

# 以多維度觀點衡量捷運系統財務效能 及其效能分解之研究<sup>1</sup>

## A MULTI-DIMENSIONAL FRAMEWORK FOR EVALUATING AND DECOMPOSING OF FINANCIAL EFFECTIVENESS OF MRT SYSTEMS

康熙宗 Chao-Chung Kang<sup>2</sup>  
陳正杰 Cheng-Chieh Chen<sup>3</sup>  
沈令絜 Lin-Chieh Shen<sup>4</sup>

(111 年 8 月 23 日收稿，112 年 3 月 7 日第一次修正，113 年 4 月 7 日接受)

### 摘 要

在都會區運輸系統中，地鐵或捷運系統具備高準點率、便捷、快速及大量運送之服務特性，故如何衡量捷運系統績效變化是值得探究課題。然而，實務上捷運系統營運除追求生產效率外，也需要探討服務品質、安全性、財務績效等多面向績效目標。環顧國內外文獻，過去文獻衡量捷運或地鐵系統績效評估時，多侷限於生產力或效率等單一議題，較少探究其他目標績效評估；故本研究嘗試從多維度觀點進行績效衡量，提出金字塔(pyramid)績效衡量概念，發展序列網路(sequential network)衡量架構，將安全、服務品質、社會環境變數納入網路 SBM (slack-based measure)模式進行分析。

本文以臺北及高雄捷運系統為例，蒐集臺北與高雄捷運系統於

- 
1. 本論文之部分研究成果承蒙國科會專題計畫補助，計畫編號：MOST 107-2410-H-126-020。本文部分研究成果發表於運輸學會 2022 年會暨學術論文國際研討會
  2. 靜宜大學企管系教授 (聯絡地址:433 臺中市沙鹿區中棲路 200 號；電話 04-26328001 分機 13312; E-mail:cckang@pu.edu.tw)。
  3. 國立東華大學運籌管理研究所副教授。
  4. 國立東華大學運籌管理研究所碩士。

2009-2019 年營運資料，結合視窗分析法與序列網路 SBM 模式，衡量樣本期間各階段效率與效能變化。實證分析顯示，臺北捷運系統之服務效能相較於其他階段之效率或效能為差，高雄捷運系統之市場效能相較於該系統其他階段之效率或效能為低，高雄捷運系統之市場效能影響該系統之後續財務效能表現。研究顯示，臺北捷運系統營運者可就服務階段先行改善，高雄捷運營運者可就市場階段優先改善，提升市場效能。實證分析顯示，本文所提之金字塔績效衡量觀念與序列網路分析架構，可同時獲得捷運系統之財務效能、生產效率、服務效能及市場效能等多階段管理意涵，提供營運單位在多面向管理改善之參考。

**關鍵詞：** 捷運系統、財務效能、序列網路、金字塔、多維度觀點

### ABSTRACT

*Providing a public transportation with high reliable, facilitate, fast, and mass delivery service is critical to attract more passengers to the system, especially for metro transits or mass rapid transit (MRT) in urban areas. Thus, analyzing efficiency or productivity changes of existing MRT system in Taiwan has become an important issue. However, most previous studies focused upon analyzing efficiency or productivity changes on the basis of a single dimensional perspective. In practice, the operators of MRT system should also pursue other performances, such as service quality, safety, and financial effectiveness. The performance of above goals is often discussed by the literature when measuring the performance of MRT or metro transits. In order to analyze the overall performance of existing MRT systematically, this study, develops a pyramid performance evaluation method and constructs a sequential network performance assessment framework from the multi-dimensional perspective. The factors of service quality, undesirable output of safety, and social economic are also incorporated into the sequential network SBM (slack-based measure) model for measuring the financial effectiveness.*

*This study conducts a case study consisting of Taipei and Kaohsiung MRT with the input-output data from 2009 to 2019, while combining the sequential network SBM DEA model and the window analysis method to assess the efficiency and effectiveness changes for each stage during the analytical sample period. The pyramid framework and sequence network model can provide managers with insightful performance management implications from the multi-dimensional perspectives. The results show that the effectiveness of Taipei MRT in the service stage is relatively weak compared to other stages, which indicates that Taipei MRT should improve the service stage first. Moreover, the marketable effectiveness of Kaohsiung MRT system is lower than that of other stages. The lower marketable or service effectiveness will affect the financial effectiveness of the Kaohsiung MRT system. In addition, results of empirical analysis show that the financial effectiveness could be decomposed into the*

*production efficiency, service effectiveness, and marketability effectiveness, which could provide more managerial information for decision makers.*

**Key Words:** *Metro ; financial effectiveness ; sequential network ; pyramid ; multi-dimensional perspectives*

## 一、前言

由於大眾捷運運輸 (Mass Rapid Transit, MRT) 或地鐵系統 (metro) 具備密集班次、高準點率、大量運送及服務導向之服務特性 (Fouracre and Dunkerley<sup>[1]</sup>; Chang et al.<sup>[2]</sup>)，世界許多主要城市莫不積極推動興建地鐵或捷運系統，藉以滿足日益增加運輸旅次需求。根據 Canavan<sup>[3]</sup> 研究顯示，在 2014 年，全世界約有 148 個城市地鐵系統提供運輸服務，運量約 46,684 百萬人次。另外，依據 UITP<sup>[4]</sup> 資料顯示，截至 2019 年，全世界已有 193 城市之地鐵或捷運系統提供營運服務，營運路網長度已達 17,221 公里，營運車站數達 12,964 站，每年旅次量已達 58,257 百萬人次。以美國紐約地鐵系統為例，截至 2017 年資料顯示，該地鐵系統平均每日旅次量 8.85 百萬人次，年旅次運量達 2.699 億人次，顯示在都會區活動中，捷運或地鐵系統扮演極為重要運輸角色。然而，全世界因 COVID-19 疫情嚴峻，運輸活動量遽降，於 2020 年，旅次量遽降至 35,084 百萬人次。

捷運系統除具備前述服務特性外，根據交通部運輸研究所<sup>[5]</sup> 研究顯示，捷運建設系統亦具備龐大沉沒成本與回收期長特性，且捷運業者多賴以營運期之票箱收入、附屬事業收入用以償還龐大興建成本。但由於捷運系統票價常受政府管制或監督，無法隨著運輸需求變化立即調整；倘若，運量或附屬事業收入不如預期時，捷運業者將面臨營運虧損窘境，產生財務虧損困境。根據 Chang et al.<sup>[2]</sup> 研究顯示，當年度眾多都會區捷運系統中，僅有東京、新加坡、香港和臺北地鐵系統沒有面臨營運虧損問題，其餘地鐵系統營運單位多面臨營運虧損窘境，反應出財務績效以及在整體投入與產出資源配置等問題仍有待改善。根據 Waters<sup>[6]</sup> 研究指出，雖然衡量生產力變化或效率是探討軌道運輸生產力之重要基礎，但尚須考慮其他因素，例如運輸系統之財務績效或市場上之營運銷售能力等因素，這些因素會直接或間接影響生產力變化 (Lin<sup>[7]</sup>)，但過去文獻少有研究針對此項議題深入研究 (Chang et al.<sup>[2]</sup>)，此一研究缺口猶待進行。

根據 Canavan<sup>[3]</sup> 研究顯示，在實際營運環境中，捷運系統營運單位除追求生產效率外，營運單位亦可能同時追求多個面向之績效指標；例如，捷運系統營運單位推動平衡計分卡機制時，除生產效率外，尚包含內部流程、財務、學習和人力資本成長等目標績效。另外，根據交通部運輸研究所<sup>[8]</sup> 與 Hyman<sup>[9]</sup> 研究論述，軌道或捷運系統績效衡量除生產效率外，亦包含運輸安全、財務績效與服務品質等面向之績效目標；由此可見，績效衡量不再是單一面向，而是多面向 (或多維度) 績效分析課題。

環顧國內外文獻，多數文獻仍聚焦於衡量軌道運輸之技術效率或生產力變化研究議題

(Oum et al.<sup>[10]</sup>)。晚近，雖有文獻針對捷運系統之生產效率或服務效能議題進行研究，例如 Jain et al.<sup>[11]</sup>、Lobo and Couto<sup>[12]</sup>、Tsai et al.<sup>[13]</sup> 採用傳統 DEA (data envelopment analysis) 方法衡量捷運系統整體效率；Wey et al.<sup>[14]</sup> 構建網路 DEA 型態，將員工變數視為分享變數納入網路模式，衡量捷運系統之生產效率與服務效能變化情形。然上述研究亦僅於評估營運單位之技術效率或服務效能之單一構面績效，尚未擴展至市場效能、財務績效或服務導向等構面績效議題。換言之，前述文獻所採用傳統 DEA 或網路 DEA 模式衡量技術效率課題仍屬單一維度觀點，非以多面向觀點進行之 (Chang et al.<sup>[2]</sup>；Canavan<sup>[3]</sup>；Tsai et al.<sup>[13]</sup>；Wey et al.<sup>[14]</sup>)，忽略其他目標績效結果，所得到績效意涵恐不完備，無法提供營運者更多績效意涵，進行營運管理改善之參考。有鑒於此，本研究目的在於從多維度觀點，提出序列網路績效衡量架構，用於詮釋捷運系統之生產效率、服務效能，市場效能及財務效能分析，並將服務面向之服務品質與安全變數納入模式，藉以詮釋捷運系統之多維度績效特性。

本文章節架構安排如下：首先研究動機與目的說明於前，第二章進行文獻回顧，第三章提出金字塔績效衡量觀點，構建序列網路績效衡量架構，第四章說明序列網路模式，第五章為實證分析，利用臺北與高雄捷運系統進行實證分析，最後提出本文之結論與後續建議。

## 二、文獻回顧

環顧國內外文獻，已有許多文獻貢獻於鐵路運輸系統之績效或生產力議題之研究；例如 Waters<sup>[6]</sup>、Oum et al.<sup>[10]</sup> 就軌道運輸或通勤鐵路系統之生產力、效率或效能研究課題進行完整性文獻回顧與評析，依文獻研究課題，可區分為下列幾項主要研究方向：

### 2.1 軌道或地鐵系統之生產力、密度經濟與規模經濟特性議題

依 Oum et al.<sup>[10]</sup> 研究指出，早期研究多聚焦於估計鐵路或地鐵系統之部分生產力 (Partial Factor Productivity, PFP) 或總要素生產力 (Total Factor Productivity, TFP) 變化。例如，Graham et al.<sup>[15]</sup> 利用 Cobb-Douglas 生產函數，以勞動、列車數、路線長度、車站數及乘客數衡量 17 個地鐵系統之規模經濟與密度經濟議題，估計總要素生產力變動及總要素生產力之分解。此研究顯示，17 個地鐵系統具有固定規模報酬，亦具有遞增密度經濟特性。Graham<sup>[16]</sup> 使用 Translog 生產函數及傳統 DEA 模式，分析 99 個城市通勤鐵路系統之總要素生產力與技術效率議題；研究顯示，社會經濟變數對技術效率有正向影響，但人口數對生產力則有負向影響。蔡奇宏<sup>[17]</sup> 構建 Translog 短期與長期成本函數，分析臺北捷運公司經濟特性議題；此研究蒐集臺北捷運公司 1996 至 2006 年時間序列季資料，投入要素包含勞動成本、中間成本、重置成本及固定成本，產出變數則為運量，運量變數不分中運量與高運量之別。此研究同時將捷運網路長度變數納入模式中，分別估計短期與長期 Translog 成本函數。研究結果顯示，臺北捷運公司於 1996 至 2006 年具有顯著密度經濟，但自 2000

年以後則呈現網路規模不經濟現象，且捷運系統最適捷運網路規模屬於遞減狀態，故建議審慎評估臺北捷運後續網路發展之必要性。

## 2.2 軌道或地鐵系統之技術效率、服務效能衡量議題

除參數函數方法之外，DEA 方法是目前廣為研究者所採用之效率衡量模式，此方法已廣泛應用於運輸產業之績效或效率衡量議題 (Cook and Zhu<sup>[18]</sup>; Cooper et al.<sup>[19]</sup>)。Santos et al.<sup>[20]</sup> 使用傳統 DEA 模式，衡量歐洲 37 個城市地鐵系統之技術效率，再利用 Tobit 回歸模式探討影響技術效率之外生變數。研究顯示，車站數與人口數變數對技術效率有正向影響。此外，Tsai et al.<sup>[13]</sup> 亦使用傳統 DEA 與 Tobit 模型，衡量 20 個地鐵系統之技術、分配與成本效率議題；研究顯示，車站數與人口密度變數對技術效率與分配效率有正向影響。基本上，Tsai et al.<sup>[13]</sup> 與 Santos et al.<sup>[20]</sup> 在研究課題及使用傳統 DEA 與 Tobit 方法，研究概念相似。此外，Tsai and Mulley<sup>[21]</sup> 應用 PFP 與 DEA 方法，衡量新加坡、香港、高雄、臺北、里斯本、舊金山及芝加哥等 15 個城市捷運系統之效率與效能變化議題，該研究以員工數、車輛數及營業成本為投入變數，車公里及載客數為產出變數。此研究採用 PFP 指標方法衡量捷運系統之成本效率、成本效能與服務效能；以 DEA 模式衡量效率與效能時，分別以車公里及載客數作為衡量效率與效能之基礎，比較此兩種方法衡量之差異。值得注意的是，Tsai and Mulley<sup>[21]</sup> 應用 DEA 衡量效率及效能時係採用不同產出項目，分別估計效率與效能，此與 Yu and Lin<sup>[22]</sup> 在求解概念有差異。前者採分段求解效率與效能，但後者採用同時分解網路 DEA 模式。根據 Wey et al.<sup>[14]</sup> 研究論述，採用分階段分解效率與效能概念，並不能詮釋捷運系統服務不可儲存特性。

Canavan<sup>[3]</sup> 利用隨機邊界函數法 (Stochastic Frontier Analysis, SFA)、DEA 與 StoNED (Stochastic Nonparametric Envelopment of Data, StoNED) 模型，探討 27 個地鐵系統在 2004 至 2012 年間的技術效率變化。研究顯示，SFA 是分析營運效率驅動因素較佳方法。此外，Canavan<sup>[3]</sup> 亦利用環境變數，例如人口數、所有權、補貼、維修及自用小汽車數等變數探討對技術效率之影響分析。Lobo and Couto<sup>[12]</sup> 亦利用隨機邊界函數法 (SFA) 方法衡量歐洲 17 個地鐵系統，並探討社會經濟變數對捷運系統技術效率之影響分析。此研究採用兩階段 SFA 模式分別估計效率值，第一階段解釋變數包含網路長度、車站數、員工數及車輛數，中間變數為車公里。第二階段之解釋變數包含第一階段變數以及環境變數，被解釋變數為載客數。此研究顯示，在 17 個地鐵系統中有 13 個地鐵系統之技術效率高於 0.9，僅有 4 個地鐵系統效能值高於 0.9 以上。另外，社會經濟變數對捷運系統之營運效率具有影響現象，但該研究並無考慮捷運運輸之不可儲存服務特性。

