

國立交通大學
運輸與物流管理學系

碩士論文

考量供應量限制下公車電動化汰換年期之研究

The Study on the Replacement Schedule of Electric
Buses considering the Supply Limitation

研究生：林子勤

指導教授：王晉元

中華民國一〇九年八月

考量供應量限制下公車電動化汰換年期之研究

The Study on the Replacement Schedule of Electric Buses considering the
Supply Limitation

研 究 生：林子勤

Student：Tzu-Chin Lin

指導教授：王晉元

Advisor：Jing-Yuan Wang

國 立 交 通 大 學
運輸與物流管理學系
碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Traffic and Transportation

August 2020

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇九年八月

考量供應量限制下公車電動化汰換年期之研究

學生：林子勤

指導教授：王晉元

國立交通大學運輸與物流管理學系

摘要

隨著全球環保意識高漲，運輸部門提出相關政策期望推動綠能運輸達成溫室氣體減量目標。本研究之目的為探討現有車隊全面電動化的問題。以營運業者角度，期望車隊最小化成本的目標下，考量經營車隊成本以及製造廠商車輛供應量、路線班次規劃等營運面向以及公車全面電動化政策的年限壓力，提出現有車隊漸進式汰舊換新使其電動化之汰換年期規畫方案。

本研究建立一兩次車輛替換數學模型，並加入目標年限概念及供應量限制，再將模擬資料輸入以求解，最後再進行敏感度分析，討論不同因素下對汰換結果的影響變化。結果顯示車輛汰換年分組合與目標年限的壓力及車輛報廢年限有關，且受限於供應量之因素，而電動公車價格則是影響車輛電動化時間的重要因素。利用本研究之模型求解可以得出柴油車隊於目標年前電動化之車輛汰換結果，供業者做為參考依據。

關鍵字：電動公車、汰換年期規劃、供應量限制

The Study on the Replacement Schedule of Electric Buses considering the Supply Limitation

Student : Tzu - Chin Lin

Advisors : Jing-Yuan Wang

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

Abstract

With the rising awareness of global environmental protection, the transportation department puts forward relevant policies and hopes to promote green transportation to achieve the target of greenhouse gas reduction. The purpose of this research is to study the issue of electrification of the existing fleet. From the perspective of the operator, under the goal of minimizing the cost of the fleet, the existing fleet needs to be replaced gradually because of considering the operating costs, the supply limitation, routing problem, other operational aspects, and the time pressure of the policy of replacing current buses by electric buses. The operator needs the plan for the replacement schedule of electric buses.

This study proposes a mathematical model of the twice replacement method of current buses, and introduces the concept of the target year and the supply limitation. Then, we put the simulation data to solve it, and finally conduct sensitivity analysis to discuss the impact of different factors on the replacement result. The results show that the combination of vehicle replacement years is related to the pressure of the target year, the age of vehicle retired, and the limitation of supply. The results also reveal that the price of electric buses is an important factor affecting the replacement schedule of electric buses. Using the model, we can get the result of the replacement of the diesel buses before the target year for the operator as a reference.

keywords : Electric bus, Replacement schedule, Supply limitation

誌謝

寫到這表示這篇論文也已大致完成，差不多要結束我的求學生涯了。當初進入交大時，也沒想到一待就待了六年，十分感謝王晉元老師的指導，從大學公共運輸競賽時就跟著老師學習，到大學的畢業專題，甚至是研究所的指導老師，很慶幸能跟著老師學習這麼長的時間。雖然跟隨這麼多年，但對於每個禮拜的 meeting 依然很緊張，不知道是不是有準備到重點、有沒有甚麼地方是沒注意到的，每次討論完總是很有收穫，把不小心走岔路的我導回正確的方向，一針見血地切入問題的核心。老師希望在提供方案之前我們能先嘗試，學會自行摸索，找到問題根本原因及可能解決方法的能力，並且教導我們要探討問題的本質以及目的，在後續分析時要不停去思考問題核心才不會離題。謝謝老師的嚴厲教導，同時感謝來撥冗前來擔任口試委員的盧老師及洪老師，指出我論文不足的部分並提出建議，也謝謝各位口委們讓我能通過口試。

謝謝我遇到所有的研究所夥伴，我待在統艙的時間很少，也不太會跟大家出遊或是出去吃飯，而到了碩二，雖然搬到自己的 lab，但大家依然會來串門子聊天，在苦悶的研究所生活中增添樂趣。謝謝鏡芳負責主導助教大小事，問甚麼問題也盡全力回答我、給我寫論文上的建議，你最棒；謝謝王允沒事就晃過來找我聊天，雖然去吃個飯還被騙去 ktv，但這個難得的體驗我還是很開心，你還給我找工作上的一些知識，是有問必答的 lab 台柱，等你之後夢想實現我去光顧；謝謝打羽球變熟的士軒，留下來幫我們口試的東西，還說我是要走了的學姊，沒關係你再半年也差不多了，不要再擔心一些奇怪的事瞎操心搞得周圍的人也緊張；謝謝佑芳我的口試好夥伴，最後剩我們兩個共患難，口試衝刺前很多個剩我們在 lab 打拼的夜晚、陪我回宿舍、聊天談心...等好多回憶，沒你真不知道怎麼撐過那段日子，希望我們都能成功找到工作。寄居在我們實驗室的嘉欣，有妳 lab 變得很歡樂，還帶我們出去吃好吃的、幫我各種外帶晚餐；謝謝我的羽球好夥伴兼出遊玩伴依芳，無數個不知道在聊甚麼卻可以聊到不知道甚麼時候的夜晚，因為妳我成功去了好多地方，陪我度過各種沒規劃的奇怪行程，幫助我完成離開新竹前要做的清單，以後我來新竹要記得當地陪喔！然後接下來是我認識碩一的各位，有跟我打到羽球的、陪我玩樂打牌的，我都很感謝，能在離校前又多認識了一些新朋友，希望我改天回學校你們還記得我。

最後就是感謝我的家人、所有愛我跟我愛的人，因為你們的支持才有現在的我，包容我的脾氣，給我一些建議及開導，在我難過、吐苦水的時候你們都在，不管是安慰我、給我建議、或是當頭棒喝，撫慰我激動的情緒，累的時候有個依靠，回家的時候有很多好吃的，謝謝你們當我永遠的後盾，讓我成功完成碩士學位。

林子勤 謹誌
2020 年 8 月

目錄

摘要	i
Abstract	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 問題背景與研究動機	1
1.2 研究目的與範圍	2
1.3 研究方法與架構	2
第二章 文獻回顧	5
2.1 電動公車營運特性	5
2.2 電動公車車輛規模	5
2.3 小結	7
第三章 數學模式構建	10
3.1 目標年限概念	10
3.2 混合公車車隊管理問題(Mixed bus fleet management problem).....	11
3.3 兩次車輛替換模型	18
3.4 目標年限限制式	27
3.5 產量限制問題	28
3.6 小結	28
第四章 案例分析	29
4.1 範例測試	29
4.1.1 參數設定	29
4.1.2 測試結果	31
4.1.3 情境分析	32
4.2 模擬分析	34
4.2.1 參數設定	34

4.2.2	模擬測試結果	35
4.2.3	模擬資料之情境分析	36
4.3	敏感度分析	37
4.3.1	供應量	38
4.3.2	電動公車價格	39
4.4	小結	40
第五章	結論與建議	42
5.1	結論	42
5.2	建議	42
參考文獻		44

圖目錄

圖 1 研究流程圖	4
圖 2 生命週期及車隊汰換時間概念圖	7
圖 3 目標年限示意圖	11
圖 4 目標年限樹狀圖	11
圖 5 舊車換新車利益計算示意圖	14
圖 6 相同變數觸發邏輯不合示意圖	21
圖 7 營運班次結果示意圖-以 8 年為例	32
圖 8 模擬分析路線圖	35
圖 9 供應量敏感度分析-目標年 2030 年	38
圖 10 供應量敏感度分析-目標年 2034 年	39
圖 11 電動公車價格敏感度分析-目標年 2034 年第二次替換期間汰換之車輛數分布	40
圖 12 電動公車價格敏感度分析-目標年 2034 年第一次替換之類型	40

表目錄

表 1 集合意義新增及修改對照表	20
表 2 集合意義範例說明	20
表 3 車隊相關參數設定	29
表 4 年份參數設定	30
表 5 成本參數設定	30
表 6 營運限制參數	30
表 7 站點距離矩陣	30
表 8 站點時間矩陣	31
表 9 現有營運班次數	31
表 10 求解結果-車輛汰換時間	31
表 11 目標年落於第一次替換結束後~第二次替換結束前之求解結果-車輛汰換時間....	33
表 12 目標年於第二次替換前之求解結果-車輛汰換時間	33
表 13 模擬資料之車隊相關參數	35
表 14 模擬資料之站點距離矩陣	35
表 15 模擬資料之站點時間矩陣	35
表 16 路線對照表	35
表 17 模擬資料之求解結果-車輛汰換時間	36
表 18 情境二之模擬資料求解結果-車輛汰換時間	37
表 19 情境三之模擬資料求解結果-車輛汰換時間	37

第一章 緒論

1.1 問題背景與研究動機

近年來由於溫室效應使全球面臨極端氣候的現象，導致許多因氣候變遷造成的天災事件頻傳，像是各地森林野火災害、冰川的加速融化、熱浪席捲導致各地高溫突破歷史紀錄等。根據聯合國世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)提出的報告「關於 2018 年全球氣候狀況的聲明」(WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018)蒐集 2018 年各地的氣溫、海平面、溫室氣體等相關資料，不僅提到 2018 年是全球開始記錄氣溫以來第四熱的一年，也包括海平面上升、冰川融化等氣候變遷現象，而報告顯示暖化程度漸劇與大氣溫室氣體的增加有相關。此報告的結果顯示全球暖化對世界造成的影響及相關災害有急迫性，是國際必須正視的問題。而根據研究資料的顯示結果，其中減少人類活動造成的空氣汙染及減輕溫室效應成為主要關注之重要議題。

隨著全球環保意識高漲，台灣也針對運輸部門提出相關政策期望推動綠能運輸達成溫室氣體減量目標。根據經濟部能源局統計資料，運輸部門於民國 108 年的燃料燃燒二氧化碳排放量(含電力消費之間接排放)高達 3,632 萬公噸，占總排放量 13.61%，僅次於工業、能源部門位居第三高，1991 年至 2019 年的整體趨勢工業部門穩居第一外，運輸部門由第二高有逐漸下降的趨勢，若能推動綠色能源相關政策之發展，逐步降低運輸部門的碳排放量，將有助於減少溫室氣體。此外，國外文獻也有相關研究佐證，Li (2016)提到柴油公車會造成大量空氣汙染及排放溫室氣體，可藉由使用替代能源以降低柴油公車造成的汙染，而替代能源中的電動公車在服務期間的零排放特性使各運輸相關機構較廣泛使用，其優勢不僅低汙染、節省能源，也有低噪音的營運特性，適合在都會地區行駛(Lajunen and Lipman, 2016；Wang et al.,2017)。

