

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。

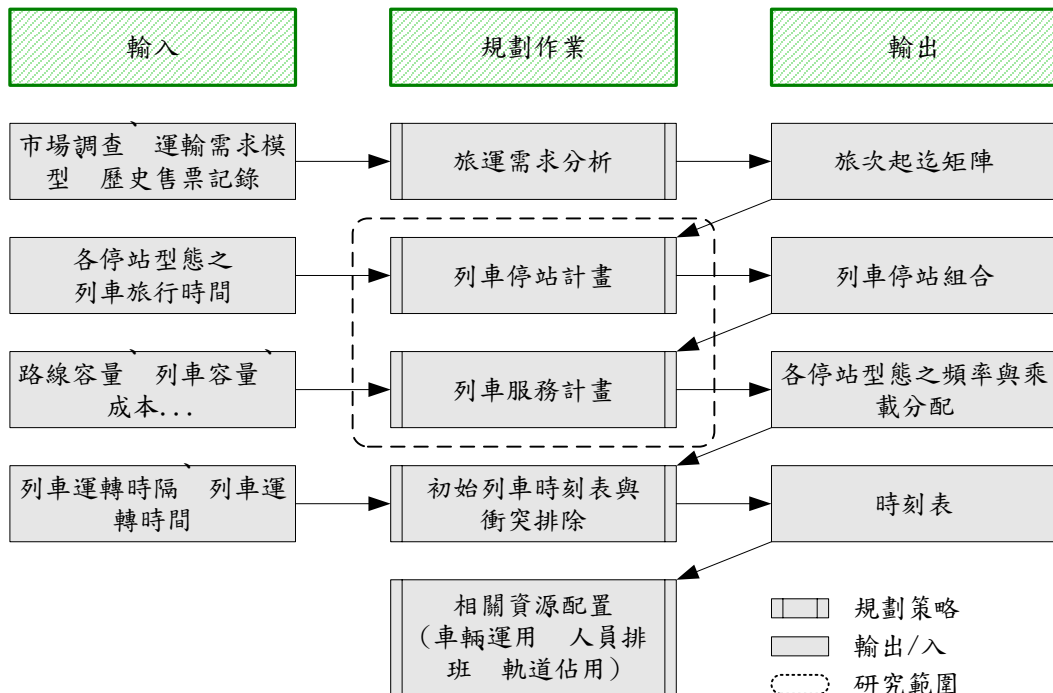


圖 1 鐵路系統營運規劃作業程序示意圖

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 $\sim$ 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 $\sim$ 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。