由前述文獻顯示，研究議題主要聚焦於運輸系統之整體績效衡量，並進一步探討影響整體技術效率之外在環境變數。在方法方面，主要採用 Tobit 模式或 SFA 方法；但 Yu and Lin<sup>[22]</sup> 之處理方法則是將少數影響變數納入於 DEA 模式中，並設定限制式進行模式求解。當外在環境變數甚多時，DEA 模式則面臨求解可行區域之限制，且上述文獻尚未就財務效能或市場銷售能力等課題進行分析。

由於臺北捷運公司屬於軌道運輸標竿聯盟會員 (Community of Metros, CoMET)；因此，相關文獻探討 CoMET 聯盟所屬成員之相對效率分析課題。例如，郭子柔<sup>[23]</sup> 應用 DEA、SFA 與 Malmquist 指數方法，衡量 CoMET 聯盟 26 個捷運系統之績效與跨期效率變動議題。該研究以車廂數、員工數為投入變數，載客數與營運收入為產出變數，環境變數包含補貼比例、服務城市人口密度及公車轉乘優惠等變數。研究顯示，在分析樣本中，臺北捷運與曼谷捷運系統屬於相對有效率；在環境變數方面，實證分析顯示服務城市人口密度越高，生產效率表現越好。黃至麒<sup>[24]</sup> 則應用 DEA 超效率 (Super-efficient) 模式及 Malmquist 指數方法，衡量 CoMET 聯盟地鐵公司之營運效率及 Malmquist 指數變動情形；該研究以軌道長度、車站數、員工人數為投入變數，載客數、總營收為產出變數。研究結果顯示，在 2006 至 2010 年間，臺北捷運系統屬於相對無效率，究其原因為生產規模不恰當，故建議臺北捷運系統應該增加投入項比例或提升軌道長度與車站數量，藉以改善無效率。黃至麒<sup>[24]</sup> 與郭子柔<sup>[23]</sup> 之研究差異在於，郭子柔<sup>[23]</sup> 將影響捷運系統之環境變數納入效率分析，但黃至麒<sup>[24]</sup> 則不考慮外在環境變數，但此兩者研究均不討論捷運系統之效率與效能議題，亦不將捷運系統之服務特性因素納入績效衡量。

前述文獻無論採用傳統 DEA 或 Malmquist 指數方法，主要在於提供營運者獲得整體系統效率變化，並在投入與產出資源進行重新配置。但實務上，捷運系統具有生產與服務階段，故文獻使用傳統 DEA 模式 (如 Jain et al.<sup>[11]</sup>、Tsai et al.<sup>[13]</sup>、Canavan<sup>[3]</sup>) 便無法進一步提供生產與服務階段之效率與效能意涵。近年來，許多文獻利用網路 DEA 模式探討運輸系統之成本效率 (或技術效率)、服務效能與成本效能課題，此概念主要應用 Fielding et al.<sup>[25]</sup> 所提出之成本效率性 (cost efficiency)、服務效能性 (service effectiveness) 及成本效能性 (cost effectiveness) 三個面向績效衡量概念。例如，Yu and Lin<sup>[22]</sup> 提出運輸事業多活動 (multi-activity) 概念，將產出分為客運及貨運兩種，利用方向性距離函數 (Directional Distance Function, DDF) 構建多活動網路模式 (Multi-activity Network DEA, MNDEA)，衡量 20 個鐵路系統之客運與貨運生產效率、服務效能與營運效能課題。此研究蒐集 2002 年營運資料，投入變數包含營運路線公里、勞工數、客運列車數、貨運列車數；產出變數包含延人公里與延噸公里，中間變數包含貨車延車公里及客運延車公里，員工數為分享變數 (share-input)。此研究最大貢獻是突破傳統 DEA 研究限制，將投入變數之共享特性及外在環境變數納入網路模式中，衡量鐵路系統之客運與貨運效率與效能變化，與傳統 DEA 模型有很大差別，具有創新性。

Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup> 探討美國 24 個通勤鐵路系統之績效議題，作者構建序列四階段網路 (sequential four-stage network model) 模式，採用非導向網路 DEA (non-oriented network DEA) 模式，以營運費用為序列網路模式之期初投入變數，車公里、營收公里及延人公里為分別為第一階段至第四階之中間投入變數，最終產出為平均每里費率。此研究顯示，在第二與第三階段有 11 個通勤系統屬於有效率，第一與第四階段僅有 5 個通勤系統屬於有效率狀態。就 2001 至 2010 年而言，此 24 個通勤地鐵系統平均效率介於 0.592~0.712 間，屬於無效率狀態；實證分析亦顯示，政府所實施之補貼政策與效率成反比關係。Wey

et al.<sup>[14]</sup>、周品帆<sup>[27]</sup>利用方向性距離函數(DDF)概念,構建混合網路 DEA 模式,此模式結合兩階段網路模式(two-stage network)與平行網路模式,詮釋捷運系統之服務不儲存與聯合生產之績效變化;此研究可同時求解捷運公司之營運效能,亦可同時求得中運量與高運量系統之效率與效能變化。

### 2.3 服務或品質因素對軌道或地鐵系統之效率與效能分析議題

有關服務績效或納入服務品質對效率影響議題,此方面文獻仍然有限。例如,Sharma et al.<sup>[28]</sup>使用傳統 BCC (Banker, Charnes, Cooper) DEA 模式及 Malmquist 指數,評估鐵路服務績效對技術效率影響分析議題。此研究蒐集 16 個鐵路系統之營運資料,投入變數方面包含員工費用、員工數及軌道長度等變數;產出變數包括貨運量、延人公里、準點率、火車事故數(安全)和投訴次數(乘客滿意度)等變數。此研究欲詮釋鐵路運輸之服務導向特性,故將準點率、安全、乘客滿意度視為產出變數,納入傳統 BCC 模式中。Link<sup>[29]</sup>比較分析有無納入服務品質變數對鐵路系統之效率影響議題,此研究蒐集德國區域鐵路系統(regional rail systems)於 2003 至 2014 年營運資料,投入變數包含營運補貼、投資補貼及設施費用,此設施費用包含票價費用及車站費用;產出變數包含延車公里、延人公里、準點率及服務滿意度。該研究於第一階段利用傳統投入導向 DEA 模式,第二階段再利用 Tobit 模式探討投入變數及社會經濟變數對效率之影響程度。研究顯示,納入服務品質變數明顯影響效率變化,忽略服務品質變數會影傳統 DEA 效率分析,進而影響管理改善措施。此外,從文獻中可發現 Link<sup>[29]</sup>使用營運補貼與投資補貼為投入變數,此補貼變數屬於營運者之非可控制變數(non-controlled variables),基本上,營運者無法就此兩個變數進行資源調整。

### 2.4 小結

經由前述文獻評析顯示,多數文獻仍著重於軌道業者之生產力或技術效率評估的研究,較少探討捷運/地鐵通勤系統之財務或市場銷售績效(marketing performance)議題;亦少有文獻詮釋軌道/捷運/地鐵系統之服務導向特性、財務效能或市場銷售能力等績效意涵。而根據 Lin<sup>[7]</sup>、Lu et al.<sup>[30]</sup>、Saranga and Nagpal<sup>[31]</sup>研究顯示,運輸事業於生產階段之生產效率會進一步影響市場銷售能力或市場績效變化。因此,若僅以 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup>或 Yu<sup>[32]</sup>所提之混合網路 DEA 模式,則尚無法詮釋捷運系統之市場能力或財務效能問題;故擴展混合 DEA 模式於多階段模式,使之能詮釋捷運系統之市場價值或財務效能意涵,將有助於營運者針對不同階段進行改善。

Hassan et al.<sup>[33]</sup>曾提出多維度觀點衡量公共運輸服務績效概念,此多維度觀點是基於乘客使用者、系統提供者及營運者等觀點進行分析,應用多準則方法評估運輸系統服務績效。Li<sup>[34]</sup>亦從多維度觀點衡量不同城市公共運輸效率變化,此多維度概念主要從政策(policy level)與技術層面(technical level)觀點建立評估體系,再利用模糊 AHP (Analytic

Hierarchy Process) 方法，分析城市公共運輸績效。顯然地，Li<sup>[34]</sup> 之績效定義與 DEA 理論之相對效率或技術效率概念明顯有差異；此外，Li<sup>[34]</sup> 的多維度概念是建立在社會面與技術面，此與 Canavan<sup>[3]</sup>、Hassan et al.<sup>[33]</sup> 之多維度概念不同。

根據 Hyman<sup>[9]</sup>、Link<sup>[29]</sup>、Saranga and Nagpal<sup>[31]</sup> 研究論點，服務滿意度或服務品質亦是評估捷運系統績效構面之一；因此，從多維度角度進行捷運系統績效衡量議題，提供多維度績效管理意涵於營運者，進行各階段營運管理改善措施，此較相關文獻採用傳統 DEA 或 SFA 模式績效意涵更具實務應用性價值。茲將有關探討捷運或地鐵系統績效評估課題文獻，摘整如表 1 所示。

表 1 捷運或地鐵運輸系統績效評估課題之相關文獻

作者	投入與產出	研究對象	方法	結果
Canavan <sup>[3]</sup>	環境變數：人口數、所有權、補貼、維修、自用小汽車數量	27 個地鐵系統在 2004 至 2012 年間的技術效率變化。探討環境變數對地鐵系統技術效率之影響分析。	SFA、DEA 與 StoNED (Stochastic Nonparametric Envelopment of Data, StoNED) 模型	人口密度、自動化程度、補貼、營運系統穩定性、維修及可供列車程度對效率具有驅動因素。
Lobo and Couto <sup>[12]</sup>	第一階段外生變數：網路長度、車站數、員工數、車輛數。 中間變數：車公里。 第二階段依變數為載客數	歐洲 17 個地鐵系統	第一階段與第二階段採用 SFA 法	13 個地鐵系統之技術效率高於 0.9；4 個地鐵系統效能值高於 0.9 以上。12 個地鐵系統技術效率受到外部環境因素影響。
Tsai et al. <sup>[13]</sup>	投入變數：勞動、車輛數 產出變數：車公里及載客數。	2009-2011 年 20 個地鐵系統之技術效率、分配效率與成本效率	第一階段利用 CCR 與 BCC 模式。 第二階段採用 Tobit 迴歸模式	車站數明顯影響技術效率，人口密度變數影響分配效率。
Wey et al. <sup>[14]</sup>	第一階段投入變數：中運量、高運量系統之營運公里及列車營運班次。中間投入變數：中運量、高運量系統延車公里。 第二階段投入變數：中運量、高運量系統車站數及站務人員。 第二階段最終產出變	採用臺北捷運公司 2005-2015 季資料探討中運量與高運量整體營運效能、生產效率及服務效能。探討政策與環境變數對整體營運效能與生產效率及服務效能之差異。	混合網路 DDF DEA 模式	統計檢定顯示，人口密度變數及轉乘政策對於技術效率無顯著影響，但對服務效能有顯著差異。環境變數小客車持有變數對生產效率統計檢定無明顯差異。

	數：中運量、高運量之延人公里及載客數。 政策變數：轉乘運量 環境變數：汽車與機車持有數、人口密度			
蔡奇宏 <sup>[17]</sup>	投入要素變數：勞動成本、中間成本、重置成本及固定成本、捷運網路長度變數 產出項目：運量變數	臺北捷運公司 1996 至 2006 年時間序列季資料	1. 短期與長期 Translog 成本函數 2. SUR 方法聯合估計	捷運公司於 1996 至 2006 年具有明顯密度經濟特性。1996 至 1999 年具有網路規模經濟性，自 2000 年以後呈現網路規模不經濟。
Tsai and Mulley <sup>[21]</sup>	投入變數：員工數、車輛數及營業成本 產出變數：車公里及載客數。	新加坡、香港、高雄、臺北、里斯本、舊金山及芝加哥等 15 個捷運系統	FPF (Partial Factor Productivity) 指標及 DEA 模式	實證顯示：亞洲地區捷運業者相較於其他地區有較高效率及效能績效。
郭子柔 <sup>[23]</sup>	投入變數：車廂數、員工數。 產出變數：客運人數、年營運收入。	CoMET 聯盟 26 個城市捷運系統	DEA 及隨機邊界函數(SFA)	臺北捷運與曼谷捷運於投入項調整前後之分析為相對有效率。
Mallikarjun et al. <sup>[26]</sup>	期初投入變數：營運費用。 中間投入變數：車公里、營收公里及延人公里 最終產出變數：平均每里里程費率	2001-2010 年美國 24 個通勤鐵路系統	1. 序列四階段網路 (sequential four-stage network model) 模式 2. 非導向網路 DEA 模式	研究顯示：第二與第三階段有 11 個通勤系統具有效率，第一與第四階段僅有 5 個通勤系統具有效率。2001 至 2010 年，此 24 個通勤地鐵系統之平均效率介於 0.592 ~ 0.712 間，屬於無效率。
周品帆 <sup>[27]</sup>	投入變數：列車數輛、車站數 分享變數：員工數 變數：延人公里、載客數 中間投入變數：延車公里	臺北捷運公司 100 年至 103 年營運資料，求解中運量系與高運量系統之效率與效能變化。	混合網路 DEA 模式	績效呈現每年 1、2、7、8 及 9 月有較低營運效能。另外，捷運與公車之間轉運量對於服務效能有其影響。

資料來源：本研究整理

### 三、多維度概念與序列網路績效評估架構

#### 3.1 多維度績效評估概念

根據 Clarke<sup>[35]</sup>、交通部運輸研究所<sup>[8]</sup> 研究指出，CoMET 與 Nova group (NOVA) 聯盟所研擬之捷運系統績效評估架構涵蓋財務效能 (financial effectiveness)、效率/生產力、資產利用率、可靠度、服務品質及安全等面向。此顯示，捷運系統營運者除追求生產力/效率績效外，亦同時在追求財務效能、服務品質及安全等多維度面向之績效目標。故依據 Canavan<sup>[3]</sup>、Waters<sup>[6]</sup>及 Lu et al.<sup>[30]</sup> 研究論點，評估績效議題以多維度觀點 (multiple dimensions) 較單一維度觀點能提供營運者獲取不同階段之績效管理意涵。

根據 Fielding et al.<sup>[25]</sup> 績效評估架構，涵蓋成本效率性、服務效能性及成本效能性等三個面向指標，此評估架構概念如圖 1 左邊之三角形績效評估架構所示。此概念為後續研究者廣為應用於評估運輸事業單位或服務業之效率與效能議題。在 DEA 理論發展至網路模式後，後續研究者陸續利用網路 DEA 模式將成本效能同步分解為技術效率 (或生產效率) 與服務效能兩部分。其中，生產效率用於衡量生產階段之生產技術變化，服務效能用於評估服務階段 (或消費階段) 之服務技術變化，此類研究如 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup> 及 Yu<sup>[32]</sup> 即屬之。但是，研究者應用 Fielding et al.<sup>[25]</sup> 績效評估架構，實際上，仍無法獲得財務 (或財務效能) 及市場績效意涵，應用上仍有其限制。值得注意的是，根據 Lin<sup>[7]</sup>，Lu et al.<sup>[30]</sup>，Saranga and Nagpal<sup>[31]</sup> 及 Scherage<sup>[36]</sup> 研究顯示，運輸事業在生產階段之生產效率或服務階段之服務效能對於市場能力 (marketability) 或財務獲利能力具有驅動力 (drivers) 之影響。此說明，軌道系統於服務階段所產生之延人公里，可透過市場階段進一步產生運輸收入，影響財務收入或財務效能變化。依此概念，本文擴展 Fielding et al.<sup>[25]</sup> 三角形績效評估架構，再透過市場階段去詮釋營運單位之財務效能，將圖 1 左邊之三角形績效評估架構擴展成金字塔績效評估架構，其概念如圖 1 右邊圖形所示。

