

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 公車即時調度排班系統之開發與建立研究--以新竹客運為例 The development of a real time bus dispatching and scheduling system – A case study of Hsinchu City

計畫編號：NSC 88-2211-E-009-017

執行期限：87年7月1日至88年6月30日

主持人：王晉元 執行機構及單位名稱：交通大學 運輸工程與管理學系

### 一、中文摘要

為了提倡使用大眾運輸系統，在政府的推動下，近幾年來已陸續有一些單位開始利用衛星定位系統或是相關技術來獲取行駛中公車的位置，並將公車的位置告知乘客。然而在現階段的系統中，都只是單純地來展示公車的定位資訊，並沒有在營運管理上針對該項資訊來作更進一步的應用。本研究的目的在於利用新竹客運市區公車的衛星定位訊號，以及所行駛路線為基本資料來源，配合傳統組合優化的技術，發展一套具有數學理論基礎且具有效率的演算法，使新竹客運的市區公車因故無法準時發車時，能夠根據所收集到的各項資料來進行即時調度，盡量使每輛車都能準時發車，以確保該公司的服務品質，並進而達到鼓勵使用大眾運輸工具的目的。

關鍵詞：機動調派、全球定位系統、組合優化

### Abstract

A couple of real time bus information systems were implemented in recent years in order to promote the usage of public transportation. These systems utilize Global Positioning System (GPS) or some other related techniques to obtain the buses' locations. It is not considered a full-blown usage of positioning information, if it is just used to display the locations of buses. It does not contribute to the operational efficiency and effectiveness of bus companies. A bus may not be able to be dispatched as planned when traffic jams or some other incidents occur. The objective of this research is to integrate the positioning information as well as the traditional combinatorial optimization techniques to development a mathematics based model and algorithm for the above stated purpose. We will implement this model with Hsinchu Bus Company for testing purpose.

**Keywords:** Dynamic Dispatching, GPS, Combinatorial Optimization

### 二、緣由與目的

近幾年來國內小汽車持有之成長快速，但是道路、停車場等公共設施之建設卻緩不濟急且供不應

求，尤以台灣地狹人稠的不利環境，道路交通擁擠的問題也顯得更加嚴重。因此政府主管單位除了致力研究如何疏導、分散車輛分佈之外，也大力提倡使用大眾運輸系統。

然而在提倡使用大眾運輸系統上，常受到道路擁擠的影響使得公共汽車的到達時間過長且無法預測，造成民眾無法充分控制其行程，也使得不耐等候的民眾轉用其他運輸工具，不僅造成大眾運輸系統乘客的流失，也無法吸引原本私有運具的使用者。因此在這幾年來，在政府的推動下，已陸續有一些單位開始利用衛星定位系統或是相關技術來獲取行駛中公車的位置，並將公車的位置告知乘客，以提高搭乘的意願。

然而在現階段的系統中，大都只是單純地來展示公車的定位資訊，並沒有在營運管理上針對該項資訊來作更進一步的應用。如果只是單純地顯示公車的位置，對公車業者的整體營運而言，並沒有太大的幫助。例如當道路嚴重壅塞，或是因為臨時發生的事件（如人員生病或是車輛故障等），而導致某條路線預期應該派出的車輛無法準時發出時，如果能利用車輛衛星定位的訊號來確定每輛車的位置，然後再配合當時實際的車輛行駛速度，當可在不影響其他路線發車時間的情形下，利用原先預計行駛其他路線的車輛來行駛該條路線，以做出即時的車輛調派，使得車輛能準時發車，以確保服務的品質，進而能夠提升民眾使用大眾運輸的意願。

由於這項機動調度必須在一有事件發生時，便即進行即時的指派，因此在運算過程必須考慮到演算的速度，同時也考慮到數學模式通常無法完整地來表示真實的狀況，因此也必須提供一個人工調整的界面，來讓調度人員能夠進行人工的調派。

本研究將以新竹客運公司的市區公車以之行車調派為本研究的範圍，其中包含四十輛市區公車，行駛約二十條的公車路線。

本研究的目的是在於利用新竹客運市區公車的衛星定位訊號，以及所行駛路線為基本資料來源，配合傳統組合優化（Combinatorial Optimization）的技術，發展一套具有數學理論基礎且具有效率的演算法，使新竹客運的市區公車因故無法準時發車時，

