

雪山隧道之速限對通行能力的影響分析¹

IMPACT ANALYSIS OF TRANSPORTATION CAPABILITY BY SPEED LIMIT IN XUESHAN TUNNEL

曾平毅 Pin-Yi Tseng²

林豐博 Feng-Bor Lin³

張瓊文 Chiung-Wen Chang⁴

蘇振維 Cheng-Wei Su⁵

呂怡青 Yi-Ching Lu⁶

(101 年 12 月 24 日收稿，102 年 1 月 24 日第一次修改，102 年 3 月 30 日定稿)

摘 要

雪山隧道的行車速率管制，自通車以來由原先的速限 70 公里/小時，調高到 80、90 公里/小時。然而，雪山隧道的速限調整，主要著眼於運輸通行效率的提升，但是否有顯著效果？本研究利用交通部高速公路局的 VD 資料，分析雪山隧道內的自由車流速率，以了解小車在隧道內運行之基本特性。其次分析隧道內的速率與流率關係及容量，並進一步剖析速限提高對於車道容量與通行能力之影響。結果發現，速限從 70 公里/小時調高為 80 公里/小時之後，容量顯著增加，北上內外車道平均約增加 200 輛/小時，南下內、外車道平均各約增加 150 輛/小時及 300 輛/小時。但速限調高到 90

-
1. 本文為交通部運輸研究所合作計畫「高快速公路收費站、隧道及坡度路段容量及車流特性之研究(1/3)」(100-78-1292) 之部分成果，初稿曾於 101 年中華民國運輸學會年會暨學術論文研討會中發表。
 2. 中央警察大學交通學系教授兼系主任（聯絡地址：333 桃園縣龜山鄉大崗村樹人路 56 號中央警察大學交通學系；電話：03-3282321 轉 4619；E-mail：una139@mail.cpu.edu.tw）。
 3. 美國克拉森 (Clarkson) 大學土木與環境工程學系教授。
 4. 交通部運輸研究所運輸計畫組簡任研究員兼副組長。
 5. 交通部運輸研究所運輸計畫組組長。
 6. 交通部運輸研究所運輸計畫組副研究員。

公里/小時後，容量沒有顯著變化。然而，速限提高到 90 公里/小時之後，雪山隧道在不同需求流量狀況下之里程生產量普遍提高；在流率接近容量時，里程生產量約提高 10%，顯示運輸能力有所提升。

關鍵詞：長隧道；速率與流率關係；容量；速限；里程生產量

ABSTRACT

The speed limit in Xueshan Tunnel was 70 km/h in the beginning, and was raised to 80 km/h and 90 km/h primarily for improving the traffic operating efficiency. But, were there any significant effects? This study used the VD data from the Freeway Bureau to investigate the free flow speed in Xueshan Tunnel and identify the basic operational characteristics of small vehicles. The relationship between the speed and flow-rate and the capacity in the tunnel were then analyzed, followed by an investigation of the impacts of raised speed limit on the capacity and the transportation capabilities. The results showed that the capacity significantly increased to an average of approximately 200 veh/h on the northbound lanes, 150 veh/h on the southbound inside lane, and 300 veh/h on the southbound outside lane when the speed limit was raised from 70 km/h to 80 km/h. No significant changes in the capacity were observed when the speed limit increased to 90 km/h. However, the mileage production at various flow rates generally increased after the speed limit was raised to 90 km/h. The mileage production increased by about 10% when the flow rate is close to the lane capacity, indicating that the transportation capabilities were improved.

Key Words: Long tunnel, Speed and flow-rate relationship, Capacity, Speed limit, Mileage production

一、前言

長達 12.9 公里的雪山隧道是國道 5 號高速公路上最長的隧道，也是世界第 6 長之公路隧道^[1,2]。此隧道有兩個單向孔道（行車淨高為 4.6 公尺）分向通行，各向孔道各有 2 個車道（車道寬度為 3.5 公尺，左右各有 0.3 公尺之路肩及 1 公尺之人行道），穿越了高達 3,886 公尺高之雪山山脈，為雙向 4 車道之國道 5 號隧道群之一重要公路設施。雪山隧道之位置與坪林收費站以北的隧道群路段，如圖 1 所示，主要的隧道包括雪山隧道（12.9 公里）、彭山隧道（3.8 公里）及石碇隧道（2.7 公里）。雪山隧道內的坡度（grade）為 1.255%（往南方向下降），隧道內有一系列的平曲線與直線路段，最短之平曲線半徑為 1,500 公尺。根據 AASHTO^[3] 之幾何設計標準，此隧道之最大安全行車速率超過 120 公里／小時。

公路隧道通常是潛在的車流瓶頸（bottleneck），但其容量有很大的變異性。公路路段之容量是指最少能經常持續 15 分鐘之最大交通流率^[4]。Koshi 等人^[5]指出，日本的公路隧道的容量在 1,100 ~ 1,350 輛／小時／車道（vphpl）之間。Levinson 等人^[6]檢核紐約市

Callahan 隧道的運作，發現該隧道容量為大約 1,600vphpl。而 Chin 與 May^[7] 的研究指出，加州 24 號公路之一部分路段，在長度 900 公尺的 Caldecott 隧道出口 60 公尺處有超過 2,000vphpl 之隧道容量。不論是國際上或是國內，對於長公路隧道運作特性之了解則很欠缺^[8,9]。

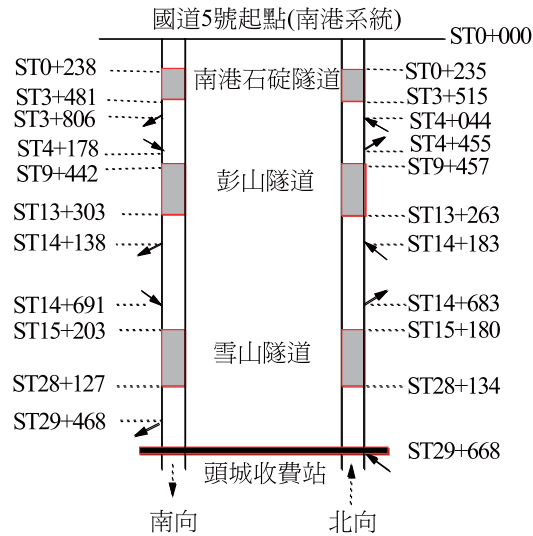


圖 1 國道 5 號南港系統至頭城收費站之間的公路設施概況

Lemke^[10] 指出公路隧道比其他開放 (open) 之公路路段較為安全；但在 1999 年至 2001 年之間發生在歐洲阿爾卑斯山系之 Mont Blanc、Tauern 和 Gotthard 隧道裡的異常災禍^[11]，提升了各界對於長隧道交通安全之關心。有鑑於此，我國高速公路局（以下簡稱高公局）在 2007 年 10 月之前對於國道 5 號之雪山隧道段採取較嚴謹之交通管制；管制重點包括速限 (speed limit) 為 70 公里／小時，且只允許小車通行、禁止在隧道內變換車道、前後車之距離至少 50 公尺，緊急停止時之前後車距離至少為 20 公尺。然而，規範行車前後間距之規定恐不合宜且不易執法。雪山隧道內之行車間距要求至少 50 公尺，並不是普遍的規定，類似的作法是在瑞士的 Gotthard 隧道，在 2001 年發生毀滅性的事故後，此隧道裡的大車彼此之間必須保持至少 150 公尺之距離，以確保當發生任何事故時最多只有一部大車涉入^[12]，以降低危險。

國道 5 號的通行車種與行車速率管制，在 2007 年 10 月之前限定只有小車可以通行雪山隧道，速限為 70 公里／小時；2007 年 10 月之後，高公局仍管制雪山隧道內之行車速限在 70 公里／小時，而國道 5 號之其他路段則提高速限為 80 公里／小時；2007 年 11 月起則開放大客車通行雪山隧道，自 2008 年 3 月 16 日起則將雪山隧道內之速限亦提高至 80 公里／小時；而後，經全面檢視公路幾何條件，於 2010 年 11 月 1 日將速限提高至 90 公里／小時，其他路段除雪山隧道北口至南港系統交流道之間的速限為 80 公里／小時外，

其餘路段均為 90 公里／小時。然而，雪山隧道的速限調整，主要因應每逢假日必塞車的民怨，著眼於運輸通行效率的提升，但是否有顯著的提升？實有待進一步探討分析。

雪山隧道中裝設有許多的交通管理設備，包括每一車道平均距離約 350 公尺之迴圈偵測器 (loop detector) 及平均約每 175 公尺處裝設之 CCTV 系統。迴圈偵測器可用以蒐集交通資料，例如流量、車種、車速及占有率 (occupancy)，這些資料經彙整成每 5 分鐘資料格式來儲存。這些偵測器已經累積了相當多的交通資料，可用以了解長隧道之車流特性。本研究之目的在於利用這些偵測器的資料，分析雪山隧道內不同地點與不同時間的自由車流速率 (free-flow speed)、速率與流率關係、車道容量，尤其是不同速限下對車道容量與通行效率之影響。

二、自由車流速率

自由車流速率 (以下簡稱自由速率)，指一車輛在不受其他車輛影響之情況下的速率。自由速率反映速限、幾何設計及其他與車流有關行車環境 (如天候、照明度等) 的影響。如果一地點的自由速率比上游路段的自由速率低，則該地點可能有較低的容量。

一般而言，如高速公路上車距 (headway) 在 5 秒以上 (或流率在 700 輛／小時以下)，則前車對後車行進的影響不顯著，因此後車可視為在自由旅行狀態中。本研究沒有個別車輛速率之資料。國道 5 號公路偵測器資料為每 5 分鐘資料，因此本研究利用在早上 6 點到晚上 8 點之間，每 5 分鐘流量不超過 12 輛 (平均車距在 25 秒以上) 的偵測器資料，估計在不同偵測站的平均自由速率。國道 5 號 3 個主要隧道的第一個及最後一個偵測器位置如下：

南下

石碇隧道：1.072K 及 3.178K

彭山隧道：9.840K 及 12.945K

雪山隧道：15.478K 及 28.236K

北上

石碇隧道：3.198K 及 1.068K

彭山隧道：12.922K 及 9.457K

雪山隧道：28.420K 及 15.448K

自由速率受速限的限制；國道 5 號公路的速限從 2006 年 6 月雪山隧道通車之後曾經過數度的調整，所以本研究利用表 1 所列日期的偵測器資料探討自由速率隨速限及空間的變化。因為新的速限生效之後，自由速率須隔一段時間才會達穩定狀況，所以本研究所用的資料為新速限生效最少 3 個月之後的資料。

表 1 分析自由速率所用之偵測器資料

偵測器(資料期間)	雪山隧道		雪隧以北路段	
	速限(km/h)	生效年月	速限(km/h)	生效年月
2007 年 9 月(22 天)	70	2006 年 6 月	70	2006 年 6 月
2008 年 2 月(11 天)	70	2006 年 6 月	80	2007 年 10 月
2008 年 6 月(18 天)	80	2008 年 3 月	80	2007 年 10 月
2010 年 1 ~ 5 月(41 天)	80	2008 年 3 月	80	2007 年 10 月
2011 年 2 ~ 5 月(23 天)	90	2010 年 11 月	80	2007 年 10 月

分析上述偵測器資料的結果列於圖 2 到圖 7 中。這些圖顯示國道 5 號上的自由速率有下列特性：

1. 速限從 70 公里／小時提高到 80 公里／小時，然後又進一步提高到 90 公里／小時的管制策略提高了自由速率，但速率增加的程度隨速限的增加而減少。平均自由速率高出速限的大約值如表 2 所示。
2. 在 2011 年 2 月到 5 月之間，雪山隧道速限為 90 公里／小時，其他路段的速限為 80 公里／小時。從圖 4 及圖 7 可知，北上車流在彭山隧道及石碇隧道的自由速率，幾乎跟雪山隧道內之自由速率一樣高，南下車流在彭山隧道及石碇隧道的自由速率，則顯著的低於雪山隧道內的自由速率。這現象的一可能原因是北上駕駛員離開雪山隧道之後，仍習慣以接近 90 公里／小時行車。
3. 雪山隧道北上有 1.255% 之上坡，南下則有同樣坡度的下坡。但是 2011 年的資料顯示南北向之平均自由速率的差別非常小。在大約 16+000K 及 24+000K 之間，南下的自由速率比北上約高 1.5 公里／小時左右。在 24+000K 及 28+000K 之間，南下的自由速率常稍低於北上；因此坡度對自由速率的影響不顯著。

表 2 平均自由速率高出速限之大約值

方向	速限 (公里／小時)	雪山隧道		彭山隧道		石碇隧道	
		內車道	外車道	內車道	外車道	內車道	外車道
北上	70	+ 5	+ 3	+ 10	+ 7	+ 9	+ 6
	80	+ 5	+ 2	+ 9	+ 6	+ 5	+ 5
	90	+ 2	- 1	-	-	-	-
南下	70	+ 6	+ 4	+ 7	+ 4	+ 7	+ 4
	80	+ 4	+ 2	+ 4	+ 2	+ 3	+ 2
	90	+ 2	- 2	-	-	-	-

註：表內“-”表示未調整速限為 90 公里／小時。

4. 雪山隧道速限為 70 及 80 公里／小時之期間內，自由速率明顯高於速限，但是速限提高到 90 公里／小時之後，自由速率大約與速限相等。這現象可能是因為速限為 90 公里／小時之期間的執法較嚴格。另一個原因可能是駕駛員難以接受比 90 公里／小時還高的速率。
5. 如圖 4 所示，北上車流進入雪山隧道之後，自由速率有逐漸下降的趨勢。自由速率在 21.055K（隧道中點附近）處最低，然後回升。最高及最低的自由速率的差距大約只有 4

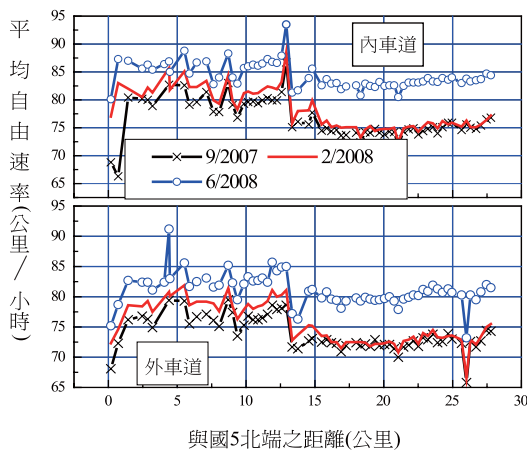


圖 2 北上內外車道自由速率在 2007 年及 2008 年之變化狀況（速限：70kph 或 80kph）

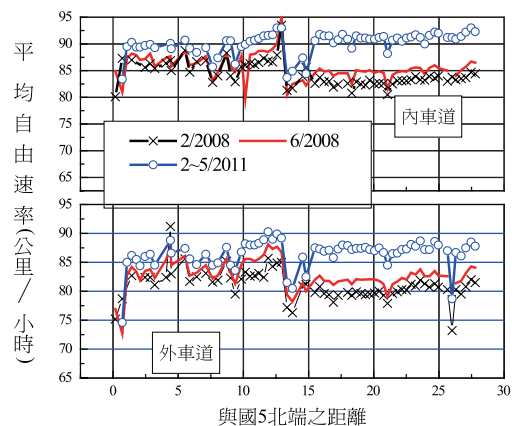


圖 3 北上內外車道自由速率在 2008 年及 2011 年之變化狀況（速限：80kph 或 90kph）

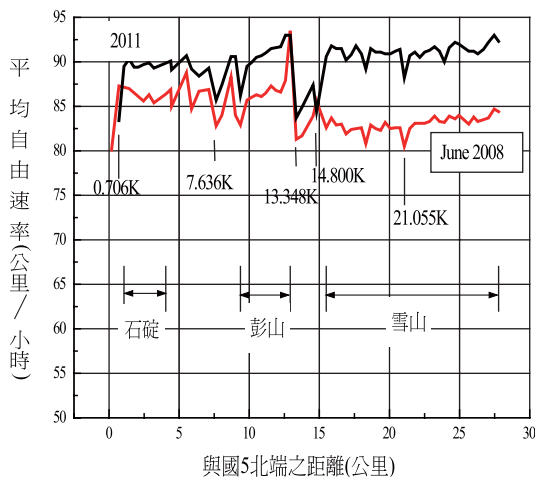


圖 4 北上內車道自由速率在 2008 及 2011 年之變化狀況

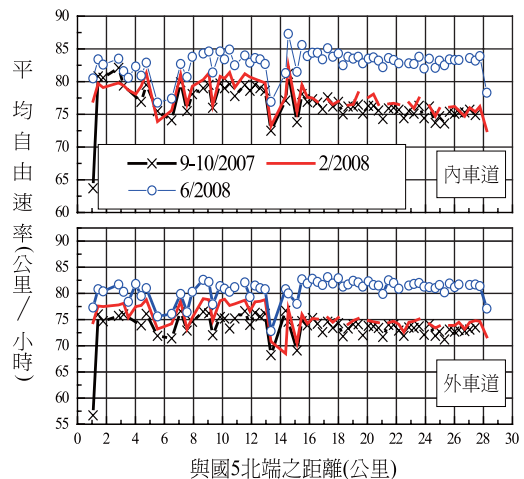


圖 5 南下內外車道自由速率在 2007 及 2008 年之變化狀況（速限：70kph 或 80kph）

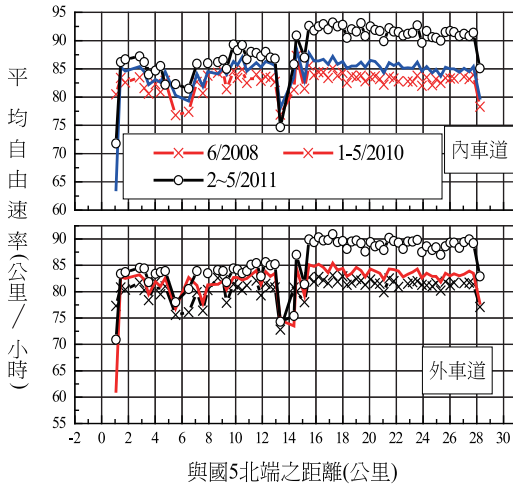


圖 6 南下內外車道自由速率在 2008、2010 及 2011 年之變化狀況 (速限：80kph 或 90kph)

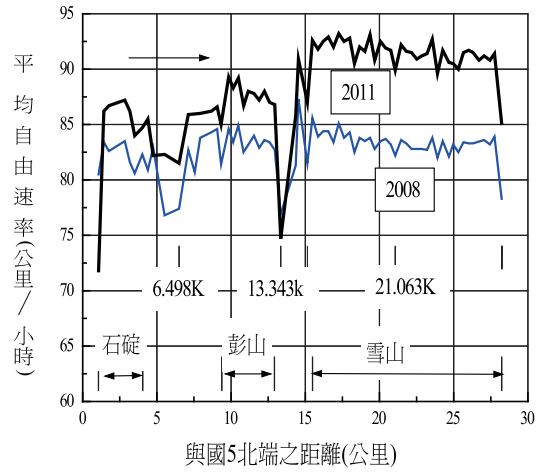


圖 7 南下內車道自由速率在 2008 及 2011 年之變化狀況

公里／小時。車流進入彭山隧道之後，自由速率逐漸下降，從進口到出口的下陷程度大約為 5 公里／小時。石碇隧道的自由速率相當穩定，圖 4 顯示南下車流在 3 個隧道上半段的自由速率皆有比下半段高的現象，但差距只有 1~2 公里／小時。

- 不論日期及速限，自由速率隨地點的變化型態相當一致。有數個地點的自由速率比鄰近上下游偵測器所在地點的自由速率顯著的低。這些地點包括：

南下路段

石碇隧道進口之上游

6.498K 處

彭山隧道出口下游 13.343K 處

雪山隧道進口上游

雪山隧道出口

北上路段

雪山隧道 21.055K 及 18.313K 處

雪山隧道出口下游，出口匝道上游 14.800K 處

彭山隧道進口上游 13.348K 處

7.636K 處

石碇隧道出口附近

雪山隧道自由速率明顯降低之處的共同特色是兩地點皆有人行橫坑。

三、國道 5 號流率與速率關係之基本型態

流率與速率的關係為分析高速公路作業的基本資料，這些關係受許多因素的影響，但一般而言，車流速率高的時候，相關車流密度低，因此流率也低。密度逐漸增加之後，流率也增加，但速率會下降。如果從上游欲通過一路段的流率接近或等於能通過的流率，則車流呈不穩定狀況。上游來的需求流率超過通過一路段之流率時，車流進入壅塞狀況，速率迅速下降，而且能通過一路段的流率也減少。這現象如圖 8 所示 7 個從穩定狀況進入壅塞狀況之車流樣本所示。從此圖亦可知，從穩定狀況進入壅塞狀況時之流率及速率有相當大的變異性；換言之，穩定及壅塞狀況沒有明確的界線。此外，圖 8 亦顯示，不論車流是否穩定，同一速率所相關的流率可能有很大差異，同一流率時之相關速率的差異更大。因此一路段的容量可估計，但不容易確定。

容量指在沒有壅塞狀況時，在某一行車環境下（如速限、天候、車種組成等）經常能通過一定點（或一路段）的最高流率。此流率並非在不同時段內觀察到的流率的最高值。容量應視為車流從穩定狀況進入壅塞狀況之前最高流率的期望值（亦即平均值）。此外，公路容量分析的對象一般是尖峰 15 分鐘或更長時段內的車流狀況，因此容量為能維持最少 15 分鐘之流率。

如圖 9 所示，每 15 分鐘的資料顯示流率相同時，速率有相當大的變異，速率相同時之相關流率也有很大的不同。但是在穩定的車流狀況下（速率未開始急速下降之前），流率與速率關係有明確的趨勢。這狀況下的流率與速率之關係可合理的用一平均關係來代表。進入壅塞狀況之後，車流不穩定，因此流率與速率的關係常有非常大的變異。在這情況下的流率與速率關係難以用平均關係來正確的代表。但一般的壅塞狀況下，速率下降時，流率通常也隨著降低。這特性與在穩定狀況速率下降時流率會繼續增高的現象不同。

為了訂定代表性的流率與速率關係，本研究將每 5 分鐘的偵測器資料整合成 15 分鐘資料，然後根據流率與速率關係的趨勢，分成小區域來估計個別區域的總平均流率及速率，這些總平均流率及速率所顯現的關係為代表性的關係。圖 9 顯示代表性流率與速率關係之一樣本。

車流進入壅塞狀況之後，有些地點的流率與速率資料分散在相當廣的區域，但多數資料仍顯現典型，速率與流率同時下降或速率下降時流率不再增加的現象。在這情況下，本研究只用這些比較集中的資料來估計平均速率及流率。因此在壅塞狀況下的代表性速率與流率關係，只能顯示流率與速率關係之大約趨勢。這些關係不宜用來規劃、設計或訂定控制策略。

上述探討流率與速率關係的對象，包括國道 5 號南北向內外車道在隧道進出口附近及

隧道中點附近。因為流率與速率的關係受速限的影響，所以本研究將 2007 年 9 月至 2011 年 5 月間的偵測器資料，根據相關速限分別分析。2007 年 11 月開始，大客車可使用雪山隧道。大客車百分比大約是全天車輛的 2.5%^[13]。大客車只能行駛外車道，而且內外車道車流各占總車流的比例接近 50%^[13]，因此本研究假設 2007 年 11 月起，外車道之大客車占外車道總車輛之 5%。此外，大客車之小車當量值設定為 1.5。

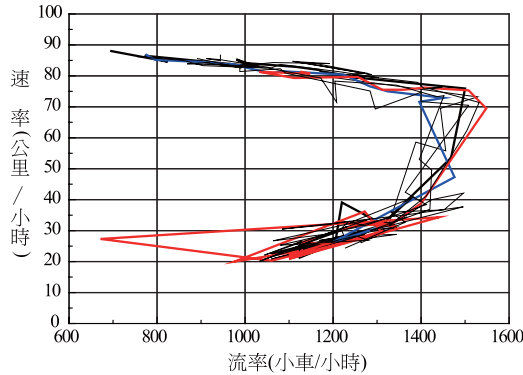


圖 8 車流從穩定進入壅塞狀況之流率與速率關係樣本（北上內車道在 27.779K 處）

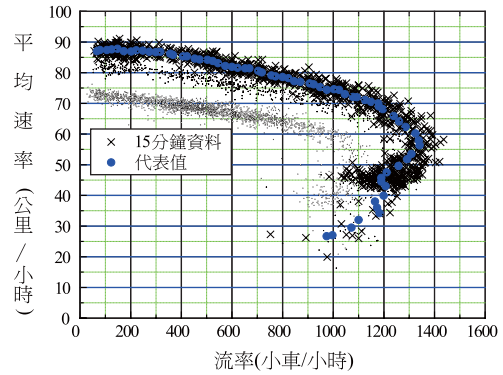


圖 9 每 15 分鐘之流率、速率資料及其代表性關係的樣本（北上內車道在 21.055K）

國道 5 號公路在不同地點之流率與速率關係呈現三種基本型態；第 1 種型態如圖 10 中速限為 90 公里／小時的代表性關係所示。這種型態的特點是穩定車流的流率達到某一程度之後，速率急速並大幅下降，結果車流很快地進入相當壅塞的狀況。這種型態一般是因為從一定點上游來的流率在短時間內遠超過該定點的容量，而且流率超過容量的情況持久不散；隧道進口最容易有這現象。第 2 種型態如前述的圖 9 所示，這種型態常常是因為一定點上游的流率受限制，因此只稍微高於該定點的容量，結果壅塞程度緩慢增加，速率及流率也隨著慢慢減低。第 3 種型態如圖 11 所示，這種型態比較特殊，一般穩定狀況及壅塞狀況交界點的速率在 50 公里／小時以上，但圖 11 顯示速率低到 40 公里／小時的時候，流率與速率關係還沒有呈現速率及流率同時下降的傾向。在這情形下，相關的容量不容易確定。圖 11 所示之型態產生在石碇隧道北上進口下游約 300 公尺處。

四、2011 年雪山隧道之流率與速率關係

2011 年期間雪山隧道之速限為 90 公里／小時，圖 12 顯示北上內外車道車流在雪山隧道進出口及中點附近的代表性流率與速率的關係。如果不考慮隧道外之地點，則雪山隧道中點附近 (21.055K) 及出口附近 (15.855K) 的流率與速率關係代表最不理想的車流特性。在穩定的車流狀況下，隧道中點附近的速率比其他地點低，其容量比進口附近 (27.779K

及 28.420K) 的容量低得多。隧道出口下游 (14.800K) 在短距離內有進出口匝道，因此該處的作業特性也不理想。圖 12 亦顯示雪山隧道的北上車道在隧道中點附近有較差的作業特性。

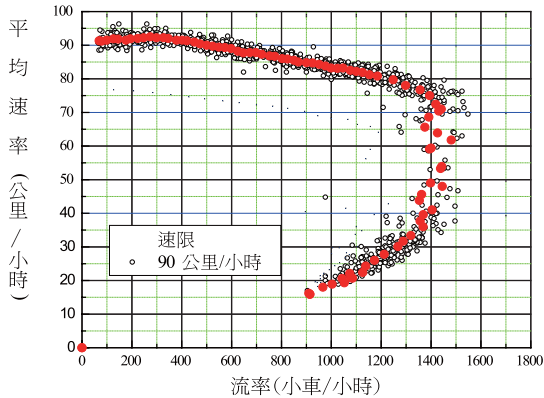


圖 10 流率與速率關係之型態樣本 1 (北上 27.779K)

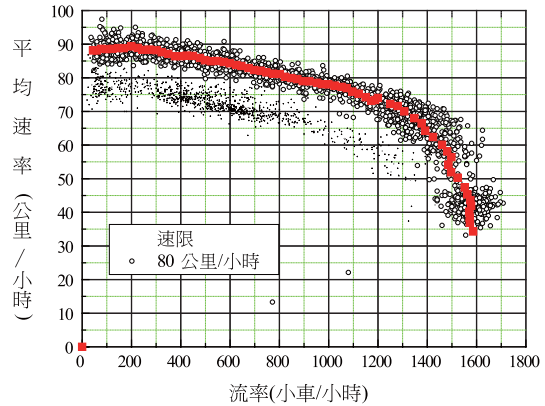
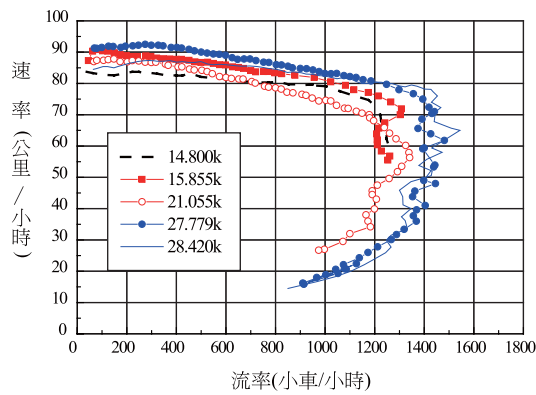
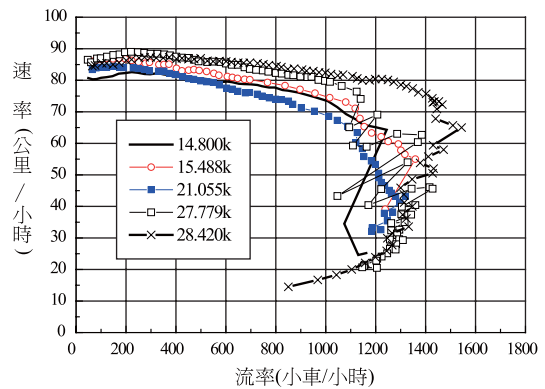


圖 11 流率與速率關係之型態樣本 2 (北上 3.198K)



(a)內車道



(b)外車道

圖 12 雪山隧道北上進出口附近及中點附近流率與速率關係

圖 13 為 2011 年雪山隧道南下車流之內車道及外車道的代表性速率與流率關係。此圖顯示雪山隧道內在中點附近 (21.063K) 的作業特性最不理想。這現象與北上路段的作業特性相似。

雪山隧道內，南北向在隧道中點附近的流率與速率關係皆比上游路段差。從圖 14 可知，此隧道北上路段的交通功能比南下路段不理想。北上的容量比南下的容量約低 150 輛／小時／車道。

圖 15 顯示彭山隧道南北向車流在未進入壅塞狀況之前的流率與速率關係幾乎沒有區別，但是南下車流在較低的流率時就會進入壅塞狀況。這現象可能是北上出口附近沒匝道而南下出口附近有匝道所造成。此外，石碇隧道南北向的流率與速率關係，亦有類似彭山隧道的性質。

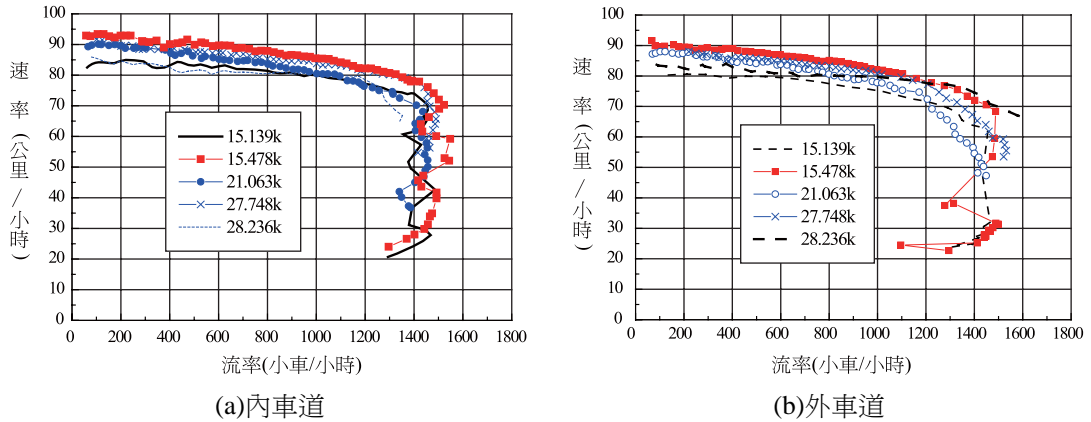


圖 13 雪山隧道南下進出口附近及中點附近流率與速率關係

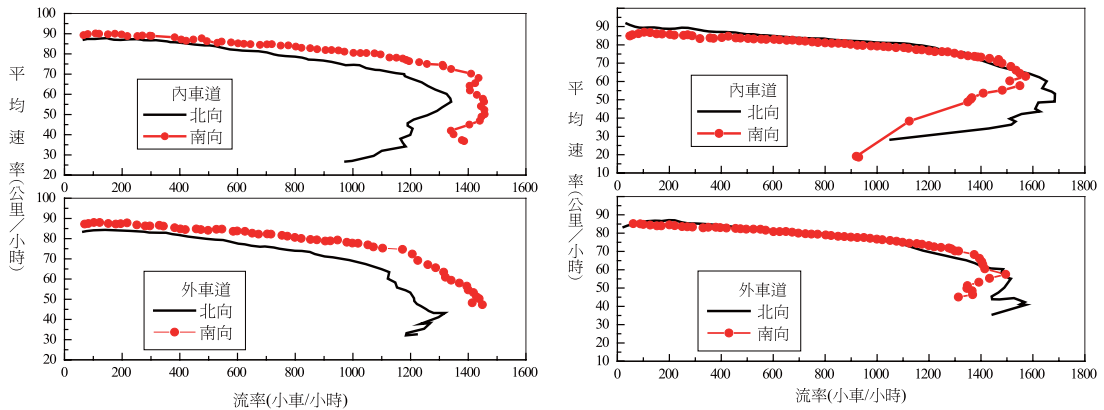


圖 14 雪山隧道南北向流率與速率關係之比較

圖 15 彭山隧道南北向流率與速率關係之比較

五、速限與容量的關係

國道 5 號的速限從 70 公里／小時提高到 80 公里／小時之後，南北向容量顯著地改善，但雪山隧道的速限從 80 公里／小時提高到 90 公里／小時之後，容量幾乎沒有變化。圖 16