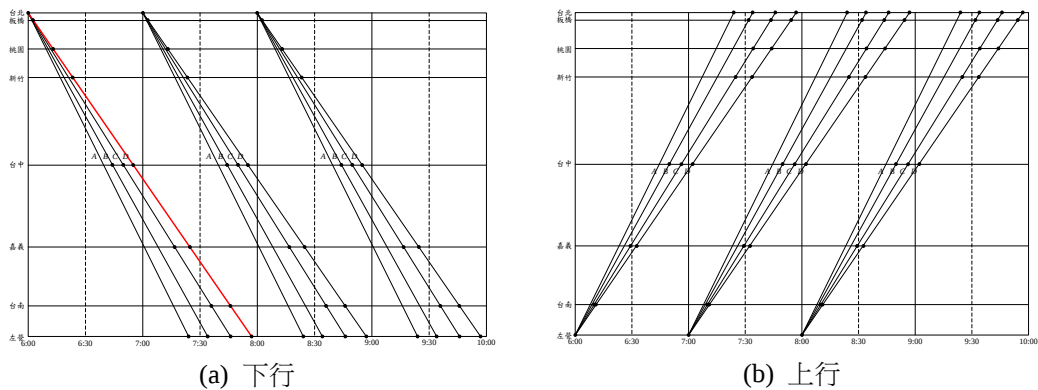


圖 2 不同停站型態之上下行時空圖

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)：

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

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

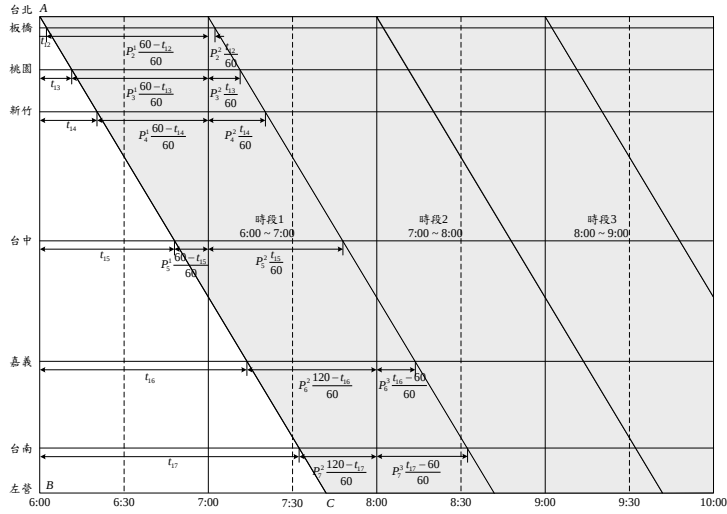


圖 3 晨間下行時空遞移之時區示意圖

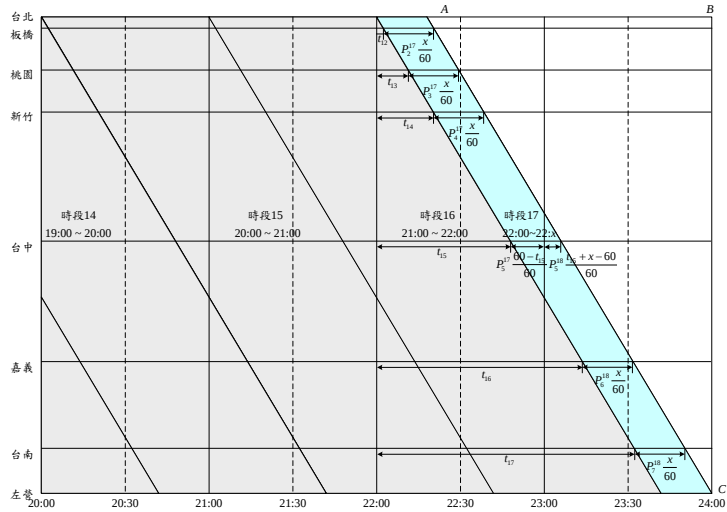


圖 4 夜間下行時空遞移之時區示意圖

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。

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

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

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

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)轉移到時段 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。