依圖 1 之金字塔績效評估概念，需先定義如何評估捷運系統之財務效能。根據文獻 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 提出衡量財務績效有收入效率 (revenue efficiency) 與利潤比效率 (profit ratio efficiency) 兩種模式。收入效率模式定義為收入項目-成本項目，利潤比效率則採用收入項/成本項之比率。其次，根據 Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup> 研究概念，其定義財務績效概念為收入項目與營業成本項目之比，此與 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 之利潤比概念相同。本文參酌 Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup> 及 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 之財務效能 (financial effectiveness) 意涵，茲定義財務效能為「收入產生效能 (revenue generation effectiveness, RGEV)」，此為運輸收入及最初投入項之間的關係，亦即圖 1 右邊金字塔績效架構，A 點與 E 點之間的線段；此運輸收入為財務效能之產出項目，亦即金字塔之 E 點，此為市場階段之最後產出項目 (final output)。

根據 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup> 研究概念，Fielding et al.<sup>[25]</sup> 之成本效能可分解為成本效率 (或生產效率) 與服務效能兩部份，即圖 1 之左邊三角形績效架構所示。以圖 1 之右邊金字塔績效架構而言，此成本效率 (CE) 或生產效率 (PE) 描述生產階段之產出項與最

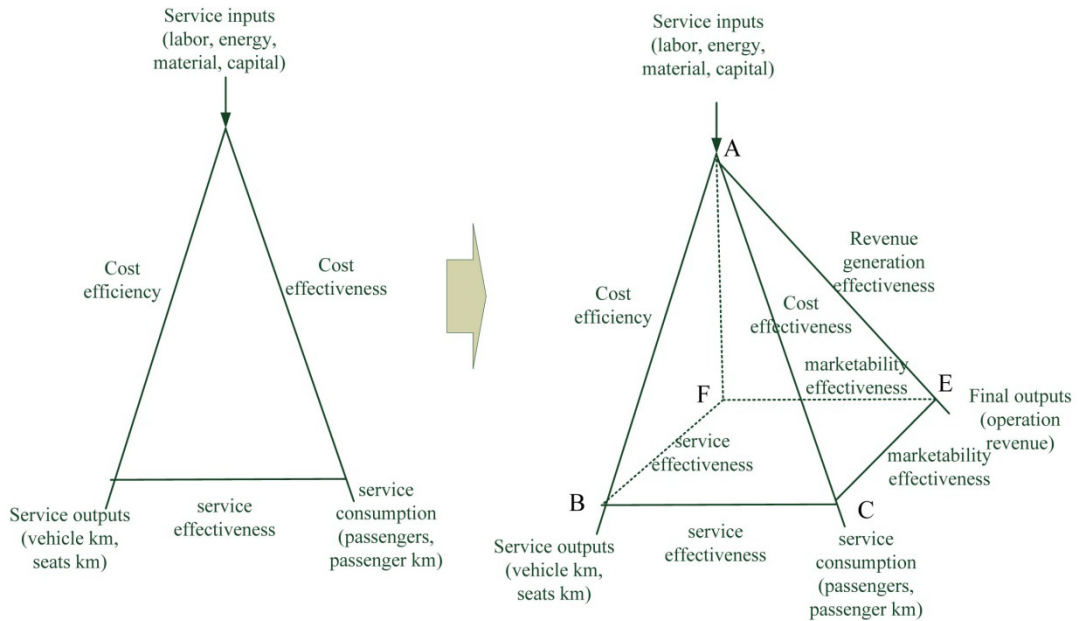


圖 1 多維度績效評估架構

初投入項之間的關係，亦即 A 點與 B 點之間的線段，此階段之產出項為服務產出 (service outputs)，亦即為 B 點項目，此 B 點之項目亦即為下一個服務階段之投入項目 (service inputs)。B 點與 C 點之間定義為服務階段，以服務效能 (service effectiveness, SE) 描述服務階段之服務消費 (service consumption) 與服務投入項之間的關係，此服務階段之服務消費項目 (service consumption) 即為市場階段之投入項目。另外，依據 Lin<sup>[7]</sup> 之市場銷售力及 Lu et al.<sup>[30]</sup> 對市場效率 (marketability efficiency) 研究概念指出，服務階段之產出對營運單位之財務能力具有驅動影響；說明延人公里可同時透過市場階段轉換為下一階段之最終產出 (final outputs)，亦即為財務收入。依此概念，此財務效能 (RGEV) 可透過成本效能與市場效能 (marketability effectiveness, ME) 兩部分來衡量；其中成本效能 (CVE) 描述期初投入項與服務消費項 (service consumption) 之間的關係，亦即金字塔績效架構中之 A 點與 C 點之間的關係。市場效能 (ME) 描述市場階段之最終產出 (final outputs) 與市場階段投入項之間的關係，亦即為 C 點與 E 點間的關係；此市場階段投入項即為服務階段之服務消費項，可視為中間變數。就圖 1 金字塔評估架構而言，F 點等同於 C 點之服務消費項目，此 B 點與 F 點之間關係亦即為服務階段；再者，F 點與 E 點之間的關係描述服務消費項目與最終產出項目之間的關係，此亦為市場階段之市場效能；因此，F 點與 E 點之間亦為市場階段之市場效能。A 點與 F 點說明期初投入項目與服務消費項目之間的關係，此等同於 A 點與 C 點之間的關係，故 A 點與 F 點之間關係亦為成本效能。因此，由圖 1 金字塔績效評估架構，衡量收入產生效能 (AE 段)，可以分解成本效能 (AC 段) 與市場效能 (CE 段) 之間的關係；同時，衡量成本效能 (AC 段) 可再區分為生產效率/成本效率 (AB 段) 與服務效能 (BC

段)。此財務效能之衡量關係亦可透過 AB 段 (成本效率或生產效率)、BF (服務效能) 及 EF 段 (市場效能) 進行評估。故圖 1 之金字塔績效衡量架構可展開為一個序列網路績效評估架構 (sequential network framework)，此序列網路評估架構包含生產階段、服務階段與市場階段部分，此三階段分別以生產效率 (productive efficiency, PE)、服務效能 (service effectiveness, SE) 及市場效能 (marketability effectiveness, ME) 衡量之，概念如圖 2 所示。

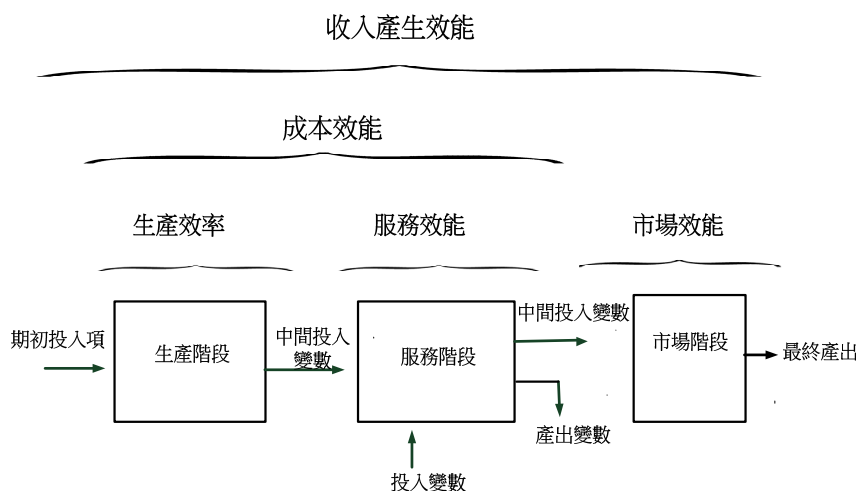


圖 2 序列網路績效評估架構概念

依照圖 2 概念，收入產生效能 (RGV) 可以分解為成本效能與市場效能，而成本效能又可以分解為生產效率與服務效能，故收入產生效能可以分解為生產效率、服務效能與市場效能。如此，我們可利用圖 2 概念，將財務效能與生產效率、服務效能及市場效能予以連結。

### 3.2 序列網路績效評估架構

根據 Wey et al.<sup>[14]</sup> 及 Yu and Lin<sup>[22]</sup> 研究指出，由於運輸系統於營運過程中生產與服務同時存在，服務具有不可儲存性，故圖 2 之序列網路架構可說明捷運系統營運單位之生產、服務及市場階段同時發生，如圖 3 所示。

依圖 3 概念，本文參酌交通部運輸研究所<sup>[8]</sup>、Wey et al.<sup>[14]</sup>、周品帆<sup>[27]</sup> 使用之投入與產出變數。假設捷運系統於生產階段初始投入變數為班次車廂數、路網長度、非站務員工數及行車用電量 (Wey et al.<sup>[14]</sup>；周品帆<sup>[27]</sup>)，第一階段產出項為延車公里 (Wey et al.<sup>[14]</sup>；Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup>；周品帆<sup>[27]</sup>)。在服務階段方面，由於運輸服務具有不可儲存特性，故延車公里即為服務階段之投入變數，此延車公里定義為中間變數。另外，服務階段之投入變數包含站務員人數、車站用電量及車站數，用於提供載客服務，產生延人公里及載客數。

由於財務效能之營運收入受到服務階段之延人公里的影響 (Lin [7]; Lu et al. [30]; Saranga and Nagpal [31])，此延人公里為服務階段與市場階段之中間變數，亦即為市場階段之投入變數，載客數為該階段之產出項。在市場階段方面，最終產出項為運輸收入 (不含業外收入)。利用市場階段之投入及中間投入變數，產生市場階段之最終產出項，亦即為運輸收入。由此觀之，圖 3 之序列網路評估架構可應用於衡量財務效能，同時可將捷運系統財務效能分解為生產效率、服務效能與市場效能等三部分之績效意涵，此分析架構較 Wey et al. [14]、周品帆 [27]、Saranga and Nagpal [31] 能獲得更多績效意涵。

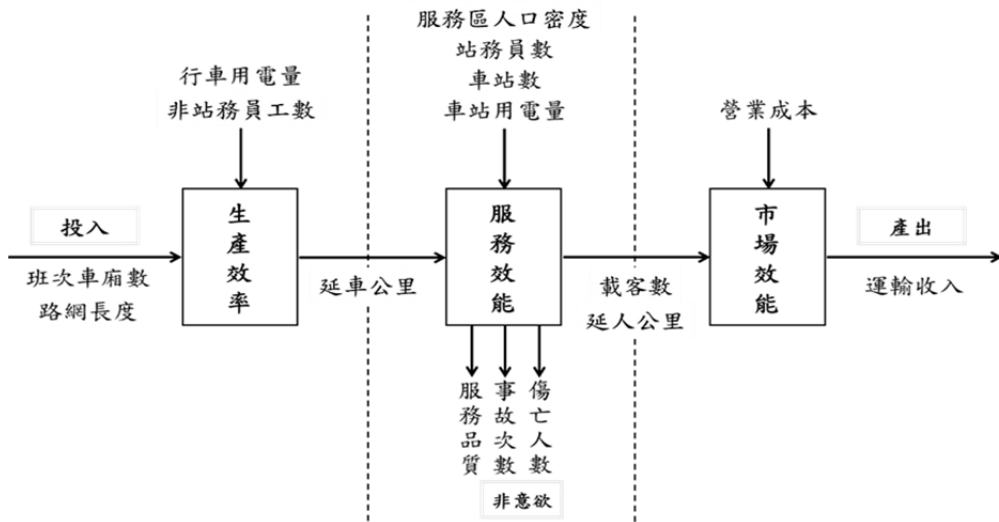


圖 3 捷運系統之序列網路績效衡量架構

### 3.3 服務品質、安全及外部環境變數之績效衡量概念

根據 Hyman [9]、Sharma et al. [28]、Haron et al. [38] 及 Nathanail [39] 研究概念指出，運輸系統以顧客為導向，除衡量生產效率或效能外，亦應考慮該事業單位之系統價值衡量 (value measurement)，此價值衡量可透過顧客對系統服務品質或該公司之市場股價或股東權益來反映 (Hyman [9])，而文獻多採用服務品質概念來衡量價值 (Sharma et al. [28])。本文採用 Sharma et al. [28] 建議，以服務品質概念進行此價值的衡量，而服務品質衡量亦即 CoMET 與 Nova group (NOVA) 聯盟績效評估架構之一。

由於文獻對於服務品質績效指標參考不盡相同，根據交通部運輸研究所 [8] 之研究報告顯示，捷運系統服務品質指標項包含可靠度指標、準點率、平均承載率、旅客滿意度、平均班次間距等變數。由於變數甚多及考慮資料的完整性，本文參酌 Sharma et al. [28] 所建議之主成份方法，將眾多變數利用主成分析法縮減變數，產生服務品質構面，並將此變數視為服務階段之意欲產出項，此過程將於實證分析章節論述結果。

考量捷運系統於服務期間若經常發生意外事故，將直接或間接地影響旅客乘車意願，

故安全亦為績效衡量重要面向之一。依交通部運輸研究所<sup>[8]</sup>之研究資料顯示，許多研究將安全因素納入於服務績效指標中，然亦有文獻將安全與服務績效予以區隔，見解不同(周品帆<sup>[27]</sup>; Sharma et al.<sup>[28]</sup>)。值得注意的是，在 DEA 文獻中，安全與服務績效處理方法有差異。文獻多以事故次數或傷亡人數變數用於評估安全績效，並將上述變數視為非意欲產出 (undesirable output)，此非意欲產出與意欲產出項目在 DEA 數學規劃構建與應用上有所不同 (Cook and Zhu<sup>[18]</sup>; Cooper et al.<sup>[37]</sup>)。因此，本文參酌周品帆<sup>[27]</sup>、Cooper et al.<sup>[37]</sup>、Lozano et al.<sup>[40]</sup> 研究概念，將事故次數或傷亡人數視為服務階段之非意欲產出項處理。

在社會經濟變數方面，影響民眾選擇捷運系統變數甚多 (Canavan<sup>[3]</sup>)，例如人口密度，費率，政府補助或油價等變數。文獻處理環境社會變數對績效影響主要採用 SFA 或 Tobit 模式為主，此類研究如 Canavan<sup>[3]</sup>、Lobo and Couto<sup>[12]</sup>、Tasi et al.<sup>[13]</sup> 即屬之。另一種方法則是選擇少數幾個環境社會變數納入 DEA 模式中，增加限制式；例如，Wey et al.<sup>[14]</sup> 都採用此種方式。然而，一但引入過多變數於模式中則會產生過多的限制式，增加網路 DEA 模式求解困難，甚至產生局部可行解現象。因此，本文參酌 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup> 研究，僅將服務人口密度變數納入於服務階段中，詮釋此變數對該階段之服務效能變化。