及圖 17 為這個現象的兩個例子。本研究並進一步分析得表 3 之結果，顯示在不同速限時，南北向內外車道在不同地點的容量及其相關臨界速率（亦即流率等於容量時之平均速率）。

速限從 70 公里／小時提高到 80 公里／小時之後，北上內車道各地點的容量平均大約增加了 200 輛／小時，北上外車道容量之改善程度則平均在 200 輛／小時以上。南下內車道的容量平均約增加 150 輛／小時，外車道的容量則約增加 300 輛／小時。

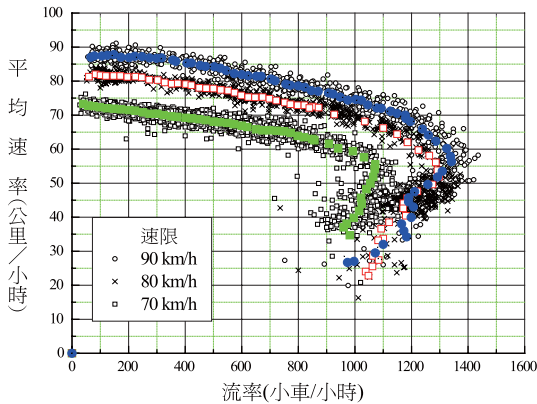


圖 16 北上內車道在 21.055K 處流率與速率在不同速限下之關係

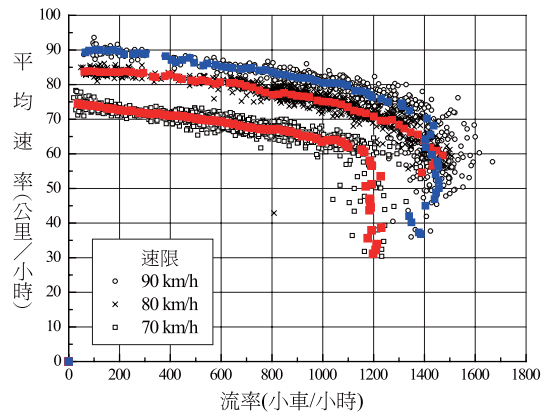


圖 17 南下內車道在 21.036K 處流率與速率在不同速限下之關係

雪山隧道的速限從 80 公里／小時提高到 90 公里／小時之後，雖然容量幾乎沒增加，但其通行能力或運輸功能 (transportation capability) 事實上大有改善。容量的相關臨界速率常隨地點而有很大的差異。以表 3 中所列的臨界速率為例，其變異範圍在 40 與 71 公里／小時之間。如兩路段各有 1,300 及 1,400 輛／小時／車道的容量，但其相關臨界速率各為 60 及 45 公里／小時，則容量為 1,300 輛／小時／車道的路段在一小時內最多能產生 $1,300 \times 60 = 78,000$ 車公里之里程，容量較高的路段在一小時內最多只能產生 $1,400 \times 45 = 63,000$ 車公里的里程。從這立場而言，上述容量低的路段反而有較高的運輸功能。因此里程生產量 (mileage production) (亦即流率乘以速率) 可作為為評估公路運輸功能之一比較合適的參數。張瓊文等人^[9]的研究亦建議利用里程生產量來評估隧道的運輸功能。

以圖 18 在北上 21.055K 處的內車道為例，速限從 80 公里／小時提高到 90 公里／小時之後，容量沒有實質的增加，但從里程生產量的立場而言，圖 19 顯示在穩定狀況下 (里程生產量隨流率的增加而增加)，90 公里／小時速限下的里程生產量大於 80 公里／小時速限下的生產量。流率在 1,000 ~ 1,350 輛／小時之範圍內時 (流率接近容量)，速限 90 公里／小時的里程生產量比速限 80 公里／小時的里程生產量約高 10%。里程生產量也有助於訂定公路之運作策略。圖 18 顯示速率與里程生產量有明顯的關係，所以這種關係可作為訂定管制策略的參考。

表 3 雪山隧道在不同地點之容量及臨界速率

地點		速限(km/h)					
與國 5 北端之距離	車道位置	70		80		90	
		容量 (pcph)	臨界速率 (km/h)	容量 (pcph)	臨界速率 (km/h)	容量 (pcph)	臨界速率 (km/h)
15.488k	北上內車道	1050	51	1260	66	1310	72
20.055k	北上內車道	1070	56	1300	52	1340	56
27.779k	北上內車道	1190	64	1400	68	1440	71
15.488k	北上外車道	1030	49	1250	55	1280	55
21.055k	北上外車道	960	40	1250	48	1260	50
27.779k	北上外車道	930	65	1280	55	1260	72
15.478k	南下內車道	1280	64	1450	71	1500	69
21.063k	南下內車道	1230	54	1440	58	1470	58
27.442k	南下內車道	1290	58	>1530	57	1500	62
27.748k	南下內車道	1330	62	>1550	63	1500	66
28.236k	南下內車道	—	—	—	—	>1353	<66
15.478k	南下外車道	1160	58	1450	71	1560	53
21.063k	南下外車道	>1230	<54	1440	58	1420	51
27.442k	南下外車道	>1270	<54	>1530	57	>1550	<55
27.748k	南下外車道	>1370	<54	>1550	63	>1630	65
28.236k	南下外車道	—	—	1570	61	1630	65

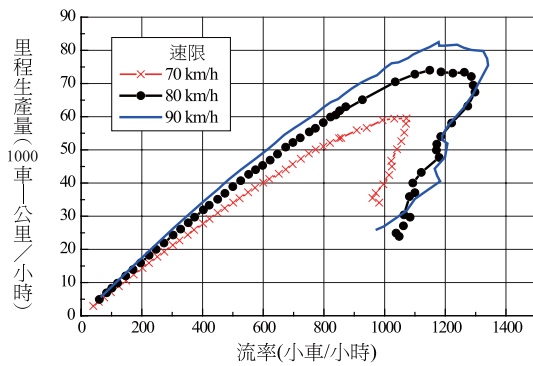


圖 18 北上內車道在 21.055K 處之里程生產量與流率的關係

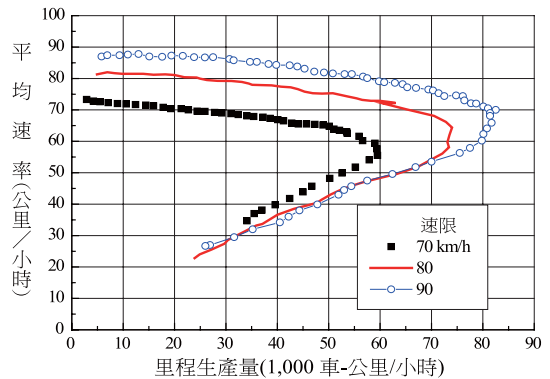


圖 19 北上內車道在 21.055K 處之里程生產量與速率的關係

運輸設施通常追求效率及安全兩大目標，本研究之主體在於探討速限對於雪山隧道通行能力之影響，並沒有特別針對安全議題進行討論。雪山隧道在通車初期（2008 年 6 月之前）僅發生 2 件 A2 事故及 8 件 A3 事故^[9]，截至 101 年 6 月則有 9 件火燒車事件^[14]，但是在 2012 年 5 月 7 日卻發生了 2 死 28 傷的首都客運重大事故，其肇事原因雖屬人為因素（大客車駕駛未保持安全距離），但是雪山隧道提高速限之後，是否造成交通安全之負面影響，為一重要研究課題，建議後續研究持續追蹤分析。

六、結 語

經本研究之分析發現，雪山隧道內南北向在隧道中點附近的流率與速率關係皆比上游路段差。此隧道北上路段的交通功能比南下路段不理想，北上的容量比南下的容量約低 150 小車／小時／車道。進一步而言，雪山隧道北上在隧道中點附近的容量只有 2,600 小車／小時（內外車道各為 1,340 及 1,260 小車／小時）。北上隧道進口附近的容量稍高，可達 2,700 小車／小時（內外車道各為 1,440 及 1,260 小車／小時），但是進口進入壅塞狀況然後開始疏解時的流率高於容量。因隧道中點附近的容量不足，所以在假日高流量期間容易造成往上游傳遞的衝擊波，造成隧道進口及其上游路段壅塞情況的惡化。

相較目前已知日本的公路隧道容量約 1,100 ~ 1,350 小車／小時／車道^[5]，美國紐約市 Callahan 隧道的容量約 1,600 小車／小時／車道^[6]，臺灣之雪山隧道容量約 1,260 ~ 1,440 小車／小時／車道。不論就實務運作或是學術研究而言，國際或是國內仍有必要持續對於長公路隧道之運作特性深入了解。

國道 5 號公路之速限曾數度調高，速限從 70 公里／小時調高為 80 公里／小時之後，北上內車道各地點的容量平均大約增加了 200 小車／小時，北上外車道容量之改善程度則平均在 200 小車／小時以上。南下內車道的容量平均約增加 150 小車／小時，外車道的容量則約增加 300 小車／小時。但雪山隧道之速限從 80 公里／小時又調高到 90 公里／小時之後，容量沒有顯著變化。另一方面，本研究利用里程生產量進行分析，結果發現速限提高之後，雪山隧道在不同需求流量狀況下之里程生產量普遍提高，顯示其運輸功能有所提升。流率在 1,000 ~ 1,350 小車／小時之範圍內時（流率接近容量），速限 90 公里／小時的里程生產量比速限 80 公里／小時的里程生產量約高 10%。此外，速率與里程生產量有明顯的關係，所以這種關係可作為訂定管制策略的參考。

參考文獻

1. 高速公路局，「雪山隧道宣導專區」，<http://www.freeway.gov.tw/>，民國 97 年。
2. 呂介斌等，「雪山隧道規劃設計回顧」，現代營建，第 318 期，民國 95 年，頁 32-42。
3. American Society of State Highways and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design*

- of Highways and Streets*, American Society of State Highways and Transportation Officials, Washington, D.C., 2004.
4. Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board of the National Academies of Science, Washington, D.C., 2000.
 5. Koshi, M., Kuwarara, M., and Acahane, M., "Capacity of Sags and Tunnels on Japanese Motorways", *ITE Journal*, Vol. 62, No. 5, 1992, pp. 17-22.
 6. Levinson, H. S., Golenberg, M., and Howard, J., "Callahan Tunnel Capacity Management", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1956, 1985, pp.1-10.
 7. Chin, H. C. and May, A. D., "Examination of the Speed-Flow Relationship at the Caldecott Tunnel", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1005, 1991, pp.75-82.
 8. 林豐博、蘇振維，「國道 5 號雪山隧道車流特性之研究」，*運輸計劃季刊*，第 38 卷，第 1 期，民國 98 年，頁 85-120。
 9. 張瓊文、林豐博、曾平毅，「雪山隧道內車流特性與容量之分析」，*中國土木水利工程學刊*，第 22 卷，第 3 期，民國 99 年，頁 141-148。
 10. Lemke, K., "Road Safety in Tunnels", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1740, 2000, pp.170-174.
 11. IAM Motoring Trust, "Dartford Tunnel Needs More Investment. London, 2004", www.iam.org.uk/motoringtrust/news/, 2008.
 12. Rapp, M. H., "Alternative One-Way Traffic and Truck Metering for Increase Safety in Tunnels through the Swiss Alps", *Proceedings of 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS America*, CD-ROM, 2002.
 13. 交通部運輸研究所，*高快速公路收費站、隧道及坡度路段容量及車流特性之研究 (2/3)*，民國 101 年。
 14. 高速公路局，「本局快報最新消息」，<http://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=610&p=1152>，民國 102 年。

以戶口普查資料分析運輸需求空間結構 分布的變遷

AN ANALYSIS OF THE CHANGES IN SPATIAL STRUCTURE FOR TRAVEL DEMAND BASED ON CENSUS DATA

許添本 Tien-Pen Hsu¹

吳佩蓉 Pei-Rong Wu²

(99 年 8 月 31 日收稿，100 年 6 月 1 日第一次修改，100 年 7 月 12 日第二次修改，
101 年 4 月 27 日第三次修改，101 年 7 月 31 日第四次修改，
101 年 10 月 1 日第五次修改，102 年 3 月 30 日定稿)

摘 要

因經濟快速成長、產業結構轉型所帶來人口聚集、區域發展失衡等現象，近年來已成為各國政府普遍重視的議題。臺灣過去因為經濟迅速成長，國民所得與消費能力增加，致使機動車輛需求日增，民眾機動力大幅提升，產生多面向的改變。這些改變均直接、間接地造成人口遷徙、居住與產業設置區位空間結構重新分配。為了解臺灣地區就業人口工作旅次空間結構集散變化趨勢及通勤行為變化情形，本研究利用民國 79 年、89 年戶口及住宅普查原始資料進行分析。採用熵值與吉尼係數作為衡量空間結構集散變化的指標，同時利用相對落差分析，進一步探討造成分布集中化的原因及群體，以釐清造成分布不均的問題癥結所在，希望能夠提供政府相關單位作為政策規畫制訂標的對象之參考依據，以消弭區域發展差距，達到區域均衡發展的目標。研究結果顯示：臺灣地區在此一期間整體就業人口

-
1. 國立臺灣大學土木工程學系副教授（聯絡地址：臺北市羅斯福路 4 段 1 號國立臺灣大學土木工程學系；電話：02-23625920#401；E-mail：hsutp@ntu.edu.tw）。
 2. 國立臺灣大學土木工程學系研究所博士班候選人（聯絡地址：臺北市羅斯福路 4 段 1 號國立臺灣大學土木工程學系；電話：02-23625920#303；E-mail：d91521005@ntu.edu.tw）。

工作旅次的空間結構分布呈集中趨勢，居住地點與工作地點位於同一鄉鎮之在地就業工作旅次所占比例增加且工作旅次通勤距離減少。

關鍵詞： 熵；吉尼係數；空間分布；戶口及住宅普查

ABSTRACT

Population accumulation and regional disparity caused by rapid economic growth and industrial transformation have become more and more important issues all over the world in recent years. The fast economic growth in Taiwan led to increases in various aspects: the national income, purchasing power, demand for motor vehicles, and consequently the mobility of citizens. All of these changes directly or indirectly caused migration, relocation of residential and industrial areas, and spatial restructuring. This paper analyzed the original population and housing census data in 1990 and 2000, to explore the trend of changes in spatial diffusion and centrality due to working trips among the working population as well as the changes of commuting behavior. Entropy and Gini coefficient were used as indicators to measure the spatial structure changes. Furthermore, relative divide was used to investigate the reasons and groups that caused the centralization and verify the causes of disparity. The aim was to provide references for related government agencies in formulating policies and setting targets. This information helped to reduce the development gap and achieve the goal of balanced regional development.

The results revealed a trend of centrality of the spatial changes due to working trips among the total working population in Taiwan from 1990 to 2000. In addition, the proportion of working trips increased and commuting distance became shorter when workers reside and work in the same township.

Key Words: *Entropy; Gini coefficient; Spatial distribution; Population and housing census*

一、緒 論

臺灣在經濟發展初期，為求快速成長採取聚集經濟之發展策略，透過國家政策與資源發展重點都市。此種將資源過度投注於特定區域的作法，雖有效促進臺灣整體經濟成長，然而同時也產生「南北差距、城鄉差距、東西差距」等區域失衡現象。根據行政院主計處統計資料顯示，臺灣在民國 79 年與 89 年間經濟年平均成長率達 6.44%，民國 89 年國內生產總值 (GDP) 約為 79 年的兩倍，足見臺灣地區過去數十年來，經濟發展非常快速。穆青雲等人^[1]與楊宗棋^[2]指出經濟成長直接對國民所得、就業結構與區域發展等方面產生影響，且區域發展與經濟成長呈現相輔相成的趨勢。經濟迅速成長，除國民所得提高外，同時亦促進產業由以二級產業為主逐漸轉型為以三級產業為主的經濟結構。而在經濟成長與所得提高相互作用下，機動車輛的需求及使用亦隨之增加，空間結構的改變造成工作旅次

通勤距離產生變化，加上機動車輛持有比率增加，更是對通勤旅次、通勤運具等相關通勤行為產生莫大影響^[3,4]。

目前各國均相當注重經濟發展所帶來的問題，諸如人口、產業聚集在特定區域，產生新的居住工作空間結構型態，使得資源過度集中在某些區域，這種區域發展失衡的現象逐漸受到關注。國內外對於區域均衡發展的相關研究眾多，研究重心主要為避免資源過度集中，造成公共投資浪費，以達到區域發展之均衡性為關注焦點。但對於經濟發展過程對人口空間分布、產業結構改變對就業人口工作旅次分布及通勤行為所產生的影響，則較未受到應有之關注。就業工作地點的選擇，對通勤距離、通勤行為有直接影響，而就業人口工作旅次空間結構更攸關國家未來的區域與經濟發展，故實有對工作旅次分布情況及通勤行為為深入探討之必要性。

本研究為了解臺灣在經濟快速發展過程中就業人口工作旅次分布及通勤行為變化趨勢，利用民國 79 年及 89 年戶口及住宅普查（以下稱戶口普查）資料進行分析，探討 79 年至 89 年間（以下稱研究年期）就業人口工作旅次空間結構分布變化趨勢，並利用熵值、吉尼係數兩項指標分析不同地理分區與各就業級別就業人口分布集散變化情形，最後再對就業人口通勤行為，如在地就業、通勤距離等項目進行討論。

本研究分為 5 部分，首先說明研究背景、動機與目的後，第 2 部分為文獻回顧與資料說明，第 3 部分說明所採用的研究方法，第 4 部份進行就業人口工作旅次集散暨通勤行為變遷分析，最後則是結論與建議。

二、文獻回顧與資料說明

本節先說明戶口普查及其應用，接著介紹遷徙行為、通勤行為相關文獻，最後對本研究所使用的資料與工作旅次資料產製過程作一說明。

戶口普查可完整反映全國的發展狀況，故先進國家皆有定期進行戶口普查計畫。根據聯合國統計資料顯示，公元 2000 年前後，全球超過 90% 的國家實施戶口普查，普查對象涵蓋全世界總人口數 99% 以上，除了顯示各國對戶口普查的重視外，亦顯現戶口普查的重要性。我國戶口普查的作業內容均根據歷次調查缺失、聯合國原則與各國經驗做精進，並辦理事前試驗調查、事後複查等審核工作，加上有明確法令依據、定期辦理，民眾對此調查之熟悉度與認同度較高，所取得資料具一定之可靠性與信賴度。

區域發展是一種空間結構變遷現象，而空間結構係由人口及其活動在空間上所組成，因此區域發展隱含著人口與活動區位分布改變之意涵，故可藉由戶口普查資料探討區域發展趨勢。戶口普查資料的內容與結果廣泛地運用在社會環境變遷^[5-7]、經濟商業活動^[8-10]、都市結構發展^[11-13]、空間結構改變^[14,15]及交通運輸等領域。在交通運輸領域中利用戶口普查資料進行的分析研究包含範圍甚廣，包括通勤旅次^[16]、運具選擇^[17,18]與旅運行為^[19,20]等方面。

在遷徙行為、通勤行為之影響因素方面，許道欣^[21]採用主計處國內遷徙調查資料，探討個人社經特性及地區條件對遷徙傾向與選擇遷徙地區之影響；研究結果顯示就業人口的性別、年齡、婚姻狀態與就業級別均會影響遷徙傾向。洪嘉瑜等人^[22]與王怡雯^[23]認為除上述因素外，教育程度亦為影響遷徙決策重要因素。陳建偉^[24]更進一步指出遷徙者中以已婚有偶、年齡 30-34 歲、高中（職）學歷、從事製造業、每人平均收入 2 萬至 3 萬居多，顯示收入亦為影響因素之一。除上述所提及的個人屬性外，前述文獻中亦指出：戶內人口數、家庭總收入、住宅（如：住宅所有權、型式）、居住時間、工作、家庭、教育因素等等亦影響遷徙決策。

除個人屬性外，遷入地區與原居地條件亦為遷徙決策重要影響因素。陳建偉^[24]指出遷入地區之教育環境、購物、休閒娛樂設施、文化設施、住宅品質等項目，對遷徙者具正向拉力作用。洪嘉瑜等人^[25]的研究結果顯示地區的相對就業機會、相對薪資與相對產業結構越有利者，越能吸引遷徙者遷入。另一方面，原居地房價、原居地失業率與原居地每萬人醫師數^[26]、地區發展速度^[21]等，均為遷徙決策影響因素。

由前述文獻可知，遷徙決策受遷徙者本身屬性、原居地與遷入地區條件等因素影響。遷徙者屬性包括性別、年齡、婚姻狀態、就業級別、教育程度、薪資與生命週期等；地區條件包括地區的經濟條件、環境條件與社會條件，此外居住時間、住宅型式與所有權等亦為遷徙決策影響因素。而在工作通勤行為方面，賴文泰^[27]與段良雄^[28]也指出工作通勤旅次會受到就業人口本身屬性、居住地點、就業地點及通勤工具便利性等相關因素影響。

根據文獻所獲資訊，本研究由遷徙者屬性與地區條件兩方面進行分析。考量戶口普查調查資料項目之限制，本研究擇取相關變數進行實證分析，在遷徙者屬性方面，本研究擇取的戶口普查資料項目計有：就業人口居住地點（縣市、鄉鎮）、年齡、性別、教育程度、就業狀況、就業級別、就業地點（縣市、鄉鎮）等欄位；在地區條件方面，此部分牽涉層面甚廣影響因素頗多，本研究以鄉鎮、縣市、都會區、區域四大地理分區為影響變數。若人口或產業在鄉鎮間分布愈不均勻，集中於某些鄉鎮，表示這些鄉鎮的地區條件較有吸引力，同時意味著鄉鎮為影響分布均勻程度的因素。

我國分別在民國 45 年、55 年、69 年、79 年、89 年及 99 年（民國 99 年之調查資料尚未公開）辦理過 6 次戶口普查計畫，本研究採用目前主計處已公布最近兩年期戶口普查資料進行分析，分別為民國 79、89 年戶口普查資料。

就業人口工作旅次資料產製過程主要包含資料判定、檢核、處理與分析等步驟。資料之判定與檢核內容包括：自戶口普查原始資料擇取就業狀態、就業級別、居住地點、就業地點等相關欄位、就業中人口（普查標準週有職業且正就業中）、家戶就業人口數應小於家戶人口數等，另考量每日工作旅次通勤距離之合理性，如居住或就業地點任一端位於離島區域者，不納入分析範圍；接著將符合檢核條件之資料逐筆進行分析，因本研究係針對家旅次中之家工作旅次進行分析，故以居住地點端為旅次起點，就業地點端為旅次迄點，再根據旅次起點與迄點所在縣市鄉鎮（此處以鄉鎮為例進行說明），累加各縣市鄉鎮的旅次起點數量與旅次迄點數量，所獲得的旅次資料為整體就業人口的累加值。

三、研究方法

許多指標可用以衡量區域發展與空間分布程度，例如：熵值、社會指標（出生率、mortality、居住條件等）、經濟指標（失業率、就業率、國內生產毛額 GDP）^[29]、變異係數（coefficient of variation）、吉尼係數（gini coefficient）、極大與極小比值方法及幾何平均數等。Cowell^[30] 提出適當的衡量指標應滿足下列特性：移轉原則（transfer principle）、所得規模無關性（income scale independence）、人口規模無關性（population size independence）與可拆解性（decomposability）等，並稱其為衡量不均度指標的 4 種特性。

在考量不均度指標的 4 種特性及所分析的資料性質，本研究擇定熵值與吉尼係數作為衡量分布集散程度之指標。近年來，熵值被廣泛地運用在運輸相關領域，例如：交通資料融合^[31,32]、企業結構特性^[33]、區域發展^[34-36]、交通監控系統^[37]。除上述應用外，王大立^[38]、鄭佩欣^[39]亦運用熵值來衡量區域集散程度。熵值具有可針對不同區域間的集散程度進行比較等優點，故本研究選擇此一指標衡量研究年期臺灣地區工作旅次空間分布集散程度變化情形。

另一方面，吉尼係數亦是評估分布程度相當廣為運用的指標，且其分布均勻考量包含整體分析單位的資訊^[40]。因此，在參考相關研究^[41,42]之後，本研究同時採用吉尼係數作為衡量指標。

3.1 極大熵理論

熵值最早主要係應用在物理學領域，Clausius^[43]於熱力學第二定律中提出此一觀念。熱力學第二定律是指在封閉系統中，能量由一種狀態轉變為另一種狀態的過程，一部分的能量轉變成無用的廢能，是一種不可逆轉的單向過程，此種特性即為 Entropy（熵）法則，以 Entropy 來計算熱形式能量之物理量，是一種反應系統狀態變化的指標，Shannon^[44]等學者將波茲曼的理論應用於資訊理論（information theory），隨後又有其他學者也將熵觀念引入其他領域的研究，例如 Odum^[45]運用於生態學、Theil^[46]運用於經濟學等領域，遂使得熵值迅速發展和多方應用。

茲將本研究所採用的熵值計算式及各變數代表意義說明如下：

$$H = -\sum_{i=1}^I P_i \ln P_i \quad (1)$$

其中 I 代表研究範圍分區總數， P_i 為 i 分區工作旅次數占總工作旅次數的比例，所有 P_i 總和等於 1； \ln 為自然對數。由公式 (1) 可知熵值介於零與研究範圍分區總數的自然對數值之間。當所有工作旅次活動均集中於同一分區（出發、抵達）時，該分區 P_i 為 1，而其他分區 P_i 皆為 0，此時熵值為 0。反之，當工作旅次活動均勻分布於各分區時，各分區

P_i 相同，熵值最大，即為分區總數之自然對數值。惟熵值應用上有一應注意之處，熵值僅用於分析比較不同範圍或對象其集散情形的相對差異性，無法實際定義不同熵值所代表的集散程度。

3.2 吉尼係數與相對落差

吉尼係數常用於觀察所得收入分配公平程度的指標，表示整體資料分布均勻程度，在本研究中即為「整體就業人口分布不均程度」，並無法獲知該分析項目中所包含群體對分布均勻現象的影響程度；意即單以吉尼係數無法獲知造成不均勻的群體。如欲進一步了解各群體對不均程度的影響方向，則需透過相對落差進行分析^[47]。

「相對落差」的概念為「若某群體使得羅倫茲曲線更接近（偏離）完全均等線，則代表該群體減緩（加劇）落差狀況」。

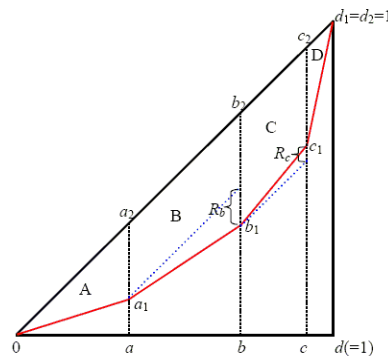


圖 1 羅倫茲曲線與各群體間相對落差示意圖

特定群體之「相對落差」係指經排序後某一群體（相較於前一群體）使羅倫茲曲線與完全均等線間差距之變化量（意即該群體造成羅倫茲曲線相對於完全均等線之「邊際偏離 (marginal divergence)」)；用以代表各群體對「整體不均」之影響程度。若「相對落差」為正值，代表該群體造成落差加劇；反之「相對落差」若為負值，則代表該群體使落差減緩。

以圖 1 為例說明「相對落差」：將 a 、 b 、 c 及 d 4 組群體予以排序後繪製羅倫茲曲線為 $0a_1b_1c_1d_1$ 。依據吉尼係數觀念，落差成因為羅倫茲曲線 ($0a_1b_1c_1d_1$) 偏離完全均等線 ($0a_2b_2c_2d_2$)。此時群體 a 使羅倫茲曲線偏離完全均等線之距離為 a_1a_2 ，其他群體之偏離距離依序分別為 b_1b_2 、 c_1c_2 與 d_1d_2 。以群體 b 與群體 c 為例，根據上述定義，群體 b 相對落差 $R_b = b_1b_2 - a_1a_2 > 0$ ，群體 c 相對落差 $R_c = c_1c_2 - b_1b_2 < 0$ ；故可得知群體 b 使落差加劇，群體 c 則是減緩落差。

採用相對落差概念探討造成落差之主要群體，可進一步確認造成分布不均的主要群體，有助於了解全面性的分布情形，作為相關政策對象標的之參考依據。

四、工作旅次集散暨通勤行為變遷分析

此節進一步利用熵值與吉尼係數兩項指標衡量工作旅次空間分布集散程度變化情形。

4.1 就業人口工作旅次集散變遷分析

本研究採用戶口普查資料中就業人口工作旅次資料，探討研究年期旅次起點、迄點與旅次分布在鄉鎮、縣市及四大區域三地理分區的集散變化趨勢。當以較大分區範圍進行分析時，係假設該分區人口均勻分布於此空間範圍內，在此條件下，分析結果誤差應大於以較小分區進行分析所得結果，故如能以較小分區範圍進行研究，應可獲得較精確的分析結果。鄉鎮市區為我國目前最基層的地方行政區，可作為空間規劃、區域發展與政策制定最基礎之單元，故本研究進行工作旅次集散變化與通勤行為變化分析主要以鄉鎮為研究單元；在集散變化分析方面，為了解縣市間及北、中、南與東部四大區域間發展情形，一併探討縣市與四大區域（四大區域涵蓋範圍詳如附錄 1）地理分區之空間結構變化情形。

4.1.1 熵值

透過公式 (1) 求算研究年期整體及各級就業人口分別於各地理分區在旅次起、迄點與旅次分布等 3 個分析項目的熵值，茲將熵值分類整理如表 1 至表 3，並說明其分析結果如下：

在就業人口工作旅次起點方面，研究年期整體就業人口在鄉鎮、縣市及四大區域三地理分區均呈現集中趨勢，表示民國 89 年就業人口居住地點分布較 79 年更集中。由各就業級別來看，一級就業人口工作旅次起點分布情形在三地理分區所獲結果一致，均呈現集中趨勢，顯示研究年期一級就業人口居住地點分布變得更不均勻；二級就業人口工作旅次起點在鄉鎮地理分區呈分散趨勢，縣市及四大區域則呈現集中趨勢，顯示二級就業人口旅次起點在鄉鎮間之分布雖已呈現分散趨勢，但仍集中在某些縣市與區域；三級就業人口分布在三地理分區均呈現分散趨勢，表示民國 89 年三級就業人口居住地點分布較民國 79 年均勻。

在就業人口工作旅次迄點方面，研究年期整體就業人口在鄉鎮、縣市及四大區域三地理分區均呈現集中趨勢，表示民國 89 年就業人口工作旅次迄點（即工廠或公司設立地點）分布較民國 79 年更集中。由各就業級別來看，一級就業人口在三地理分區所獲結果一致，均呈現集中趨勢，二級與三級就業人口在三地理分區所獲結果一致，均呈現分散趨勢，表示民國 89 年二級、三級產業之工廠或公司設立地點分布較民國 79 年均勻。

在就業人口工作旅次分布方面，研究年期整體就業人口在鄉鎮地理分區旅次分布呈現分散趨勢，縣市、四大區域兩個較大分區範圍地理分區則呈現集中趨勢（表 2 數據均為 3.52，以原始數據進行判斷時，可知呈現集中趨勢）。惟縣市地理分區，兩年度熵值相差幾

微。由各就業級別來看，一級、二級工作旅次分布在三地理分區的集散均呈現集中趨勢，而三級就業人口旅次分布呈分散趨勢。

表 1 工作旅次熵值表－鄉鎮層級

		一級就業	二級就業	三級就業	整體就業
旅次起點	民國 79 年	5.63	5.23	5.03	5.37
	民國 89 年	5.55	5.25	5.14	5.32
	集散變化	集中化	分散化	分散化	集中化
旅次迄點	民國 79 年	5.61	5.03	4.79	5.27
	民國 89 年	5.55	5.1	5.02	5.24
	集散變化	集中化	分散化	分散化	集中化
旅次分布	民國 79 年	6.02	7.03	6.9	6.98
	民國 89 年	5.84	7.00	7.00	7.09
	集散變化	集中化	集中化	分散化	分散化

表 2 工作旅次熵值表－縣市層級

		一級就業	二級就業	三級就業	整體就業
旅次起點	民國 79 年	2.86	2.77	2.69	2.84
	民國 89 年	2.69	2.75	2.72	2.81
	集散變化	集中化	集中化	分散化	集中化
旅次迄點	民國 79 年	2.85	2.68	2.56	2.80
	民國 89 年	2.69	2.72	2.67	2.78
	集散變化	集中化	分散化	分散化	集中化
旅次分布	民國 79 年	3.08	3.52	3.44	3.52
	民國 89 年	2.83	3.47	3.47	3.52
	集散變化	集中化	集中化	分散化	差異不大

比較鄉鎮與縣市地理分區就業人口的集散變化趨勢如下：整體就業人口在旅次起點、迄點方面的分析結果一致，均呈現集中趨勢；在工作旅次分布方面的變化情形並不相同，鄉鎮地理分區呈現分散趨勢，縣市地理分區則呈現集中趨勢，表示在鄉鎮間的分布雖已趨向均勻，但仍集中在某些縣市。