然而，台灣目前的大眾運輸在綠能運輸上的發展僅有大方向的目標計畫與概念，缺乏完整可行的執行細項方案，導致客運業者的購車意願也因缺乏具體措施及考量多種成本因素而卻步。交通部運輸部門節能計畫(交通部, 2017)提出，為維護空氣品質並建構低碳排放的永續運輸環境，達成溫室氣體減量的目標，積極推動的工作項目中包括大型車輛汰舊換新及交通設施電動化，期望能達成「2030 年市區公車全面電動化」的政策目標。為了達成上述的政策目標，必須有一套完整可行的執行策略，同時考慮現有車隊車齡與汰換後的新車與舊車混合營運問題，最終達到車隊全面汰換。然而由於目前尚缺乏相關之具體方案與策略，且客運業者考量充電設施、購車成本、電池續航力等因素，對電動公車的購車意願尚未提升，依此發展現況可能難以達成預定之目標。

由於考量業者的財務預算限制及車輛製造商對於電動公車的供應無法一次性提供過多數量的問題，需循序漸進汰換車隊為電動公車。業者不僅須評估上游車輛供應，對內部營運的財務預算、更換後車隊中車種混合營運情形、現有車隊汰換時間不同的問題等面向須逐步調適，以滿足現有大眾運輸需求，因此逐步汰舊換新是業者須採取的營運策略，以配合政策綠能運輸之發展。業者須關心可能遇到的不同面向營運問題，如在車輛供應部份，必須考慮電動公車的供應數量是否足以滿足既有路線之公共運輸需求及能否配合製造廠商供應數量進行營運規畫；混合車隊部份，則是在車輛逐步電動化的過程中會有柴油車及電動車混合營運的情形發生，是否能配合現有公共運輸需求做車輛調度；路線營運方面，由於汰換新舊車會牽涉到班次營運規劃，如何在不損害現有路線營運需求下做車輛調整；而現有車隊車齡方面，必須考慮現有車隊購車時間的不同做汰換，須將上述之面向納入研究中考慮。

此外，須加入目標年限以貼近社會現況。配合政策 2030 年市區公車要全面電動化之年限，顯示了車隊電動化的急迫性，因此研究方法不僅要考慮車輛供應量等上述所提面向，還需加入於政策年限前公車全面電動化的目標年限限制於數學模式中求解。本研究將在考慮諸多限制下，最佳化現有車隊汰舊換新的效益，擬定車輛汰換順序，以求循序漸進達到車隊全面電動化的目標，供決策者作車隊營運規劃的參考依據。

1.2 研究目的與範圍

依據上述所提背景與研究動機，本研究之研究目的為探討現有車隊全面電動化的問題。以營運業者的角度，在期望車隊最小化成本的目標下，考量營運成本、購車成本等經營車隊成本以及製造廠商車輛供應量、路線班次規劃等營運現實面考量。本研究將提出現有車隊循序漸進全面汰舊換新成電動公車的規畫方案，並考慮 2030 年公車全面電動化的政策加入目標年限，建立一數學規劃模式求解最佳化車輛汰換年分，以供決策者作為參考依據。本研究的目的主要有以下兩點：

1. 建立一數學模式求解找出車輛汰舊換新模式：考慮需汰換之公車或購入新車的生命週期成本，期望最小化車隊成本下找到最佳化車輛年分汰換模式，提供業者因應車隊全面電動化之漸進式更新車隊方案。
2. 於車輛汰換同時滿足現有營運班次之規劃：考量電動公車會有服務範圍限制及營運成本不同等面向，車輛漸進式電動化時會有混合車隊營運問題所面臨的路線問題(routing problem)，也就是如何從場站出發服務完所有班次回到場站。因此，本研究將車輛服務現有路線下之路徑問題於車輛汰換模式中一併納入研究，在滿足現有服務需求下找到可行的車輛汰換年份組合。

1.3 研究方法與架構

本研究以營運業者的角度，考慮成本、預算限制、車輛供應量等限制條件下最佳化車隊組合。以下將研究分成六個部分：第一個部分為研究目的與範圍之確立，第二部分為相關文獻蒐集與回顧，第三部分為建立數學模式，第四部分為簡例驗證，第五部分為實測與執行，第六部分為結果討論，第七部分為結論與建議。

1. 研究目的與範圍之確立：本研究以營運業者的立場，以最小化車隊成本為目標，考慮成本、預算限制、車輛供應量等限制條件下同時考慮路線規畫，以最佳化車輛汰換年分，決定車輛汰舊換新方案。
2. 相關文獻蒐集與回顧：參閱電動公車營運特性、電動公車車隊規模相關文獻，整理其問題考量之因素、相關參數設置及使用的數學模式，供本研究之方向及建構模式時的參考。
3. 建立數學模式：本研究以最小化初期替換車隊成本為目標，考量營運成本、購車成本等，結合預算限制、車輛供應量等限制條件，並達成滿足現有公共運輸需求之營運路線規劃，納入目標年限決定汰舊換新的時間，得出車隊電動化之汰換年分。
4. 簡例驗證：以小範例代入本研究建立之數學模式，檢視此模式的可行性。
5. 實測與執行：擴大範例規模執行本研究方法，模擬路線、車隊、班次等營運資料套入數學模式中進行求解。檢視得出的結果並檢驗其合理性，是否為現實中可行方案，若否，則數學模型需要進行修正。
6. 敏感度分析：針對現實可能之情況做敏感度分析，檢視結果合理性並討論不同因素下對方案結果造成的變化，供研究之結論與建議可能的改善方向。
7. 結果討論：針對實測後的結果進行討論及分析。
8. 結論與建議：歸納並解釋結果，確認該數學模式之適用性，提出一些觀點供未來可深入研究探討的方向或可能的改善建議給予後續研究可精進的部分。

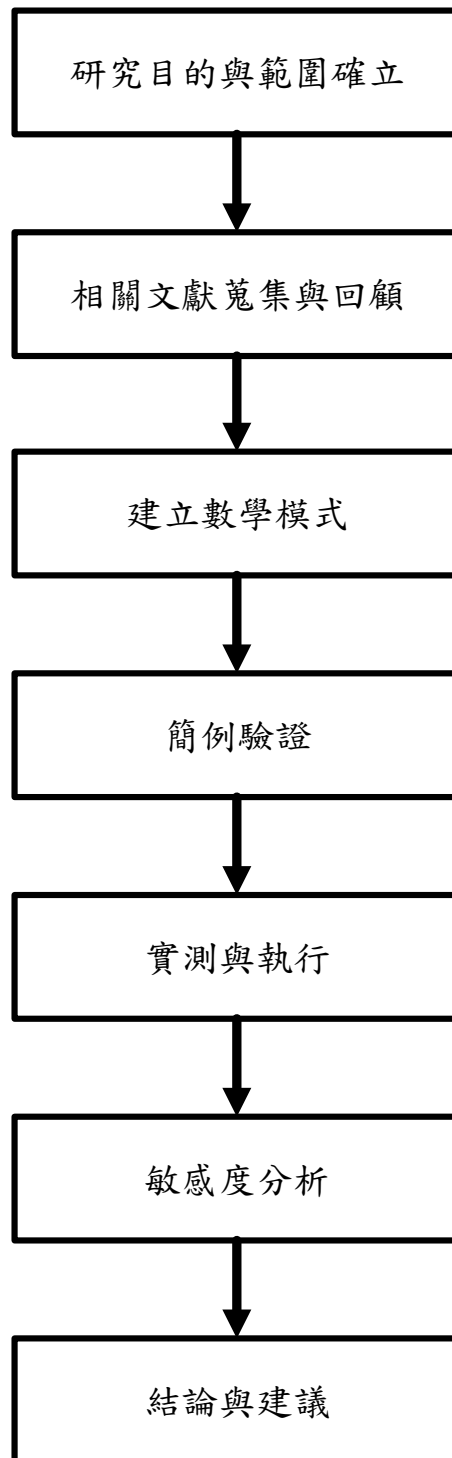


圖 1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

文獻回顧主要分成三大部分：第一部分針對電動公車之營運特性進行回顧；第二部分為電動公車車隊規模及配置問題等相關文獻，了解電動公車車隊規模問題之研究方法，整理不同研究處理車輛規畫問題的相關模式，作為本研究建立模式之參考；第三部分為整理與方法比較，並提出本研究欲使用之模式進行總結。此章節蒐集與本研究相關之電動公車車隊規模及配置問題的文獻進行回顧與整理，統整不同文獻的問題範疇及研究方法。最後比較模式之優劣，以作為本研究建立數學規劃模型之參考。

2.1 電動公車營運特性

Gao et al. (2017) 評估市區電動公車營運的能源消耗與電池績效。藉由應用模擬軟體，建立一框架概念，結合現實世界車輛績效、服務可靠度資料，應用至公車電動化可行性之研究，評估電池績效與能源消耗情況。研究中實例分析顯示電動公車更具節能優勢，消耗的能量較柴油公車少。此外該研究提到需研擬不同公車類型及電池種類進行混合營運的重要性，如何維持電池容量之穩定性及快速充電設備效能提升，使公車服務水準更加穩定成為非常重要之課題，期望藉由發展一個框架概念供客運業者依據不同類型的電池、充電方式等營運情形執行混合營運策略，以有效降低營運總成本。

Li et al. (2018) 研究如何在有限的預算下，有效管理在最大化車隊效益下汰換之公車車隊。文獻中提到傳統公車造成的空氣污染嚴重，比較多種替代能源公車，包括電動公車、壓縮天然氣公車、混合動力公車、柴油公車，考慮污染對環境造成的影響，將外部成本納入成本效益分析。然而在混合車隊管理問題中會因電動車種本身的特性而有距離範圍限制、營運成本不同的問題，因此不僅需考慮車隊大小及組合，路徑問題也是需一併考量的因素之一。結果藉由不同因素的情境分析、敏感度分析，探討對車隊總效益之影響與車隊組成的相關變化。

2.2 電動公車車輛規模

Rogge et al. (2018) 建立電動車隊規模及車隊混合問題之最佳化模式。依據車種數量、服務趟次排程、充電設施數目作成本最佳化，並進行服務排程及充電排程之規劃，此研究將這類問題定義為電動車輛排程車隊規模及混合車隊問題(Electric Vehicle Scheduling Fleet Size and Mix Problem, EVS-FMC)。研究假設固定充電設備設置於場站的充電方式，且定義問題中服務順序具有方向性。該模式之決策變數為確認服務班次或充電事件的服務順序、時間變數與計算能源消耗需考量之電量現況變數，加入時間窗之條件，考慮車輛排程限制、能源消耗及充電限制，目標為最小化電動車隊總持有成本，包括購車成本、營運成本、能源成本、充電設施成本。該研究利用群組基因演

算法(Grouping Genetic Algorithm, GGA)求解決定車隊車輛配置數目及排程，並結合混合整數線性規劃之數學模式最佳化充電設施。執行情境分析時分成兩種：情境一為位於都市之路線，班次頻率較固定、路線長度較短；情境二為位於郊區之路線，尖離峰班次變化較大、路線相對較長，並參考兩種電動公車類型進行分析。情境分析以原有傳統公車的排班方式做為比較基準，比較結果包含三種：僅有電池容量小的公車、僅有電池容量大的公車、混合兩種類型公車之車輛配置。結果顯示由於不同車輛類型其特性帶來的成本會互補，像是電池容量與行駛範圍的關係，進而影響採購的車輛數，因此在考慮路線營運特性下，可使用混合車隊將電池容量小的車輛應用於如尖峰時段的短期需求，而電池容量大的車輛應用於正常時段的服務路線上，其總成本會相較其他單一車種的方案較低。