能夠根據所收集到的各項資料來進行即時調度，盡量使每輛車都能準時發車，以確保該公司的服務品質，並進而達到鼓勵使用大眾運輸工具的目的。

### 三、結果與討論

本研究計劃公車即時機動調度的研究核心在於研究當偶發事故發生而導致班次發生延誤時，能根據目前之衛星定位資訊配合數學模式提供公車調派方案供調度者參考使用，以提昇公車之準點性能提昇並增加公司整體之營運效率。

首先，我們將此一問題化成網路模式來進行研究。圖 1 為本研究之網路示意圖。茲將網路中各元素所代表之意義說明如下：

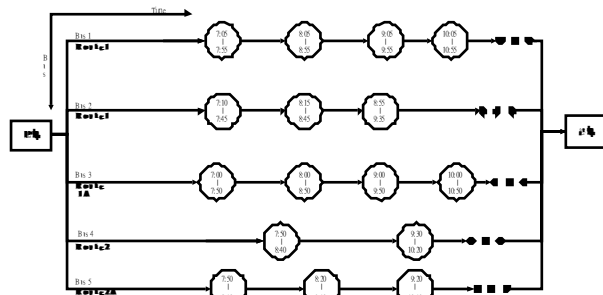


圖 1 班次網路示意圖

橫軸：代表時間軸，表示各車輛在各個時的位置。

縱軸：代表車輛，本研究中將所有車輛順序編號，而每一輛車會有所服務的路線屬性。

起點：為一虛擬點，代表營運時間開始。

迄點：為一虛擬點，代表營運時間結束。

節點：代表一個班次，每個班次有起始時間 (ST) 與結束時間 (ET) 兩個屬性，表示車輛必須在 ST 由場站出發，執行完所屬路線後預計於 ET 返回場站休息，然後執行下一班次。

節線：主要用以連接班次，以 bus1 為例，當執行完 6:05 的班次之後，其下一個連接的班次為 7:05。

任務路徑：由數個班次所串連起來，其表示某車輛所執行之班次，以 bus1 為例，其一天所執行的班次順序為 6:05、7:05、8:05、9:05...，以下文章將任務路徑簡稱為任務。

在進行機動調度時，為達到即時回應的要求，不可能對整個班次路網進行求解。以目前個人電腦的計算速度而言，不可能短時間在如此龐大的班次路網中求出最佳解；因此，首先定義預警線與回復

線兩參數值，該參數值可由調度者自行輸入。這兩條線主要用以從班次路網中界定出機動路網的範圍，使得求解時的路網規模縮小並能涵蓋所有可能被調度之班次。

在正式介紹在本研究所將會所用的模式前，首先必須介紹兩個名詞：預警線與回復線。

在介紹預警線之前，吾人先介紹預警時間，此值為使用者給定之參數之一。若設定預警時間為 5 分鐘，則系統自動檢查 5 分鐘後即將發車的班次是否能順利發出，若發現無車可發則啟動機動調度功能，啟動之後。假設預警時間為 5 分鐘，當系統時間為 7:55 分鐘時發現 Bus3 (路線 1A) 因車輛塞在路上無法回來執行 8:00 的班次 (圖 2 中之黑點)，因此吾人設定 7:55 為預警線，而 8:00 這個班次即為擾動班次。當預警線切下來後，預警線之前一個班次表示現正被執行或停留在調度站休息的車輛，而這些車輛皆為可考慮被用來機動調度的車輛，因此對各任務路徑而言，預警線之前一班次即為機動調度路網的起始。

相對於預警線，回復線其功能在於界定機動調度路網結束，也就是回復線後各車次之執行按照班次路網之車次進行。回復線之計算是以擾動車次之起始時間加上最大容忍回復時間即為回復線的位置，而最大容忍回復時間亦是由使用者輸入之參數之一。由於各車次之週轉時間不盡相同，故回復線之前一點 (班次) 為路網之結束點。延續前例，設定最大容忍回復時間為 2 個小時，則回復線為 10:00。圖 2 中之黑框即為一機動調度路網。

