

國 立 交 通 大 學
運 輸 與 物 流 管 理 學 系

碩 士 論 文

多路線市區電動公車充電排程之研究
Optimization of Charging Scheduling of Electric
Urban Buses with Multiple Routes

研 究 生：邵鏡芳

指 導 教 授：王晉元

中 華 民 國 一 ○ 九 年 七 月

多路線市區電動公車充電排程之研究

Optimization of Charging Scheduling of Electric Urban Buses with
Multiple Routes

研 究 生：邵鏡芳

Student: Ching-Fang Shao

指導教授：王晉元

Advisor: Dr. Jin-Yuan Wang



中華民國一〇九年七月

多路線市區電動公車充電排程之研究

學生：邵鏡芳

指導教授：王晉元

國立交通大學運輸與物流管理學系碩士班

摘 要

隨近日全球暖化嚴重，各國為解決環境污染問題皆積極推行公共運輸電動化，然而電動公車之特性導致推行營運現仍存許多挑戰，如：續航里程限制、充電器數量不足、系統設置成本過高等等。本研究之目的為針對一搭配快速充電設備之電動公車系統，發展一套混合整數規劃模式，提出良好的充電排程與設施規劃，使電動公車業者能使用相同排程表日復一日妥善營運。

本研究之最佳化模式係以最小化電動公車營運成本為目標，求解出良好的電動公車充電排程以及系統最佳充電器數量。其貢獻為加入考量三項要素：一為使電動公車於高電量時充電時間由固定快速充電 5 分鐘放鬆為彈性，二為加入考量夜間充電使電動公車能日復一日以相同班表營運，三則將公車營運模式設計為混合調度，並實例應用於人口密度高且公車發車頻率高之臺灣市區。

本研究藉蒐集 PTX 中之車機資料取得高雄 G 客運之電動公車營運班表，並利用該客運實際營運路線進行實例測試。求解結果顯示本研究求解出之排程表確實讓各車更高效地進行充電，車輛回程至進行充電幾乎無需等候，亦可使系統所需之充電器數量降至最低，顯示其電動公車排程更為效率。

關鍵詞：電動公車充電排程、快速充電、混合整數規劃

Optimization of Charging Scheduling of Electric Urban Buses with Multiple Routes

Student: Ching-Fang Shao

Advisor: Dr. Jin-Yuan Wang

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

Abstract

With global warming getting worse, all countries are actively promoting the electrification of public transportation to solve environmental pollution problems. However, the characteristics of electric buses have led to some challenges in the implementation of operations, such as: range anxiety, lack of chargers, and massive capital cost.

This study aims to develop a mixed integer programming model to optimize electric bus recharging schedules, which determines both the planning and operational decisions while minimizing annual operation costs. The contributions of this study are three. First, the integrated model make electric buses be charged more properly. Second, we add new constraint into model to make every bus return to depot with battery full charged, so that the transit agencies can use the same operation and recharging schedule to operate day after day. Finally, the model is considering more complicated dispatching mechanism and demonstrated using a real-world transit network based in Kaohsiung, Taiwan. Sensitivity analysis is concerned with different frequency, route length and extreme situations.

The results showed that range anxiety can be eliminated by adopting optimized recharging schedules. Sensitivity analyses revealed that the model could provide transit agencies with comprehensive guidance on the utilization of electric buses and development of a fast charging system.

Keywords: Electric bus, Recharging scheduling, Fast charging, Mixed integer programming,

誌謝

在交大六年的日子裡，也將隨著本篇論文的完成進入尾聲。這篇論文得以順利完成，首先要感謝我的指導教授 王晉元教授，從公共運輸規劃競賽指導至今日碩士論文順利完成，老師皆非常有耐心地引導、訓練學生。從老師身上學習到的，不僅僅是運輸領域的專業知識，更包含正確的做事方法、解決問題的邏輯思維、待人處事的原則及嚴謹的生活態度。謝謝老師總能在生活各方面給予學生莫大的鼓勵與助力，讓我們能順利地完成碩士論文，並於此二年的研究生活中滿載而歸。

感謝論文審查委員 邱裕鈞教授與 盧宗成教授，於論文撰寫期間給予許多寶貴建議與評論。感謝論文口試委員 蘇昭銘教授以及 黃家耀教授，百忙之中撥冗審閱此論文，並於口試時給予真知灼見與指教，使本論文能更加嚴謹完整，在此致上萬分謝意。

在二年的研究生活當中，謝謝王盧 Lab 的學長姐們品蓁、宛樺、崑育、煜民、筱彤、玟姍，在我遇到瓶頸問題時給予的所有鼓勵與協助。謝謝同學佑芳、子勤、士軒、王允的陪伴與照顧，以及一同分擔助教事務的學弟妹們，謝謝你們所有的貼心幫忙。謝謝博愛宿舍的室友林彤、穎瑜，碩一時總一起頂著寶山路的寒風騎機車回宿舍，總一起吃飯喝酒相互打氣，妳們是我研究所生活的歸屬之一，謝謝妳們的照顧。

謝謝陪伴我六年的運管系女籃，在球隊中遇見的每一位隊友都無比貼心，不論是與妳們一同在場上拚戰的精神，亦或是在場下所建立起的情感，都十分珍貴。謝謝妳們每次練球時總帶給我許多歡笑，讓我一掃研究生活的煩悶。也謝謝奕靜等學妹這一年一起幫忙照顧球隊，使球隊凝聚。

最後，感謝我最愛的父母與家人，這些年來對我的支持與無微不至的呵護，使我能專心完成論文、完成學業。謝謝您們這段時間的包容，即使我不常回家，每每回到家總是有享用不完的雞湯與補品，讓我回到新竹能繼續奮鬥。謝謝爸爸媽媽的照顧與陪伴，您們辛苦了。

邵鏡芳

2020 年七月 於新竹交大

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究範圍與限制	2
1.3 研究目的	2
1.4 研究流程與內容	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 電動公車營運特性	4
2.2 電動公車充電方式與充電排程	6
2.2.1 電動公車充電方式與策略	6
2.2.2 電動公車充電排程規劃	10
2.3 小結	12
第三章 模式建構	14
3.1 問題描述	14
3.2 電動公車充電排程最佳化模式建構	16
3.2.1 參數、變數說明與充電事件之建構	16
3.2.2 數學模式	21
第四章 實驗測試與結果分析	24
4.1 測試範例	24

4.2	測試結果.....	31
4.3	模式檢驗.....	34
4.4	情境範例設計	37
4.4.1	不同發車頻率之情境範例	37
4.4.2	不同發車頻率之情境範例結果.....	42
4.4.3	不同路線長度之情境範例	43
4.4.4	不同路線長度之情境範例結果.....	44
4.4.5	極端情境範例	45
4.4.6	極端情境結果	48
第五章	結論與建議.....	51
5.1	結論.....	51
5.2	建議.....	52
第六章	參考文獻.....	53

圖目錄

圖 1 研究流程圖	3
圖 2 公車每單位營運里程生命週期成本.....	8
圖 3 公車每單位營運時間生命週期成本.....	8
圖 4 使用隨站快充策略之成本比較圖	9
圖 5 單場站營運之架構示意圖	15
圖 6 執行趟次與充電事件之關係圖	18
圖 7 臺灣 G 客運公車路線圖	25
圖 8 充電器使用情況圖(1~360 分鐘)	35
圖 9 充電器使用情況圖(361~720 分鐘).....	35
圖 10 充電器使用情況圖(721~1080 分鐘).....	35
圖 11 不同發車頻率之情境結果比較圖	43
圖 12 不同路線長度之情境範例結果比較圖	44
圖 13 不同路線長度之充電事件與等候時間比較圖	45
圖 14 特殊情境之成本與充電器數量之結果比較圖	50
圖 15 特殊情境之成本與等候時間之結果比較圖	50

表目錄

表 1 公車各路線特性表	5
表 2 充電模式優劣比較	6
表 3 充電排程規劃之文獻回顧	12
表 4 模式之集合符號定義	18
表 5 模式之參數符號定義	19
表 6 模式之變數符號定義	20
表 7 各車輛對應之營運趟次表	26
表 8 趟次對應公車路線與長度	26
表 9 各趟次時間表(原時刻)	27
表 10 各趟次時刻表(單位：分鐘)	28
表 11 各車輛營運班表(單位：分鐘)	29
表 12 大範例之成本參數表	30
表 13 測試範例之求解結果	32
表 14 各車輛之充電事件表	33
表 15 編號 EAL-0905 車輛之排程結果	34
表 16 於第 804 分鐘發生之系統等候充電事件	36
表 17 原四路線實際營運情況	37
表 18 低頻率之情境範例時刻表	39
表 19 中頻率之情境範例時刻表	40
表 20 高頻率之情境範例時刻表	41
表 21 低頻率之情境範例結果	42
表 22 中頻率之情境範例結果	42
表 23 高頻率之情境範例結果	43
表 24 不同路線長度之輸入參數	44

表 25 極端情境各班次交錯之各車輛營運班表	46
表 26 極端情境各車輛返程時間相同之車輛營運班表	47
表 27 極端情境車輛於收班前 5 分鐘同時返程之車輛營運班表	48
表 28 各班次時間交錯之情境結果	48
表 29 各車輛返程時間相同之情境結果	49
表 30 車輛於收班前 5 分鐘同時返程且需同時充電之之情境結果	49



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

近日全球暖化嚴重，氣候變遷異常，各國開始呼籲節能減碳且更重視環境污染等議題。根據國際能源署指出(2018)，2018 年全球能源消耗量增加，速度為 2010 年以來平均成長率的兩倍，造成與能源相關的二氧化碳(CO₂)排放量亦大幅增加。而我國經濟部能源局統計資料顯示，運輸部門在民國一〇七年之二氧化碳排放量(含間接排放)高達 3,632 萬公噸，佔總排放 13.61%。僅次於工業部門之二氧化碳排放量 13,201 萬公噸，佔總排放 49.46%。

為解決全球暖化問題，各國電動車與電動公車之應用逐漸興起，我國亦積極推行公共運輸電動化。交通部運輸部門以限制高污染車輛使用、落實商港區空污減量、分階段推動車輛電動化為方向，更於 2018 年推出了「2030 大客車全面電動化」。但截至 2018 年 12 月底臺灣僅有 504 輛電動大客車，而全臺灣營業用大客車登記總數為 15,966 輛(不包含遊覽車)，顯示政府推行公共運輸電動化之效果不彰。雖然目前公車電動化速度較為緩慢，但政府於 2019 年 8 月提出「公路公共運輸補助電動大客車作業要點」，提供業者申請電動公車補助及籌備汰換，積極協助各公車業者引入電動公車。

電動公車之推行與營運仍存在許多挑戰，乃因於電動公車之特性與柴油公車最大的不同在於續航里程限制與需進行充電排程與設施規劃。Mohamed et al. (2018)提出電動公車之最大續航里程僅 250 公里，而快充電動公車僅 30~40 公里，遠低於柴油公車之 500~700 公里，其里程焦慮問題將成為營運上之一大阻礙。Kunith et al. (2017)則點出若電動公車系統未經過縝密地場站設置規劃，營運時將遇到充電站容量不足或充電器不夠，以致充電等候過久造成下一趟班次有延誤情況發生。多項研究皆表示里程焦慮、充電排程以及充電設施容量不足皆是使用電動公車所會面臨之主要問題。此外，電動公車於每日營運結束時剩餘電量皆不盡相同，如此將造成公車於隔日營運以及充電班表大幅變動，故如何讓電動公車能於每日營運開始時將電量統一維持滿電狀態，使相同之營運班表能於隔日重複循環，亦是極為重要的議題。

本研究期望能發展一套模式，克服電動公車營運之以上限制。加以考量電動公車行駛里程限制與系統充電需求，建立一最佳化模式同時求解最佳充電排程表以及充電設備數量，使電動公車營運成本最小化。藉提出良好的充電排程與設施規劃，使電動公車能日復一日以相同班表妥善營運。

1.2 研究範圍與限制

因現今電動公車快速充電系統(Fast Charging)技術發展日益成熟，快速充電之充電效能已大幅提升，世界各地紛紛開始針對都市區電動公車使用全快速充電系統。本研究模式限制研究範圍僅適用於純電動公車系統，搭配快速充電系統進行營運，營運模式為單一場站(Single Depot)營運模式，充電時間為固定，但於高電量狀態時可彈性充電至滿電狀態。充電器數量為模式最佳化後求得，模式除了考量一般營運之充電需求，亦加入考慮夜間充電需求，使各車輛於收班前之電量皆為滿電狀態。

1.3 研究目的

本研究目的旨在已知各車輛營運班表之情況下，以公車營運及設施建置成本最小化為目標，針對此電動公車之充電排程問題建立數學模式並求得最佳解。目的為求出規劃公車營運系統所需之三項資訊：總營運成本、最少所需之快充充電器數量以及各營運車輛之充電排程班表。利用快充系統進行排程充電，使電動公車能在不影響原班表之情況下，確保其能準時並擁有足夠電量完成任務，且能於每日營運開始時使其電量維持滿電狀態進行營運。

1.4 研究流程與內容

本研究之目的為建立一電動公車充電排程最佳化模式，期望能透過數學模式為一全為電動公車營運之系統設計出最佳充電排程，同時決定出之充電設施最小需求數量，降低公車營運系統之固定成本。研究流程圖如圖 1，本研究內容分述如下列七點：

1. 問題定義

依據研究背景與動機，確立本研究欲建立考量隔日循環之電動公車充電排程最佳化模式。

2. 電動公車充電排程文獻回顧

依研究目的回顧文獻，電動公車遇到之問題主要共分為四部分：營運特性、車隊配置、充電方式與規劃、不同充電方式對應之充電排程。

3. 電動公車充電排程模式建立

建立電動公車充電排程之最佳化模式，透過模式決定各公車於執行任務期間於何時間點至充電場站進行充電。同時決定該系統所需之最小充電器數

量，利用相互等候與共用充電器之方式又不失服務水準之情況下，有效使用系統資源。

4. 實例應用

蒐集現行實施快速充電系統之臺灣 G 客運業者營運資料，將蒐集之資料套入本研究發展模式求解，安排業者之電動公車各車輛營運班表。

5. 結果討論

針對實例應用之結果進行分析討論。

6. 結論與建議

歸納本研究結果，並根據研究內容提出後續發展與建議。

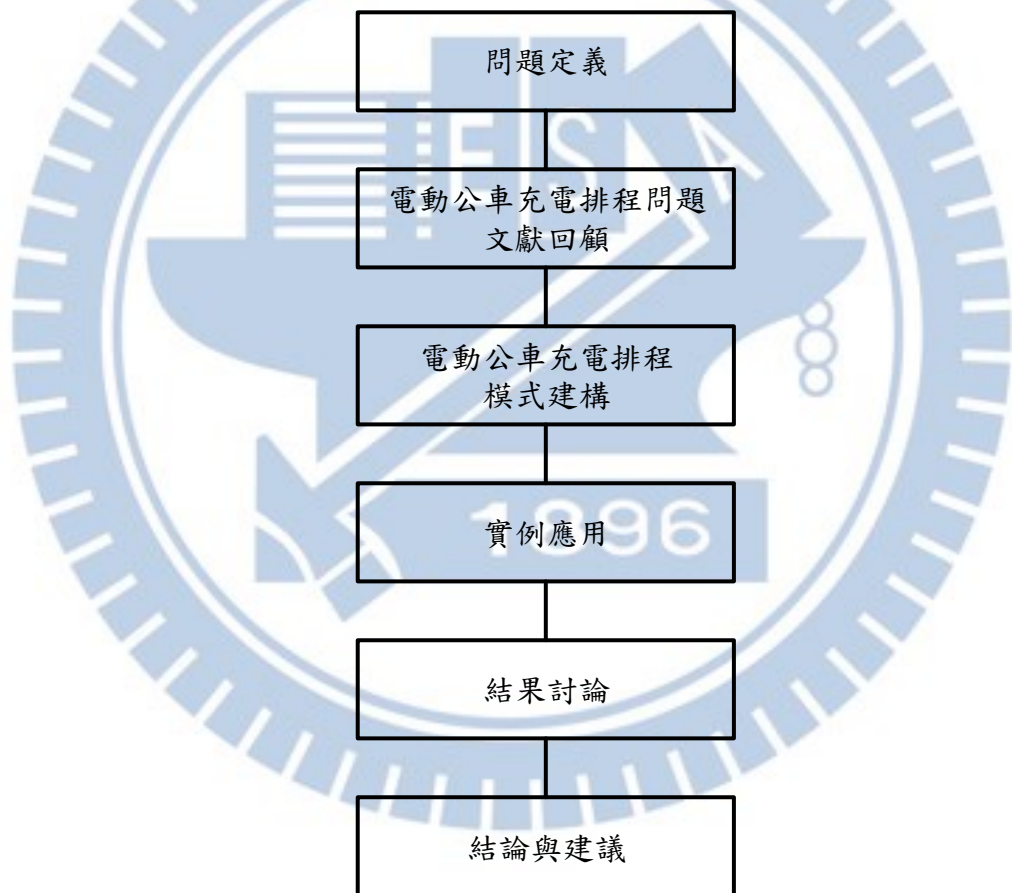


圖 1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

文獻回顧部分主要分成三大部分：第一部分將針對電動公車其營運特性進行回顧；第二部分為電動公車充電方式與規劃等相關文獻，了解電動公車不同的充電方式與排程規劃，並針對充電排程文獻進行分析，整理出各項研究處理排程問題所使用之發展模式，並作為本研究建立模式之參考。最後分析模式之優點與缺漏之處，於模式構建時加以改良。