Teoh et al. (2017) 檢視電動公車代替傳統柴油公車營運的可能性，於不同情境策略下比較，找適合的營運方式。利用軟體 Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium(EMME)並考慮欲研究地區之現有交通狀況建立路網。收集乘客數、車輛數、路線上下車人數等營運資料，且在不同類型的路口於星期二、三、四的尖峰時段調查其車量數、方向、車種等交通量資料。將蒐集到的真實資料整理產生起迄矩陣，藉由嘗試錯誤(trial and error)的方式校正矩陣，直到貼近現實路況。以校正完的起迄矩陣產生出電動公車網路後進行情境分析，包含既有路線、利用現況環境結合電動公車營運、以三種不同影響因素(公車路線、快速充電時間、班距)測試電動公車的表現，這五種情境分析探討。此研究範圍針對開發中國家的馬來西亞作為實測對象，探討不同影響因素對電動公車營運的影響。結果顯示電動公車的營運績效比現有傳統公車好，其中以有快速充電設施及路邊快速充電樁的電動公車情境有最好營運績效，而研究也指出電動公車營運會牽涉到諸多因素，像是能源消耗、電池消耗、營運準則(如班距)、快速充電設施等。

Li et al. (2018)藉由漸進式汰換舊公車，改由較新、較環境友善的車輛服務，將逐漸替換車隊的過程之目標式以最大化初期替換車隊的效益，同時考慮預算限制、車輛路徑問題下，達到最佳化車隊大小、組合。車隊的生命週期及車隊汰換時間概念如圖 2 所示，而為了計算替換車隊的總淨利，此研究提出 New Life Additional Benefit-Cost analysis(NLABC)計算新公車的整個生命週期。此方法計算汰換或新購入的公車整個生命週期的成本，藉由計算外部成本作為效益，與營運成本、殘值、購車成本等進行相減得出替換車隊的總效益，並考慮四種能源之公車(電動公車、壓縮天然氣公車、混合動力公車、柴油公車)建立數學模式以達到替換車隊後的混合車隊管理。由於建立出來的數學模型為非線性規劃且又是整數問題，為了使模型可得到全域解，因此進行非線性限制式線性化的過程，並提出兩階段解決方案程序(two-step solution procedure)藉由刪除不合理或是縮減變數數值範圍等方式簡化數量過多的決策變數及限制式，再進行求解。此外還額外提出多期間方法(multi-period approach)，將一天時間做切割，每天的服務趟次依據行駛範圍不同切成多個時段服務然後充電，即可藉由切出來的服務時段

得知充電時間。此研究針對香港作為研究實測地區，引入實際資料(兩條路線)外並做情境分析、敏感度分析(包含公車調度問題、路線問題)，探討不同因素下對外部成本、總效益等與車隊組成相關的變化。

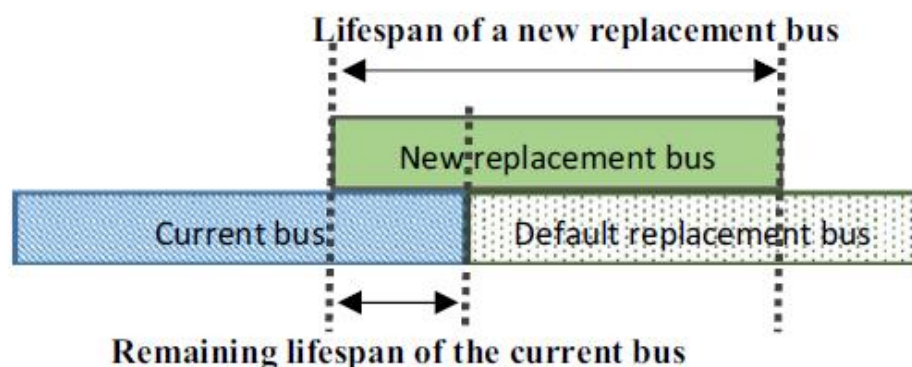


圖 2 生命週期及車隊汰換時間概念圖

資料來源：Li et al. (2018)

Ercan et al. (2015)提出不同替代能源的選擇下，最佳化公車車隊的生命週期評估研究。考慮駕駛環境不同，列出三個地區的駕駛環境作為參數(曼哈頓、商業中心、奧蘭治地區)，使用多目標線性規劃的方式，以六種不同能源的車型(柴油、混合動力、電動、生質能源、壓縮天然氣、液化天然氣)為決策變數，滿足最小化生命週期成本、二氧化碳排放量、排放有害物質造成空汙的相關健康及環境損害成本三個目標，再給予不同權重做情境分析，將三個目標式最大化、整體最小化的模式最小最大化(MINIMAX)，找到車隊組合最佳化。此文獻也整理各車種生命週期相關資料，如上游生產階段對環境造成的影響、在生命週期營運期間的成本項等。結果顯示最佳車隊組合不會超過三種類型的車輛，且電動及混合動力佔多數，推測是因為考量建設成本及維修壓力，因此車種無法多元化。此外，電動公車的碳排及健康損害成本低，但初期成本高，而混合動力的生命週期成本相較之下較有優勢，兩者的優勢可依據目標權重的不同作互補的效果。此外，亦分析生命週期成本及碳排間的關係，可看出兩者呈反向關係，減少成本使對環境友善的車輛也隨之減少，因此提高對環境的損害，反之亦然。

2.3 小結

綜合上述文獻，車輛的配置與成本項目有很大的關係，如何在有限的資源限制下達成車輛組合最佳化是一大研究課題，且需滿足顧客的服務需求是客運業的本質。上述提到車輛配置主要是藉由汰換現有車隊或是購入綠能車輛的方式達成車隊佈署，車種依不同文獻有分成換成電動公車或是其他替代能源車種的混合車隊。依據每篇文獻欲探討的因素不同導致限制條件有所不同，考量限制及欲研究之因素發展模型建構後，

再進行車輛配置。上述文獻的求解方式都不一樣，主要分成採用演算法求解、建置數學模式最佳化、進行模擬分析測試，在主要研究方法求解後，會針對不同影響因素做分析，如營運特性(車輛、班次)、路線特性(都市或郊區等駕駛環境)，進行情境分析或是敏感度分析，期望藉由這些分析探討不同因素對目標式之影響關係、因素間的變動關係及對電動車隊配置決策的影響，能更貼近真實情境。

多數研究將電動公車車輛配置問題發展成模型以各方法求解，再實地用於各地區解決該的電動公車營運問題，使業者在營運規劃時能依據自身所需考量之因素做有效的決策。然而在上述電動公車文獻回顧中有關車輛配置之參考文獻發現一些缺漏之處：

1. 未有文獻考量業者因應政策面所提出之年限汰換壓力，提供其相對應的解決方案作參考。
2. 未單純以業者角度思考於政策全面電動化前，在現有車隊年限到期之情況下可能採取之車輛汰換措施。
3. 對於電動車輛尚未普及的地區未考慮供應商之產能問題。

由前述的電動車隊規模相關文獻可知，雖然對於替代能源的車輛配置的研究已有很多，但尚未有相關文獻考量業者因應政策所提出之年限汰換產生的壓力。由於台灣電動公車之普及度不高，政府為順應環保意識提出市區公車電動化之政策，這是與國外營運情況相異之處，多數研究僅考慮汰換車隊之年分或是車輛配置及組合模式，但並無納入此方面的營運情境。因此，本研究欲考慮台灣政策下之營運環境，將政策年限以目標年之概念引入車隊替換模式中，建構一電動公車替換模型。

上述所提台灣的電動公車普及度並不高，而在全面電動化之期限到之前，業者對現有車輛年限快到期會採取之替換方法是個需納入考量的因素。以業者的角度普遍認為柴油公車較有利於營運規劃：以排程角度會認為更換成柴油車並不需要配合服務範圍之限制而調整車隊大小；以購車成本會認為柴油公車價格較電動公車低，節省車隊成本；以營運成本來看，維修、電池替換、充電設置等成本一併考慮至電動公車之營運成本，電動公車的每單位營運成本較柴油公車高。因此，業者在市區公車全面電動化之前，對於現有較老舊之車輛於政策年限將至前會選擇替換一次或兩次、替換之車輛類型如何是業者需思考的車隊汰舊換新策略，這是現有文獻尚未考慮之因素。是故，本研究因應政策下之台灣特有的營運環境，欲建構兩次替換車隊之模式，以供台灣客運業者做決策時之參考。

在進行車輛汰換規劃時，多數文獻著重於外部成本、營運等成本項之計算，並未考慮客運業者在資源有限的情況下應調整之車隊配置。業者在汰換車輛時，須考慮現有

車輛車齡不同、政策目標年限的長短，選擇不同的替換車輛策略，而對於電動公車尚未普及的地區外在供給因素可能是影響車輛配置上的重要原因之一。電動公車不僅購車成本較高，數量也較柴油公車少，但鮮少有研究考量車輛製造商提供電動公車供應量之因素，因此對於供應商資源有限導致供應量限制的問題應納入模式一併參考，以業者的立場考慮成本項外之影響車輛更換之要素，能較全面提供車輛汰換之建議。

第三章 數學模式構建

根據上一章節整理電動車隊規模相關文獻之內容，本研究欲建立一套考慮業者營運規劃的電動車輛汰換模式。目前未有相關文獻考量業者因應政策面之年限汰換的壓力、車輛製造廠商的供應量限制等外在因素、根據現有車輛老舊程度等營運策略因應政策重新作調整規劃，為業者提供替換車輛策略，因此本研究欲針對上述缺口建立一套車輛汰換成電動公車模式。從文獻中選擇以計算車隊生命週期的研究方法做為主要參考文獻，並考慮車齡、以年為單位漸進式汰換原有車隊為概念加入目標年之限制條件，因此本研究採用 Li et al. (2018)提出的概念為基礎，延伸其漸進式汰換舊公車的模式，並探討供應量問題及目標年限的限制與車隊汰舊換新之最佳化模型的關係及影響。本章分為五個部分：第一部分先介紹目標年限的概念，並說明以目標年限區分不同情境下的汰換策略；第二部份介紹 Li et al. (2018)所提出以 New Life Additional Benefit-Cost analysis (NLABC)概念為架構之數學模型；第三部分為依據文獻的數學模型進行修改，建立可兩次車輛替換的模型；第四部份是為政策汰換年限壓力所提出的目標年情境下相關限制式；第五部份為考慮供應商的電動車供給量問題引入產能限制。