比較縣市與四大區域地理分區就業人口的集散變化趨勢如下：整體就業人口在 3 個分析項目所得結果一致，均呈現集中變化趨勢，惟縣市地理分區之工作旅次分布集散變化情形並不明顯。

表 3 工作旅次熵值表－區域層級

		一級就業	二級就業	三級就業	整體就業
旅次起點	民國 79 年	1.21	1.13	1.11	1.18
	民國 89 年	1.15	1.12	1.12	1.15
	集散變化	集中化	集中化	分散化	集中化
旅次迄點	民國 79 年	1.20	1.09	1.08	1.16
	民國 89 年	1.15	1.11	1.11	1.14
	集散變化	集中化	分散化	分散化	集中化
旅次分布	民國 79 年	1.30	1.33	1.31	1.36
	民國 89 年	1.19	1.28	1.36	1.30
	集散變化	集中化	集中化	分散化	集中化

本節分析研究年期臺灣地區工作旅次集散變遷趨勢，研究結果顯示：整體就業人口在旅次起點、旅次迄點於三種地理分區集散變化分析結果一致，均呈現集中趨勢；旅次分布的分析結果為鄉鎮分區呈現分散趨勢，縣市與區域分區呈現集中趨勢，表示在鄉鎮分區間集散變化趨勢雖較均勻，但仍集中於某些縣市與區域。一級就業人口在旅次起點、旅次迄點與旅次分布之分析項目於三地理分區的集散變化分析結果一致，均呈現集中趨勢。二級就業人口在旅次起點之分析結果為鄉鎮分區呈現分散趨勢，縣市與區域分區呈現集中趨勢，顯示在鄉鎮較小地理分區間之集散情形雖趨於均勻，但在較大地理分區則仍集中在某些縣市與區域；旅次迄點於三地理分區之集散變化分析結果一致，均呈現分散趨勢；旅次分布於三種地理分區之集散變化分析結果一致，均呈現集中趨勢。三級就業人口在旅次起點、旅次迄點與旅次分布分析項目於三地理分區之集散變化分析結果一致，均呈現分散趨勢。

4.1.2 吉尼係數

本節以吉尼係數分析研究年期就業人口工作旅次起點集散變化情形，除針對不同地理分區（鄉鎮、縣市、都會區及四大區域四類，各都會區涵蓋範圍詳如附錄 2）進行分析外，考量就業人口通勤行為亦受其本身屬性影響，同時對性別、年齡、就業級別及教育程度等項目加以探討。各屬性因素之吉尼係數如表 4。

對表 4 進行橫向比較可知，民國 79 年時就業人口在性別、就業級別兩屬性皆為分布高度均等的情况（吉尼係數小於 0.2）^[48]，縣市、四大區域、年齡、教育程度等屬性為分布相對均等的情况（吉尼係數介於 0.3-0.4），鄉鎮及都會區吉尼係數均大於 0.4（一般以 0.4 為警戒值），顯示其分布差距頗大，相當不均勻，表示民國 79 年時造成就業人口工作旅次起點分布不均的主因為鄉鎮與都會區的地區條件；民國 89 年時性別屬性為分布絕對均勻的情况，教育程度為分布比較均勻的情况（吉尼係數介於 0.2-0.3），四大區域、年齡與就業級別等屬性為分布相對均勻的情况，鄉鎮、縣市與都會區等屬性為分布相當不均勻的情况，

顯示民國 89 年時造成就業人口工作旅次起點分布不均的主因為鄉鎮、縣市與都會區的地區條件。

表 4 就業人口工作旅次起點分布與相關屬性因素吉尼係數

年度	鄉鎮	縣市	都會區	四大區域	性別	年齡	就業級別	教育程度
民國 79 年	0.5121	0.3828	0.4629	0.3064	0.1841	0.3395	0.1822	0.3101
民國 89 年	0.5527	0.4111	0.625	0.3271	0.0898	0.3363	0.3587	0.2920
集散變化	集中化	集中化	集中化	集中化	分散化	分散化	集中化	分散化

在集散變化趨勢方面，研究年期就業人口性別、年齡及教育程度三屬性之吉尼係數變動值為負值，表示這些因素使就業人口分布呈分散趨勢；而各地理分區與就業級別屬性吉尼係數變動值為正值，表示這些因素使就業人口分布呈集中趨勢，以地理分區為例說明，顯示就業人口居住地點有更集中分布在某些鄉鎮、縣市、都會區與四大區域的趨勢。

民國 79 年鄉鎮與都會區的吉尼係數均超過警戒值，民國 89 年鄉鎮、縣市與都會區的吉尼係數均超過警戒值，其中民國 79 年縣市的吉尼係數未超過警戒值，為分布相對均勻的情況，但民國 89 年時其吉尼係數大於警戒值，表示就業人口在縣市間的分布更不均勻，集中趨勢更明顯。研究年期都會區的吉尼係數均超過警戒值，且民國 89 年的吉尼係數甚至高達 0.625，顯見就業人口工作旅次起點集中在某些都會區，區域發展失衡的現象愈趨嚴重。研究年期就業人口工作旅次起點在四大區域均呈現集中趨勢，表示某些區域對於人口遷徙仍較具有吸引力，使得人口聚集情形更為明顯。

透過吉尼係數僅能利用數值大小判定分布差距問題是否存在及分布均勻程度，但並未考量各分析群體間人數（樣本數）差異，亦無從得知造成分布不均的因素。故本研究結合吉尼係數與相對落差觀念，接續對分布不均勻之項目進行相對落差分析，更有助於了解造成不均的群體，進而提供政府相關單位政策施行對象之參考。

由表 4 知研究年期就業人口在鄉鎮、縣市與都會區之吉尼係數接近或超過警戒值，顯示其分布相當不均勻。為釐清造成落差之主要群體，進一步計算就業人口工作旅次起點在「鄉鎮」、「縣市」與「都會區」三地理分區之相對落差，了解造成落差的主要群體，以下分別依序探討。

鄉鎮相對落差分析結果如下：民國 79 年時落差主要發生在臺北縣五股鄉、臺南縣歸仁鄉、桃園縣蘆竹鄉、桃園縣觀音鄉、高雄縣林園鄉、基隆市安樂區與新竹市香山區等鄉鎮，為加劇落差群體，使不均度增加（民國 89 年時這些鄉鎮為減緩落差群體）；民國 89 年時落差主要發生在臺中縣后里鄉、臺中縣東勢鎮、宜蘭縣羅東鎮、屏東縣內埔鄉、高雄市新興區、基隆市中正區與基隆市仁愛區等鄉鎮，為加劇落差群體，使不均度增加（民國 79 年時這些鄉鎮為減緩落差群體）。其餘鄉鎮對於研究年期就業人口工作旅次起點分布均勻程

度影響方向（加劇、減緩）均相同。

由表 5 知縣市相對落差分析結果如下：民國 79 年時落差主要發生在臺東縣、新竹市、花蓮縣、基隆市、新竹縣、宜蘭縣、南投縣、苗栗縣、臺南市、嘉義縣、臺中市與雲林縣等縣市，為加劇落差群體，使不均度增加；民國 89 年時，加劇落差的縣市除增加屏東縣外，其餘縣市對於研究年期就業人口工作旅次起點分布均勻程度影響方向（加劇、減緩）均相同。

表 5 工作旅次起點各群體相對落差分析－縣市別

民國 79 年縣市相對落差資料			民國 89 年縣市相對落差資料		
縣市名稱	相對落差值	影響方向	縣市	相對落差值	影響方向
嘉義市	—	—	臺東縣	—	—
臺東縣	0.032121	加劇落差	嘉義市	0.034754	加劇落差
新竹市	0.029231	加劇落差	花蓮縣	0.031691	加劇落差
花蓮縣	0.028617	加劇落差	基隆市	0.028722	加劇落差
基隆市	0.028499	加劇落差	新竹市	0.027874	加劇落差
新竹縣	0.026099	加劇落差	宜蘭縣	0.026368	加劇落差
宜蘭縣	0.024025	加劇落差	南投縣	0.02344	加劇落差
南投縣	0.01949	加劇落差	苗栗縣	0.02201	加劇落差
苗栗縣	0.01814	加劇落差	新竹縣	0.02044	加劇落差
臺南市	0.014775	加劇落差	嘉義縣	0.019128	加劇落差
嘉義縣	0.014202	加劇落差	臺南市	0.015061	加劇落差
臺中市	0.010953	加劇落差	雲林縣	0.011772	加劇落差
雲林縣	0.004166	加劇落差	屏東縣	0.006587	加劇落差
屏東縣	-0.0006	減緩落差	臺中市	0.002535	加劇落差
臺南縣	-0.01077	減緩落差	臺南縣	-0.00677	減緩落差
彰化縣	-0.01209	減緩落差	高雄縣	-0.01036	減緩落差
高雄縣	-0.01276	減緩落差	彰化縣	-0.01152	減緩落差
臺中縣	-0.01698	減緩落差	高雄市	-0.01902	減緩落差
高雄市	-0.01958	減緩落差	臺中縣	-0.02194	減緩落差
桃園縣	-0.02054	減緩落差	桃園縣	-0.03925	減緩落差
臺北市	-0.09177	減緩落差	臺北市	-0.07328	減緩落差
臺北縣	—	—	臺北縣	—	—

資料來源：本研究計算所得；—：表無數值。

都會區相對落差分析結果如下：研究年期各都會區、次都會區均位於相同群體中，對不均度影響方向均相同。落差發生在新竹次都會區、臺中彰化大都會區與臺南大都會區，為加劇落差群體，使工作旅次起點分布不均度增加；高雄大都會區為減緩落差群體，使工作旅次起點分布不均度減少。

由表 4 知就業級別屬性吉尼係數雖小於警戒值，惟數值變動極大，由民國 79 年屬於分布絕對均勻 (0.1822) 狀態變動至民國 89 年分布相對均勻 (0.3587) 狀態，不均度的變化程度最大，顯示研究年期就業級別係使就業人口工作旅次起點分布更為不均勻的重要原因之一。本研究對此屬性進行相對落差分析，探討各就業級別對不均度之影響，分析結果為民國 79 年時三級就業人口為造成分布不均勻之主因，而民國 89 年時二級就業人口則為分布不均勻之主因。

由表 1 至表 4 知，兩個指標所獲結論均顯示研究年期整體就業人口（各級就業人口變化趨勢亦相似）工作旅次起點其地理分區空間結構分布呈現集中趨勢，顯示採用不同指標衡量集散分布的均勻程度所獲結論具一致性。

根據本節分析結果可知，地區條件為影響就業人口工作旅次起點的重要關鍵因素，表示一地區經濟、環境與社會等條件，對就業人口選擇居住地點（即工作旅次起點）扮演重要角色，連帶地對運輸旅次空間結構集散程度產生影響。因此為了減少區域發展的差距，並達到均衡區域發展的目標，政府首要課題為改善落差發生地區的條件，並應持續檢討改善投資環境，期使原有產業繼續成長發展並吸引新產業不斷加入，以提供更多就業機會，增加該地區對人口及就業人口的吸引力，促使人口與產業持續不斷遷移至此地區，讓該地區得以永續成長發展。另一方面，應配合人口與產業發展，規劃與提供適量住宅或提供住宅貸款優惠，避免造成住宅供需失衡問題，以達繁榮地方經濟，促進在地產業永續發展，縮短城鄉發展差距之政策目標。

4.2 就業人口通勤行為變遷分析

居住與工作地點間相對地理空間關係，意味就業人口完成工作通勤旅次所需支付的時間與成本。為促進地方產業發展、鼓勵在地就業，均衡的居住與工作地點為政府平衡區域發展的重要課題，若在適當空間範圍內滿足居住與就業需求，除可營造在地、就近就業環境、有效降低通勤就業人口，減少因通勤所造成空氣污染及噪音等環境外部成本外，更有助於消弭區域間人口結構區域就業機會的差異，均衡公共建設投資，故本研究透過分析就業人口在地就業與通勤距離的變化，以了解研究年期就業人口居住與工作地點間均衡變化情形。

4.2.1 在地就業

整理研究年期各鄉鎮通勤就業人口在地就業變化情形如表 6。表中通勤就業人口係指工作地點與居住地點位於不同鄉鎮市區者。

表 6 研究年期通勤就業人口比例變化情形－鄉鎮

通勤就業人口比例 (%)	民國 79 年鄉鎮數量	比例	民國 89 年鄉鎮數量	比例
<10	6	0.02	1	—
10-20	48	0.14	23	0.07
20-30	155	0.44	126	0.36
30-40	94	0.27	118	0.33
40-50	37	0.10	62	0.18
50-60	10	0.03	21	0.06
>60	3	0.01	2	0.01

由表 6 知民國 79 年與 89 年分別有 13 及 23 個鄉鎮其通勤就業人口占總就業人口 50% 以上，民國 79 年與 89 年則分別有 54 及 24 個鄉鎮其通勤就業人口占總就業人口低於 20%。89 年通勤就業人口小於 30% 的鄉鎮數量較 79 年少，而高通勤比例（大於 30%）的鄉鎮數量則增加，顯示具有高通勤就業人口的鄉鎮整體上係呈現增加趨勢。

工作旅次通勤行為除了前面所提與就業人口屬性、機動車輛持有、家戶內就業人口數等因素相關外，居住地點與工作地點間相對地理空間關係更是重要因素。本研究將就業人口居住地點與工作地點相對地理空間關係分三類進行分析，分別為：在家工作、居住地點與工作地點位於同一鄉鎮市區（但非在家工作）及居住地點與工作地點位於不同鄉鎮市區進行分析。

表 7 民國 79 年就業人口通勤工作旅次相對地理空間分布比率表

	在家工作	居住與工作地點 位於同一鄉鎮	居住與工作地點 位於不同鄉鎮
一級就業人口	1,099,432	762,655	110,166
比率	55.74%	38.67%	5.59%
二級就業人口	602,599	2,025,926	1,445,044
比率	14.79%	49.73%	35.47%
三級就業人口	214,615	921,119	904,674
比率	10.52%	45.14%	44.34%
整體就業人口	1,916,646	3,709,700	2,459,884
比率	23.70%	45.88%	30.42%

由表 7 知民國 79 年時除第一級就業人口超過 5 成以上屬於在家工作居多數外，整體、二級與三級就業人口均以居住與工作地點位於同一鄉鎮居多數，皆超過 45% 以上，顯示就業人口具有選擇較短工作通勤距離的傾向。而二級與三級就業人口雖均以居住與工作地點

位於同一鄉鎮居多數，但二級就業人口中居住與工作地點位於同一鄉鎮約占 50%，比居住與工作地點位於不同鄉鎮高出 15%，而三級就業人口中居住與工作地點位於同一鄉鎮及居住與工作地點位於不同鄉鎮兩者之比率相差不大，顯示三級就業人口較易產生跨鄉鎮工作通勤旅次。

表 8 民國 89 年就業人口通勤工作旅次相對地理空間分布比率表

	在家工作	居住與工作 地點位於同一鄉鎮	居住與工作 地點位於不同鄉鎮
一級就業人口	164	828,185	38,927
比率	0.02%	95.49%	4.49%
二級就業人口	116,019	1,832,154	1,115,291
比率	3.79%	59.81%	36.41%
三級就業人口	493,412	3,593,752	2,418,129
比率	7.58%	55.24%	37.17%
整體就業人口	609,595	6,254,091	3,572,347
比率	5.84%	59.93%	34.23%

由表 8 知民國 89 年就業人口與民國 79 年就業人口工作旅次地理空間分布情形類似。整體、各級就業人口中，居住與工作地點位於同一鄉鎮所占比率仍居多數，皆超過 55% 以上，與民國 79 年相較，在比率上更是大幅提升，顯示就業人口選擇較短工作通勤距離的傾向更明顯。而二、三級就業人口間通勤型態的差異雖仍存在，但三級就業人口於居住與工作地點位於同一鄉鎮及位於不同鄉鎮兩者間比率的差距大幅增加，顯示除了就業人口選擇較短通勤距離傾向更顯著外，不同就業級別就業人口與工作旅次地理空間分布的關聯性降低。

表 9 研究年期就業人口通勤工作旅次相對地理空間分布比率變動表

	在家工作	居住與工作 地點位於同一鄉鎮	居住與工作 地點位於不同鄉鎮
一級就業人口	-55.72%	56.82%	-1.10%
二級就業人口	-11.00%	10.08%	0.94%
三級就業人口	-2.94%	10.10%	-7.17%
整體就業人口	-17.86%	14.05%	3.81%

由表 9 可知在家工作此類別之整體與各級就業人口均呈現減少趨勢，而居住與工作地點位於同一鄉鎮之就業人口均呈現成長趨勢，成長比率均超過 1 成以上；居住與工作地點

位於不同鄉鎮之一級、三級就業人口呈現減少趨勢，整體及二級就業人口則呈現增加趨勢。

研究年期整體就業人口中超過 60% 以上為在地就業人口，其中，一級就業人口均有 90% 以上為在地就業，與一般對一級就業人口通勤行為之認知相符；二級就業人口約有 60% 以上為鄉鎮內通勤者；民國 79 年時三級就業人口約有 55% 以上為鄉鎮內通勤者，民國 89 年時鄉鎮內通勤就業人口比例則增加至 60% 以上，顯示就業人口有選擇在地、就近就業的趨勢，民國 79 年時，居住與工作地點位於同一鄉鎮與不同鄉鎮之三級就業人口比率相差不大，民國 89 年則明顯以居住與工作地點位於同一鄉鎮居多數。由此可推斷臺灣地區就業人口通勤行為與就業級別間存在關聯性，民國 89 年時兩者間之關聯性雖較民國 79 年弱，但關聯性仍存在。

4.2.2 通勤距離

產業結構升級轉型由一級產業轉變為二級產業，再從二級產業轉變為三級產業，加上產業設置區位的改變，均對就業人口工作通勤行為產生影響。本研究利用通勤距離的變化，探討研究年期就業人口工作通勤行為變化趨勢。

本研究參考交通部運輸研究所「第三期臺灣地區整體運輸系統規劃」^[49] 旅次分類方式，將旅次分為三大類，第一類為旅次長度小於 20 公里的短程旅次；第二類為旅次長度介於 20 至 50 公里的中程旅次；第三類為旅次長度大於 50 公里的長程旅次，採用此一分類方式有助與運輸規劃及區域發展等相關研究進行比較。本研究亦採用此計畫中所構建之道路系統路網，作為計算就業人口工作旅次通勤距離的基準。根據道路系統路網地圖，以各鄉鎮之鄉鎮公所所在地為交通分區（此處以鄉鎮）中心，透過 TransCad 軟體中最短路徑的工具求算兩兩交通分區中心（centroid）間的距離。由戶口普查資料中可得知就業人口居住地點（鄉鎮）與工作地點（鄉鎮）等資訊，輔以前述距離資訊，可對應出就業人口之通勤距離。

經由上述程序可獲知研究年期就業人口通勤距離變化趨勢，民國 79 年時工作旅次平均通勤距離約為 17.36 公里，民國 89 年約為 13.86 公里，約減少 3.5 公里，減少比例約 20%，顯示工作通勤距離係呈現減少趨勢。整體與各就業級別就業人口通勤距離變化趨勢如圖 2。

由圖 2 可知在整體通勤就業人口方面，通勤距離小於 20 公里者（圖中藍紫色部分所示），民國 79 年約為 87.47%，民國 89 年減少至 86.77%；通勤距離介於 20 至 50 公里者（圖中深紫色部分所示），民國 79 年約為 6.29%，民國 89 年增加至 8.09%；通勤距離大於 50 公里者（圖中黃色部分所示），民國 79 年約為 6.24%，民國 89 年減少至 5.14%。短程、長程通勤旅次均有減少，中程通勤旅次則呈現增加趨勢。

一級就業人口其通勤距離小於 20 公里者，民國 79 年所占比例為 96.67%，民國 89 年增加至 97.84%；通勤距離介於 20 至 50 公里者，民國 79 年為 1.24%，民國 89 年減少至 1.17%；通勤距離大於 50 公里者，民國 79 年為 2.09%，民國 89 年時所占比例小於 1%。二級就業人口其通勤距離小於 20 公里者，民國 79 年所占比例為 84.41%，民國 89 年增加至 85.33%；通勤距離介於 20 至 50 公里者，民國 79 年為 8.02%，民國 89 年增加至 9.17%；

通勤距離大於 50 公里者，民國 79 年所占比例為 7.57%，民國 89 年減少至 5.50%。三級就業人口其通勤距離小於 20 公里者，民國 79 年所占比例為 84.59%，民國 89 年增加至 85.97%；通勤距離介於 20 至 50 公里者，民國 79 年為 7.84%，民國 89 年時增加至 8.51%；通勤距離大於 50 公里者，民國 79 年所占比例為 7.57%，民國 89 年減少至 5.52%。

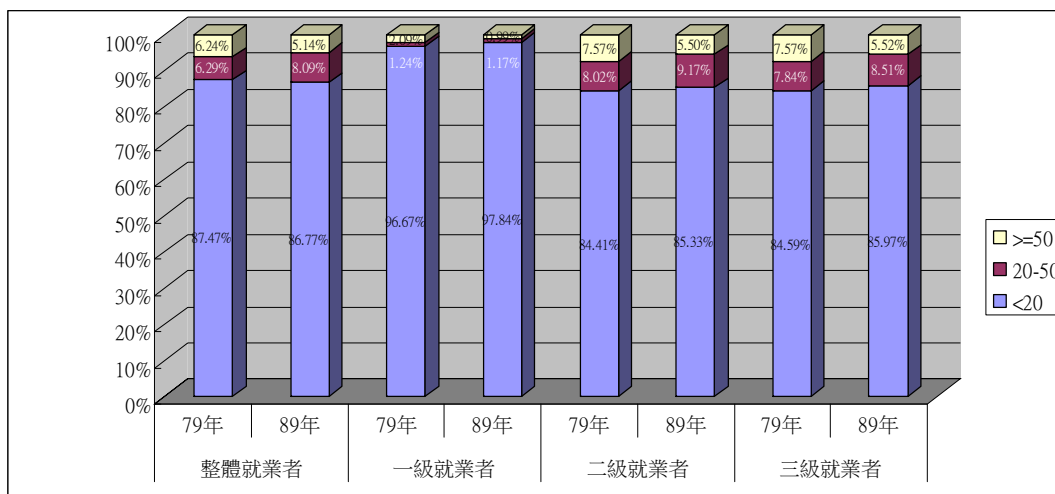


圖 2 研究年期工作旅次通勤距離 (公里) 變化情形：依就業級別區分

由本節分析結果可知，研究年期多數就業人口之工作通勤距離仍屬短程旅次，一級就業人口於短程旅次所占比例較其他就業級別更高，與一般認知相符。工作旅次通勤距離小於 20 公里之短程旅次於各就業級別均呈現增長趨勢；通勤距離介於 20 至 50 公里間之中程旅次其一級就業人口減少，二、三級就業人口則增加；通勤距離大於 50 公里之長程旅次，在整體就業人口與各級就業人口均呈現減少趨勢。研究年期各鄉鎮在地就業（在家工作與居住與工作地點位於同一鄉鎮）比率呈現增加趨勢，表示跨鄉鎮通勤工作旅次減少，意謂鄉鎮地理分區的發展趨向均衡。在薪資待遇、勞動條件等勞動市場資訊公開揭露情形下，工作地點遠近為就業時重要考量因素，遂使得在地、就近就業型態成為一趨勢。而研究年期整體、各級就業人口通勤距離均呈現減少趨勢，表示就業人口具有選擇較近工作地點、較短通勤距離的傾向。由在地就業與通勤距離的變化趨勢可知，在地、就近就業於政府大力推動下已逐漸形成，表示未來政府仍應考量區域特性持續以在地化的思維推動區域發展，並制定目標性、政策性的短中長期發展計畫，作為地方政府規劃發展之指導原則，例如雲嘉南區域著重於農業發展，花東區域著重於自然保育與觀光旅遊等等。除可引導國家朝向整體性、合理的發展方向外，對於各區域的均衡發展與國家未來整體永續發展更有莫大助益。

五、結論與建議

區域均衡發展為國土規劃之重要課題，都市集中的問題近年來在臺灣社會漸趨嚴重，尤其在經歷經濟急遽發展、產業結構轉型的衝擊下，區域均衡發展的相關議題更受重視。本研究為了解研究年期區域發展集散趨勢，以戶口普查資料分析不同地理分區工作旅次空間結構集散及通勤行為變化情形。利用熵值與吉尼係數兩項指標觀察研究年期就業人口工作旅次在旅次起點、迄點與分布等三項目集散程度，希望藉由本研究結果能使各級政府相關規劃單位，對於工作旅次空間結構分布集散有更深地認識與了解，以作為日後經濟與區域發展及國土規劃之決策參考依據。

本研究結果可歸納下列幾點結論：

1. 整體工作旅次之旅次起點與迄點在鄉鎮、縣市與區域三地理分區均呈現集中趨勢，旅次分布在鄉鎮地理分區呈現分散趨勢，縣市與區域地理分區則呈現集中趨勢。各級就業人口集散變化趨勢分別為：一級工作旅次於旅次起點、迄點與分布等三項目在鄉鎮、縣市與區域三地理分區均呈現集中趨勢；二級工作旅次之旅次起點在鄉鎮地理分區呈現分散趨勢，縣市與區域地理分區則呈現集中趨勢，旅次迄點在三地理分區中均呈現分散趨勢，旅次分布在三地理分區中均呈現集中趨勢；三級工作旅次於三分析項目方面在三地理分區中均呈現分散趨勢。總體而言，各分析項目在不同地理分區所得結果多數相同，部分不一致者，係在較小地理分區呈現分散趨勢，而在縣市與區域較大地理分區則呈現集中趨勢，顯示在鄉鎮分區雖已呈現分散趨勢，但仍集中在某些縣市與區域。一級工作旅次均呈現集中趨勢，二級工作旅次之三分析項目其集中、分散趨勢均而有之，三級工作旅次則均呈現分散趨勢。
2. 由研究年期居住地點、工作地點空間變動分析結果得知，各鄉鎮於本地就業之通勤比率愈來愈高，顯示鄉鎮發展有逐漸均衡穩定的趨勢。工作旅次通勤距離縮短，跨鄉鎮的通勤工作旅次比例亦減少，表示就業人口具有選擇較短通勤距離與在地、就近就業的傾向。
3. 政府推動減少區域發展落差政策，以達成均衡區域發展之目標時，須明確了解政策作用對象，方可達到政策預期效果。本研究透過相對落差進行更全面性之分析，藉以釐清落差形成之主因，並計算該因素各群體之相對落差，進一步了解落差發生的群體（就業級別、區域），以提供政府相關政策施政對象標的及施政績效檢視的參考。相對落差分析結果顯示：研究年期落差發生的區域變化並不大，落差仍舊發生在某些區域，表示政府應針對落差發生之區域（鄉鎮、縣市與都會區）提出因應對策，改善該區域的條件，提升其相對吸引力，以消弭區域間發展的不均衡。
4. 本研究所探討之內容亦可藉由傳統運輸需求調查資料進行分析，惟此調查所需花費之人力、時間與金錢成本相當可觀，而近年來隱私權與治安等問題讓調查環境漸趨惡化，拒

訪比率高，除大幅增加調查經費外，更使訪問樣本偏誤愈加嚴重，影響資料正確性。我國戶口普查調查內容中包含社經特性等資料，此部分與運輸需求相關性甚高，如能引用此部分資料作為運輸需求相關分析，定可節省大量成本，並獲得穩定、可靠的資料來源。經本研究實證結果，證實可透過戶口普查資料進行運輸需求空間結構變遷的分析。

最後，對後續相關研究，本研究提出下列幾點建議作為參考：

1. 影響就業人口遷徙決策與通勤行為的變數眾多，受限於戶口普查資料調查項目及不同資料來源間的整合問題，本研究僅擇取部分變數進行分析。由文獻中可知所得與住宅等亦為關鍵因素。先進國家的戶口普查資料項目因包含重要交通相關參數，故可更廣泛運用此一資料進行運輸領域相關分析：如共乘資訊、通勤時間、運具選擇等。後續研究如能將相關變數納入戶口普查甚至建置涵蓋更多變數，如：所得、住宅、產業、運輸、交通建設與土地使用等的資料庫，將有助於日後運用更多變數資料進行更完整、更長年期的分析，除有利於對此議題更細緻及全盤性的了解外，並可進行更廣泛領域的研究。
2. 研究中探討工作旅次集散與通勤行為均以就業級別為分析對象，三個就業級別均包含數個不同行業，屬於同一就業級別中之行業其工作旅次與通勤行為可能存在差異性，後續研究如能再針對不同行業之通勤行為進行區分，將更有助於政策的制定。
3. 本研究探討就業人口居住地點與工作地點相對地理空間，係以鄉鎮地理分區為分析對象，後續研究可用縣市、區域等地理分區進行分析，以了解在地就業與跨區通勤在不同地理分區間通勤行為之差異，更可對人口、產業空間結構與區域均衡性有進一步的了解，以作為資源分配、區域發展相關政策擬定的依據。此外，研究中在地就業等通勤行為變化係以整體就業人口為分析對象，未來可對不同就業級別之就業人口分別探討其在地就業情形，並比較其彼此間之異同，對通勤行為將有更全面性的了解，以作為制定區域發展政策的參考。
4. 通勤距離、時間與費用等均為就業人口通勤行為決策的重要項目，本研究中僅針對通勤距離此一項目進行分析，後續研究如能加入通勤時間與費用等相關影響因素的考量，應可更真確反應就業人口通勤行為。
5. 本研究嘗試建立一個分析架構，以解析工作旅次空間結構集散變化趨勢及影響因素。未來亦可運用此分析架構，探討臺灣本島不同地理分區空間結構集散情形；另一方面，亦可透過對其他開發中國家進行分析、比較，以了解其國家整體空間結構發展歷程與變遷趨勢，除可獲悉其發展歷程外，相關政策之制定更可作為我國區域規劃之參考借鏡。

參考文獻

1. 穆青雲、周宜強，「由工作通勤變化探討都會區發展歷程」，**規劃與設計學報**，第 5 卷，民國 85 年，頁 81-96。
2. 楊宗棋，「臺中都會區地方生活圈通勤就業活動空間分佈之研究」，逢甲大學建築與都市計畫碩士班碩士論文，民國 93 年。

3. Handy, S., Cao, X., and Mokhtarian, P., "Correlation or Causality between the Built Environment and Travel Behavior? Evidence from Northern California", *Transportation Research Part D*, Vol. 10, No. 6, 2005, pp. 427-444.
4. 姜渝生、廖仁哲，「家戶—效用最大化之小汽車持有與使用、工作運具混合需求模式之研究—臺灣地區之實證研究」，*運輸計劃季刊*，第 27 卷，第 4 期，民國 87 年，頁 543-582。
5. Johnson, K. M., Nucci, A., and Long, L., "Population Trends in Metropolitan and Nonmetropolitan America: Selective Deconcentration and the Rural Rebound", *Population Research and Policy Review*, Vol. 24, No. 5, 2005, pp. 527-542.
6. Fairweather, J. and Mulet-Marquis, S., "Changes in the Age of New Zealand Farmers: Problems for the Future?", *New Zealand Geographer*, Vol. 65, No. 2, 2009, pp. 118-125.
7. Wrigley, E. A., "Rickman Revisited: The Population Growth Rates of English Counties in the Early Modern Period", *The Economic History Review*, Vol. 62, No. 3, 2009, pp. 711-735.
8. Junjie, H., "Transport and the Location of Foreign Logistics Firms: The Chinese Experience", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 41, No. 6, 2007, pp. 597-609.
9. Haller, S. A., "The Distribution of Productivity in Irish Manufacturing between 1995 and 2004-Determinants, Changes and Implications", *Economic and Social Review*, Vol. 39, No. 1, 2008, pp. 13-38.
10. Bayer, P., Ross, S. L., and Topa, G., "Place of Work and Place of Residence: Informal Hiring Networks and Labor Market Outcomes", *Journal of Political Economy*, Vol. 116, No. 6, 2008, pp. 1150-1196.
11. Marshall, J. D., "Urban Land Area and Population Growth: A New Scaling Relationship for Metropolitan Expansion", *Urban Studies*, Vol. 44, No. 10, 2007, pp. 1889-1904.
12. Mulligan, G. and Vias, A., "Growth and Change in U.S. Micropolitan Areas", *The Annals of Regional Science*, Vol. 40, No. 2, 2008, pp. 203-228.
13. Feng, J., Zhou, Y., and Wu, F., "New Trends of Suburbanization in Beijing since 1990: From Government-led to Market-oriented", *Regional Studies: The Journal of the Regional Studies Association*, Vol. 42, No. 1, 2008, pp. 83-99.
14. 楊政龍、金家禾，「知識設施對臺灣製造業生產力之影響」，*都市與計劃*，第 29 卷，第 4 期，民國 91 年，頁 513-512。
15. 謝高橋，「臺灣社會變遷的回顧檢討與展望」，*臺灣經濟*，第 226 卷，民國 84 年，頁 113-130。
16. Kirby, D. K. and LeSage J. P., "Changes in Commuting to Work Times over the 1990 to 2000 Period", *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 39, No. 4, 2009, pp. 460-471.
17. Parkin, J., Wardman, M., and Page, M., "Estimation of the Determinants of Bicycle Mode Share for the Journey to Work Using Census Data", *Transportation*, Vol. 359, No. 1, 2008, pp. 93-109.
18. Vrtic, M., Fröhlich, P., Schüssler, N., Axhausen, K.W., Lohse, D., Schiller, C., and Teichert, H., "Two-Dimensionally Constrained Disaggregate Trip Generation, Distribution and Mode Choice Model: Theory and Application for a Swiss National Model", *Transportation Research Part A*, Vol. 41, No. 9, 2007, pp. 857-873.
19. Handy, S., Blumenberg, E., Donahue, M., Lovejoy, K., Rodier, C., Shaheen, S., Shiki, K., and

