

電動車共享系統車隊布署最佳化模式

OPTIMAL FLEET DEPLOYMENT MODEL FOR ELECTRIC VEHICLE SHARING SYSTEMS

盧宗成 Chung-Cheng Lu¹

顏上堯 Shangyao Yan²

林韋捷 Wei-Chieh Lin³

(105 年 10 月 26 日收稿，105 年 12 月 29 日第 1 次修改，106 年 6 月 16 日定稿)

摘 要

本研究發展數學規劃模式，在給定之車隊規模下，求解遊憩式電動車共享系統各租賃站之最佳車輛配置數，目標為最大化系統營運業者之利潤。本研究建立電動車車流時空網路，描述電動車在時空維度之移動，並以此為基礎發展公共電動車系統車隊布署模型。此外，此模式亦考量充電式(plug-in)電動車之營運特性，包括電動車電量消耗、電量限制與充電需求。為了測試本研究所發展的公共電動車系統車隊布署模式應用於不同問題情境之結果，本研究以日月潭風景區電動車共享系統為參考對象，將其延伸成不同租賃站數與車隊規模之各種測試情境，包括依照目前現況設計之情境 1(2 個租賃站、19 輛電動車)、未來可能新增租賃站及擴大車隊規模之情境 2(3 個租賃站、30 輛電動車)。本研究利用最佳化問題求解軟體 CPLEX 求解所設計之測試例題，並於每一情境下針對顧客需求進行敏感度分析，探討此模式在不同需求水準下所得之結果，並提出相關之建議。

關鍵詞： 公共電動車；共享移動力系統；時空網路；車隊布署

-
1. 國立交通大學運輸與物流管理系教授 (聯絡地址：100 臺北市忠孝西路 1 段 118 號 4 樓，電話：02-23494960；E-mail: jasoncclu@gmail.com)。
 2. 國立中央大學土木工程系教授。
 3. 國立臺北科技大學資訊管理研究所碩士。

ABSTRACT

This study develops a mathematical programming model to determine optimal deployment of a given fleet of plug-in electric vehicles (EVs) to the stations of a leisure-oriented EV-sharing system. The objective is to maximize the profit of the system operator. The proposed model is developed based on an EV-flow time-space network that describes the movements of EVs in the spatial and temporal dimensions. In addition, the model takes into account the operational characters of plug-in EVs, including energy consumption, battery capacity and charging requirement. To examine the performance of the proposed model, this study conducts a set of computational experiments on two problem instances (or scenarios) of different sizes (in terms of numbers of stations and EVs) generated based on the EV-Sharing system deployed in Sun Moon Lake national park in Nantou, Taiwan. The base case scenario (scenario 1) is designed according to the current status of the system, including 2 stations and 19 EVs. Considering that the system will be expanded in the near future, the other scenario with more stations and EVs is also generated; scenario 2 has 3 stations and 30 EVs. These two problem instances of the model are solved using CPLEX. The results show that the proposed model is effective in obtaining optimal fleet allocations for the EV-Sharing system. We also conduct a sensitivity analysis to examine the impact of different demand levels of on the fleet allocation results of the model. The results of the sensitivity analysis are discussed and suggestions for dealing with unmet demand, such as real-time dispatching or reallocation of EVs and increasing the fleet size, are presented. The fleet allocation results obtained by solving the model can be used as a reference for the system operator to improve the overall operational efficiency and service level of the system.

Key Words: *Public electric vehicles; Shared mobility systems; Time-space networks; Fleet deployment*

一、前言

1.1 研究背景與動機

為了減少運輸部門的碳排放與能源消耗，許多國家將推廣電動車 (electric vehicles, EVs) 列為綠色運輸的主要發展項目之一，並推動各項相關的示範計畫，包括電動車購買價格補貼、充電基礎設施、電池交換與資訊平台之設立及公共電動車 (public EV) 系統等。在各項電動車推廣計畫中，公共電動車或電動車共享 (EV-sharing) 服務近來逐漸受到各國的重視。

日本京都於 2000 年 12 月啟動公共電動車示範計畫，由日本新能源與產業科技發展組

織贊助，此示範計畫共設置 6 個租賃站，50 個充電座，35 輛兩人座電動車 (20 輛 Toyota e-coms 與 15 輛 Nissan Hyperminis)，提供京都市民與遊客電動車租借服務^[1]；其後也陸續於大阪、東京、橫濱與神戶等都市推動電動車共享服務示範計畫。美國聖地牙哥市於 2011 年 7 月推出的 Car2go 計畫，是全球最早大規模推動的電動車共享服務，共投入 300 輛電動車，註冊加入會員後便可預約租車或在現場取車，並可透過手機 App 查看欲租用車輛剩餘電量，是否足以提供接續租用行程之使用。Car2go 電動車租用服務的最大特色是，可隨時租還，使用者不需要將車開到特定租還站，只需停放在 Car2go 服務範圍內即可，預估至 2020 年，加州將設置上萬座公共充電站點。法國巴黎市則於 2011 年 12 月推出 Autolib' 電動車共享服務，由巴黎市政府與 Bolloré 公司共同合作，由該公司負責興建充電站、提供租借所需的車輛及系統服務的整合；此電動車共享服務與 2007 年推出的 Velib' 自行車共享服務互補，提供巴黎市民完整的低碳運輸服務；至 2015 年，已投入超過 2,500 輛電動車，並且有超過 15,500 名註冊使用者。此一共享服務也於 2015 年成功推廣至英國倫敦與美國印地安納波里斯市；其中，於 2015 年 9 月在印地安納波里斯市推出的 BlueIndy 電動車共享服務，預計建置 200 個租賃站與 500 輛電動車 (<https://www.blue-indy.com/>)。

電動車共享服務其營運方式類似公共自行車 (public bike) 服務，其特點包括異地取車還車服務 (甲租乙還)、自助式無人服務、租金以「分鐘」計價等，因此，非常適合在短程、區域性觀光或通勤交通使用。本研究所探討的遊憩式電動車共享系統 (leisure-based EV-sharing systems)，即為公共電動車在觀光遊憩區之應用。為減輕碳排放量造成觀光遊憩區的環境負擔，並改善旅遊品質，我國經濟部於 2013 年 4 月底啟動日月潭風景區之智慧電動車先導運行計畫^[2]，結合公、私部門之資源，導入公共電動車系統。依據 2012 年 9 月份英國經濟學人雜誌報導，一台共享租賃車的運輸效能等同 15 台私人小汽車，因此，在觀光遊憩區推動電動車共享服務，除了可以達到節能減碳的效益外，更可改善遊客所帶來的交通擁塞問題。

在公共電動車系統的建置與營運過程中，電動車車隊布署 (fleet deployment) 或車輛配置 (vehicle allocation) 是一項很重要的工作。租賃站中之車輛數若是配置不足，使用者可能會常常租不到車輛，將會降低其使用電動車的意願，影響業者的收入；此外，若某些租賃站配置過多電動車，則會有過多閒置車輛，造成資源浪費且增加營運管理成本。因此，對公共電動車租賃系統營運業者而言，如何在各租賃站配置適當數量的電動車輛，是系統規劃與營運相當重要的課題^[3]。目前實務上，各租賃站電動車配置數量，通常是由營運業者根據過去經驗來決定，此作法僅仰賴相關作業人員之經驗與主觀判斷，較缺乏效率，且難以了解規劃結果之績效。為協助公共電動車系統業者有效決定各租賃站之車輛配置數，本研究提出一數學規劃模式，求解對業者利潤最大之車隊布署方案。

1.2 文獻回顧

電動車一般分為純電動車 (pure electric vehicle, PEV; 或電池電動車 battery electric vehicle, BEV)、混合動力電動車 (hybrid electric vehicle, HEV) 與燃料電池車 (fuel cell

electric vehicle, FCEV) 等 3 類，本研究探討的電動車共享系統乃是使用充電式純電動車 (plug-in PEV)。文獻中關於電動車之研究相當廣泛，包括設置電動車站之最佳位置、消費者購買電動車的動機、電動車產業與市場、電動車相關控制系統等。其中，又以電動車充電站數量與位置之相關研究為主，例如 Kou 等人^[4] 建立最佳化模式求解電動車充電站之位置與規模；Ge 等人^[5] 提出都市充電站規劃模式，模式中考慮道路路網結構與容量限制、車流資訊等重要因素；Liu 等人^[6] 提出調適性粒子群最佳化演算法求解電動車充電站規劃問題。Kobayashi 等人^[7] 針對電動車提出一個新的路徑搜尋法，幫助電動車在電力不足時，可以快速搜尋到鄰近充電站之路線，與一般搜尋法比較，其執行時間只有原來的一半。Kim 等人^[8] 針對電動車充電站提出一個隨機模式與充電排程方法。Huang 等人^[8] 針對電動車快充與慢充設備之網路設計提出最佳化模式。