3.1 目標年限概念

根據研究目的提到，欲考慮業者因應政策面下的汰換壓力，本研究將加入目標年限的概念分不同情境作分析。業者在市區公車全面電動化之前，需要思考現有車輛的汰換年期於政策年限將至前會選擇替換次數、替換之類型如何，為因應政策下之台灣特有的營運環境，因此本研究欲以Li et al. (2018)的車隊配置模式為基礎，建構兩次替換車隊之模式，並加入目標年限於模型中以全面車輛電動化，達到政府所希望的目標。為了分析目標年限對車隊電動化策略的影響，將情形依據目標年限的落點分為：目標年落在第二次汰換之最後一輛車報廢後、第二次汰換最早可能換車時間至第二次汰換最晚可能換車時間前、第一次汰換之最後一輛車年限到至第二次汰換最早可能換車時間、落在第一次汰換期間，共四種，如圖 3 的標號所示。由於配合政策面，需於目標年公車全面電動化的限制，因此第二次替換之類型必須是電動車，第一次能源類型可選擇柴油或是電動，而根據目標年限的時間點分成四種不同情境，以樹狀圖(圖 4)表示可能出現的結果及營運年限。情境一是目標年限落在第二次汰換最晚可能換車時間後，由於假設第二次汰換已是電動類型，因此在目標年前一定公車全面電動化，第二次汰換時間不用更動。情境二是目標年落在第二次最早可能換車時間至第二次汰換最晚可能換車時間前，若是第一次替換為柴油車，則第二次汰換須於目標年前全面更換，因此第二次換車時間變成第二次最早可能換車時間到目標年前，須完成公車電動化；若第一次已經是電動類型，汰換時間維持正常報廢年限即可，汰換時間區間不變。情境三是第一次汰換之最後一輛車年限至第二次汰換最早可能換車時間，落在第一次替換與第二次替換時間段之間，需思考是否要進行二次替換，若是則需額外考慮

第一次車種是否為電動類型，第一次替換為電動類型則替換維持正常使用年限下再進行汰換，若否則須在第一次替換區間後到目標年前完成第二次車隊汰換並電動化；若不進行二次替換則第一次替換須提前車隊電動化，才符合政策所制定的目標。情境四則是落在第一次替換區間內，一次替換即可，不需進行第二次替換，而本研究主要是針對需二次替換的情境下找出車隊汰換組合，與一次替換模型之限制式較不一樣，因此情境四便不在本研究深入探討。

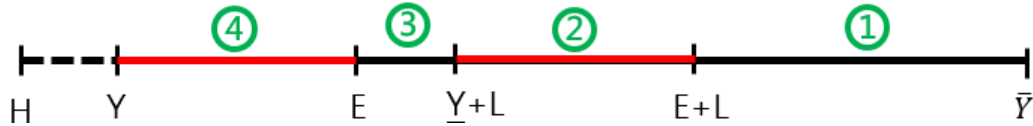


圖 3 目標年限示意圖

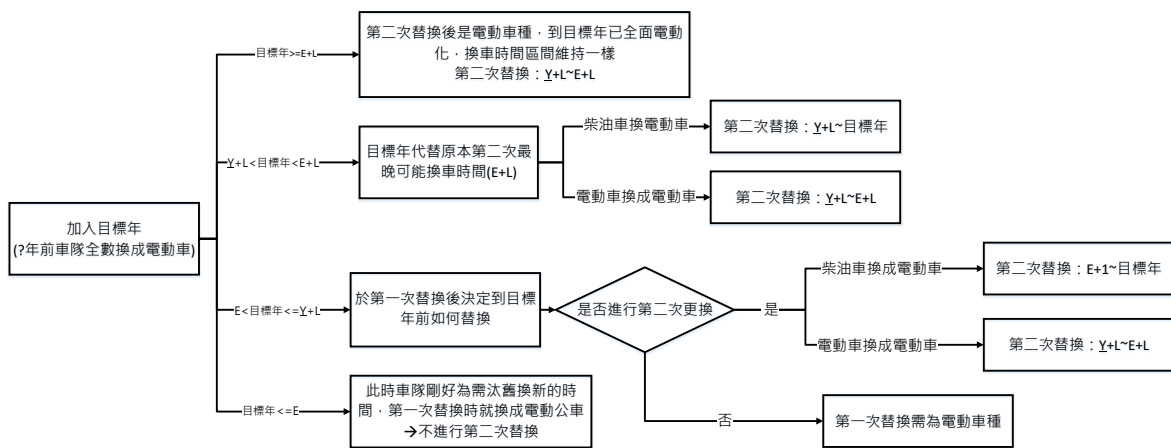


圖 4 目標年限樹狀圖

3.2 混合公車車隊管理問題(Mixed bus fleet management problem)

本研究將利用 Li et al. (2018)研究的車輛汰換模式做為架構，於本小節進行模型說明。以文獻提出的 NLABC 計算公車整個生命週期之成本，包括外部成本、營運成本、殘值、購車成本等最佳化替換車隊總效益，並於漸進式汰換車隊的過程對新舊車輛同時進行路徑規畫以滿足現有班次服務需求。該文獻更換的類型多元，考慮環境友善，將替代能源納入現有車種選擇，共有天然氣為燃料的公車、柴油車、電動車以及混合動力車輛四種類型，形成現有柴油車輛汰舊換新的車輛配置組合。以下將展示 Li et al.對車輛汰換問題建構之數學模式架構並解釋進行參數及變數說明。

1. 集合

O ：起點場站(origin depots)集合。

D ：迄點場站(destination depots)集合。

T ：站點(terminal)集合。

I ：現有車隊類型集合，為不同車型的柴油車。

I' ：可能購入的新車類型集合，包括柴油公車、混合動力公車、以天然氣為燃料之公車以及電動公車。

R ：公車路線(雙向)之集合。

S ：公車路線(單向)之集合。

2. 參數

$B_{in,i',Y}$ ：於計畫期間內第 Y 年的類型 i' 替換 i 型的第 n 台舊公車之總外部效益(金錢單位)。 $\forall i \in I, i' \in I'$ 。

$B_{i'n,Y}$ ：第 n 台額外購入之公車 i' 於計畫期間內第 Y 年的外部效益(金錢單位)。 $\forall i' \in I'$ 。

$C_{in,i',Y}$ ：於計畫期間內第 Y 年的類型 i' 替換 i 型的第 n 台舊公車之總成本(金錢單位)。 $\forall i \in I, i' \in I'$ 。

$C_{i'n,Y}$ ：第 n 台額外購入公車 i' 於計畫期間內第 Y 年的總成本(金錢單位)。 $\forall i' \in I'$ 。

C_i^{jk} ： i 型公車從 j 點到 k 點的單位行駛距離的營運成本(金錢單位/距離單位)。 $\forall i \in I, j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

$C_{i'}^{jk}$ ： i' 型公車從 j 點到 k 點的單位行駛距離的營運成本(金錢單位/距離單位)。 $\forall i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

E_i^{jk} ： i 型公車從 j 點到 k 點的單位行駛距離的車輛排放汙染之外部成本(金錢單位/距離單位)。 $\forall i \in I, j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

$E_{i'}^{jk}$ ： i' 型公車從 j 點到 k 點的單位行駛距離的車輛排放汙染之外部成本(金錢單位/距離單位)。 $\forall i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

H_i ：原有車輛(i 型公車)的購車年份。 $\forall i \in I$ 。

i'' ：於原本汰換車輛方案中欲替換現有車隊的預設類型。 $\forall i'' \in I'$ 中的柴油車。

L_i ： i 型公車的使用年限。 $\forall i \in I \cup I'$ 。

F_i ： i 型公車的車隊規模。 $\forall i \in I$ 。

l^{jk} ：從 j 點到 k 點的行駛距離(距離單位)。 $\forall j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

m ：於消除子迴圈(sub-tour)限制式中需要消除的路線參數。

M ：總預算(金錢單位)。

M_Y ：年度預算(金錢單位)。

P_i ：採購 i 類型公車的購車成本(金錢單位)。 $\forall i \in I$ 。

$P_{i'}$ ：採購 i' 類型公車的購車成本(金錢單位)。 $\forall i' \in I'$ 。

t^{jk} ：從 j 點到 k 點的旅行時間(時間單位)。 $\forall j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

U ：非常大的正數。

x_{in}^{jk} ：現有車隊(類型 i 公車)第 n 台公車從 j 點到 k 點的每日行駛趟次數。 $\forall i \in I, j \in O \cup T, k \in T \cup D$ 。

$\underline{Y}$ ：規劃期開始的一年。

$\bar{Y}$ ：規劃期結束的一年，當最後一輛替換公車到達預定退休年份。

ψ_i ：類型*i*之公車每天可運行的最長時間(時間單位)。 $\forall i \in I$ 。

$\psi_{i'}$ ：類型*i'*之公車每天可運行的最長時間(時間單位)。 $\forall i' \in I'$ 。

Φ_i ：充滿燃料的*i*型公車可運行的最大距離(距離單位)。 $\forall i \in I$ 。

$\Phi_{i'}$ ：充滿燃料的*i'*型公車可運行的最大距離(距離單位)。 $\forall i' \in I'$ 。

E ：現有車隊中的最新的車輛最晚可能需更換車輛的時間。

α ：折舊率。

β ：通貨膨脹。

δ_i ：*i*型公車補充燃料的時間(時間單位)。 $\forall i \in I$ 。

$\delta_{i'}$ ：*i'*型公車補充燃料的時間(時間單位)。 $\forall i' \in I'$ 。

γ ：利率。

3. 決策變數

$u_{in,i',Y}^{jk}$ ：在*Y*年將第*n*台公車類型*i*替換成類型*i'*，且該車服務從*j*點到*k*點的趟次數。 $\forall i \in I, i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D, n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。

$w_{i'n,Y}^{jk}$ ：在計畫期間*Y*年額外購入第*n*台類型*i'*，且該車服務從*j*點到*k*點的趟次數。 $\forall i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D, n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。

$N_{in,i',Y}$ ：類型*i*的第*n*輛舊公車於當前年份*Y*中是否被替換為類型*i'*的新公車；是為1，否為0。 $\forall i \in I, i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。

$N_{i'n,Y}$ ：在計畫期間*Y*年是否購入類型*i'*的第*n*個額外新公車；是為1，否為0。 $\forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。