- Song, L., *Travel Behavior of Immigrant Groups in California*, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 2009.
20. Federal Highway Administration, *Journey to Work Trends in the United States and Its Major Metropolitan Areas 1960-2000*, 2003.
 21. 許道欣, 「人口遷移決策及其影響因素-臺灣地區人口內部遷移之研究」, 國立中興大學都市計畫研究所碩士論文, 民國 80 年。
 22. 洪嘉瑜、銀慶貞, 「臺灣人口遷移屬性與動機的變化」, **東吳經濟商業學報**, 第 61 期, 民國 97 年, 頁 31~66。
 23. 王怡雯, 「生活環境滿意度與人口遷移關係之研究-以臺南市為例」, 臺北市立教育大學社會科教育學系碩士論文, 民國 95 年。
 24. 陳建偉, 「臺南市東區遷入者與遷移動機之研究」, 國立臺南大學行政管理學系碩士論文, 民國 96 年。
 25. 洪嘉瑜、陶宏麟、蔡智發, 「影響臺灣內部遷徙的經濟因素探討」, **經濟論文叢刊**, 第 31 輯, 第 2 期, 民國 91 年, 頁 253~277。
 26. 薛立敏、曾喜鵬、謝鈺偉, 「臺灣地區近年來遷移行為變化之影響因素分析-家戶遷移決策與遷移地點選擇之聯合估計」, **人口學刊**, 第 34 期, 民國 96 年, 頁 69~107。
 27. 賴文泰, 「家戶通勤行為, 小客車持有與使用混合需求模型之研究」, 國立成功大學交通管理學系博士論文, 民國 88 年。
 28. 段良雄, 「巢式多項羅機 (NMNL) 運具選擇模式」, **運輸計劃季刊**, 第 13 卷, 第 3 期, 民國 73 年, 頁 285-307。
 29. 戴安蕙, 「臺灣北部區域空間經濟變遷之研究 (1970-1999)」, 中國文化大學地學研究博士論文, 民國 92 年。
 30. Cowell, F. A., *Measuring Inequality*, Prentice Hall/Harvester Wheatsheaf, New York, 1995.
 31. Fassnuit-Mombot, B. and Choquel, J. B., "An Entropy Method for Multisource Data Fusion", *Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion*, International Society of Information Fusion, 2000, pp. 17-23.
 32. Duc, B., Bigün, E. S., Bigün, J., Maître, G., and Fischer, S., "Fusion of Audio and Video Information for Multi Modal Person Authentication", *Pattern Recognition Letter*, Vol. 18, No. 9, 1997, pp. 835-843.
 33. 莊明穎, 「產業結構特性對貨運需求之影響—以臺灣地區為例」, 國立交通大學交通運輸研究所碩士論文, 民國 86 年。
 34. 陳偉志, 「可及性與區域發展—以臺灣地區西部運輸走廊為例」, 國立中興大學都市計畫研究所碩士論文, 民國 84 年。
 35. 馮正民、蘇振維、朱冠文, 「臺灣地區西部走廊高快速運輸系統對區域發展之衝擊」, **運輸計劃季刊**, 第 24 卷, 第 4 期, 民國 84 年, 頁 355-368。
 36. 邱錦祥, 「高速鐵路對臺北都會區第三級業人口成長之影響分析」, **運輸計劃季刊**, 第 20 卷, 第 2 期, 民國 80 年, 頁 149-168。
 37. 許威烈, 「以燭為特徵之視覺化交通監視系統」, 國立中央大學通訊工程研究所博士論文, 民國 93 年。

38. 王大立，「從交通旅次資料看都會區空間結構－臺中都會區實例分析」，**都市與計劃**，第 21 卷，第 1 期，民國 88 年，頁 63-80。
39. 鄭佩欣，「以交通旅次資料探討臺北都會區空間結構」，逢甲大學都市計畫學系碩士論文，民國 92 年。
40. 黃昱瞳，「全民健保實施牙醫總額預算制度對醫療資源分布的影響評估」，國立臺北護理學院醫護管理研究所碩士論文，民國 90 年。
41. 余姿瑩，「外來投資在中國大陸分佈不均度之分析」，國立政治大學中山人文社會科學研究所碩士論文，民國 93 年。
42. 石曜合，「臺灣農家與非農家所得不均度之比較與分析－考量所得來源與家庭人口規模之影響」，臺灣大學農業經濟學研究所碩士論文，民國 99 年。
43. Clausius, R., "On the Nature of the Motion Which We Call Heat", *Philosophical Magazine Series* 4, Vol. 14, No. 91, 1857, pp. 108 – 127.
44. Shannon, C. E., "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, 1948, pp. 379–423.
45. Odum, E. P., *Fundamentals of Ecology*, 3rd Ed., Saunders, New York, 1971.
46. Theil, H., *Economics and Information Theory*, North-Holland, Amsterdam, 1967.
47. 潘金谷、曾淑芬、林玉凡，「數位基尼係數應用之擴充：我國數位落差現況」，**資訊社會研究**，第 16 期，民國 98 年，頁 1-32。
48. 簡雅惠，「臺灣社會保險所得重分配效果於不同城鄉間之影響」，國立政治大學財政研究所碩士論文，民國 96 年。
49. 交通部運輸研究所，**第三期臺灣地區整體運輸系統規劃：整體運輸系統供需預測與分析**，民國 83 年。

附錄 1 臺灣地區區域標準分類表

區域別	包含範圍（不含離島：澎湖縣、金門縣及連江縣）
北部地區	臺北市、基隆市、新竹市、臺北縣、宜蘭縣、桃園縣及新竹縣
中部地區	臺中市、苗栗縣、臺中縣、彰化縣、南投縣及雲林縣
南部地區	嘉義市、臺南市、高雄市、嘉義縣、臺南縣、高雄縣及屏東縣
東部地區	臺東縣、花蓮縣

資料來源：行政院主計處。

附錄 2 臺灣地區都會區標準分類表

都會區別	包含範圍
臺北基隆大都會區	臺北市、 臺北縣（不含鶯歌鎮、坪林鄉）、 基隆市
中壢桃園大都會區	臺北縣鶯歌鎮、 桃園縣（不含大園鄉、復興鄉）
臺中彰化大都會區	臺中市、臺中縣之潭子鄉、大雅鄉、烏日鄉、大肚鄉、龍井鄉、 霧峰鄉、太平市、大里市、 彰化縣之彰化市、和美鎮、花壇鄉
臺南大都會區	臺南市、 臺南縣之七股鄉、安定鄉、仁德鄉、歸仁鄉、關廟鄉、永康市、 高雄縣之湖內鄉、茄萣鄉。
高雄大都會區	高雄市、 高雄縣之鳳山市、林園鄉、大寮鄉、大樹鄉、大社鄉、仁武鄉、 鳥松鄉、岡山鎮、橋頭鄉、燕巢鄉、彌陀鄉、梓官鄉、旗山鎮、 美濃鎮、杉林鄉、 屏東縣之屏東市、麟洛鄉
新竹次都會區	新竹市、 新竹縣之竹北市、竹東鎮、新埔鎮、芎林鄉、橫山鄉、北埔鄉、 寶山鄉
嘉義次都會區	嘉義市、 嘉義縣之水上鄉、中埔鄉

資料來源：行政院主計處。

城際客運鐵路之列車停站與列車服務 計畫決策支援系統—以臺灣高鐵為例

A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPTIMIZING RAILWAY STOPPING PATTERNS AND TRAIN SERVICE PLAN - APPLICATION TO THE TAIWAN HIGH SPEED RAIL

孫千山 Chian-Shan Suen¹

鍾志成 Jyh-Cherng Jong²

張學孔 S. K. Jason Chang³

(101 年 6 月 26 日收稿，102 年 2 月 25 日第一次修改，102 年 3 月 30 日定稿)

摘 要

城際客運鐵路業者為滿足不同旅客之需求，通常會規劃每站皆停、越站停車或直達快車之產品組合，再擬定每小時各停站型態之發車頻率來提供服務。由於停站型態組合與發車頻率，通常是業者依據經驗法則或在部分民意需求下妥協的產品，除了無法顧及整體之最佳化安排外，亦甚少考量列車與旅次之時空遞移現象。基於上述原因，本研究致力發展一決策支援系統，以最小車內旅行時間找出最佳的停站型態組合，再以業者最大利潤為目標進行列車服務計畫求解。作者延續過去的研究成果，將停站模式精進為可求解大規模的 0-1 整數規劃問題，之後再將停站型態組合的輸出作為列車服務計畫的輸入，並納入旅次起迄之時空遞移現象，利用混合整數規劃找出不同時段下各停站型態的列車頻率。本研究並將所構建之模式應用在臺灣高鐵，在此案例分析中顯示，該決策支援系統可正確且有效率地

-
1. 國立臺灣大學土木工程學系交通工程組博士候選人、中興工程顧問社正研究員（聯絡地址：105 臺北市南京東路 5 段 171 號中興工程顧問社；E-mail：james_suen@sinotech.org.tw）。
 2. 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心資深研究員兼組長。
 3. 國立臺灣大學土木工程學系教授。

找出最佳停站型態組合與列車服務頻率，而旅客車內旅行時間與業者利潤均有更好的績效表現，顯見本決策支援系統不但能滿足旅客需求，亦能協助業者創造更多利基。

關鍵詞： 城際客運鐵路；列車停站計畫；列車服務計畫

ABSTRACT

To satisfy different needs of passengers, intercity railway operators usually design various stopping patterns, such as all-stop, skip-stop, and express trains. The operators then assign adequate hourly service frequency for each stopping pattern. Since stopping patterns and service frequencies are typically determined by empirical rules or needs of some local citizens, the resulting arrangements may not be optimal and comprehensive, and most of them do not consider the time-space transition of trains and trips. Thus, this research aims to develop a decision support system to generate the optimal combination of stopping patterns for minimizing passenger in-vehicle time, and to obtain the best train service plans for maximizing operators' profit. We refined the previous model for stopping pattern planning to resolve large-scale 0-1 integer programming problems. The optimal combination of stopping patterns obtained was then input to a train service plan, and the time-space transitions from the beginning to the end of trips were included, to determine the service frequencies of each stopping pattern in different periods through mixed integer programming. The proposed models were applied to the Taiwan High Speed Rail. The case analysis showed that the decision support system could precisely and efficiently find the optimal stopping patterns and service frequencies; the resulting passenger in-vehicle time and operators' profit exhibited better results than current practices. The results demonstrate that the decision support system can not only meet passengers' needs but also help operators to create more profits.

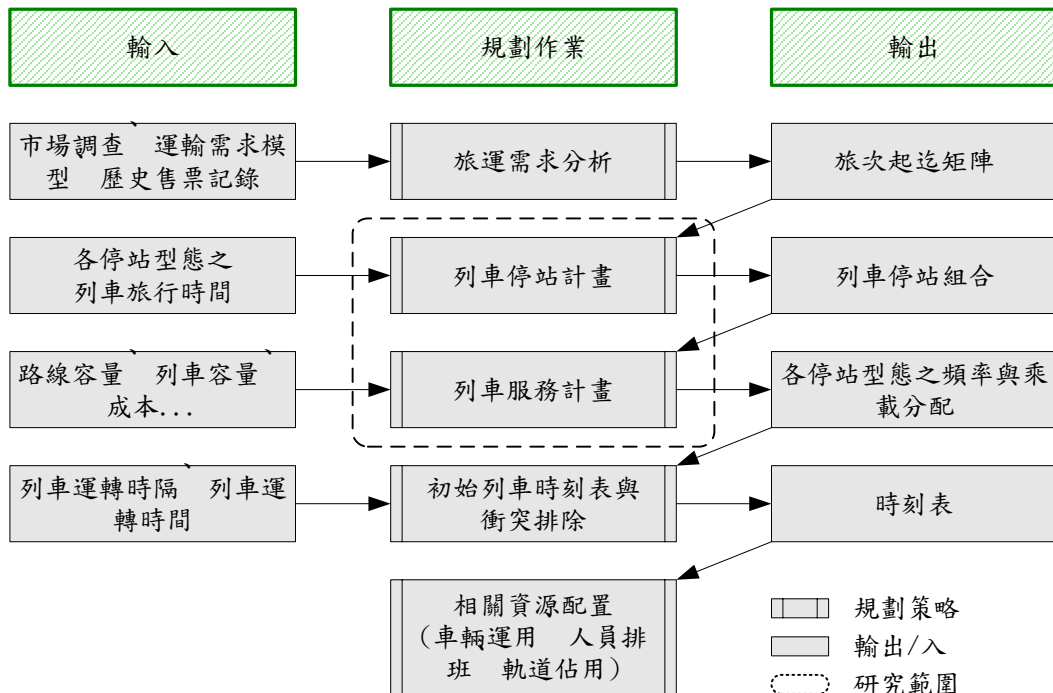
Key Words: Intercity passenger railway; Train stopping plan; Train service planning

一、前言

城際客運鐵路為重要交通建設，其沿線會串連許多主要的城市以滿足不同旅客之往返需求。由於整體旅客在不同空間及時間的需求差異甚大，且又為多點之間的起迄組合，因此如何在軌道設備及列車資源有限的前提下，找出最適合的停站方式與發車頻率來提供服務，是軌道營運業者所必須面對的重要議題之一^[1,2]。

鐵路系統之營運規劃是一個非常複雜的過程，實務上軌道營運業者通常會將此過程區分為數個決策規劃作業^[3-5]。圖 1 是城際鐵路系統營運規劃的典型作業程序，從中可知鐵

路業者通常會透過市場調查、需求模型或者歷史售票記錄等資料來進行旅運需求分析；而列車停站計畫則是搭配旅行時間以及上一步驟產出之旅次起迄矩陣，來決定最佳的停站組合；在停站計畫確定後，則可一併考量路線容量、列車容量、營運成本與其他限制，找出各停站型態之最適發車頻率；而透過初始班表的整理與列車衝突排解模式求解，則可得出運轉時刻表；而該時刻表可再進階地應用在車輛排程、人員排班與軌道占用之後續分析。



由上述的營運規劃作業程序可知，列車停站計畫與列車服務計畫，扮演著連結旅客起迄需求與鐵路業者服務供給之角色，且在作業規劃的初期就要先予以確定，以利進行後續的時刻表與其他資源配置等作業。

有鑑於此，本研究針對城際客運鐵路系統發展一套決策支援系統，一方面透過列車停站模式，分析求解車內旅行時間最小之停站型態組合，另一方面則是在業者利潤最大化下，考量旅次起迄之時空遞移並利用前項模式產出之最佳停站組合，求得每小時各停站型態的最佳服務頻率。本研究最後以臺灣高速鐵路系統（以下文中簡稱臺灣高鐵／圖中簡稱臺高）為例進行案例分析，並提出相關的改善建議。

二、列車停站計畫

2.1 列車停站計畫問題分析

鐵路營運業者常使用的停站型態包含有每站皆停、越站停車或直達快車之服務^[6,7]，在資源有限的情況下，業者通常僅會提供數種停站組合來提供服務，如何在眾多停站型態中找出適合的組合方式，使其能滿足旅客需求是一個重要的議題。實務上，鐵路營運業者通常採經驗法則來決定停站型態的組合，有經驗的營運業者或許可以找到不錯的組合方式，但面臨龐大的組合數下，可能無法考量整體的最佳方案；另一方面，業者亦可能受到地方的壓力而妥協出特定的停站型態，此時或許提高了某些特定起迄旅客的便利性，但亦可能造成其他旅客的不便。綜整上述情況所製定的列車停站組合模式，通常均不是最佳方案，且會增加整體旅客的車內旅行時間^[8]。

列車停站計畫的主要目的，就是在已知旅次起迄矩陣下，找出最佳的停站型態組合。因此，列車停站的規劃作業，本身就是一個最佳化的問題。一般而言，採每站皆停的型態可滿足所有起迄的需求，但是對於部分旅客而言，車內旅行時間會相對高於越站停車的列車；另一方面，採直達快車雖可節省特定起迄需求的車內旅行時間，但是卻無法服務其他不停站的旅客。若鐵路營運業者可針對每個起迄需求提供直達服務，則整體旅客的車內旅行會最小，惟實務上多型態組合之營運有其複雜性，加上資源有限，業者通常僅會提供數種停站型態組合（如 3 ~ 5 種服務型態）。因此，鐵路業者必須要決定適合的停站型態組合，以節省整體旅客的車內旅行時間。

以一個具有 n 個車站的城際鐵路路線而言，起迄車站之外共有 $n - 2$ 個中間車站可供列車選擇停站或者通過，若 m 為總共的停站型態數量，則 $m = 2^{(n-2)}$ ，若鐵路業者決定選取 r 種停站型態來服務，則列車停站組合的問題規模可以式(1)來計算：

$$C_r^m = \frac{m!}{r! \times (m-r)!} \quad (1)$$

舉例而言，若一城際鐵路路線共有 10 個車站，且假設鐵路業者欲提供 5 種停站型態來營運，則會有超過 88 億 ($C_5^{2^{(10-2)}} = 8,809,549,056$) 個停站型態組合供選擇，而問題的規模也會隨車站數 n 或者欲提供停站型態組數 r 之增加而呈指數遞增。

由上述說明可知，如何有效率且正確地找出最佳停站型態組合，是一個複雜的運算問題，亦為本研究的重點之一。

2.2 列車停站計畫模式構建

本研究於最佳停站組合模式之構建，主要係延續前述問題，亦為作者之研究成果^[9]進

行修正，一方面使其可對較大規模問題進行求解，另將原本以啟發式基因演算求解的方法改為數學規劃法求得最佳解。以下則針對城際客運鐵路停站組合模式，說明構建時所考量的一些特性：

1. 在列車停站計畫階段，各停站型態之於每小時之列車頻率與相關的營運成本無法取得，因此在本階段作業規劃時，係以整體旅客的車內旅行時間最小為目標。
2. 承上，由於無列車頻率，亦即無乘載容量等相關資訊，此階段係假設整體旅客起迄需求均被服務完的前提下，來計算整體旅客的車內旅行時間。
3. 相關的列車頻率、列車容量、路線容量、營運成本…等資訊，將一併於後續之列車服務計畫考量。
4. 以一個具有 n 個車站及 $m = 2^{(n-2)}$ 個停站型態之路線而言，本研究將第 1 個型態視為直達車，第 m 個型態視為每站皆停，而第 2 個至 ~ 第 $m-1$ 個型態則以二進位方式予以編碼，以方便模式進行最佳化時之識別。表 1 即是以一個具有 5 個車站共 8 種停站型態的範例，本研究將停站標示為 1、通過為 0 來進行識別，由於起站（車站 1）與迄站（車站 5）均會停車，因此編碼時僅要針對中間的通過車站處理即可，亦即車站 2 ~ 車站 4 可透過十進位轉換為二進位的編碼，例如：型態 3 之編碼為 $(3-1)_{(10)} = 2_{(10)} = 010_{(2)}$ 、型態 4 之編碼為 $(4-1)_{(10)} = 3_{(10)} = 011_{(2)}$ 。
5. 為取得不同停站型態下之各起迄需求旅行時間，必須在模式演算前先進進行前置作業處理。本研究參考日本新幹線與臺灣高鐵的作法，依據表 2 與表 3 之方式以動態計算各種停站型態下不同起迄車站之旅行時間。表 2 是一個典型的旅行時間表範例，一般而言，兩相鄰車站的旅行時間可細分為站間旅行時間、減速進站時間、加速離站時間、停站時間；表 3 則顯示停站型態一旦確定後，則相鄰兩車站之旅行時間可用簡單的方式計算求得。

表 1 5 個車站下之停站型態與對應之編碼方式

停站型態	車站 1	車站 2	車站 3	車站 4	車站 5	對照編碼
型態 1	1	[0	0	0]	1	$0_{(10)}$
型態 2	1	[0	0	1]	1	$1_{(10)}$
型態 3	1	[0	1	0]	1	$2_{(10)}$
型態 4	1	[0	1	1]	1	$3_{(10)}$
型態 5	1	[1	0	0]	1	$4_{(10)}$
型態 6	1	[1	0	1]	1	$5_{(10)}$
型態 7	1	[1	1	0]	1	$6_{(10)}$
型態 8	1	[1	1	1]	1	$7_{(10)}$

表 2 相鄰車站之旅行時間表

方向 1 車站 A → 車站 B				方向 2 車站 B → 車站 A			
車站	站間 時間	增量時間		車站	站間 時間	增量時間	
		減速進站	加速離站			減速進站	加速離站
⋮				⋮			
車站 A	t_1	—	t_3	車站 A	—	t_5	—
車站 B	—	t_2	—	車站 B	t_4	—	t_6
⋮				⋮			

備註：「—」表示數值未列出。

表 3 不同停站方式下之相鄰車站旅行時間計算

停站情境		旅行時間	
車站 A	車站 B	方向 1 車站 A → 車站 B	方向 2 車站 B → 車站 A
通過	通過	t_1	t_4
通過	停站	$t_1 + t_2$	$t_6 + t_4$
停站	通過	$t_3 + t_1$	$t_4 + t_5$
停站	停站	$t_3 + t_1 + t_2$	$t_6 + t_4 + t_5$

本研究在構建列車停站計畫模式時，假設旅次起迄的需求矩陣為已知；另外，臺灣高鐵在臺北－臺中、臺中－左營的停站型態，主要係為支援晨間發車與夜間列車平衡之用，依據臺灣高鐵於 2012 年 4 月的營運班表，全日雙向 157 班次中，該停站型態僅晨間 4 班、夜間 4 班，屬列車調度用，因此不在模式考慮範圍內。

有關列車最佳停站組合之模型建立如下：

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m D_{ij} t_{ijk} z_{ijk} \quad (2)$$

s.t.

$$z_{ijk} \leq H_k, \quad \forall k, i, j \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m H_k = r \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^m z_{ijk} = 1, \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$z_{ijk}, H_k = \{0, 1\}, \forall i, j, k \quad (6)$$

式(2)為目標式，表示以整體旅客的車內旅行時間最小化為目標，計算方式為車站 i 至車站 j 的旅次與各種停站型態之旅行時間相乘後的加總；式(3)定義停站型態 k 被選為服務時，方能考慮此停站型態 k 是否為車站 i 至車站 j 的最短旅行時間；式(4)表示欲選擇停站型態組合之數量為 r ；式(5)定義不同停站型態下，僅有一組型態滿足車站 i 至車站 j 的時間為最小，同時確保車站 i 至車站 j 的旅次均能被服務到；式(6)表示決策變數 z_{ijk}, H_k 均為 0-1 變數。

三、列車服務計畫

3.1 列車服務計畫問題分析

就列車服務計畫而言，理想上應該是在列車停站計畫中規劃出最佳的停站型態組合後，再求解每小時各型態的發車頻率，惟多數的研究均將既有的停站型態配置作為輸入參數^[10-16]，無論是透過營運業者提供或研究自行假設的停站型態組合，均無透過停站計畫階段考量旅客的車內旅行時間最小化。少部分的研究雖有結合列車停站計畫與列車服務計畫，但求解規模上有其限制，例如：Chang 等人^[17]透過多目標最佳化方法，在動態的停站型態組合下決定最佳的列車頻率、Ulusoy 等人^[18]利用非線性的混合整數規劃同時求取最佳的停站型態組合以及列車頻率，由於列車停站與列車服務計畫整合的模式非常複雜且不易求解，因此這些混合模式的解析範圍均限制在一小時內。由此可知，實務上鐵路營運業者在求解一整天的最佳列車停站組合與列車服務計畫仍是一個挑戰。

此外，多數的列車服務計畫文獻中^[10,11,14-18]，最大的問題是幾乎所有的模式都假設列車在起站出發後，均可在同一小時內服務到下游車站的旅客需求，此種假設隱含著列車的速度為無限大，且旅客需求係均勻分佈在同一小時內。然而，這種假設與實務的系統並不吻合，因為城際鐵路的旅行時間通常都超過一小時以上，且下游車站的旅客未必能被同一小時內由起站出發的列車所服務到。Jong 等人^[12,13]針對此問題納入了時空遞移的處理，將旅客起迄需求依據不同停站型態的列車平均速度予以調整，以克服上述不合理的情形，惟該研究仍是以既有之停站方式組合作為輸入參數，並非依據旅客需求下所得出之最佳停站配置，因此仍有改善的空間。

3.2 時空遞移調整與未服務旅客轉移

以臺灣高鐵為例，圖 2 分別顯示下行與上行 4 種不同停站型態的列車時空示意圖，就下行每站皆停的型態 D 列車而言，圖 2(a)中顯示若該列車 06:00 從臺北站出發，約可在 07:00 前抵達臺中，並於近 08:00 抵達左營，這表示 06:00 ~ 07:00 間若嘉義至臺南有旅客起迄需求，實際上是無法被此列車服務，運輸需求預測所得到的每小時旅次分配，必須依據列

車的運轉時空特性來調整，此即為旅運需求之時空遞移現象。

在進行時空遞移調整時，必須要先計算平均速度以推估營運的累計時間，又平均車速與停站型態有關，因此模式內係採動態的方式計算，表 4 則是以平均速率 200 km/h 為例，顯示下行與上行的累計時間。此外，前一小時未服務的旅客中，有一定的比例會轉移至下一小時，因此實際作為模式輸入的旅次起迄資料，須合理地將前一小時未受服務而轉移的旅客考慮在內。

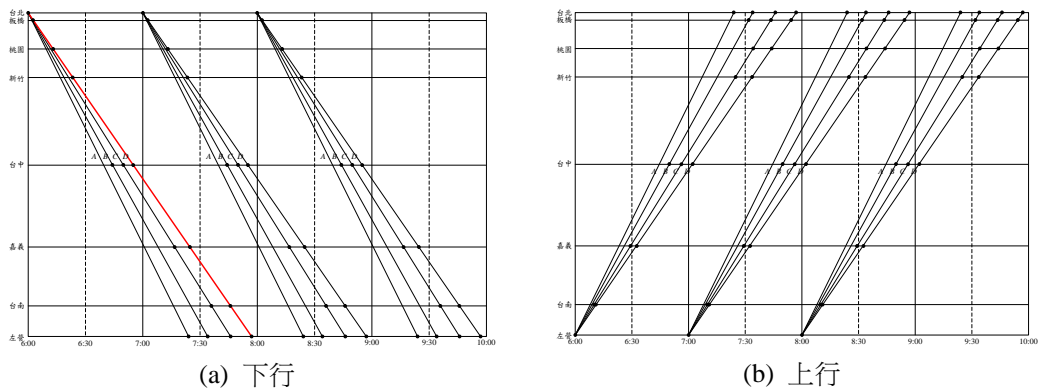


圖 2 不同停站型態之上下行時空圖

表 4 下行列車運行時空關係表 (以平均速度 200km/h 為例)

車站名稱	車站編號	里程(公里)	下行列車累計旅行時間(分鐘)	上行列車累計旅行時間(分鐘)
臺北	1	5	0.00	102.00
板橋	2	13	2.40	99.60
桃園	3	42	11.10	90.90
新竹	4	72	20.10	81.90
臺中	5	165	48.00	54.00
嘉義	6	251	73.80	28.20
臺南	7	314	92.40	9.60
左營	8	345	102.00	0.00

3.2.1 下行時空遞移與旅客轉移

圖 3 與圖 4 分別為晨間與夜間下行時空遞移的時間帶，從清晨 06:00 (時段 1) 至夜間共可區分為 17 個時段，假設每小時之旅客需求為均勻分布，則時段 1 至時段 16 在時空遞

移後的旅客需求可表示如式(7)與式(8)：

$$\text{若 } 0 \leq t_{li} \leq 60, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^t = \frac{(60 - t_{li})}{60} D_{ij}^t + \frac{t_{li}}{60} D_{ij}^{t+1}, \quad \forall j > i \quad (7)$$

$$\text{若 } 60 \leq t_{li} \leq 120, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^t = \frac{(120 - t_{li})}{60} D_{ij}^{t+1} + \frac{(t_{li} - 60)}{60} D_{ij}^{t+2}, \quad \forall j > i \quad (8)$$

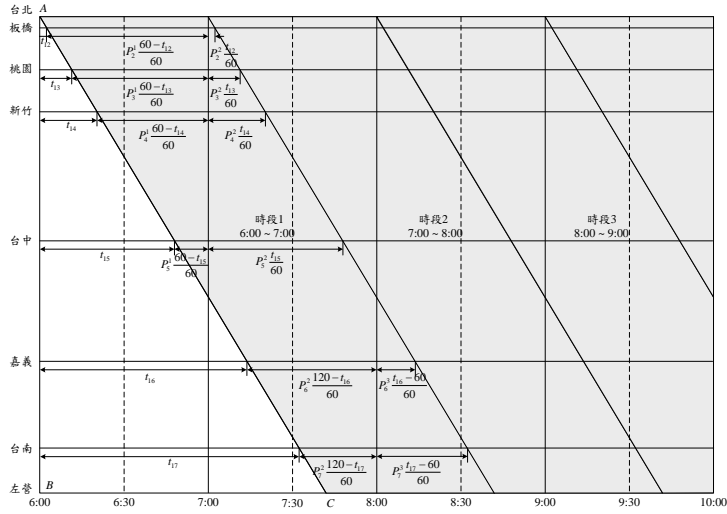


圖 3 晨間下行時空遞移之時區示意圖

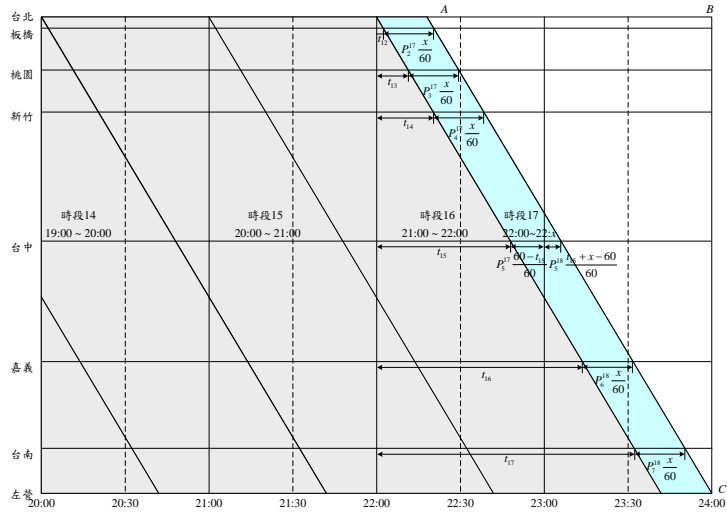


圖 4 夜間下行時空遞移之時區示意圖

式中：

t_{li} = 下行列車從臺北站至車站 i 所累積的車內旅行時間 (分鐘)；

\bar{D}_{ij}^t = t 時段車站 i 至車站 j 的平均旅客需求 (人／小時)；

D_{ij}^t = t 時段車站 i 至車站 j 之原始旅客需求 (人／小時)。

以高鐵而言，每日的營運時段為 06:00 ~ 24:00，且收班車必須要在 24:00 前抵達末端車站，因此最後一個時段並非 23:00 ~ 24:00，從表 4 可知最後一個臺北－左營的服務時段是落在 22:00 ~ 22:x，而 x 則是依據各停站型態的平均速率來決定，因此最後一個時段的旅客需求可表示如式(9) ~ 式(11)所示。

$$\text{若 } 0 \leq t_{li} + x < 60, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^{17} = \frac{x}{60} D_{ij}^{17}, \quad \forall j > i \quad (9)$$

$$\text{若 } t_{li} < 60 \leq t_{li} + x, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^{17} = \frac{(60 - t_{li})}{60} D_{ij}^{17} + \frac{(t_{li} + x - 60)}{60} D_{ij}^{18}, \quad \forall j > i \quad (10)$$

$$\text{若 } 60 \leq t_{li} < 120, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^{17} = \frac{x}{60} D_{ij}^{18}, \quad \forall j > i \quad (11)$$

此外，圖 3 之 ΔABC 區塊是清晨下行方向無法被服務的旅客，這些未服務旅客可透過式(12)與式(13)轉移至時段 1，而其他各時段未服務旅客則採用式(14)來轉移，至於圖 4 內之 ΔABC 區塊則是完全無法被服務到的旅客。

$$\text{若 } 0 \leq t_{li} < 60, \text{ 則 } G_{ij}^1 = \bar{D}_{ij}^1 + \beta \left(\frac{t_{li}}{60} D_{ij}^1 \right), \quad \forall i < j \quad (12)$$

$$\text{若 } 60 \leq t_{li} < 120, \text{ 則 } G_{ij}^1 = \bar{D}_{ij}^1 + \beta \left(D_{ij}^1 + \frac{(t_{li} - 60)}{60} D_{ij}^2 \right), \quad \forall i < j \quad (13)$$

$$G_{ij}^t = \bar{D}_{ij}^t + \beta (G_{ij}^{t-1} - S_{ij}^{t-1}), \quad \forall t = 2, \dots, 17, \quad \forall i < j \quad (14)$$