2.1 電動公車營運特性

Li (2014)對過去從 1990 年後之公車應用研究進行大量文獻回顧，分別對天然氣公車、柴油公車、電動公車之續航里程、營運成本以及廢氣排放量進行比較。回顧電動公車之續航里程 2008~2009 年北京及上海電動公車在使用公車冷氣空調之情況下其最大行駛里程約為 130~150 公里。若在不使用公車空調之情況下，則最大可行駛至 250 公里。該研究更針對不同能源之公車其耗能成本及排放量進行比較：研究顯示電動公車之行駛成本較柴油公車更為便宜，電動公車之單位行駛成本約為每公里 0.52 美元，而柴油公車為每公里 0.68 美元。且電動公車具有排放降低污染等特性，非常適合業者用其進行營運。電動公車續航里程較柴油公車更短，故該研究提出營運電動公車需非常注重營運排程問題，電動公車在進行營運排程 (Vehicle Scheduling Problem with Route Constraints, VSP-RC)需考量下列因素：續航里程限制、班表時間限制以及行駛路線固定。電動公車之充電排程對營運成本及電網負荷影響甚鉅，若公車班表安排不妥當，使公車無法順利營運完排定班表，亦或是讓過多公車同時充電使電網負荷過大，將造成電價成本提升、營運成本大幅增加。

Perrotta et al. (2014)針對不同公車路線特性對電動公車之耗能影響進行分析，其對葡萄牙的城市 Oporto 中的三條電動公車路線進行研究，三條電動公車路線分別為地形嚴苛的路線、普通市區路線以及城際路線。該研究以兩種公車的重要特性作為參數，分別為停靠站的數量與路線長度，並假設公車每站皆會停靠 20 秒，且公車皆行駛在自由車流速率的道路中，在上述所有的假設條件下對三條路線公車在行駛及煞車時的耗能狀況進行模擬，公車路線特性如表 1 所示。模擬結果顯示，因為地勢較為平坦且直線路型較多，在市區路線(路線 204) 上行駛以及煞車所消耗的能源皆最少，而雖然停靠站數量最少、路線長度亦最短，卻因地勢高低起伏、路線蜿蜒加上站間距離最短，因此在地形嚴苛的路線(路線 401) 上行駛與煞車所消耗的能源則皆最多。得知電動公車在續航里程限制下，適合於地勢平坦且直線路型多之市區路線進行營運。

表 1 公車各路線特性表

公車路線編號	路線類型	停靠站數量	路線長度(公里)
401	地形嚴苛	26	8
204	普通市區	38	12
602	城際路線	55	19

資料來源：Perrotta et al. (2014)

Kunith et al. (2017)提及充電場站設施的建置佔營運成本極大一部分，因此充電場站設施與電池充電需求之配合更顯重要。但電力場站設施的規劃尤為複雜，其中需考量到諸多元素，包含：公車營運路線、班次頻率、時刻表、充電站可容納車輛、充電效能、電動公車營運耗能……等等。該研究期望能藉由一混合整數規劃之數學模式求解集合覆蓋問題(capacitated set covering problem)，於柏林建立一小型電動公車路網範例。柏林之公車營運環境與臺灣較不相同，其充電站設置特性為隨站增設，故以公車站是否設置充電站與購買電池容量設定為決策變數，忽略夜間充電需求，以充電站設置成本與購買電池成本最小化為目標，尋找各路線之公車最適合之充電排程，並最佳化充電站之設置位址，滿足營運電動公車之所有充電需求，有效進行資源分配。

Mohamed et al. (2018)運用深度訪談各家業者以針對電動公車之營運特行進行縝密分析，分析主題共分為四大類別。其中在營運與財務可行方面分析指出里程焦慮問題(Range anxiety)將是營運電動公車所會遇到的最大阻礙，由於電動公車之最大里程數僅能至 250 公里，一般充電功率充滿一台電動公車則需花費數小時。反觀柴油公車之最大里程為 500~700 公里，且加油時間僅需 1~3 分鐘。業者亦提出電動公車充電時間長與續航里程限制，在高人口密度之都市進行連續 20 小時之環境下營運將遇上造成極大困難。同時業者也強調，電動公車是否能在有限時間內完成充電，於下一趟次發車時間準時發車，維持良好的服務水準為非常重要之一環。

Liu et al. (2019)提出一般電動公車在營運上所面臨的三項挑戰：續航里程限制、電池等設備購置成本高以及充電時間耗時。隨著科技日新月異，快充公車系統能逐漸提升電動公車之續航里程，更能降低電池容量需求及縮短充電時間。但快充系統其固定建置成本相較一般充電系統來的更高，且對電力系統要求高、尖峰需求用電量高將增加其電力成本。若無法妥當安排電動公車之充電排程以及充電設備之數量，將使營運成本大幅增加。該研究將針對快充公車系統進行研究，探討不同的充電策略對公車系統營運成本之影響。

綜合上述文獻回顧可得，使用電動公車營運為零污染排放，每單位行駛成本低於一般柴油公車，更適用於地形平坦、人口密度高且停站次數多之市區。但電動公車之續航里程遠小於一般柴油公車，且充電時間較為耗時，使用電動公車進行營運

需隨時注意剩餘之續航里程是否足夠。若電動公車欲進行充電，需隨時注意下一趟發車時間，以維持公共運輸之服務水準。此外，電動充電站等設施之設置成本高，設施佔地空間大，於市區營運常有用地取得不易之情形發生，因此系統充電器設置數量必有所限制。若今一電動公車系統其營運及充電排程安排不當，可能造成電動公車服務至路線之一半沒電，無法順利執行班表。亦或是同時有多輛電動公車欲進行充電，易衍生出充電裝置不足無法順利充電，導致需另外派車，亦或是電網負荷過大造成電價成本上升，上述問題都將使系統營運成本大幅增加。

由上述問題顯示電動公車排程之重要性，如何針對電動公車特性妥善規劃及營運現成為一非常重要之課題。下一小節將詳細說明有關電動公車充電方式及充電排程之文獻。

2.2 電動公車充電方式與充電排程

2.2.1 電動公車充電方式與策略

Li (2014)該研究也針對電池交換(Battery swapping)、快速充電(Fast charging)此兩種充電方式進行比較，電池交換相較於快速充電其優點為可以利用夜間時間進行充電以節省電力成本，而快速充電僅需 10~30 分鐘即可將電池充滿，行駛里程約 80 公里。而電池服務時間(Battery service time)和充電站容量(Station capacity)此兩項因素將直接影響客運業者之營運規劃，如何選擇電池容量大小與場站設計亦為非常重要之課題。

Li (2016)提出電動公車有三種不同的充電模式，分別是交換電池(Battery Swapping)、快速充電(Fast Charging)以及一般充電(Regular Charging)，並且分析整理出三種模式的優、劣勢表格，如表 2 所示

表 2 充電模式優劣比較

	優勢	劣勢
交換電池	1. 可有效解決電動公車的里程焦慮問題 2. 電池可在夜間進行充電，利用夜間電價優惠期間節省電費，並且能分散使用電力系統之時段，降低系統負擔。	1. 電池交換站所需站點用地不易於高人口密度之都市取得用地 2. 建造電池交換站及購買替換電池皆需投入大量資本

快速充電	1. 快速充電站所需之占地不大 2. 快充充電裝置更容易安裝於現有公車站	1. 續航里程數相對較短，因此需要充電之次數更多，亦不適用於長途路線 2. 不易享受到夜間電價優惠 3. 快充裝置之設置成本較高
一般充電	1. 一般充電站通常設於調度場站，無須設置於商業人口密集區，因此用地相對較容易取得 2. 電池可於夜間充電，亦可享受電價優惠節省電費，降低對電力系統之負擔	1. 當公車沒電時須返回充電，當充電時間過長趕不及運行下一班次時，業者需額外購入公車以支援完成工作。

資料來源：Li (2016)

Gao et al. (2017)該研究亦探討有關電動公車之充電方式，其中分為路線充電(on-route charging)以及夜間充電(overnight charging)。路線充電為電動公車服務期間進行，通常採高功率(約 400-500kW)進行快速充電；而夜間充電則是在夜間及非營運時段進行，一般採用較低之功率進行充電。針對此兩種充電方式作者以公車服務可靠度進行衡量，分析結果顯示快速充電擁有充電時間極短之特性，可讓電動公車所需之電池容量減小，如此亦減少充電時間不足而造成下一班次發車延誤的情況發生，讓公車服務水準保持地更為可靠穩定。作者期望可藉由發展一套框架，此架構可供公車業者擬出不同種類之電池、充電方式、交換電池之公車之營運情形，結合不同營運路線、車輛種類進行最佳化混合營運策略，使公共運輸系統能夠有效降低營運總成本，並建立一可靠且營運成本最低之電動公車營運模式。

Wei et al. (2018)提到電動公車之充電方式大致可分兩種：一為停靠於端點營運場站時進行快速充電(on-route charging)，二則為勤務結束後回到公車調度站進行夜間充電(in-depots/overnight charging)。本研究之目標式為最小化電動公車之購置成本與充電站之建設成本，而模式之限制式分別設有電動公車之續航里程、各充電站容量與柴油公車應汰換之數量等限制。在不影響原班表、路線之情況下，建立一電動公車車隊時空配置最佳化模式(Battery Electric Bus System Deployment Problem, BEBSD)。數學模式方法為設定決策變數(二元變數)，其能決定是否將系統中的每輛柴油公車汰換為電動公車，亦可決定充電站之數量及位置、每輛電動公車之充電地點與時程。模式以美國猶他州 UTA(Utah Transit Authority)進行實例分析，經求解結果發現，當柴油公車之淘汰數量遞增時，充電站所需數量亦會隨之增加。

Lajunen (2018)進行不同充電方式之生命週期成本比較，其探討的充電方式分為三種：夜間充電(overnight charging)、端點站充電(terminal charging)以及機會充電(opportunity charging)，機會充電的方式是指藉電動公車在各站等待乘客上下車之時間進行充電。該研究定義之生命週期成本為資本成本、營運成本以及電池替換成本之加總，其中資本成本包含購車成本及建置充電設備之成本相加，隨後扣除此兩項成本之殘值；營運成本為各年能源成本、維護成本、二氧化碳排放成本與充電設備維護成本全部折現後進行加總；最後一項電池替換成本運算方式為電池使用之單位成本(\$/kWh)與電池容量(kWh)相乘加總。經計算後該研究將各電動公車充電方式與柴油車進行成本比較，比較結果圖 2 及圖 3，可發現所有電動車之生命週期成本皆大於柴油車，其原因為電動車之購置成本遠大於柴油車成本，而佔生命週期成本最大部份之成本又為購車成本。但以能源消耗成本方面，電動公車之時間、里程單位能源消耗小於柴油車單位能源消耗成本。此外，僅以電動公車各充電方式進行成本比較，可發現機會充電之成本最高，原因為建置機會充電之設備花費較其他兩者更為昂貴，而進行端點充電策略之生命週期成本最低。

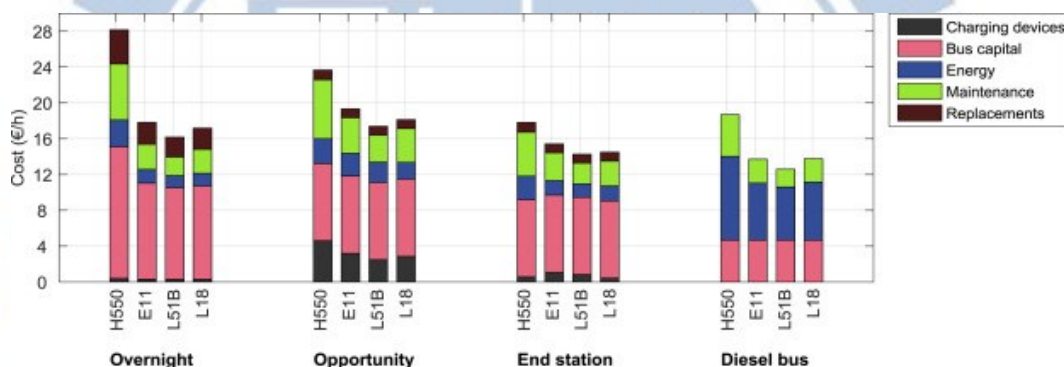


圖 2 公車每單位營運里程生命週期成本

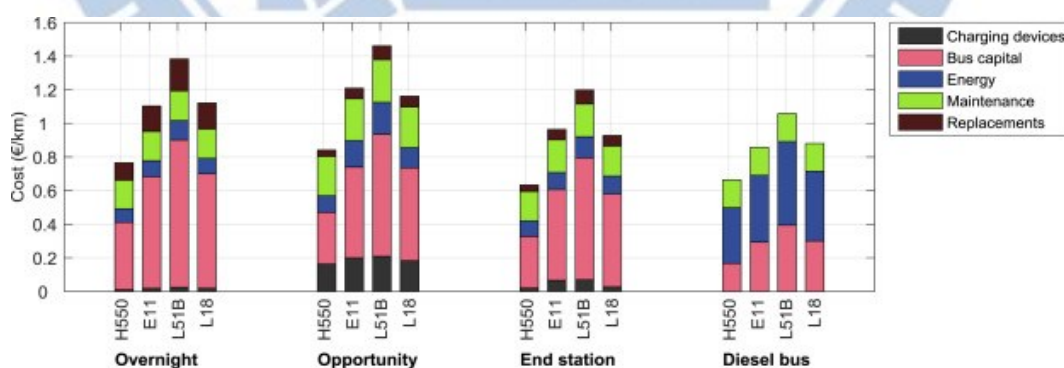


圖 3 公車每單位營運時間生命週期成本

資料來源：Lajunen (2018)

Liu et al. (2019)研究指出搭載不同電池種類之公車，將造成其前期購置成本與營運電力成本有所不同。因此該研究期望利用不同電池種類之電動公車進行營運，

搭配隨站快充(On-route fast charging)充電策略，建立一套以最小化系統營運成本為目標，最佳化充電排程、充電策略與電池所需大小之數學模式，並利用 CPLEX 求解軟體進行求解。此模式將實例應用於美國猶他州之 10 條公車路線，探討不同路線特性、公車種類以及搭配不同充電策略，如圖 4 所示，有使用隨站快充之充電策略其總營運成本大幅減少，該研究亦探討各項營運成本之佔比將有何影響，爾後給予地方公車業者規劃系統方面之建議。