界定出機動調度路網後，本研究之問題即在此一路網中求解出最佳的調度方案 (一組任務)，吾人將問題視為一集合分割 (set partition) 的問題，亦即在此路網中找出一組成本最小的任務 (每一任務可視為一班次集合)，使得機動調度路網中所有的班次皆被執行一次且只能一次。

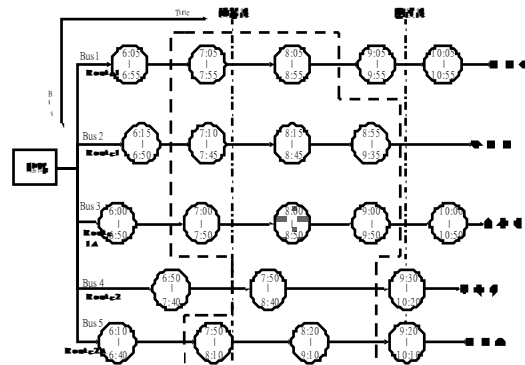


圖 2 機動調度網路示意圖

對任一任務  $X_d$  而言，其成本由三項指標所構成，分別是變動指標 (Impact indicator,  $I_d$ )、延誤指

標 (Recovery indicator,  $Y_d$ ) 以及取消指標 (Cancellation indicator,  $CL_d$ )，亦即  $C_d = w_1 I_d + w_2 Y_d + w_3 CL_d$ ，其中  $w_1, w_2, w_3$  為使用者自定之罰值，用以區別出各指標的重要程度。茲將各指標說明如下：

1. 變動指標：以數學符號  $I_d$ ，表示一任務  $X_d$  之班次變動程度，亦即以任務中不同班次的個數除以路網中之總路線數，如式(1)所示，若

$x_1 = \{j_1^5, j_4^1, j_6^6, j_4^5\}$ ，表示任務  $x_1$  之執行順序為路線 5 第一個班次、路線 1 第四個班次、路線 6 第六個班次以及路線 5 第四個班次，則其不同路線的個數為 3(路線 5、1、6)，假設路網中共有 10 條路線，則  $I_1 = 3/10$ 。 $I_d$  之值介於 0 到 1 之間。

$$I_d = \frac{\text{任務 } d \text{ 中不同路線之個數}}{\text{路網中之路線總合}}$$

2. 延誤指標：以數學符號  $Y_d$ ，表示一任務  $X_d$  之延誤程度，當任一擾動班次經過機動調度後仍無法按照預定班表發車時，吾人不能因其無法準時發車而將此一班次取消，此舉將造成旅客之平均等候時間大於一個班距長度，長期下來將造成旅客流失。為此，吾人允許班次之發車時間產生延誤，其延誤時間為大於等於零小於等於該路線之班距。因此，延誤指標定義為任務  $d$  之延誤程式。

$$Y_d = \frac{\text{任務 } d \text{ 中各班次之延誤時間的總合}}{\text{任務 } d \text{ 中各班次之執行時間}}$$

3. 取消指標：以數學符號  $CL_d$ ，若  $x_d$  為一班次取消之任務，則其取消指標等於 1，否則等於零。所謂班次取消之任務，乃指該任務中僅包含一班次，例如  $x_1 = \{j_1^5, j_4^1, j_6^6, j_4^5\}$ 、 $x_1 = \{j_1^5, j_4^1, j_6^6, j_4^5\}$  則  $x_1$  為一班次取消之班次，因此  $CL_1 = 1$ ，而  $CL_2 = 0$ ，式(3)為取消指標之表示式。

$$CL_d = \begin{cases} 1 & \text{；假如任務 } d \text{ 為班次取消之情形} \\ 0 & \text{；其它情形} \end{cases}$$

吾人先前雖已定義出回復線用以限定機動調度路網之規模以及系統回復時間，然吾人希望回復時間能愈早愈好，因此本研究定義另一決策變數  $R$ ，使得系統回復時間愈早愈好。吾人以數學模式來更清楚的描述本研究計劃公車即時機動調度之問題，首先吾人先定義每個符號：

本研究之決策變數有二：一為  $x_d$ ，表示任務路徑  $d$  是否被選擇，若  $x_d = 1$  表示在最佳解中包含  $x_d$ ，另一決策變數為回復變數  $R$ 。吾人可將問題之數學模式表示如下：

$$\text{Min } \sum_{d \in D} C_d x_d + w_4 R \quad (4)$$

s.t.