4. 數學模型

$$\max_{\substack{u_{in,i',Y}^{jk}, w_{i'n,Y}^{jk} \\ N_{in,i',Y}, N_{i'n,Y}}} z = \sum_{Y=\underline{Y}}^{\bar{Y}} \left[\sum_{i \in I, i' \in I', n} (B_{in,i',Y} - C_{in,i',Y}) N_{in,i',Y} + \sum_{i' \in I', n} (B_{i'n,Y} - C_{i'n,Y}) N_{i'n,Y} \right] \quad (1)$$

$$B_{in,i',Y} = \sum_Y^{H_i+L_i-1} \frac{365 \sum_{j,k} E_i^{jk} l^{jk} x_{in}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \sum_{H_i+L_i}^{Y+L_{i'}-1} \frac{365 \sum_{j,k} E_{i'}^{jk} l^{jk} x_{in}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} - \sum_Y^{Y+L_{i'}-1} \frac{365 \sum_{j,k} E_{i'}^{jk} l^{jk} u_{in,i',Y}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}}, \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (2)$$

$$B_{i'n,Y} = - \sum_Y^{Y+L_{i'}-1} \frac{365 \sum_{j,k} E_{i'}^{jk} l^{jk} w_{i'n,Y}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}}, \forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (3)$$

$$C_{in,i',Y} = \sum_Y^{Y+L_{i'}-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_{i'}^{jk} l^{jk} u_{in,i',Y}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} - \left[\sum_Y^{H_i+L_i-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_i^{jk} l^{jk} x_{in}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \right.$$

$$\sum_{H_i+L_i}^{Y+L_{i'}-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_{i',n}^{jk} l^{jk} x_{in}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \frac{P_i(1-\alpha)^{(Y-H_i)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'} - \frac{(1+\beta)^{(H_i+L_i-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(H_i+L_i-\underline{Y})}} P_{i''}, \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', i'' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (4)$$

$$C_{i'n,Y} = \sum_Y^{Y+L_{i'}-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_{i',n}^{jk} l^{jk} w_{i'n,Y}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'}, \forall i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (5)$$

$$\gamma \geq 0 \quad (6)$$

目標式(1)為與正常使用年限下汰換的車輛相比的最大化總效益，由舊車換新車及購買新車的各項成本組成，包含外部成本、營運成本、汰換舊車的折舊以及正常使用年限下舊車需報廢後購入新車與比報廢年限早購車之價差，以複利計算方式，將計畫起始年做為基年，得出以年為單位的期數，最後統一未來的成本換算成現值，於限制式(2)~(5)詳細列出。舊換新車的效益(2)為舊車於報廢前剩餘生命週期造成的外部成本，加上正常使用至報廢年限後進行車輛汰換，以公司原預計更換的類型（柴油）服務班次造成的外部成本，最後減去於 y 年更新車輛的生命週期造成的外部成本，這三項外部成本也是代表舊車換新車的外部成本乘上負號做為效益。此效益主要是計算外部成本，以 y 年換車與正常使用年限後報廢及使用舊車的效益相比，如圖 5 所示，計算比原預定現有車輛年限到需報廢後購車的時間點早汰換車輛是否較有效益。額外購買新車的效益於限制式(3)所示，計算額外新增車輛至現有車隊的外部成本，再乘上負號做為效益。(4)為舊換新車的成本，包含營運成本、分解殘值損失、正常年限到報廢車輛時購入新車與提早購入車輛的價差。營運成本由距離、班次及單位營運成本組成，同樣為圖 5 的概念，計算 y 年更新車輛的營運成本比表定正常使用年限下換車的營運成本之差異；分解殘值損失的計算為 y 年換車時該車的殘值因汰舊換新而被分解，形成成本；購車時間的價差則是與原本車輛報廢後本該購入車子的成本做比較，會因為通貨膨脹及利率使成本有差。(5)則為額外購入新車成本，由購入之新增車輛之營運成本及購車成本組成。

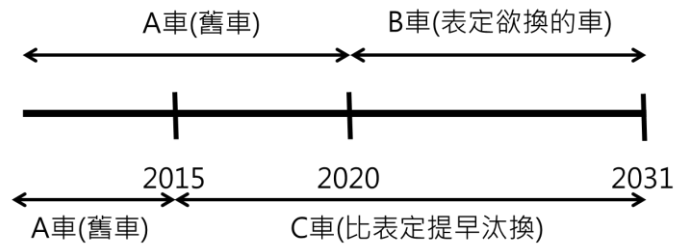


圖 5 舊車換新車利益計算示意圖

s.t.

$$\sum_{j \in O \cup T} u_{in,i',Y}^{jk} = \sum_{p \in T \cup D} u_{in,i',Y}^{kp}, \forall i \in I, n, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], k \in T \quad (7)$$

$$\sum_{j \in O \cup T} w_{i'n,Y}^{jk} = \sum_{p \in T \cup D} w_{i'n,Y}^{kp}, \forall i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], k \in T \quad (8)$$

$$\sum_{k \in T} u_{in,i',Y}^{ok} \geq \frac{1}{U} \sum_{(j,k) \in S} u_{in,i',Y}^{jk}, \forall i \in I, n, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (9)$$

$$\sum_{k \in T} w_{i'n,Y}^{ok} \geq \frac{1}{U} \sum_{(j,k) \in S} w_{i'n,Y}^{jk}, \forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (10)$$

$$\sum_{k \in T} u_{in,i',Y}^{ok} \leq 1, \forall i \in I, n, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (11)$$

$$\sum_{k \in T} w_{i'n,Y}^{ok} \leq 1, \forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (12)$$

$$\sum_{Y=\underline{Y}}^{H_i+L_i} \sum_{i' \in I'} N_{in,i',Y} = 1, \forall i \in I, n \quad (13)$$

$$\sum_{Y=\underline{Y}}^{\bar{Y}} \sum_{n,i' \in I'} N_{in,i',Y} = F_i, \forall i \in I \quad (14)$$

$$\sum_{\underline{Y}}^Y N_{in,i',Y} = \sum_{k \in T} u_{in,i',Y}^{ok}, \forall i \in I, i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, E], o \in O \quad (15)$$

$$\sum_{\underline{Y}}^Y N_{i'n,Y} = \sum_{k \in T} w_{i'n,Y}^{ok}, \forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, E], o \in O \quad (16)$$

限制式功能相同的會分成舊換新車及額外購入車輛兩種決策變數。限制式(7)、(8)為舊換新車及額外購入車輛之進入該站點班次等於由該站點出來班次。(9)~(12)確保車子從場站出發，且一天發車一次。車輛限制的部分，限制式(13)為在車輛生命週期中，舊車換新車只能換一次；(14)規定舊換新車之車輛數需與原車隊大小相同；(15)、(16)則是限制只有在舊車被汰換掉時，才可以指派新車。

$$\sum_{Y_s=\underline{Y}}^E u_{in,i',E}^{jk} N_{in,i',Y_s} \leq u_{in,i',Y}^{jk}, \forall i \in I, i' \in I', n, j \in T, k \in T, Y \in [E+1, \underline{Y} + L_{i'} - 1] \quad (17)$$

$$\sum_{Y_s=Y-L_{i'}+1}^E u_{in,i',E}^{jk} N_{in,i',Y_s} \leq u_{in,i',Y}^{jk}, \forall i \in I, i' \in I', n, j \in T, k \in T, Y \in [\underline{Y} + L_{i'}, E + L_{i'} - 1] \quad (18)$$

$$\sum_{Y_k=\underline{Y}}^E w_{i'n,E}^{jk} N_{i'n,Y_k} \leq w_{i'n,Y}^{jk}, \forall i' \in I', n, j \in T, k \in T, Y \in [E+1, \underline{Y} + L_{i'} - 1] \quad (19)$$

$$\sum_{Y_k=Y-L_{i'}+1}^E w_{i'n,E}^{jk} N_{i'n,Y_k} \leq w_{i'n,Y}^{jk}, \forall i' \in I', n, j \in T, k \in T, Y \in [\underline{Y} + L_{i'}, E + L_{i'} - 1] \quad (20)$$

該文獻假設現有車隊購車年份最新一台車正常汰換年份為E年，E年前經歷車輛汰換會得出新班次，而E年後已汰換的新車隊服務班次將不變直到車輛再度被汰換。(17)、(19)為E年後到第一台可能換車的年份前，表示仍在使用的舊車，路線趟次數維持在E年時的趟次數。(18)、(20)則是依據汰換舊車的年份或購入新車的年份決定新車使用與否及其班次數。

$$\sum_{j,k} t^{jk} u_{in,i',Y}^{jk} + \frac{\sum_{j,k} l^{jk} u_{in,i',Y}^{jk}}{0.8\Phi_{i'}} \delta_{i'} \leq \Psi_{i'}, \forall i \in I, n, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (21)$$

$$\sum_{j,k} t^{jk} w_{i'n,Y}^{jk} + \frac{\sum_{j,k} l^{jk} w_{i'n,Y}^{jk}}{0.8\Phi_{i'}} \delta_{i'} \leq \Psi_{i'}, \forall n, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (22)$$

$$\sum_{i \in I, n, i' \in I'} u_{in,i',Y}^{jk} + \sum_{i' \in I', n} w_{i'n,Y}^{jk} \geq \sum_Y \sum_{i \in I, i' \in I', n} x_{in}^{jk} N_{in,i',Y}, \forall Y \in [\underline{Y}, E], j, k \in S \quad (23)$$

$$u_{in,i',Y}^{jk} + u_{in,i',Y}^{kj} \geq \sum_{p \in O \cup T | j} u_{in,i',Y}^{pk} + \sum_{p \in O \cup T | k} u_{in,i',Y}^{pj}, \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], (j, k) \in R \quad (24)$$

$$w_{i'n,Y}^{jk} + w_{i'n,Y}^{kj} \geq \sum_{p \in O \cup T | j} w_{i'n,Y}^{pk} + \sum_{p \in O \cup T | k} w_{i'n,Y}^{pj}, \forall i' \in I', n, \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], (j, k) \in R \quad (25)$$

文獻中限制式(21)、(22)為每天每車服務時間及補充能源時間(加油或充電)不可超過營運時間，0.8則是考慮先前的文獻資料：電動公車使用80%的電量，小於20%需要充電。(23)確保新車可以滿足舊車所有服務趟次。(24)、(25)為車輛若有拜訪某一路線之相關站點，至少有服務該路線趟次，藉由限定車輛服務路線引導其車輛路徑，以加快運算效率。

$$\sum_{p \in T \cup D | k} u_{in,i',Y}^{jp} + \sum_{p \in T \cup D | j} u_{in,i',Y}^{kp} \geq \frac{1}{U} (u_{in,i',Y}^{jk} + u_{in,i',Y}^{kj}), \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', (j, k) \in R, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (26)$$

$$\sum_{p \in T \cup D | k} w_{i'n,Y}^{jp} + \sum_{p \in T \cup D | j} w_{i'n,Y}^{kp} \geq \frac{1}{U} (w_{i'n,Y}^{jk} + w_{i'n,Y}^{kj}), \forall i' \in I', n, (j, k) \in R, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (27)$$

$$\sum_{a \in A, b \in R \cup D - A} \sum_{j_a \in T, j_b \in T \cup D} u_{in,i',Y}^{j_a j_b} \geq \frac{1}{U} \left(\sum_{a \neq b} \sum_{j_a, j_b \in T} u_{in,i',Y}^{j_a j_b} - (m-1) \right), \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], A \in P_{\geq 2}(R) \quad (28)$$

$$\sum_{a \in A, b \in R \cup D - A} \sum_{j_a \in T, j_b \in T \cup D} w_{i'n,Y}^{j_a j_b} \geq \frac{1}{U} \left(\sum_{a \neq b} \sum_{j_a, j_b \in T} w_{i'n,Y}^{j_a j_b} - (m-1) \right), \forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], A \in P_{\geq 2}(R) \quad (29)$$

$$\sum_{i \in I, n \in F_i, i' \in I'} \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'} - \frac{P_i(1-\alpha)^{(Y-H_i)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} \right] N_{in,i',Y} + \sum_{i' \in I', n} \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'} N_{i'n,Y} \right] \leq \frac{M_Y}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}}, \forall Y \in [\underline{Y}, E] \quad (30)$$

$$\sum_{Y=\underline{Y}}^E \left\{ \sum_{i \in I, n \in F_i, i' \in I'} \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'} - \frac{P_i(1-\alpha)^{(Y-H_i)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} \right] N_{in,i',Y} + \right.$$

$$\sum_{i' \in I', n} \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'} N_{i', n, Y} \right] \leq M \quad (31)$$

$$E = \max(H_i) + L_i \quad (32)$$

$$N_{in, i', Y} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] ,$$

$$N_{i', n, Y} \in \{0, 1\} \quad \forall n, i' \in I', \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (33)$$

$$u_{in, i', Y}^{jk} \in Z \quad \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D, \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] ,$$

$$w_{i', n, Y}^{jk} \in Z \quad \forall n, i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D, \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (34)$$