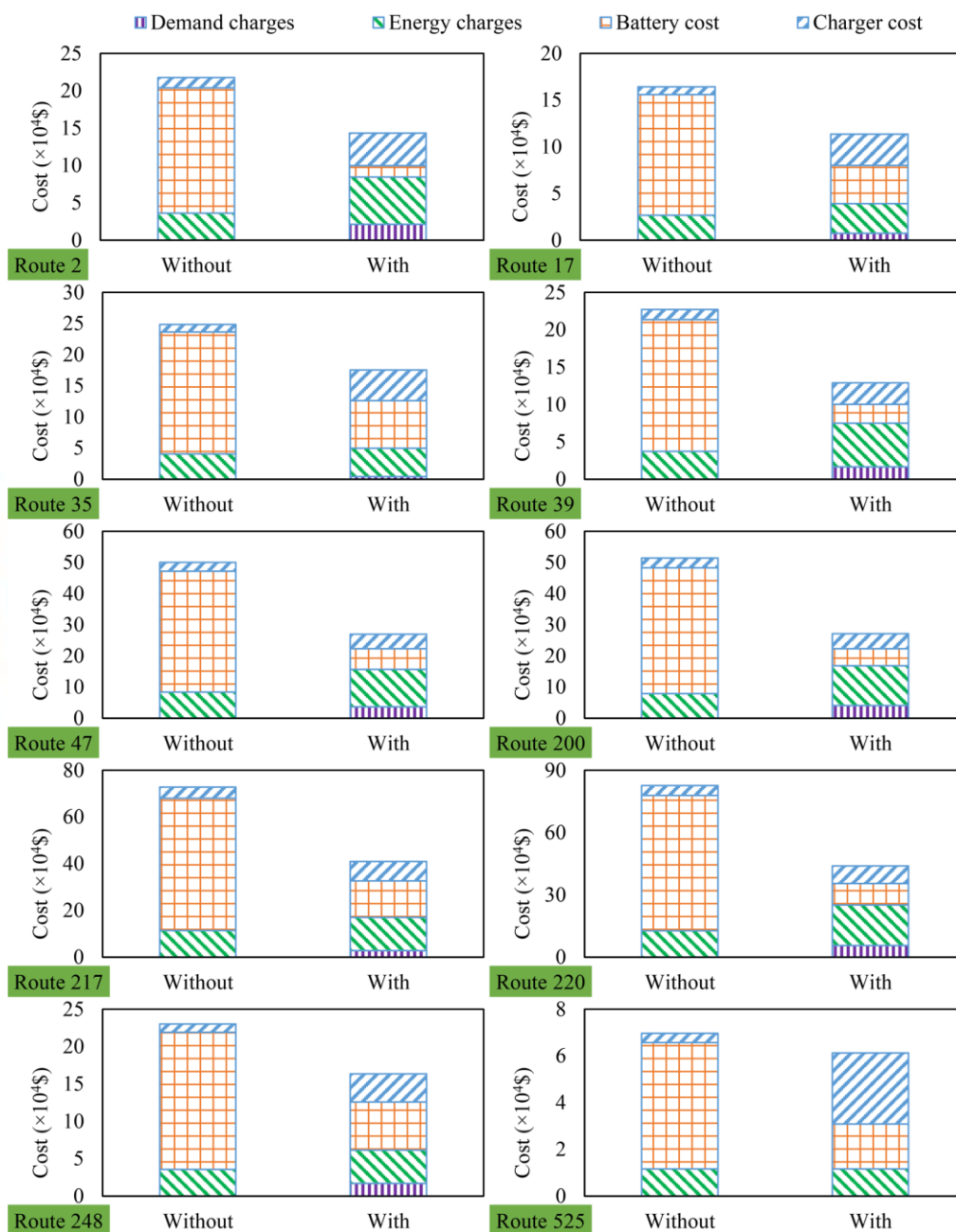


圖 4 使用隨站快充策略之成本比較圖

資料來源：Liu et al. (2019)

2.2.2 電動公車充電排程規劃

Chao and Xiaohong (2013)針對電動公車交換電池之充電系統研究一多目標充電排程問題，以最小化車隊資本以及最小化充電需求為目標，發展數學模式後，使用非支配型排序基因演算法-II(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II, NDSGA-II)進行多目標求解。該研究以電動公車單場站營運模式為架構，固定電池交換時間一次為 15 分鐘，實例應用於上海之 3 條公車環線，結果顯示經由最佳化之充電班表確實能降低該公車系統之營運成本。

陳珮心 (2013)該研究針對一公車系統，其包含快充搭配慢充兩種充電方式，以最小化營運成本與所需車輛數為目標，建構一集合分割問題，並建立一套變數產生演算法(Column generation)進行求解。該研究藉由預先設定充電座數量後進行電動公車排程，利用研究設計之情境模擬一公車系統，無實際應用於現實。其模擬情境之充電站設置於營運場站內，系統僅有一條公車路線，搭配不同發車頻率、路線行駛長度以及不同充電座數量以進行最佳化求解。其充電時間可不固定，並加入考量夜間充電需求，使電動公車於隔日開始營運時皆為滿電狀態。研究結果顯示使用其求解模式確實可讓系統所需之車輛數有效減少，電動公車在充電座數量有限之情況下仍能順利完成班表營運，並使營運成本最小化。

李佳芸 (2015)為改善過往文獻其電動公車之充電量僅能固定充至滿電狀態，將充電時間放鬆為彈性。其針對一搭配快充和慢充裝置之全電動公車系統，建立一電動公車排程最佳化模式。以最小化營運成本為目標，預先假設充電器數量與公車車輛數相等，並設定充電時間為彈性且加入考量夜間充電需求，確保所有車輛於隔天營業時期電量皆為滿電狀態，最終利用禁忌搜尋法(Tabu Search)搜尋出排程最佳解。模式結果使用情境模擬驗證其效果，並實例應用於日月潭風景區中一公車環線。

Ke et al. (2016)為發展澎湖地區之電動公車插入式充電(Plug-in)系統，利用澎湖地區現有之公車班表、路線進行模擬。以基因演算法建構出以設置成本最小化為考量之排程模型，其中目標式考量充電站數量、公車車輛數以及購買之電池容量，最佳化出各編號公車之運行班表與充電排程。另外，此研究亦實例應用於澎湖之 15 條公車路線，依不同路線特性分為去程、回程及環狀路線，並依據各路線特性指派對應之公車種類，期望將資源利用效率最大化。模式分析結果由三張圖網表示，分別解釋：路線與對應執行公車之編號、各公車之電池能量與時間關係、充電器與對應充電公車之關係。文末利用基因演算法修改不同的公車車輛數與電池容量進行敏感度分析，比較各建設成本差異。

Wang et al. (2017)該研究以純電動公車進行充電排程，搭配各車輛已知的營運班表來進行充電排程問題之研究，以充電成本、等候懲罰成本與充電場站(器)建置維護成本最小化為目標，建立數學模式以進行混合整數規劃問題之求解。模式之決

策變數為二元變數，一為決定各運輸場站內是否設置充電站及充電器，二為電動車於某充電站或充電器時是否進行充電動作。該研究將進行一次充電事件之時間固定為 5 分鐘，限制式考量電動公車之電池容量以及運輸場站內的充電站容量限制。

隨後該研究將模式實例分析應用於美國加利福尼亞州的城市 (Davis, California)，經由實際蒐集業者之營運資料，總共有 17 條公車路線搭配 2 個總轉運充電站進行充電排程，而各充電站預設裝置至多 3 個充電器，最佳化出此公車系統最適合之公車車輛排程與設施規劃供業者參考。且此研究所考量之情境與臺灣最為相似，業者僅會將電動充電場站設置在總轉運站內或附近之空地，同於臺灣皆需謹慎考量場地空間受限之特性。

由表 3 文獻回顧整理可發現，上述四篇文獻其模式皆以最小化營運成本或設置成本為目標，並使用數學模式與各演算法進行求解。Ke et al. (2016)、陳玥心 (2013)、李佳芸 (2015) 之充電排程系統所用充電裝置皆為快充系統搭配慢充系統，僅 Wang et al. (2017) 使用全快充系統。Ke et al. (2016)、李佳芸 (2015) 皆前提假設充電器數量與公車車輛數相同，陳玥心 (2013) 設定為固定數量，僅 Wang et al. (2017) 為最佳化充電器數量。但該篇研究之充電時間為固定，且無考慮夜間充電及隔日循環問題。Ke et al. (2016)、陳玥心 (2013)、李佳芸 (2015) 之充電時間皆為彈性，且陳玥心 (2013)、李佳芸 (2015) 皆有考量夜間充電需求，其更顯充電考量夜間需求及隔日循環問題於電動公車營運之必要性。。

表 3 充電排程規劃之文獻回顧

	Wang et al. (2017)	Ke et al. (2016)	李佳芸 (2015)	陳珮心 (2013)
目標式	最小化 營運成本	最小化 設置成本	最小化 營運成本	最小化 成本與車輛數
發展演算法	無	GA	Tabu Search	Column Generation
充電方式	快充	快充+慢充	快充+慢充	快充+慢充
充電設置	設置場站內	設置場站內	設置場站內	設置場站內
調度方式	單一調度	混合調度	單一調度	單一調度
*充電器數量	最佳化	公車數量	公車數量	研究假設
*應用地區	Davis 市區	澎湖	臺灣日月潭 僅一條路線	無 僅一條路線
充電時間	固定 5 分鐘	彈性	彈性	彈性
*考量夜間	X	(X)	O	O

2.3 小結

綜合上述幾篇文獻，充電場站等設備之固定成本高，在規劃時需先進行縝密的分析與調查，使能有效地被使用。隨著柴油公車逐漸為電動公車所代替，電動公車營運路線其沿線可能需要建置更多的充電設備，而充電設備的充電方式以及其設置位址則須考慮到該公車路線的路面特性，如地形、路線長度、停靠站數量等，並且也須配合行駛該路線之車型與其配置電池的類型。其中，電動充電站之設置數量與位置和電池容量有非常大之關係，如何妥善規劃電動公車之充電站數量及充電排程，使電動公車擁有足夠電量並能準時完成接下來班表、保持服務水準為一非常重要之課題。

多數研究都將此電動公車充電排程問題運用各方法求解發展模型，並實地應用於各國家各地區解決當地電動公車營運問題，而其研究皆貢獻許多，使國外業者於營運規劃時能依據各地不同情況做出最有效的決策。然而回顧以往電動公車排程之文獻，發現不足之處主要有二：

1. 充電行為不符合現實，如：充電電量固定。
2. 充電器數量除 Wang et al. (2017)外，其餘皆為研究預先假設固定數量。

在進行電動公車之充電規劃與排程時，Wang et al. (2017)針對充電行為之假設皆太過強烈，使得充電行為不貼近現實，如：充電時間固定。如此將造成業者之營運造成額外負擔，期望在本研究中可以將充電時間放鬆為較為彈性。

而相較 Ke et al. (2016)、李佳芸 (2015)以及陳珮心 (2013)三篇文獻，唯 Wang et al. (2017)無考量到電動公車營運之夜間充電需求與隔日循環限制，其更顯考量隔日循環限制於實際營運上之必要性。隔日循環限制係指各車輛於當日營業結束後，仍有辦法以昨日相同起始電量開始第二天之營運，且第二天執行之班表、充電排程皆需與第一天完全相同不可調換，確保每日營運能日復一日循環。若無考量隔日循環限制，將會造成公車於隔天發車時處於低電量狀態，導致業者需另外派遣更多人力與車輛進行支援。此外，若業者為使公車於隔天發車前充滿電，可能會利用夜間安排輪班人員漏夜為公車車隊進行充電，在日間營運未經安排之情況下會使夜間充電需求過大，因而衍生出充電器不足的問題，以致人員於凌晨充電作業時間更長進而花費更多營運成本。期望在本次研究中可以加入夜間充電考量，讓回程收班之車輛仍需補充的電量降至最低，如此便可解決夜間充電設備不足的問題，更可省去許多收班作業所需之人力與時間。

Kunith et al. (2017)在進行充電站設置時，往往可將充電場站隨公車站點增設，或於多點轉運站設置充電站。反觀臺灣電動公車之營運環境多為單場站營運(Single Depot)，且充電站之設置空間常因市區空間狹小、地價昂貴因此取得不易，僅能設置於端點場站、總調度站附近，故臺灣市區之營運情況與國外文獻存在差異。故本研究將模擬臺灣市區公車業者之營運模式，以單場站及混合調度之營運架構，建立一電動公車充電排程模式。

第三章 模式建構

本研究以 Wang et al. (2017)之模式為基礎架構進行改良，因該篇參考文獻與臺灣市區之電動公車環境極為相似，係針對美國加利福尼亞州之戴維斯進行實例建模，以單場站營運模式為考量，又加以限制充電站只能設置在終點場站附近。由於電動公車之行駛里程遠小於一般柴油公車，在確保公車系統能夠正常營運的情況下，公車業者如何妥善規劃電動公車之充電排程與充電場站設置成為十分重要之議題。

故本研究希望能以 Wang et al. (2017)之模式作為主要架構，建立一適合臺灣電動公車營運生態，並加入考量隔日循環之充電排班最佳化模式，改良充電行為使其更為符合現實，以利業者充份利用現有電動公車系統之所有資源，達到營運總成本最小化之目的。本研究欲建立一模式，在班表已知之情況下，最小化營運成本，求得下列二資訊：

1. 各車輛之充電排程表
2. 所需之充電器個數

本章節將介紹本研究如何發展電動公車之充電排程最佳化模式，將以 Wang et al. (2017)之模型架構作為基礎，進而改良成更適合臺灣電動公車營運環境之最佳化模式。

3.1 問題描述

本研究以最小化車輛營運行駛成本、充電成本與充電設施建置維護成本最小化為目標，於已知各車輛營運班表之情況下進行充電排程問題之研究，建立數學模式以進行混合整數規劃問題之求解。

本研究實施單一場站(Single Depot)營運模式，亦即當日營運結束後車輛回到原出發場站。本研究設定環境已建置好一座充電站，其充電站內尚未建置任何一個充電器，因此藉由此研究可規劃安裝數個充電器供多輛電動公車充電。且由於臺灣地狹人稠取得空地不易，充電站僅能設置於總營運場站(Transit Center)附近。以圖 5 之單場站營運系統為例，系統包含：一個營運場站、三條公車路線及一座設置於營運場站附近之充電站。並利用各公車執行班次中間之休息時間前往充電站進行充電，充電時間固定為 5 分鐘。執行一班次意指執行一往返趟次(Round Trip)，以圖 5 之路線一為例，若公車執行路線一之班次(07:00-07:50)，則該公車所行經之站點為 A-D-A，表示該公車於 07:00 從 A 站點出發，並於 07:50 繞一趟返回至 A 站點。

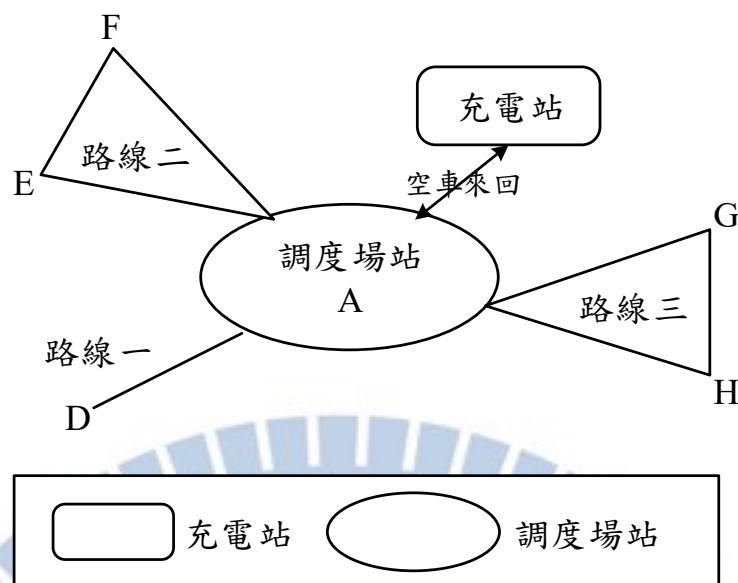


圖 5 單場站營運之架構示意圖

本研究所採用之充電方式全為快速充電(Fast Charging)，快速充電可於營運時段利用各趟次間之間隔時間於充電站進行。為了確保每日營運之情況得以維持延續與穩定，本研究另要求每一輛收班之電動公車於最後一趟次執行結束時盡量為滿電之狀態回營運場站，目的為使各電動公車回到場站後只需要再充數分鐘的電即可充滿電收班休息，以滿電的狀態開始第二天的營運。

本研究建立模式之假設條件如下：

1. 公車系統以純電動公車所組成
2. 已知每輛電動公車對應之營運班表
3. 每輛電動公車限制之最大行駛距離相同
4. 能量消耗與行駛距離成正比
5. 電力補充能量與充電時間成正比
6. 所有電動公車皆用同一種快充設備，且一個充電器只含一插座
7. 充電時間於高電量時將放鬆為彈性
8. 電動公車為混合調度，同一輛公車可服務多條路線
9. 充電場站於現實中已設置完成，充電站數量固定為 1
10. 充電器設置於營運場站，公車一回到場站能立即充電，且充電時間不影響司機之休息時間

本研究模式上述 10 點假設當中，除了第 7、8 點假設外，其餘皆與 Wang et al. (2017)之假設相同。而第 7 點原 Wang et al. (2017)假設充電時間固定 5 分鐘，如此造成電動公車接近滿電時(少於 5 分鐘即可充飽)將無法進行充電。因此本研究將此充電時間限制放寬，使電動公車在接近滿電時仍可進行充電。第 8 點原 Wang et al. (2017)為單一調度，於本研究發展為混合調度。

