B/C Ratio 與 IRR 皆高於國道客運台北台中，顯示節能輪胎技術經濟效益會隨著行駛里程的增加而提高，亦即車輛行駛里程越多，節能效果將越為明顯（國道客運台北台中平均每日行駛里程 715.8 公里，台北高雄則為 726.3 公里）。

另一方面，對於社會整體而言，節能輪胎技術導入國道客運，其技術效率皆低於市區公車，表示節能輪胎技術導入國道客運之邊際本益比低於市區公車，而邊際效率則高於市區公車。此外，節能輪胎導入國道客運可節省的油耗成本皆高於市區公車，顯示節能輪胎技術應用在國道客運上，其社會整體效益較市區公車佳。另一方面，節能技術導入國道客運估算之損益兩平的油價皆低於現況油價，而市區公車之損益兩平的油價則高於現況油價。此結果顯示，若以現況油

價為基礎分析節能輪胎導入之可行性，對於市區公車而言，除非油價調高至 52.6180 元，才可填補成本差額，但對於國道客運而言，現況油價有助於提升節能

輪胎技術之導入。

表 7 節能輪胎技術之評估指標與決策準則

評估指標與決策準則		市區公車	國道客運	
			台北台中	台北高雄
經濟效益	NPV	-25994.6490	12291.4613	13800.7264
	B/C Ratio	0.3812	1.1133	1.1416
	IRR	-	0.0544	0.0586
業者財務	PPM	-	14	14
技術效率	CCPPR	3084932.0351	1542466.0175	1542466.0175
配套政策	FP	52.6180	19.5526	19.0682
	DGSY	11.4603	16.3260	16.3260

資料來源：本研究整理。

5. 結論

國內大客車營運業者對於節能技術大多抱持保守態度，除非車輛原廠同意或是法規政策規定，否則客運業者並不會主動導入節能技術。節能輪胎核心技术在於降低輪胎滾動阻力增加燃油的行駛里程。因此，以技術成熟度、支援程度以及應用車型範圍觀之，節能輪胎將為近期國內大客車可望導入的節能技術。

本研究嘗試建構節能輪胎技術成效評估模式，並以國內大客車為例，分別估算在行駛型態為市區公車以及國道客運之節能效益分析。由估算結果可知，節能輪胎技術導入國道客運，對於客運業者、政府以及社會皆帶來正面效益；但若節能輪胎技術導入市區公車，節能效益則無法填補一般輪胎與節能輪胎成本差額，而使客運業者虧損。此結果與輪胎業者測試成果相符，亦即節能輪胎在車輛高速行駛時，節能效益將達到最大。因此，對於客運業者而言，節能技術導入國道客運路線，其節能效益將較市區公車路線佳；另一方面，政府可加強宣導節能輪胎技術觀念，亦或研擬相關政策，協助輔導客運業者導入節能輪胎技術。

本研究建構節能輪胎技術成效評估模式僅估算單一節能技術節能效益。考量未來車廠可能導入多種節能技術（複合節能技術），本研究建構的評估模式可視實際導入狀況調整為複合節能技術成效評估模式，用

以估算複合節能技術之節能效益。本研究結果將可作為國內客運業者評估導入節能輪胎技術之參考。

6. 致謝

本研究承蒙經濟部能源局 100 年度「車輛節能應用技術研究計畫」(1/3) 資助，計畫編號 100-D0406，特此感謝。

7. 參考文獻

- [1] Transportation Research Board, "Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles". Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles; Board on Energy and Environmental Systems, Division on Engineering and Physical Sciences, Transportation Research Board. National Academies Press, 2010.
- [2] <http://www.goodyear.com.tw/>，固特異輪胎。
- [3] Bridgestone, *Tires & Truck Fuel Economy - A New Perspective*, 4th Edition, RealANSWERS Magazine, 2008.
- [4] <http://www.michelin.com.tw>，米其林輪胎。
- [5] CAI-Asia Center and World Bank, "Guangzhou Green Trucks Pilot Project Final Report", 2010.
- [6] Transit Cooperative Research Program (2009), Assessment of Hybrid-Electric Transit Bus Technology.
- [7] <http://www.moeaboe.gov.tw/oil102/>，經濟部能源局，2011/09/11擷取。
- [8] <http://www.cbc.gov.tw/lp.asp?ctNode=690&CtUnit=347&BaseDSD=7&mp=1>，中央銀行，2011/09/11擷取。
- [9] http://163.29.140.81/careerguide/ind/ind_detail.asp?section_id=2&id_no=80422，行政院勞委會，2011/09/11擷取。
- [10] Cambridge systematic, Inc., Eastern Research Group, Inc (2010), Evaluate the Interactions between Transportation-Related Particulate Matter, Ozone, Air Toxics, Climate Change, and Other Air-Pollutant Control Strategies. NCHRP Report 25-25, July 2010.