式中：

β = 前一時段未被服務到的旅客移轉至下一時段的比例。

3.2.2 上行時空遞移與旅客轉移

圖 5 與圖 6 分別為晨間與夜間上行時空遞移的時間帶，從清晨 06:00 (時段 1) 至夜間共可區分為 17 個時段，假設每小時之旅客需求為均勻分布，則時段 1 至時段 16 在時空遞移後的旅客需求可表示如式(15)與式(16)：

$$\text{若 } 0 \leq t_{8i} < 60, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^t = \frac{(60 - t_{8i})}{60} D_{ij}^{t-1} + \frac{t_{8i}}{60} D_{ij}^t, \quad \forall j < i \quad (15)$$

$$\text{若 } 60 \leq t_{8i} < 120, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^t = \frac{(120 - t_{8i})}{60} D_{ij}^t + \frac{(t_{8i} - 60)}{60} D_{ij}^{t+1}, \quad \forall j < i \quad (16)$$

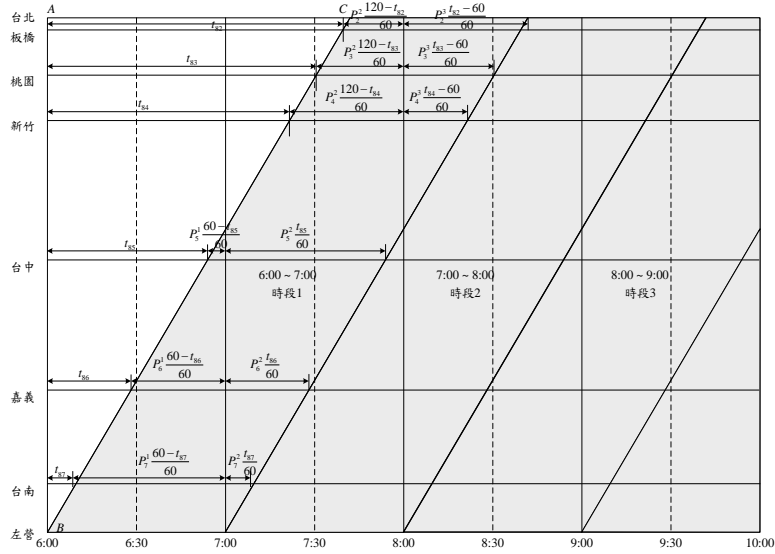


圖 5 晨間上行時空遞移之時區示意圖

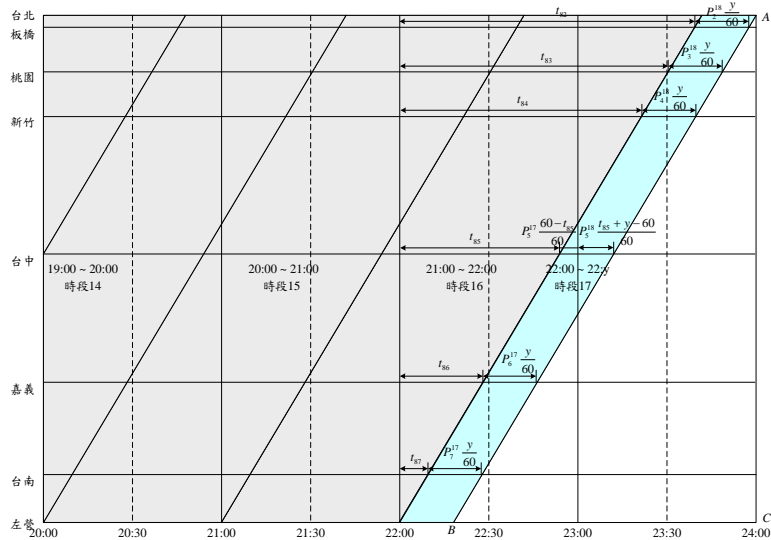


圖 6 夜間上行時空遞移之時區示意圖

式中：

t_{8i} = 上行列車從左營站至車站 i 所累積的車內旅行時間 (分鐘)。

與下行情況相同，上行最後一個時段並非 23:00~24:00，從圖 6 中可知最後一個左營-臺北的服務時段是落在 22:00 ~ 22:y，而 y 也是依據各停站型態的平均速率決定出來的，因此最後一個時段的旅客需求可表示如式(17) ~ 式(19)所示。

$$\text{若 } 0 \leq t_{8i} + y < 60, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^{18} = \frac{y}{60} D_{ij}^{17}, \quad \forall j < i \quad (17)$$

$$\text{若 } t_{8i} < 60 \leq t_{8i} + y, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^{18} = \frac{(60 - t_{8i})}{60} D_{ij}^{17} + \frac{(t_{8i} + y - 60)}{60} D_{ij}^{18}, \quad \forall j < i \quad (18)$$

$$\text{若 } 60 \leq t_{8i} < 120, \text{ 則 } \bar{D}_{ij}^{18} = \frac{y}{60} D_{ij}^{18}, \quad \forall j < i \quad (19)$$

此外，圖 5 之 ΔABC 區塊是清晨上行方向無法被服務的旅客，這些未服務旅客可透過式(20)與式(21)轉移到時段 1，而其他各時段未服務旅客則採用式(22)來轉移，至於圖 6 內之 ΔABC 區塊則是完全無法被服務到的旅客。

$$\text{若 } 0 \leq t_{8i} < 60, \text{ 則 } G_{ij}^1 = \bar{D}_{ij}^1 + \beta \left(\frac{t_{8i}}{60} D_{ij}^1 \right), \quad \forall i > j \quad (20)$$

$$\text{若 } 60 \leq t_{8i} < 120, \text{ 則 } G_{ij}^1 = \bar{D}_{ij}^1 + \beta \left(D_{ij}^1 + \frac{(t_{8i} - 60)}{60} D_{ij}^2 \right), \quad \forall i > j \quad (21)$$

$$G_{ij}^t = \bar{D}_{ij}^t + \beta (G_{ij}^{t-1} - S_{ij}^{t-1}), \quad \forall t = 2, \dots, 17, \quad \forall i > j \quad (22)$$

3.3 列車服務計畫模式構建

列車服務計畫的功能需求，主要係依據營運策略及鐵路業者所能支配的資源而定，不同公司的需求會有所不同，但大致上是相似的。本研究所構建的列車服務計畫係以臺灣高鐵為案例分析，因此列車服務計畫決定的就是終端發車站每一小時各停站型態的發車頻率，以下說明模式構建時所考量的重要特性：

1. 旅運需求為模式的輸入資料，當需求變動時，必須重新執行模式以求得新的服務計畫。
2. 將列車停站計畫之最佳停站組合輸出結果，作為列車服務計畫模式的輸入；
3. 考量旅次起迄之時空遞移特性，以更貼切的描述實際狀況；
4. 考量雙向各不同路段的路線容量；
5. 依據司機員及軌道線型配置等限制，考量雙向每小時所能發出的班次數；

6. 考量列車組數限制；
7. 為確保服務品質，將每小時各不同停站型態的最小服務頻率納入考量；
8. 依據立位及座位，考量列車容量限制；
9. 依據不同起迄對的旅客需求，考量各自的最低服務率，以確保該起迄對可至少服務完設定比率之旅客；
10. 依據實際營運限制，臺北與左營為固定的發車站；
11. 考量最高乘載水準，以確保一定的服務品質；
12. 考量高鐵公司與政府簽訂 BOT 合約之單向運能限制（單向 60,000 座位乘 340 公里）；
13. 考量整體營運時段的最佳解（例如 06:00 ~ 24:00），而非單一小時各別的最佳解（例如 06:00 ~ 07:00、07:00 ~ 08:00、...）。

本研究在構建列車服務計畫模式時假設旅客需求矩陣為已知，且旅客不於系統內轉乘；另外，若系統運能不足時，部分旅客會流失，另一部分則會轉搭其他列車。

有關列車最佳服務計畫之模型建立如下：

$$\max \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} S_{ij} P_{ij} - \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} f_k^t C_k - \varpi \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} S_{ijk}^t t_{ijk} v \quad (23)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} c_{kmn} f_k^t \leq \gamma^t C_{mn}, \quad \forall (m, n) \in A, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} f_k^t \leq \gamma^t N_T, \quad \forall t \in T \quad (25)$$

$$f_k^t \geq \gamma^t f_{km}, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (26)$$

$$S_{ijk}^t \leq a_{ijk} f_k^t C_T, \quad \forall i, j \in N, k \in K, t \in T \quad (27)$$

$$S_{ij}^t = \sum_{k \in K} S_{ijk}^t, \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (28)$$

$$S_{ij} = \sum_{t \in T} S_{ij}^t, \quad \forall i, j \in N \quad (29)$$

$$l_{ij} \sum_{t \in T} G_{ij}^t \leq S_{ij}, \quad \forall i, j \in N \quad (30)$$

$$S_{ij}^t \leq G_{ij}^t, \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (31)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} S_{ij} d_{ij} \leq \alpha \cdot C_S \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} f_k^t d_k \quad (32)$$

$$S_k^t = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} S_{ijk}^t, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (33)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} b_{ijmn} S_{ijk}^t = L_{kmn}^t, \quad \forall k \in K, (m, n) \in A, t \in T \quad (34)$$

$$L_{kmn}^t + E_{kmn}^t = C_T f_k^t, \quad \forall k \in K, (m, n) \in A, t \in T \quad (35)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} f_k^t \cdot d_k \geq M \quad (36)$$

$$S_{ijk}^t, S_{ij}^t, S_k^t, L_{kmn}^t, E_{kmn}^t, G_{ij}^t, S_{ij} \geq 0, \quad f_k^t \geq 0 \quad \text{and are integers} \quad (37)$$

其中，式(23)為目標函數，第一項 $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} S_{ij} P_{ij}$ 為票箱收入，第二項 $\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} f_k^t C_k$ 為各種停站型態的營運維修成本總和，前二項相減即為該鐵路系統之利潤，第三項 $\varpi \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} S_{ijk}^t t_{ijk} v$ 為加權後的旅客旅行時間成本， ϖ 係權衡營運者利潤及旅客時間價值之權重。透過目標式可知，在相同的票價水準之下，旅客通常會選擇行駛時間較短的班次，除非是該種列車的車票已經售罄，因此藉由此目標值之導引，可自動將旅次優先分配給旅行時間較短的營運列車。

限制式部分，式(24)為路線容量限制，主要受到路線、交通及控制條件的影響，每一路線區間每小時所能開行的列車總數不可能無止境地增加，因此本式利用外生變數 c_{kmn} ，針對通過該特定區間的列車建構限制式；式(25)為列車組數限制，在有限的列車組數下，每小時所能開行的列車總數有一定的限制；式(26)定義列車最低服務頻率限制，由於每一種列車營運模式所停靠的車站以及運轉時間皆不相同，基於服務旅客的觀點，可能會要求每一種營運模式的列車在每小時的最低發車頻率，以達到一定的服務品質；式(27)表示座位分配限制，意義為旅客可以選搭某一特定營運模式的列車之前提包括：(i)該種列車有開車，(ii)該種列車有停靠旅客的起迄車站，及(iii)該種列車仍有空位；式(28)與式(29)為各起迄車站被服務旅客的守候限制，意義為每一對起迄點若有不同營運模式的列車停靠時，則旅客可以選搭不同的列車，因此該起迄點被服務的旅次總數為各種營運模式列車所服務旅次之和；式(30)定義旅客最低服務比例限制，可限制每一種起迄點的最低服務比例，以確保一定的服務水準；式(31)定義旅客最高服務比例限制，表示每一對起迄點被服務的旅次必須小於或等於該起迄點的旅運需求數；式(32)為承載水準限制，可維持列車之服務水準，如果承載水準過高致使車廂過度擁擠，則營運單位應檢討與改善；式(33)為各種營運模式列車服務旅客數的守候限制；式(34)表示各種營運模式列車在每一區間載運旅客數的守候限制；式(35)定義區間容量限制，表示每一路線區間所載運的旅客數，必須小於或等於列車容量與發車頻率的乘積；式(36)為高鐵公司與政府簽訂 BOT 合約中的單方向的運能保證；式(37)說明決策變數均為非負以及發車頻率為整數限制。

四、案例分析

本研究以臺灣高鐵為對象進行案例分析，考量旅客多對多起迄需求下，求解車內旅行時間最小化目標之最佳停站計畫組合，之後再以此停站方式為基礎，同時考量業者利潤最大，以求解每小時各停站型態之發車頻率。本研究並將求解結果與現況進行比較，提出可供營運參考與改善之方向。

本研究於模式應用上，均採用微軟 C++/MFC 技術平台進行程式的開發與資料前處理，包含有：操作參數、旅次起迄的輸入、數學模式的轉換與模式輸出，另求解部分則搭配 CPLEX 最佳化求解軟體，透過分枝界限法進行 0-1 整數與混合整數規劃求解^[19]，並在程式完整確認與驗證後，進行案例之分析。

4.1 背景資料

臺灣高鐵位於臺灣西部走廊，路線長度 345 公里，初期共設有 8 個車站，自 2007 年開通後，已逐漸成為西部走廊重要的長途運輸工具。圖 7 顯示臺灣高鐵營運初期規劃的 5 種停站型態組合 (A~E)，在不考慮列車平衡之常態狀況下 (即不考慮型態 E 時)，臺灣高鐵的始發車站為臺北站與左營站。

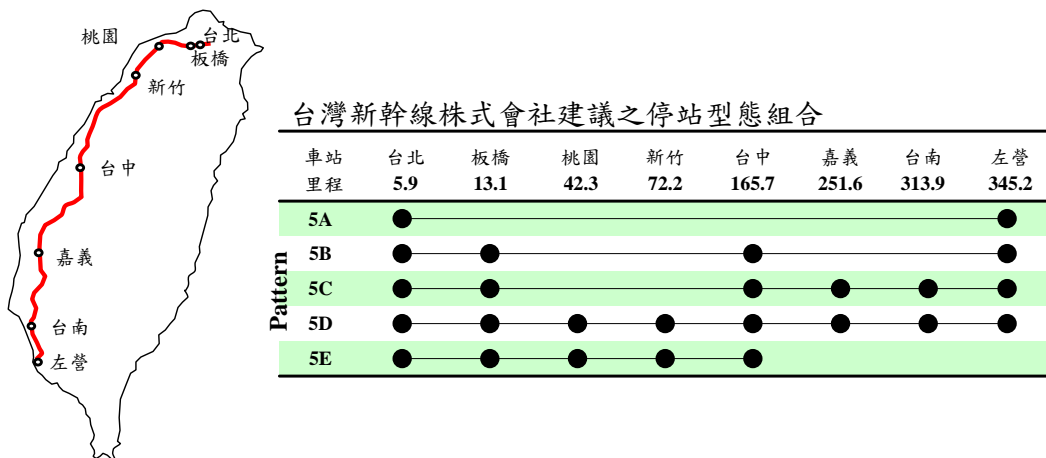


圖 7 臺灣高鐵營運初期停站型態示意圖

由於該停站型態可能是依合作夥伴之經驗法則所制定，或者納入多方個別需求下所妥協出的停站型態，就現況而言，臺灣高鐵多以型態 B 及型態 D 作為主力的服務產品，少部分時間會採用型態 C、型態 E 及類似的變化型態，而型態 A 則是未曾使用過。由上可知，沒有依據旅客需求所制定出的停站型態可能無法符合多數旅客的實際需求，不但無法整體

考量整體旅客的車內旅行時間最小化，且也可能會導致後續列車服務計畫資源配置的浪費，而此一課題在未來新增車站後將更形重要。由於鐵路業者路線容量、列車與相關資源有限，因此通常僅提供少數的停站型態組合，再依據不同停站方式配置其發車頻率，以下以 2008 年的旅客起迄需求為例，說明如何在有限資源下，應用本研究建立之決策系統來達成最好的配置。

4.2 最佳停站組合

案例分析的執行環境為 Core2 Duo 3.0GHz、4GB RAM 的桌上型電腦，圖 8 顯示在 8 個車站以及提供 5 種停站型態之規模內，多數情境均可在 17 秒內求得最佳解，此結果大幅改善 Jong 等人^[9] 求解時間過長之問題，表示本研究建構的模式可有效的求得最佳解。

以下各小節分別就現況作業、模式效益及衍生功能等進行探討。

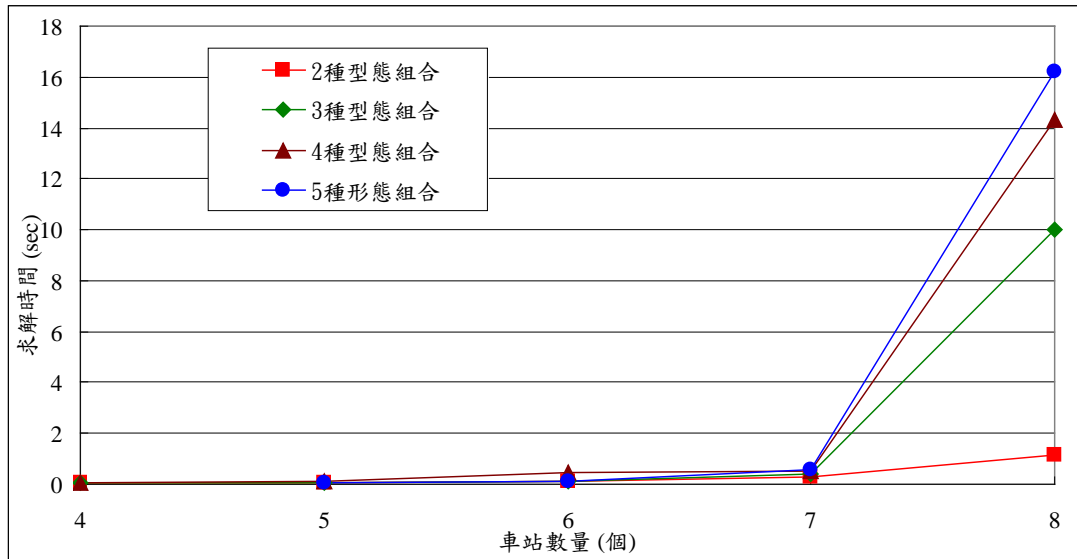


圖 8 列車停站計畫模式求解效率測試

4.2.1 結果評估與現況衝擊

本研究以臺灣高鐵初期營運的 8 個車站進行案例分析，並以既有旅次起迄的需求矩陣作為輸入，可得出圖 9 與圖 10 的結果，茲將結果說明如下：

1. 從圖 9 可知，在車站數固定的情形下，整體旅客的車內旅行時間（目標值），會隨著欲提供停站型態組合數（ r ）的增加而有逐漸降低的趨勢。現況運作上，由於營運資源有限，不可能無限制地提供多種停站型態，因此列車最佳停站模式即可提供鐵路營運業者作為決策支援應用，使在眾多停站型態中，依據所欲提供的組合數作最佳的停站配置建

議。

- 透過列車最佳停站模式所得出之停站組合，可將旅客車內旅行時間最小化，圖 9 中即可觀察到在提供相同停站組合數之下，模式求解的目標值均優於臺灣高鐵現階段主要採用的兩種停站型態 (BD)，或已使用的 4 種停站型態 (BCDE)，顯示現況停站型態配置仍有改善的空間。現況運作上，列車停站多以鐵路營運專家的經驗法則來決定，由於組合數量過於龐大，即使是經驗豐富的專家也可能無法找到最佳的配置，因此列車最佳停站模式可提供一個良好的決策應用。
- 透過圖 9 可知，相較於臺灣高鐵主要提供的兩種停站型態而言 (BD)，列車最佳停站模式在僅提供 2 組停站型態時，最佳解之旅客車內旅行時間改善幅度約為 0.9%，亦即每天約可節省 992 旅客小時，每年可減少 361,921 旅客小時。
- 相較於臺灣高鐵已使用之 4 種停站型態而言 (BCDE，排除沒使用的型態 A)，最佳解之旅客車內旅行時間改善幅度約為 6.2%，亦即每天約可節省 6,734 旅客小時，每年可減少 2,457,974 旅客小時。現況運作上，若鐵路營運業者在規劃之初就依據旅運需求來進行最佳停站組合配置，將可使大多數旅客起迄需求的旅行時間最少，若該節省之旅行時間以貨幣價值計，將更突顯列車最佳停站模式之效益。
- 圖 10 顯示多數情境下，每站皆停為基本之停站型態，惟當停站型態組數達 7 組時，多種停站方式之互相搭配下，可取代每站皆停之停站型態。
- 本研究透過圖 10 之各種情境可知，在該旅次起迄需求下，板橋站不用作為必停車站；現況運作上，臺灣高鐵將板橋站設定為必停車站，本研究建議臺灣高鐵在未來重新規劃停站型態時，可考慮先將此限制移除，直接依據旅次起迄需求來決定停站型態即可。

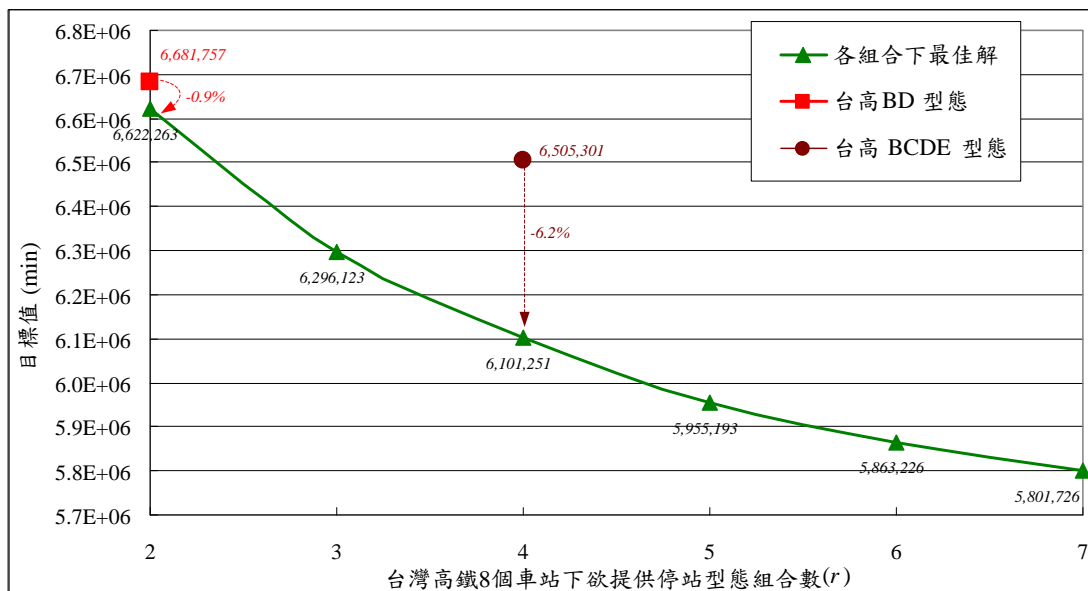


圖 9 臺灣高鐵 8 車站之列車停站型態組合與整體旅客車內旅行時間

2種型態組合								
型態	台北	板橋	桃園	新竹	台中	嘉義	台南	左營
2A	●				●		●	●
2B	●	●	●	●	●	●	●	●
3種型態組合								
型態	台北	板橋	桃園	新竹	台中	嘉義	台南	左營
3A	●				●			●
3B	●	●				●	●	●
3C	●	●	●	●	●	●	●	●
4種型態組合								
型態	台北	板橋	桃園	新竹	台中	嘉義	台南	左營
4A	●				●			●
4B	●			●			●	●
4C	●	●	●			●		●
4D	●	●	●	●	●	●	●	●
5種型態組合								
型態	台北	板橋	桃園	新竹	台中	嘉義	台南	左營
5A	●							●
5B	●				●	●		●
5C	●			●			●	●
5D	●	●	●		●			●
5E	●	●	●	●	●	●	●	●
6種型態組合								
型態	台北	板橋	桃園	新竹	台中	嘉義	台南	左營
6A	●							●
6B	●				●			●
6C	●			●			●	●
6D	●	●				●		●
6E	●	●	●				●	●
6F	●	●	●	●	●	●	●	●
7種型態組合								
型態	台北	板橋	桃園	新竹	台中	嘉義	台南	左營
7A	●							●
7B	●						●	●
7C	●				●	●		●
7D	●			●	●			●
7E	●	●	●					●
7F	●	●	●		●		●	●
7G	●	●	●	●		●	●	●

圖 10 案例分析之列車停站型態組合建議

7. 臺灣高鐵未來將新增 4 個車站營運，假使未來欲提供 4 組停站型態來服務旅客，則求解空間將會有 455 億種組合 ($C_4^{2^{(12-2)}} = 45,545,029,376$)，此時之列車停站配置已非人工或經驗法則能夠勝任，若能採本決策支援系統，將可快速且合理的決定停站型態組合。

4.2.2 效益與衍生功用

有關列車最佳停站模式之效益與衍生功用部分，說明如下：

1. 透過本模式之應用，可取代鐵路營運業者以專家經驗法則或試誤法來選取停站計畫組合，可減少鐵路營運業者資源的誤用，並降低旅客的車內時間成本。
2. 面對龐大的停站型態組合，即便是經驗豐富的鐵路營運專家，也需要一定的作業時間方能決定停站方案，即使決定後但仍無法保證該方案能夠充分考量整體旅客的旅行時間最小化。以案例分析之臺灣高鐵為例，在取得旅次起迄需求預測且決定欲提供停站型態組合數後，即可快速正確的求得旅客車內時間最小的停站計畫組合。
3. 在衍生功用上，若鐵路營運業者面對外界質疑其停站型態組合的配置，或者受到民意壓力希望增停某特定車站時，即可應用本模式來分析特定停站方式下的相對服務績效，可正確的透過量化績效評估結果回應外界的質疑或要求。

4.3 最佳列車頻率

列車服務計畫模式可觀察不同停站型態組合數下的整體利潤（目標值）變化，由於列車服務計畫模式所須輸入的參數較多，因此表 5 先彙整各項參數的基本設定。

表 5 列車服務計畫輸入參數一覽表

項目	參數	設定值說明
1	票價	商務艙與標準艙之加權平均票價
2	最低旅客服務比率	採旅程遞遠遞增方式設定
3	營運成本	採固定成本與變動成本總和
4	最低服務頻率	每站皆停之型態至少每小時 1 班次
5	座位容量	依商務艙與標準艙加總，即每車 989 個座位
6	立位容量	不考慮立位，即每車 0 個立位
7	最大乘載率	0.75
8	未受服務旅客轉移比率	0.6
9	旅客時間價值	5 元／分鐘
10	旅行時間成本權重	假設權重相等為 1
11	單向運能限制	依 BOT 契約要求之座位公里數

4.3.1 結果評估與現況衝擊

本研究分別以 3 種情境來進行評估，表 6 分別說明 3 種情境下之停站型態、旅客時間價值、目標值以及模式求解時間。其中，情境 1 是透過本研究發展的停站模式，分別產製 2 種~4 種的停站型態組合，並將該停站配置作為列車服務計畫模式的輸入，以觀察不同停站型態數下之目標值變化；情境 2 的停站組合數為 2 種，係直接採用臺灣高鐵現況最常使用的兩種停站型態 (BD)；情境 3 則以臺灣高鐵已使用的 4 種停站型態 (BCDE) 作為列車服務計畫模式的輸入。茲將各情境的運算結果呈現如圖 11 所示，並綜合研析說明如下。

表 6 列車服務計畫分析情境一覽表

情境列	停站型態	旅客時間價值 (元)	目標值 (元)	求解時間 (秒)
情境 1	2 種－最佳停站模式產生	31,700,237	54,867,637	1
	3 種－最佳停站模式產生	30,148,426	56,625,497	1
	4 種－最佳停站模式產生	29,654,579	57,217,577	2
情境 2	2 種－高鐵 BD 型態	31,986,466	54,609,192	1
情境 3	4 種－高鐵 BCDE 型態	31,281,992	55,574,819	2

1. 在本案例 8 個車站，分別求取 2~4 種停站型態下之列車服務計畫時，均可在 2 秒內求得最佳解，表示整體求解效率非常好；現況運作上，單就列車服務計畫可能就需要數天時間來完成方案擬定，但仍無法確保鐵路營運業者利潤最大及旅客旅行時間最小。
2. 在給定的旅次起迄需求下，情境 1 之停站型態組數從 2 組增至 4 組時，目標值呈遞增趨勢，惟邊際效益是遞減的。現況運作上，擬定一組列車服務計畫就需耗費多時，透過本模式可快速的產製方案，將原本需耗費在製作方案的時間，轉為進行不同方案的評估，增加運作效率。
3. 當提供的停站組數增加時，旅客可選擇的服務型態變多，可供區間直達的起迄對增加，因此整體車內旅行時間成本會相對降低，致使利潤呈現遞增趨勢。現況運作上，在完成列車服務計畫方案後，僅能大略知道結果趨勢，但無法精確掌握相關變化與影響，透過本模式可量化所有的運算結果，規劃單位可以掌握各項重要的數值與其代表意義。
4. 透過表 6 與圖 11 可知，相較於臺灣高鐵主要的兩種停站型態 (BD) 作為停站組合求得最佳之各級列車發車頻率，以 2 種最佳停站型態配置下得出之列車服務計畫利潤目標改善幅度約為 0.47%，亦即從 54,609,192 元增加至 54,867,637 元，目標值相差 258,445 元。
5. 相較於臺灣高鐵已使用之 BCDE4 種停站型態（排除沒使用的型態 A）作為停站組合求解最佳各級列車發車頻率，以 4 種最佳停站型態配置下得出之列車服務計畫利潤目標改

善幅度約為 2.96%，亦即從 55,574,819 元增加至 57,217,577 元，目標值相差 1,642,758 元。此處之目標值比較均以兩者之最佳情況來評估，惟現況運作下若非以列車服務計畫模式得出每小時各級列車發車頻率，則可能使目標值之差異更大。

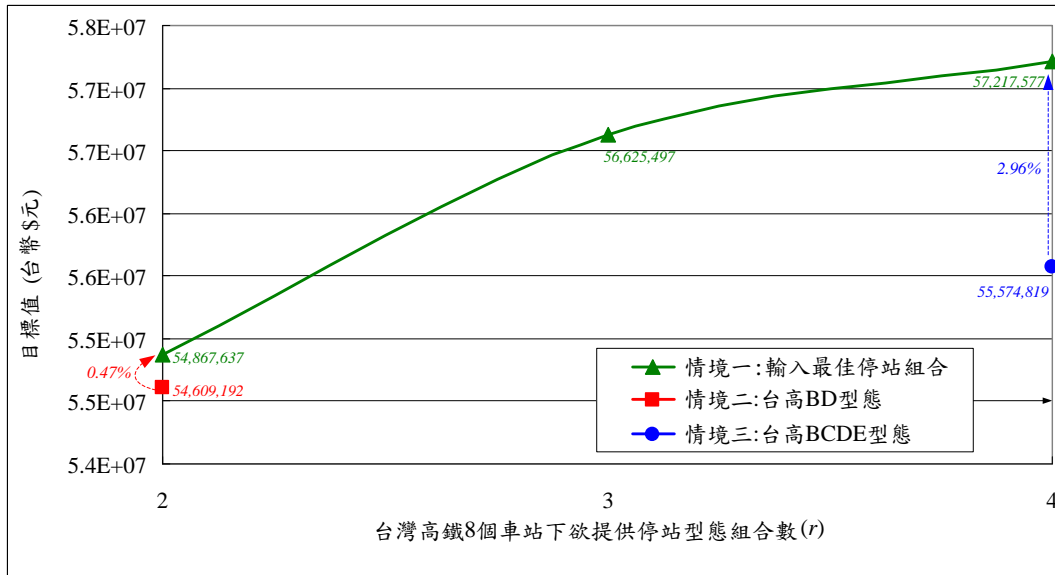


圖 11 不同停站組合數之整體目標值變化

此外，本研究亦嘗試將最佳的 4 組停站型態組合（圖 10 之 4A~4D）刪除任一組停站型態，再去評估剩餘任 3 組停站型態組合的服務計畫目標值，發現目標值均劣於最佳的 3 組停站型態組合（圖 10 之 3A ~ 3C），此結果說明若鐵路營運業者欲提供 3 組停站型態時，仍應以最佳列車停站模式所得出的停站組合方案為宜。

4.3.2 效益與衍生功用

有關列車服務計畫模式之效益與衍生功用部分，歸納說明如下：

1. 列車服務計畫目標式中以利潤最大化為目標，並以加權方式將旅行時間成本納入視為負效用，因此，系統在最佳化的求解過程中，會選取營運成本相對較低，且又能顧及旅行時間相對較少之停站型態作為發車頻率的設定依據，以得出每小時各級列車的發車頻率，此效益是專家經驗法則或試誤法無法達到的。
2. 透過列車服務計畫模式的運用，可精確掌握利潤與時間價值的量化指標，而在求解完成後，亦可得知決策變數中每小時每區間各級列車的運量分派，可提供鐵路營運單位參考。
3. 衍生功用上，鐵路營運業者可能限於 BOT 契約或者民意要求，每小時必須加開某列車時，則可針對特定停站型態的列車來設定服務頻率，透過目標值的計算即可快速且正確地評估方案優劣，同時亦可與既有方案比較利潤與旅行時間。

4.3.3 敏感度分析

由於旅行時間成本權重值為較不確定之因子，因此本節針對該權重值進行敏感度分析。本研究以臺灣高鐵目前已使用之 4 種停站型態 (BCDE) 為分析基礎，使用表 5 的列車服務計畫基本參數，並將旅行時間成本權重值進行微幅調整，可得圖 12 之結果，謹針對其意涵說明如下。