第 10 點則假設電動公車之充電事件發生時，並不會影響到司機的休息時間。因電動公車之充電器皆設置於場站內，每當公車回到場站無空車來回之問題，其能直接停於充電器旁立即充電。且進行充電事件時司機僅需要將充電插頭插上公車就能繼續歇息，與休息時間並無太大關係。

3.2 電動公車充電排程最佳化模式建構

本節基於上一章之問題描述，建立電動公車之充電排班最佳化模式，3.2.1 定義模式使用到之車輛營運場站、執行趟次和充電事件之關係，並進行參數、集合與變數之說明，如表 4、表 5 及表 6，最後說明數學模式其目標式與限制式所表示之涵義。

3.2.1 參數、變數說明與充電事件之建構

為求模式建立需要，將營運場站分別定義為起點場站(origin depot)與終點場站(destination depot)，電動公車一早由起點場站出發，將一天所有被指派之趟次執行結束後立即返回終點場站。令 O 代表所有起始場站之集合， D 為所有終點場站之集合， S 則為所有現實服務趟次之集合。令 T 為以一分鐘為單位之所有時間節點集合，用以記錄每時刻於此系統發生的所有事件，亦包括充電站當下之使用情況，此 T 集合範圍從最早班次出發時間至最後班次之結束時間，亦為公車業者全天之營運時間。而 R 則代表於此一公車系統之所有所需電動公車車輛集合，本研究設定一輛電動公車一次僅能服務一條公車路線，但一條路線可為多輛電動公車所服務。

每趟趟次 $i \in S$ 皆有各自的起始時間 a_i 與結束時間 b_i ，而 u 充電時間(charging duration)表示於充電站進行充電事件所持續之時間長度，假若充電事件開始於 $t \in T$ 時間點，則充電結束時間為 $t + u$ 。令電動公車於每趟次執行結束後由終點場站行駛至充電站之時間與距離，分別定義為 r 與 d 。令 P 為兩連續趟次串接而成之趟次對(trip-pair)集合表示為 $(i, j) \in P$ ，此集合代表執行完趟次 $i \in S \cup O$ 後緊接著服務趟次 $j \in S \cup D$ ，串接成同一輛電動公車一天所需執行的趟次鏈。

充電事件只能發生於兩趟次之間置時間區間(trip-interval)，意旨發生於 i 趟次結束後至下一趟次 j 趟次出發前之間置時間段，區間時間長度表示為 $a_j - b_i$ ， a_j 為下一趟次 j 趟次之發車時間， b_i 為 i 趟次結束公車返回到營運場站之時間點。而同一趟次對 $(i, j) \in P$ 之間可選擇在多個時間點進行充電，例如：充電時間定為三分鐘，閒

置時間區間為五分鐘，則充電事件可選擇於第 1、2 或第 3 分鐘開始進行充電，如此即產生出三個候選充電時間點，說明同一閒置區間內之充電事件可有多種可能。

另一方面，因應模式設計需要，模式中之充電事件只能發生於兩趟次之間。故當車輛行駛完所有班表，亦同無下一趟次須執行時，該車輛已無對應之決策變數可供模式判斷該車輛是否能進行充電事件，如此將造成電動公車收班回到場站後便無法再充電。為能使完成服務後準備進行收班之電動公車回到場站後還能執行充電，本模式令 V 為虛擬趟次集合，於各輛電動公車一天所需執行的趟次最後新增一虛擬趟次，意為建立一個能量消耗為 0 的趟次，使模式使電動公車回到場站收班後來能再進行一次充電使電池充至全滿。例如：假設系統只有一輛電動公車，有 10 個服務趟次需被執行。故該電動公車之完整的趟次列表為：1、2、3……10、11，前面第 1 至第 10 趟次為現實中實際之服務趟次，又稱為 S 集合。最後一項第 11 趟次，即為所謂的 V 虛擬趟次，使電動公車於結束服務後能再進行最後一次充電，確保電量於隔日開始營運前皆為滿電狀態。

A 代表於充電站內之所有候選充電事件集合，其中 $(i, j, t) \in A$ 表示電動公車於趟次對 $(i, j) \in P$ 間在第 n 座充電站之 $t \in T$ 至 $t + u$ 的時間點進行充電。為使所有電動公車皆能準時運行各趟次，確保公車不能有延誤情況發生，因此設定了兩條限制式來限縮候選充電事件之集合，設 t 為開始進行充電之時間，則需滿足 $t \geq b_i + r$ 且 $(t + u) + r \leq a_j$ 。為記錄充電事件之等候時間，令 w_{ijt} 表示該電動公車於充電站進行充電事件所需等候的時間，當電動公車執行完 i 趟次，則其抵達充電站之時間為 $b_i + r$ 。若該電動公車之充電事件開始於時間節點 $t \in T$ ，則充電等候時間為 $w_{ijt} = t - (b_i + r)$ 。

圖 6 說明本研究公車執行趟次與充電事件之間之關係，圖中之趟次對 (i, j) 代表為同一輛電動公車所服務之連續趟次，中間部份代表公車系統內之充電站，而電動公車僅能利用執行下趟趟次前之閒置時間進行快速充電。假設：(1) 由 i 趟次結束由終點場站行駛至充電站需花費 0 分鐘，意即 $r = 0$ 。(2) 進行一次充電之時間固定為 5 分鐘，意即 $u = 5$ ，(3) 時間以分鐘為單位。以圖 6 為例，當電動公車執行完第 i 趟次時時間為第 5 分鐘，返回充電場站之時間為第 5 分鐘。然而 j 趟次之出發時間為第 11 分鐘，因此電動公車最晚需於時間第 11 分鐘前離開充電站如此才能趕上 j 趟次之發車時間。根據上述條件，充電站內可兩件列出符合之候選充電事件，分別為由時間第 5 分鐘開始充電至第 10 分鐘(f 事件)，另一可行充電事件為從第 6 分鐘開始充電至第 11 分鐘(g 事件)。且 f 事件之充電等候時間(w_{ijt})為 0，g 事件之充電等候時間為 1。另外兩充電事件 e 事件與 h 事件未與趟次對節點連接，代表其在時間執行上不可行，前者為無法無時間內抵達充電站，後者將會使下一趟趟次出發時間產生延誤。於此例可得該趟次對之充電時間與候選充電事件集合之關係可表示為 $(i, j, 4) \notin A, (i, j, 5) \in A, (i, j, 6) \in A, (i, j, 7) \notin A$ ，令可得充電等候時間 $w_{ij5} = 0, w_{ij6} = 1$ 。

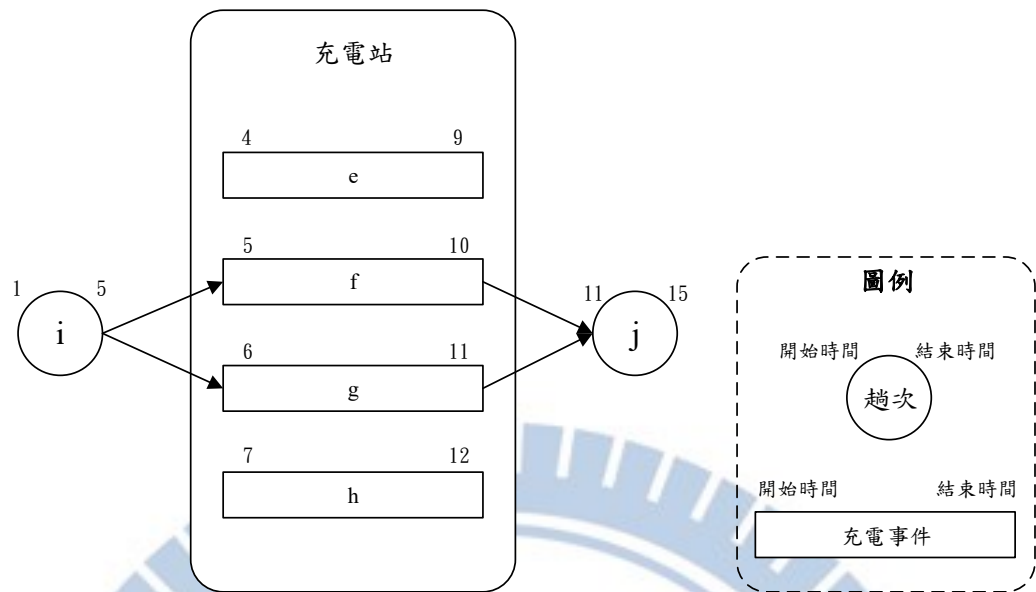


圖 6 執行趟次與充電事件之關係圖

表 4 模式之集合符號定義

集合	定義
O	每輛電動公車之營運起始趟次集合
D	每輛電動公車之返程收班最後趟次集合
S	營運班表上的趟次集合
V	虛擬趟次集合
P	同一輛電動公車班表趟次之集合
K	充電器集合
T	時間集合
A	公車於 i 趟次與下一 j 趟次間可能發生的所有充電事件集合，各充電事件分別於第 t 時間點充電，表示為： (i, j, t) 。
R	電動公車車輛集合

其他參數、變數將如下列各表所示：

表 5 模式之參數符號定義

參數	定義
c_d	車輛每公里行駛成本
d	每趟次執行結束後行駛至充電站之距離
r	第 i 趟次執行結束後行駛至充電站之時間
c_0	充電事件固定成本
c_e	充電事件變動成本
u	充電時間
c_w	充電等候時間懲罰成本
$\bar{D}$	公車一年營運天數
α	折現率
c_{f1}	充電器建置成本
c_{m1}	充電器維護成本
c_{f2}	充電站建置成本
c_{m2}	充電站維護成本
$\bar{w}$	電動公車收班電量與滿電狀態之差距懲罰值
w_{ijt}	公車於 i 趟次與 j 趟次間於 t 時間點充電所需等候的時間
d_i	執行第 i 趟次所消耗之能量
β_0	電動公車之初始電量
e_{min}	電動公車之最小電量限制
θ	充電效率

表 6 模式之變數符號定義

變數	定義	值域/單位
Y_{it}^k	該電動公車於 i 趟次結束是否於 t 時間點在充電站內的第 k 個充電器進行充電	$\{0,1\}$
X_i	該電動公車於 i 趟次結束後是否在充電站進行充電	$\{0,1\}$
Z_k	第 n 座充電站內之第 k 個充電器是否有被使用	$\{0,1\}$
Z	充電站使否有被使用	$\{0,1\}$
th_i	電動公車於 i 趟次結束之剩餘電量閾值	[km]
E_i	電動公車於 i 趟次結束之剩餘電量	[km]

3.2.2 數學模式

別於以往文獻，本研究加入夜間充電之考量以確保每輛電動公車皆能以相同滿電狀態開始第二天之營運，如此電動公車每日營運、充電之排程亦能日復一日地循環。有鑒於此，本研究於成本項目加入了車輛收班電量與滿電量之差距懲罰，建構一混合整數規劃模式如下所示：

1. 目標式

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{i \in S} (c_d d + c_0 + c_e u) \bar{D} X_i + \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j,t) \in A} c_w w_{ijt} \bar{D} Y_{it}^k \\ & + \sum_k^K (\alpha c_{f1} + \bar{D} c_{m1}) Z_k + (\alpha c_{f2} + \bar{D} c_{m2}) Z \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)為原 Wang et al. (2017)之目標式，以最小化一年之充電與營運行駛成本為目標，其共由四個部分組成：營運場站至充電站旅行成本、充電固定成本及充電變動成本(第一項)、充電等候時間成本(第二項)、充電器設置與維護成本(第三項)以及充電站設置與維護成本(第四項)。

為確保各電動公車輛回程收班時皆能以滿電之狀況回到場站，如此一來收班後需進行夜間充電之需求量亦會減至最低，則不會有過多車輛充電等候過久的問題。故本研究將原文獻之目標式再加入一項：各路線電動公車返程電量與總電量之差距懲罰值(第五項)，成為改良後之新目標式式(2)。

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{i \in S} (c_d d + c_0 + c_e u) \bar{D} X_i + \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j,t) \in A} c_w w_{ijt} \bar{D} Y_{it}^k \\ & + \sum_k^K (\alpha c_{f1} + \bar{D} c_{m1}) Z_k + (\alpha c_{f2} + \bar{D} c_{m2}) Z \\ & + \sum_{i \in D} \bar{w}(\beta_0 - E_i) \end{aligned} \quad (2)$$

2. 限制式

$$X_i \leq 1, \forall i \in S \quad (3)$$

$$E_i = \beta_0, \forall i \in O \quad (4)$$

$$E_i \geq e_{min}, \forall i \in S \quad (5)$$

X_i 為決策變數，若 $X_i = 1$ 代表電動公車執行完 i 趟次後需進行充電，本研究限制每一趟次結束僅能充一次電，故設定式(3)確保同一趟次結束後，各充電站充電事件加總不得超過 1。式(4)、式(5)分別為設定電動公車之初始最大電量及最小安全電量。

式(6)為 Wang et al. (2017)之原最高能量限制式，式(7)為 Wang et al. (2017)原能量守恒限制式，說明電動公車於執行班表期間前後旅次鏈間之電量守恒關係。但原式(6)會造成高電量之電動公車(充滿電僅需花費 5 分鐘以內)最後需補滿電時無法進行充電。原因為其由模式判定充一次電會超過最大電量，故讓此電動公車完全無充電可能。

$$E_j + (-d + \theta u - d)X_i \leq \beta_0, \forall (i, j) \in P \quad (6)$$

$$E_j = E_i + (-d + \theta u - d)X_i - d_j, \forall (i, j) \in P \quad (7)$$

故本研究刪除式(6)之最高電量限制，將式(7)加以改良為式(8)並增設式(9)，藉新增一電量閾值 th_i 以確保所有電動公車不論電量高低皆能進行充電，其目的為針對高電量公車仍然允許其充電直到電量為 100%為止，如此設定才能確保每輛車收班回程時之電量為滿電狀態。另式(9)將對電量門檻值 th_i 進行賦值，若電動公車之電量小於門檻電量 $\beta_0 - (\theta u - d)$ ，則 $th_i = E_i$ 。若該電動公車電量超過門檻電量，則代表其充電將面臨過飽狀態，令門檻值 $th_i = \beta_0 - (\theta u - d)$ 於式(8)抵銷充超過之電量。

$$E_j = E_i + (-d + \theta u - d)X_i - d_j + (\beta_0 - (\theta u - d) - th_i)X_i, \forall (i, j) \in P \quad (8)$$

$$th_i = \text{Max}(E_i, \beta_0 - (\theta u - d)), \forall i \in S \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{(i,j,t) \in A} Y_{it}^k = X_i, \forall i \in S \quad (10)$$

$$\sum_{i:(i,j,t') \in A} \sum_{t'=t-u+1}^t Y_{it'}^k \leq 1, \forall k = 1, \dots, K, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j,t) \in A} Y_{it}^k \leq MZ_k, \forall k = 1, \dots, K \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_k \leq MZ \quad (13)$$

$$Z_k \leq Z_{(k-1)}, k = 2, \dots, K \quad (14)$$

式(10)為針對同一趟次，所對應之所有充電器之充電事件加總需和該趟次充電事件數相符，式(11)則為當發生一充電器發生充電事件時，其前後時段皆無其他公車使用該充電器，一充電器一次僅能服務一輛電動公車。式(12)代表充電事件與充電器設置之關係，若 k 充電器有設置($Z_k = 1$)，則該充電器才有可能發生充電事件。式(13)表示充電器與充電站設置之關係，若有設置充電站($Z = 1$)，則該充電站才有可能設置充電器。最後式(14)為充電器使用次序之關係，說明若第 $k - 1$ 個充電器尚未被使用，則第 k 個充電器不可能會啟用。

3. 變數值域限制

式(15)、式(16)為充電事件之二元變數限制式，若 Y_{it}^k 等於1則代表電動公車執行完第 i 趟次後，在第 t 分鐘於充電站內之第 k 個充電器有充電事件。 X_i 等於1代表電動公車於執行完第 i 趟次後，於充電站有發生充電事件，0則代表無發生充電事件。式(17)、式(18)分別代表充電器與充電站使用狀態之二元變數限制式，若值等於1，則代表該充電器或充電站有被使用，0則代表無被使用。

$$Y_{it}^k = \{0,1\}, \forall i, t, k \quad (15)$$

$$X_i = \{0,1\}, \forall i \quad (16)$$

$$Z_k = \{0,1\}, \forall k \quad (17)$$

$$Z = \{0,1\} \quad (18)$$

第四章 實驗測試與結果分析

本章將於 4.1 針對臺灣 G 客運業者公車路網進行實例測試，實際利用其電動公車營運路線作為測試對象，於 4.2 節進行測試之結果討論。4.3 節將設計不同發車頻率、路線長度以及班次衝突之營運班表，並於檢視模式於不同情境下的求解表現。