限制式(26)~(29)為避免由規畫路徑中會出現子迴圈(sub-tour)的問題。公車營運需考慮由場站出發，連結至一條或多條路線的站點，再返回場站，子迴圈的問題則是起始或結束的站點並非起始場站。(26)、(27)為避免在同一路線，沒有連結到場站或其他路線的站點；(28)、(29)為避免多條路徑產生子迴圈，計算A集合中路線的轉換路線班次。(30)、(31)分別為汰換成本及購車成本不能超過每年預算及整體預算。(31)為定義E為現有車隊最後一台車汰換的年份。(33)、(34)為定義決策變數的數值範圍及類型。

$$Z_{in, i', Y} = \sum_k u_{in, i', E}^{ok} * N_{in, i', Y}$$

$$y_{i', n, Y} = \sum_k w_{i', n, E}^{ok} * N_{i', n, Y}$$

$$Z_{in, i', Y} - \sum_k u_{in, i', E}^{ok} \leq 0 \quad (35)$$

$$Z_{in, i', Y} - UN_{in, i', Y} \leq 0 \quad (36)$$

$$U(N_{in, i', Y} - 1) - z_{in, i', Y} + \sum_k u_{in, i', E}^{ok} \leq 0 \quad (37)$$

$$y_{i', n, Y} - \sum_k w_{i', n, E}^{ok} \leq 0 \quad (38)$$

$$y_{i', n, Y} - UN_{i', n, Y} \leq 0 \quad (39)$$

$$U(N_{i', n, Y} - 1) - y_{i', n, Y} + \sum_k w_{i', n, E}^{ok} \leq 0 \quad (40)$$

由於此數學模型為非線性規劃且又是整數問題，為了可得到全域解，此研究利用限制式(15)~(20)的假設，得出無論是舊換新車或是額外購入新車的班次數只會在 $(y \sim y + L_i - 1)$ 有值，可簡化目標式，對於新車與班次相關成本項不須再乘以是否於y年替換或購入新車的二元變數並累加 $(y \sim y + L_i - 1)$ 下的成本，僅需將計畫起始至結束下，有服務的班次數造成的外部成本及營運成本加總即可，避免原目標式中二元變數與決策變數相乘，使模型非線性。此外，再加入限制式(35)~(40)，z為第n台車換車期間最後一年由場站出發的班次加總乘以是否y年換車的二元變數，將整數與二元變數相乘轉成整數變數，將(17)~(20)非線性限制式線性化。限制式(35)確保z會小於等於該輛車在換車期間最後一年從場站出發的班次；限制式(36)中，若N=1會使限制式(35)無作用，限制式(37)則是確保z大於等於該輛車在換車期間最後一年從場站出發的班次，與限制式(35)搭配則是使z等於換車期間最後一年從場站出發的班次；當N=0時，限制式(36)使z小於等於0，(37)使z大於等於極大負值，

而 z 本身為大於等於0的整數，因此整合起來結果為 z 等於0。同理(38)~(40)為一樣的作用，只是決策變數為額外購車的趟次。統整(35)~(40)將(17)~(20)的二次限制式線性化，將問題轉成整數線性規劃。而此模型的變數多達數千個，為了提高求解效率，該文獻提出兩步驟求解程序(two-step solution procedure)。步驟1為減少決策變數及限制式，像是路線距離設上限以刪除不合理的節線、利用縮減年限縮減變數等作法；步驟2為針對混合公車車隊管理(MBFM)的數學模型進行求解。

3.3 兩次車輛替換模型

根據上一小節解釋的數學模式，本研究將利用該車隊規模配置模式做為架構，修改以建立可替換兩次的最小化營運成本車輛汰換模式，其中第二次替換主要是沿用第一次替換的概念進行部分修改。由於文獻中僅執行替換一次的車輛配置，且不限定替換後的類型須為綠能動力，為因應台灣現況發展，考慮業者營運角度及成本項，如何依據現有車隊之報廢年限到期時間於車輛全面電動化前做相關車輛汰換措施亦是業者關心的問題。以業者角度，對於車輛替換方案未必會選擇僅替換一次的車輛配置，業者於規定前公車全面電動化即可，思考車隊電動化政策前，如何將現有車隊於年限到期前採取可能之車輛汰換措施，因此本研究將以 Li et al. (2018)的車隊配置模式為基礎，建立可替換兩次的車輛組合模式，並限定最後一次替換須換成電動能源之車輛以全面車輛電動化，達到政府所希望的目標。對於本研究欲探討之問題進行問題描述：

1. 單場站、多路線：將問題範圍之界定與 Li et al. (2018)相同，問題規模為單場站、多條公車路線。
2. 每條路線為雙向，起迄兩個站點：每條路線以起迄兩站點標示，考慮雙向服務路線上之乘客。
3. 柴油車替換至電動車的車輛配置組合：Li et al. (2018) 的車隊配置模式中考慮更換的類型多元，如天然氣為燃料的公車、柴油車、電動車等，但考慮台灣大眾運輸能源使用的現況，綠能方面還是以電動為動力較為普遍，因此本研究僅考慮柴油車替換至電動車的車輛配置組合。
4. 現有車隊於目標年前全面電動化：本研究加入車隊電動化之政策年限限制，提供業者可能之車輛汰換措施作為業者規劃時之參考依據。
5. 最小化汰換車隊成本：本研究是以業者角度為考量所設計之模型，原本的數學模型考量外部成本及營運成本做為目標式，由於外部成本不會計算在業者實際支付的成本項中，對於業者而言是較不關心的項目，因此本研究將目標式修正為最小化營運成本。

6. 供應量只考慮一家業者：本模型只考慮一家業者購入車隊，假設不考慮市場內業者對供應量的競爭及廠商對於業者供應量的分配問題。

界定問題範圍後，本研究在建構此模型時，對於許多可能影響因素建立了一些假設：

1. 第二次替換之類型需為電動公車：由於本研究有加入電動化政策之限制，本研究期望提供的汰換車輛措施能配合政府綠能運輸之政策，因此設定第二次替換後類型需更換成電動車。
2. 額外購入車輛為電動類型：若因車輛汰換後電動車的行駛範圍及營運時間有限，使營運班次不足而須額外購入車輛的情況下，為考量新增車輛不需要再更新成替代能源，因此假設額外購入的車輛需為電動車，滿足政府希望市區公車全面電動化的用意。
3. 電動公車價格未考慮政府補貼：假設業者購入電動公車尚未獲得政府相關補貼或是大量購入有價格優惠，本模型的電動公車價格參數採用原價進行替換模型求解。
4. 規劃期間服務範圍及規模不變：現有路線及班次在已知的情況下，假設於規劃期間現有路線未做調整，服務班次也假設不變，需求假設為固定。
5. 柴油及電動公車的使用年限相同：忽略因電動與柴油特性而使現實中可能兩者使用年限不同，假設兩者的車輛生命週期相同。
6. 假設單位營運成本固定：忽略車輛老化造成的營運成本上升問題，假設單位營運成本為固定常數，於規劃期間維持一樣。
7. 未限定充電站數量，假設可以隨時充電：本研究僅考慮車輛的充電時間、營運範圍等特性，假設電動公車沒電時可以隨時充電，並假設不限定充電站數量。

問題描述及假設建立後，為符合建構之模型所需，集合也需要進行修正，像是對替換之類型進行修正。集合意義修改前後的對照表如表 1 所示，由於原模型中考慮現有類型有不同，因此以集合 I 表示，並以 F_i 記錄其車隊規模，而本研究以台灣現況環境為考量，現有車隊的傳統能源僅有柴油，因此將集合 I 意思修改為不同購入年分的柴油車作為集合 I 中的元素。集合 I' 則是為車輛在集合 I 中的元素，即現有該車輛購車年份下的柴油車，及電動類型組成。集合修正的解說以表 2 作為範例解釋，假設 2012、2013 年

分別購入柴油車 3、4 輛，則此集合 I 有元素 1、2，作為 2012、2013 年的柴油類型。結合這三種集合解釋，現有類型設定為柴油車，在第一次更換的類型設定為考慮柴油及電動兩種，而第二次替換，也就是最終替換，的類型則依政策規定需為電動公車。

表 1 集合意義新增及修改對照表

原模型		修改後	
符號	意義	符號	意義
I	現有車隊類型集合，為柴油車，以不同車型代表不同柴油車隊。	I	以購入年份不同代表不同柴油車隊。
I'	可能購入的新車類型集合，包括柴油公車、混合動力公車、以天然氣為燃料之公車以及電動公車。	I'	第一次替換購入的新車類型集合，為購入年份不同的柴油公車以及電動公車。0 代表電動公車。

表 2 集合意義範例說明

現有購車年分	車隊大小	類型	集合 I 的元素	集合 I	集合 I'
2012	3	柴油	1	{1,2}	{1,0(電動車)}
2013	4	柴油	2		{2,0(電動車)}

車輛類型集合做了修正及新增，使參數也需做些調整，而依據第二次替換模式求解所需，避免第一、二次替換時的變數重複而導致求解產生問題，對舊換新及額外購入車輛的相關變數進行新增，因此本段落會以對照表的方式進行參變數修正及新增說明並解釋原因。變數的更動則是為了避免第一次替換即換成電動車，使得若第二次替換的變數只記錄第一次及第二次替換的車輛類型會記錄成相同的變數，導致代入限制式會有衝突，因此需記錄第二次替換時原本隸屬的車隊為何，所以舊換新的相關變數(是否替換車輛、趟次數)須另外新增變數，以記錄從原本車隊、第一次替換之類型、第二次替換成電動車。類似的情形同樣發生在額外購車的第二次替換模式中的趟次數，若用同一個變數，會因為第一次替換之額外購入車輛的年份晚而到第二次替換期間尚在營運時，因為觸發購車限制式導致買車時間不合理的現象，如圖 6 所示，假設 2014 年購入一台電動車，紅色線條表示假設於第一次替換後的車輛營運期間，照常理可營運 2014~2023 年，若使用與第一次替換相同趟次變數，會使 2020 年的趟次數有值，觸發第二次替換之購車限制式，需提早購車等式才成立，反而造成不合理的現象。由於在建立第二次替換模式是參考第一次替換的數學概念，因此很多功能一樣的限制式藉由更換年限及決策變數的方式重新套用，因此採用 Li et al. (2018) 模型的限制式，再進行模型擴增，而對於建立二次車輛替換模式修改限制式的部分會於後續段落進行詳細說明。

