

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

結合適應性號誌控制與適時化轉運策略在公車營運路線之應用

A Joint Application of Adaptive Signal Control and Timed Transfer Strategy to Transit Route Operations

計畫編號：NSC 89 - 2416 - H - 009 - 014

執行期限：88 年 08 月 01 日至 89 年 07 月 31 日

主持人：林貴璽 gslin@cc.nctu.edu.tw 國立交通大學運輸工程與管理學系

一、中文摘要

公車運輸一直是乘載旅客最有效的運具之一，其經由充分有效地利用能源、勞動力 以及有限都市空間的優點與私有運具相抗衡，然公車運輸亦存在一些諸如不易控制車輛在營運路線的速率以避免造成車隊 由場站發車時間的不確定性、以及不易整合各接駁的路線等問題，因此勅期發展有效的對策便成為交通主管當局、業者、以及一般公車使用者所關切的急務。

本研究目標在以經濟有效的路線控制方式，由一套結合路線適應性號誌與場站適時化轉運的整合模式來探討必須經由轉運作業的公車運輸服務特性，此一整合模式著重於最佳化 (1) 公車發車間距，(2) 接駁公車路線的寬容時間，(3) 個別公車路線的遲延時間，以及 (4) 相關的交通號誌控制參數，如最大展延時相長度、最大與最小時相長度等以及在各種交通水準之下，評估公車路線的控制績效。

關鍵詞：轉運適時化，寬容時間，延遲發車時間，號誌化優先通行控制，公車優先通行

Abstract

Bus transit has long been effective in transporting passengers to their destinations. The benefits of using buses, such as its efficient use of energy, labor, and congested urban space, make bus transit competitive with the private cars. However, there also exist some notable problems that may affect the performance of bus operations, thus increasing cost to bus operators and

passengers. Such problems may include the ineffectiveness of controlling bus travel speeds along transit routes to prevent frequent bus bunching, the uncertainty of bus dispatching at terminals, and the difficulties of coordinating transit routes (lines) at transfer terminals, etc. Thus, developing effective treatments for some of these problems has become more urgent and important to traffic authorities, transit agencies, and the general public.

This study explores the major issue of how route control activities can help to achieve more reliable services in a bus transit system relying on transfers. The incorporation of signalized route control with transfer system operations will especially emphasize the optimization of (1) the bus service headways, (2) the slack times for all transit routes to be coordinated, (3) the holding times for individual transit routes to provide higher headway stability and schedule adherence, and (4) the signal timing parameters (e.g. maximum phase extension, maximum and minimum phase durations) for all transit routes, and the assessment of route control performance at various demand levels.

The goal of this study is a system operation to help control transit route connections sensibly and economically and provide reliable on-time bus services with transfers at lowest possible cost to transit operators, passengers, and related auto users.

Keywords: Timed Transfer, Slack Time, Holding Time, Signal Preemption, Bus Priority

二、緣由與目的

隨著社會經濟與個人所得的成長，私人運具的擁有與使用率也逐漸提升，然而因道路容量的限制，若任由私人運具使用率持續高成長，則將有導致重要道路系統癱瘓之虞；基於此種直接的理由，各國莫不致力於大眾運輸系統的發展，提供完整的路網規劃、有效的營運配合策略、低廉的費率，以及提高可及性與班次密集度等的服務，冀望將多數旅客導入大眾運輸營運中，以降低私人運具的使用率，進而改善道路擁擠的狀況。惟大眾運輸工具無法如私人運具般提供所有旅客起迄點間的及戶服務，因此為了增加大眾運輸營運的競爭力，必須在構建一套完整的大眾運輸路網之下，加強各大眾運具間的整合，以充分掌握乘客的旅次需求。從營運效率的觀點來看，大眾運具間整合的成敗關鍵，除了考量路網配置的完整性之外，另一重要因素就是轉運機制的優劣性。