4.1 測試範例

本研究選定臺灣 G 客運作為範例，利用其電動公車營運路網進行模式測試。因 G 客運業者之電動公車營運系統與本研究最相近，故選擇其作為本研究之研究對象。

研究範圍擷取 G 客運建軍站之電動公車營運路網，因 G 客運五站營運場站中建軍站擁有最大規模之電動公車營運路線，故選定其此建軍站為研究範圍。建軍站之電動公車營運路網包含 4 條電動公車路線以及 1 個充電場站(即建軍站)，其 4 條路線分別為：50 五福幹線、52A、52B 以及 73 路，充電場站設置於建軍站，如圖 7 所示。各路線公車營運趟次之出發點及結束點都在此建軍站，為一單一場站營運系統排程問題(Single-Depot Scheduling Problem, SDSP)。各條公車路線營運班次之出發與回到場站之時間序列可從 PTX 公車動態網站上取得 A2 公車動態定點資料(https://ptx.transportdata.tw/MOTC#!/CityBus/CityBusApi_RealTimeNearStop)。

本測試情境為：已知建軍站擁有 4 條電動公車路線與其各車輛對應之營運班表，現實情況為已建置好一個充電場站，且充電器數量為未知。期望能透過模式求解最小化電動公車一年之營運行駛及充電成本，最佳化電動公車充電班表，以及求解出最小所需之充電器數量。

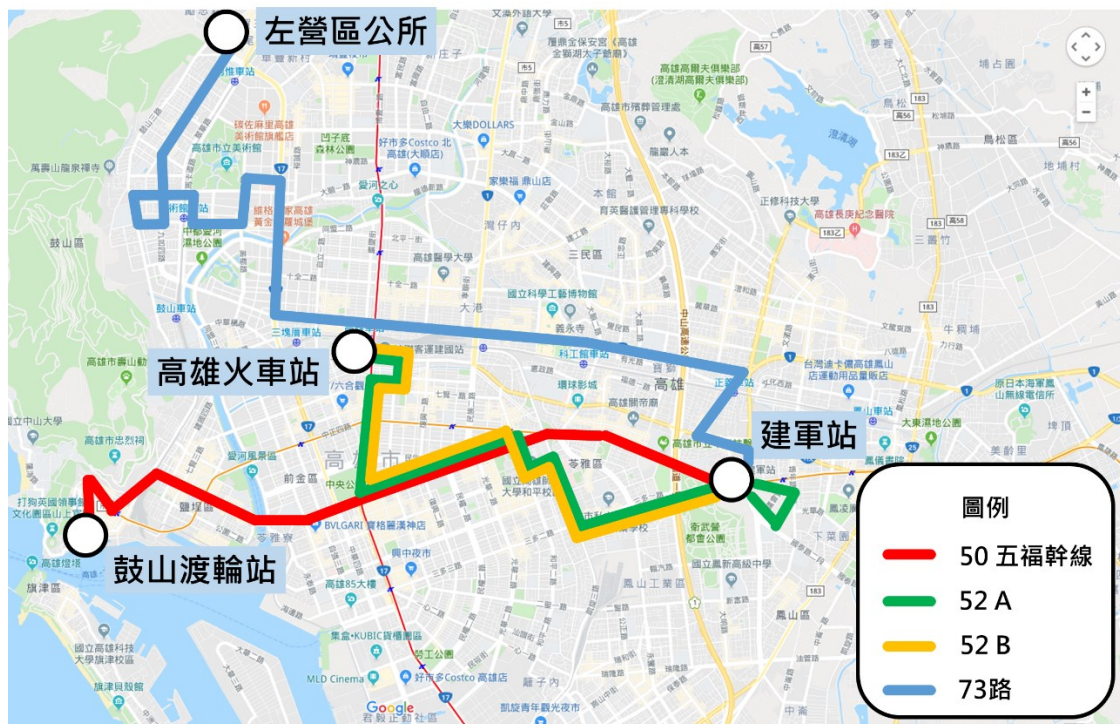


圖 7 臺灣 G 客運公車路線圖

各車輛對應之營運趟次表係由 PTX 動態資料抓取而得，實際參照 G 客運建軍站 4 電動公車路線之營運班次¹、車輛營運班表進行模式求解。經資料整理後發現，此範例路網共有 112 趟營運趟次，由 16 輛電動公車混合調度服務而成。此混合調度意指一輛電動公車可去服務多條路線，此 112 趟營運趟次均從建軍站出發，每趟次完成後該電動公車必回到建軍站。

16 輛電動公車各對應之營運趟次表係從 PTX 動態資料中各車輛之出發時間進行比對，分析出 16 輛電動公車所有執行趟次的時間。車輛營運趟次表如表 7 所示，由上至下依序為第 1 至 16 輛電動公車之各車營運趟次。所有趟次分為兩部分，包含實際服務趟次(S)與虛擬趟次(V)(詳見 3.2.1)共 128 趟次；實際服務趟次共 112 趟次，外加每輛車於最後需增設 1 虛擬趟次以供最後充電，共 16 虛擬趟次，為編號第 113 至第 125 趟次。

以編號第 1 輛電動公車為例，其車號為 EAA-901，需服務的趟次依序為第 14、26、47、78、96、105、109、113 趟次，其中第 14、26……109 為現實中實際服務趟次，完成後即返回建軍站。返回場站後則執行第 113 虛擬趟次，模式將視電動公車目前電量情況決定是否於收班前進行最後一次充電，以確保該車輛於隔日電量能維持滿電狀況開始營運。

¹ 班次與趟次為同義詞

表 7 各車輛對應之營運趟次表

#	車牌號碼	營運趟次編號
1	EAA-901	14, 26, 47, 78, 96, 105, 109, 113,
2	EAA-902	6, 20, 34, 49, 59, 91, 114,
3	EAA-903	12, 21, 35, 46, 56, 75, 98, 115,
4	EAA-906	2, 16, 31, 41, 53, 65, 76, 116,
5	EAL-0901	9, 22, 36, 44, 62, 72, 84, 94, 117,
6	EAL-0902	66, 74, 87, 100, 118,
7	EAL-0903	13, 25, 37, 52, 60, 69, 82, 97, 119,
8	EAL-0905	1, 23, 55, 64, 77, 89, 120,
9	EAL-0907	3, 15, 29, 40, 57, 67, 81, 95, 121,
10	EAL-0908	10, 30, 63, 79, 90, 102, 106, 110, 122,
11	EAL-0909	5, 17, 28, 42, 54, 73, 92, 103, 107, 111, 123,
12	EAL-0910	4, 18, 33, 48, 58, 70, 86, 124,
13	EAL-0926	11, 24, 38, 50, 61, 80, 93, 125,
14	EAL-0959	43, 51, 68, 85, 99, 126,
15	EAL-0960	8, 27, 39, 71, 88, 101, 127,
16	EAL-0961	7, 19, 32, 45, 83, 104, 108, 112, 128,

各趟次所對應之公車路線與路線長度如表 8 所示。50 路五福幹線其往返一趟之總長度為 20 公里，班次共有 54 班為最多班次之路線。52A 往返一趟為 17.6 公里，52B 往返一趟為 14.2 公里，最後 73 路則為最長路線但班次最少一天僅 8 班，其往返一趟總長為 31 公里。各公車路線長度為依據公車行駛之往返程路徑，利用 GoogleMap 估算加總而得。

表 8 趟次對應公車路線與長度

路線	趟次編號	路線長度 (公里)
50	2, 4, 6, 9, 11, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 29, 31, 33, 34, 36, 38, 40, 41, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 58, 59, 62, 64, 65, 68, 70, 71, 73, 77, 78, 82, 85, 86, 88, 89, 92, 96, 98, 101, 103, 105, 107, 109, 111,	20
52A	7, 15, 19, 25, 28, 32, 39, 46, 54, 60, 63, 69, 76, 81, 97, 102, 110,	17.6
52B	3, 5, 12, 13, 17, 21, 27, 30, 35, 37, 42, 47, 52, 56, 57, 61, 66, 67, 72, 74, 79, 80, 84, 87, 90, 94, 95, 99, 100, 104, 106, 108, 112,	14.2
73	1, 8, 10, 23, 75, 83, 91, 93,	31

112 趟服務趟次之時間表如下表 9 所示，其中 i 為趟次編號， a_i 與 b_i 分別代表第 i 趟次之班次出發時間與返程時間。表 9 所有班表趟次時間從最早至最晚由編號小到大依序排列，可得最早班次($i = 1$)之出發時間(a_i)為 05:40，而最後一班($i = 112$)返回場站之時間(b_i)為 22:51。故本研究模式設定 G 客運之系統營運時間為 05:30 至 23:30，營運時長共計為 1080 分鐘(18 小時)，將 05:30 設定為時間 $t = 0$ ，以一分鐘為單位將時間段切分，故可得最後一趟次返程之時間由 22:51 轉換為 $t = 1041$ 。同理，最後收班時間 23:30 則轉換為 $t = 1080$ ，而總營運時間段經轉換可表示為 $t = 0 \sim 1080$ 。

表 9 為原建軍站之所有趟次時刻表，表 10 為其時間以每分鐘為單位轉換後之出發時間與返程時間， i 為趟次編號， a_i 與 b_i 分別代表第 i 趟次之班次出發時間與返程時間。表 11 則為各車輛所服務之營運趟次班表， B 為電動公車車輛之編號， i 同樣為服務之趟次編號， a_i 與 b_i 代表第 i 趟次之班次出發時間與返程時間。

表 9 各趟次時間表(原時刻)

從建軍站出發								
i	a_i	b_i	i	a_i	b_i	i	a_i	b_i
1	05:40	07:29	21	07:54	08:49	41	10:25	11:37
2	05:43	06:41	22	07:56	09:08	42	10:30	11:36
3	05:45	06:37	23	07:58	09:50	43	10:45	11:59
4	06:00	07:15	24	08:08	09:17	44	10:54	12:48
5	06:00	06:49	25	08:15	09:19	45	10:59	12:08
6	06:15	07:38	26	08:30	09:38	46	10:59	12:01
7	06:18	07:21	27	08:31	09:24	47	11:00	11:56
8	06:19	08:21	28	08:40	09:51	48	11:19	12:27
9	06:29	07:51	29	08:44	09:53	49	11:28	12:38
10	06:43	08:35	30	08:56	11:02	...	...	...
11	06:44	08:03	31	08:59	10:06	103	19:11	20:28
12	06:44	07:41	32	09:12	10:19	104	19:34	20:39
13	06:51	07:59	33	09:18	10:26	105	19:50	20:56
14	07:00	08:19	34	09:25	10:36	106	20:26	21:16
15	07:05	08:23	35	09:32	10:38	107	20:29	21:42
16	07:08	08:26	36	09:46	10:56	108	20:51	21:46
17	07:23	08:21	37	09:49	10:44	109	21:12	22:25
18	07:33	08:47	38	09:58	11:05	110	21:25	22:31
19	07:37	08:39	39	10:01	11:16	111	21:49	22:56
20	07:39	08:47	40	10:11	12:51	112	22:00	22:51

表 10 各趟次時刻表(單位：分鐘)

從建軍站出發								
i	a_i	b_i	i	a_i	b_i	i	a_i	b_i
1	10	119	21	144	199	41	295	367
2	13	71	22	146	218	42	300	366
3	15	67	23	148	260	43	315	389
4	30	105	24	158	227	44	324	438
5	30	79	25	165	229	45	329	398
6	45	128	26	180	248	46	329	391
7	48	111	27	181	234	47	330	386
8	49	171	28	190	261	48	349	417
9	59	141	29	194	263	49	358	428
10	73	185	30	206	332	...	...	...
11	74	153	31	209	276	103	821	898
12	74	131	32	222	289	104	844	909
13	81	149	33	228	296	105	860	926
14	90	169	34	235	306	106	896	946
15	95	173	35	242	308	107	899	972
16	98	176	36	256	326	108	921	976
17	113	171	37	259	314	109	942	1015
18	123	197	38	268	335	110	955	1021
19	127	189	39	271	346	111	979	1046
20	129	197	40	281	441	112	990	1041

表 11 各車輛營運班表(單位：分鐘)

B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i
1	14	90	169		22	146	218		40	281	441		86	684	767
	26	180	248		36	256	326		57	444	509		124	1080	1080
	47	330	386		44	324	438		67	548	613		13	11	74
	78	636	729		62	490	560		81	649	744		24	158	227
	96	744	821		72	589	656		95	743	806		38	268	335
	105	860	926		84	665	734		121	1080	1080		50	389	455
	109	942	1015		94	742	804		10	10	73		61	489	544
	113	1080	1080		117	1080	1080		30	206	332		80	644	716
2	6	45	128	6	66	531	589		63	505	577		93	727	828
	20	129	197		74	613	686		79	640	699		125	1080	1080
	34	235	306		87	690	754		90	705	771		14	43	315
	49	358	428		100	793	854		102	819	897		51	389	513
	59	462	540		118	1080	1080		106	896	946		68	550	626
	91	707	831		7	13	81		110	955	1021		85	676	756
	114	1080	1080		25	165	229		122	1080	1080		99	780	849
					37	259	314		11	5	30		126	1080	1080
3	12	74	131		52	391	441		17	113	171	15	8	49	171
	21	144	199		60	467	527		28	190	261		27	181	234
	35	242	308		69	560	629		42	300	366		39	271	346
	46	329	391		82	659	746		54	410	480		71	581	662
	56	428	486		97	749	819		73	610	695		88	693	782
	75	616	615		119	1080	1080		92	708	780		101	796	863
	98	769	846		8	1	10		103	821	898		127	1080	1080
	115	1080	1080		23	148	260		107	899	972		16	7	48
4	2	13	71		55	419	494		111	979	1046		19	127	189
	16	98	176		64	510	579		123	1080	1080		32	222	289
	31	209	276		77	630	704		12	4	30		45	329	398
	41	295	367		89	704	809		18	123	197		83	661	783
	53	399	470		120	1080	1080		33	228	296		104	844	909
	65	529	600		9	3	15		48	349	417		108	921	976
	76	619	693		15	95	173		58	450	519		112	990	1041
	116	1080	1080		29	194	263		70	572	641		128	1080	1080
5	9	59	141												

參數設定如下表 12 所示，根據賴文泰 (2017) 電動公車營運指標、財務效益分析與發展策略之研究，車輛每單位行駛電量成本為每公里 4.34 元(貨幣單位皆代表台幣)。電動公車之剩餘電量係以公里數為單位，代表該公車仍可行駛的剩餘公里數，參考 Wang et al. (2017) 設定電量上限(最大行駛距離) β_0 為 150 公里，最低安全電量 e_{min} 則為最大電量之 20% 故為 30 公里。

電動公車行駛於各路線之耗能 d_i 依照上述路線資訊對應之公里數。當電動公車完成 i 趟次回到場站後需行駛至充電站進行充電，根據 G 客運之充電站設置於建軍場站內，由場站行駛至充電站之距離與時間暫可忽略不計，分別可得 $r = 0$, $d = 0$ 。

關於充電事件成本，設定啟動充電事件之固定成本 c_m 為一次 60 元，充電變動成本 c_e 為每分鐘 15 元。若電動公車進入充電站後卻無法立即充電，本研究將給予充電等候時間懲罰值 c_w 為每分鐘 6.51 元。本研究設定於充電站內每次之充電時間 u 固定為 5 分鐘，且充電效率 θ 為使電動公車注入每分鐘可再多服務 8 公里之電量。

充電場站設施成本設定建置一充電器之固定成本 c_{f1} 為一座 78 萬元，充電器維護成本 c_{m1} 則為一天 300 元；充電站之建置成本 c_{f2} 為一站 640 萬元，充電站維護成本 c_{m2} 同樣為一天 300 元。充電站個數 Z 為依據本研究範例之建軍站為現實中已建置完成之充電站，故設定為 1。充電器個數 K 為模式為充電器於現實已設置之數量，充電器命名為 M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 ，但最終實際所需用到之充電器數量係由模式最佳化求解所決定。

G 客運一年之公車營運天數 $\bar{D}$ 設定為 360 天，依據 Davis et al. (2016) 引述新替代能源公車其使用年限平均一輛使用 7.8 年，故將固定資本以折現率 10% 平均攤還成 8 年本金，可得現值轉換為本金之折現因子 α 為 0.1874。最後，加入隔日循環限制後，期望每輛電動公車於值勤結束皆能以滿電的狀況返回場站，故每輛完成任務返程電動公車，針對其剩餘電量與滿電之差距給予懲罰值 w 為每公里 3 萬元。