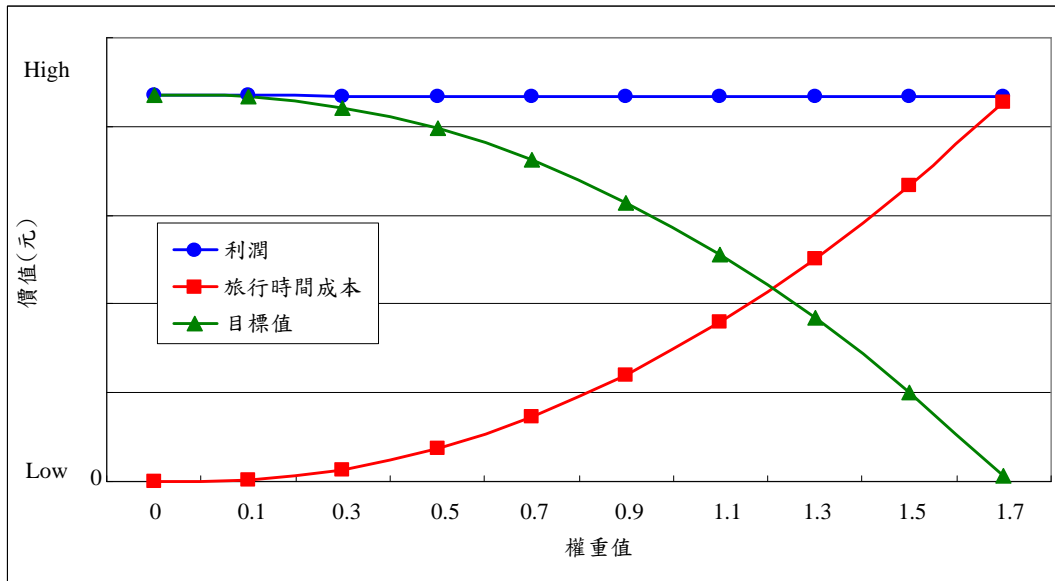


圖 12 旅行時間成本權重值敏感度分析

1. 欲服務之既有旅次起迄需求與停站型態為已知，在旅行時間成本權重值微幅調整的情況下，每小時各級列車的發車頻率與運量分配可能有所不同，但是總載運旅客量與總派車頻率大致相同，使得票箱收入與營運成本的相減的利潤值大致維持在一定水準。
2. 旅行時間成本會隨著權重值的提高而增加，由於整體目標值為利潤與時間價值成本項相減，故可觀察到整體目標值隨著旅行時間成本權重值的提高而降低。
3. 若以旅客角度而言，該權重值越大會導引模式產生更有利於旅客的列車服務計畫，因此各級列車每小時班次會有所不同，並導致鐵路營運業者利潤微幅下降，惟利潤的影響幅度並不顯著，因此該目標式的定義可隱含鐵路營運業者與旅客雙贏之下的服務策略。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究根據城際客運鐵路系統之特性發展一套決策支援系統，使鐵路營運業者可正確地找出最佳停站型態組合，且有效率地決定各列不同型態的發車頻率。

就模式而言，列車停站計畫以旅客車內旅行時間最小為目標，採 0-1 整數規劃進行求解；列車服務計畫則以最大利潤為目標，並將旅行時間成本的權重值視為負效用，特別是在旅次起迄需求部分有考量時空遞移關係及未服務旅客轉移之比率，再以混和整數規劃進行求解。

最後，本研究之決策支援系統係以臺灣高鐵為例進行分析，除了找出不同停站型態組數下之最佳停站配置外，亦透過模式分析出不同情境之列車服務計畫目標值。研究結果顯示：臺灣高鐵現況停站型態組合仍有精進空間，以達到整體旅客車內旅行時間最小之目標，並使臺灣高鐵有更好的利潤表現。整體而言，本決策支援系統不但能滿足旅客需求，同時亦能協助業者創造更多利基，達到雙贏之局面。此一課題在未來新增車站後將更形重要，本研究建立之模式可在路線容量、列車與相關資源有限情況下來達成最好的配置。

5.2 建議

實務上在擬定停站計畫時，規模較大之鐵路營運業者可能會考量階級化停站方式的設定，亦即高級列車（速度較快）所選停的車站，一定會被納入次級列車（速度較慢）選停的車站，此階級停站方式的需求亦可作為未來研究之課題。

此外，發展更全面的模式及更有效率的演算法，除了考慮列車與旅客的時空遞移及各項營運限制條件之外，能同時求解全日需求變化的列車停站模式組合以及列車服務頻率，亦為未來的研究方向。

參考文獻

1. 鍾志成、孫千山、李宇欣、李治綱、陳信雄，「鐵路列車服務計畫規劃方法」，中華民國運輸學會第 21 屆學術論文研討會論文集，中華大學主辦，民國 95 年。
2. Assad, A. A., "Modelling of Rail Networks: Toward a Routing/Makeup Model", *Transportation Research Part B*, Vol. 14, Issues 1-2, 1980, pp. 101-114.
3. Bussieck, M. R., Winter, T., and Zimmermann, U. T., "Discrete Optimization in Public Rail Transport", *Mathematical Programming*, Vol. 79, 1997, pp. 415-444.
4. Sussman, J., *Introduction to Transportation Systems*, Artech House Its Library, Boston, 2000.
5. Landex, A., Kaas, A. H., and Hansen, S., *Railway Operation. Publication REPORT 2006-4*,

- Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark, Denmark, 2006.
6. Sone, S., "Novel Train Stopping Patterns for High-Frequency, High-Speed Train Scheduling", *Computers in Railways III Technology*, Vol. 2, 1992, pp. 107-118.
 7. Eisele, D. O., "Application of Zone Theory to a Suburban Rail Transit Network", *Traffic Quarterly*, Vol. 22, 1968, pp. 49-67.
 8. Deng, L. B., Shi, F. W., and Zhou, L., "Stop Schedule Optimum of Passenger Train Plan, Sciencepaper Online", www.paper.edu.cn, 2008.
 9. Jong, J. C., Suen, C. S., and Chang, S. K., "A Decision Support System to Optimize Railway Stopping Patterns: Application to the Taiwan High Speed Rail", Proceedings of the 91st Annual Meeting of Transportation Research Board, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012, pp. 24-33.
 10. Hung, C. Y., "Train Plan Model for Taiwan High Speed Rail", Master Dissertation, National Cheng Kung University, R.O.C. (Taiwan), 1998.
 11. Chen, Y. Y., "Integration of High Speed Rail System Scheduling and Train Seats Allocation", Master Dissertation, National Taiwan University, R.O.C. (Taiwan), 1998.
 12. Jong, J. C. and Suen, C. S., "A Train Service Planning Model with Dynamic Demand for Intercity Railway Systems", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, 2007, pp. 1598-1613.
 13. Jong, J. C. and Suen, C. S., "Optimizing Train Service Plan for Intercity Railways", Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research, cd-rom, WCRR, 2008.
 14. Hsieh, W. J., "Service Design Model of Passenger Railway with Elastic Train Demand", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, 2003, pp. 307-322.
 15. Lee, C. K. and Hsieh, W. J., "A Bi-level Programming Model for Planning High Speed Rail Service", *Transportation Planning Journal*, Vol. 31, No.1, 2002, pp. 95-119.
 16. Albrecht, A. R. and Howlett, P. G., "Application of Origin-Destination Matrices to the Design of Train Services", *Australasian Journal of Engineering Education*, Vol. 15, No. 2, 2009, pp. 95-104.
 17. Chang, Y. H., Yeh, C. H., and Shen, C. C., "A Multiobjective Model for Passenger Train Services Planning: Application to Taiwan's High-Speed Rail Line", *Transportation Research Part B*, Vol. 34, 2000, pp. 91-106.
 18. Ulusoy, Y. Y., Chien, I. J., and Wei, C. H., "Optimal All-Stop, Short-Turn, and Express Transit Service under Heterogeneous Demand", *Transportation Research Record*, No. 2197, 2010, pp. 8-18.
 19. Rardin, L. R., *Optimization in Operations Research*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.

附錄 1 列車停站計畫模式符號說明

變數	說 明	單位
n	車站數	個
m	停站型態數量， $m = 2^{(n-2)}$	個
r	欲選取/提供之總停站型態數量	個
D_{ij}	運量需求預測中，從車站 i 至車站 j 的旅客需求	人
t_{ijk}	停站型態 k ，從車站 i 至車站 j 的旅行時間	分鐘
z_{ijk}	若停站型態 k 被選取，且從車站 i 至車站 j 為最短旅行時間者，則 $z_{ijk} = 1$ ；反之則 $z_{ijk} = 0$	—
H_k	若停站型態 被選來營運服務，則 $H_k = 1$ ；反之則 $H_k = 0$	—

附錄 2 列車服務計畫模式符號說明

變數	說 明	單位
f_k^t	t 時段第 k 種停站型態的發車頻率	班次/小時
S_k^t	t 時段第 k 種停站型態列車服務的旅客數	人/小時
S_{ij}^t	t 時段從車站 i 至車站 j 被服務的旅客數	人/小時
S_{ij}	所有從車站 i 至車站 j 被服務的旅客數	人
S_{ijk}^t	t 時段從車站 i 至車站 j 被停站型態 k 服務的旅客	人/小時
L_{kmn}^t	t 時段停站型態 k 在路段 (m,n) 的載運旅客數	人/小時
E_{kmn}^t	t 時段停站型態 k 在路段 (m,n) 的空餘座位數	座位/小時
G_{ij}^t	考量時空遞移下， t 時段從車站 i 至車站 j 的旅客需求	人/小時
G_{ij}	考量時空遞移下，所有從車站 i 至車站 j 的旅客需求	人
A	相鄰車站之間的路段所形成的集合	—
K	列車營運模式所形成的集合	—
N	車站所形成的集合	—
T	所有時段所形成之集合	—
a_{ijk}	若停站型態 k 之列車能服務從車站 i 至車站 j 的旅客需求，則 $a_{ijk} = 1$ ；反之則 $a_{ijk} = 0$	—
b_{ijmn}	若車站 i 至車站 j 經過路段 (m,n) ，則 $b_{ijmn} = 1$ ；反之則 $b_{ijmn} = 0$	—
c_{kmn}	停站型態 k 列車經過路段 (m,n) ，則 $c_{kmn} = 1$ ；反之則 $c_{kmn} = 0$	—
C_K	停站型態 k 列車的單趟營運維修成本	元/列車

附錄 2 列車服務計畫模式符號說明（續）

變數	說 明	單位
C_{mn}	路段 (m, n) 的容量	列車/小時
C_T	列車容量（座位與立位）	載人數/列車
C_S	列車座位容量	座位/列車
d_{ij}	從車站 i 至車站 j 的旅行距離	公里
d_k	停站型態 k 全程的服務里程	公里
f_{km}	停站型態 k 的最低服務頻率	班次/小時
l_{ij}	從車站 i 至車站 j 的最低服務比率， $l_{ij} \leq 1$	—
M	單向運能限制之座位公里數	座位公里
N_T	每小時單向可供營運列車組數	班次/小時
P_{ij}	從車站 i 至車站 j 的平均票價	元/人
t_{ijk}	停站型態 k ，從車站 i 至車站 j 的旅行時間	分鐘
v	時間價值	元/人/分鐘
α	最高乘載水準	—
β	未服務旅客轉移比例	—
ϖ	旅客時間價值相對於鐵路業者營運利潤的權重值	—
γ^t	時段 t 相對於 1 小時之比例	—

灰色多目標計畫組合模式於運輸計畫 規劃之研究

PROJECT PORTFOLIO SELECTION FOR TRANSPORTATION PROGRAMMING USING GREY MULTIOBJECTIVE PROGRAMMING

溫裕弘 Yuh-Horng Wen¹

牛紀芸 Ji-Yun Niou²

(101 年 1 月 2 日收稿，101 年 7 月 6 日第一次修改，
101 年 11 月 14 日第二次修改，102 年 3 月 30 日定稿)

摘 要

運輸計畫規劃 (transportation programming) 是運輸部門進行運輸計畫選擇之過程，包括計畫評估、選擇、排程與預算組合，以決策核定之運輸計畫集合。過去相關運輸計畫規劃問題較無計畫組合與綜效之考量，因此，導入計畫組合管理概念，考慮計畫組合之利益、成本與風險，建構計畫組合規劃模式，進行最適計畫組合方案之選擇，即成為重要之研究議題。本研究計畫組合規劃模式以計畫組合為決策對象，有別於過去計畫規劃問題以個別計畫為規劃對象，並考慮計畫組合之利益、風險及預算之不確定性，建構灰色多目標 0-1 整數規劃問題，並應用灰色理想解相似度順序偏好法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 求解多目標計畫組合規劃模式之妥協解。本研究以行政院公共工程委員會之大型

-
1. 淡江大學運輸管理學系助理教授 (聯絡地址：251 新北市淡水區英專路 151 號淡江大學運輸管理學系；電話：02-26215656 ext. 3387；E-mail: yhwen@mail.tku.edu.tw)。
 2. 淡江大學運輸管理系運輸科學碩士班碩士。

運輸建設計畫，作為實務數值範例應用問題之假設基礎，透過數值範例應用分析，驗證本研究模式之可行性。藉由不同目標式權重組合下，計畫組合規劃妥協解決策空間可顯示兩目標之間的權衡取捨率。而計畫組合規劃模式係以計畫組合為決策對象，可作為以計畫組合管理進行運輸計畫規劃模式之基礎；整合灰數於規劃模式中，即允許利益、風險及預算輸入值為大概範圍之區間值，有助於規劃者面對並處理不明確規劃條件下，維持規劃結果之變動決策彈性。

關鍵詞：運輸計畫規劃；計畫組合模式；灰色多目標規劃；灰數

ABSTRACT

Transportation programming is the process of selecting and determining a final set of transportation projects, including project evaluation, selection, scheduling and budget portfolio management. Since conventional transportation programming models lacked the consideration for project portfolios and synthetic effects, such important research topics arise as the introduction of a project portfolio management concept, the consideration for benefits, costs and risks of the project portfolios, the establishment of a project portfolio programming model, and the selection of optimum project portfolio solutions. This study developed a project portfolio programming model with project portfolios as the target for decision making rather than individual projects in the previous programming models. Since the programming tasks are filled with uncertainties in terms of benefits, risks and budgets of project portfolios, grey multiobjective 0-1 integer programming problems were designed. Additionally, a grey Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) approach was developed to solve the proposed model. With the large-scale transportation development projects of the Public Construction Commission, Executive Yuan, as the assumption basis of numerical examples and applications, the analysis confirmed the feasibility of the proposed model. The trade-off ratios between two goals were shown using different goal weight combinations for negotiations and decision making in regard to project portfolio programming. The proposed model uses project portfolios as the target for decision making, and can therefore set up a foundation for transportation programming models using a project portfolio management approach. The incorporation of grey numbers in the programming model allows possible ranges for the input values of benefits, risks and budgets, which helps to maintain the flexibility in decision making when planners are faced with and dealing with indefinite conditions for programming.

Key Words: *Transportation programming; Project portfolio selection; Grey multi- objective programming; Grey numbers*

一、前言

運輸計畫規劃 (transportation programming) 是運輸部門進行運輸計畫選擇之過程，包括計畫評估、選擇、排程與預算組合，以決策核定之運輸計畫集合^[1]。運輸計畫規劃常面臨須結合多個不同的目標和計畫之間關係複雜，以及預算相互競爭而增加了問題難度^[1,2]。近年來政府財政相當困窘，在資源有限的情況下，如何妥善分配預算以達成目標，成為一重要之規劃課題。運輸計畫多為國家級、區域性之中、長期 (10 ~ 30 年) 運輸發展與基礎建設開發投資計畫，其涵蓋多階段規劃期程，並由許多子項計畫所組成，規劃時間長、具有投資成本大、影響範圍廣以及高度不確定性之特性^[3,4]；由於運輸計畫規劃與執行時程長，使得許多不確定性風險增加，可能會造成工程成本增加、建設時間延長等，使得整體計畫成本不易掌控。計畫利益通常也難以具體估計，不同類型計畫也會有不同特性與利益，使得各項方案相互間難以取決。運輸計畫規劃問題屬於中長期決策，運輸部門在預算限制下，只能優先滿足目標之計畫，但計畫間通常在資源與財務上相互衝突^[5]。

計畫組合選擇 (project portfolio selection) 問題源自於 Markowitz^[6-8]，最初主要探討財務金融投資組合問題，並以均值－變異模式 (mean-variance model) 為方法論基礎，將機率性 (probability) 整合於最佳化模式中，以模式化不確定性環境中之投資理財行為。計畫組合選擇問題在理財投資組合、研發 (R&D) 計畫組合選擇之應用已有相當豐富之文獻，包括：以均值－變異為基礎之投資組合選擇問題^[9-13]、以模糊不確定性之計畫組合問題^[14-18]、產品及研發組合選擇問題^[19-22]；惟計畫組合選擇應用於運輸計畫規劃問題，尚較闕如^[23]。Markowitz^[6-8] 計畫組合選擇問題建構為二次規劃 (quadratic programming) 模式，屬於 NP-hard 問題，求解非常困難^[9-13]。Young^[10] 運用 minimax 概念，將投資標的之報酬水準服從常態分配下，建構線性規劃來近似 Markowitz^[6-8] 二次規劃解。而 Cooper 等人^[19] 與 Beaujon 等人^[20] 則建構背包問題 (knapsack problem) 基礎之計畫組合整數規劃模式，並考慮計畫之均值－變異準則 (mean-variance criterion) 作為組合選擇之目標式。然而，前述研究主要以機率性方法 (probabilistic approaches) 描述市場環境之不確定性，對於非機率性因素 (non-probabilistic factors) 之不確定性問題則有不足。晚近許多研究^[14-18] 發展模糊組合選擇問題，即以模糊可能性 (possibility) 來探討包含隨機、非隨機因素之不確定性環境下的組合選擇問題。再加上組合選擇問題，本質上即是多目標問題 (追求報酬最大、風險最低)，故這類研究多採模糊多準則決策方法，如：Arenas 等人^[14] 運用模糊目標規劃法 (fuzzy goal programming) 求解考慮報酬、風險、流動性 (liquidity) 之投資組合選擇問題；Ida^[15] 則將目標函數係數以區間值與模糊數來描述不確定性，並建構多目標組合選擇規劃問題；而 Abiyev 與 Menekay^[16] 運用模糊邏輯 (fuzzy logic) 來估計期望報酬與風險，並透過基因演算法求解模糊組合選擇問題；Sadi-Nezhad 等人^[24] 建構模糊 0-1 背包問題來求解投資計畫組合問題，但該模式仍以個別投資計畫為決策對象，而未考慮組合後之風險

變異與綜效。而 Ong 等人^[18]則改良均值－變異模式並提出一演算法，在最大利益與最小風險下建立股票投資組合架構，利用灰色預測模式，預測未來投資方案風險值與報酬率考量個別計畫風險值（不確定性），成本與效益估計採用確定性數值。Carlsson 等人^[21]則將未來現金流以模糊可能性來估計，建構一研發計畫選擇評價模式，進行研發計畫組合選擇。Inuiguchi 與 Ramik^[25]則比較分析模糊規劃（fuzzy programming）與隨機規劃（stochastic programming）之差異、應用於計畫組合選擇問題之優缺點與問題特性。歸納之，計畫組合選擇問題的關鍵即在於計畫在組合決策時，針對計畫與計畫間的變異不確定性及報酬（效益）與成本不確定性之處理，而發展以機率性與模糊可能性兩類處理方式。

在運輸計畫規劃上，多重計畫組合的規劃管理遠較個別計畫選擇問題複雜，運輸建設計畫之間常有相關性，所涉及之經濟與社會利益、成本與風險，應以計畫組合管理（project portfolio management, PPM）的概念作全盤考量，才較能以宏觀角度做完善的規劃。然在運輸計畫規劃階段，計畫間尚未定義優先順序，只能初步篩選出必要執行之計畫，計畫與計畫之間關係亦不明確，如何選擇最適之運輸計畫投資組合，便成為重要之研究課題。過去相關運輸計畫規劃問題^[1, 26, 27]多僅針對個別計畫方案進行評估、選擇與規劃，並無計畫組合與綜效（synergy）之考量。且相關研究^[23, 26-29]模式考慮成本、利益與部門預算限制，應用背包問題找出利益最高的最佳化方案。晚近研究，Stankeviciene 與 Jachimaviciene^[23]與 Zhong 與 Young^[27]於模式中開始加入計畫組合之概念，但其模式仍是以個別計畫作為決策對象，且假設主計畫與子計畫間關係已知（即組合已知）、計畫之成本與利益均為確定性數值；而於計畫風險處理上，則在計畫選擇初期由決策者依照建設類別設定個別計畫的風險程度，並由決策者設定可接受的總風險值限制式。綜上，運輸計畫選擇文獻仍以確定性模式、考慮個別計畫為主；僅 Teng 與 Tzeng^[3,4]一系列研究考慮運輸投資計畫間相依性，並考慮計畫目標達成度與資源利用率之不確定性的模糊數，建立模糊多目標 0-1 整數規劃，來求解相依計畫之運輸投資計畫選擇。綜整而言，導入計畫組合管理概念，建構運輸計畫組合選擇規劃模式，可同時考慮多重運輸計畫組合下所衍生之綜效及衡量運輸計畫組合之利益與風險，以進行最適運輸計畫組合方案選擇，以滿足計畫組合決策目標，即成為運輸計畫規劃值得研究的議題。再者，運輸計畫規劃須考慮成本、利益及風險之不確定性，且運輸計畫評估須面臨過去相關或可取得的數值資料稀少性。運輸計畫在規劃階段，對於預算、成本、利益等評估值，及執行期限之控制，往往僅能掌握於一幅值範圍，無法取得精確的數值；計畫間相互關係與交互作用亦不明確，衍生之綜效利益、共同成本更甚難評估。而且，此階段的規劃結果，通常會預留彈性，以因應未來難以掌握之發展情境與風險，如：樂觀、悲觀之發展情境，供給需求預測之上限、下限範圍。因此，如何在不確定性、資訊不明確之決策環境下，處理運輸計畫組合決策規劃問題，具有很大大之研究空間。

如前文獻回顧所述，處理計畫組合選擇之不確定性問題常用隨機規劃或模糊規劃方法，但此兩類規劃方法仍須分別針對目標式、限制式之係數資訊、參數發生或目標達成、限制範圍，確認其機率分配（probability distribution）或可能性分配（possibility distribution）。然而，在實務規劃上，定義出參數之機率分配或可能性分配常有困難，且易受質疑。

因此，在資訊不明確之決策環境下，難以隨機性或可能性進行分析處理時，可應用灰色區間數之觀念，建構灰色規劃 (grey programming) 模式^[30-32]。綜整文獻^[25, 33, 34]，針對隨機規劃、模糊規劃與灰色規劃於計畫組合選擇問題之適用條件及優缺點比較，列於表 1。隨機規劃適用於問題中之隨機變數服從多變量常態分配 (multivariate normal distribution)；倘隨機變數服從其他一般分配 (general distribution) 時，隨機規劃便難以求解。而模糊規劃則較隨機規劃容易求解，模糊規劃可處理模糊係數與軟限制式 (soft constraints)，且變數之可能性分配可設為任何單峰分配 (unimodal distribution)^[25]。然而，模糊規劃仍須假設不確定變數之間相互獨立，惟模糊可能性規劃問題可等同於具未知相關係數之隨機規劃問題^[25]。有別於隨機規劃以隨機變數與機率分配，模糊規劃以模糊數與可能性分配來處理不確定性問題，灰色規劃則以灰數 (grey numbers) 來處理資訊不完全下之數值不確定性與變數關係不明確之問題。灰數代表僅能掌握一區間範圍之資訊或參數不確定性，不須定義特定之機率分配或可能性分配^[33-35]、亦不須假設不確定變數之間獨立性或相關係數，正符合實務上運輸計畫規劃之決策不確定性環境。因此，本研究嘗試建構一以灰色多目標規劃為基礎之運輸計畫組合選擇模式，作為決策者在選擇運輸計畫組合方案之決策參考。

本研究以計畫組合管理概念為模式之框架，建立運輸計畫組合選擇問題，有別於過去運輸計畫規劃問題^[1, 23, 26-29]以個別計畫為規劃對象，本研究計畫組合規劃模式係以計畫組合為決策對象，再針對運輸計畫在成本、利益與預算評估、及計畫完成期限之變異的不確定性，運用灰數與多目標 0-1 整數規劃模式進行運輸計畫最適組合之最佳化決策規劃。本研究模式同時考慮計畫組合與組合選擇問題，並加入利益、成本、預算及執行年限之區間灰數不確定性，並發展可行之求解程序，具有模式問題發展之創新性。模式中輸入參數與目標式，而輸出結果為灰數，滿足運輸計畫規劃決策時面臨之資訊不明確與規劃彈性之問題特性，透過計畫組合規劃求解，期給予決策者具有彈性的計畫組合決策參考。本文結構如下：第二節說明計畫組合於運輸計畫規劃模式之構建，第三節說明求解方法，第四節進行應用數值範例分析，最後於第五節彙整結論與建議。

二、模式建構

本研究建構灰色多目標 0-1 整數規劃為基礎之計畫組合選擇模式，進行運輸計畫規劃。本節說明運輸計畫組合選擇變數、利益、成本與風險函數建立，及組合選擇 0-1 整數規劃模式之建構。

2.1 成本與利益函數

令計畫規劃對象之運輸計畫個別計畫為 $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ ，令這些運輸計畫方案 A_i 均為通過初步可行性評估（如：市場、技術、經濟、財務、政治、環境、管理可行性）之篩選所挑選出具可行性之計畫方案，令運輸計畫方案集合為 A ，如下：

表 1 隨機規劃、模糊規劃與灰色規劃於組合選擇問題之比較

比較項目 \ 規劃模式		隨機規劃	模糊規劃	灰色規劃
問題特性	不確定性	大樣本不確定性	認知不確定性： 數 值 模 糊 不 明 確 (vagueness) 限 制、目 標 不 明 確 (ambiguity)	不完全資訊下之 小樣本不確定性： 數值因素不明確、 關係不完全清楚
	不確定變數	隨機變數 (random variables)	模糊數 (fuzzy numbers)	灰數 (grey numbers)
	分配要求	機率性分配 (多變量常態分配 或典型機率分配)	可能性分配 (任何單峰分配)	允許任意分配
	規劃模式型態	<ul style="list-style-type: none"> － 機 率 分 配 問 題 (distribution problem) － 二階段、多階段隨機 規劃具修正依賴函 數 問 題 (recourse problem) － 機 率 限 制 式 問 題 (chance constraints) 	<ul style="list-style-type: none"> － 模 糊 目 標 係 數 問 題、模糊目標規劃 － 模糊限制式問題 － 混合模糊目標係數 與限制式問題 － 模糊關係方程 	<ul style="list-style-type: none"> － 灰色區間目標係數 問題 － 灰色限制式問題 － 混合灰色區間目標 係數與灰色限制式 問題 － 混合灰色規劃與模 糊規劃問題
優點 (適用性)		<ul style="list-style-type: none"> － 適用於大樣本數 據，能確認具統計機 率分配 － 變數服從常態分配 時，易求解 	<ul style="list-style-type: none"> － 可處理非隨機性因 素與模糊決策 － 適用彈性規劃與軟 限制式問題 － 可能性分配可設為 任何單峰分配 － 較 隨 機 規 劃 易 求 解、且求解結果可有 效處理風險集中策 略 	<ul style="list-style-type: none"> － 適用資訊不完全，數 據不足僅能掌握參 數區間範圍而無法 確認範圍內之分配 － 不須設定機率分配 或可能性分配 － 不須假設變數間獨 立或相關係數
缺點		<ul style="list-style-type: none"> － 未考慮其他非機率 性不確定因素 － 問題複雜度高，求解 困難 － 變 數 若 為 一 般 分 配，更難以求解 － 實務規劃上針對財 務、風險、計畫值定 義機率分配函數常 有困難 	<ul style="list-style-type: none"> － 假設不確定變數間 相互獨立 － 實務規劃上針對財 務、風險、計畫值定 義可能性分配函數 常有困難 	<ul style="list-style-type: none"> － 針對較細部計畫規 劃問題將使問題複 雜度增加，求解困難 － 若數據樣本足夠、能 確認不確定變數之 機率性或可能性，則 可應用隨機規劃或 模糊規劃，或混合模 式

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

令運輸計畫組合方案為 $P_k, k = 1, 2, \dots, m$ ，即每個計畫組合方案為單一計畫或兩個以上計畫之組合，如下式：

$$P_k = \{A_i \mid x_i^k = 1\} \quad (2)$$

其中， $x_i^k = \{0, 1\}$ 為單一計畫 A_i 選入計畫組合方案 P_k 之 0-1 決策變數， $x_i^k = 1$ 表 A_i 被選入 P_k 中，屬於計畫組合方案 P_k 內。

本研究之計畫組合規劃，有別於過去相關運輸計畫規劃問題^[1, 23, 26-29]以個別計畫方案為決策對象，而是以計畫組合方案 P_k 為決策對象，決策變數為 $x_k = \{0, 1\}$ ，規劃時，當 $x_k = 1$ ，代表計畫組合方案 P_k 被選入最適組合中。由於本研究問題須同時求解計畫組合與組合選擇，亦即，在規劃模式中計畫之選擇決策將變為 $x_i^k x_k$ ，惟由於 x_i^k 與 x_k 均為 0-1 決策變數，若同時求解 $x_i^k x_k$ ，最多將有 2^{n+m} 次運算，且組合數 m 的大小又受計畫數 n 之影響（ m 最多為 $2^n - 1$ ）；若問題規模大時，將使問題成為組合最佳化之複雜問題，造成求解困難。因此，本研究規劃模式之 0-1 決策變數分為兩階段求解，第一階段在規劃模式中須決定個別計畫 A_i 歸屬於計畫組合 P_k ，即決策變數 x_i^k ；決定出所有計畫組合方案 P_k 後，再代回數學規劃模式，求解最佳之計畫組合，即決策變數 x_k 。

針對個別計畫，須進行成本與利益之評估，令個別計畫 A_i 之總成本與總利益分別為 $TC(A_i)$ 與 $TU(A_i)$ 。在評估運輸計畫之成本時，首先要設定評估期間，評估期間的長度通常是按照交通基礎建設的預期生命週期 (life cycle) 來設定。在規劃設計階段，成本項目包含規劃成本；在施工階段，則包含建設成本及土地取得與建物拆遷成本；在營運階段，包含營運操作成本、維護成本及重置成本；而結束階段，則包含場地重建成本及清運成本。各階段成本再透過折現率與現值因子函數，推算計畫成本現值 (present worth)。計畫之經濟利益係指運輸計畫對整體社會所創造出來的福利 (welfare)，這些福利可換算為貨幣化單位，利益的貨幣化評估通常是透過消費者效用水準 (utility) 或消費者剩餘 (consumer surplus) 的變化來衡量；在評估計畫之使用者利益時，主要估算之項目為：旅行時間節省與旅行成本節省。同樣，針對個別計畫發生在不同時點之利益，亦透過折現率與現值因子函數，推算計畫成本現值。

為簡化分析，本研究假設未考慮計畫組合中個別計畫之共同成本及其成本折減之效果，僅考慮計畫組合所帶來之利益加成效果。因此，針對計畫組合方案 P_k ，其總成本可表示為：

$$TC(P_k) = \sum_i TC(A_i) x_i^k \quad (3)$$

針對計畫組合方案 P_k ，其總利益函數可表示為：

$$TU(P_k) = (1 + \gamma_k) \sum_i TU(A_i) x_i^k \quad (4)$$

其中， γ_k 代表計畫組合 P_k 中之計畫 A_i 間的利益加成效果， $0 \leq \gamma_k \leq 1$ ，假設 γ_k 係由決策者針對每個計畫組合方案 P_k 評估設定。實務上，針對計畫組合方案 P_k 可重新進行整體利益評估，考慮運輸計畫組合將可能形成完整路網及系統，其將帶來較大的使用者旅行時間／成本之節省，及所衍生之消費者剩餘增加的利益、抑或整體系統建設將可能節省部分共同成本而具有資本成本節省之利益。評估這些組合後的計畫組合方案總利益增加效益，可依評估組合方案之益本比反推組合利益加成效果 γ_k 。

2.2 灰色數與風險函數

在進行運輸計畫評估時，常面臨過去相關或可取得的數值資料不明確，且運輸計畫在規劃階段，針對計畫之成本、利益、預算及執行年限資料，因應未來不明確之發展情境與風險，往往僅能掌握於一幅值範圍，如樂觀、悲觀情境或上限、下限預測值，無法取得精確的數值。再者，在計畫組合管理上，計畫間相互關係與交互作用亦不明確，衍生之綜效利益、共同成本更甚難評估。由於評估數值的不確定性，Sharpe 等人 [36] 建議應採用區間數值進行評估。因此本研究針對計畫之成本、利益、預算及執行年限變異數皆利用灰數作為評估。灰數代表一個資訊不完全、不確定的數，可用一區間範圍來表示 [33-35, 37, 38]，定義為：

$$\otimes x = [\underline{\otimes} x, \overline{\otimes} x] = \{x' \in x \mid \underline{\otimes} x \leq x' \leq \overline{\otimes} x\} \quad (5)$$

其中， $\underline{\otimes} x$ 與 $\overline{\otimes} x$ 分別代表灰數的下界 (lower bound) 與上界 (upper bound)。而灰數之區間中存在有一白化值 (whitening value) $\tilde{\otimes} x$ ，白化值代表一明確數值，灰數轉換 (grey transformation) 即為於灰數中取得一個確定值 [33-35]，定義為：

$$\tilde{\otimes} x = x', \quad x' \in [\underline{\otimes} x, \overline{\otimes} x], \quad \forall \tilde{\otimes} x \in \otimes x \quad (6)$$