一般而言，轉運旅客常以等候時間來衡量轉運系統的服務績效，都市公車系統轉運作業的績效常取決於“內部場站轉運策略” - 如整合班距、適時轉運等與“外部路線控制策略” - 如專用路線與設施規劃、車輛優先通行控制等的配合。不同的大眾運輸路線所面臨的外在交通、幾何與控制狀況互異，因此當旅客對轉運的品質期望極為殷切時，以更動態的方式控制轉運路線上公車（或其他運具）的運行將成為最重要的策略之一。以今日進步迅速的交通控制技術來看，一個簡單的路線號誌控制模式都可多少在提高行車速率或減少控制延誤的前提下，滿足旅客對大眾運輸品質的要求，若能進一步與轉運策略相整合，將可相當程度地提高整體大眾運輸路網的服務績效。

自 1970 年代以來，單純以場站適時化轉運策略或號誌化車輛優先通行策略的特性分析與執行案例甚多；有關公車排班與轉運作業，大致以公車可靠性分析 [12, 13]、車輛抵達時間分配 [2, 4, 9, 11]、轉運排班策略 [36, 37, 40]、轉運路線與區位選擇 [36, 37, 38, 39]、以及適時化轉運 [2, 5,

6, 7, 8, 10] 等為主題；而號誌化車輛優先通行控制則可以模式發展 [14, 21, 22, 31, 32]、模式的實際測試與應用 [18, 19, 26, 27]、控制策略評估 [16, 18, 19, 23, 25, 33, 35]、以及理論研究 [15, 24, 25, 28, 29, 30] 等為重點。

本研究在上述營運考量與文獻啟發之下，以同時簡化轉運路網結構與運具種類的方式，發展一套大眾運輸路線適應性號誌優先通行策略與轉運點的適時化轉運策略的整合模式，經由這兩種策略間的互動來協助穩定公車運行間距與降低旅客在各站位的停等時間，並整合（或協調）各大眾運輸接駁路線車輛到達轉運站位的時間，以降低轉運的時間延誤。

三、結果與討論

（一）結果

基於簡化號誌路網公車轉運作業的考量，本研究以兩條接駁路線、單一轉運站位為重點。研究作業主要包括轉運系統架構與模式開發，以及模式操作與情境比較等兩個階段。

1. 系統架構與模式開發

通常公車行駛於一般道路中，較容易受交通、道路、與管制狀況的影響，因此公車的旅行時間會有較大的變異性且較難控制；對這項旅行時間的變異是以公車營運路線的號誌控制策略來改善，以期符合所有接駁公車在轉運站位發車班表的定點要求或至少在所訂的寬容時間內完成接駁作業。

前述號誌控制決策是經由一連串的成本評估而得，成本函數採取階層化系統成本結構 (hierachical cost structure) 的方式來發展；系統成本項目包括私有小型車成本、接駁運具成本、以及運具使用者成本等三項，而在結合號誌化路線控制與適時化轉運作業後整體的系統成本結構可區分為：(1) 區域階層成本、(2) 路線階層成本與 (3) 路網階層成本（如圖 1）。相對於各階層的成本結構，整體系統控制作業也可區分為三個階層，即區域控制階層、路線控制階層、與路網控制階層，其最佳化