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

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

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

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)：

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

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

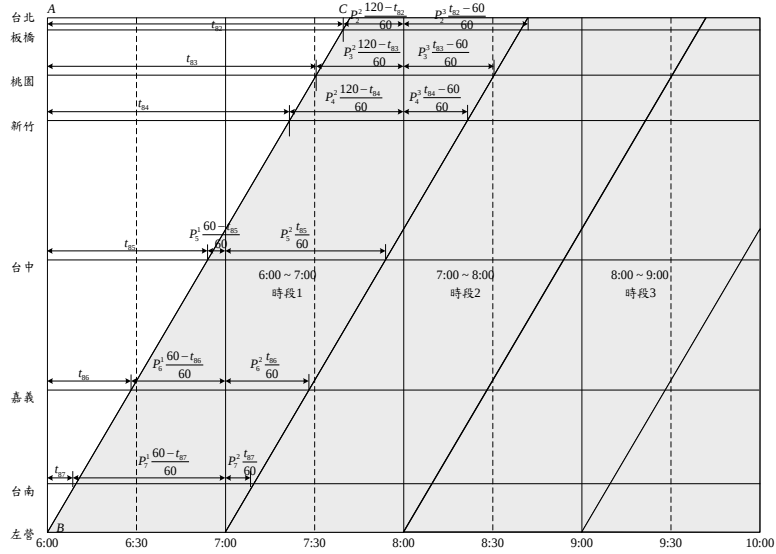