經由圖 1 與圖 3 說明，本文之評估架構不僅可提供財務效能衡量外，亦可提供不同階段之績效意涵。將捷運系統服務導向與安全因素納入模式中，可同時提供捷運系統之服務導向、安全、服務品質及財務效能意涵，此較 Canavan<sup>[3]</sup>、Wey et al.<sup>[14]</sup>、Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup> 及周品帆<sup>[27]</sup> 等人之研究，能提供多面向捷運系統績效評估意涵，亦能補充 Chang et al.<sup>[2]</sup>、Lin<sup>[7]</sup>、Clarke<sup>[35]</sup> 及 Nash<sup>[41]</sup> 尚未探討之財務與市場績效之研究課題。

## 四、研究方法

有關衡量財務效能、收入效率之研究議題與方法，Cooper et al.<sup>[37]</sup> 曾提出收入效率 (revenue efficiency) 模式、利潤比效率 (profit ratio efficiency) 模式，評估 DMUs (decision making units) 之收入與利潤效率議題。值得注意的是，上述 DEA 模式屬於產出導向型態且僅能提供單一面向財務績效意涵，無法應用於序列網路績效衡量。在績效評估文獻上，許多研究者陸續提出不同網路 DEA 型態，例如兩階段網路、平行網路或混合網路型態等理論，並廣泛應用於運輸事業績效衡量 (Lobo and Couto<sup>[12]</sup>、Wey et al.<sup>[14]</sup>、Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup>)。此網路 DEA 模式之理論概念在 Cook and Zhu<sup>[18]</sup>、Kao<sup>[42]</sup> 及 Cook et al.<sup>[43]</sup> 等文獻有深入探討，此不再贅述。

在網路 DEA 模式中可區分投入導向或產出導向型態，投入導向意義說明，營運單位假定固定產出水準下縮減投入項資源；相反地，產出導向是指營運單位在假定投入水準下去擴充產出資源。然而，實務上，營運者可同時縮減投入與擴充產出資源，此觀點在 DEA 理論定義為非導向模式 (non-orientation model) (Cooper et al.<sup>[37]</sup>)。由此觀之，以投入或產

出導向之效率或利潤比模式在應用方面應顯然有其限制。

近來，Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 所提之網路 Slack-based measure model (SBM) 屬於非導向網路 DEA 模式，具有同步調整投入與產出資源之優點，此較符合營運者可同步調整投入產出資源現象。故本文利用 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 所提之 Network SBM (NSBM) 模式，探討捷運系統之財務效能及每一階段之效率或效能變化。在利用 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 之 NSBM 模式前，先說明網路型態之可行性集合概念說明如下：

假設有  $j$  個 ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) DMUs (decision making units) 需進行評估，每一個 DMU 包含  $d$  ( $d = 1, 2, \dots, D$ ) 部門 (或階段)，每  $d$  部門包含  $n$  投入項 ( $n^d = 1, 2, \dots, N^d$ ) 且不為負，以  $x_j^d \in R_+^{n^d}$  表示之。 $d$  部門包含  $m$  產出項 ( $m^d = 1, 2, \dots, M^d$ ) 且不為負，以  $y_j \in R_+^{m^d}$  表示之。此外，令  $z_j^{(d,d+1)} \in R_+^{L(d,d+1)}$  為第  $j$  個 DMU <sub>$j$</sub>  於第  $d$  與第  $d+1$  部門之間的連結變數 (linking)。此網路可行性集合 (Production Possibility Set, PPS) 定義如下：

$$T^N = \left\{ (x^d, z^{d,d+1}, y^d) : \sum_{j=1}^J x_{nj}^d \lambda_j^d \leq x_{nk}^d, n^d = 1, 2, \dots, N^d, \sum_{j=1}^J y_{mj}^d \lambda_j^d \geq y_{mk}^d, m^d = 1, 2, \dots, M^d, \right. \\ \left. \sum_{j=1}^J z_{j,d}^{(d-1,d)} \lambda_j^d \leq z_{k,d}^{(d-1,d)}, d = 1, 2, \dots, D-1, \sum_{j=1}^J z_{j,d}^{(d,d+1)} \lambda_j^d \geq z_{k,d}^{(d,d+1)}, d = 1, 2, \dots, D, \lambda_j^d \geq 0, \right. \\ \left. j = 1, 2, \dots, J \right\} \quad (1)$$

其中，“ $k$ ”表示第  $k$  個 DMU， $\lambda_j^d$  為第  $j$  個 DMU <sub>$j$</sub>  於第  $d$  部門之密度向量。在變動規模報酬 (variable returns-to-scale, VRS) 假設條件下，本文利用式 (1) 及網路 SBM 模式概念構建序列網路 SBM 模式，有關變數定義與符號先說明如下。

$x_j^{NL}$ 、 $x_k^{NL}$ ：第  $j$  個與第  $k$  個 DMU 之路網長度變數

$x_j^{Pe}$ 、 $x_k^{Pe}$ ：第  $j$  個與第  $k$  個 DMU 之非站務員工數

$x_j^{ca}$ 、 $x_k^{ca}$ ：第  $j$  個及第  $k$  個 DMU 之班次車廂數

$x_j^e$ 、 $x_k^e$ ：第  $j$  個及第  $k$  個 DMU 之行車用電量

$z_j^{vkm(1,2)}$ 、 $z_k^{vkm(1,2)}$ ：第  $j$  個及第  $k$  個 DMU 於第一與第二階段之間的延車公里數

$x_j^s$ 、 $x_k^s$ ：第  $j$  個及第  $k$  個 DMU 之車站數

$x_j^{se}$ 、 $x_k^{se}$ ：第  $j$  個及第  $k$  個 DMU 之站務員數

$x_j^{eu}$ 、 $x_k^{eu}$ ：第j個及第k個DMU之車站用電量數

$y_j^{sv}$ 、 $y_k^{sv}$ ：第j個及第k個DMU之服務品質產出變數

$y_j^{pass}$ 、 $y_k^{pass}$ ：第j個及第k個DMU之載客數

$z_j^{pkm(2,3)}$ 、 $z_k^{pkm(2,3)}$ ：第j個及第k個DMU於第二與第三階段之間的延人公里數

$x_j^{oc}$ 、 $x_k^{oc}$ ：第j個及第k個DMU之營業成本變數

$y_j^r$ 、 $y_k^r$ ：第j個及第k個DMU之運輸收入

$s_k^{NL-}$ ：第k個DMU之路網長度變數虛擬變數

$s_k^{pe-}$ ：第k個DMU之非站務員數虛擬變數

$s_k^{sv+}$ ：第k個DMU服務品質變數之虛擬變數

$s_k^{pass+}$ ：第k個DMU載客數之虛擬變數

$s_k^{oc-}$ ：第k個DMU營業成本變數之虛擬變數

$s_k^{r+}$ ：第k個DMU的運輸收入之虛擬變數

$\lambda_j^1$ 、 $\lambda_j^2$ 、 $\lambda_j^3$ ：分別為第j個DMU於第一、第二及第三階段密度向量

$$\text{Min } \rho_k = \min\left(\frac{\{1 - [\frac{1}{4}(\frac{s_k^{NL-}}{x_k^{NL}} + \frac{s_k^{pe-}}{x_k^{pe}} + \frac{s_k^{ca-}}{x_k^{ca}} + \frac{s_k^{e-}}{x_k^e}) + \frac{1}{3}(\frac{s_k^{s-}}{x_k^s} + \frac{s_k^{se-}}{x_k^{se}} + \frac{s_k^{su-}}{x_k^{su}}) + \frac{1}{1}(\frac{s_k^{oc-}}{x_k^{oc}})]\}}{\{1 + [\frac{1}{2}(\frac{s_k^{pass+}}{y_k^{pass}} + \frac{s_k^{sv+}}{y_k^{sv}}) + \frac{1}{1}(\frac{s_k^{r+}}{y_k^r})]\}}\right) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^J x_j^{NL} \lambda_j^1 = x_k^{NL} - s_k^{NL-} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^{pe} \lambda_j^1 = x_k^{pe} - s_k^{pe-} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^{ca} \lambda_j^1 = x_k^{ca} - s_k^{ca-} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^e \lambda_j^1 = x_k^e - s_k^{e-} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J z_j^{vkm(1,2)} \lambda_j^1 = \sum_{j=1}^J z_j^{vkm(1,2)} \lambda_j^2 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^s \lambda_j^2 = x_k^s - s_k^{s-} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^{se} \lambda_j^2 = x_k^{se} - s_k^{se-} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^{eu} \lambda_j^2 = x_k^{eu} - s_k^{eu-} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J y_j^{sv} \lambda_j^2 = y_k^{sv} + s_k^{sv+} \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J y_j^{pass} \lambda_j^2 = y_k^{pass} + s_k^{pass+} \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J z_j^{pkm(2,3)} \lambda_j^2 = z_k^{pkm(2,3)} \quad (\text{第二階段之產出項}) \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J z_j^{pkm(2,3)} \lambda_j^3 = z_k^{pkm(2,3)} \quad (\text{第三階段之投入項}) \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j^{oc} \lambda_j^3 = x_k^{oc} - s_k^{oc-} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J y_j^r \lambda_j^3 = y_k^r + s_k^{r+} \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J \lambda_j^1 = 1, \sum_{j=1}^J \lambda_j^2 = 1, \sum_{j=1}^J \lambda_j^3 = 1 \quad (17)$$

$$\lambda_j^1 \geq 0, \lambda_j^2 \geq 0, \lambda_j^3 \geq 0; s_k^{NL-}, s_k^{pe-}, s_k^{ca-}, s_k^{e-}, s_k^{se-}, s_k^{oc-}, s_k^{sv+}, s_k^{pass+}, s_k^{r+} \geq 0 \quad (18)$$

式 (2) 為目標式，說明營運者可同時縮減投入及擴張產出變數。當第  $d$  部門之所有投入變數與產出變數無須調整時，亦即投入與產出變數之虛擬變數皆為 0，此時目標值達到 1 水準，即在追求最小化  $\rho_k$  值；此說明，第  $k$  個 DMU 生產技術達到效率前緣。因將第

$d(d=1,2,3)$  部門投入與產出變數虛擬變數納入，故限制式以恆等式表示。式 (3) 至式 (6) 為第一階段之投入變數限制式，式 (3) 說明第  $k$  個 DMU 之網路長度變數與所有  $j$  個 DMU 投入變數位於技術效率前緣之間差，欲縮減投入資源程度為  $s_k^{NL-}$ 。同理，式 (4) 至 (6) 限制式之意涵如同式 (3) 之意涵說明。式 (7) 為第一階段與第二階段之中間投入變數 (亦即為延車公里)。依照 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 模式概念，式 (7) 為「固定連結 (fixed linking)」型態，說明中間產出項無法進行調整。因為，延車公里於列車行駛中無法立即調整，此延車公里為第一階段之產出項，立即為第二階段之投入項，故沒有虛擬變數，限制式以  $\sum_{j=1}^J y_{kj}^{(1,2)} \lambda_j^1 = \sum_{j=1}^J y_{kj}^{(1,2)} \lambda_j^2$  表示之。式 (8) 至式 (10) 為第二階段之投入變數限制式，如同式 (3) 意義所述，式 (8) 至 (9) 說明第  $k$  個 DMU 的投入變數與所有  $j$  個 DMU 投入變數位於技術效率前緣之間的差距，此差距為欲縮減之投入資源程度。式 (10) 至 (11) 為第二階段產出變數限制式，意義說明，第  $k$  個 DMU 的產出變數與所有  $j$  個 DMU 產出項位於技術效率前緣之間的差距，此差距為產出項欲增加或擴張資源部分。式 (13) 說明第二階段產出項延人公里，此延人公里為第三階段之投入項，以式 (14) 表示之。依照 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 模式概念，式 (13) 與 (14) 說明中間投入項延人公里變數為「自由連結 (free linking)」型態，此中間產出項可以進行調整。式 (15) 為第三階段之投入變數 (營業成本) 限制式，同理，此式說明第  $k$  個 DMU 的投入變數與所有  $j$  個 DMU 投入變數位於技術效率前緣之間的差距，欲縮減  $s_k^{\alpha-}$  過多投入資源程度。式 (16) 為第三階段之產出變數限制式，說明第  $k$  個 DMU 的產出變數與所有  $j$  個 DMU 產出變數位於技術效率前緣之間的差距，欲擴張該運輸收入之產出資源程度。式 (17) 說明，此三個階段之生產技術均假設為變動規模報酬 (VRS) 條件進行，每一個部門之密度變數總和須等於 1。式 (18) 說明模式之決策變數，為該三階段之密度向量變數，所有虛擬變數不為負值。

依據 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 之網路 SBM 概念，令  $s_{nk}^{d-*}$  與  $s_{nk}^{d+*}$  分別代表部門  $d$  之虛擬變數最佳解，且若決策變數存在最佳解，則網路 SBM-DEA 模式可求得第  $k$  個 DMU 之  $d$  部門效率，如式 (19) 所示。

$$\rho_k^{d*} = \frac{1 - \frac{1}{N^d} \sum_{n=1}^{N^d} s_{nk}^{d-*} / x_{nk}^d}{1 + \frac{1}{M^d} \sum_{m=1}^{M^d} s_{mk}^{d+*} / y_{mk}^d} \quad (19)$$

其中， $\rho_k^{d*}$  為第  $d$  個部門效率最佳解。當  $s_n^{d-*} = 0$  及  $s_m^{d+*} = 0$ ，顯示在第  $d$  部門沒有超額投入或超額產出現象，表示第  $k$  個 DMU 在  $d$  部門內之投入與產出變數無須調整，此時投入與產出變數資源處於最佳配置，故  $\rho_k^{d*}$  值等於 1，表示生產技術落在效率前緣上。若再將每一個部門之相對權重納入網路模式中，欲求第  $k$  個 DMU 整體網路效率，可利用  $\sum_{d=1}^D w^d \rho_k^{d*} = \rho_k^*$  予以加權求得，其中  $w^1, w^2, w^3$  分別為第一、第二及第三階段之相對權重， $w^1 + w^2 + w^3 = 1, w^d \geq 0, \forall d = 1, 2, 3$ ，此值不為負。當所有部門  $d$  效率皆為 1 時，則  $\rho_k^* = 1$ ，

顯示整體系統之生產技術或服務技術處於效率前緣上。反之，當某個部門效率不為 1 時，則整體系統效率不會落在效率前緣上，表示此部門之投入與產出資源須進行調整。

由前述說明，序列網路模式可以求解整體系統效率及分解每一個部門之無效率變化情形。因 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 之 NSBM DEA 模式為非導向 (non-oriented) 型態，營運者可根據每部門之無效率同時進行投入與產出資源調配。