電動車共享系統屬於共享移動力系統 (shared mobility systems)^[10]，相較於自行車共享系統 (bike-sharing systems)^[11-14] 與一般小汽車共享系統 (car-sharing systems)^[15-16] 已有許多相關研究投入，關於電動車共享系統的研究目前仍相當有限。Nakayama 等人^[17] 結合基因演算法與模擬模式，求解日本京都電動車共享系統的設計與營運問題，包括租賃站數量與車隊規模。George 與 Xia^[18] 發展考慮充電站車輛可得性之利潤最大化模式，求解電動車共享系統的最佳車隊規模，作者提出精確解與近似解演算法求解所發展之數學模式。為了解決使用者需求與租賃站車輛或停車空位間之不平衡，Bruglieri 等人^[19] 發展電動車重新配置模式與演算法。Kumar 與 Bierlaire^[20] 分析法國尼斯電動車共享服務系統的各租賃站營運績效。Kaspi 等人^[21] 從車輛與停車空間不足所導致使用者增加的總旅行時間，來衡量車輛共享系統的預約機制績效，並且根據分析結果建立數學規劃模式，求解有效的預約機制。Boyaci 等人^[22] 以法國尼斯電動車共享系統為例，發展一多目標混合整數線性規劃模型求解單向車輛共享系統，其結果顯示可允許決策者以量化的方式調整營運者和消費者間的利益。同樣以法國尼斯電動車共享系統為例，Boyaci 等人^[23] 針對電動車共享系統的车辆與人員調度問題，提出一個多目標混合整數線性規劃模式，此最佳化模式求解結果再輸出至一個離散事件模擬架構中，進行相關的充電限制可行性評估。

由以上文獻回顧可知，目前相關文獻中尚無針對電動車共享系統之車輛配置最佳化問題進行討論與研究。然而，根據 Katzev^[3] 之研究，對於一般民眾而言，使用車輛共享系統最常見的困擾在於需要使用車輛時卻租借不到車，對於業者而言，於租賃站配置過多車輛會導致資源浪費與成本過高，因此，車輛共享系統的車輛配置問題對於系統營運而言可說是相當重要。為了彌補此一文獻上的缺口，本研究將針對電動車共享系統車隊布署問題發展最佳化模式。

1.3 研究內容概述

為了提升公共電動車系統的營運效能及服務水準，本研究從公共電動車系統營運業者立場，以最大化業者利潤為目標，在既有的車隊規模下，求解每日營運前各租賃站電動車輛配置問題，幫助系統營運業者決定每日營運前各租賃站之最佳車輛配置數。為了描述電

動車輛在系統中的流動情形，本研究建立電動車車流時空網路。時空網路之應用範圍相當廣泛，尤其在運輸領域，成效相當良好，例如 Yan 與 Chen^[24] 利用多重時空網路描述人旅次流動與車輛流動，並以此構建一整合旅次需求與班次供給之長途客運業者車隊排程模式；Yan 與 Tseng^[25] 建構多重時空網路來描述人旅次流動與飛機流動，再以數學規劃方法，構建一直接整合旅次需求與航次供給之多機種多停靠飛航排程模式；Kliewer 等人^[26] 利用時空網路流動技巧，發展多場站、多車輛型態之公車排程模；Yan 與 Chen^[27] 利用時空網路流動技巧，考量航空客運業者的聯盟行為，發展數個飛航排程模式及求解演算法。Yan 等人^[26] 提出具有時空相似度限制之運鈔車路線與排程模式，使當日規劃之路線能與先前所規劃之路線與抵達服務需求點的時間有所差異，以提升運鈔車護運作業的安全性。

本研究利用時空網路流動技巧，在電動車流時空網路的基礎上，運用數學規劃方法，建立遊憩式電動車共享系統車隊布署最佳化模式。為了測試所發展之模式的求解績效，本研究以日月潭風景區電動車共享系統為參考對象，將其延伸成不同租賃站數與車隊規模之各種測試情境，包括依照目前現況設計之情境 1 (2 個租賃站、19 輛電動車)、未來可能新增租賃站及擴大車隊規模之情境 2 (3 個租賃站、30 輛電動車)，並於每一情境下針對顧客需求進行敏感度分析，探討此模式在不同需求水準下所得之結果，並提出相關之建議。

本文後續內容簡介如下。第二節為問題描述與假設，第三節介紹電動車車流時空網路，第四節為數學模式，第五節為範例測試與結果，第六節為結論與建議。

二、問題描述與假設

2.1 問題描述

遊憩式電動車共享系統乃是布署於郊區或觀光遊憩區之公共電動車系統，其目的乃是藉由提供旅客便利的電動車租賃服務，降低旅客自行開車的比例，減輕遊客所帶來的碳排放量與交通擁塞對於觀光遊憩區之環境負擔。一般而言，布署於都會區之通勤式電動車共享系統之租賃站，通常設置於公共運輸場站 (火車站、捷運站等) 周邊與主要旅次產生或吸引點附近 (學校、醫院、百貨公司等)，作為第一里或最後一里的接駁運具；由於市區內空間有限，此類型系統之租賃站容量較小，但是站數較多。另一方面，遊憩式系統通常布署於郊區或名勝風景區，租賃站通常設置於熱門景點，提供遊客低碳運輸的旅遊運具；由於郊區具有較大之腹地，此類型系統之租賃站容量較大，能夠容納較多之車輛，但是站數較少。此外，遊憩式系統的租賃需求較通勤式系統之租賃需求穩定，因此系統營運者較易獲得租賃需求資料，作為營運管理優化的決策參考。

當公共電動車系統建置完成後，在系統營運管理中所面對的一個重要決策即為車隊的布署，或是各租賃站的車輛配置問題。當配置過少的車輛數於租賃站時，將無法滿足使用者的需求，間接影響使用者使用此系統的意願；另一方面，配置過多車輛數於租賃站時，會導致車輛閒置率增加，造成資源浪費的情形。因此，為了提供使用者便捷的公共電動車

租賃服務，增加其使用意願，除了租賃站的設置區位必須妥善規劃外，站在公共電動車系統營運業者的角度而言，如何在各租賃站配置適當的電動車輛數，將成為系統營運相當重要的課題。

本研究從遊憩式公共電動車系統營運業者立場，以最大化業者利潤為目標，在既有的車隊規模與租賃站個數下，求解每日營運前各租賃站電動車輛布署問題，幫助系統營運業者決定每日營運前各租賃站之最佳車輛配置數。

2.2 問題假設

針對此模式，本研究提出以下之基本假設：

(一) 需求面

1. 需求量已知且固定：本研究假設系統每一時段的電動車租賃起迄 (origin-destination, O-D) 需求皆為已知且固定。由於實務上無法在營運前得知公共電動車系統之每日實際需求量，因此本研究所建構之車輛配置模式，乃是依據營運業者所提供之歷史資料估計系統的電動車租賃起迄需求。
2. 未被服務之需求即離開租賃系統：在實務上，公共電動車系統並非一定能完全服務所有顧客需求。因此，本研究在模式中允許租賃站因為電動車輛不足而無法服務顧客需求之情況，且在此情況下，未被服務之顧客不會繼續等待，而是離開系統。由於數學模式之求解目標為最大化業者利潤，為了讓求解之車輛配置結果服務更多的需求，本研究針對未服務之顧客需求給予一懲罰成本。