表 12 大範例之成本參數表

參數名稱	參數值	單位(台幣)
車輛行駛成本	c_d	4.34 \$ / 公里
至充電站行駛距離	d	0 公里
充電固定成本	c_m	60 \$ / 次
充電變動成本	c_e	15 \$ / 分鐘
充電時間	u	5 分鐘
等候懲罰成本	c_w	6.51 \$ / 分鐘
公車營運天數	$\bar{D}$	360 天
折現因子	α	0.1874
充電器建置成本	c_{f1}	780,000 \$ / 充電器
充電器維護成本	c_{m1}	300 \$ / 天

充電站建置成本	c_{f2}	6,400,000	\$/充電站
充電站維護成本	c_{m2}	300	\$/天
充電器數量	K	5	個
充電站數量	Z	1	站
返程電量差懲罰值	$\bar{w}$	30,000	\$/公里
各充電事件之等候時間	w_{ijt}	由所有可能之充電事件集合(A)計算而得	
路線個數	num_route	4	條
各路線消耗	d_i	50 路=20; 52A 路=17.6; 52B 路=14.2; 73 路=31	公里
最大電量	β_0	150	公里
最小電量	e_{min}	30	公里
充電效率	θ	8	公里/分鐘

在進行模式求解之前，本研究共需要輸入的資料共有三：一、各車輛營運班表，其中包含車輛編號、執行趟次，與其對應之發車時刻及返程時刻，並加上路線長度，詳見表 8 以及表 11。二、所有可充電事件集合 A 與各事件之充電等候時間 w_{ijt} ，其由各車輛營運班表所先行計算出，詳見 3.2.1。最後為各營運成本、系統營運之參數，詳見表 12。

4.2 測試結果

本研究以 Microsoft Windows 10 專業版為作業平台，使用 Python 套接 Gurobi 最佳化模組進行模式建構，並於 AMD Ryzen 5 2400G CPU @3.60GHz，8.0GB Ram 之個人電腦上執行求解。

模式求解後得到的結果為四：一為系統營運總成本，二為顯示系統中之第 k 個充電器是否被使用，三則為各公車於執行完第 i 趟次是否需進行充電，四為顯示各充電事件應發生在第 t 個時間點，由此可計算出系統充電之總等候時間。

測試範例之充電結果如表 13 所示：使用 16 輛電動公車去執行 128 趟次，經模式最佳化後得該公車系統僅需使用到 1 個充電器，共發生 62 件充電事件，充電等候時間總計為 20 分鐘，總營運成本為 4,621,604 元。

表 13 測試範例之求解結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 4,621,604	路線數：4 條	使用充電器數：1 個
	車輛數：16 輛	發生充電事件數：62 件
	班次：128 班次	等候充電時間：20 分鐘

各車輛所發生之所有充電事件資訊如下表 14 所示， Veh 表示車牌號碼、 i 為趟次編號、 b_i 為第 i 趟次之返程時間， E 表示該車執行完第 i 趟次後之剩餘電量， t 代表充電發生之時間點，最後 w 則代表充電所需等候的時間。

大部分充電事件之等候時間(w_{ijt})皆為 0，而車輛回到場站後需等候充電的共有 8 件充電事件，但其等候時間皆不超過 5 分鐘。此代表在模式加入等候時間之懲罰值後，會使所有車輛一回到場站後促使充電事件盡快開始，如此便能讓所有電動公車於執行完對應營運趟次後皆能立即充電。

一旦兩充電事件發生衝突，其中一輛車需調整其開始充電之時間，其需先等另一輛車輛充電結束之後，才能開始充電。如車輛編號 EAL-0907 之編號第 67 趟次與 EAA-903 之第 75 趟次，前者於第 613 分鐘回到場站並立即開始充電，但後者於第 615 分鐘回到場站時剛好唯一的充電器正在使用中，故其須另外等候 3 分鐘，待前者於第 618 分鐘完成充電後才能開始進行充電程序。

針對表 14 之剩餘電量(E_i)，可發現有些車輛會等待電量低至接近最低容忍電量 30 公里時才進行充電，如車輛編號 EAL-0901 之第 62 趟次於電量為 50 公里時進行充電。但大多數車輛皆在電量為 100~120 公里時即進行充電，可推測因模式之目標式有針對各車輛最後一班收班電量與滿電電量之差距給予懲罰值，如此便會讓在外執行任務之車輛隨時保持高電量之狀態，如此回程收班時才不會有電量差距過大之情形，造成收班後仍需花費大量時間充電。

檢視表 14 其所有車輛之充電時間點皆無衝突，電動公車於完成每趟服務趟次後，不論充電是否需要等候亦皆盡速安排充電。電量方面，所有車輛全無低於 30 公里最小電量，亦可發現此 16 輛車進行最後一件充電事件前，其電量皆大於 110 公里，表示完成此次充電後，所有車輛之電量將全部為滿電狀態。根據上述電動公車充電資訊，可證明本研究模式之求解結果合理。

表 14 各車輛之充電事件表

<i>Veh</i>	<i>i</i>	<i>b_i</i>	<i>E</i>	<i>t</i>	<i>w</i>	<i>Veh</i>	<i>i</i>	<i>b_i</i>	<i>E</i>	<i>t</i>	<i>w</i>
EAA-901	26	248	110	248	0		57	509	95.8	509	0
	47	386	135.8	386	0		67	613	121.6	613	0
	105	926	90	926	0		95	806	118.2	809	3
	109	1015	110	1015	0	EAL-0908	30	332	104.8	332	0
EAA-902	34	306	90	306	0		79	699	113	699	0
	49	428	110	428	0		106	946	104	946	0
	59	540	130	540	0		110	1021	126.4	1021	0
	91	831	119	833	2	EAL-0909	42	366	89.8	366	0
EAA-903	21	199	121.6	199	0		54	480	112.2	480	0
	46	391	118.2	391	0		92	780	110	780	0
	75	615	104.8	618	3		107	972	110	972	0
	98	846	124.8	846	0		111	1046	130	1046	0
EAA-906	31	276	90	276	0	EAL-0910	33	296	90	296	0
	53	470	90	470	0		58	519	90	519	0
	65	600	110	600	0		70	641	110	641	0
	76	693	132.4	693	0		86	767	130	767	0
EAL-0901	62	560	50	560	0	EAL-0926	24	227	110	227	0
	72	656	75.8	656	0		50	455	110	455	0
	84	734	101.6	734	0		80	716	121.6	716	0
	94	804	127.4	804	0		93	828	119	828	0
EAL-0902	87	754	107.4	754	0	EAL-0959	51	513	110	514	1
	100	854	133.2	856	2		68	626	130	626	0
EAL-0903	37	314	104	314	0		99	849	115.8	851	2
	52	441	129.8	441	0	EAL-0960	27	234	104.8	234	0
	69	629	114.8	631	2		39	346	127.2	346	0
	97	819	112.4	819	0		71	662	130	662	0
EAL-0905	23	260	88	260	0		101	863	110	863	0
	55	494	108	494	0	EAL-0961	32	289	97.2	289	0
	64	579	128	579	0		45	398	117.2	398	0
	89	809	110	814	5		104	909	104.8	909	0
EAL-0907	15	173	118.2	173	0		112	1041	116.4	1041	0

4.3 模式檢驗

為檢驗模式之合理性，本研究將利用表 14 測試結果檢查求解結果之車輛電量、充電排程與充電器使用狀況是否皆符合模式建構之限制式，並核對各車輛之趟次班表時間檢視是否存在衝突，以檢驗模式之合理性。模式合理性準則以下列五項進行說明：

1. 電動公車電量守恆

以車輛編號 EAL-0905 公車為例，下表 15 為其一天之營運班表與充電排程結果， i 、route、length 分別代表趟次編號、公車路線名稱、公車路線長度， a_i 、 b_i 、 E_i 分別代表第 i 趟次之出發時間、返回場站時間，以及完成該趟次後之剩餘電量。最後 t 、 w 則代表該電動公車開始充電時間以及等候充電時間。

可發現當車輛從滿電狀態行駛完第 1 趟次耗電 31 公里之路線時，電量 E 從 150 公里變為 119 公里。回到場站後進行充電補充 40 公里之電量後，電量變回 150 公里，緊接著繼續行駛第 2 趟次其電量消耗 31 公里，使電量 E 剩餘 119 公里，由此證明電動公車之能量守恆。

表 15 編號 EAL-0905 車輛之排程結果

i	route	length	a_i	b_i	E_i	t	w
1	73	31	10	119	119	119	0
2	73	31	148	260	119	-	-
3	50	20	419	494	99	494	0
4	50	20	510	579	119	579	0
5	50	20	630	704	130	-	-
6	50	20	704	809	110	814	5
D	-	-	1080	1080	150	-	-

2. 電動公車剩餘電量界於限制範圍內

由表 15 編號 EAL-0905 車輛最後一趟次之剩餘電量 E 為 150 公里及表 14 編號 EAL-0901 車輛的 62 趟次之剩餘電量為 50 公里可發現：每輛車之電量 E 皆明顯落在 150 公里與最低限制 30 公里之間，證明滿足電池容量最大為 150 公里，最低安全電量 30 公里之限制。

3. 充電時間與趟次時間互不衝突且盡早進行充電

以編號 EAL-0905 車輛之第 1 趟次為例，電動公車於執行完的 1 趟次後於第 119 分鐘開始充電，充至第 124 分鐘結束。然而下一趟次之出發時間為第 148 分鐘，顯示充飽電後至下一趟次出發前仍有許多時間，證明執行趟次與充電時間互不衝突。而所有車輛若有充電需求，皆安排在一回到場站時進行充電，若充電器正在被其他車輛使用，也會等待至該車輛充電完成後立刻進行充電，故充電時間皆為合理且符合現實。

4. 充電器一次僅能為一輛公車進行充電

總系統之充電器使用情況如下圖 8 至圖 10 所示，縱軸為 16 輛車輛依序排列，橫軸為時間切分為 1~360 分鐘、361~720 分鐘以及 721~1080 分鐘。若充電器正在被使用，則該時間點則標示紅色。由圖中紅色線段分布顯示，各車輛使用充電器之時段皆全部錯開無重疊使用，顯示模式中充電器之使用符合限制。

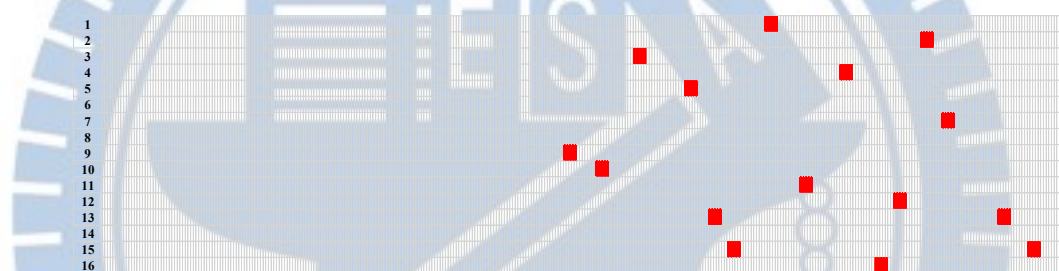


圖 8 充電器使用情況圖(1~360 分鐘)

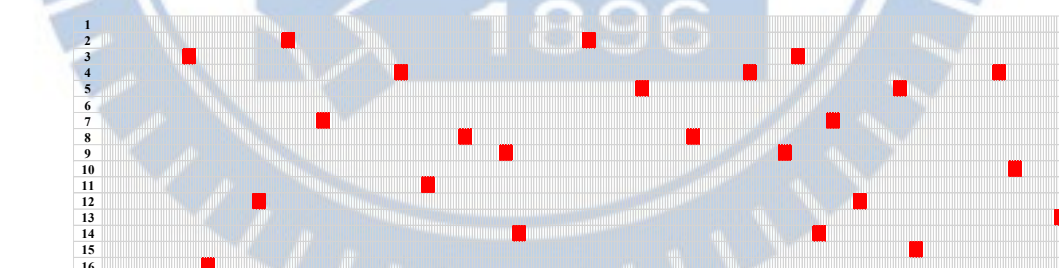


圖 9 充電器使用情況圖(361~720 分鐘)

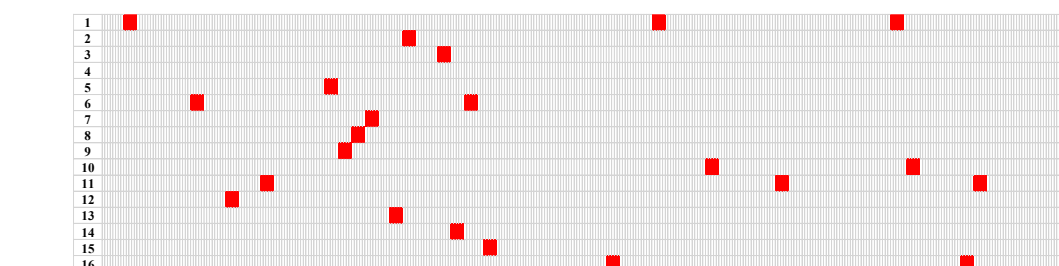


圖 10 充電器使用情況圖(721~1080 分鐘)

5. 若充電器正在被使用，則較晚到達之車輛需等候

由表 16 所示，*veh* 表示上圖 10 縱軸之車輛序號，序號 5、9、8、7 車輛分別希望於第 804 分鐘、第 806 分鐘、第 809 分鐘以及第 819 分鐘進行充電，但由於充電器數量只有一個，且該 4 輛車輛皆容許等候，因此安排先到之車輛優先進行充電，其餘車輛依序遞補進行充電。排程解果顯示序號 9、8 車輛分別需等候 3、5 分鐘方可進行充電，排程結果合理。

表 16 於第 804 分鐘發生之系統等候充電事件

<i>veh</i>	<i>i</i>	b_i	<i>t</i>	<i>w</i>
5	94	804	804	0
9	95	806	809	3
8	89	809	814	5
7	97	819	819	0

經由上述 5 點可證明模式求解之結果皆為實務可行，且無出現任何不合邏輯之情況。所有求解結果皆滿足模式建構之限制，包含：能量守恆、執行趟次與充電時間不衝突、充電器使用狀況合理等等，即使須等待充電之車輛亦盡速安排充電，使等候成本降至最低，充分證實模式之合理性。

4.4 情境範例設計

為更加了解模式是否適用於不同特性之公車系統，本研究設計了下列三項情境範例：一為不同發車頻率之情境範例，二則為不同路線長度之情境範例，最後第三部分則為特殊情境之範例。第一部分將設計不同發車班次頻率之班表，第二部分則依據不同路線特性設計不同路線長度供模式做測試，並加以探討上述兩因素其對營運成本、所需充電器數量之影響。最後亦針對班表衝突之情況來進行模擬，檢視該系統如何因應電動公車執行班表衝突時之情況。

4.4.1 不同發車頻率之情境範例

為探討不同發車頻率如何影響營運成本及充電器需求，本研究以原 G 客運之班表為基礎，修改出另外三種不同發車頻率之班表。模擬當電動公車遇到不同路線特性時，充電設備之供電效能是否能滿足電動公車之充電需求，情境將細分為低、中、高三種不同的發車頻率以進行情境範例分析。

情境範例之基本參數設定與測試範例相同，營運時間同為 05:30~23:30，共 1080 分鐘，一共使用 16 輛電動公車營運 4 條路線，分別為 50 路、52A、52B、73 路。各路線之資本資訊如路線長度、行駛一趟之旅行時間以及原班次數如下表 17 所示：可發現其中三條公車路線 50 路、52A 以及 52B 皆為路線較短的市區短路線，一天行駛班次數皆非常多。另外 1 條路線 73 路則屬於跨行政區之長路線，由衛武營行駛至左營區公所，其平均行駛一趟需耗時將近兩小時，於後面班表設計時會另外討論。

表 17 原四路線實際營運情況

	50 路	52A	52B	73 路
路線長度	20	17.6	14.2	31
班次行駛時間 (分鐘/班)	80	70	60	110
一天班次數	54	17	33	8

下表 18 至表 20 為 G 客運全 4 條電動公車路線於低、中、高三種不同發車頻率之情境範例時刻表，本研究設計 50 路第一班次於 05:45 發車、52A 於 06:45 發車、52B 於 05:45 發車，以及 73 路於 05:40 發車。50 路、52A 以及 52B 此三條路線之班表自第二班次開始，其發車時間皆由前一趟次之發車時間加上尖離峰班距推算而得。若該趟次之發車時間落在尖峰時間段則使用尖峰班距推算下一趟次之發車時間，若發車時間位於離峰時間則以離峰班距推算。各班次之回程時間係依據