前述目標式 (2) 與限制式尚未將安全因素納入模式中，但安全亦為評估捷運系統之另一個重要構面，當捷運系統發生事故或產生傷亡人數時，會對捷運系統運作產生影響 (周品帆<sup>[27]</sup>; Lozano et al.<sup>[40]</sup>)。故安全因素的事故次數或傷亡人數可視為非意欲產出，再納入序列網路模式中。

假設第  $k$  個 DMU 於第  $d$  部門有非意欲產出 ( $u_k^{b,d}$ ,  $b = 1, 2, \dots, B$ )，文獻處理非意欲產出方法有採用「伴隨非意欲 (non-separable undesirable)」與「非伴隨非意欲 (separable undesirable) 產出」兩種方式 (Cooper et al.<sup>[37]</sup>)，例如污染排放隨著捷運系統運行過程中伴隨產生；但是，在捷運運行或服務過程中，肇事或事故並非伴隨發生，此屬非伴隨非意欲產出。本文參酌 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 概念，將非意欲產出納入於投入項，此非意欲產出變數 ( $u_k^{b,d}$ ) 可納入目標式之分子部分，故式 (2) 可修正為式 (20)。根據非意欲出之弱可拋性 (weak disposability) 特性，一旦捷運系統發生事故，營運單位無法任意拋棄負擔成本需處理非意欲產出，此隱含意欲產出與非意欲產出具有同等重要。

根據圖 2 概念，第二階段有事故次數與傷亡人數兩個非意欲產出項，故須增加  $u_k^a = \sum_j \lambda_j^2 u_j^a + s_k^{a-}$  與  $u_k^{ad} = \sum_j \lambda_j^2 u_j^{ad} + s_k^{ad-}$  於網路模式之限制式中，其中， $u_j^a$ 、 $u_k^a$  分別為第  $j$  個 DMU 與第  $k$  個 DMU 於第  $d$  部門事故次數變數。 $u_j^{ad}$ 、 $u_k^{ad}$  分別為第  $j$  個 DMU 與第  $k$  個 DMU 於第  $d$  部門傷亡人數變數； $s_k^{a-}$ 、 $s_k^{ad-}$  分別為第  $k$  個 DMU 於第  $d$  部門之非意欲產出 (事故次數與傷亡人數變數) 之虛擬變數，目標式 (2) 修改為式 (20)，如下所示。

$$\min \rho_k = \min \left( \frac{\{1 - [\frac{1}{4} (\frac{s_k^{NL-}}{x_k^{NL}} + \frac{s_k^{pe-}}{x_k^{pe}} + \frac{s_k^{ca-}}{x_k^{ca}} + \frac{s_k^{e-}}{x_k^e}) + \frac{1}{3} (\frac{s_k^{s-}}{x_k^s} + \frac{s_k^{se-}}{x_k^{se}} + \frac{s_k^{su-}}{x_k^{su}}) + \frac{1}{1} (\frac{s_k^{oc-}}{x_k^{oc}})]\}}{\{1 + [\frac{1}{2} (\frac{s_k^{pass+}}{y_k^{pass}} + \frac{s_k^{sv+}}{y_k^{sv}}) + \frac{1}{3} (\frac{s_k^{r+}}{y_k^r} + \frac{s_k^{a-}}{u_k^a} + \frac{s_k^{ad-}}{u_k^{ad}})]\}} \right) \quad (20)$$

s.t. 限制式 (3) - (18)

$$\sum_j \lambda_j^2 u_j^a = u_k^a - s_k^{a-} \quad (21)$$

$$\sum_j \lambda_j^2 u_j^{ad} = u_k^{ad} - s_k^{ad-} \quad (22)$$

$$\lambda_j^1, \lambda_j^2, \lambda_j^3 \geq 0, s_k^{NL-}, s_k^{pe-}, s_k^{ca-}, s_k^{e-}, s_k^{se-}, s_k^{oc-}, s_k^{sv+}, s_k^{pass+}, s_k^{r+}, s_k^{a-}, s_k^{ad-} \geq 0 \quad (23)$$

目標式加入非意欲產出虛擬變數於分子項目中，此說明，營運者可同時縮減投入資

源、減少非意欲產出項以及擴張產出項之資源，達到生產技術或服務技術落在技術效率前緣條件。在模式之限制式方面，除了保留原來限制式 (3) 至 (18) 外，再增加式 (21) 與式 (22) 於模式中。式 (21) 說明，第  $k$  個 DMU 之非意欲產出 (亦即事故次數) 與  $j$  個 DMU 非意欲產出項位於效率前緣上之間的差距，此差距為欲縮減 程度範圍。同理，式 (22) 說明第  $k$  個 DMU 之非意欲產出 (傷亡人數) 與  $j$  個 DMU 非意欲產出項位於效率前緣上之間的差距，此差距為欲縮減 範圍。因為網路模式額外增加兩個限制式，此虛擬變數需再納入於原式 (18) 中，故式 (18) 需修改為式 (23)。

同理，此序列網路模式說明，第  $k$  個 DMU 於第  $d$  個部門之無效率時，可同時縮減投入資源，降低非意欲產出及擴張產出資源，進而達到整體系統效率落於生產技術效率或服務技術前緣上。根據前述網路 SBM 模式之說明，本文可以利用此模式分析圖 3 序列網路各階段之效率與效能變化情形。

## 五、實證分析

在本章節部分，本文以臺北及高雄捷運系統為例，詮釋捷運系統之財務效能、生產效率、服務及市場效能，藉以說明本文所提之金字塔績效衡量觀念與序列網路評估架構之可應用性。

### 5.1 變數選擇與樣本統計分析

本研究以臺北 (以下稱為北捷) 與高雄捷運公司 (以下稱為高捷) 為分析對象，蒐集北捷<sup>[45]</sup> 與高捷<sup>[46]</sup> 公司於 2009 至 2019 年之營運資料。在變數選擇方面，本文參酌 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup>、周品帆<sup>[27]</sup> 與 Yu<sup>[32]</sup> 使用變數與 Daraio et al.<sup>[47]</sup> 及 Catalano et al.<sup>[48]</sup> 所建議變數，各階段所使用之投入、中間產出、意欲產出與非意欲產出變數如表 2 所示。

在生產階段方面，投入變數包含班次車廂數、網路長度、員工數 (不含站務人員) 及行車系統用電量，延車公里為中間產出變數。考量捷運系統路網持續興建與擴展，將網路長度變數納如於生產階段。此外，營運列車數為列車車廂數乘以班次數計算，藉以反映運輸系統之可服務容量性。根據文獻 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup>、Yu<sup>[32]</sup> 研究顯示，由於運輸服務具有不可儲存特性；此特性說明，當列車於起訖點之間提供運輸服務時，若無人搭乘，此列車所提供之座位數或車廂服務容量無法儲存，此延車公里於營運服務過程中無法立即調整，故視為兩階段間之固定連結型態 (fixed link)。在服務階段方面，投入變數包含延車公里外，站務員數、車站數及車站用電量，中間產出變數延人公里，產出變數為載客數。延人公里變數在服務階段可調整，以自由連結 (free link) 形式表示該階段與市場階段之連續性。除上述變數外，本階段產生旅客對系統服務滿意為該階段之意欲產出項。另外，根據交通部運輸研究所<sup>[8]</sup> 研究顯示，影響捷運系統服務指標因素甚多，例如，準點率 (單位：%)、平均乘載率 (單位：人/平方公尺)、平均班次間距 (單位：分)、旅客滿意度 (單位：%) 及可靠度指標 (單位：萬車廂公里) 等因素。由於上述指標單位不同，為避免引入過多變數於網路 DEA 模式限制式影響模式求解，故本文採用主成份分析法，將上述變數縮減成一個服務品質構面；分別求得臺北捷運及高雄捷運之主成份分析式分別為：

表 2 模式之投入與產出變數

階段	投入/產出	變數名稱(單位)	參考文獻
生產階段	初始投入變數	營運列車數(節)	Jain et al. <sup>[11]</sup> 、Tsai et al. <sup>[13]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Tsai and Mulley <sup>[21]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、郭子柔 <sup>[23]</sup> 、Yu <sup>[32]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		路網長度(公里)	Jain et al. <sup>[11]</sup> 、Lobo and Couto <sup>[12]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、Sharma et al. <sup>[28]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		員工數(不含站務人員)(人)	Lobo and Couto <sup>[12]</sup> 、Tsai et al. <sup>[13]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、郭子柔 <sup>[23]</sup> 、周品帆 <sup>[27]</sup> 、Sharma et al. <sup>[29]</sup> 、Yu <sup>[32]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		行車用電量(億度)	交通部運輸研究所 <sup>[8]</sup> 、沈令黎 <sup>[50]</sup>
	中間產出變數	延車公里(萬公里)	Jain et al. <sup>[11]</sup> 、Lobo and Couto <sup>[12]</sup> 、Tsai et al. <sup>[13]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Tsai & Mulley <sup>[21]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、Yu <sup>[32]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
服務階段	第二階段環境變數	服務區人口密度(人/平方公里)：在特定期間內，各路線車站所在地區之人口密度。	Canavan <sup>[3]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、郭子柔 <sup>[23]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		站務員數(人)	Tsai et al. <sup>[13]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、郭子柔 <sup>[23]</sup> 、周品帆 <sup>[27]</sup> 、Sharma et al. <sup>[28]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
	第二階段投入變數	營運車站數(站)	Lobo and Couto <sup>[12]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Graham et al. <sup>[15]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、Yu <sup>[32]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		車站用電量(億度)	交通部運輸研究所 <sup>[8]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		服務品質	Sharma et al. <sup>[28]</sup> 、Link <sup>[29]</sup> 、Nathanail <sup>[39]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
	非意欲產出	事故次數(件)：在特定期間內，列車系統及車站內發生之事故次數	Lin <sup>[7]</sup> 、Sharma et al. <sup>[28]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
		傷亡人數：在特定期間內，列車系統及車站內發生之死亡與受傷人數，並以特定權重表示嚴重程度。	Lin <sup>[7]</sup> 、周品帆 <sup>[27]</sup> 、Sharma et al. <sup>[28]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
	意欲產出變數	載客數(萬人)	Lin <sup>[7]</sup> 、Jain et al. <sup>[11]</sup> 、Lobo and Couto <sup>[12]</sup> 、Tsai et al. <sup>[13]</sup> 、Wey et al. <sup>[14]</sup> 、Tsai & Mulley <sup>[21]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、郭子柔 <sup>[23]</sup> 、Yu <sup>[32]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
中間產出	延人公里(萬公里)	Lin <sup>[7]</sup> 、Yu and Lin <sup>[22]</sup> 、Mallikarjun et al. <sup>[26]</sup> 、Sharma et al. <sup>[28]</sup> 、Yu <sup>[32]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>	
市場階段	第三階段投入	營業成本(億元)：不包含人事成本、營業外成本。	Tsai & Mulley <sup>[21]</sup> 、Mallikarjun et al. <sup>[26]</sup> 、周品帆 <sup>[27]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>
	最終產出變數	運輸收入(億元)：不含補貼及附屬事業收入，單位：億元。	郭子柔 <sup>[23]</sup> 、Daraio et al. <sup>[47]</sup> 、Catalano et al. <sup>[48]</sup> 、沈令黎 <sup>[49]</sup>

資料來源：交通部運輸研究所<sup>[8]</sup>、沈令黎<sup>[49]</sup>，資料整理自臺北捷運與高雄捷運之歷年營運年報資料<sup>[45,46]</sup>

臺北捷運公司服務品質主成份分析式: 服務品質=0.862\*可靠度指標+0.712\*準點率+0.672\*平均乘載率+0.198\*旅客滿意度-0.897\*平均班次間距

高雄捷運公司服務品質主成份分析式: 服務品質=0.843\*可靠度指標+0.634\*準點率+0.265\*平均乘載率+0.903\*旅客滿意度-0.902\*平均班次間距

利用上述主成份分析可得主成分因子得點 (令為  $y_{SQ}$ )，由於主成分因子得點出現負值，根據 Tone et al. [50] 研究指出，文獻處理 DEA 模式非正值 (non-positive) 變數方法甚多，主要是將非正值之投入或產出變數進行變數轉換，再代入 DEA 模式之限制式進行求解。故本文參酌 Tone et al. [50] 概念，令  $y'_{SQ} = y_{SQ} - y_{SQ}^{\min} + \varepsilon > 0$  進行轉換，其中， $y'_{SQ}$  為變數轉換後之服務品質， $y_{SQ}^{\min}$  為  $y_{SQ}$  最小值， $\varepsilon$  為微小值；轉換後之服務品質值如表 3 所示，此為服務品質產出變數。

表 3 轉換後之服務品質主成分因子得點

年	臺北捷運服務品質	高雄捷運服務品質
2009	0.0000001	0.0000001
2010	0.526441	0.4769701
2011	0.606391	1.4354301
2012	0.634001	1.1471901
2013	0.649411	0.9642401
2014	1.068581	1.8625301
2015	1.098661	1.9182801
2016	1.312601	2.0192701
2017	1.295651	3.0521001
2018	1.894541	2.4388001
2019	1.863691	3.1668301
最大值	1.894541	3.1668301
最小值	0.0000001	0.0000001
平均數	0.9880393	1.665267
標準差	0.5815117	0.9999996

安全亦是衡量服務指標之一，但依照交通部運輸研究所 [8]、Li [34] 研究概念，將運輸安全視為績效衡量構面之一，不納入服務品質指標。故本文參酌前述文獻，將事故次數與傷亡人數變數不納入服務品質構面。另參酌周品帆 [27] 與 Lozano et al. [40] 研究概念，將事故次數或傷亡人數採用非意欲產出變數處理之。網路 DEA 文獻處理非意欲產出變數有兩種方式，一是將非意欲產出視為意欲產出之反項 (或負項)，另一種則是將非意欲產出當作投入變數方式處理 (Cook and Zhu [18])。因傷亡人數有輕重、嚴重、死亡等級之區分，故參考

Lin<sup>[7]</sup> 與蘇昭銘<sup>[51]</sup> 等之研究，以傷亡人數當量=9.5\*死亡人數+3.5\*受傷人數之準則，計算傷亡人數當量。事故次數包含列車系統及車站內之事故次數，此包含天然災害、供電中斷、火災、路軌故障、非法入侵，以及列車運行中所產生傷亡事件等，造成列車運行停止。在車站內所發生事故，包含乘客於車站侵入軌道，影響列車運行等事件。

市場階段之投入變數包含延人公里與營業成本，此延人公里為中間投入變數，本階段之產出項為運輸收入，亦為序列網路架構中之最終產出。因為所蒐集之資料無法細分優待票或全票，故此項收入包含學生票、軍警票、老人票、全票等收入項目。此外，考量非營業收入、附屬事業收入或補貼與運輸服務較無直接關係，故不納入運輸收入項目。其次，根據 Hyman<sup>[9]</sup> 概念，服務導向之績效衡量構，除衡量投入與產出之間關係外，尚應考慮外在社會環境因素 (hardship factors)，此” hardship factors” 多為運輸事業單位所無法控制，例如政府政策 (Canavan<sup>[3]</sup>; Wey et al.<sup>[14]</sup>)、競爭交通工具 (Wey et al.<sup>[14]</sup>)、人口變數 (Wey et al.<sup>[14]</sup>; Yu and Lin<sup>[22]</sup>; Catalano et al.<sup>[48]</sup>) 或油價變化等變數。在環境變數方面，本文參酌 Wey et al.<sup>[14]</sup> Yu and Lin<sup>[22]</sup> 及 Catalano et al.<sup>[48]</sup> 之研究，採用服務區人口密度 (人/平方公里) 變數，由於此變數非捷運公司 (DMU 單位) 所能控制，故參酌 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 概念，將此納入模式之投入限制式。