(二) 供給面

1. 租賃站和電動車供給數量已知：本研究假設公共電動車系統內的租賃站數、電動車輛數均為已知。此外，每一租賃站皆配有足夠的充電座數與停車位數供公共電動車使用者使用。由於本研究是在電動車車隊規模固定的情形下進行每日租賃站車輛配置，且所有車輛都要布署至租賃站中，因此在模式中將不考慮車輛購買成本與折舊成本；車隊購買成本通常於系統建置時決定車隊規模時加以考量。
2. 單一電動車種：為求簡化模式呈現與求解，本研究僅考量單一電動車種；然而此時空網路具有延伸至多車種的彈性，未來可視不同應用考量多車種。
3. 電動車之最低剩餘電量限制：在實際營運的過程中，當電動車剩餘電量低於一事先給定之預設值 (例如剩餘電量低於 25%) 時，將必須在租賃站中進行充電而無法繼續服務顧客需求，本研究於模式中考量此一最低剩餘電量限制。
4. 假設充飽電之時間固定：在實際營運的過程中，由於每輛電動車的剩餘電量一旦達到最低車輛預設值即必須充電，因此，本研究為求簡化模式求解，假設每輛電動車一旦充電則將電量充到滿 (100%)，而且所需之充電時間均相同且固定，充電成本亦相同。

三、電動車車流時空網路

本研究利用多層時空網路 (multi-layer time-space network) 定式電動車輛在公共電動車系統中之流動情形，每一層時空網路對應一輛電動車；換言之，電動車車流時空網路的層數等於電動車數量。圖 1 為電動車車流時空網路示意圖，假設有 n 輛電動車，故有 n 層時空網路。在每一層時空網路中，橫軸代表公共電動車系統內之各租賃場站，而縱軸則為系統營運時間。此外，一般公共電動車系統中包括「甲站租、甲站還 (甲租甲還)」及「甲站租、乙站還 (甲租乙還)」兩種租賃行為。「甲站租、甲站還」係指在公共電動車系統當中，顧客租賃和歸還電動車位於同一租賃站；「甲站租、乙站還」則係指在該系統當中，接受顧客租賃和歸還電動車位於不同租賃站，因此本研究在電動車流時空網路之設計上，將考量這兩種租賃行為。另一方面，本研究之時空網路採用 1 天作為規劃之時程長度，模式求解結果即為該日各租賃站之電動車配置數量。若在未來使用此模式時，可依不同租賃站數量及規劃時程考量，於電動車流時空網路進行相對應修改。

時空網路包含節點與節線兩大要素；節點為時空點，代表 1 個租賃站在某時間之狀態，節線代表電動車在兩時空點間之作業 (移動或滯留)。其中，節點又可以分為租賃站時空節點與匯集節點兩類，以下分別說明。

1. 租賃站時空節點

租賃站時空節點表示電動車在不同作業之起點或迄點，包括顧客租賃電動車行為之起點或迄點 (即電動車租賃站或歸還電動車站)，以及電動車在某一租賃站滯留或充電之開始或結束。在顧客租賃需求方面，本研究根據電動車租賃業者所提供之歷史資料，來推估該系統在每一時段所有起迄對間之租賃需求量。同時，考量電動車租賃業者之實際營運現況，將對應於同一個租賃站之兩相鄰時空節點間之時間間隔 (時距) 設為 60 分鐘，也就是每個租賃站每 60 分鐘都有一個相對應的時空節點。決策者在未來使用此模式時，可依需要增加或減少時空點之時距長度。

2. 匯集節點

本研究於每層時空網路模型中設計單一匯集節點，匯集節點為一個虛擬節點，乃是用於平衡時空網路中之電動車流量，不存在於空間中。在每天營運時間開始前，業者會依各電動車租賃站之車輛配置規劃，將電動車布署至租賃站以服務顧客需求，直到營業結束時，才會將租賃系統內所有電動車匯集到該節點。

此外，本研究於每層電動車流時空網路所設置之節線共分成 5 種，分別為「旅行需求節線」、「滯留節線」、「充電節線」、「供給節線」及「匯集節線」，其節線成本、用電量與流量上下限設計說明如下：

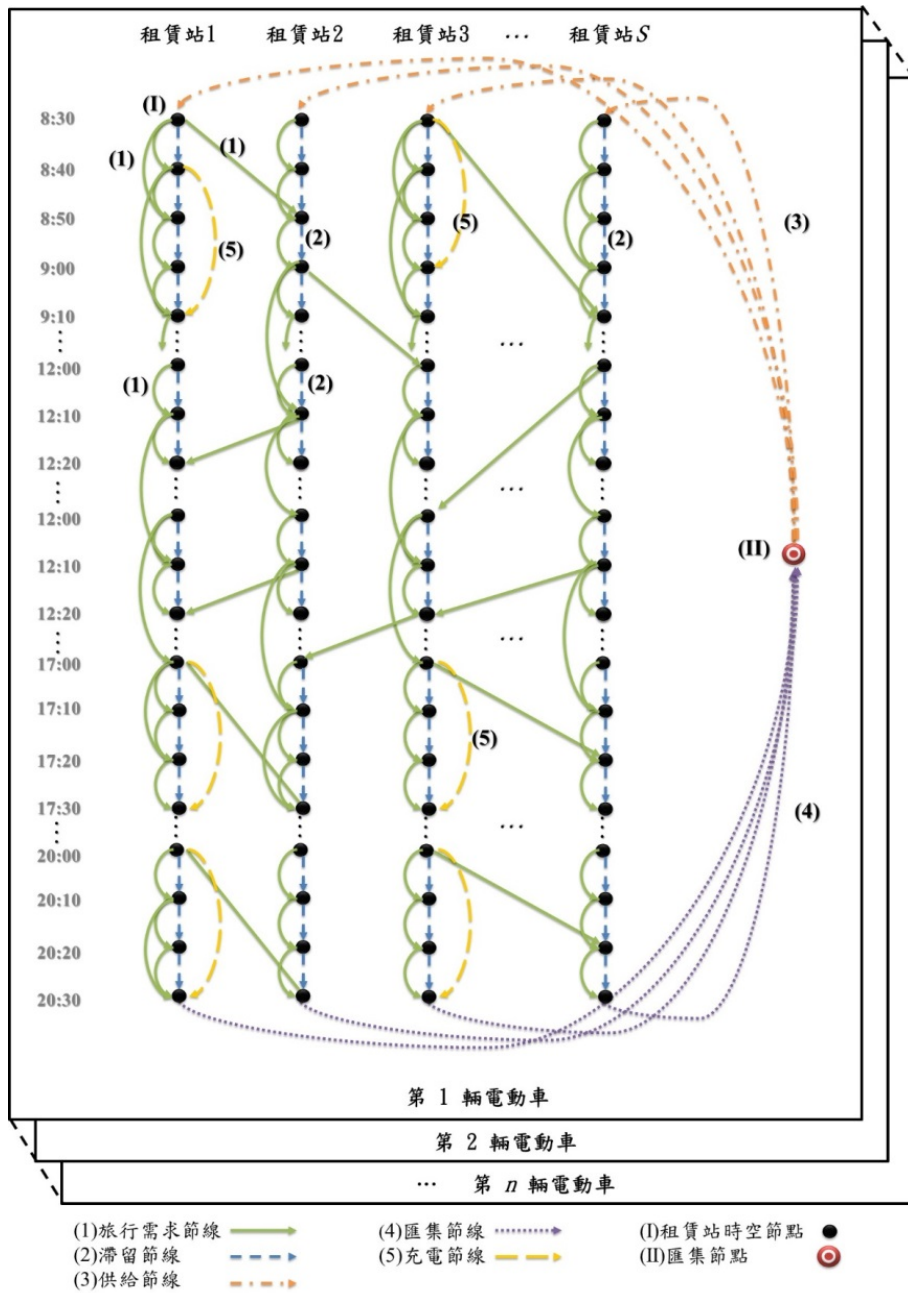


圖1 電動車車流時空網路示意圖

1. 旅行需求節線

旅行需求節線（簡稱旅行節線）連接兩個不同的租賃站時空節點，表示使用者租用電動車輛於相同或不同租賃站間移動之情形。旅行節線之起點即為顧客取車之租賃站與時間，而迄點則代表顧客還車之租賃站與時間。旅行節線連接相同租賃站、不同時點之情形稱為「甲租甲還」；旅行節線連接不同租賃站、不同時間點之情形稱為「甲租乙還」。本研究中將旅行節線流量上限設為 1，表示電動車於該時段兩點間流動；流量下限設為 0，表示該時段兩點間無任何電動車通過。此外，由於電動車耗電成本將反映在供給節線與充電節線（見後續說明），因此旅行節線上之節線成本為零。電動車在旅行節線上的用電量為正值，且與該節線之時間長度成正比。