$$\sum_{d \in D} x_d = 1 \quad k \in K', j \in J \quad (5)$$

$$r_d x_d - R \leq 0 \quad d \in D \quad (6)$$

$$x_d \in \{0, 1\} \\ R \geq 0$$

目標式(4)之第一項在於最小化調度方案之成本，而第二項則是最小化回復時間，其中  $w_4$  為使用者自行給定之罰值。限制式(5)表示最佳調派方案必須涵蓋機動調度路網內之所有班次，且恰為一次。也就是同一班次僅能由一任務所執行，不能同時由兩個及兩個以上任務所執行。限制式(6)與目標式第二項是相互呼應，目的在於使回復時間愈小愈好，式(6)中之  $r_d$  表示任務  $d$  之回復時間，也就是任務最後一班次之結束時間減去預警線的時間。

本研究所構建之模式為一整數規劃問題，若以傳統分枝定限法(Branch and Bound)來求解，則會有求解時間過長的缺點。Column generation 法除具較嚴謹之學理基礎，且該法保證收斂到最佳解，其對於路網規模之敏感不較內部窮舉法明顯，綜合上述比較，本研究計劃將採用 Column generation 來求解在本研究所欲構建之模式。

Column generation 主要是利用線性規劃中之對偶理論來產生組合(任務<sup>(2)</sup>)，如此可避免浪費不必要的時間來窮舉不可行的組合。針對主問題之限制式(5)與(6)，定義對偶變數  $\pi_k$  與  $\sigma_d$ ，根據對偶理論可獲得主問題之對偶問題如(7)所示。

$$\text{Max } \sum_{k \in J} \pi_k + 0 \sum_{d \in D} \sigma_d$$

s.t.

$$\sum_{k \in J} \pi_k a_{dk} + r_d \sigma_d \leq C_d \quad (7)$$

$$-\sum_{d \in D} \sigma_d \geq w_3$$

$$\pi_k \text{ free}$$

$$\sigma_d \geq 0$$

$$a_{dk} = \begin{cases} 1 & \text{；假如任務 } d \text{ 中包含班次 } k \\ 0 & \text{；otherwise} \end{cases}$$

根據單純法之對偶可行性可知：如果可證明對尚未考慮的任務均滿足式(8)則找到最到最佳解，否則吾人可以從這些尚未考慮到的任務中找出一個新的任務  $i$ ，使得  $C_i - (\sum_{k \in J} \pi_k a_{ik} + r_i \sigma_i) < 0$ 。亦即吾人在求解式(9)。在式(9)，由於  $\sigma_d$  對於目標式之影響並非直接，故可將式(9)簡化為式(10)，並針對其求解最短路徑的問題，求解出的最短路徑即為一任務。

$$C_d - (\sum_{k \in J} \pi_k a_{dk} + r_d \sigma_d) \geq 0 \quad d \in D \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{k \in J} \pi_k a_{dk} + r_d \sigma_d \quad d \in D \\ & \text{s.t.} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{d: k \in D} a_{dk} = 1 \quad k \in K', j \in J \\ & a_{dk} = \{0, 1\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{k \in J} \pi_k a_{dk} \quad d \in D \\ & \text{s.t.} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{d: k \in D} a_{dk} = 1 \quad k \in K', j \in J \\ & a_{dk} = \{0, 1\} \end{aligned}$$

根據前面所述，吾人以求解式(10)來產生一新的任務，直到找到最佳任務組合。任務產生的步驟如下：

先給定一起始解，本研究中給定的起始解為取消擾動班次，亦即其餘各路線皆不調動而各任務之成本為 0，為讓任務產生時能排列組合成各種可能之任務，本研究加入取消每個班次的任務，即任務中僅含有一個班次，而任務之成本為  $w_3$ 。