有關模式所使用之投入、中間變數與產出變數樣本統計分析如表 4 所示。表 4 顯示各階段之特定投入、中間變數及最終產出變數之樣本統計分析，以班次車廂數變數而言，其平均數為 3386260.0，標準差為 2833510.8，該值甚大，主要是因為該變數係以班次數乘上列車廂數。以高雄捷運系統而言，在不考慮輕軌系統情形下，雖然提供高運量系統服務，但其列車系統採用 3 個車廂數編組，而臺北捷運系統包含中運量與高運量系統，中運量營運列車採用 3 個車廂編組，高運量系統營運列車採用 6-8 個車廂編組，不同營運列車車廂編組造成該變數樣本標準差較大現象，此亦可反映高雄與臺北捷運系統在提供運輸服務能量之差異。有關投入產出變數之相關分析如表 5 所示。

表 5 顯示，投入、中間產出與產出變數之間的相關係數均達 0.95 以上，具高度正相關，此說明 DMU 所使用之投入與產出變數之間具有同向性；故本文利用表 5 之變數進行序列網路 SBM 模式之求解。

由於 DEA 鑑別程度會受到投入與產出個數之影響，根據 Cooper et al.<sup>[19]</sup> 之建議，DMU 數量需至少符合  $\max\{3*(\text{投入變數個數}+\text{產出變數各數}), (\text{投入變數個數}*\text{產出變數各數})\}$  之建議準則。若不考慮中間投入項，本文模式所使用變數計有 8 個投入與 4 個產出變數。依 Cooper et al.<sup>[19]</sup> 之建議準則，此網路模式之 DMU 數量最少需大於  $\max\{3*(8+4), (8*4)\}=36$  個；但是，目前分析樣本僅為 22 個，可能面臨 DMU 數不足問題，影響序列網路模式之鑑別度。故本文參酌 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 與高強等人<sup>[52]</sup> 所提之視窗方法，增加分析樣本數，此視窗方法概念說明如下。

假設有  $j$  個 DMU， $t$  為評估時期數， $p$  為單一視窗長度， $w$  為視窗個數，此視窗數量與 DMU 總數可如式 (24) 所述 (Cooper et al.<sup>[37]</sup>)。

$$p = \begin{cases} \frac{t+1}{2} & \text{當 } t \text{ 為基數} \\ \frac{t+1}{2} \pm \frac{1}{2} & \text{當 } t \text{ 為偶數} \end{cases} \quad (24)$$

表 4 投入與產出變數之樣本統計分析

第一階段投入變數	最大值	最小值	平均數	標準差
班次車廂數	6814512.0	586866.0	3386260.0	2833510.8
路網長度	131.1	39.1	81.2	40.4
非站務員工數	4921.0	471.0	2300.1	1805.2
系統用電量	3.3	0.4	1.6	1.3
第一階段中間變數	-	-	-	-
延車公里	2310.1	414.4	1249.7	831.1
第二階段投入變數	-	-	-	-
站務員數	1428.0	386.0	862.5	475.3
車站數	117.0	37.0	72.5	36.7
車站用電量	4.6	0.9	2.5	1.6
第二階段產出變數	-	-	-	-
載客數	78959.9	4333.9	35656.0	31520.5
第二階段中間變數	-	-	-	-
延人公里	636111.8	29723.0	288049.3	259178.7
第三階段投入變數	-	-	-	-
營業成本	178.0	17.3	79.7	60.7
第三階段最終產出變數	-	-	-	-
運輸收入	168.1	10.3	77.7	67.6

每一個 DMU 之視窗數可按  $w=t-p+1$  計算得之，DMU 總數可依照  $(j \times p \times w)$  乘積計算。根據視窗分析法概念，每一個視窗得到一個效率值，單一 DMU 除第一與最後一期外，其餘每期資料會因視窗重疊產生多個效率值，此可用欄距 (column range, CR) 觀察每期各 DMU 效率穩定性，此欄距  $(CR_{At}) = \text{Max}(A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{pt}) - \text{min}(A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{pt})$ ；其中， $A_{pt}$  表示受評單位 A 於第 p 個視窗之第 t 期效率值；欄距變動越小，表示效率越穩定。綜合欄距可依  $CR_A = \text{Max}_{j=2, \dots, k-1}(CR_{Aj})$  計算；同理，當欄距值 (CR) 變動愈小，表示愈穩定；

反之，若變動很大，則顯示效率值呈現不穩定。若欲探討 DMU 跨時期穩定性，可分析全時期之全距 (Total Range, TR)，此全距為各 DMU 視窗內之效率最大值與最小值之差，亦即  $TR_A = \text{Max}(A_{11}, \dots, A_{t-p+1,t}) - \text{min}(A_{11}, \dots, A_{t-p+1,t})$ 。另外，平均數與變異數為各 DMU 於全期之平均相對效率及變動幅度 (高強等人 [52])。

表 5 投入與產出變數之間相關分析

	班次車廂數	路網長度	非站務員工數	系統用電量	延車公里	站務員數	營運車站	車站用電量	載客數	延人公里	營業成本	運輸收入
班次車廂數	1.000											
路網長度	0.994	1.000										
非站務員工數	0.996	0.991	1.000									
系統用電量	0.995	0.996	0.994	1.000								
延車公里	0.995	0.998	0.992	0.997	1.000							
站務員數	0.998	0.999	0.995	0.997	0.997	1.000						
車站數	0.997	0.999	0.994	0.998	0.998	1.000	1.000					
車站用電量	0.991	0.994	0.991	0.999	0.997	0.995	0.996	1.000				
載客數	0.995	0.997	0.995	0.999	0.998	0.997	0.998	0.998	1.000			
延人公里	0.996	0.998	0.996	0.999	0.998	0.998	0.998	0.997	1.000	1.000		
營業成本	0.976	0.985	0.979	0.991	0.988	0.982	0.985	0.995	0.990	0.989	1.000	
運輸收入	0.996	0.998	0.994	0.999	0.999	0.998	0.998	0.998	1.000	1.000	0.989	1.000

## 5.2 實證分析結果

依序列網路模式概念，整體系統效率 (亦即為財務效能) 為各階段效率之加權，此權重之設定可參考 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 概念，可利用外生變數方法進行設定或參酌 Yu<sup>[32]</sup> 及 Yu and Lin<sup>[22]</sup> 之研究，假設權重相等。文獻亦有採用 Entropy 法設定權重值，此可為後續研究課題。考量運輸系統營運過程中，生產、服務與消費服務同時產生 (Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu<sup>[32]</sup>)；故簡化分析起見，本文假設權重相等，各階段權重值為 0.33，進行模式求解。

根據臺北捷運與高雄捷運之投入、中間產出項、最終產出項、非意欲產出及服務品質、環境變數等變數，依序列網路 SBM DEA 模式，結合視窗分析法所計算之視窗數與總 DMU 數，利用 DEA-Solver-PRO 15.0 軟體，進行求解。

因為本研究之樣本期間為 2009 至 2019 年，根據視窗分析法，此  $t=11$  為基數，代入式 (24) 中之  $p=(11+1)/2=6$ ，得 6 年期為一個視窗長度。此外，因分析樣本共有 22 期，可區分 6 個視窗數，合計 72 個 DMU，此較原先 22 個 DMU 為多，可提升模式鑑別度。在變動規模報酬 (VRS) 假設條件下，此 72 個 DMU 同時進行求解，亦即臺北與高雄捷運 2009 至 2019 年投入與產出樣本資料一起進行評估，此可獲得臺北與高雄捷運之整體系統效能，亦即財務效能，此財務效能可同時分解為生產效率 (PE)、服務效能 (SE) 及市場效能 (ME)。為利於分析起見，本文再依據臺北捷運與高雄捷運系統之別，分別整理各階段之視窗效率與視窗效能變化情形，結果如表 6 至 8 所示。

表 6 生產階段效率視窗分析結果

捷運公司	視窗	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	視窗平均數	平均數	變異數	綜合欄距	全距
臺北	W1	0.88929	0.92984	1	1	1	1						0.96986	0.97941	0.001007	0.05294	0.11071
	W2		0.89343	1	1	0.95511	0.95672	1					0.96754				
	W3			1	1	0.94706	0.94831	1	1				0.98256				
	W4				1	0.94706	0.94831	1	1	1			0.98256				
	W5					0.94706	0.94831	1	1	1	1		0.98256				
	W6						0.94831	1	1	1	1	1	0.99139				
	CR		0.03641	0	0	0.05294	0.05169	0	0	0	0						
	M	0.88929	0.91164	1	1	0.959258	0.958327	1	1	1	1	1					
高雄	W1	0.99186	1	1	0.95595	1	1						0.99130	0.995228	0.000144	0.04405	0.04405
	W2		1	1	0.95595	1	1	1					0.99266				
	W3			1	0.96506	1	1	1	1				0.99418				
	W4				1	1	1	1	1	1			1.00000				
	W5					1	1	1	1	0.97969	1		0.99662				
	W6						1	1	1	0.97969	1	1	0.99662				
	CR		0	0	0.04405	0	0	0	0	0.02031	0						
	M	0.99186	1	1	0.96924	1	1	1	1	0.98646	1	1					

表 6 為生產階段之生產效率變化，因為每一個視窗跨越 6 期，故呈現 6 個視窗效率值變化。就臺北捷運公司而言，視窗之效率值介於 0.967543~0.991385 之間，變異數為 0.001007，顯示該公司於樣本分析期間之視窗生產效率具穩定性。再觀察該表 6 之 CR 值，該值介於 0~0.05294，觀察 2013、2014 年之綜合欄距值分別為 0.05294 與 0.05169，顯示此兩期之生產效率穩定性表現較差。進一步分析臺北捷運公司於樣本分析期間之效率平均值，即表 6 之效率均值 (M) 變化，該值介於 0.88929 與 1 之間；其中，以 2009 年之 0.88929 最差，說明該公司於該年度尚有 11.07% 的改善空間。觀察臺北捷運路網發展，因 2009-2010

年及 2013-2014 年期間，由於新的路線通車加入營運，營運路網規模擴大，此期間有超額投入與產出不足現象，使得生產技術不在效率前緣上。就 2009~2019 年間，將視窗生產效率加權平均  $(0.969855+0.967543+0.982562+0.982562+0.982562+0.991385)/6$ ，得生產效率平均值為 0.97941，顯示該公司在生產階段之投入與產出資源方面，尚有 2.059% 的改善空間。

觀察表 6 之高雄捷運公司生產階段生產效率變化，其值介於 0.991302~1 之間，變異數為 0.000144，該值甚小，顯示各視窗生產效率變化具穩定性。再觀察該公司之年度平均值 (M) 變化，其值介於 0.96924~1 間，平均值為 0.995228，顯示該公司尚有 0.477% 的改善空間。綜觀高雄捷運公司生產效率之綜合欄距、全距為 0.04405，該值甚小，顯示效率變動幅度較小，此顯示，高雄捷運在生產階段之效率表現相較於臺北捷運表現較具穩定。

比較臺北捷運與高雄捷運之生產效率平均值 (0.97941 vs. 0.99523)，高雄捷運之生產效率平均值相較於臺北捷運系統為高，顯示，高雄捷運在生產階段之生產效率表現相較臺北捷運系統為優。

表 7 為服務階段之服務效能值變化情形；觀察該表之臺北捷運公司 6 個視窗服務效能值變化，服務效能值介於 0.809347~0.978567 之間，變異數為 0.04422，顯示臺北捷運於此階段 6 個視窗之服務效能變化具穩定性。再檢視該表於 2009~2019 年期間之服務效能值變化情形，其 CR 值介於 0~0.64199 之間，綜合欄距為 0.64199，全距為 0.64199，此 CR 值變化較大，顯示臺北捷運之服務效能值穩定性較低。再觀察臺北捷運於分析樣本期間之服務效能，其服務效能均數介於 0.62797~1 之間；其中，該公司於 2013、2014 年之服務效能均值僅為 0.68963 及 0.62797，此兩期相較於其他期間為低。值得注意的是，該公司之 CR 值於 2013 及 2014 年分別為 0.64199 與 0.6057，此相較其他期間為高，顯示臺北捷運公司於 2013 與 2014 年之服務效能表現較差。另外，此分析樣本期間之服務效能均數為六個視窗之加權平均，亦即為 0.97857、0.88256、0.84077、0.80935、0.90011 及 0.89905 之加權平均，得 0.88507，顯示該公司在服務階段之投入與產出資源約有 11.49% 之服務改善空間。

再檢視該表之高雄捷運公司 6 個視窗服務效能變化情形，其視窗服務效能值皆為 1，變異數、綜合欄距與全距皆為 0，樣本分析期間，每一個年期之服務效能值皆為 1，服務效能均值亦為 1，顯示高雄捷運於服務階段之服務效能具高度穩定性，且服務技術落在效能前緣上。綜觀臺北捷運與高雄捷運之服務效能變化，高雄捷運公司在服務階段之效能具有高度穩定性與服務效能，顯示高雄捷運相較於臺北捷運有較佳服務效能表現。

同理，將臺北與高雄捷運在市場階段之市場效能值整理如表 8 所示。表 8 顯示，臺北捷運在 6 個視窗之市場效能均值介於 0.991253~0.998028 之間，變異數為 0.000102，此變異數微小，顯示臺北捷運公司在此 6 個視窗之市場效能具有高度穩定性。其次，觀察 2009~2019 年間之市場效能均值 (M) 變化，該值介於 0.97388~1 之間；觀察 CR 值變化，該值介於 0~0.05225 之間，變動幅度甚小，具有穩定性。觀察表 8 於樣本分析期間，臺北捷運公司於 2010 及 2014 年之市場效能均值分別為 0.97388 與 0.98643，顯示，該公司於此兩期之市場效能相較於其他樣本期間為低。其次，臺北捷運於此階段之市場效能均值為

0.99625，顯示該公司在市場階段之資源配置約有 0.37%之改善空間。

表 7 服務階段之服務效能視窗分析結果

捷運公司	視窗	服務階段										視窗平均數	平均數	變異數	綜合欄距	全距	
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018						2019
臺北	W1	1	0.87140	1	1	1	1						0.97857	0.88507	0.04422	0.64199	0.64199
	W2		0.77526	0.99994	1	0.643150	0.877030	1					0.88256				
	W3			0.99987	1	0.446980	0.597750	1	1				0.84077				
	W4				1	0.358010	0.498070	1	1	1			0.80935				
	W5					1	0.40065	1	1	1	1		0.90011				
	W6						0.39430	1	1	1	1	1	0.89905				
	CR		0.09614	0.00013	0	0.64199	0.60570	0	0	0	0						
	M	1	0.82333	0.99994	1	0.68963	0.62797	1	1	1	1	1					
高雄	W1	1	1	1	1	1	1						1	1	0	0	0
	W2		1	1	1	1	1	1					1				
	W3			1	1	1	1	1	1				1				
	W4				1	1	1	1	1	1			1				
	W5					1	1	1	1	1	1		1				
	W6						1	1	1	1	1	1	1				
	CR		0	0	0	0	0	0	0	0	0						
	M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					