2. 滯留節線

滯留節線連接對應於同一租賃站的兩個相鄰時點，表示電動車輛於租賃站滯留之狀態。滯留節線流量上限設為 1，流量下限設為 0。為了避免過多電動車在租賃場站中滯留，滯留節線成本將設為電動車於場站內的保管或管理成本。由於電動車在滯留的過程中，電量並無任何損耗，因此用電量為 0。

3. 充電節線

充電節線連接同一個租賃站之不同時點，係指當電動車抵達該租賃站之剩餘電量低於系統預設值時，電動車輛於租賃站進行充電之狀態。如 2.2 節所述，本研究假設每輛電動車充飽電的時間都相同，也就是每一充電節線之長度均相同，充電成本亦相同。此外，充電節線流量上限設為 1，流量下限設為 0。電動車在充電過程中，其電量增加而非損耗，因此電動車在充電節線上的用電量為負值。

4. 供給節線

供給節線連接匯集節點與各租賃站之第 1 個時點，表示在每天營運時間開始時，依各個電動車租賃站之車輛配置規劃，將電動車布署到各個租賃站。供給節線流量上限設為 1，流量下限為 0。如同 2.2 節所述，本研究不考慮車輛購買與折舊成本，但是每輛電動車在每日營運前，會由業者將其電量充滿，再配置於租賃站，因此供給節線之單位流量成本為 1 輛電動車充飽電所需之耗電成本，在此假設為一固定值（與充電節線之成本相同）。電動車在供給節線的用電量為 0。

5. 匯集節線

匯集節線連接各租賃站每天最後一個時點與匯集節點，表示每天營運結束後，各租賃場站電動車匯集到匯集節點。匯集節線流量上限設為 1，流量下限為 0，匯集節線成本為 0，用電量亦為 0。

四、數學模式

4.1 電動車共享系統車隊布署最佳化模式

本研究所建構之電動車共享系統車隊布署最佳化模式求解目標為最大化業者利潤，為業者總收入減去總成本，總收入為所有旅行節線之電動車出租收入，總成本包括：(1) 電動車供給成本（每日營運前充滿電之成本）；(2) 電動車充電成本（電動車營運中在各租賃站之充電成本）；(3) 滯留成本（電動車於租賃站停留的管理成本）；以及 (4) 顧客流失成本，其決策變數為每日營運前各租賃站之電動車配置數量。模式之數學符號說明如下：

集合

- S^v ：第 v 層時空網路之供給節線集合 ($v = 1$ 時表示第 1 輛電動車之時空網路， $v = n$ 時表示第 n 輛電動車之時空網路)
- T^v ：第 v 層時空網路之旅行需求節線集合
- P^v ：第 v 層時空網路之滯留節線集合
- C^v ：第 v 層時空網路之充電節線集合
- N^v ：第 v 層時空網路之所有節點之集合
- A^v ：第 v 層時空網路之所有節線之集合

參數

- s_{ij}^v ：第 v 層時空網路中供給節線 (i, j) 之單位流量成本
- c_{ij}^v ：第 v 層時空網路中充電節線 (i, j) 之單位流量成本
- p_{ij}^v ：第 v 層時空網路中滯留節線 (i, j) 之單位流量成本
- d_{ij} ：對應於各層時空網路中旅行需求節線 (i, j) 之需求量 (即節點 i 至節點 j 之顧客數)
- E_{ij}^v ：第 v 層時空網路中對應於旅行需求節線 (i, j) 之車輛耗電量
- f_{ij}^v ：第 v 層時空網路中對應於旅行需求節線 (i, j) 之業者收入
- α ：顧客流失之單位懲罰成本
- RE ：電動車輛剩餘電量比例之預設下限值
- u^{max} ：電動車輛剩餘電量比例之預設上限值
- M ：為一正數極大值
- ε ：為一正數極小值

決策變數

x_{ij}^v : 第 v 層時空網路中節線 (i, j) 之流量

變數

u_i^v : 第 v 層時空網路中車輛抵達 i 點之剩餘電量 (占總電量之比例)

y_{ij} : 對應於各層時空網路中旅行節線 (i, j) 之顧客流失量

電動車共享系統車輛配置模式

Maximize

$$\sum_{v=1}^n \{ \sum_{(i,j) \in T^v} f_{ij}^v x_{ij}^v - (\sum_{(i,j) \in S^v} s_{ij}^v x_{ij}^v + \sum_{(i,j) \in P^v} p_{ij}^v x_{ij}^v + \sum_{(i,j) \in C^v} c_{ij}^v x_{ij}^v + \sum_{(i,j) \in T^v} \alpha y_{ij}) \} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j \in N^v} x_{ij}^v - \sum_{k \in N^v} x_{ki}^v = 0, \forall i \in N^v, \forall v, \quad (2)$$

$$\sum_{v=1}^n x_{ij}^v + y_{ij} = d_{ij}, \forall (i, j) \in T^v, \forall v, \quad (3)$$

$$RE \leq u_i^v \leq u^{Max}, \forall i \in T^v, \forall v, \quad (4)$$

$$u_i^v - u_j^v + M(1 - x_{ij}^v) \geq E_{ij}^v, \forall (i, j) \in T^v, \forall v, \quad (5)$$

$$u_i^v + M(1 - x_{ij}^v) \geq u_j^v, \forall (i, j) \in P^v, \forall v, \quad (6)$$

$$u_i^v - M(1 - x_{ij}^v) \leq RE, \forall (i, j) \in C^v, \forall v, \quad (7)$$

$$u_i^v - \varepsilon + x_{ij}^v M \geq RE, \forall (i, j) \in C^v, \forall v \quad (8)$$

$$u_j^v + M(1 - x_{ij}^v) \geq u^{max}, \forall (i, j) \in C^v, \forall v \quad (9)$$

$$x_{ij}^v = 0 \text{ or } 1, \forall (i, j) \in A^v, \forall v, \quad (10)$$

$$y_{ij} \in \text{non-negative integer}, \forall (i, j) \in T^v, \forall v, \quad (11)$$

$$0 \leq u_i^v \leq 1, \forall (i, j) \in A^v, \forall v. \quad (12)$$

目標式 (1) 為最大化業者經營總利潤，為業者總收入減去總成本，總成本包括電動車供給成本、滯留成本、充電成本以及顧客流失成本。式 (2) 為節點之流量守恆限制式。式 (3) 表示對於每一旅行節線而言，被服務與未被服務(流失)的流量必須等於需求量。式 (4) 為每輛電動車於每個租賃站節點之剩餘電量，必須介於電量下限值 RE 與最大值 u^{max} (=100%) 之間。式 (5) 表示在旅行需求節線上電動車使用後之剩餘電量；在此式中，當旅行節線流量 x_{ij}^v 等於 1 時，電動車剩餘電量 u_j^v 會等於出發時的電量 u_i^v 減去所耗費的電量

E_{ij}^v 。式 (6) 表示電動車滯留後之剩餘電量；在此式中，當滯留節線流量 x_{ij}^v 等於 1 時，電動車的電量會維持不變。式 (7)、(8) 判斷電動車在各時點是否需要充電的限制 (當電動車剩餘電量低於電量下限值 RE 時，必須進行充電，也就是電動車必須進入充電節線；反之，電動車不會進入充電節線)；式 (7) 及 (8) 須同時滿足。式 (9) 表示電動車離開充電節線後 (充電完畢)，其電量為最大電量 (充飽電)。式 (10)、(11)、(12) 分別為變數 x_{ij}^v 、 y_{ij} 、 u_i^v 之範圍限制。值得一提的是，此模式中並未有租賃站容量的限制式，一般而言，布署於都會區之通勤式電動車共享系統由於空間受限，其租賃站容量較小；然而，遊憩式系統通常布署於郊區或名勝風景區，租賃站具有較大之腹地能夠容納較多之車輛，因此租賃站容量限制在車輛配置最佳化模式中並非主要之限制；在模式中，可以透過設定滯留節線的流量上限來作為租賃站容量之限制。