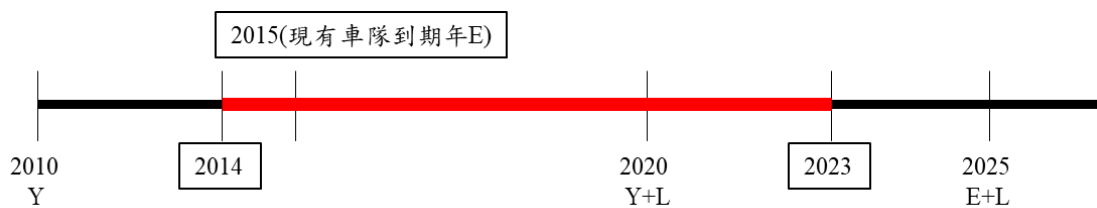


圖 6 相同變數觸發邏輯不合示意圖

1. 參數

新增及修正之參數

原模型		修改後	
符號	意義	符號	意義
$C_{i'n,Y}$	第n台額外購入公車 i' 於計畫期間內第Y年的總成本(金錢單位)。 $\forall i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。	$C_{0,n,Y}$	第n台額外購入電動公車(0)於計畫期間內第Y年的總成本(金錢單位)。 $\forall n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。
L_i	i型公車的使用年限。 $\forall i \in I \cup I'$ 。	L	公車的使用年限。
新增參數			
$C_{i,n,i',0,Y}$	於計畫期間內第Y年的第n台舊公車車隊i第一次替換成 i' 型，第二次替換成電動公車(0)的總成本(金錢單位)。 $\forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。		
$C2_{0,n,Y}$	第二次替換中，第n台額外購入電動車(0)於計畫期間內第Y年的總成本(金錢單位)。 $\forall n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。		

2. 修改及新增的決策變數

新增及修正之決策變數

原模型		修改後	
符號	意義	符號	意義
$N_{i'n,Y}$	在計畫期間Y年是否額外購入類型 i' 的第n台新公車；是為1，否為0。 $\forall i' \in I', n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。	$N_{0,n,Y}$	在計畫期間Y年是否額外購入第n台電動車(0)；是為1，否為0。 $\forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。
新增決策變數			
$u_{i,n,i',0,Y}^{jk}$	在計畫期間Y年，將車隊i第n台公車在第一次替換後換成 i' 型公車，第二次替換成電動公車(0)，於第二次替換後服務從j點到k點		

	的趟次數。 $\forall i \in I, i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D, n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。
$w2_{0,n,Y}^{jk}$	在計畫期間 Y 年，第二次替換期間額外購入第 n 電動公車(0)，服務從 j 點到 k 點的趟次數。 $\forall j \in O \cup T, k \in T \cup D, n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。
$N_{i,n,i',0,Y}$	車隊 i 的第 n 輛現有公車於計畫期間第 Y 年中是否第一次被替換為類型 i' 的公車，第二次被替換成電動公車(0)；是為 1，否為 0。 $\forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$ 。

3. 數學模式

修改目標式：兩次替換車隊總成本最佳化

$$\min_{\substack{u_{i,n,i',Y}^{jk}, w2_{0,n,Y}^{jk}, \\ N_{i,n,i',Y}, N_{0,n,Y}, \\ N_{i,n,i',0,Y}, u_{i,n,i',0,Y}^{jk}}} z = \sum_{Y=\underline{Y}}^{\bar{Y}} [\sum_{i \in I, i' \in I', n} (C_{i,n,i',Y}) N_{i,n,i',Y} + \sum_n (C_{0,n,Y}) N_{0,n,Y} +$$

$$\sum_{i' \in I', n} (C_{i,n,i',0,Y}) N_{i,n,i',0,Y} + \sum_n (C_{2,0,n,Y}) N_{0,n,Y}] \quad (41)$$

$$C_{i,n,i',0,Y} = \sum_{Y=\underline{Y}}^{Y+L-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_0^{jk} l^{jk} u_{i,n,i',0,Y}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} - \left[\sum_{Y=\underline{Y}}^{E+L-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_{i'}^{jk} l^{jk} x_{i,n}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \right. \\ \left. \sum_{E+L}^{Y+L+L-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_{i'}^{jk} l^{jk} x_{i,n}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} \right] + \frac{P_{i'}(1-\alpha)^{(Y-H_i-L)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} + \frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_0, \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (42)$$

$$C_{2,0,n,Y} = \sum_{Y=\underline{Y}}^{Y+L-1} \frac{365 \sum_{j,k} C_0^{jk} l^{jk} w2_{0,n,Y}^{jk}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}}, \forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (43)$$

車輛二次替換模型的目標式為(41)，為兩次替換車隊下與預定時間汰換車輛相比的最小化總成本。由於外部成本並未由業者實際支付，本研究以業者角度建立替換車輛之模式，因此將目標式修正成最小化車隊成本，分為第一次換車及第二次換車，同樣由舊車換新車及購買新車的各項成本組成。第一次換車的成本項與原模式相同，為(4)、(5)，而第二次換車的成本項則為(42)、(43)。舊換新車的成本(42)包含營運成本、分解殘值損失、第二次購車成本，其中營運成本為於 Y 年汰舊換新的營運成本減去現有車隊的營運成本。額外購入新車的成本(43)則只有營運成本及購車成本。

s.t.

$$\sum_{j \in O \cup T} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} = \sum_{p \in T \cup D} u_{i,n,i',0,Y}^{kp}, \forall i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], k \in T \quad (44)$$

$$\sum_{j \in O \cup T} w 2_{0,n,Y}^{jk} = \sum_{p \in T \cup D} w 2_{0,n,Y}^{kp}, \forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], k \in T \quad (45)$$

$$\sum_{k \in T} u_{in,i',0,Y}^{ok} \geq \frac{1}{U} \sum_{(j,k) \in S} u_{in,i',0,Y}^{jk}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (46)$$

$$\sum_{k \in T} w 2_{0,n,Y}^{ok} \geq \frac{1}{U} \sum_{(j,k) \in S} w 2_{0,n,Y}^{jk}, \forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (47)$$

$$\sum_{k \in T} u_{in,i',0,Y}^{ok} \leq 1, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (48)$$

$$\sum_{k \in T} w 2_{0,n,Y}^{ok} \leq 1, \forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], o \in O \quad (49)$$

$$\sum_{Y=\underline{Y}+L}^{H_i+L+L} N_{i,n,i',0,Y} = \sum_{Y=\underline{Y}}^{H_i+L} N_{i,n,i',Y}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i \quad (50)$$

$$\sum_{n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} N_{i,n,i',0,Y} = \sum_{n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} N_{i,n,i',Y}, \forall i \in I, i' \in I' \quad (51)$$

$$\sum_{\underline{Y}}^Y N_{i,n,i',0,Y} = \sum_k u_{i,n,i',0,Y}^{ok}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y} + L, \underline{Y} + L + L - 1], o \in O \quad (52)$$

$$\sum_{\underline{Y}}^{Y+L-1} N_{i,n,i',0,Y} = \sum_k u_{i,n,i',0,Y+L-1}^{ok}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y} + L, E + L], o \in O \quad (53)$$

$$\sum_{\underline{Y}+L}^Y N_{0,n,Y} = \sum_k w 2_{0,n,Y}^{ok}, \forall n, Y \in [\underline{Y} + L, \underline{Y} + L + L - 1], o \in O \quad (54)$$

$$\sum_{\underline{Y}}^{Y+L-1} N_{0,n,Y} = \sum_k w 2_{0,n,Y+L-1}^{ok}, \forall n, Y \in [\underline{Y} + L, E + L], o \in O \quad (55)$$

限制式功能相同的會分成舊換新車及額外購入車輛兩種決策變數的限制式，限制式大部分皆與第一次替換相同，而與原模式不同的部分為(51)~(55)。限制式(44)、(45)為舊換新車及額外購入車輛之流量守恒。(46)~(49)確保車子有從場站出發，且一天發車一次。車輛限制的部分，限制式(50)於原模型中為在車輛生命週期中，舊車換新車只能換一次，而第二次替換的變數下標有記錄第一次替換類型，因此需考慮第一次替換之類型，確保是同一輛車替換，等式改成該輛車的第二次替換數量需等於第一次替換數量。(51)與原式子不同之處為考慮第一次替換之類型，二次替換期間內舊換新車之車輛數需與前一次替換的車輛數相同。(52)~(55)則是由第一次替換的(15)、(16)做修改而來，目的是限制只有在舊車被汰換掉時，才可以指派新車，且不能超過營運年限。

$$\sum_{Y_s=\underline{Y}+L}^{E+L} u_{in,i',0,E+L}^{jk} N_{in,i',0,Y_s} \leq u_{in,i',0,Y}^{jk}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, j \in T, k \in T, Y \in [E + L + 1, \underline{Y} + L + L - 1] \quad (56)$$

$$\sum_{Y_s=\underline{Y}-L+1}^{E+L} u_{in,i',0,E+L}^{jk} N_{in,i',0,Y_s} \leq u_{in,i',0,Y}^{jk}, \forall i' \in I', n \in F_i, j \in T, k \in T, Y \in [\underline{Y} + L + L, E + L + L - 1] \quad (57)$$

$$\sum_{Y_k=\underline{Y}+L}^{E+L} w 2_{0,n,E+L}^{jk} N_{0,n,Y_k} \leq w 2_{0,n,Y}^{jk}, \forall n, j \in T, k \in T, Y \in [E+L+1, \underline{Y}+L+L-1] \quad (58)$$

$$\sum_{Y_k=Y-L+1}^{E+L} w 2_{0,n,E+L}^{jk} N_{0,n,Y_k} \leq w 2_{0,n,Y}^{jk}, \forall n, j \in T, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L+L, E+L+L-1] \quad (59)$$

沿用第一次替換的概念，現有車隊第一次替換後最後一台車汰換的年份為 $E+L$ 年。(56)、(58)為 $E+L$ 年後~第一台可能換車的年份前，表示仍在使用的車，路線趟次數維持在 $E+L$ 年時的趟次數。(57)、(59)則是依據汰換舊車的年份或購入新車的年份決定新車營運時間。