白化權函數 (whitening function) 則為不同白化值於該灰數之權重函數，白化權值介於 [0, 1]，常用之白化權函數通常以線性函數定義。

在個別計畫之成本與利益估計上，常隨著計畫特性、規劃時點、甚至調查、分析方法不同而有所差異，成本與利益估計值並非確定值，即宜採用灰數來處理。在計畫評估時，單一折現率無法完全符合實際狀態，實務上，折現率會因不同時期的經濟狀況不同而有所不同。而在考慮計畫成本項目為分年編列情況之下，計畫總成本現值受折現率影響；且考慮成本預估之不確定性，個別計畫總成本預估值宜以灰數呈現較為合理。個別計畫總成本函數之區間灰數，設為 $\otimes TC(A_i)$ 。再者，亦考慮計畫利益估計之不確定性，將個別計畫之總利益亦轉換為一區間灰數，設為 $\otimes TU(A_i)$ 。

運輸計畫不若一般投資計畫僅考慮投資風險最小下追求報酬最大，而須廣泛考慮計畫之經濟利益與成本。而運輸計畫在風險控管上，最重要即是計畫全生命週期管理 (life-cycle assessment)，計畫期程之風險控管可減少計畫延期及經費增加發生之機率。本研究引申 Markowitz^[6-8] 投資計畫組合問題之概念，並定義運輸計畫風險來自於計畫執行年限之變異 (如計畫延後)，並考量計畫組合內之個別計畫間之相互影響，使得計畫組合執行年限將可能產生共變異之變化。個別計畫在規劃初期均會設定計畫之執行年期，但實際執行之年期常常會隨時空情境與執行條件之不同而改變，使得計畫執行年期可能提早或延遲，進而影響計畫之成本與利益，形成計畫執行之不確定風險。再者，決策者對於計畫執行年期往往僅能掌握於一幅值範圍，故以區間灰數估計計畫執行年期變異。而計畫組合方案之執行年期，由於牽涉到多個計畫之執行，其不確定程度更難以估計，故以計畫組合角度須重新估計計畫組合之執行年期，並設定計畫組合執行年期之區間灰數，由計畫組合執行年期之變異作為計畫組合方案之風險函數。

令 y_k 為計畫組合方案 P_k 之估計執行年期，而 $\otimes y_k$ 為計畫組合方案 P_k 執行年期之灰色區間， $\otimes y_k = [\underline{\otimes y_k}, \overline{\otimes y_k}]$ ，其中， $\underline{\otimes y_k}$ 與 $\overline{\otimes y_k}$ 分別代表計畫組合方案執行年期之下界與上界。參考 Ong 等人^[18] 對計畫組合之不確定風險函數建立，本研究計畫組合方案 P_k 執行年期之風險函數 $R(P_k)$ 可列式為：

$$R(P_k) = \frac{\overline{\otimes y_k} - \underline{\otimes y_k}}{y_k} \quad (7)$$

2.3 規劃模式

本研究運輸計畫組合模式之目標式設定為：最大化總淨現值目標、最小化總風險值目標，分別列式如下：

$$\text{Max } Z_1 = \sum_k [TU(P_k) - TC(P_k)] x_k \quad (8)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_k R(P_k) x_k \quad (9)$$

在預算限制考量下，計畫組合之總成本必須小於決策單位之總預算限制，參考行政院公共工程委員會^[39] 之年度預算執行率，各單位之預算執行率期望大於 90%，以避免無效的決策結果，因此本研究參考此限制，限制式表示如下：

$$\sum_k TC(P_k) x_k \leq TB \quad (10)$$

$$\sum_k TC(P_k) x_k \geq 0.9TB \quad (11)$$

其中， TB 為總預算值。

再者，本研究考慮在最終計畫組合結果時，每個個別單一計畫方案僅會屬於一計畫組合（即一個別計畫不會同時納入不同組合中），因此，須加上一限制式。亦即，當一特定計畫組合 P_k 被選入最佳計畫組合時，即 $x_k = 1$ ，其所包含的個別計畫 $\{A_i, x_i^k = 1\}$ ，即不能再被選入其他最終計畫組合中。此限制式如下：

$$\sum_k x_i^k = 1, \forall i \quad (12)$$

而最終規劃結果亦須限制至少有一計畫組合被選取，即：

$$\sum_k x_k \geq 1 \quad (13)$$

多目標計畫組合規劃之數學規劃模式，表示如下：

$$\text{Max } Z_1 = \sum_k [TU(P_k) - TC(P_k)] x_k \quad (14a)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_k R(P_k) x_k \quad (14b)$$

s.t.

$$\sum_k TC(P_k) x_k \leq TB \quad (14c)$$

$$\sum_k TC(P_k) x_k \geq 0.9TB \quad (14d)$$

$$P_k = \{A_i \mid x_i^k = 1\} \quad (14e)$$

$$\sum_k x_i^k = 1, \forall i \quad (14f)$$

$$\sum_k x_k \geq 1 \quad (14g)$$

$$x_i^k = \{0, 1\}, x_k = \{0, 1\}, \forall i, k \quad (14h)$$

其中，式(14a)、(14b)為兩目標式，式(14c)–(14h)為限制式。式(14c)與(14d)為預算限制，式(14e)為計畫組合定義式，式(14f)表示最適規劃下個別計畫僅能歸屬於一計畫組合中，不能重複選入不同組合，式(14g)則限制至少有一計畫組合被選取，式(14h)表決策變數 x_i^k 與 x_k 為 $\{0, 1\}$ 整數。

由於計畫成本與利益及計畫執行年期之不確定性而設為灰數，在運輸計畫規劃階段，決策者對於總預算數之估計，亦往往僅能掌握於一幅值範圍，故預算值亦宜設為灰數作為限制式。因此，本研究數學規劃式中，目標式係數及預算式均以灰化處理，導致決策變數將會在輸入值之上、下界與原始預估值變動下而變動，模式輸出決策變數之變動，則將提供規劃決策者更具彈性之決策資訊。

將基本列式 (式(14a)–(14h)) 與灰數相整合後，建構本研究之灰色多目標計畫組合規劃模式，如 [P1] 所示：

[P1]

$$\text{Max } \otimes Z_1 = \sum_k [\otimes TU(P_k) - \otimes TC(P_k)] x_k \quad (15a)$$

$$\text{Min } \otimes Z_2 = \sum_k \otimes R(P_k) x_k \quad (15b)$$

s.t.

$$\sum_k \otimes TC(P_k) x_k \leq \otimes TB \quad (15c)$$

$$\sum_k \otimes TC(P_k) x_k \geq 0.9 \otimes TB \quad (15d)$$

$$P_k = \{ A_i \mid x_i^k = 1 \} \quad (15e)$$

$$\sum_k x_i^k = 1, \forall i \quad (15f)$$

$$\sum_k x_k \geq 1 \quad (15g)$$

$$x_i^k = \{0, 1\}, x_k = \{0, 1\}, \forall i, k \quad (15h)$$

三、求解方法

進一步，本研究提出運輸計畫組合規劃問題之求解方法，發展一兩階段求解程序，在決策變數之處理上，第一階段先處理計畫組合決策變數，先決定組合方案；第二階段再以計畫組合方案為規劃對象，進行灰色多目標 0-1 整數規劃之求解。而在灰色多目標規劃模式之求解，本研究參引林楨家與李家儂^[30]、林楨家與沈育生^[31]、Lin 與 Li^[32] 系列研究所提出之灰色 TOPSIS 求解法進行求解。此兩階段求解方法，分別以下列兩小節說明如下。

3.1 決策變數處理與組合方案

本研究規劃問題必須同時求解決策變數 x_i^k 與 x_k ，在規劃模式中計畫之選擇決策變數將變為 $x_i^k x_k$ ，將使問題成為組合最佳化之複雜問題，增加複雜度而求解困難。因此，本研究在求解上，針對於決策變數先做兩階段處理，第一階段先決定組合方案，第二階段再以組合方案為規劃對象進行組合方案之最適選擇。

在第一階段處理上，透過先分群再窮舉的方式，找出所有可能的計畫組合方案。假設決策者能先初步決定幾個計畫組合分群，再針對每個計畫組合分群，進行所有可能組合方案之窮舉，即先求解 x_i^k ，將決策對象轉為計畫組合方案；再針對所有計畫組合方案，代回規劃模式，決策變數簡化為 x_k ，以進行模式求解。惟當計畫個數為 n ，若未先分群，則所有可能之組合個數即為 $2^n - 1$ ；若 n 很大時，將使組合數過多而大幅增加問題求解複雜度。故先分群之目的，僅在於降低組合之求解複雜度；將 n 個計畫先分成若干個分群，每個分群內之計畫個數為 m ($m \ll n$)，則對每個分群再窮舉所有組合時，該分群之組合個數則可降為 $2^m - 1$ 。舉例而言，若原本個別計畫方案共 20 個，直接將這 20 個計畫進行所有可能的組合，則組合方案最多將有 $2^{20} - 1 = 1,048,575$ 個組合方案；若決策者初始可將 20 個計畫依據列管、執行單位、依據整體系統目標、計畫屬性，先將之分群，假設分為 4 個分群每個分群含 5 個計畫，則每個分群再窮舉所有組合方案，則所有可能組合方案將為 $4 \times (2^5 - 1) = 124$ 個組合方案，即可大幅降低問題求解複雜度。

實務上，在運輸計畫規劃階段，以整體系統規劃觀點與計畫組合管理之概念而言，決策者應可先依整體系統目標、計畫屬性，而將所有計畫先分成若干個分群。令初步計畫組合分群為 P_ℓ ，每個分群中包含不同個數之計畫，如 $P_\ell = \{A_1^\ell, A_2^\ell, \dots, A_{n'}^\ell\}$ ， $n' \leq n$ 。針對任一計畫組合分群 P_ℓ ，再依窮舉組合的方法，將 P_ℓ 再拆解為子集合： $P_{\ell-1}, P_{\ell-2}, \dots, P_{\ell-m'}$ ， m' 個計畫組合方案 ($m' = 2^{n'} - 1$)，這些計畫組合方案即包括單一個別計畫及兩個以上計畫組合方案；亦即，針對 P_ℓ 內之元素 $\{A_1^\ell, A_2^\ell, \dots, A_{n'}^\ell\}$ 依所有可能組合，可窮舉出 $C_1^{n'} + C_2^{n'} + \dots + C_{n'}^{n'} = m'$ 個計畫組合方案。

舉例說明，假設原始計畫方案集合為 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ ，決策者經評估與計畫組合管理概念，初步將計畫分為 2 個分群： $P_1 = \{A_1, A_3, A_4, A_5\}$ 以及 $P_2 = \{A_2\}$ 。再將計畫組合分群 P_1 ，依可能組合拆解為下列計畫組合方案：

$$\begin{aligned} C_1^4 &= \{A_1\}, \{A_3\}, \{A_4\}, \{A_5\} \\ C_2^4 &= \{A_1, A_3\}, \{A_1, A_4\}, \{A_1, A_5\}, \{A_3, A_4\}, \{A_3, A_5\}, \{A_4, A_5\} \\ C_3^4 &= \{A_1, A_3, A_4\}, \{A_1, A_3, A_5\}, \{A_1, A_4, A_5\}, \{A_3, A_4, A_5\} \\ C_4^4 &= \{A_1, A_3, A_4, A_5\} \\ P_{1-1} &= \{A_1\}, P_{1-2} = \{A_3\}, P_{1-3} = \{A_4\}, P_{1-4} = \{A_5\}, P_{1-5} = \{A_1, A_3\}, P_{1-6} = \{A_1, A_4\}, \\ P_{1-7} &= \{A_1, A_5\}, P_{1-8} = \{A_3, A_4\}, P_{1-9} = \{A_3, A_5\}, P_{1-10} = \{A_4, A_5\}, P_{1-11} = \{A_1, A_3, A_4\}, \\ P_{1-12} &= \{A_1, A_3, A_5\}, P_{1-13} = \{A_1, A_4, A_5\}, P_{1-14} = \{A_3, A_4, A_5\}, P_{1-15} = \{A_1, A_3, A_4, A_5\} \end{aligned}$$

以及 $P_2 = \{A_2\}$ 共計 16 個計畫組合方案，再針對此 16 個計畫組合方案進行計畫組合選擇之規劃求解。

針對原所有計畫進行初步分群，可運用一些分群理論方法，如： k -平均值分群法 (k-means clustering)、模糊分群法 (fuzzy clustering)、灰色聚類法 (grey clustering) 等，透過對個別計畫之屬性設定 (如計畫性質、目的、範圍、列管執行單位等)，協助決策者進行客觀分群。而分群數 (即分成幾群) 之設定，亦可依循所採用分群法對分群數之檢定而決定。

3.2 應用灰色 TOPSIS 法

理想解相似度順序偏好法 (TOPSIS) 為 Hwang 與 Yoon^[40] 所發展之多準則決策方法，其概念在於尋找距離正理想解 (positive ideal solution) 最近而離負理想解 (negative ideal solution) 最遠的解。Lai 等人^[41] 將 TOPSIS 應用於求解無偏好多目標規劃問題上，將多個目標式正規化建立距離正理想解與負理想解之距離函數，而求解距正理想解最近、離負理想解最遠之妥協解 (compromise solution)。而林楨家與李家儂^[30]、林楨家與沈育生^[31]、Lin 與 Li^[32] 系列研究則整合 TOPSIS 程序加入於灰色規劃求解方法，提出灰色 TOPSIS 法，以求解灰色多目標規劃之妥協解。本研究即應用灰色 TOPSIS 法來求解所提出之灰色多目標 0-1 整數規劃問題。

針對灰色規劃問題，依循 Huang 與 Moore^[37] 解法必須先分解成兩個子模式，其可分開求解，亦可以將兩個子模式合併一起求解，但必須加入上界決策變數大於下界決策變數之限制。以下則以分解成兩個子模式之方法，導入灰色整數規劃之求解。令原灰色多目標規劃模式 [P1] (式(15a)–(15h)) 以一般式表示如 [P2]，其中，原目標式 Z_2 為最小化，將 Z_2 乘上(-1) 轉換為最大化目標式。而 $f(X)$ 表可行解空間， $\otimes B$ 為預算限制。

$$\begin{aligned}
 & \text{[P2]} \\
 & \text{Max } \otimes Z_1, (-\otimes Z_2) \\
 & \text{s.t.} \\
 & f(X) \leq \otimes B \\
 & X \in \{0,1\}
 \end{aligned} \tag{16}$$

灰色整數規劃可依灰數之上、下界，拆解成為兩個子模式 [P2-1] 與 [P2-2]，其分別代表灰數上界模式與灰數下界模式。亦即，灰數上界子模式為所有灰係數與灰預算均以上界值代入；而灰數下界子模式，則係以灰下界值代入。

[P2-1]

$$\text{Max } \bar{\otimes} Z_1, (-\bar{\otimes} Z_2)$$

s.t.

$$\begin{aligned} f(X) &\leq \bar{\otimes} B \\ X &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (17)$$

[P2-2]

$$\text{Max } \underline{\otimes} Z_1, (-\underline{\otimes} Z_2)$$

s.t.

$$\begin{aligned} f(X) &\leq \underline{\otimes} B \\ X &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (18)$$

藉由[P2-1]，可求得最適解，目標式 Z_1 、 Z_2 之上界值記為 $\bar{\otimes} Z_1^*$ 、 $\bar{\otimes} Z_2^*$ ，及對應之決策變數 $\{\bar{\otimes} x_1^*, \bar{\otimes} x_2^*, \dots, \bar{\otimes} x_m^*\}$ 。由 [P2-2]，可求得最適解，目標式 Z_1 、 Z_2 之下界值記為 $\underline{\otimes} Z_1^*$ 、 $\underline{\otimes} Z_2^*$ ，及對應之決策變數 $\{\underline{\otimes} x_1^*, \underline{\otimes} x_2^*, \dots, \underline{\otimes} x_m^*\}$ 。

而在 TOPSIS 之正理想解與負理想解之求解上，先分別針對個別單一目標（即 $\max \otimes Z_1$ 與 $\min \otimes Z_2$ ）下，進行求解，並將個別單一目標下之最適解再代入另一個目標式中，即可建立一償付表 (payoff table)，表示如下：

$$\{(Z_1^{**}, Z_2^-), (Z_1^-, Z_2^{**}), (Z_1^{**}, Z_2^{**}), (Z_1^-, Z_2^-)\} \quad (19)$$

其中， Z_1^{**} 與 Z_2^{**} 分別為兩目標式在個別最佳化之目標式值，亦即， Z_1^{**} 為個別單一目標 $\max Z_1$ 下之目標式值， Z_2^{**} 為個別單一目標 $\min Z_2$ 下之目標式值。在償付表中， (Z_1^{**}, Z_2^{**}) 為正理想解，而 (Z_1^-, Z_2^-) 為負理想解。

應用灰色 TOPSIS 法，求解灰色多目標 0-1 整數規劃問題，求解步驟分述如下：

Step1：轉換多目標問題為單一目標問題

運用上述之灰色整數規劃求解方法，分別求解各目標對限制式之最佳解，以建立償付表，再從償付表中找出各目標的正理想解與負理想解，並藉由全域準則法，將多目標規劃問題轉換為單一目標規劃問題，同時輸入目標間的權重。內容分項說明如下：

1. 建立償付表

將前步驟所得各目標之最佳解灰色區間，代入其它項目標式，找出在達成該目標式最佳化的情況下，其他目標達成狀況。藉以求得達成各目標之正理想解灰色區間與負理想解灰色區間。

2. 利用全域準則法轉換為單目標灰色規劃問題

全域準則法 (global criterion method) 是利用權重與距正理想解之距離值作為基準，轉換多目標為單目標規劃問題，找出最適妥協解的多目標規劃求解方法。全域準則法是藉由償付表找出各目標的正、負理想解，進而利用其進行正規化。使多目標規劃問題轉變為，以目標與正理想解間差異最小化為目標之單目標規劃問題。

由償付表找出各目標式 (Z) 之正理想解 ($Z_1^{**}(\otimes x), Z_2^{**}(\otimes x)$) 與負理想解 ($Z_1^{-}(\otimes x), Z_2^{-}(\otimes x)$)。藉由兩目標式之權重 (w_1, w_2)，將兩目標式與其正理想解及負理想解之相對差距進行加權，成為單目標灰色規劃。轉換後之單目標模式如下所示：

$$\text{Min } \otimes Z = w_1 \left(\frac{Z_1^{**}(\otimes x) - Z_1(\otimes x)}{Z_1(\otimes x) - Z_1^{-}(\otimes x)} \right) - w_2 \left(\frac{Z_2^{**}(\otimes x) - Z_2(\otimes x)}{Z_2(\otimes x) - Z_2^{-}(\otimes x)} \right) \quad (20)$$

其中，目標式 Z_1 之權重為 w_1 、目標式 Z_2 之權重為 w_2 。

Step2：求解灰色單目標規劃問題

使用灰色整數規劃求解方法，加入 [P2-1] 及 [P2-2] 之限制條件後，求解新決策目標之灰色決策變數。

Step3：運輸計畫組合規劃解

綜合前述步驟之結果，求得模式決策變數為 $\otimes x = [\otimes x_1, \otimes x_2, \dots, \otimes x_m]$ ，其中 $\otimes x_k$ 代回原式重新計算目標值，此一結果即為運輸計畫組合規劃結果。

四、應用範例

為確認本研究模式之可行性，本研究針對一應用數值範例進行分析，並就部分參數進行敏感度分析。

4.1 範例說明

本研究以行政院公共工程委員會在民國 99 年所列管之重大公共建設計畫^[39]為例，僅考慮交通部鐵公路類別之計畫，選取其中總成本大於 100 億以上之大型運輸建設計畫，作為本實務數值範例之基礎，並針對部分難以取得實際資料之參數給予合理之假設，透過模式求解與分析以確認本模式於實務運輸建設計畫規劃問題應用之可行性。

由於在原始資料中並未定義計畫間之相關性及計畫整合之綜效，故本研究依各個別計畫之性質及相關性，先初步進行第一階段之計畫分群。而各計畫於提案前均已經過計畫可行性評估，但計畫未執行前難以評估計畫之利益，原始資料中僅部分計畫在可行性評估中

提及計畫之益本比，而多數計畫未提供益本比數值，則本範例參考過去已完成且計畫類型相似、規模尺度相近之計畫的益本比給予合理之假設數值。而個別運輸計畫案之基本資料如下表 2 所示。初步依據計畫性質，將範例計畫方案先分為 6 個計畫分群，每個計畫分群再窮舉所有可能之計畫組合方案，分述如下：

1. 計畫組合分群 $P_1: \{A_1, A_5\}$

為北部國道改善計畫，其中包含國道 2 號拓寬計畫(A_1)及國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程 (A_5)，其中又可分為進一步拆解為 C_1^2 兩個個別計畫組合方案，即 $P_{1-1}: \{A_1\}$ ， $P_{1-2}: \{A_5\}$ 。

2. 計畫組合分群 $P_2: \{A_2, A_3, A_4\}$

為中部都會區國道整合改善計畫，其中包含國道 6 號南投段建設計畫 (A_2)、國道 4 號豐原大坑段及臺中生活圈 4 號道路建設計畫 (A_3)、臺中生活圈 2 號線東段、4 號線北段 (A_4) 等 3 個計畫，又可將計畫組合為拆解為 $C_2^3 + C_1^3$ 共 6 個計畫組合方案，即 $P_{2-1}: \{A_2, A_3\}$ ， $P_{2-2}: \{A_2, A_4\}$ ， $P_{2-3}: \{A_3, A_4\}$ ， $P_{2-4}: \{A_2\}$ ， $P_{2-5}: \{A_3\}$ ， $P_{2-6}: \{A_4\}$ 。

3. 計畫組合分群 $P_3: \{A_6, A_{21}, A_{22}\}$

為桃園機場聯外系統改善計畫，其中包含臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 (A_6)、臺灣桃園國際機場道面整建及助導航設施提升工程計畫 (A_{21})、桃園國際機場第一航廈改善工程專案計畫 (A_{22}) 等 3 個計畫，其中又可將計畫組合為拆解為 $C_2^3 + C_1^3$ 共 6 個計畫組合方案，即 $P_{3-1}: \{A_6, A_{21}\}$ ， $P_{3-2}: \{A_6, A_{22}\}$ ， $P_{3-3}: \{A_{21}, A_{22}\}$ ， $P_{3-4}: \{A_6\}$ ， $P_{3-5}: \{A_{21}\}$ ， $P_{3-6}: \{A_{22}\}$ 。

4. 計畫組合分群 $P_4: \{A_8, A_{10}, A_{11}, A_{15}\}$

為鐵路都會區系統改善計畫，其中包含臺鐵都會區捷運化暨區域鐵路後續建設計畫 (基隆—苗栗) (A_8)、臺中都會區鐵路高架捷運化計畫 (A_{10})、高雄屏東潮州捷運化建設計畫 (A_{11})、臺鐵都會區捷運化桃園段高架化建設計畫 (A_{15}) 等 4 個計畫，其中又可將計畫組合為拆解為 $C_3^4 + C_2^4 + C_1^4$ 共 14 個計畫組合方案，即：

$P_{4-1}: \{A_8, A_{10}, A_{11}\}$ ， $P_{4-2}: \{A_8, A_{10}, A_{15}\}$ ， $P_{4-3}: \{A_8, A_{11}, A_{15}\}$ ， $P_{4-4}: \{A_{10}, A_{11}, A_{15}\}$ ， $P_{4-5}: \{A_8, A_{10}\}$ ， $P_{4-6}: \{A_8, A_{11}\}$ ， $P_{4-7}: \{A_8, A_{15}\}$ ， $P_{4-8}: \{A_{10}, A_{11}\}$ ， $P_{4-9}: \{A_{10}, A_{15}\}$ ， $P_{4-10}: \{A_{11}, A_{15}\}$ ， $P_{4-11}: \{A_8\}$ ， $P_{4-12}: \{A_{10}\}$ ， $P_{4-13}: \{A_{11}\}$ ， $P_{4-14}: \{A_{15}\}$ 。

5. 計畫組合分群 $P_5: \{A_9, A_{12}, A_{14}, A_{16}\}$

為鐵路系統整合改善計畫，其中包含臺北市區鐵路地下化東延南港工程 (A_9)、臺鐵立體化高雄市區鐵路地下化計畫 (A_{12})、高雄市區鐵路地下化延伸左營計畫 (A_{14})、臺南市區鐵路地下化計畫 (A_{16}) 等 4 個計畫，其中又可將計畫組合為拆解為 $C_3^4 + C_2^4 + C_1^4$ 共 14 個計畫組合方案，即：

$P_{5-1}: \{A_9, A_{12}, A_{14}\}$ ， $P_{5-2}: \{A_9, A_{12}, A_{16}\}$ ， $P_{5-3}: \{A_9, A_{14}, A_{16}\}$ ， $P_{5-4}: \{A_{12}, A_{14}, A_{16}\}$ ， $P_{5-5}: \{A_9, A_{12}\}$ ， $P_{5-6}: \{A_9, A_{14}\}$ ， $P_{5-7}: \{A_9, A_{16}\}$ ， $P_{5-8}: \{A_{12}, A_{14}\}$ ， $P_{5-9}: \{A_{12}, A_{16}\}$ ， $P_{5-10}: \{A_{14}, A_{16}\}$ ， $P_{5-11}: \{A_9\}$ ， $P_{5-12}: \{A_{12}\}$ ， $P_{5-13}: \{A_{14}\}$ ， $P_{5-14}: \{A_{16}\}$ 。

表 2 應用範例之個別計畫基本資料

計畫 編號	計畫名稱	計畫成本 (億元) ⁽¹⁾	計畫 利益 (億元) ⁽²⁾	B/C ⁽³⁾	預期 執行 年期 ⁽⁴⁾
A ₁	國道 2 號拓寬計畫	128.71	164.75	1.28	3.25
A ₂	國道 6 號南段建設計畫	375.58	495.77	1.32	16.18
A ₃	國道 4 號豐原大坑段及臺中生活圈 4 號道路建設計畫	317.76	409.92	1.29*	10.09
A ₄	臺中生活圈 2 號線東段、4 號線北段	206.96	262.84	1.27	10.09
A ₅	國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程	882.57	1,103.21	1.25*	4.08
A ₆	臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫	1,138.50	1,525.59	1.34	6.92
A ₇	高速鐵路站區聯外道路系統改善計畫	486.42	860.96	1.77	15.51
A ₈	臺鐵都會區捷運化暨區域鐵路後續建設計畫（基隆－苗栗）	84.84	114.53	1.35	9.00
A ₉	臺北市區鐵路地下化東延南港工程	830.69	938.68	1.13	12.84
A ₁₀	臺中都會區鐵路高架捷運化計畫	288.31	322.91	1.12*	8.26
A ₁₁	高雄屏東潮州捷運化建設計畫	152.37	201.13	1.32	6.00
A ₁₂	臺鐵立體化高雄市區鐵路地下化計畫	715.82	909.1	1.27	10.51
A ₁₃	東部鐵路快捷化計畫-花東線鐵路瓶頸路段雙軌暨全線電氣化計畫	150	201	1.34	5.01
A ₁₄	高雄市區鐵路地下化延伸左營計畫	106.62	146.07	1.37*	8.76
A ₁₅	臺鐵都會區捷運化桃園段高架化建設計畫	308.44	363.96	1.18	8.92
A ₁₆	臺南市區鐵路地下化計畫	293.6	393.42	1.34	8.23
A ₁₇	臺 11 線東部濱海公路改善計畫	110.38	151.22	1.37	19.01
A ₁₈	東西向快速道路北門至玉井線中山高至臺 1 線路段建設計畫（臺南）	115.31	148.74	1.29	4.92
A ₁₉	臺 9 線花東公路第 3 期道路改善計畫	35.62	45.59	1.28	4.00
A ₂₀	生活圈道路交通系統建設計畫（公路系統）	360	655.2	1.82	17.01
A ₂₁	臺灣桃園國際機場道面整建及助導航設施提升工程計畫	107.42	149.31	1.39	3.50
A ₂₂	國家重要交通門戶－桃園國際機場第一航廈改善工程專案計畫	19.91	25.49	1.28	3.00
A ₂₃	高雄港東側聯外公路（國道 7 號）	659.92	864.5	1.31	12.51

資料來源：行政院公共工程委員會^[39]

註：(1) 計畫成本資料來源：公共工程委員會。

(2) 計畫利益資料係由計畫成本乘上益本比 (B/C ratio) 推估而得。

(3) 部分計畫（標示*者）之益本比係查詢各計畫權責機關相關計畫報告資料所提出期望益本比，惟多數計畫（其他無標示*者）之益本比為本研究作合理假設。

(4) 計畫預期執行年期係查詢各計畫權責機關相關計畫報告說明資料所推算。

6. 計畫組合分群 $P_6: \{A_{13}, A_{17}, A_{19}\}$

為東部運輸系統改善計畫，其中包含東部鐵路快捷化計畫－花東線鐵路瓶頸路段雙軌暨全線電氣化計畫、臺 11 線東部濱海公路改善計畫、臺 9 線花東公路第 3 期道路改善計畫等 3 個計畫，又可將計畫組合為拆解為 $C_2^3 + C_1^3$ 共 6 個計畫組合方案，即：

$$P_{6-1}: \{A_{13}, A_{17}\}, P_{6-2}: \{A_{13}, A_{19}\}, P_{6-3}: \{A_{17}, A_{19}\}, P_{6-4}: \{A_{13}\}, P_{6-5}: \{A_{17}\}, P_{6-6}: \{A_{19}\}。$$

而未包含在計畫分群內之個別計畫，則視為獨立之計畫組合方案，為高速鐵路站區聯外道路系統改善計畫 ($P_7=A_7$)、東西向快速道路北門至玉井線中山高至臺 1 線路段建設計畫 (臺南) ($P_8=A_{18}$)、生活圈道路交通系統建設計畫 (公路系統) ($P_9=A_{20}$)及高雄港東側聯外公路 (國道 7 號) ($P_{10}=A_{23}$)。因此，計畫數量由原先 23 個可行之個別運輸計畫，增為 58 個計畫組合方案。

分別應用式(3), (4), (7)，估算計畫組合方案之成本、利益與執行年限變異風險值，計畫組合方案參數列於表 3。在組合方案之總利益估計，實務上，應針對計畫組合方案重新進行整體利益評估；惟限於範例資料不足，故本數值範例在組合方案利益之參數設定，僅依據組合方案之整體規模，參考過去已完成且計畫規模尺度相近之整體計畫的益本比給予合理之假設值。原則上，計畫組合之規模增加，所影響之使用者利益將更增加，故依評估組合方案之益本比反推組合利益加成效果 γ_k 。而在組合方案之執行年限變異風險值估計，由個別計畫之執行年期及其灰數上、下限值，可估計每個計畫可能之起訖期程範圍，而計畫組合則依其中所包含的計畫最早 (期程灰數下限) 與最晚 (期程灰數上限) 的期程加以聯集，來估計組合方案的期程與範圍上、下限，應用式(7)估算風險值。

4.2 規劃分析

針對前述假設之應用數值範例，考慮在實務規劃時，部分參數數值為不確定狀態，往往非明確之預估值，而僅能掌握一幅值範圍。因此，範例中計畫之成本、利益、風險變異及預算限制設為區間灰數，而區間灰數值之決定，是將原預估值以灰色程度 10%轉換。整合數值灰化後之上、下界參數，即可建構本研究之灰色多目標計畫組合規劃模式。本研究在求解灰色多目標計畫組合規劃模式時，將兩目標給予不同權重 (w_1, w_2)，再透過灰色 TOPSIS 法求解妥協解；其中，目標式 Z_1 (總淨現值目標) 之權重為 w_1 、目標式 Z_2 (總風險值目標) 之權重為 w_2 。範例中，本研究設定： $\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$ ， $\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$ ， $\{w_1 = 0, w_2 = 1\}$ ， $\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$ ， $\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$ 共 5 組權重組合，進行灰色 TOPSIS 法求解。在求解上，本研究應用 Lingo (11.0 版) 中 IOP 模組求解；不同權重組合下之規劃結果如表 4 所示。

結果顯示，單純以利益、成本為決策考量，亦即，單一最大化計畫總淨現值目標 (即權重 $\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$) 與較傾向最大化總淨現值目標 (即權重 $\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$) 之規劃結果相同，其規劃結果之 Z_1 目標值 (總淨現值) 最大、 Z_2 目標值 (總風險值) 亦最大，規劃解較傾向選擇組合計畫較大之計畫組合，總淨現值較大，但執行年期變異風險值相對較高。