為更清楚說明限制式 (7) 及 (8)，舉例如圖 2 所示，圖中有兩個租賃站 A 與 B，每個租賃站有相對應的 7 個時空點，此輛電動車布署於租賃站 B，電動車從時空點 B1 出發時電量為 $u_{B1}=1$ (充滿電)，使用者將此輛電動車開往租賃站 A，當電動車抵達節點 A5 時之剩餘電量比例 (u_{A5}) 為 0.2 (也就是占總電量的 20%)，由於 u_{A5} 低於預設的下限值 0.25，因此必須進入充電節線 (A5, A7)，也就是 x_{A5A7} 必須等於 1；如此，則滿足限制式 (7)： $u_{A5} = 0.2 \leq 0.25$ ，與限制式 (8)： $u_{A5} = 0.2 \geq 0.25 + \varepsilon - M$ 。反之，當 $x_{A5A7} = 0$ ，則限制式 (7) 為 $0.2 \leq 0.25 + M$ ，且限制式 (8) 為 $0.2 \geq 0.25 + \varepsilon$ ，由此可以得知電動車的剩餘電量比例高於系統的剩餘電量比例之下限值，則不需要進行充電 (電動車不會進入充電節線 (A5A7))。

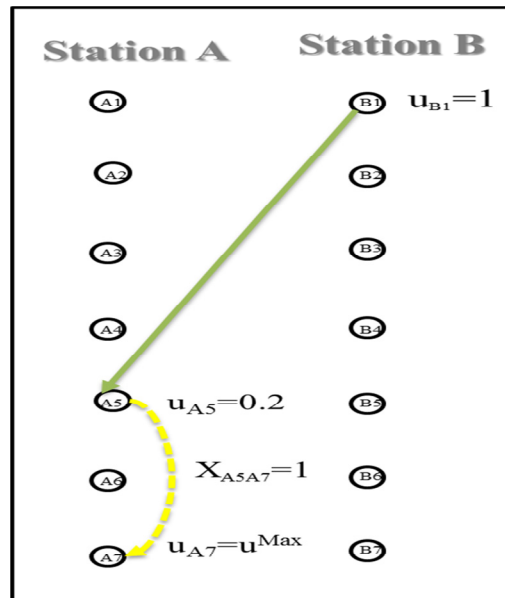


圖 2 電動車充電限制式說明

式 (9) 表示電動車在充完電後之剩餘電量為 u^{max} 。如圖 2 所示，在此式中，當充電節線流量 x_{A5A7} 等於 1 時，電動車充完電的剩餘電量 u_{A7} 為系統所給定的 u^{max} 。式 (10) 表示節線流量決策變數為二元整數變數。式 (11) 表示顧客流失數量變數為正整數。式 (12) 表示電動車在各時空點之剩餘電量比例介於 0 到 1 之間。

4.2 小範例測試

為驗證前一小節所述之公共電動車車隊布署最佳化模式之正確性，本研究參考日月潭公共電動車系統，自行設計一小範例，模式中之成本參數包含供應成本（每輛車每日 45 元）、充電成本（每輛車每次充滿電 45 元）、滯留成本（每分鐘 0.5 元）、顧客流失成本（每位顧客 275 元）等 4 項成本參數。此範例包括兩個租賃站（A，B）、3 輛電動車，以 1 天作為規劃之時程長度，本研究自行產生之顧客需求資料如表 1 所示。

將相關系統供給資料、成本參數與需求資料代入模式中，利用 CPLEX 求解，所得最佳解之目標值為 1,359 元，求解時間約為 1 秒鐘，在此小範例中之所有顧客均被服務，所以沒有顧客流失成本。每輛車詳細的行駛軌跡如圖 3 所示，各時空節點旁之紅色數字，代表電動車抵達該點時之剩餘電量比例，在此小範例求解結果中，電動車在各個時空節點的剩餘電量值皆正確，且第 2 輛車在 16:00 時在租賃站 A 進行充電兩小時，充電後剩餘電量比例回到 1.0，這些結果說明本研究所設計的模式能夠充分描述電動車在營運過程中的各項特性。

表 1 小範例之顧客需求資料

顧客需求	車站(借)	時間	車站(還)	時間
顧客 1	車站 A	8:00	車站 A	16:00
顧客 2	車站 B	8:00	車站 A	12:00
顧客 3	車站 B	8:00	車站 B	13:00
顧客 4	車站 B	13:00	車站 B	14:00
顧客 5	車站 A	12:00	車站 A	13:00
顧客 6	車站 A	13:00	車站 A	14:00

五、範例測試與結果

5.1 公共電動車系統之相關參數設定

本研究以日月潭風景區電動車共享系統為模式測試對象，根據 2015 年 1 月系統營運業者所提供的營運資訊，目前於日月潭風景區內設置 2 個租賃據點，布署 19 輛電動車

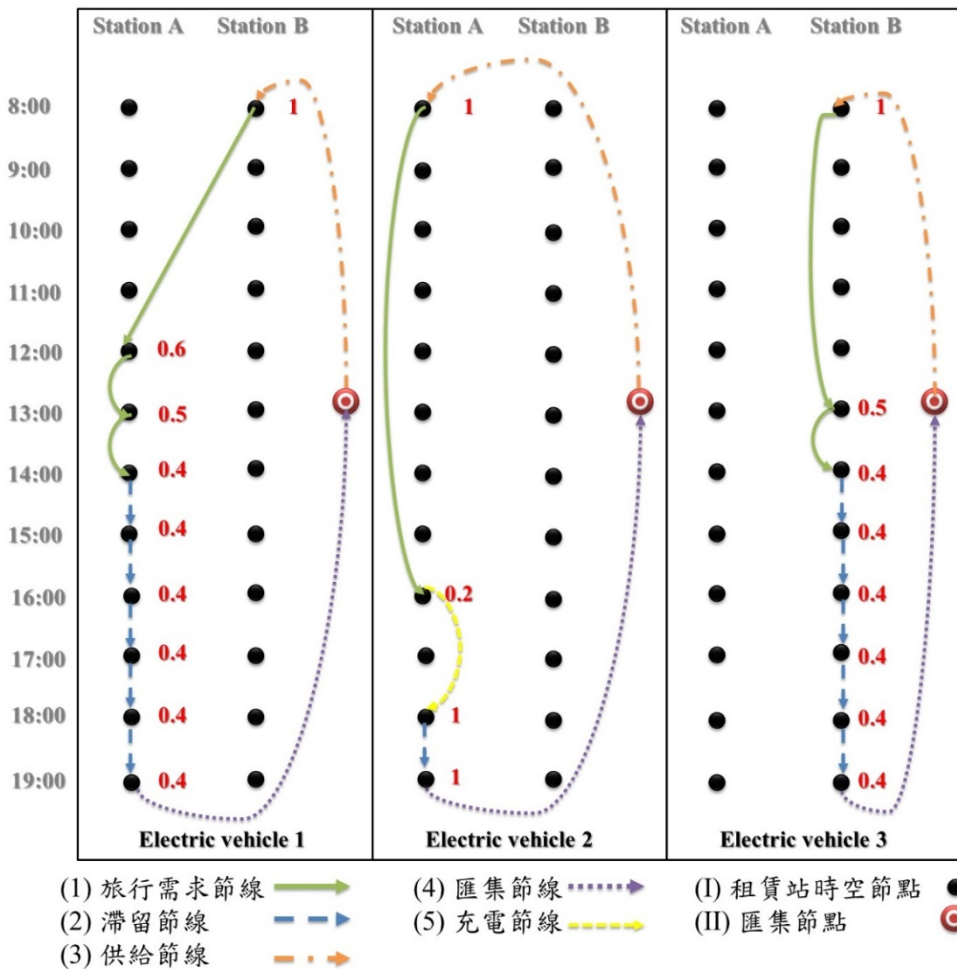


圖 3 小範例之各電動車行駛軌跡

(TOYOTA iQEV)，分別配置於水社碼頭站及九族纜車站，如圖 4 所示。每日開始營業時間為 8:30 AM 至營業結束時間為 19:30 PM 共 12 小時；在租賃行為方面，此系統具有「甲租甲還」之非跨站需求與「甲租乙還」之跨站需求兩種形式。本研究依據實務營運現況設定每日規劃時長為早上 8:30 至晚上 19:30 共 12 小時，本研究以 60 分鐘作為相鄰兩時空點間之時距，規劃 12 個時間節點的時空網路。

除了日月潭風景區電動車共享系統之目前營運規模外 (2 個租賃站，19 輛電動車)，為了配合交通部未來將新增租賃站數目以及擴大車隊規模，本研究以現有系統規模為基礎，將其延伸成不同租賃站數及車隊規模，如表 2 所示，這些測試例題代表交通部對於未來系統擴充規劃之不同情境。