控制架構如圖 2。

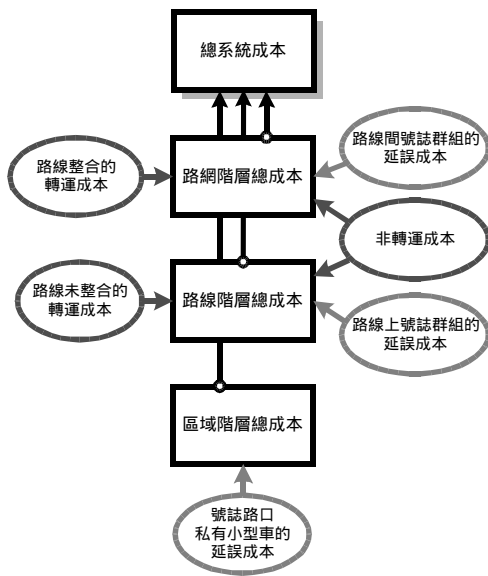


圖 1 階層化系統成本圖

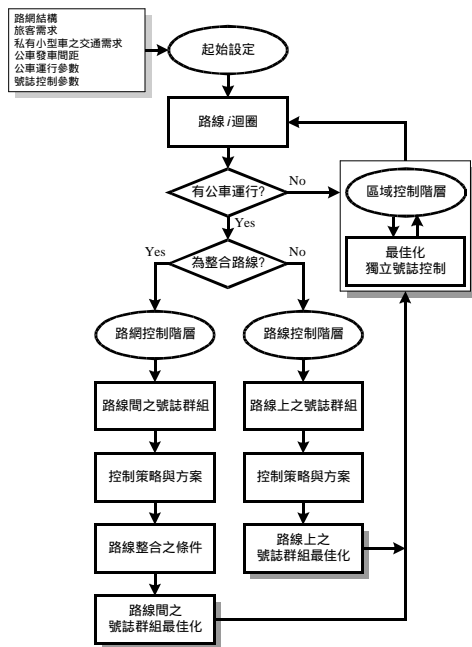


圖 2 階層控制最佳化架構圖

2. 模式運作與情境比較

(1) 路線控制階層

以 OPAC 水平滾動搜尋法所得的最佳號誌轉換點為區域階層的控制基礎，路線階層則以模組化控制任一區域階層所含相鄰的號誌節點，採最小化系統成本為目標(如

幹線延誤時間、公車延誤時間、轉運等候時間、系統總時間成本等)。模組在離線狀況下的控制績效(如續進有效性、到達性、準點偏差等)是以幹線三個連續節點在不同的幹線流量水準下進行 60 分鐘定性操作而得，並與 PASSER IV 定性時制經 TRAF-NETSIM 模擬結果相比較；圖 3 顯示本模式在路線階層的續進有效性會隨交通需求與用路人的時間價值而變，惟因強制幹線續進所衍生的平均每車延誤時間亦隨續進流量增加而加大，此為後續時制補償的必然結果(圖 4)。

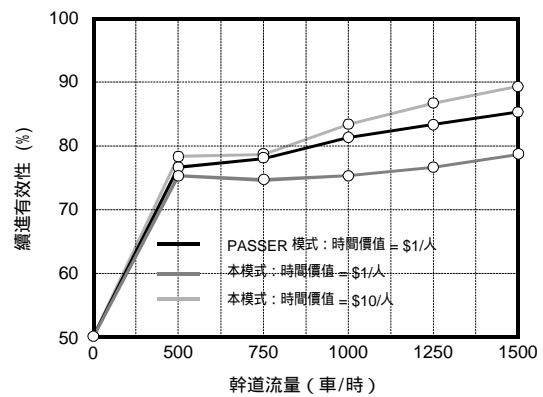


圖 3 路線階層的續進有效性

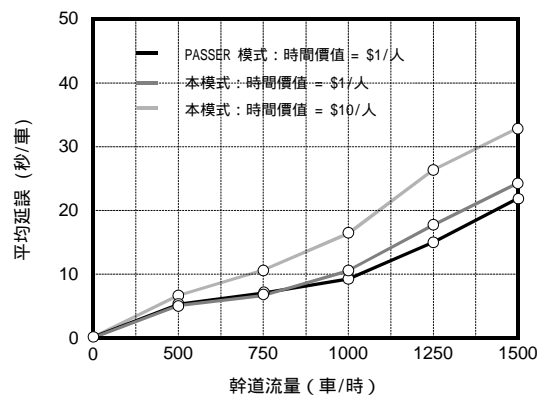


圖 4 路線階層的平均延誤趨勢圖

(2) 路網控制階層

公車轉運路網中，在單位營運成本、車輛承載率、平均迴車時間、乘客需求率、轉運比率、以及相關的時間價值等為已知之下，公车的非轉運成本是決定班距的主要因素，因此本階層是以整合各適時轉運