檢視表 8 之高雄捷運 6 個視窗之市場效能均值變化情形，其值介於 0.959578~0.999915 之間，變異數為 0.005807，變動幅度甚小，顯示視窗之市場效能變化具穩定性。其次，再觀察表 8 高雄捷運在 2009~2019 年之間的市場效能變化情形，該值介於 0.8073~1 之間；CR 值介於 0~0.24093 之間，此以 2013 年之 CR 值較大，顯示該公司於 2013 年之市場效能變異幅度較大，市場效能穩定度較差，而觀察該期之市場效能值亦僅為 0.80733。整體而言，高雄捷運之市場效能之均值為 0.97070，顯示該公司於市場階段尚有 2.93%的資源配置改善空間。

比較分析臺北捷運與高雄捷運於此階段之市場效能變化，綜觀樣本分析期與視窗之市場效能，臺北捷運公司之市場效能變化相較於高雄捷運具穩定性；此外，比較臺北捷運與高雄捷運之市場效能均值變化(0.99625 vs. 0.97070)，顯示，臺北捷運在市場階段效能表現相較於高雄捷運為佳。

表 9 為序列網路效能值變化，亦即財務效能值變化。觀察該表之臺北捷運公司，此 6 個視窗財務效能值變化介於 0.896182~0.979652 之間，變異數為 0.012415，該變異數值微

小，變動程度小，但綜合欄距 0.36993 值不低，顯示視窗之間的財務效能值的穩定程度尚非理想。另外，就臺北捷運此 6 個視窗而言，其財務效能均數為 0.93777，顯示臺北捷運公司尚有 6.2228%之資源配置改善空間。再觀察 2009~2019 年期各年度之財務效能變化情形，該均值 (M) 介於 0.80865~1 之間，其 CR 值介於 0~0.36993 之間。以 2013 與 2014 年而言，臺北捷運之財務效能值分別為 0.82978 與 0.80865，對應於同年期之 CR 變動程度較大，顯示此兩年期之財務效能相較於其他年期為差。觀察臺北捷運公司其他階段效率或效能變化，2013~2014 之服務階段的服務效能亦較低，造成該公司於 2013-2014 年財務效能較差，影響整體效能表現。

表 8 市場階段之市場效能變化

捷運公司	視窗	市場階段											視窗平均數	平均數	變異數	綜合欄距	全距
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019					
臺北	W1	1	0.94775	0.99997	1	0.99987	0.99993						0.99125	0.99625	0.00010	0.05225	0.05225
	W2		1	1	1	1	0.98784	0.99998					0.99797				
	W3			1	1	1	0.98827	0.99991	1				0.99803				
	W4				1	1	0.97511	0.99991	1	1			0.99583				
	W5					1	0.98023	0.99997	1	1	1		0.99664				
	W6						0.98721	0.99999	1	1	1	1	0.99780				
	CR		0.05225	0.00003	0.00000	0.00013	0.02482	0.00008	0	0	0						
	M	1	0.97388	0.99999	1.00000	0.99997	0.98643	0.99995	1	1	1	1					
高雄	W1	1	1	1	0.91077	1	1						0.98513	0.97070	0.00581	0.24093	0.24093
	W2		1	1	0.9984	0.75907	1	1					0.95958				
	W3			1	0.99978	0.75907	1	1	1				0.95981				
	W4				1	0.75907	1	1	1	1			0.95985				
	W5					0.75944	1	1	1	1	1		0.95991				
	W6						1	1	1	1	1	0.9995	0.99992				
	CR		0	0	0.08923	0.24093	0	0	0	0	0						
	M	1	1	1	0.977238	0.80733	1	1	1	1	1	0.9995					

再觀察表 9 高雄捷運公司之 6 個視窗財務效能值變化情形，該值介於 0.98405~0.99884 之間，變異數為 0.00066，該值甚小；其次，該表中之綜合欄距 0.08048，該值亦不大，顯示視窗之間的財務效能變化具穩定性。就此 6 個視窗而言，其財務效能之均數為 0.98862，顯示高雄捷運公司於財務資源配置尚有 1.154%改善空間。再觀察表 9 之各年期財務效能變化情形，其均值 (M) 介於 0.93564~1 之間，CR 值介於 0~0.08048 之間；其中又以 2013 年

之 CR 值 0.08048 相較其他年度為高，此 CR 變動程度較大，顯示該年度之財務效能變化相較於其他年期穩定性為低，且 2013 年之財務效能僅為 0.93564，相較其他年度財務效能亦為低。

觀察高雄捷運其他階段之效率或效能變化情形，高雄捷運公司於 2013 之市場效能亦較低，此亦造成該公司於 2013 年財務效能較差所致。綜觀樣本分析期，高雄捷運在綜合欄距、全距、效能變動較臺北捷運公司為穩定。比較臺北捷運與高雄捷運在財務效能均值表現 (0.937772 vs. 0.98864)，顯示臺北捷運之財務效能較高雄捷運為低。

表 9 序列網路視窗效能變化

		整體網路系統												視窗均數	平均數	變異數	綜合欄距	全距
捷運公司	視窗	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019						
臺北	W1	0.96310	0.91488	1	1	1	0.99998						0.97965	0.93777	0.01242	0.36993	0.36997	
	W2		0.88137	1	1	0.83207	0.93813	1					0.94192					
	W3			1	1	0.70451	0.81061	1	1				0.91918					
	W4				1	0.63003	0.74710	1	1	1			0.89618					
	W5					0.98235	0.67895	1	1	1	0.99989		0.94353					
	W6						0.67715	1	1	1	0.99987	1	0.94617					
	CR		0.03351	0.00003	0	0.36993	0.32283	0.00003	0.00001	0	0.00002							
	M	0.96310	0.89813	0.99998	1	0.82978	0.80865	0.99998	1	1	0.99988	1						
高雄	W1	0.99729	1	1	0.95550	1	1						0.99213	0.98862	0.00066	0.08048	0.08048	
	W2		1	1	0.98478	0.919520	1	1					0.98405					
	W3			1	0.98828	0.919520	1	1	1				0.98463					
	W4				1	0.919520	1	1	1	1			0.98659					
	W5					0.919640	1	1	1	0.99323	1		0.98548					
	W6						1	1	1	0.99323	1	0.99983	0.99884					
	CR		0	0	0.04450	0.08048	0	0	0	0.00677	0							
	M	0.99729	1	1	0.98214	0.93564	1	1	1	0.99549	1	0.99983						

為進一步探討各階段效率或效能之間的變化趨勢，本文利用表 6 至表 9 結果彙整如圖 3 所示。圖 3 顯示，就生產階段而言，臺北捷運於 2009、2010 年之生產效率相較其他年期為差，此相較高雄捷運公司，其生產效率亦稍低，但生產效率仍相當穩定。就服務階段而言，臺北捷運公司在 2010、2013、2014 年之服務效能顯較其他階段績效為差，尤其在 2013 及 2014 年間，服務效能明顯低於 0.7 以下。觀察該公司於 2013、2014 年皆有許多事故次數發生，其中以 2014 年之傷亡人數為歷年最高，此階段安全表現待加強。觀察高雄捷運服務效能變化，歷年表現皆位於效率前緣上。在市場階段方面，臺北捷運在市場效能具有穩定性發展，但高雄捷運於 2013 年之市場效能明顯較其他年期為低。就超額分析顯示，高雄捷運於 2013 年市場效能出現營業成本有超額投入現象，使得市場效能無法落在效能前緣上，故有效縮減營運成本成為高雄捷運改善市場效能之課題。

再觀察圖 3 之臺北捷運系統總效率 (亦即財務效能) 變化趨勢，此財務效能於 2010、

2013 與 2014 年較其他年度明顯低落，亦較高雄捷運之財務效能為低。此外，臺北捷運之財務效能變化趨勢與服務效能趨勢相似，此財務效能受到服務效能影響較大；而圖 3 亦顯示該公司於 2010、2013 與 2014 年有較低之服務效能，影響該公司同年度之市場效能表現。由此觀之，臺北捷運公司欲改善財務效能，可藉由改善服務階段之投入與產出資源分配，提升其服務效能。另外，觀察臺北捷運公司於 2013 與 2014 年間，在安全方面出現較高事故次數與傷亡人數，此階段之有較多之非意欲產出。故臺北捷運公司可在服務階段同時縮減非意欲產出，即降低事故次數、減低傷亡人數，提升此階段之服務技術，使服務效能落在效能前線上。

再觀察圖 3，高雄捷運於此三個階段之表現，市場階段之市場效能表現較其他階段為差，尤以 2013 年之市場效能相較其他年期為差，此因於該公司於此年期營運成本有過多超額投入所致。再觀察高雄捷運之財務效能變化情形，因在市場效能相對較差，進而影響其在財務效能表現。故高雄捷運公司首先改善其在市場階段之投入與產出資源配置，例如縮減營運成本或增加運輸收入，提升財務效能。值得注意的是，高雄捷運之財務效能趨勢發展相較於臺北捷運公司具穩定性且較佳。

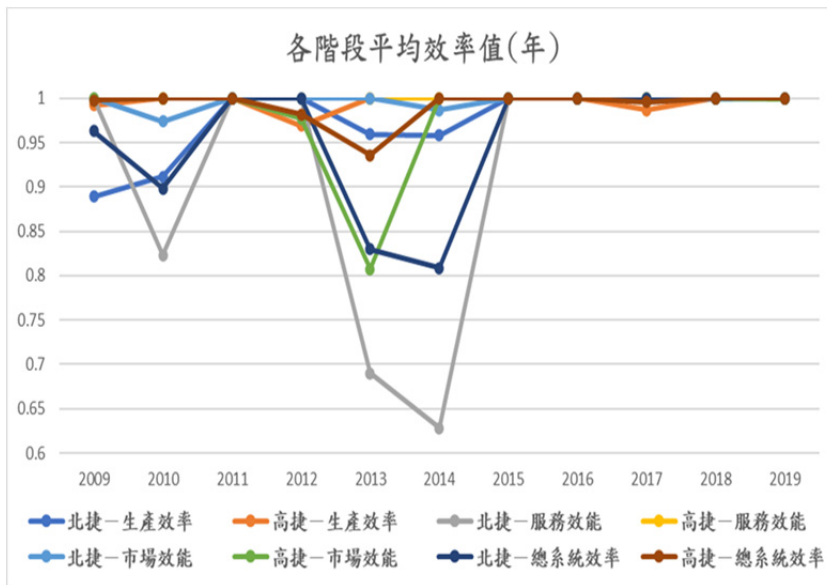


圖 3 受評單位各階段平均效率變化情形

### 5.3 檢討與分析

在都會區裡，由於民眾運輸需求與經濟活動日益增加，除公車運輸系統外，捷運系統提供便捷、大量運送及服務導向之運輸服務。但由於捷運營運單位多受到政府之管制措施，多數捷運營運機構面臨營運虧損與票價不易調整困境，產生永續營運問題，此問題反

映捷運營運單位之財務效能衡量課題。環顧國內外文獻，過去文獻多數仍局限於探討捷運系統之生產力或生產效率課題。但實務上，捷運營運單位除追求營運效率外，亦在同時追求其他目標績效，例如服務品質、安全績效、財務績效等目標；此顯示，衡量捷運系統績效不再是單一面向，而是多維度績效衡量課題。基此，本文提出金字塔績效評估觀念及序列網路分析模式，並以臺北捷運與高雄捷運系統為例進行實證分析。本文除獲致上述研究成果之外，亦獲致以下數點意涵。

1. 在研究方面之貢獻，本文擴展 Fielding et al.<sup>[25]</sup> 之三角績效評估概念，提出金字塔績效評估觀念及序列網路績效衡量架構，此序列網路績效衡量架構可衡量捷運營運單位之財務效能，同時可將財務效能分解為生產效率、服務效能及市場效能等階段意涵，此可提供營運者於不同階段進行管理改善措施。從案例分析顯示，本文結合網路 SBM 模式與視窗分析法，同時考量服務品質、安全面向之事故次數與傷亡人數及環境變數，此可衡量臺北及高雄捷運系統在財務、生產、服務、安全與服務品質等目標之效率與效能評估。因此，本文所提之金字塔與序列網路績效衡量架構具備可操作性與應用性，此模式概念較 Lin<sup>[7]</sup>、Lobo and Couto<sup>[12]</sup>、Wey et al.<sup>[14]</sup>、Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup>、周品帆<sup>[27]</sup> 及 Link<sup>[29]</sup> 等研究，除可提供捷運系統(或軌道系統)生產效率或服務效能外，亦可詮釋安全性、服務品質導向性、市場服務及財務效能等管理意涵優點。故本文模式較前述文獻能提供管理者在多階段績效意涵，此可作為營運者在各階段改善之參考。
2. 由案例分析顯示，本文之金字塔績效衡量概念可用於詮釋捷運系統之財務分析課題，此可補充 Chang et al.<sup>[2]</sup> 並無衡量捷運財務績效之研究缺口。再者，過去文獻 Lobo and Couto<sup>[12]</sup>、Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup>、周品帆<sup>[27]</sup> 及 Yu<sup>[32]</sup> 之研究課題多侷限於效率或效能績效衡量，而本文研究則將捷運系統之服務品質、財務、安全、市場及外在環境變數等多個目標績效一起納入評估，此符合實務應用價值；而本文研究成果可補充前述文獻之研究限制與研究缺口。
3. 在研究方法或模式應用方面，根據 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup> 研究顯示，若網路階段不能同時求解，則不能有效詮釋運輸系統之不可儲存性。而本文應用網路 SBM 模式，可同時分解整體網路效能概念，此與 Mallikarjun et al.<sup>[26]</sup> 採取個別階段求解有差異；後者求解方法無法詮釋運輸服務不可儲存性與服務特性。根據 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 之收入效率或利潤比效率等模式顯示，其模式僅能提供產出導向之財務效率意涵，而本文所提出之金字塔績效衡量與序列網路模式，除可提供財務效能意涵外，亦可提供生產效率、服務效能及市場效能等意涵，故本文之金字塔績效衡量較 Cooper et al.<sup>[37]</sup> 之收入效率或利潤比效率等模式，能提供更多階段之效率或效能等管理意涵，應用性更為廣泛。
4. 實證分析結果顯示，臺北捷運之財務效能不若高雄捷運系統具有穩定性；究其原因，臺北捷運主要受到 2010、2013 與 2014 年之服務效能較差所致。值得注意的是，隨著新的路線完工通車，車站加入營運，路網規模擴大，在生產階段，臺北捷運或高雄捷運系統之生產階段呈現較低生產效率現象。此初期網路擴大，產生過多投入資源，然而在服務階段之產出並未同步提升。