圖 4 日月潭風景區電動車系統租賃站設置分布圖

表 2 各測試情境之租賃站數、車隊規模與問題規模

測試情境	租賃站個數	車隊規模	變數個數	限制式個數
1	2	19 輛電動車	11301	12784
2	3	30 輛電動車	40793	44394

在業者收入計算方面，本研究依照日月潭電動車共享系統之付費準則，每當顧客租借電動車時，前半小時基本費用為 99 元，之後每分鐘以 8 元累加計算。而在成本參數方面，本研究所考慮之成本包含供應成本、滯留成本、充電成本、顧客流失成本等 4 項成本參數，以下將分別說明各項成本參數之設定。

1. 供應成本

如 2.2 節所述，本研究不考慮電動車購買成本與折舊成本。在每日營運求，業者會把所有的電動車的電量充滿，因此本研究假設每台電動車不論前一天剩餘電量多寡，都必須進行充滿電的動作，根據資料顯示，每一輛電動車充滿電的成本為 45 (元/次)，因此設定每輛電動車的供給成本約 45 元。

2. 滯留成本

本研究參考目前日月潭風景區內之電動車租賃站並無須支付土地使用費等相關管理費用，因此假設每輛電動車之滯留成本皆為 0.1 (元/分鐘)，由於時空網路中同一租賃站相鄰之兩時空節點間之時距為 1 小時，因此每輛電動車之滯留成本為 10 (元/小時)。

3. 充電成本

本研究根據經濟部智慧電動車先導運行計畫書中所提供之資料，取得 iQ EV 之電池容量為 12kWh，為配合實際營運情形，將電動車殘電量之下限設定為 25%，當電動車之殘電量低於預設值時，該輛電動車則必須進行充電，並把電充到滿。本研究假設充電器效率為 0.9，求得每次充飽電所需之用電量為 $(12 \times (1 - 25\%)) / 0.9 = 10$ (度)，依業者所提供之電費為 4.5 元/度，所以每台電動車充滿電之充電成本為 $10 \text{ (度)} \times 4.5 \text{ (元)} = 45 \text{ (元/次)}$ 。

4. 顧客流失成本

本研究考量實際營運情形，允許租賃站因電動車輛不足而無法服務顧客需求之情況，針對此種情況，本研究將設定一顧客流失之懲罰值。根據營運業者所提供的租車歷史資料，可得知顧客平均租車時間為 50 分鐘，依照日月潭電動車共享系統之付費準則，顧客需繳交 99 元的半小時基本費用，之後每分鐘以 8 元累加計算。因此，顧客流失成本之設定約為 250 元/每位顧客。

本研究在 Microsoft Windows 7 作業系統上，使用 CPLEX 最佳化軟體進行模式構建，並於 Intel(R) Core(TM)i5 Quad CPU U4200 @1.6GHz 2.3GHz CPU，8.0GB Ram 之個人電腦上執行程式得到求解結果。

5.2 測試情境 1 (2 個租賃站與 19 輛電動車)

5.2.1 情境 1 之需求

本研究透過業者的協助，取得電動車共享服務開始營運後之逐筆電動車租車歷史資料，以每小時為單位，統計與彙整從各站出發至其他站的電動車租借數量，因此，本研究參考此資料建立每一小時電動車起迄需求表，作為顧客需求模式之輸入。根據業者所提供的租車歷史資料，本研究整理各租賃站之租車與還車需求分配比例，如表 3 所示。

表 3 情境 1 各租賃站租車與還車需求之分配比例

	A 站 (還車)	B 站 (還車)
A 站 (租車)	37.5%	12.5%
B 站 (租車)	12.5%	37.5%

5.2.2 情境 1 模式測試結果

本研究將各項供給與需求資料代入所建構的模式，以 CPLEX 軟體進行求解，結果如表 4 所示。

表 4 情境 1 求解結果

利潤	收入	各項成本	車輛配置數	求解時間
6,410 (元)	8,775 (元)	供應成本：855 (元) 充電成本：90 (元) 滯留成本：1,420 (元) 顧客流失成本：0 (元)	A 站：9 輛 B 站：10 輛	23 (sec)

由表 4 中可知在此情境下無任何顧客流失，因此目前的車隊規模已經能滿足現有的顧客需求。此外，充電成本為 90 (元)，表示有兩輛電動車在過程中進行充電，分別是編號 V9 的電動車於 15:30 在租賃站 A，與編號 V14 的電動車於 15:30 在租賃站 B 進行充電。

5.2.3 情境 1 之需求敏感度分析

因政府目前積極推廣日月潭風景區電動車共享系統，推估未來會有更多旅客使用此電動車共享系統來遊玩日月潭風景區，因此將情境 1 之顧客需求調整到原來需求的 2 倍與 2.5 倍，分別分析此模式在不同需求水準下之車輛配置結果，以供業者在未來顧客需求增加時，決定每日營運前各個租賃站之車輛配置數之參考依據。

1. 情境 1 擴大至 2 倍需求

本研究將情境 1 之 2 倍顧客需求量代入所建構的模式，以 CPLEX 軟體進行求解，結果如表 5 所示。

表 5 情境 1 擴大至 2 倍顧客需求之求解結果

利潤	收入	各項成本	車輛配置數	求解時間
14,906 (元)	16,971 (元)	供應成本：855 (元) 充電成本：180 (元) 滯留成本：780 (元) 顧客流失成本：250 (元)	A 站：10 輛 B 站：9 輛	35 (sec)

由表 5 中可知，跟原始需求情境下求解結果比較，發現因為顧客需求的增加，導致收入從原先的 8,775 (元) 提升到 16,971 (元)，而電動車車輛的滯留成本也因此從 1,420 (元) 降低為 780 (元)，顯示電動車車輛服務顧客的次數增加，但需求的增加會導致有顧客無法租借到電動車，因此產生顧客流失成本。根據模式求解結果，此一流失之顧客在 15:30 於租賃站 B 要租借電動車到租賃站 A 時 (16:30 還車)，當時租賃站 B 無任何電動車可租借，因此放棄租賃；但本研究發現此時在租賃站 A 有電動車滯留，因此建議業者未來增加人工調度次數，將滯留其他租賃站的電動車移動到車輛不足的租賃站，以服務更多顧客，得到更多利潤。表 6 所示為營運過程中車輛充電之詳細資訊，共有 4 輛車必須進行充電。

表 6 情境 1 擴大至 2 倍顧客需求之車輛充電資訊

車子編號	充電站 (租賃站)	充電時間
V1	A	15:30
V6	B	15:30
V9	A	15:30
V15	B	15:30

2. 情境 1 擴大至 2.5 倍需求

本研究將情境 1 之 2.5 倍顧客需求代入所建構的模式，以 CPLEX 軟體進行求解，結果如表 7 所示。

表 7 情境 1 擴大至 2.5 倍顧客需求之求解結果

利潤	收入	各項成本	車輛配置數	求解時間
14,807 (元)	19,557 (元)	供應成本：855 (元) 充電成本：405 (元) 滯留成本：490 (元) 顧客流失成本：3,000 (元)	A 站：12 輛 B 站：7 輛	約 30 (min)

由表 7 中可知，跟原始需求情境下之求解結果比較，發現當有更多的顧客需求時，收入很明顯地從 8,775 (元) 增長到 19,557 (元)，成長超過 2 倍以上，滯留成本也從 1,420 (元) 降低到 490 (元)，而利潤也從原先 6,410 (元) 增長到 14,807 (元)，但是卻有較多的顧客流失產生，顧客流失成本從原先的 0(元) 大幅增加到 3,000 (元)，從原先沒有顧客流失，增加到 12 個顧客流失。詳細的顧客流失資訊如表 8 所示，由表中可知顧客借不到電動車的主要原

表 8 情境 1 擴大至 2.5 倍顧客需求之流失顧客資訊

顧客數量	租賃站 (借)	時間	租賃站 (還)	時間	備註
1	A	12:30	A	13:30	尚有車輛閒置於其他站
2	A	15:30	A	16:30	車輛不足
1	A	16:30	B	17:30	車輛不足
2	B	12:30	A	14:30	車輛不足
3	B	13:30	A	15:30	車輛不足
1	B	14:30	B	16:30	車輛不足
1	B	14:30	A	16:30	尚有車輛閒置於其他站
1	B	14:30	B	15:30	車輛不足