表 3 計畫組合方案資料

計畫組合方案編號	計畫組合	計畫組合成本	計畫組合利益	B/C	預期年期
P_1	A_1, A_5	1,011.28	1,645.81	1.63	4.25
P_{1-1}	A_1	128.71	164.75	1.28	3.25
P_{1-2}	A_5	882.57	1,103.21	1.25	4.08
P_2	A_2, A_3, A_4	900.30	1,731.75	1.92	18.10
P_{2-1}	A_2, A_3	693.34	1,241.87	1.79	18.10
P_{2-2}	A_2, A_4	582.54	995.20	1.71	18.10
P_{2-3}	A_3, A_4	524.72	861.75	1.64	10.09
P_{2-4}	A_2	375.58	495.77	1.32	16.18
P_{2-5}	A_3	317.76	409.92	1.29	10.09
P_{2-6}	A_4	206.96	262.84	1.27	10.09
P_3	A_6, A_{21}, A_{22}	1,265.83	2,528.81	2.00	8.84
P_{3-1}	A_6, A_{21}	1,245.91	1,676.46	1.35	1.58
P_{3-2}	A_6, A_{22}	1,158.41	2,242.63	1.94	5.01
P_{3-3}	A_{21}, A_{22}	127.33	183.36	1.44	6.92
P_{3-4}	A_6	1,138.50	1,525.59	1.34	6.92
P_{3-5}	A_{21}	107.42	149.31	1.39	3.50
P_{3-6}	A_{22}	19.91	25.49	1.28	3.00
P_4	$A_8, A_{10}, A_{11}, A_{15}$	833.96	1,186.00	1.42	12.92
P_{4-1}	A_8, A_{10}, A_{11}	525.52	712.21	1.36	9.42
P_{4-2}	A_8, A_{10}, A_{15}	681.59	921.27	1.35	12.92
P_{4-3}	A_8, A_{11}, A_{15}	545.65	761.00	1.39	12.92
P_{4-4}	A_{10}, A_{11}, A_{15}	749.12	1,033.97	1.38	12.43
P_{4-5}	A_8, A_{10}	373.15	473.26	1.27	9.84
P_{4-6}	A_8, A_{11}	237.21	332.09	1.40	9.00
P_{4-7}	A_8, A_{15}	393.28	519.79	1.32	12.92
P_{4-8}	A_{10}, A_{11}	440.68	574.71	1.30	8.92
P_{4-9}	A_{10}, A_{15}	596.75	776.82	1.30	11.76
P_{4-10}	A_{11}, A_{15}	460.81	622.23	1.35	12.43
P_{4-11}	A_8	84.84	114.53	1.35	9.00
P_{4-12}	A_{10}	288.31	322.91	1.12	8.26

表 3 計畫組合方案資料 (續)

計畫組合方案編號	計畫組合	計畫組合成本	計畫組合利益	B/C	預期年期
P_{4-13}	A_{11}	152.37	201.13	1.32	6.00
P_{4-14}	A_{15}	308.44	363.96	1.18	8.92
P_5	$A_9, A_{12}, A_{14}, A_{16}$	1,946.73	3,153.58	1.62	19.10
P_{5-1}	A_9, A_{12}, A_{14}	1,653.13	2,537.34	1.53	19.10
P_{5-2}	A_9, A_{12}, A_{16}	1,840.12	2,921.23	1.59	19.10
P_{5-3}	A_9, A_{14}, A_{16}	1,230.91	1,778.19	1.44	12.43
P_{5-4}	A_{12}, A_{14}, A_{16}	1,116.04	1,715.16	1.54	17.18
P_{5-5}	A_9, A_{12}	1,546.52	2,318.98	1.50	17.18
P_{5-6}	A_9, A_{14}	937.31	1,252.40	1.34	19.10
P_{5-7}	A_9, A_{16}	1,124.29	1,579.06	1.40	19.10
P_{5-8}	A_{12}, A_{14}	822.44	1,198.26	1.46	12.43
P_{5-9}	A_{12}, A_{16}	1,009.42	1,519.32	1.51	12.43
P_{5-10}	A_{14}, A_{16}	400.22	575.09	1.44	8.76
P_{5-11}	A_9	830.69	938.68	1.13	12.84
P_{5-12}	A_{12}	715.82	909.10	1.27	10.51
P_{5-13}	A_{14}	106.62	146.07	1.37	8.76
P_{5-14}	A_{16}	293.60	393.42	1.34	8.23
P_6	A_{13}, A_{17}, A_{19}	296.00	607.78	2.05	20.01
P_{6-1}	A_{13}, A_{17}	260.38	515.75	1.98	20.01
P_{6-2}	A_{13}, A_{19}	185.62	328.21	1.77	5.01
P_{6-3}	A_{17}, A_{19}	146.00	248.05	1.70	20.01
P_{6-4}	A_{13}	150.00	201.00	1.34	5.01
P_{6-5}	A_{17}	110.38	151.22	1.37	19.01
P_{6-6}	A_{19}	35.62	45.59	1.28	4.00
P_7	A_7	486.42	860.96	1.77	15.51
P_8	A_{18}	115.31	148.74	1.29	4.92
P_9	A_{20}	360.00	655.20	1.82	17.01
P_{10}	A_{23}	659.92	864.50	1.31	12.51

而兩目標具相同權重 $\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$ 與較傾向考量風險值目標（即權重 $\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$ ）之規劃結果相同，所規劃選得之計畫組合數較前述規劃結果少，執行年期變異風險值與總淨現值均較小，為較折衷之決策導向。而完全以風險趨避為決策導向（即單一最小化總風險值目標 $\{w_1 = 0, w_2 = 1\}$ ）時，其規劃結果之 Z_2 目標值（總風險值）最小、 Z_1 目標值（總淨現值）亦最小，規劃解較傾向選擇組合計畫較小之計畫組合，執行年期變異之總風險值較小，惟總淨現值亦較小。

灰色規劃結果為灰色決策解，代回模式中則求得灰色目標值；其中，權重 $\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$ 與 $\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$ 之規劃決策解相同，而權重 $\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$ 與 $\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$ 之規劃決策解相同，係因決策變數為 0-1 變數的關係所致。各個目標式權重組合下其不同灰參數對應之規劃結果相同，顯示規劃解為強固 (robust)。探究可能的原因，雖規劃目標式之係數、限制式之係數與右手邊值 (right-hand-side, RHS) 為區間灰數，但規劃決策解為 0 或 1 跳動，而使得決策解對灰參數變動之影響不大。另外，模式規劃結果在預估值下之規劃結果可視為灰數規劃解之特例，模式在處理不確定性的灰參數過程中，即可發揮灰模式之價值。不同目標式權重組合下之計畫組合規劃妥協解之總淨現值 (Z_1) 與總風險值 (Z_2) 目標值之決策空間，對應預估值、灰下界及灰上界模式，分別如圖 1(a)–(c)。由圖 1(a)–(c)，可顯示不同目標式權重組合所代表之兩目標間的權衡取捨率 (trade-off rate)，並隱含決策者可採用不同權重組合對應之目標式值，可提供較大之決策彈性。

4.3 敏感度分析

1. 總預算額度之敏感度分析

運輸計畫組合規劃最關鍵之核心問題即是總預算分配，為檢驗總預算額度變化對計畫組合規劃結果之影響，本研究進行預算限制之敏感度分析。本研究將預算額度由原先預估之 6,300.6 億元，增加及減少 10%，分別為 5,513.025 億元及 7,088.175 億元，而各計畫之成本與利益值以及計劃執行年期變異風險值不變，同時假設兩目標式之權重相等 ($\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$)，以了解計畫組合規劃結果是否會因預算之增減而有所不同，預算變動下之規劃結果列於表 5。

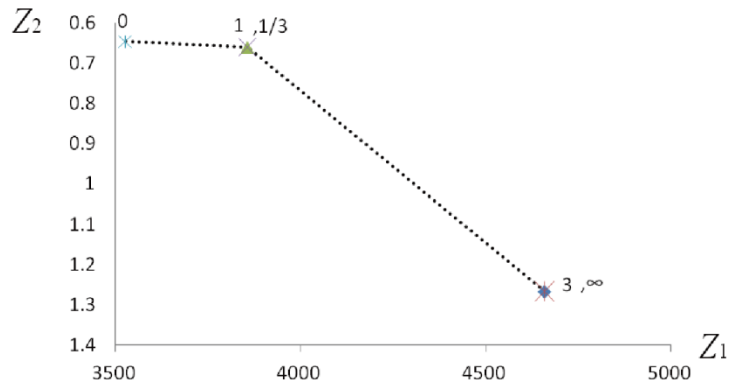
由表 5 可知，隨預算額度增加，計畫組合總淨現值會隨預算額度增加而增加，且由於選入的計畫組合也增加，而使得計畫組合執行年期變異之總風險值亦隨之增加。由表 5 可知，當預算緊縮時（總預算減少 10%），選入最終計畫組合方案之計畫組合成本較低；當預算較寬裕（總預算增加 10%）時，則會改為選入組合方案內計畫數較多之組合方案。從表 5 亦可顯示哪些組合方案對於預算改變較為敏感，亦受到該計畫組合方案之成本所影響。

2. 灰色程度之敏感度分析

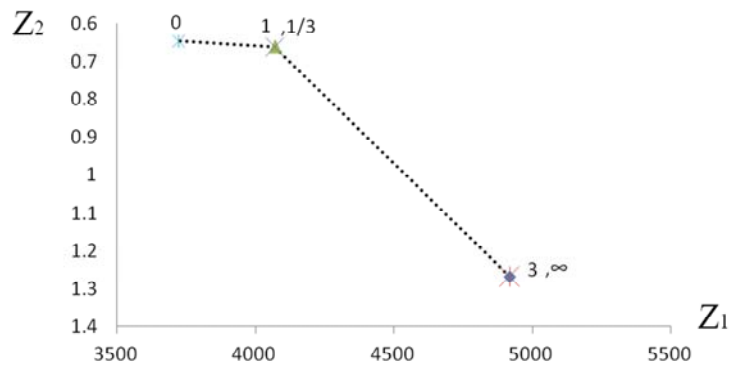
進一步，本研究進行參數灰色程度之敏感度分析，以探討當規劃條件之明確程度發生改變時，對規劃結果會有什麼影響。本研究將參數之灰色程度以 10% 為基準，分別降低至

表 4 不同目標式權重之計畫組合規劃最適妥協解結果

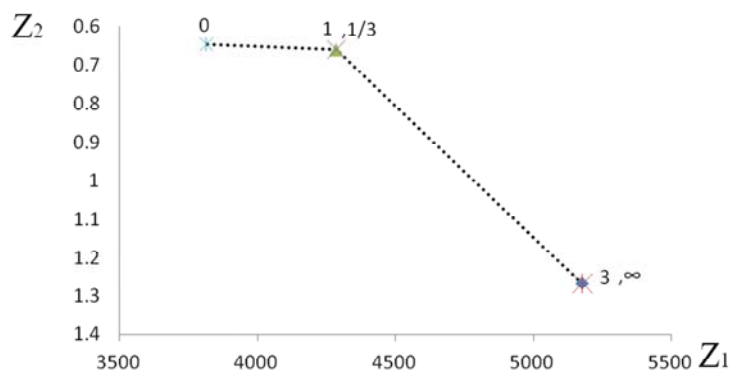
目標權重	$\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$			$\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$			$\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$			$\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$			$\{w_1 = 0, w_2 = 1\}$		
灰色參數	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界
規劃解之 最適計畫組合	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_{2-2}	P_{2-2}	P_{2-2}
	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3
	P_5	P_5	P_5	P_5	P_5	P_5	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}
	P_6	P_6	P_6	P_6	P_6	P_6	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}
	P_7	P_7	P_7	P_7	P_7	P_7	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{10}	P_{10}	P_{10}
	P_9	P_9	P_9	P_9	P_9	P_9									
	10595.26	11183.89	11772.52	10595.26	11183.89	11772.52	9399.883	9922.099	10444.31	9399.883	9922.099	10444.31	8976.632	9475.334	9869.278
	5936.742	6266.561	6596.379	5936.742	6266.561	6596.379	5543.516	5851.49	6159.463	5543.516	5851.49	6159.463	5450.178	5752.966	6055.753
Z_1 : 計畫組合 總淨現值(億元)	4658.523	4917.329	5176.136	4658.523	4917.329	5176.136	3856.367	4070.61	4284.852	3856.367	4070.61	4284.852	3526.454	3722.368	3813.525
Z_2 : 計畫組合 總風險值	1.26802	1.26802	1.26802	1.26802	1.26802	1.26802	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.646992	0.646992	0.646992



(a) 灰下限之目標式決策空間



(b) 預估值之目標式決策空間



(c) 灰上限之目標式決策空間

圖 1 對應不同灰參數下與不同權重之目標式值決策空間

表 5 預算額度敏感度分析之計畫組合規劃最適妥協解結果

預算額度改變	預算額度減少 10%			原始預算額度			預算額度增加 10%		
灰參數	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界
規劃解之 最適計畫組合	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2
	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3
	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}
	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}
				P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_5	P_5	P_5
							P_7	P_7	P_7
							P_9	P_9	P_9
總利益值 (億元)	8855.421	9347.389	9839.357	9399.883	9922.099	10444.31	11056.37	11670.62	12284.86
總成本值 (億元)	5126.03	5410.81	5695.589	5543.516	5851.49	6159.463	6446.394	6804.52	7162.66
Z_1 : 計畫組合 總淨現值 (億元)	3729.391	3936.579	4143.768	3856.367	4070.61	4284.852	4609.98	4866.097	5122.2
Z_2 : 計畫組合 總風險	0.61458	0.61458	0.61458	0.661275	0.661275	0.661275	1.111306	1.111306	1.111306

5% (規劃範圍更明確) 以及升高至 20%、30% (規劃範圍更不明確)，而假設兩目標式之權重相等 ($\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$)，以觀察規劃模式對目標式值結果之變化，灰色程度之敏感度分析結果如表 6。

由表 6 可發現，參數之灰色程度改變對計畫組合決策變數之規劃結果並無影響，即計畫組合選擇結果不變，隱含本研究規劃結果堪稱強固。而計畫組合執行年期變異之風險值亦不變，僅總成本與總利益值隨灰色程度不同而改變。並發現當參數灰色程度升高時，妥協解之灰數範圍隨著參數之灰色程度增加而擴大，且目標值之灰數範圍變化幅度與參數灰度變化幅度相近。故可判定灰參數之灰色程度會影響目標值之灰區間變化，若規劃條件越明確時，則可降低參數之灰色程度，相反地，若規劃條件越不明確時，則可提高參數之灰色程度，如此可維持規劃之彈性，以因應計畫組合方案規劃之不確定性。

五、結論與建議

本研究建構一灰色多目標規劃為基礎之計畫組合選擇模式，應用於運輸計畫規劃問題。本研究以計畫組合管理理論為模式之框架，再針對運輸計畫在成本、利益與預算估計

表 6 灰色程度敏感度分析之計畫組合規劃最適妥協解結果

灰色上下界	下界				原始 預估值	上界			
	30% 灰色程度	20% 灰色程度	10% 灰色程度	5% 灰色程度		5% 灰色程度	10% 灰色程度	20% 灰色程度	30% 灰色程度
灰色程度 改變	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2
	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3
	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}
	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}
	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}
總利益值 (億元)	4818.871	5201.325	9399.883	9667.687	9922.099	10176.51	10444.31	6501.654	6884.108
總成本值 (億元)	8171.14	8819.64	5543.516	5701.452	5851.49	6001.528	6159.463	11024.55	11673.06
Z_1 ：計畫組合 總淨現值 (億元)	3352.265	3618.320	4184.573	4303.792	4417.049	4530.307	4649.526	4522.899	4788.954
Z_2 ：計畫組合 總風險	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275

上之不確定性，運用灰數及多目標 0-1 整數規劃模式，進行運輸計畫最適組合之最佳化決策規劃，期給予決策者具有彈性的計畫組合決策參考。本研究所建構之灰色多目標計畫組合規劃模式，係以計畫組合方案為規劃決策對象，有別於過去計畫規劃問題以個別計畫為規劃對象，並考慮成本、利益、執行年期變異風險及預算之不確定性，建構灰色多目標 0-1 整數規劃問題，並應用灰色 TOPSIS 法求解灰色多目標計畫組合規劃模式之妥協解。

本研究以公共工程委員會之大型運輸建設計畫，作為實務數值範例假設之基礎，透過數值範例分析檢驗本研究模式之可行性。由範例分析結果可知，不同目標式權重組合之計畫組合規劃妥協解決策空間，可顯示不同權重組合所代表之兩目標之間的權衡取捨率，即可提供較大之決策彈性。規劃結果顯示，以偏向考慮利益、成本之淨現值最大化為決策導向下，規劃解較傾向選擇組合計畫較大之計畫組合，總淨現值較大，但執行年期變異風險值相對較高。而偏向以風險趨避為決策導向下，所規劃選得之計畫組合數較少，執行年期變異之總風險值較小，惟總淨現值亦較小。

透過預算額度與灰色程度之敏感度分析，發現總預算改變對計畫組合規劃結果影響較為明顯，而灰色程度改變之規劃結果則堪稱強固。預算改變即會改變計畫組合結果，隨預算提高，較傾向組合計畫之規劃解。本研究計畫組合規劃模式，可作為以計畫組合管理進行運輸計畫規劃之規劃模式基礎；整合灰數於規劃模式中，即允許成本、利益、執行年期變異風險及預算輸入值為大概幅值範圍之區間值，有助於規劃者面對並處理不明確規劃條件下，維持規劃結果之決策彈性。

囿於資料取得之困難，因此本研究僅藉由數值應用範例分析驗證本研究之可行性。未來後續研究可針對更詳細之計畫成本與利益資料，應用運輸計畫經濟利益評估模式進行深入分析，並導入計畫組合管理概念，對組合計畫進行全面整體性之利益與成本分析，再以本研究所建構之規劃模式為基礎，進行運輸計畫組合選擇規劃。惟問題規模增加、計畫方案數量增加時，其組合將更複雜，亦會使得計算困難度與運算時間複雜度大幅增加，後續研究可考慮應用啟發式演算法，以提升運算效率與應付問題複雜度。本研究模式未考慮計畫排程問題，後續研究可考慮將工程年期及計畫執行狀態納入規劃模式中，以增加模式之決策應用性。

參考文獻

1. Niemeier, D. A., Zabinsky, Z. B., Zeng, Z., and Rutherford, G. S., "Optimization Models for Transportation Project Programming Process", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 121, No.1, 1995, pp.14-26.
2. Humphrey, T., *Summary of Findings, Issues in Statewide Transportation Planning*, Transportation Research Board, Washington DC, 1974.
3. Teng, J. Y. and Tzeng, G. H., "A Multiobjective Programming Approach for Selecting Non-independent Transportation Investment Alternatives", *Transportation Research -Part B*,

- Vol. 30, No. 4, 1996, pp. 291-307.
4. Teng, J. Y. and Tzeng, G. H., "Transportation Investment Project Selection Using Fuzzy Multiobjective Programming", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 96, 1998, pp. 259-280.
 5. Young, R., "Multimodal Investment Choice Analysis: Application of Goal Programming for Selection of Transportation Projects", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, USA, 2002.
 6. Markowitz, H., "Portfolio Selection", *Journal of Finance*, Vol. 7, 1952, pp. 77-91.
 7. Markowitz, H., *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investment*, Wiley, New York, 1959.
 8. Markowitz, H., *Analysis in Portfolio Choice and Capital Market*, Basil Blackwell, Oxford, 1987.
 9. Voros, J., "Portfolio Analysis—An Analytical Derivation of the Efficient Portfolio Frontier", *European Journal of Operational Research*, Vol. 23, No. 3, 1986, pp. 294-300.
 10. Young, M. R., "A Minimax Portfolio Selection Rule with Linear Programming Solution", *Management Science*, Vol. 44, No. 5, 1998, pp. 673-683.
 11. Best, M. J. and Hlouskova, J., "The Efficient Frontier for Bounded Assets", *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 52, 2000, pp. 195-212.
 12. Stein, M., Branke, J., and Schmeck, H., "Efficient Implementation of an Active Set Algorithm for Large-scale Portfolio Selection", *Computers & Operations Research*, Vol. 35, 2008, pp. 3945-3961.
 13. Yan, W., Miao, R., and Li, S. R., "Multi-period Semi-variance Portfolio Selection: Model and Numerical Solution", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 194, 2007, pp. 128-134.
 14. Arenas, M., Bilbao, A., and Rodriguez, M. V., "A Fuzzy Goal Programming Approach to Portfolio Selection", *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, No. 2, 2001, pp. 287-297.
 15. Ida, M., "Solutions for the Portfolio Selection Problem with Interval and Fuzzy Coefficients", *Reliable Computing*, Vol. 10, No. 5, 2004, pp. 389-400.
 16. Abiyev, R. H. and Menekay, M., "Fuzzy Portfolio Selection Using Genetic Algorithm", *Soft Computing*, Vol. 11, No.12, 2007, pp. 1157-1163.
 17. Bilbao, A., Perez, B., Arenas, M., and Rodriguez, M. V., "Fuzzy Compromise Programming for Portfolio Selection", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 173, 2006, pp. 251-264.
 18. Ong, C. S., Huang, J. J., and Tzeng, G. H., "A Novel Hybrid Model for Portfolio Selection", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 69, No. 2, 2005, pp. 1195-1210.
 19. Cooper, R. G., Edgett, S. J., and Kleinschmidt, E. J., *Portfolio Management for New Products*, Perseus Books, Berkeley, 1998.
 20. Beaujon, G. J., Marin, S. P., and McDonald, G. C., "Balancing and Optimizing a Portfolio of R&D Projects", *Naval Research Logistics*, Vol. 48, No. 1, 2001, pp. 18-40.
 21. Carlsson, C., Fuller, R., Hekkila, M., and Majlender, P., "A Fuzzy Approach to R&D Project Portfolio Selection", *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 44, 2007, pp. 93-105.

22. Wang, J. and Hwang, W. L., "A Fuzzy Set Approach for R&D Portfolio Selection Using a Real Options Valuation Model", *Omega—The International Journal of Management Science*, Vol. 35, 2007, pp. 247-257.
23. Stankeviciene, J. and Jachimaviciene, I., "A Multi-Objective Project Portfolio Formation Model: Case Study of Lithuanian Transport Sector", The 6th International Scientific Conference, Business and Management, 2010, pp. 230-238.
24. Sadi-Nezhad, S., Khalili Damghani, K., and Pilevari, N., "Application of 0-1 Fuzzy Programming in Optimum Project Selection", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 64, 2010, pp. 335-339.
25. Inuiguchi, M. and Ramik, J., "Possibilistic Linear Programming: A Brief Review of Fuzzy Mathematical Programming and a Comparison with Stochastic Programming in Portfolio Selection Problem", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 111, 2000, pp. 3-28.
26. Sinha, K. C. and Labi, S., *Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
27. Zhong, T. and Young, R., "Multiple Choice Knapsack Problem: Example of Planning Choice in Transportation", *Evaluation and Program Planning*, Vol. 33, 2010, pp. 128-137.
28. Sinha, K. C. and Jukins, D. P., *Transportation Project Evaluation and Priority Programming: Techniques and Criteria*, Transportation Research Board, Washington DC, 1980.
29. Sinha, K. C. and Muthusubramanyam, M., "Optimization Approach in Highway Programming and System Analysis", *Transportation Research Record*, No. 867, 1982, pp.12-19.
30. 林楨家、李家儂，「用於都市地區活動分布之灰色 TOD 規劃模式」，*運輸計劃季刊*，第 34 卷，第 1 期，民國 94 年，頁 63 - 92。
31. 林楨家、沈育生，「地區性道路間距設計之灰色規劃模式」，*運輸計劃季刊*，第 34 卷，第 2 期，民國 94 年，頁 293 - 324。
32. Lin, J. J. and Li, C. N., "A Grey Programming Model for Regional Transit-oriented Development Planning", *Papers in Regional Science*, Vol. 87, No. 1, 2008, pp. 119-139.
33. Deng, J. L., "The Control Problems of Grey System", *System and Control Letters*, No. 5, 1982, pp. 288-294.
34. Deng, J. L., et al., *Essential Topics on Grey System: Theory and Application*, China Ocean Press, Beijing, 1988.
35. Deng, J. L., "Introduction to Grey System Theory", *Journal of Grey System*, Vol. 1, 1989, pp. 1-24.
36. Sharpe, P. and Keelin, T., "How SmithKline Beecham Makes Better Resource-Allocation Decisions", *Harvard Business Review*, March–April, 1998, pp. 45–57.
37. Huang, G. H. and Moore, R. D., "Grey Linear Programming, Its Solving Approach and Its Application", *International Journal of Systems Science*, Vol. 24, No. 1, 1993, pp. 159-172.
38. Huang, G. H., Baetz, B.W., and Patry, G. G., "Grey Integer Programming: An Application to Waste Management Planning under Uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 83, No. 3, 1995, pp. 594-620.

39. 行政院公共工程委員會，「公共工程委員會列管計畫查詢」，<http://cmdweb.pcc.gov.tw/pccms/owa/pln90.bro1>，民國 101 年。
40. Hwang, C. L. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making: Method and Application*, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
41. Lai, Y. L., Liu, T. Y., and Hwang, C. L., "TOPSIS for MACM", *European Journal of Operational Research*, Vol. 76, No. 3, 1994, pp. 486-500.

運輸計劃季刊稿約

- 一、本刊歡迎國內外有關運輸之工程、經濟、規劃、管理、資訊等未經刊登於其他刊物之中、英文研究論著；已刊登者，雖使用語文不同、題目更改、或內文經改寫，均不接受投稿。已於國內外會議發表之論文，不論有無收錄於其會議資料中，除經大幅修改者外，均請作者提附該會議主辦者之同意書，並於論文中加註說明。論文如屬接受公私機關團體委託研究出版之報告書之全文或一部分或經重新編稿者，作者應提附該委託單位之同意書，並於論文中加註說明。交通部運輸研究所同仁擬投稿件如屬所內已結案或未結案之計畫者，應依照本所出版品管理作業要點第十一條之規定辦理。凡由本刊主動邀稿者，不受上述各項限制。
- 二、為便於一次刊出，來稿以二萬五千字為限，其中應包括三百字以內之摘要一篇及三至五個關鍵詞，並請註明姓名、身分證字號、戶籍地址、服務單位、職稱、聯絡地址及電話。
- 三、中文稿之題目、作者姓名、摘要及關鍵詞均請附英文。文稿中需註釋處，請標明上標無括號序碼，並請從題目、作者介紹開始，往下連續編號，再於引註當頁下方加橫線排印註釋。文稿中之數學式，函數請排正體字，變數請排斜體字。圖及表中之中文字請排細明體，英文字請排 Times New Roman 體，圖原則上不加框，表之框線均採細線。
- 四、參考文獻請按出現序排列，文稿中提及時請標明上標加括號序碼，參考文獻必須是文稿所引用者始得列入，且參考文獻內容必須依本刊規定格式完整無缺列入。參考文獻中，英文之逗點、句點均採英國式排於引號外。本刊參考文獻編排規定格式及範例如下：
 - 1.期刊論文：作者姓名（姓在前名在後），論文篇名，期刊名稱，卷期，出版日期，起迄頁碼。
中文例：林楨家、李家儂，「用於都市地區活動分布之灰色 TOD 規劃模式」，**運輸計劃季刊**，第 34 卷，第 1 期，民國 94 年，頁 63-91。
英文例：Cervero, R. and Kockelman, K., "Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design", *Transportation Research A*, Vol. 2, No. 3, 1997, pp.199-219.
 - 2.圖書單行本：作者姓名，書名，版次（無則免列），出版社，出版地，出版日期。
中文例：黃芳銘，**結構方程模式：理論與應用**，第 5 版，五南圖書出版股份有限公司，臺北，民國 96 年。
英文例：Nunnally, J. C., *Psychometric Theory*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1978.
 - 3.研討會論文：作者姓名，論文篇名，研討會/論文集名稱，冊別（無則免列），舉辦單位，出版日期，起迄頁碼。
中文例：溫傑華、藍武王、趙國婷，「國道客運車輛下層設置座位或臥鋪接受之研究」，中華民國運輸學會第 16 屆學術論文研討會論文集，第 1 冊，中華民國運輸學會，民國 90 年，頁 221-230。
英文例：Eberhart, R. C. and Kennedy, J., "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. IV, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995, pp.1942-1948.
 - 4.博、碩士論文：作者姓名，論文名稱，學校系所，出版日期。
範 例：陳勝智，「以大眾運輸導向發展理念進行車站地區都市再發展之探討」，成功大學都市計劃研究所碩士論文，民國 90 年。
 - 5.政府出版圖書/規範：政府機關名，圖書/規範名，出版日期。
範 例：交通部統計處，**中華民國交通統計年鑑**，民國 94 年。
 - 6.網頁資料：作者姓名/網頁機關名，文章篇名/連結主題名，網址，網頁下載日期。
範 例：交通部運輸研究所，「全國路況資訊中心」，<http://e-traffic.iot.gov.tw/>，民國 97 年。
 - 7.與以上所列文獻格式不同者，請改以註解方式列出。
- 五、來稿請備一式三份，打印清楚；照片、圖片請附寄原本，凡無法清晰辨認及製版者，恕不接受；並請提供 Microsoft Word 97（含以上）版本可讀檔案格式之電子檔。
- 六、運輸計劃季刊編輯室對來稿在不變更其論點之原則下有刪改權；來稿一經發表，當酌致稿酬；其他刊物如需轉載，應同時徵得作者及本所同意，並註明出處。
- 七、來稿請附本刊保證及授權書寄：10548 臺北市敦化北路 240 號 6 樓交通部運輸研究所運輸計劃季刊編輯室。

Transportation Planning Journal Quarterly GUIDELINES FOR THE SUBMISSION OF PAPERS

1. The Journal welcomes the submission of previously unpublished research papers from all countries, which are related to engineering, economics, planning, management, and information processing of transportation systems. Previously published papers, even if published in a different language, with a different title, or modified contents, will not be accepted. Unless drastically revised since conference presentation, papers which have been previously presented in domestic or international conferences, regardless of whether they had been included in the conference proceedings or not, must be submitted with a letter of consent from the conference organizer, and such a presentation must be duly noted in the paper itself. Papers which duplicate or contain portions of study reports of research projects, edited versions thereof, or funded by government agencies or private organizations, should be submitted with a letter of consent from the funding agency, and this must be duly noted in the paper itself. Papers submitted by the staff of the IOT should comply with its "Guidelines for Publications". The above terms do not apply to invited papers and articles.
2. The length of submitted papers should not exceed 25,000 characters/words, and should include an abstract of no more than 300 characters/words, as well as 3 to 5 key words, and the author's name and position, institution, contact address, and telephone number.
3. Papers written in Chinese should also carry an English version of the abstract, including the title of the paper, the name of the author, and key words of the paper. Notes should be numbered consecutively in the order in which they first appear in the text and should be started with the title and the introduction of the author(s). References listed should be limited to all those mentioned and quoted in the text, and should be numbered consecutively in the order in which they have been mentioned in the text. The Times New Roman font should be used for the English version. Print all the mathematical equations and functions. And variables should be typed in italics.
4. The guidelines of reference formats are as follows:
 - (1) Journal: authors (beginning with the last name), article title, journal title, volume number, publish date, and page numbers.
 - (2) Book: authors, book title, edition number, publisher, place of publication, publish date.
 - (3) Conference paper: authors, paper title, conference title, sponsor, publish date, and page numbers.
 - (4) Doctoral dissertation or master thesis: author, title of the dissertation/thesis, department, college, and publish date.
 - (5) Government publication: government authority, name of the publication, and publish date.
 - (6) Web page: author or authority, article title or related link, URL, date of downloading.
5. Papers should be submitted with three copies of manuscript typed in a clearly legible form and an electronic file accessible by the Microsoft Word 97 (and above). All graphs and photographs should be submitted in originals. No illegible submissions will be accepted.
6. The Editor's Office of the Transportation Planning Journal Quarterly (TPJ Quarterly) reserves the right to edit and make any changes to the submitted papers, provided that such editing changes do not alter the paper's original content. Upon the acceptance of a paper for publication, the TPJ Quarterly shall remunerate the author for the contribution of the paper. The TPJ Quarterly reserves the copyright on all of its published papers, and all reproductions of such papers must receive a prior permission of the author and this journal, and meanwhile indicate the sources.
7. All submissions should be sent to the following address:

The Editor's Office
Transportation Planning Journal Quarterly
Institute of Transportation
6F., No. 240, Dunhua N. Rd.,
Taipei City 10548, Taiwan (R.O.C.)

保證及授權書

茲保證本人著作「」
符合運輸計劃季刊稿約之規定，刊登後並授權中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）得以重製、公開傳輸、散佈方式利用本著作，且得授權第三人為相同之利用，並同意得提供予其他資料庫進行刊載及相同之利用，本人並承諾對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）或其再授權利用之人不行使著作權。本人保證本著作無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情事負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。本人承諾本著作經貴刊刊登後，不再以同一稿件，或將題目更改，或將內容改編，轉投其他國內、外刊物登載，如有違反，同意貴所得公布本人姓名並永不再接受本人投稿。此致
中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）
立保證及授權書人（所有作者均請簽章，姓名後註明身分證字號）：

中 華 民 國 年 月 日

LETTER OF GUARANTEE

This letter serves to guarantee that my paper entitled ' _____', conforms to the "Guidelines for the Submission of Papers" of the Transportation Planning Journal Quarterly, and that I hereby authorize the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) and any third party to reproduce、public transmission、distribution my paper. I also agree my paper could be exchanged to the other database and to abandon the author's copyright to the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) and users from the database. I guarantee that I did not infringe upon the copyright of the paper of any other person. If I violated this rule, I should take on the responsibility for compensation to the author and to the Republic of China (represented by the IOT of the Ministry of Transportation and Communications) accordingly. I guarantee that once this paper is published in the TPJ Journal, I will not make redundant or duplicate publication (i.e., submission of the same article, or with a different title, or modified content) to other journals or periodicals in the Republic of China or any other countries. I agree that in the event of any violation of the stated terms on my part, the IOT may announce my name in public and shall reject all my papers afterwards.

This guarantee is provided to the Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications.

Signature (both author's and co-authors'):

Date: _____