路線接駁運具的準點性為目標，相對於無控制路線的營運，其間的相關成本比較如表 1。

表 1 路網階層控制方式的系統成本表

控制方式	營運成本 (\$/分鐘)	候車成本 (\$/分鐘)	行車成本 (\$/分鐘)	延誤成本 (\$/分鐘)	轉運成本 (\$/分鐘)
定時式	46.1	21.4	132.5	9985.5	8.6
公車優先	46.1	21.4	107.0	10142.8	7.8
適應式	46.1	21.4	117.4	9892.0	6.1

註：整合班距為 20 分鐘，無限班車容量、每一路線含 10 個號誌節點，預設週期 80 秒， $g/C = 0.5$ ，轉運寬容時間 2 分鐘與遲延發車時間 1 分鐘。

(3) 情境組合與比較

對任何已知的路線控制策略而言，所推估的動態系統成本是個別號誌或號誌群組執行特定控制決策的指標，本研究針對五種營運路線控制情境加以比較，相關成本與準點性如表 2。

- A. 未整合路線、定時式號誌控制
- B. 適時化轉運整合、定時式號誌控制
- B. 適時化轉運整合、公車優先通行控制
- C. 適時化轉運整合、公車續進號誌控制
- D. 適時化轉運整合、適應性號誌控制

表 2 不同情境下的系統分析表

控制方式	非轉運成本 (\$/分鐘)	轉運成本 (\$/分鐘)	延誤成本 (\$/分鐘)	系統成本 (\$/分鐘)	準點標準差
情境 A	200.0	N.A.	9985.5	N.A.	N.A.
情境 B	200.0	8.6	9985.5	208.6	1.26 分
情境 C	174.5	7.8	10142.8	178.3	1.35 分
情境 D	182.4	6.6	9806.0	189.0	1.19 分
情境 E	184.9	6.1	9892.0	190.4	1.02 分

註：相關預設參數同表 1。

(二) 討論

1. 研究方法：

轉運系統的營運規劃策略最常受限於到達班距的變異，路線愈長，變異性愈大；此一變異由本研究的簡化模式顯示可予以縮減，並增加準點性，惟本模式對於路網規模不大的路線控制效果無以定論，主要癥結在於少量節點的控制對節省時間成本的效益不明顯所致。

精確即時的系統資訊是本模式的動作前提，但卻常是被詬病的議題。若資訊供給

前提成立，則以準點轉運為訴求的控制概念應可以『即時修正班距或班表』的邏輯來取代傳統最小化系統成本的目標式，除了可直接引用傳統轉運站位的派車規劃架構外，亦可簡化路線控制模式。

2. 研究結果：

- (1) 轉運站規劃的車輛到站時間應適當，預測公車平均旅行時間過短，常須藉優先式或續進式控制協助；時間過長則以適應性控制最佳（表 2）。
- (2) 強制修正時制必衍生後續號誌補償的問題，因此所導致的節點延誤成本以優先式控制最高。
- (3) 準點性以適應性控制最高，本研究發現在不同的預測到達時間下，此種控制具有低標準差與高適用彈性的特點（表 2 為一例）。

四、計畫成果自評

有鑑於系統複雜度與資源限制（包括計算機設備、路網即時交通資訊等），本研究僅針對兩條公車營運路線的轉運系統進行探討，模式的核心工作是將路線的號誌連鎖、路網的公車轉運配對、以及轉運中心的發車班表同時納入決策考慮，故簡化的模式弱點至少包括：

1. 營運路線設定為單純迴車式，沿線站位需求與各節點間的預測公車到達時間（含進出虛擬站位）為定值。
2. 營運路線各節點均為號誌二時相單車流動線直行控制，避開時制尋優、車道變換、以及車輛到達模組的複雜性，與實際運作略有出入。
3. 對不同的配對公車組視為相互獨立，故發車班距有不短於 20 分鐘的預設下限，連帶亦影響轉運站的寬容與遲延發車時間。
4. 僅模化等班距轉運作業。