因是車輛不足，由於所有的電動車都被租借或是充電中，整個系統沒有閒置的電動車能夠服務這些顧客需求，造成顧客流失成本，因此本研究建議業者在未來可以增加電動車車隊規模，以服務更多的顧客，降低顧客流失的數量。表 9 所示為營運過程中之車輛充電詳細資訊，共有 9 輛車必須進行充電。

表 9 情境 1 擴大至 2.5 倍顧客需求之車輛充電資訊

車子編號	充電站 (租賃站)	充電時間
V2	B	17:30
V3	B	15:30
V8	A	15:30
V11	B	17:30
V12	A	17:30
V13	B	15:30
V15	B	15:30
V16	A	15:30
V17	A	17:30

5.3 測試情境 2 (3 個租賃站與 30 輛電動車)

5.3.1 情境 2 之需求

由於此情境為系統未來規劃之情境，因此無法取得新租賃站的顧客需求歷史資料，只能依據目前日月潭風景區各景點的遊客起迄需求資料，推估未來各租賃站可能的顧客需求數量。根據日月潭風景區管理處所提供的遊客起迄需求資料和系統營運業者所提供的租車歷史資料，本研究整理並推估各租賃站租車與還車需求之分配比例，如表 10 所示。

表 10 情境 2 各租賃站租車與還車需求之分配比例

	A 站 (還車)	B 站 (還車)	C 站 (還車)
A 站 (租車)	25%	6.25%	6.25%
B 站 (租車)	6.25%	25%	6.25%
C 站 (租車)	6.25%	6.25%	25%

5.3.2 情境 2 模式測試結果

本研究將各項供給與需求資料代入所建構的模式，以 CPLEX 軟體進行求解，結果如

表 11 所示。由表 11 中可知，在此情境下無任何的顧客流失成本，因此分析此一車隊規模 (30 輛)，已經能滿足所推估的顧客需求，並根據充電成本為 180 (元) 發現有 4 輛電動車必須進行充電，詳細的充電資訊如表 12 所示。

表 11 情境 2 求解結果

利潤	收入	各項成本	車輛配置數	求解時間
10,880 (元)	14,610 (元)	供應成本：1,350 (元) 充電成本：180 (元) 滯留成本：2,200 (元) 顧客流失成本：0 (元)	A 站：10 輛 B 站：12 輛 C 站：8 輛	354 (sec)

表 12 情境 2 車輛充電資訊

車子編號	充電站 (租賃站)	充電時間
V1	A	16:30
V10	A	15:30
V11	B	15:30
V24	B	15:30

5.3.3 情境 2 之需求敏感度分析

本研究將情境 2 之顧客需求調整到原來需求的 2 倍與 2.5 倍，分別分析此模式在不同需求水準下所得的結果，以供業者在未來顧客需求增加時，決定每日營運前在各個租賃站之車輛配置數的參考依據。

1. 情境 2 擴大至 2 倍需求

本研究情境 2 之 2 倍顧客需求量代入所建構的模式，以 CPLEX 軟體進行求解，結果如表 13 所示。

表 13 情境 2 擴大至 2 倍顧客需求之求解結果

利潤	收入	各項成本	車輛配置數	求解時間
24,326 (元)	27,441 (元)	供應成本：1,350 (元) 充電成本：180 (元) 滯留成本：1,950 (元) 顧客流失成本：250 (元)	A 站：10 輛 B 站：12 輛 C 站：8 輛	414 (sec)

由表 13 中可知，與原始需求水準下之求解結果比較，因為顧客需求增加導致收入從原先的 14,610 (元) 提升到 27,441 (元)，而電動車車輛的滯留成本也因此從 2,200 (元) 降低為 1,200 (元)，顯示電動車車輛服務顧客的次數增加，但需求的增加會導致有些顧客借不到電動車，產生顧客流失成本。根據模式求解結果，此一流失之顧客在 16:30 於租賃站 B 要租借電動車到租賃站 A 時 (17:30 還車)，當時租賃站 B 無任何電動車可租借，因此放棄租賃；但本研究發現此時在租賃站 C 有電動車滯留，因此建議業者未來增加人工調度次數，將滯留其他租賃站的電動車移動到車輛不足的租賃站，以服務更多顧客，得到更多利潤。表 14 所示為營運過程中車輛充電之詳細資訊，共有 7 輛車必須進行充電。

表 14 情境 2 擴大至 2 倍顧客需求下之車輛充電資訊

車子編號	充電站 (租賃站)	充電時間
V1	C	15:30
V11	C	15:30
V12	B	15:30
V21	A	15:30
V23	B	15:30
V29	A	15:30
V30	A	15:30

2. 情境 2 擴大至 2.5 倍需求

本研究將情境 2 之 2.5 倍顧客需求代入所建構的模式，以 CPLEX 軟體進行求解，結果如表 15 所示。

表 15 情境 2 擴大至 2.5 倍顧客需求下之求解結果

利潤	收入	各項成本	車輛配置數	求解時間
25,558 (元)	31,398 (元)	供應成本：1,350 (元) 充電成本：360 (元) 滯留成本：880 (元) 顧客流失成本：3,250 (元)	A 站：8 輛 B 站：11 輛 C 站：11 輛	30 (min)

由表 15 中可知，與原始需求情境下之求解結果比較，發現當有更多的顧客需求時，收入很明顯地從 14,610 (元) 增長到 31,398 (元)，成長超過 2 倍以上，滯留成本也從 1,420 (元)

降低到 880 (元)，而利潤也從原先 10,880 (元) 增長到 25,558 (元)，但是卻有較多的顧客流失產生，顧客流失成本從原先的 0 (元) 大幅增加到 3,250 (元)，從原先沒有顧客流失，增加到 13 個顧客流失，詳細的顧客流失資訊如表 16 所示，由表中可知顧客借不到電動車的主要原因是車輛不足，由於所有的電動車都被租借或是充電中，整個系統沒有閒置的電動車能夠服務這些顧客需求，造成顧客流失成本，因此本研究建議業者在未來可以增加電動車車隊規模，以服務更多的顧客，降低顧客流失的數量。表 17 所示為營運過程中之車輛充電詳細資訊，共有 8 輛車必須進行充電。

表 16 情境 2 擴大至 2.5 倍顧客需求下之流失顧客資訊

顧客數量	租賃站 (借)	時間	租賃站 (還)	時間	備註
2	A	13:30	A	15:30	系統車輛不足
1	A	14:30	A	15:30	尚有車輛閒置於其他站
1	A	14:30	C	15:30	系統車輛不足
1	B	14:30	B	15:30	系統車輛不足
1	B	15:30	B	17:30	系統車輛不足
1	B	15:30	C	16:30	系統車輛不足
2	B	15:30	A	16:30	系統車輛不足
1	C	11:30	B	12:30	系統車輛不足
1	C	12:30	B	13:30	系統車輛不足
1	C	13:30	C	14:30	尚有車輛閒置於其他站
1	C	14:30	C	15:30	系統車輛不足

表 17 情境 2 擴大至 2.5 倍顧客需求下之車輛充電資訊

車子編號	充電站 (租賃站)	充電時間
V2	C	17:30
V7	B	15:30
V16	C	15:30
V20	A	16:30
V25	B	15:30
V27	A	15:30
V29	A	17:30
V30	C	15:30

六、結論與建議

6.1 結論

本研究從遊憩式電動車共享系統營運業者立場，以業者利潤最大化為目標，在既有之車隊規模下，求解每日營運前各租賃站電動車輛布署問題。求解方法首先構建多層電動車車流時空網路，考量電動車電量限制與充電需求，並以此為基礎建立電動車共享系統車隊布署最佳化模式，幫助業者決定每日營運前在各個租賃站之車輛配置數。

本研究以日月潭風景區電動車共享系統之現況為基礎 (情境 1：2 個租賃站，19 輛電動車)，並配合未來將新增租賃站以及擴充車隊規模之規劃 (情境 2：3 個租賃站，30 輛電動車)，分別產生測試例題，以 CPLEX 軟體對模式求解，對求解結果進行分析，並在不同情境下，對不同的顧客需求水準作敏感度分析，以供業者決定每日營運前各個租賃站之車輛配置數參考。