表 17 之班次行駛時間推算而得，而下一趟次之出發時間為該趟次之發車時間再加上尖離峰班距。

本研究定義尖峰時段共有兩個時段，分別為上午尖峰 05:30~08:30 以及下午尖峰 16:30~19:30，其餘時間全視為離峰時段。各頻率之尖離峰班距設計如下：低頻率時刻表之離峰班距為 60 分鐘，尖峰時段則為 30 分鐘；中頻率時刻表之班距於離峰時段為 40 分鐘，尖峰時段為 20 分鐘；最後高頻率時刻表之班距於離峰時段為 30 分鐘，尖峰時段為 15 分鐘。

由於 73 路之行駛路線較長，從衛武營行駛至左營區公所需耗時近 2 小時，且一天僅有 8 個班次。因此另外將 73 路視為特殊路線，其班表調整另外以班次數作為基準，將其於低、中、高頻率時刻表之班次數分別設計為一天 4、7、11 班次。



表 18 低頻率之情境範例時刻表

50 路		52A		52B		73 路	
a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i
05:45	07:05	06:45	07:55	05:45	06:50	05:40	07:30
06:15	07:35	08:15	09:25	06:15	07:20	10:40	12:30
06:45	08:05	10:45	11:55	07:15	08:20	15:40	17:30
07:15	08:35	13:45	14:55	07:45	08:50	20:40	22:30
07:45	09:05	16:45	17:55	08:45	09:50		
08:15	09:35	18:15	19:25	09:45	10:50		
09:15	10:35	20:15	21:25	11:45	12:50		
10:15	11:35			12:45	13:50		
11:15	12:35			14:45	15:50		
12:15	13:35			15:45	16:50		
13:15	14:35			17:15	18:20		
14:15	15:35			17:45	18:50		
15:15	16:35			18:45	19:50		
16:15	17:35			19:15	20:20		
16:45	18:05			21:15	22:20		
17:15	18:35			22:15	23:20		
17:45	19:05						
18:15	19:35						
18:45	20:05						
19:15	20:35						
20:15	21:35						
21:15	22:35						

表 19 中頻率之情境範例時刻表

50 路		52A		52B		73	
a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i
05:45	07:05	06:25	07:35	05:45	06:50	05:40	07:30
06:05	07:25	07:25	08:35	06:05	07:10	08:10	10:00
06:25	07:45	08:25	09:35	06:45	07:50	10:40	12:30
06:45	08:05	10:25	11:35	07:05	08:10	13:10	15:00
07:05	08:25	12:25	13:35	07:45	08:50	15:40	17:30
07:25	08:45	14:25	15:35	08:05	09:10	18:10	20:00
07:45	09:05	16:25	17:35	09:05	10:10	20:40	22:30
08:05	09:25	17:25	18:35	09:45	10:50		
08:25	09:45	18:25	19:35	11:05	12:10		
09:05	10:25	19:25	20:35	11:45	12:50		
09:45	11:05	21:25	22:35	13:05	14:10		
10:25	11:45			13:45	14:50		
11:05	12:25			15:05	16:10		
11:45	13:05			15:45	16:50		
12:25	13:45			16:45	17:50		
13:05	14:25			17:05	18:10		
13:45	15:05			17:45	18:50		
14:25	15:45			18:05	19:10		
15:05	16:25			18:45	19:50		
15:45	17:05			19:05	20:10		
16:25	17:45			20:05	21:10		
16:45	18:05			20:45	21:50		
17:05	18:25			22:05	23:10		
17:25	18:45						
17:45	19:05						
18:05	19:25						
18:25	19:45						
18:45	20:05						
19:05	20:25						
19:25	20:45						
20:05	21:25						
20:45	22:05						
21:25	22:45						

表 20 高頻率之情境範例時刻表

50 路		52A		52B		73	
a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i	a_i	b_i
05:45	07:05	06:15	07:25	05:45	06:50	05:40	07:30
06:00	07:20	07:00	08:10	06:00	07:05	06:40	08:30
06:15	07:35	07:45	08:55	06:30	07:35	07:40	09:30
06:30	07:50	08:30	09:40	06:45	07:50	09:40	11:30
06:45	08:05	10:00	11:10	07:15	08:20	11:40	13:30
07:00	08:20	11:30	12:40	07:30	08:35	13:40	15:30
07:15	08:35	13:00	14:10	08:00	09:05	15:40	17:30
07:30	08:50	14:30	15:40	08:15	09:20	16:40	18:30
07:45	09:05	16:00	17:10	09:00	10:05	17:40	19:30
08:00	09:20	17:00	18:10	09:30	10:35	18:40	20:30
08:15	09:35	17:45	18:55	10:30	11:35	20:40	22:30
08:30	09:50	18:30	19:40	11:00	12:05		
09:00	10:20	19:15	20:25	12:00	13:05		
09:30	10:50	20:30	21:40	12:30	13:35		
10:00	11:20	22:00	23:10	13:30	14:35		
10:30	11:50			14:00	15:05		
11:00	12:20			15:00	16:05		
11:30	12:50			15:30	16:35		
12:00	13:20			16:30	17:35		
12:30	13:50			16:45	17:50		
13:00	14:20			17:15	18:20		
13:30	14:50			17:30	18:35		
14:00	15:20			18:00	19:05		
14:30	15:50			18:15	19:20		
15:00	16:20			18:45	19:50		
15:30	16:50			19:00	20:05		
16:00	17:20			19:30	20:35		
16:30	17:50			20:00	21:05		
16:45	18:05			21:00	22:05		
17:00	18:20			21:30	22:35		
17:15	18:35						
17:30	18:50						
17:45	19:05						
18:00	19:20						
18:15	19:35						

18:30	19:50			
18:45	20:05			
19:00	20:20			
19:15	20:35			
19:30	20:50			
20:00	21:20			
20:30	21:50			
21:00	22:20			
21:30	22:50			
22:00	23:20			

4.4.2 不同發車頻率之情境範例結果

不同發車頻率之情境以與測試範例相同之公車營運系統來進行模擬，系統維持使用 16 輛電動公車去營運 4 條公車路線。充電裝置之充電效率(θ)一樣為每分鐘 8 公里，充電時間則固定為 5 分鐘。本研究模擬三種情境之求解結果如下列表 21 至表 23 所示。

低頻率之情境如表 21 所示，由於發車班次最少，故所需的充電事件與成本為最低。且因車輛回到場站的時間多較為分散，車輛充電皆不需等候。中頻率如表 22，其發車班次增加為 74 班，充電事件數量也隨之增長。高頻率如表 23 所示，其發車班次增為 101 班，而充電事件數為最多之 56 件。加上執行班次過於緊密，造成一天之營運中進行充電所需等候的總時間為 5 分鐘，其代表有些車輛於完成趟次後有充電需求時，開始沒辦法立即充電。

表 21 低頻率之情境範例結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 3,165,332	路線數：4 條 車輛數：16 輛 班次：49 班	使用充電器數：1 個 發生充電事件數：33 件 等候充電時間：0 分鐘

表 22 中頻率之情境範例結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 3,748,532	路線數：4 條 車輛數：16 輛 班次：74 班	使用充電器數：1 個 發生充電事件數：45 件 等候充電時間：0 分鐘

表 23 高頻率之情境範例結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 4,294,850	路線數：4 條 車輛數：16 輛 班次：101 班	使用充電器數：1 個 發生充電事件數：56 件 等候充電時間：5 分鐘

下圖 11 為低、中、高三種不同發車頻率成本與所最小需充電器數量之比較圖，可以看到一年營運總成本隨三種不同發車頻率呈線性增加，其中低頻率班表之總成本為\$3,165,332，而中頻率為\$3,748,532，高頻率則為成本最高之\$4,294,850。三種狀況所需之最佳充電器數量皆為 1 個，因營運班表皆於不同時間點交錯回到場站，電動公車間皆能輪流接續著充電，故不需要第 2 個充電器設備，結果合理。



圖 11 不同發車頻率之情境結果比較圖

4.4.3 不同路線長度之情境範例

為探討不同路線特性其長度耗能是如何影響公車系統之營運成本及求解最小所需之充電器個數是否有差異，本研究依照原本測試範例之充電時間 5 分鐘、充電效率(θ)為每分鐘 8 公里，將充電時間固定並模擬搭配不同公車路線長度，從最短路線 5 公里至長路線 45 公里，長度依序為：5、10、15、20、25、30、35、40、45 公里，共 9 種路線長度(d_i)來進行模擬。輸入之重要參數資訊如下表 24，其餘參數則與測試範例相同，用上述之參數針對不同路線長度進行敏感度分析。

表 24 不同路線長度之輸入參數

參數名稱	參數值		單位
充電時間	u	5	分鐘
各路線消耗	d_i	[5,10,15,20,25,30,35,40,45]	公里

4.4.4 不同路線長度之情境範例結果

利用不同路線長度進行模擬可準確了解電動公車於不同環境下之營運狀況，本情境範例以充電時間固定 5 分鐘以及充電效率為每分鐘 8 公里之情況下進行求解，執行之結果如下圖 12 所示。縱軸分別代表各路線長度搭配情境下所花費的總成本以及最少所需用到的充電器數量。當路線長度到達 35 公里時，充電器使用數量增加為 2 個充電器。在路線長度不超過 40 公里時，營運總成本隨路線程度增加成等比例增加，說明營運路線長度與總成本成正比。而當路線長度超過 40 公里時，執行結果將會開始出現不可行(Infeasible)，說明充電時間為 5 分鐘之充電量將無法供給電動公車執行路線長度為 40 公里所需之電能。

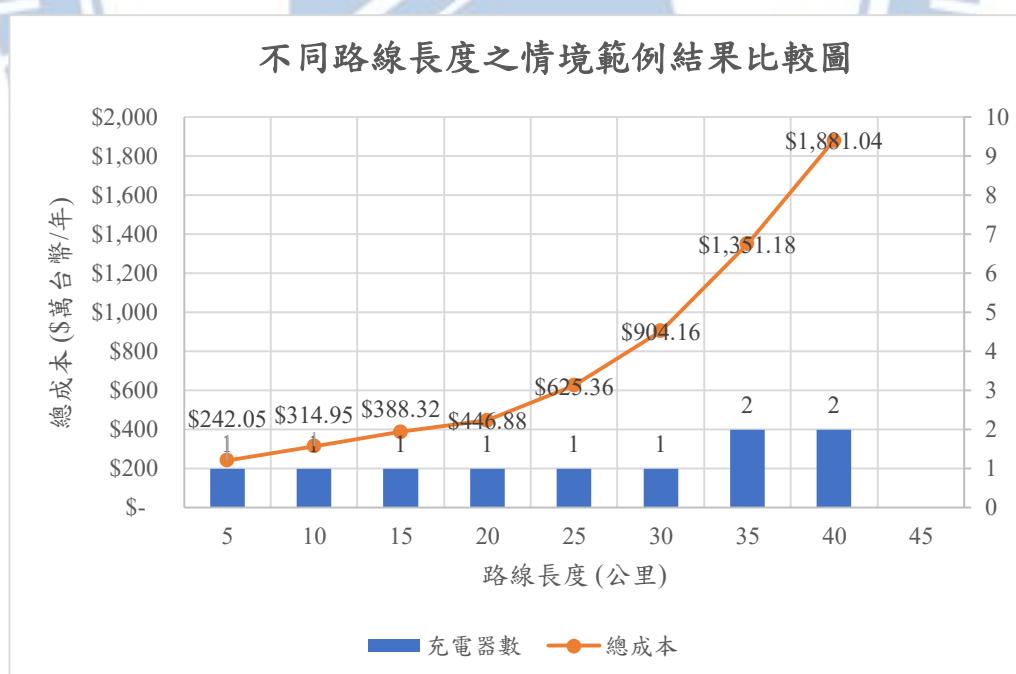


圖 12 不同路線長度之情境範例結果比較圖

另由圖 13 可得，在路線長度不超過 40 公里時，其充電事件數隨路線長度增加但增加幅度稍稍略減。從路線長度為 5 公里發生 17 件充電事件，提升至路線長度 30 公里發生 89 件充電事件。而總充電等候時間亦由等候 14 分鐘逐漸提升到 66 分鐘，表示在充電器僅有一個的情況下，路線長度增加亦使充電需求隨之上升，導致越來越多電動車輛回到場站時須排隊等候充電。而路線長度 35 公里後因系統充電器數量增加為 2，使總等候時間大幅縮減至 16 分鐘。

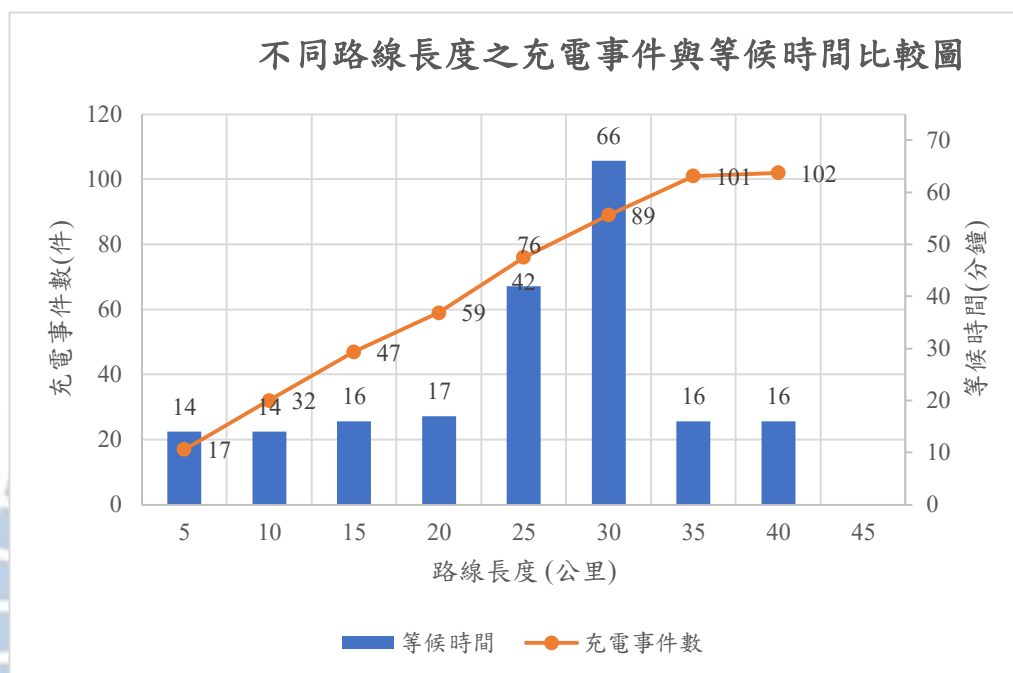


圖 13 不同路線長度之充電事件與等候時間比較圖

4.4.5 極端情境範例

本研究為確認排程模式能因應公車班表衝突之情境，利用大幅調整班次時間使公車營運班表出現極端情況以進行測試。藉設計出極端情況之班表並帶入模式求解，以檢視排班模式與最佳化出的充電器數量及充電等候時間是否能正確因應班表衝突情境。極端情境之定義如下列二類：

- (1) 各班次時間交錯 (原 4.1 測試範例班表)
- (2) 各車輛之末班返程時間相同
- (3) 三分之二車輛於收班前 5 分鐘同時返程且須同時充電

各班次時間交錯之班表與測試範例完全相同(詳見表 11)，16 輛電動公車之執行趟次班表係由 PTX 動態資料抓取而得，因班表內容與表 11 相同，故僅顯示重點班次資訊如表 25 所示。 B 為 16 輛電動公車車輛之編號， i 代表執行趟次編號， a_i 及 b_i 則分別代表該趟次之出發時間與返回場站之時間，皆已將時間單位轉換為分鐘。

表 25 極端情境各班次交錯之各車輛營運班表

B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i
1	14	90	169	2	6	45	128	3	12	74	131	4	2	13	71
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	109	942	1015		91	707	831		98	769	846		76	619	693
	113	1080	1080		114	1080	1080		115	1080	1080		116	1080	1080
5	9	59	141	6	66	531	589	7	13	81	149	8	1	10	119
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	94	742	804		100	793	854		97	749	819		89	704	809
	117	1080	1080		118	1080	1080		119	1080	1080		120	1080	1080
9	3	15	67	10	10	73	185	11	5	30	79	12	4	30	105
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	95	743	806		110	955	1021		111	979	1046		86	684	767
	121	1080	1080		122	1080	1080		123	1080	1080		124	1080	1080
13	11	74	153	14	43	315	389	15	8	49	171	16	7	48	111
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	93	727	828		99	780	849		101	796	863		112	990	1041
	125	1080	1080		126	1080	1080		127	1080	1080		128	1080	1080