5. 本文雖獲致上述研究成果，唯根據文獻研究，影響財務效能或各階段績效變數甚多，例如高雄捷運之經營方式屬於民間參與營運方式，附屬事業收入通常為財務重要收入之一，此項收入是否納入財務效能計算，值得再思考。再者，由於捷運營運單位為吸引乘客搭乘，實施轉乘機制，採取較低費率，地方政府再於次年度補助捷運公司之非營運收入項目，此類補助措施可能影響財務效能衡量。後續研究可結合序列網路模式與隨機邊界函數法 (SFA)，將影響服務、市場或財務效能之外在環境變數或政策因素予以排除，藉以獲得實際財務效能及各階段效率或效能之變化。再者，本文在模式之權重設定係參酌 Wey et al.<sup>[14]</sup>、Yu and Lin<sup>[22]</sup>、Yu<sup>[32]</sup> 研究，假設權重相等進行求解。文獻處理權重之設定，有採用網路模式之內生變數權重法 (參見 Cook and Zhu<sup>[18]</sup>；Kao<sup>[42]</sup>)，外生變數權重法 (參見 Wey et al.<sup>[14]</sup>；Cooper et al.<sup>[37]</sup>) 或 Entropy 法，此權重之設定可為後續研究議題。再者，在序列網路模式之發展方面，除可利用 Tone and Tsutsui<sup>[44]</sup> 之網路 SBM 模式外，亦可採用其他方法構建模式，例如利用方向性距離函數、網路加法型或網路包絡型概念，發展序列網路模式，此可為後續模式發展議題。後續研究亦可發展多目標 DEA 模式，用於分析本研究課題。再者，由於本文蒐集 2009 至 2019 年度營運資料，且 COVID-19 疫情對公共運輸經營環境產生巨變，故 COVID-19 對捷運系統之整體營運效能衝擊，亦可為後續研究發展課題。

## 六、結論與建議

環顧國內外文獻，文獻探討捷運或地鐵系統多侷限於生產力或效率課題；然而實務上，捷運或地鐵運輸除追求生產力效率目標外，亦在追求高服務品質、安全性及財務績效等多個目標績效；因此，探討捷運系統績效課題不再屬於單一目標，宜以多維度角度為之，更能符合實務觀點。本文提出金字塔績效衡量概念與序列網路衡量架構，將收入產生效能 (亦即財務效能) 分解為生產效率、服務效能及市場效能等三部分，此可提供營運者獲得不同階段之績效管理意涵，可作為各階段營運管理改善之參考。本研究應用主成份分析法，將影響服務品質變數形成服務品質構面，再將此服務品質之主成份因子得點納入模式中，同時考量捷運系統之安全性，將非意欲產出變數納入序列網路模式進行分析。以臺北及高雄捷運系統為例，蒐集 2009-2019 年之投入與產出變數資料，結合網路 SBM 模式與視窗分析法，進行模式求解。

根據視窗分析及網路 SBM 模式結果顯示，臺北捷運於 2013 及 2014 年之財務效能相對於其他階段效能為差，此主要受到同年度服務效能較差所致。究其原因，此期間臺北捷運於安全方面有較多事故與傷亡人數發生，影響服務品質及安全。故臺北捷運公司如欲改善財務效能，可先改善服務階段，降低非意欲產出，提高安全性。再者，臺北捷運公司於 2010 與 2014 年有較低服務效能，影響該公司於市場效能表現。高雄捷運於市場階段表現相較其他階段為差，尤以 2013 年之市場效能相較其他年期為差；究其原因，主要營運成

本有過多超額投入現象。高雄捷運在 2012、2013 年市場效能較差影響該公司之財務效能表現。故高雄捷運公司首先應改善其在市場階段之投入與產出資源配置；例如，降低營運成本與提升運輸收入，進而使財務效能與市場效能達到效能前緣上。

由實證分析顯示，本文所提之金字塔績效衡量概念與序列網路模式架構，可詮釋捷運系統之財務效能、生產效率、服務效能及市場效能之多階段管理意涵，營運者可就不同階段之投入與產出資源進行較佳配置，故本文之多維度績效衡量概念具備可應用性。本文雖獲致許多研究成果，唯影響財務效能或市場效能之外生變數甚多，例如政府對捷運系統可能實施補助措施，此可能對市場效能或財務效能產生扭曲，後續研究可就此議題進行研究。再者，模式權重值可能影響目標值求解，此權重值設定可為後續研究課題。此外，本文基於投入與產出資料的完整性，研究對象僅包含兩家業者，此兩家業者有高運量、輕軌或中運量系統之別。因無法蒐集路線別或不同系統別營運資料，故尚無法詮釋以路線別或系統別財務或市場效能管理意涵。後續研究可擴大研究對象，增加樣本數，探討各都會區或各國捷運系統之財務、市場及服務導向等相關議題。

## 參考文獻

1. Fouracre, P. and Dunkerley, C., "Mass Rapid Transit Systems for Cities in the Developing World", *Transport Reviews*, Vol. 23, No. 3, 2003, pp. 299-310.
2. Chang, C. C., Shyue, S. D., and Chang, S. K., "Financial Sustainability Oriented Strategies for Urban Mass Rapid Transit Operation", *Transportation Planning Journal*, Vol. 39, No. 4, 2010, pp. 413-440.
3. Canavan S. , *Performance Modelling of Urban Rail Systems: An Application of Frontiers, Regression, and Causal Inference Techniques*, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, 2015.
4. UITP, "Statistics Brief- World Metro Figures 2021." , <https://www.uitp.org/publications/metro-world-figures-2021/>, 民國 111 年 12 月。
5. 交通部運輸研究所，*交通建設計畫財務評估之研析*，民國 101 年。
6. Waters II, W.G., "Productivity Measurement", In: Hensher, D.A., Button, K.J. (eds), *Handbook of Transport Modelling*, Elsevier Science Ltd, Oxford, 2000.
7. Lin, E. T. J. , "Productive Efficiency, Service Effectiveness, Productivity and Sales Force Measurement of Rail Transport Industry", Institute of Traffic and Transportation, National Chiao Tung University, 2004.
8. 交通部運輸研究所，*軌道運輸系統營運統計資料與績效評量指標整合規劃*，民國 105 年。
9. Hyman, W., "Guide for Customer-Driven Benchmarking of Maintenance Activities", NCHRP Report 511, *Transportation research Board*, Washington, D.C., 2004.
10. Oum, T. H., Waters II, and Yu, C., "A Survey of Productivity and Efficiency Measures in Rail Transport", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 33, No. 1, 1999, pp. 9-42.

11. Jain, P., Cullinane, S., and Cullinane, K., “The Impact of Government Development Models on Urban Rail Efficiency”, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, 2008, pp. 1238-1250.
12. Lobo, A. and Couto, A., “Technical efficiency of European Metro Systems: The Effects of Operational Management and Socioeconomic Environment”, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 16, No. 3, 2016, pp. 723-742.
13. Tsai, C.-H., Mulley, C., and Merkert, C., “Measuring the Cost Efficiency of Urban Rail Systems an International Comparison Using DEA and Tobit Models”, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 49, Iss. 1, 2015, pp. 17-34.
14. Wey, W.-M., Kang, C. C. and Haider, A. Khan, “Evaluating the Effects of Environmental Factors and a Transfer Fare Discount Policy on the Performance of an Urban Metro System”, *Transport Policy*, Vol. 97, 2020, pp. 172-185.
15. Graham, D. J., Couto, A., Adeney, W. E., and Glaister, S., “Economies of Scale and Density in Urban Rail Transport: Effects of Productivity”, *Transportation Research Part E*, Vol. 39, 2003, pp. 443-458.
16. Graham, D. J., “Productivity and Efficiency in Urban Railways: Parametric and Non-parametric Estimates”, *Transportation Research Part E*, Vol. 44, Iss. 1, 2008, pp. 84-99.
17. 蔡奇宏，「台北捷運系統成本函數及經濟特性之研究」，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 97 年。
18. Cook, W. D., and Zhu, J., *Data Envelopment Analysis: A Handbook on the Modeling of Internal Structures and Networks*, Springer, New York, 2014.
19. Cooper, W. W., Seiford, L. M., and Zhu, J., *Handbook on Data Envelopment Analysis*, Springer, New York, 2011.
20. Santos, J., Simoes, P., Costa, A., and Cunha Marques, R. *Efficiency of the Portuguese Metros. Is It Different from Other European Metros?*, Center for Management Studies (CEG-IST), Technical University of Lisbon, 2010.
21. Tsai, C.-H. and Mulley, C., “Benchmarking the Efficiency Performance of International Metro Systems”, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.9, 2013, pp. 1-14.
22. Yu, M. M. and Lin, T. J., “Efficiency and Effectiveness in Railway Performance Using a Multi-activity Network DEA Model”, *Omega-International Journal of Management Science*, Vol. 36, 2008, pp. 1005-1017.
23. 郭子柔，「世界各主要城市之捷運營運績效分析」，國立臺北大學企業管理學系碩士論文，民國 100 年。
24. 黃至麒，「應用資料包絡分析法評估國際地鐵聯盟成員之經營績效」，國立高雄第一科技大學運籌管理研究所碩士論文，民國 102 年。
25. Fielding, G. J., Babitsky, T. T., and Brenner, M. E., “Performance Evaluation for Bus Transit”, *Transportation Research Part A*, Vol. 19A, No. 1, 1985, pp. 73-82.
26. Mallikarjun, S., Lewis, H. F., and Sexton, T. R., “Operational Performance of U. S. Public Rail Transit and Implications for Public Policy”, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 48, 2014,

- pp. 74-88.
27. 周品帆, 「考慮轉乘運量與事故發生之臺北捷運績效評估 - 多運具網絡資料包絡分析法」, 國立交通大學運輸與物流管理學系碩士論文, 民國 105 年。
  28. Sharma, M., Debnath, R., Oloruntoba, R. and Sharma, S.M., “Benchmarking of Rail Transport Service Performance through DEA for Indian Railways”, *International Journal of Logistics Management*, Vol. 27, Iss. 3, 2016, pp. 629-649.
  29. Link H., “The Impact of Including Service Quality into Efficiency Analysis: The Case of Franchising Regional Rail Passenger Service in Germany”, *Transportation Research Part A*, Vol. 119, 2019, pp. 284-300.
  30. Lu, W. M., Hung, S. W., Kweh, Q. L., Wang, W.K., and Lu, E. T., “Production and Marketing Efficiencies of the U.S. Airline Industry: A Two-stage Network DEA Approach”, In: Cook, Wade, D., Zhu, J. (eds), *Data Envelopment Analysis: A Handbook on the Modeling of Internal Structures and Networks*, Springer, New York, 2014.
  31. Saranga, H. and Nagpal, R., “Drivers of Operational Efficiency and Its Impact on Market Performance in the Indian Airline Industry”, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 53, 2016, pp. 165-176.
  32. Yu, M. M., “Assessing the Technical Efficiency, Service Effectiveness, and Technical Effectiveness of the World’s Railways Through NDEA Analysis”, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Iss. 10, 2008, pp. 1283-1294.
  33. Hassan M. N., Hawas, Y. E., and Ahmed, K., “A Multi-dimensional Framework for Evaluating the Transit Service Performance”, *Transportation Research A*, Vol. 50, 2013, pp. 47-61.
  34. Li X., “Multi-Dimensional Assessment of Transit System Efficiency and Incentive-based Subsidy Allocation”, Ph. D, Dissertation University of Wisconsin Milwaukee, 2015.
  35. Clarke, W.R., “Public Transport, Proceedings of the Conference on Transport Benchmarking”, European Conference of Ministers of Transport, 2000, pp. 148-158.
  36. Scheraga, C. A., “Operational Efficiency Versus Financial Mobility in the Global Airline Industry: A Data Envelopment Analysis and Tobit Analysis”, *Transportation Research Part A*, Vol. 38, No. 5, 2004, pp. 383-404.
  37. Cooper, W. W., Seiford, L. M., and Tone, K., *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, 2nd Ed., Springer, New York, 2007.
  38. Haron, S., Nasir, M. S. B. & Mohamad, S. S., “Rail Transport Service Performance Indicators in Klang Valley”, AIP Conference Proceedings, No. 1774, 2016, pp. 1-8.
  39. Nathanail, Eftihia., “Measuring the Quality of Service for Passengers on the Hellenic Railways”, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, 2008, pp. 48-66.
  40. Lozano, S., Gutiérrez, E., and Moreno, P., “Network DEA Approach to Airports Performance Assessment Considering Undesirable Outputs”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, 2013, pp. 1665-1676.
  41. Nash, C., “Modelling Performance: Rail”, In: Hensher, D.A., Button, K.J. (eds), *Handbook of Transport Modelling*, Elsevier Science Ltd, Oxford, 2000.

42. Kao, C., "Network Data Envelopment Analysis: A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 239, No. 1, 2014, pp. 1-16.
43. Cook, W. D., Liang, L., and Zhu, J., "Measuring Performance of Two-stage Network Structures by DEA: A Review and Future Perspective", *OMEGA: The International Journal of Management Science*, Vol. 38, No. 6, 2010, pp. 423-430.
44. Tone K. and Tsutsui, M., "Network DEA: A Slacks-based Measure Approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 197, No. 1, 2009, pp. 243-252.
45. Taipei Rapid Transit Company, Year Statistical Operation Reports of TRTC, Year 2009 – 2019, Taipei, Taiwan.
46. Kaohsiung Rapid Transit Company, Year Statistical Operation Reports of TRTC, Year 2009 – 2019, Taipei, Taiwan.
47. Daraio, C., Diana, M., Costa, F. D., Leporelli, C., Matteucci, G., and Nastasi, A., "Efficiency and Effectiveness in the Urban Public Transport Sector: A Critical Review with Directions for Future Research", *European Journal of Operational Research*, Vol. 248, 2016, pp. 1-20.
48. Catalano, G., Daraio, C., Dinan, M., Gregori, M., and Matteucci, G., "Efficiency, Effectiveness, and Impacts Assessment in the Rail Transport Sector: A State-of-the Art Critical Analysis of Current Research", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 26, 2019, pp. 5-40.
49. 沈令絜, 「考量服務品質之捷運系統績效分析」, 國立東華大學運籌管理管理研究所碩士論文, 民國 110 年。
50. Tone K., Chang, T.-S., and Wu, C.-H., "Handling Negative Data in Slack-based Measure Data Envelopment Analysis Models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 282, 2020, pp. 926-935.
51. 蘇昭銘、解詠荃、白乙均、洪承揚、魏珮孺, 「交通事故與公共運輸服務之關聯性分析」, 108 年道路交通安全與執法研討會, 中央警察大學, 民國 108 年, 頁 17-30。
52. 高強、黃旭男、Toshiyuki Sueyoshi, 管理績效評估：資料包絡分析法, 華泰文化事業公司, 臺北市, 民國 92 年。

# 消保與防詐諮詢專線

☎有消費問題→ 1950全國消費者服務專線

☎有詐騙疑慮→ 165反詐騙諮詢專線



消費諮詢



165全民防騙網