過去純粹基於規劃轉運系統營運或發展號誌控制策略的研究甚多，本研究為結合該兩種系統的發軔，待改進之處甚多；惟檢討原預定工作項目，達成程度已在 90% 之際，未來值得進一步執行相關參數的敏感性分析。

本研究檢視路線節點的延誤成本遠高於其他各單項成本，這是主管當局應審慎評估該機會成本效益適用對象的重要理由，因此對轉運系統的控制策略（包括站位與路線）的掌握將是本研究的另一挑戰。

本研究部分研究結果經整理已投稿於 *Journal of Advanced Transportation*，刻正進行審查中。

五、參考文獻

- [1] Abkowitz, M., Josef, R., Tozzi, J. and Driscoll, M. K., *Operational Feasibility of Timed Transfer in Transit Systems*, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 113, No. 2, pp. 168-177, 1987.
- [2] Bookbinder, J. H. and A. Desilets, *Transfer Optimization in a Transit Network*, *Transportation Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 106-118, 1992.
- [3] Gary, B. H. (Editor), *Urban Transportation Glossary*, *Transportation Research Board, National Research Council, Washinhton, D.C.*, 1989.
- [4] Guenther, R. P. and Hamat, K., *Distribution of Bus Transit On-Time Performance*, TRR 1202, pp.1-8, 1989.
- [5] Hall, R. W., *Vehicle Scheduling at a Transportation Terminal with Random Delay en Route*, *Transportation Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 308-320, 1985.
- [6] Lee, K. T. and Schonfeld, P., *Optimal Slack Time for Timed Transfers at a Transit Terminal*, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 25, No. 3, pp. 281-308, 1991.
- [7] Lee, K. T., *Optimization of Timed Transfer in Transit Terminals*, Ph. D. dissertation, Civil Engineering Dept., Univ. of Maryland, College Park, 1993.
- [8] Lee, K. T. and Schonfeld, P., *Real-Time Dispatching Control for Coordinated Operation in Transit Terminals*, TRR 1433, pp. 3-9, 1994.
- [9] Talley, W. K. and Becker, A. J., *On-Time Performance and Exponential Probability Distribution*, TRR 1108, pp. 22-26, 1987.
- [10] Ting, C. J., *Transfer Coordination in Transit Networks*, Ph. D. Dissertation, Civil Engineering Department, Univ. of Maryland, College Park, 1997.
- [11] Turnquist, M. A., *A Model for Investigating the Effects of Service Frequency and Reliability on Bus passenger Waiting Times*, TRR 663, pp. 70-73, 1978.
- [12] Turnquist, M. A., *Evaluating Potential Effectiveness of Headway Control Strategies for Transit System*, TRR 746, pp. 25-29, 1980.
- [13] Turnquist, M. A., *Strategies for Improving Reliability of Bus Transit Service*, TRR 818, pp. 7-13, 1980.
- [14] Radwan, A. E. and Hurley, J. W. . *Macroscopic Traffic Delay Model of Bus Signal Preemption* ,TRR 881 ,pp. 59-65, 1982.
- [15] Richardson, A. J. and Ogden, K. W. . *Evaluation of Active Bus-Priority Signals* , Committee on Bus Transit Systems , pp5-12.
- [16] Cisco, B. A. and Khasnabis, S. . *Techniques to Assess Delay and Queue Length Consequences of Bus Preemption* , TRR 1494 , pp. 167-175, 1995.
- [17] Han, B. and Yagar, S. , *Real-Time Control of Traffic with Bus and Streetcar Interaction*, .
- [18] Benevelli, D. A., Radwan, A. E. and Hurley, J. W. , *Evaluation of a Bus Preemption Strategy by Use of Computer Simulation* , TRR 906 , pp. 60-67, 1983.
- [19] Liebermam, E. B., Muzyka, A. and Schneider, D. , *Bus Priority Signal Control : Simulation Analysis of Two Strategies* , Abridgment , pp. 26-29.
- [20] Lin, F. B., Cooke, D. and Vijyakumar, S. , *Use of Predicted Vehicle Arrival Information for Adaptive Signal Control - An Assessment* , TRR 1112 , pp. 89-97, 1987.
- [21] Chang, G. L., Vasudevan, M. and Su, C. C. , *Bus Preemption Under Adaptive Signal Control Environments* , TRR