本研究的主要貢獻整理如下：

1. 本研究以時空網路為基礎，建立電動車共享系統車輛配置最佳化模式，在利潤最大化之目標下，幫助業者決定每日各租賃站最佳電動車配置數。
2. 本研究將所發展之公共電動車車輛配置模式，應用在日月潭公共電動車租賃系統進行測試與分析，雖然模式中作了一些假設，但是實務上仍可以提供系統營運業者作為最佳化車輛配置之參考。
3. 本研究在不同情境下，對不同的顧客需求水準進行敏感度分析，幫助業者在未來顧客需求增加時，作為系統規劃與營運之參考，例如：擴大車隊規模，或是增加人工調度次數，將滯留其他租賃站的電動車，移動至車輛不足的租賃站，以便服務更多的顧客需求，得到更多利潤。

6.2 未來研究方法與建議

本研究相關之後續研究方向建議如下：

1. 在實際營運的過程中，每輛電動車在符合須充電的條件下之剩餘電量都有所不同，所需充滿電之時間亦不相同。本研究為求簡化模式求解，假設每輛電動車一旦充電則將電量充滿 (100%)，而且所需之充電時間均相同且固定，充電成本亦相同。未來如要放鬆此一假設，可以設計讓充電節線有不同的單位時間充電效率與充電成本 (例如安裝快充充電座的場站，其充電節線有較高之單位時間充電效率與充電成本)；如此，當車輛經過不同時間長度之充電節線，就會充入不同的電量。在模式中，只要稍微修改式 (9) 等號右邊值 (right-hand-side value)，即可允許最佳化模式選擇充到不同的電量。
2. 本研究使用日月潭風景區電動車系統租賃站作為範例測試，於實際營運中使用單一電動

- 車種，未來若有多車種於租賃系統中(例如使用油電混合車)，可於後續研究中納入考量。
3. 實務上，顧客於電動車租賃場站進行租賃行為，若租賃場站已無可租賃車輛，則會產生無法服務之狀況。本研究則假設顧客皆不會有等待行為，且直接離開本租賃系統，可於後續研究中考慮顧客等待之情形。
 4. 本研究採用顧客需求歷史資料求解最佳電動車配置數量，用以最大化業者利潤，然而在實際營運過程中，電動車租賃需求本身具有顯著的變異性與不確定性，各站在每日各時段之需求都無法準確得知，可於後續研究中採用隨機規劃或是穩健最佳化模式，求解需求不確定之情況下，電動車租賃系統各租賃站每日營運前之車輛配置。
 5. 本研究站在電動車租賃系統業者立場，以業者總利潤最大化為目標，考量每日營運前各租賃站電動車輛布署問題，可於後續研究中考慮以每週為規劃目標，進行各租賃站營運前之車輛配置。
 6. 未來若有較大規模之系統可供測試，在資料能夠取得的前提下，可以測試本研究最佳化模式求解較大規模問題之績效。

參考文獻

1. Kitamura, R., "Sharing Electric Vehicles in Kyoto: Kyoto Public Car System", *IATSS Research*, Vol. 26, No. 1, 2002, pp. 86-89.
2. 經濟部，「日月潭風景區智慧電動車先導運行計畫」，經濟部智慧電動車先導運行計畫專案計畫書，民國 101 年。
3. Katzev, R., "Car Sharing: A New Approach to Urban Transportation Problems", *Analyses of Social Issues and Public Policy*, Vol. 3, No. 1, 2003, pp.65-86.
4. Kou, L., Liu, Z., and Zhou, H., "Modeling Algorithm of Charging Station Planning for Regional Electric Vehicle", *Modern Electric Power*, Vol. 27, No. 4, 2010, pp. 44-48.
5. Ge, S. Y., Feng, L., Liu, H., and Wang, L., "The Planning of Electric Vehicle Charging Stations in the Urban Area", *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology*, IEEE, 2012, pp. 1598-1604.
6. Liu, Z. F., Zhang, W., Ji, X., and Li, K., "Optimal Planning of Charging Station for Electric Vehicle Based on Particle Swarm Optimization", *2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia*, IEEE, 2012, pp. 1-5.
7. Kobayashi, Y., Kiyama, N., Aoshima, H., and Kashiya, M., "A Route Search Method for Electric Vehicles in Consideration of Range and Locations of Charging Stations", *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2011, pp. 920-925.
8. Kim, J., Son, S. Y., Lee, J. M., and Ha, H. T., "Scheduling and Performance Analysis under a Stochastic Model for Electric Vehicle Charging Stations", *Omega*, Vol. 66, 2017, pp.278-289.
9. Huang, K., Kanaroglou, P., and Zhang, X., "The Design of Electric Vehicle Charging Network", *Transportation Research Part D*, Vol. 49, 2016, pp.1-17.

10. Laporte, G., Meunier, F., and Calvo, R. W., “Shared Mobility Systems”, *4OR*, Vol. 13, 2015, pp.341-360.
11. Dell’Amico, M., Hadjicostantinou, E., Iori, M., and Novellani, S., “The Bike Sharing Rebalancing Problem: Mathematical Formulations and Benchmark Instances”, *Omega*, Vol. 45, 2014, pp.7-19.
12. Lin, J. R. and Yang, T. H., “Strategic Design of Public Bicycle Sharing Systems with Service Level Constraints”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 47, No. 2, 2011, pp. 284-294.
13. Lu, C. C., “Robust Multi-Period Fleet Allocation Models for Bike-Sharing Systems”, *Networks & Spatial Economics*, Vol. 16, No.1, 2016, pp.61-82.
14. Shu, J., Chou, M. C., Liu, Q., Teo, C. P., and Wang, I. L., “Models for Effective Deployment and Redistribution for Bicycles within Public Bicycle-Sharing Systems”, *Operations Research*, Vol. 61, 2013, pp.1346-1359.
15. Nair, R. and Miller-Hooks, E., “Fleet Management for Vehicle Sharing Operations”, *Transportation Science*, Vol. 45, 2011, pp.524-540.
16. Nair, R. and Miller-Hooks, E., “Equilibrium Network Design of Shared-Vehicle Systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 235, 2014, pp. 47-61.
17. Nakayama, S., Yamamoto, T., and Kitamura, R., “Simulation Analysis for the Management of an Electric Vehicle-Sharing System: Case of the Kyoto Public-Car System”, *Transportation Research Record*, Vol. 1791, 2002, pp. 99-104.
18. George, D. K. and Xia, C. H., “Fleet-Sizing and Service Availability for a Vehicle Rental System via Closed Queueing Networks”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 211, 2011, pp. 198-207.
19. Bruglieri, M., Colorni, A., and Luè, A., “The Relocation Problem for the One-Way Electric Vehicle Sharing”, *Networks*, Vol. 64, 2014, pp. 292-305.
20. Kumar, V. P. and Bierlaire, M., “Optimizing Locations for a Vehicle Sharing System”, Proceedings of the Swiss Transport Research Conference (STRC), Ascona, Switzerland, 2012, pp.1-30.
21. Kaspi, M., Raviv, T., and Tzur, M., “Parking Reservation Policies in One-Way Vehicle Sharing Systems”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 62, 2014, pp.35-50.
22. Boyaci, B., Zografos, K. G., and Geroliminis, N., “An Optimization Framework for the Development of Efficient One-Way Car-Sharing Systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 240, No. 3, 2015, pp. 718-733.
23. Boyaci, B., Zografos, K. G., and Geroliminis, N., “An Integrated Optimization-Simulation Framework for Vehicle and Personnel Relocations of Electric Carsharing Systems with Reservations”, *Transportation Research Part B*, Vol. 95, 2017, pp. 214-237.
24. Yan, S. and Chen, H. L., “A Scheduling Model and a Solution Algorithm for Inter-City Bus Carriers”, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 9, 2002, pp. 805-825.
25. Yan, S. and Tseng, C. H., “A Passenger Demand Based Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing”, *Computers & Operations Research*, Vol. 29, No. 11, 2002, pp. 1559-1581.

26. Kliewer, N., Mellouli, T., and Suhl, L., “A Time-Space Network Based Exact Optimization Model for Multi-Depot Bus Scheduling”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, No. 3, 2006, pp. 1616-1627.
27. Yan, S. and Chen, C. H., “Coordinated Flight Scheduling Models for Allied Airlines”, *Transportation Research Part C*, Vol. 15, No. 4, 2007, pp. 246-264.
28. Yan, S., Wang, S. S., and Wu, M. W., “A Model With a Solution Algorithm for the Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling Problem”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp. 464-473.