圖 5 晨間上行時空遞移之時區示意圖

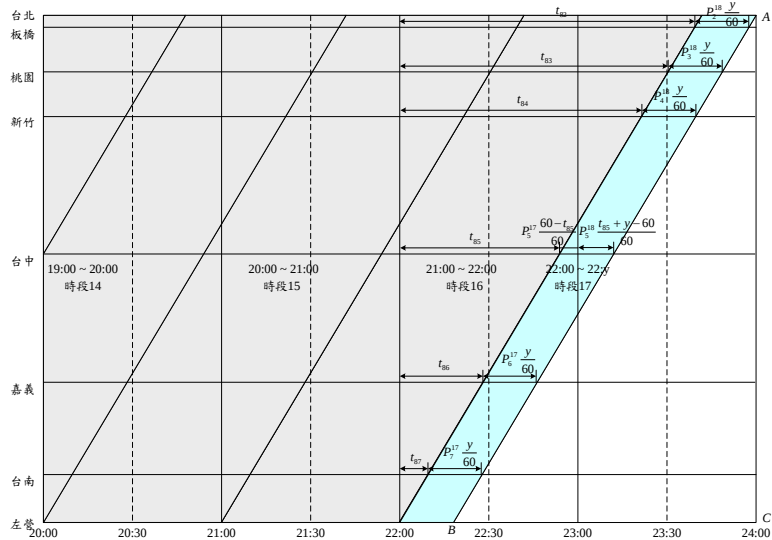


圖 6 夜間上行時空遞移之時區示意圖

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。

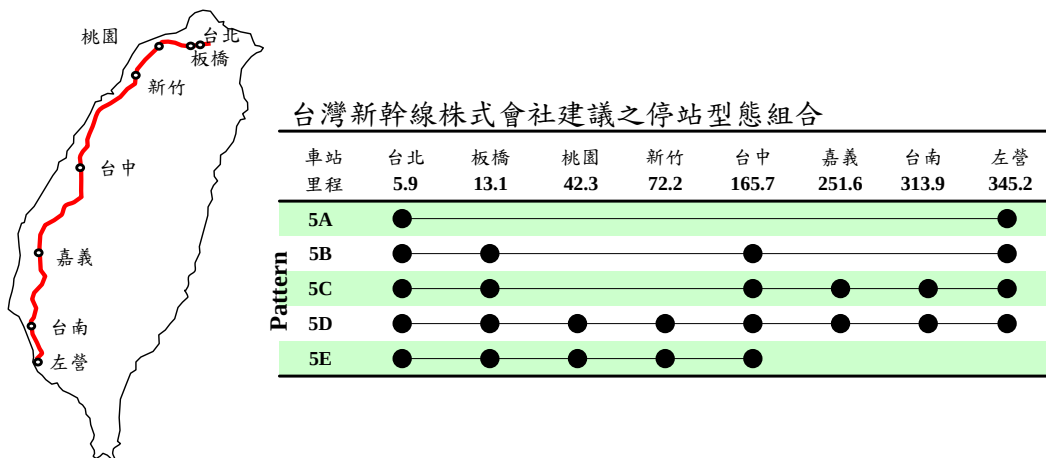


圖 7 臺灣高鐵營運初期停站型態示意圖

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。

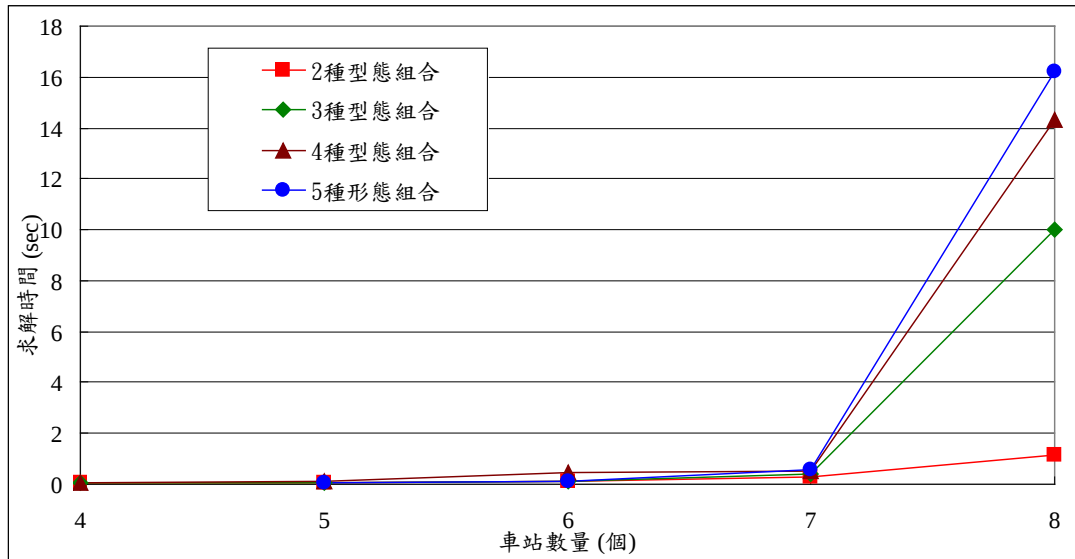


圖 8 列車停站計畫模式求解效率測試

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。