- 1494 , pp. 146-153, 1995.
- [22] Jacobson, J. and Sheffi, Y. , *Analytical model of Traffic Delays under Bus Signal Preemption : Theory and Application* , Transportation Research Vol.15B , pp. 127-138, 1981.
- [23] Wattleworth, J. A., Coruage, K. G. and Wallace, C. E. , *Evaluation of Bus-Priority Strategies on Northwest Seven Avenue in Miami* , Abridgment , pp. 32-35, 1973.
- [24] Labell, L. N., Schweiger, C. P. and Kihl, M. , *Advanced Public Transportation Systems : The State of the Art Update '92* , pp. VIII – XVII, 1992.
- [25] Roupail, N. M. , *Operational Evaluation of Bus Priority Strategies* , TRR 994, pp. 30-34, 1984.
- [26] Cornwell, P. R. , *Dynamic Signal Co-Ordination and Public Transport Priority* , Selections Pertaining to : *Bus Priority at Signalized Intersection* , pp. 158-160, 1992.
- [27] Salter, R. J. and Shahi, J. , *Prediction of Effects of Bus-Priority Schemes by Using Computer Simulation Techniques*.
- [28] Casey, R. F., Labell, L. N., Holmstrom, R., LoVecchio, J. A., Schweiger, C. L. and Sheehan, T., *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art Update '96* , pp. X - XVI, 1996.
- [29] Samuel, R. and Robert, N. *Methodology for Evaluating Bus-Actuated, Signal-Preemption System* , TRR 630 , pp. 11-17, 1997.
- [30] Yagar, S. , *Efficient Transit Priority at Intersections* , TRR 1390 , pp. 10-15, 1993.
- [31] Khansnabis, S., Reddy, G. V. and Chaudry, B. B. , *Signal Preemption as a Priority Treatment Tool for Transit Demand Management* , 1991.
- [32] Khasnabis, S. and Rudraraju, R. K. , *Optimal Bus Headways for Pre-Emption : A Simulation Approach* , TRB Preprint , 1996.
- [33] Khasnabis, S., Reddy, G. V. and Hoda, S. K. , *Evaluation of the Operating Cost Consequences of Signal Preemption as an IVHS Strategy* , TRR 1390 , pp. 3-9, 1993.
- [34] Sunkari, S. R., Beasley, P. S., Urbanik T. and Fambro, D. B., *Model to Evaluate the Impacts of Bus Priority on Signalized Intersections* , TRR 1494 , pp. 117-123, 1995.
- [35] El-Reedy T. Y. and Ashworth, R. , *The Effect of Bus Detection on the Performance of a Traffic Signal Controlled Intersection* , Transportation Research Vol.12 , pp. 337-342, 1978.
- [36] 朱正祺 , *高速公路城際客運轉運操作最佳化模式之構建與求解* , 國立交通大學碩士論文 , 民國 85 年。
- [37] 阮如芸 , *捷運車站與接駁車站多目標區位選擇之研究* , 國立交通大學碩士論文 , 民國 82 年。
- [38] 邱裕鈞 , *線性軸輻路網轉運區位、路線與排班最適整合模式之研究* , 中華民國運輸學會第七屆校際運輸學術聯誼研討會論文集 , pp. 223-240 , 民國 87 年。
- [39] 許書耕等 , *高速公路客運轉運系統之研究* , 運輸計畫季刊第 27 卷第 2 期 , pp. 315-338 , 民國 87 年。
- [40] 彭增光 , *都會區大眾運輸系統整合排班營運策略之研究* , 國立中央大學碩士論文 , 民國 85 年。