求解 LP relaxation：起始解產生後，求解 LP relaxation，並獲得路網中各班次之對偶值。

構建成本矩陣：有了各班次之對偶值後，將各班次之延誤節點加入路網中並將延誤節點之對偶值設定為所屬之班次，例如班次  $J_2^1$ ，假設延誤間隔時間為 5 分鐘，在回復時間的限制之下，其允許有 23 分鐘的延誤，則對於班次  $J_2^1$ ，其增加之延誤節點有  $J_{21}^1$ 、 $J_{22}^1$ 、 $J_{23}^1$ 、 $J_{24}^1$  四個點，以  $J_{23}^1$  為例，該延誤節點表示班次  $J_2^1$  延誤 15 分鐘，為方便表示吾人將原來不延誤的班次以  $J_{20}^1$  表示。因此班次  $J_2^1 = \{J_{20}^1, J_{21}^1, J_{22}^1, J_{23}^1, J_{24}^1\}$ ，而  $J_2^1$  中之各班次之對偶值皆為一樣。每班次之延誤節點加入之後，即構建節點間的成本矩陣，對任意節點  $i, j$  而言，若  $ST_i \geq ET_i$  則節點  $i, j$  間存在一節線，而該節線的成本  $c_{ij} = DP_j + \omega_3 Dly_j + e^{(ST_j - ET_i)}$ ，其中  $DP_j$  為節點  $j$  之對偶值， $Dly_j$  為節點  $j$  之延誤時間，為表示節點間之時間的差異，本研究以將節點間之時距取指數，即  $e^{(ST_j - ET_i)}$ ，此舉可避免求解最短路徑時，造成任務之班次發生跳躍的情形。若  $ST_i < ET_i$  則  $c_{ij} = \infty$ 。

求解最短路徑：成本矩陣構建完成後，即求解

最短路徑，路徑起點為機動調度路網中各路線之第一個節點，而迄點則為最後一個節點。每一條最短路徑即為一任務。

加入新任務：為使任務產生更有效率或更早發現班次無法調度的情形，首先檢查在步驟 4 中各車輛所找出之最短路徑是否包含擾動班次，若所有最短路徑皆不包含擾動班次，則表示目前沒有車輛可以支援擾動班次，此時演算法停止，結果為取消或延遲擾動班次。因為若調度支援可行則求解出之最佳任務組合中必包含兩個任務以上。若其它車輛之最短路徑包含擾動班次，則將此新任務加入模式中重覆步驟 2-5 直到滿足式(8)。若包含擾動班次的車輛不只一部，則分別以產生一組任務，最後再比較各組任務之目標值。目標值最小的即為最佳機動調度任務組合。

先前提及由於本研究在求解最佳調度方案，因此若調度可行，則調度方案間是一組任務組合，若每次直接只加入單一任務，則回到步驟 2 時，該單一任務並不會自動被選上，因此為本研究強迫新加入的任務被選上，即變數值設為 1，這樣才能由新加入的任務再去產生下一個新的任務。當所有車輛皆加入模式而目標值仍有於起始解之目標值，則表示該組合不是最佳解。

上述任務產生方法在實際測試中顯示在約百分之四十的情形中可以在合理時間內即可找到可以彼此支援的調度方式。

#### 四、計畫自評

已完成計畫書中所有預計完成的事項。本研究的成果，已預計在 1999 年於加拿大多倫多舉行的第六屆智慧型運輸系統中發表，並也已寫成論文投稿期刊中。

#### 五、參考文獻

1. Cattrysse, D., Maes, J., and Van Wassenhove, L.N., "Set partitioning and column generation heuristics for capacitated dynamic lotsizing", *European Journal of Operational Research*, Vol.46, 1990, pp.38-47.
2. Celso, C.R., Minoux, M., and Perma, M.C., "An optimal column-generation-with-ranking algorithm for very large scale set partitioning problems in traffic assignment", *European Journal of Operational Research*, Vol. 41, 1989, pp.232-239.
3. Lancaster, K., "A New Approach to Consumer

Theory" , *Journal of Political Economy* , 174 , pp. 132-157 , 1966 .

4. Lavoie, S., Minoux, M., and Odier, E., "A New Approach for Crew Paring Problems by Column Generation with an Application to Air Transportation", *European Journal of Operational Research*, Vol. 35, pp.45-58, 1988.
5. 周義華, 吳宗憲, "公車路線間相互支援之排班專家系統", *運輸計劃季刊*, 第二十六卷, 第一期, 1997, pp. 159-202.