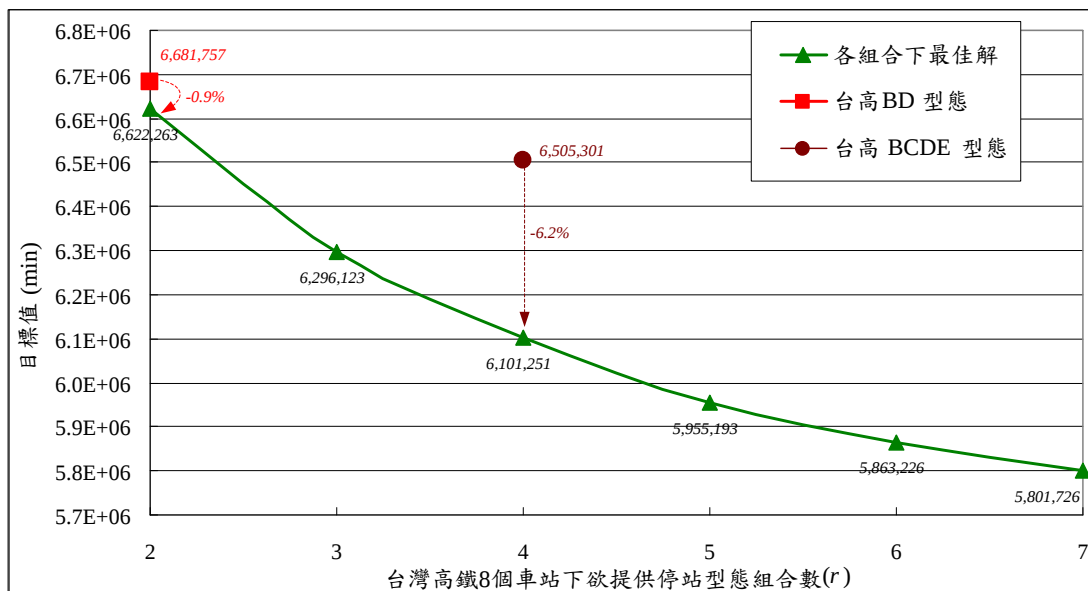


圖 9 臺灣高鐵 8 車站之列車停站型態組合與整體旅客車內旅行時間

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。

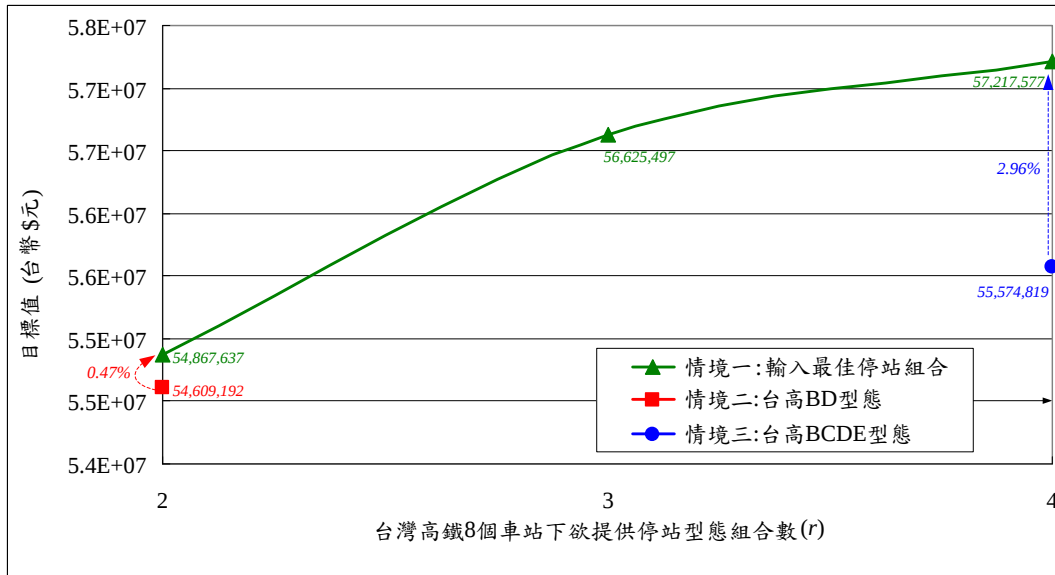


圖 11 不同停站組合數之整體目標值變化

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。

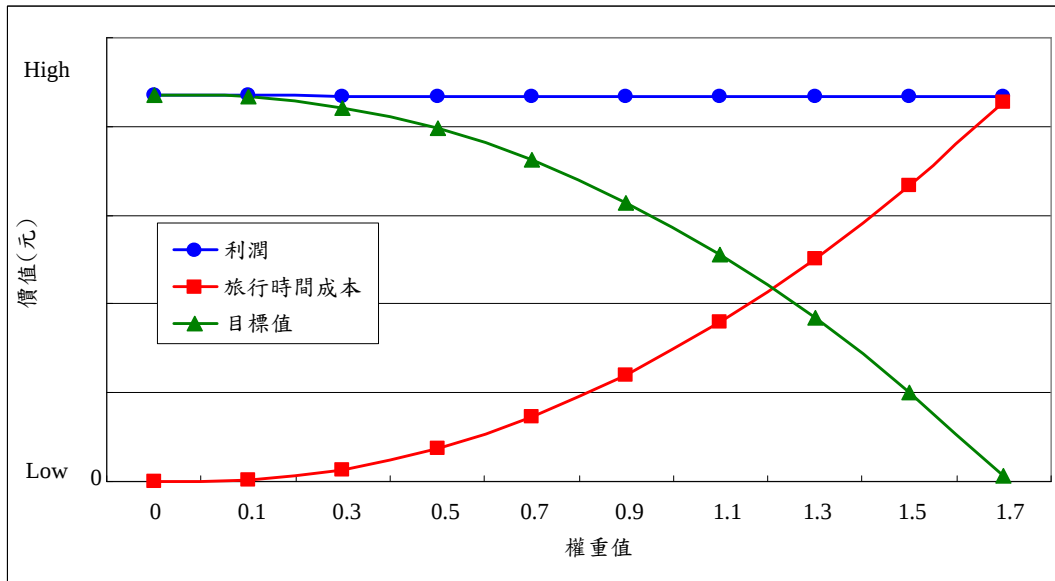


圖 12 旅行時間成本權重值敏感度分析

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	—