第二種極端情境範例為：使各車輛最後於同時間點返回場站，故將各車輛之末班班表調整如表 26 所示。其中紅字部分代表經調整的班次，設計使所有車輛於時間點為 980 分鐘時同時結束任務趟次並返回到場站。

表 26 極端情境各車輛返程時間相同之車輛營運班表

B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i
1	14	90	169	2	6	45	128	3	12	74	131	4	2	13	71
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	109	935	980		91	857	980		98	900	980		76	900	980
	113	1080	1080		114	1080	1080		115	1080	1080		116	1080	1080
5	9	59	141	6	66	531	589	7	13	81	149	8	1	10	119
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	94	920	980		100	920	980		97	910	980		89	880	980
	117	1080	1080		118	1080	1080		119	1080	1080		120	1080	1080
9	3	15	67	10	10	73	185	11	5	30	79	12	4	30	105
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	95	920	980		110	955	980		111	979	980		86	900	980
	121	1080	1080		122	1080	1080		123	1080	1080		124	1080	1080
13	11	74	153	14	43	315	389	15	8	49	171	16	7	48	111
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	93	860	980		99	920	980		101	910	980		112	960	980
	125	1080	1080		126	1080	1080		127	1080	1080		128	1080	1080

最後第三種情境為設計多輛車輛同時有充電需求，由於在實務上不可能同時有 16 輛車班距之班距相同並同時回到場站，故本研究設計此極端情境為：全部之 16 輛電動公車中，其中有三分之二的車輛同時於收班前 5 分鐘同時回到場站，亦即於時間點為第 1075 分鐘時回到場站，將有 10 輛車有立即充電之需求。

表 27 極端情境車輛於收班前 5 分鐘同時返程之車輛營運班表

B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i	B	i	a_i	b_i
1	14	90	169	2	6	45	128	3	12	74	131	4	2	13	71
	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
	109	1002	1075		91	940	1075		98	999	1075		76	1005	1075
	113	1080	1080		114	1080	1080		115	1080	1080		116	1080	1080
5	9	59	141	6	66	531	589	7	13	81	149	8	1	10	119
	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
	94	812	1075		100	1013	1075		97	1009	1075		89	974	1075
	117	1080	1080		118	1080	1080		119	1080	1080		120	1080	1080
9	3	15	67	10	10	73	185	11	5	30	79	12	4	30	105
	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
	95	1013	1075		110	1009	1075		111	979	1046		86	684	767
	121	1080	1080		122	1080	1080		123	1080	1080		124	1080	1080
13	11	74	153	14	43	315	389	15	8	49	171	16	7	48	111
	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
	93	727	828		99	780	849		101	796	863		112	990	1041
	125	1080	1080		126	1080	1080		127	1080	1080		128	1080	1080

4.4.6 極端情境結果

在各班次時間交錯之情境下，發生之充電事件為 62 件，僅需使用 1 個充電器設備，所有電動公車於一天營運期間其總充電等候時間為 20 分鐘，總成本為 4,621,604 元。

表 28 各班次時間交錯之情境結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 4,621,604	路線數：4 條	使用充電器數：1 個
	車輛數：16 輛	發生充電事件數：62 件
	班次：128 班	等候充電時間：20 分鐘

在各班次末班返程時間設定同為第 980 分鐘的情境下，充電事件數與前者相同，所需之充電器數量增為 2 個。等候時間大幅增為 280 分鐘，故總成本較原測試範例需再多加 260 分鐘的等候成本以及增設 1 個充電器之成本，總成本增為 5,485,112 元。

表 29 各車輛返程時間相同之情境結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 5,485,112	路線數：4 條 車輛數：16 輛 班次：128 班	使用充電器數：2 個 發生充電事件數：62 件 等候充電時間：280 分鐘

最後 10 車輛於收班前 5 分鐘同時返程且需同時充電之情境，其充電事件數與前兩者同為 62 件，但充電器數量一次增為 10 個，如此為確保所有車輛回到場站能直接進行充電不需等候，故充電等候時間為 0 分鐘，此情境之營運總成本為 6,862,280 元。

表 30 車輛於收班前 5 分鐘同時返程且需同時充電之之情境結果

總成本	路線基本資料	求解結果
\$ 6,862,280	路線數：4 條 車輛數：16 輛 班次：128 班	使用充電器數：10 個 發生充電事件數：62 件 等候充電時間：0 分鐘

由極端情境一到情境三之充電器數量比較如圖 14 所示，充電器數量與總成本關係呈現高度正相關。情境三則為收班前 5 分鐘同時有 10 輛電動公車返回場站，在需準時收班的壓力下，使公車系統之充電裝置必須提升為 10 個充電器以供電動公車充電，如此造成公車系統營運之總成本大幅上升至 6,862,280 元。充電器對總成本影響距甚，期望公車業者能盡可能降低所需之充電器數量。

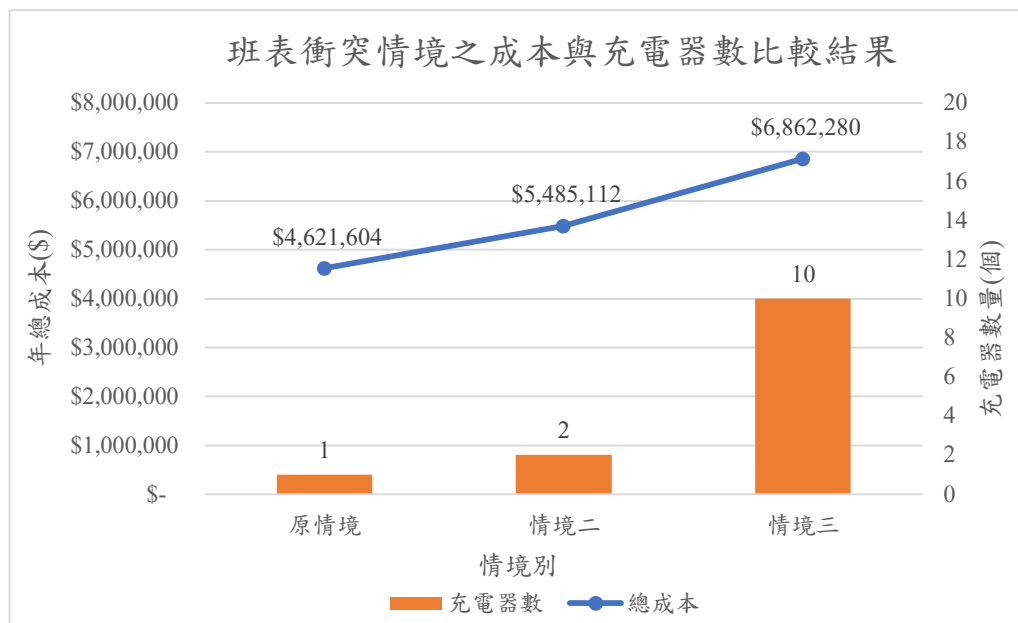


圖 14 特殊情境之成本與充電器數量之結果比較圖

測試範例相同之情境一由於返程時間交錯，故等候時間並沒有太大影響。而因情境二於同時間點有大量公車回到場站之緣故，使充電設備供不應求，公車欲充電等候皆需進行等候，等候時間高達 280 分鐘。由於情境三最佳所需之充電器數量為 10 個，故所有車輛回到場站後皆能立即充電，充電等候時間為 0。但等候時間對總成本之影響甚小，故鼓勵營運業者善用排班等候充電，使營運總成本最小化。

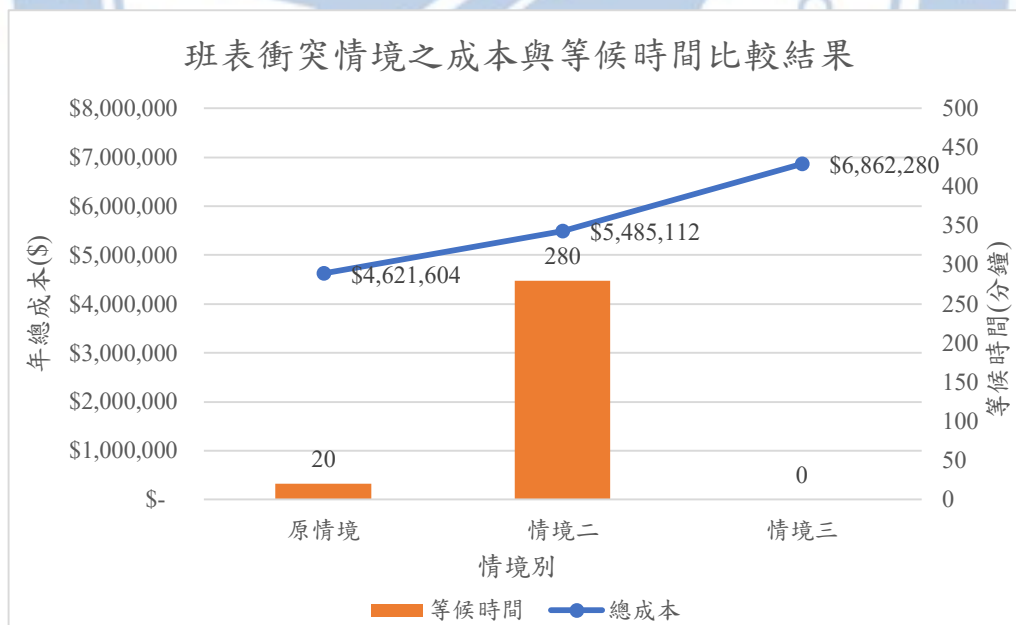


圖 15 特殊情境之成本與等候時間之結果比較圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

為實施節能減碳改善全球暖化，各國紛紛推行公共運輸電動化，臺灣交通部更於 2017 年推動「2030 大客車全面電動化」，期望所有公車業者將柴油公車汰換為電動公車進行營運。但電動公車與柴油公車之特性差異甚大，在營運上往往衍生出下列困境：里程焦慮、充電裝置不足及可能產生隔日循環問題。上述困境更顯公車業者如何規劃電動公車系統及妥善其充電營運排程，為極其重要之課題。期望本研究能發展一套數學模式，最佳化電動公車之充電排程與充電器數量，使業者能克服上述之營運困境，並使營運成本最小化。

本研究之模式係以全電動公車、全快速充電系統構成，營運模式呈單場站營運，各車輛皆能進行混合調度。以高雄 G 客運電動公車路線規模最大之建軍場站做為實際應用案例，藉 PTX 蒐集 4 條電動公車路線之實際營運班表，同時考慮夜間充電需求，確保每輛車於隔日開始營運時之電量皆為滿電狀態，並由模式求解出 16 輛車輛之充電排程表及充電器最佳建置數量，以最小化系統之營運成本。

本研究另以高雄 G 客運之營運班表為基礎，設計出低中高頻率班表、不同路線長度以及兩種極端班表之敏感度測試，對模式進行適性測驗。由求解結果可發現：充電事件數與執行趟次數呈正比，而充電器使用數量受車輛營運班表極大影響，因車輛班表多呈現交錯時間返回建軍場站，使用充電器之時間皆錯開。因此低、中頻率皆僅需一個充電器且充電無需等候。而因高頻率班次繁多，造成充電事件可能相互重疊，造成系統總充電等候時間增為 5 分鐘；不同路線長度結果顯示充電事件與路線長度呈正比，而當路線長度超過 40 公里時公車將無法順利營運，原因可能為充電量 40 公里，其造成電動公車每執行完一趟次皆需要進行充電，否則即無法完成下一趟次；最後一極端班表情境結果顯示，當多數車輛同時返回場站時，模式會安排各車輛依序等候充電。而當全部車輛皆急需充電時，模式會建議業者建置大量充電器，以供電動公車順利完成充電。

本研究之貢獻為在一全電動公車快充系統下進行充電排程最佳化，在公車處於高電量時充電時間可由固定 5 分鐘放鬆為彈性。同時加入夜間充電考量，消除隔日循環問題。並將模式實例應用於臺灣高雄市區，證明模式可適應都市高人口密度區其公車系統營運時間長、發車頻率高，且需進行混合調度之特性，能最佳化出適當之充電班表供業者作為參考。

5.2 建議

受限於時間因素，本研究僅考慮公車處於高電量時可將充電時間固定放鬆為彈性。暫不考慮將所有充電時間放鬆為彈性之原因，係因窮舉出所有可能充電事件將造成決策變數數量過多，數學模式求最佳解會耗費大量時間。未來研究可以將充電時間放鬆為彈性，若無法在合理時間內求出最佳解，則可發展啟發式解法求解近似解。

本研究實例應用範圍僅限單一場站且全電動公車路線，建議未來可擴大實例應用範圍，改為多場站以及將現行之柴油公車路線納入規劃考量，發展全都市公車系統之充電排程。

本研究假設電池之電力補充能量與充電時間成正比，但現實電池之放電與充電速度受電量高低影響極深，如：電池在高電量時充電較慢。建議未來可加入考量電池之充電放電特性，使模式更貼近現實。

本研究於計算總營運成本時，電價成本無論充電時間點皆為均一值，而實際的電價在尖峰、離峰充電會有不同的計算方式，甚至會有不同的電量收費級距。建議未來可將此變量加入考量，使營運成本之計算更貼近現實。

最後為公車到站之不確定性，本研究假設公車皆依照車輛營運班表正常營運，為考量到該營運公車於營運期間會遇上道路壅塞、提早返回營運場站等等問題。建議未來可以針對公車到站時間不確定之特性加以考量，使公車排程系統更加完善。

第六章 參考文獻

- [1] Chao, Z., & Xiaohong, C. (2013). "Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging: Model and Case Study". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2725-2736. doi:10.1016/j.sbspro.2013.08.306
- [2] Davis, S. C., Williams, S. E., Boundy, R. G., & Moore, S. (2016). "2015 Vehicle Technologies Market Report". doi:10.2172/1255689
- [3] Gao, Z., Lin, Z., Laclair, T., Liu, C., Li, J.-M., Birky, A., & Ward, J. (2017). "Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service". *Energy*, 122, 588-600. doi:10.1016/j.energy.2017.01.101
- [4] Ke, B.-R., Chung, C.-Y., & Chen, Y.-C. (2016). "Minimizing the costs of constructing an all plug-in electric bus transportation system: A case study in Penghu". *Applied Energy*, 177, 649-660. doi:10.1016/j.apenergy.2016.05.152
- [5] Kunith, A., Mendelevitch, R., & Goehlich, D. (2017). "Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems". *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(10), 707-720. doi:10.1080/15568318.2017.1310962
- [6] Lajunen, A. (2018). "Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods". *Journal of Cleaner Production*, 172, 56-67. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.066
- [7] Li, J.-Q. (2014). "Transit Bus Scheduling with Limited Energy". *Transportation Science*, 48(4), 521-539. doi:10.1287/trsc.2013.0468
- [8] Li, J.-Q. (2016). "Battery-electric transit bus developments and operations: A review". *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(3), 157-169. doi:10.1080/15568318.2013.872737
- [9] Liu, Z., Song, Z., & He, Y. (2019). "Economic Analysis of On-Route Fast Charging for Battery Electric Buses: Case Study in Utah". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(5), 119-130. doi:10.1177/0361198119839971
- [10] Mohamed, M., Ferguson, M., & Kanaroglou, P. (2018). "What hinders adoption of the electric bus in Canadian transit? Perspectives of transit providers".

Transportation Research Part D: Transport and Environment, 64, 134-149.
doi:10.1016/j.trd.2017.09.019

- [11] Perrotta, D., Macedo, J. L., Rossetti, R. J. F., Sousa, J. F. d., Kokkinogenis, Z., Ribeiro, B., & Afonso, J. L. (2014). "Route Planning for Electric Buses: A Case Study in Oporto". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 1004-1014. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.135
- [12] Wang, Y. S., Huang, Y. X., Xu, J. P., & Barclay, N. (2017). "Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis". *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 100, 115-132. doi:10.1016/j.tre.2017.01.001
- [13] Wei, R., Liu, X., Ou, Y., & Kiavash Fayyaz, S. (2018). "Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system". *Journal of Transport Geography*, 68, 160-168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>
- [14] 李佳芸 (2015)。充電式電動公車排班模式之研究。碩士論文，國立交通大學運輸與物流管理學系碩士班。
- [15] 陳珮心 (2013)。應用變數產生法求解電動公車車輛排程問題。碩士論文，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班。
- [16] 賴文泰 (2017)。電動公車營運指標、財務效益分析與發展策略之研究。運輸計劃季刊，46卷4期，頁377-397。doi: 10.6402/TPJ