修改原模型限制式(23)：

$$\sum_{i \in I, n, i' \in I'} u_{i,n,i',Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} = \sum_{\underline{Y}}^Y \sum_{i \in I, i' \in I', n} x_{i,n}^{jk} N_{i,n,i',Y}, \forall Y \in [\underline{Y}, E], j, k \in S \quad (23)$$

$$\sum_{j,k} t^{jk} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + \frac{\sum_{j,k} l^{jk} u_{i,n,i',0,Y}^{jk}}{0.8\Phi_0} \delta_{i'} \leq \Psi_{i'}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (60)$$

$$\sum_{j,k} t^{jk} w_{0,n,Y}^{jk} + \frac{\sum_{j,k} l^{jk} w_{0,n,Y}^{jk}}{0.8\Phi_0} \delta_0 \leq \Psi_0, \forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], j \in O \cup T, k \in T \quad (61)$$

$$\sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} =$$

$$\sum_{Y_a=\underline{Y}+L}^Y \sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} x_{i,n}^{jk} N_{i,n,i',0,Y_a}, \forall Y \in [\underline{Y}+L, E+L], j, k \in S \quad (62)$$

$$\sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} =$$

$$\sum_{Y_a=\underline{Y}+L}^Y \sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} x_{i,n}^{jk} N_{i,n,i',0,Y_a-L}, \forall Y \in [\underline{Y}+L, E+L], j, k \in S \quad (63)$$

$$\sum_{i \in I, n \in F_i, i' \in I'} u_{i,n,i',Y}^{jk} + \sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} =$$

$$\sum_{i \in I, n \in F_i} x_{i,n}^{jk}, \forall Y \in [\underline{Y}+L, E+L], j, k \in S \quad (64)$$

$$u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + u_{i,n,i',0,Y}^{kj} \geq \sum_{p \in O \cup T | j} u_{i,n,i',0,Y}^{pk} + \sum_{p \in O \cup T | k} u_{i,n,i',0,Y}^{pj}, \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], (j, k) \in R \quad (65)$$

$$w_{0,n,Y}^{jk} + w_{0,n,Y}^{kj} \geq \sum_{p \in O \cup T | j} w_{0,n,Y}^{pk} + \sum_{p \in O \cup T | k} w_{0,n,Y}^{pj}, \forall n, \forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], (j, k) \in R \quad (66)$$

限制式(60)、(61)為每天每車服務時間及考慮補充能源時間(加油或充電)不可超過營運時間。(62)確保新車可以滿足舊車所有服務趟次，此式子與第一次替換相同功能的限制式相比多考慮兩次替換中額外購入車輛的營運趟次，因為第一次替換中額外購入的車輛可能尚在營運。原模型限制式(23)採用不等式的方式限制新車至少需滿足原班次服務，而以業者角度，在汰換車輛後希望能維持原有服務水準即可，因此本研究將不等式改為等式，並在第二次替換中新增限制式(63)、(64)，由於原本只有考慮替換車輛需滿足原服務班次，但第二次替換需考慮因年限到而無法繼續營運的車輛班次缺口，因此新增限制式(63)，若年限尚未到還不用替換則限制式(63)的不等式右側為 0，不會發揮限制作用；若年限到需報廢，則限制式(63)會考慮報廢車輛的班次數一併滿足；限制式(64)則是考慮第一次替換的結果，無論第二次如何替換，總營運班次均要滿足現有服務班次。(65)、(66)同第一次替換中限制式(24)、(25)的功能，目的是為了加快運算效率。

$$\sum_{p \in T \cup D|k} u_{i,n,i',0,Y}^{jp} + \sum_{p \in T \cup D|j} u_{i,n,i',0,Y}^{kp} \geq \frac{1}{U} (u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + u_{i,n,i',0,Y}^{kj}), \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, (j, k) \in R, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (67)$$

$$\sum_{p \in T \cup D|k} w_{0,n,Y}^{jp} + \sum_{p \in T \cup D|j} w_{0,n,Y}^{kp} \geq \frac{1}{U} (w_{0,n,Y}^{jk} + w_{0,n,Y}^{kj}), \forall n, (j, k) \in R, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (68)$$

$$\sum_{a \in A, b \in R \cup D - A} \sum_{j_a \in T, j_b \in T \cup D} u_{i,n,i',0,Y}^{j_a j_b} \geq \frac{1}{U} \left(\sum_{a \neq b} \sum_{j_a, j_b \in T} u_{i,n,i',0,Y}^{j_a j_b} - (m-1) \right), \forall i \in I, i' \in I', n \in F_i, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], A \in P_{\geq 2}(R) \quad (69)$$

$$\sum_{a \in A, b \in R \cup D - A} \sum_{j_a \in T, j_b \in T \cup D} w_{0,n,Y}^{j_a j_b} \geq \frac{1}{U} \left(\sum_{a \neq b} \sum_{j_a, j_b \in T} w_{0,n,Y}^{j_a j_b} - (m-1) \right), \forall n, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}], A \in P_{\geq 2}(R) \quad (70)$$

$$\sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} \left\{ \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_0 - \frac{P_{i'}(1-\alpha)^{(Y-H-L)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} \right] N_{i,n,i',0,Y} \right\} + \sum_n \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_0 N_{0,n,Y} \right] \leq \frac{M_Y}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}}, \forall Y \in [\underline{Y} + L, E + L] \quad (71)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{Y=\underline{Y}}^E \left\{ \sum_{i \in I, n \in F_i, i' \in I'} \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_{i'} - \frac{P_i(1-\alpha)^{(Y-H-L)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} \right] N_{i,n,i',Y} + \sum_n \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_0 N_{0,n,Y} \right] \right\} + \\ & \sum_{Y=\underline{Y}+L}^{E+L} \left\{ \sum_{i \in I, i' \in I', n \in F_i} \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_0 - \frac{P_{i'}(1-\alpha)^{(Y-H-L)}}{2(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} \right] N_{i,n,i',0,Y} + \right. \\ & \left. \sum_n \left[\frac{(1+\beta)^{(Y-\underline{Y})}}{(1+\gamma)^{(Y-\underline{Y})}} P_0 N_{0,n,Y} \right] \right\} \leq M \end{aligned} \quad (72)$$

限制式(67)~(70)為避免規畫路徑中會出現的趟次路徑子迴圈(sub-tour)問題。(67)、(68)為避免在同一路線，沒有連結到場站或其他站點；(69)、(70)為避免 m

條路徑的產生子迴圈。(71)、(72)分別為汰換成本及購車成本不能超過每年業者的資金預算及整體預算。

$$\sum_{k \in T, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} u_{i,n,i',Y}^{ok} \leq L, \forall i \in I, n \in F_i, o \in O, i' \in I' \quad (73)$$

$$\sum_{k \in T, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} w_{0,n,Y}^{ok} \leq L, \forall n, o \in O \quad (74)$$

$$\sum_{k \in T} u_{i,n,i',Y}^{ok} * \sum_{k \in T} u_{i,n,i',0,Y}^{ok} = 0, \forall i \in I, n \in F_i, o \in O, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (75)$$

$$\sum_{k \in T} w_{0,n,Y}^{ok} * \sum_{k \in T} w_{0,n,Y}^{ok} = 0, \forall n, o \in O, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (76)$$

$$\left(\frac{1}{U}\right) * \sum_{k \in T, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} u_{i,n,i',Y}^{ok} \leq \sum_{Y \in [\underline{Y}, E]} N_{i,n,i',Y}, \forall i \in I, n \in F_i, o \in O, i' \in I' \quad (77)$$

$$\left(\frac{1}{U}\right) * \sum_{k \in T, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} u_{i,n,i',0,Y}^{ok} \leq \sum_{Y \in [\underline{Y}+L, E+L]} N_{i,n,i',0,Y}, \forall i \in I, n \in F_i, o \in O, i' \in I' \quad (78)$$

$$\left(\frac{1}{U}\right) * \sum_{k \in T, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]} w_{0,n,Y}^{ok} \leq \sum_{Y \in [\underline{Y}, E]} N_{0,n,Y}, \forall n, o \in O \quad (79)$$

$$N_{i,n,i',0,Y} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (80)$$

$$u_{i,n,i',0,Y}^{jk}, w_{0,n,Y}^{jk} \in Z \quad \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I', j \in O \cup T, k \in T \cup D, Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \quad (81)$$

限制式(73)~(79)是新增加的限制式，主要是在處理兩次替換時的換車及營運邏輯問題，使第一次替換的車輛若年限未到能於第二次期間繼續營運，而不會有同一輛車營運班次重疊的問題。(73)、(74)為避免第一次替換超過營運年限還在使用該車輛。(75)、(76)為避免兩次替換期間的車輛重複營運，也就是同一車輛在Y年第二次替換有班次營運就不能出現第一次替換時的營運班次，兩者不能在同一年併存。(77)~(79)為補強原本模式中的觸發趟次限制式，原本限制式只規範何時買車就何時開始營運，而以此限制式規定第一次替換模式中，只要有營運班次就一定有替換買車。(80)、(81)為新增的決策變數值的範圍及定義。

$$R_{i,n,i',0,Y} = \sum_k u_{i,n,i',0,E+L}^{ok} * N_{i,n,i',0,Y} \\ y_{2,0,n,Y} = \sum_k w_{0,n,E+L}^{ok} * N_{0,n,Y} \\ R_{i,n,i',0,Y} - \sum_k u_{i,n,i',0,E+L}^{ok} \leq 0, \forall i \in I, n \in F_i, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (82)$$

$$R_{i,n,i',0,Y} - U N_{i,n,i',0,Y} \leq 0, \forall i \in I, n \in F_i, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (83)$$

$$U(N_{i,n,i',0,Y} - 1) - R_{i,n,i',0,Y} + \sum_k u_{i,n,i',0,E+L}^{ok} \leq 0, \forall i \in I, n \in F_i, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (84)$$

$$y_{2,0,n,Y} - \sum_k w_{0,n,E+L}^{ok} \leq 0, \forall n, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (85)$$

$$y_{2,0,n,Y} - U N_{0,n,Y} \leq 0, \forall n, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (86)$$

$$U(N_{0,n,Y} - 1) - y_{2,0,n,Y} + \sum_k w_{0,n,E+L}^{ok} \leq 0, \forall n, k \in T, Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (87)$$

同樣，加入限制式(82)~(87)將(56)~(59)有關趟次營運的非線性限制式線性化，將問題轉成整數線性規劃。規劃時先降低問題規模，像是藉由參數限制其可能路線，減少決策變數的規模，接著針對混合公車車隊管理(MBFM)的數學模型進行求解。此小節為建立二次車輛替換模式之說明，後續將介紹目標年限之概念及產能限制。

3.4 目標年限限制式

加入目標年，將各情境依照圖 4 目標年限樹狀圖及 3.1 小節相關說明，改變與汰換時間相關的限制式，而由於情境三可以不進行二次替換，因此須新增限制式及對原有限制式做些微變化，以符合本研究的模型設計邏輯。限制式(88)為可以只換一次車，但要在目標年是電動類型行駛的限制條件，若第二次替換二元變數等於 1，表示會汰換兩次車輛，第一次替換產生之車輛班次則不一定需使用電動類型服務；若第二次替換二元變數等於 0，也就是第二次替換沒有更換車輛，則第一次替換產生之車輛班次必須為電動類型服務，以符合於目標年全面電動化的目標。與其他情境不同之處在於情境三未必替換兩次，因此限制式(50)、(51)、(62)需進行調整。限制式(50)為在車輛生命週期中舊車換新車只能換一次，依據第二次替換變數的下標有記錄第一次替換類型，確保與第一次替換為同輛車，依第一次替換的類型不同分成(50-1)、(50-2)：若第一次替換後為柴油車，需做第二次替換，於車輛生命週期中舊換新車只能換一次，換車年份期間改為第一次最晚換車時間後一年(E+1)到目標年限(deadline)，限制式為等號；若第一次替換後為電動車，則未必有第二次替換，等號便改成小於等於的方式做表達。限制式(51)為第二次替換數量限制，同樣依據第一次替換類型有不同的限制條件，分成(51-1)、(51-2)：若第一次替換後為柴油車，則需做第二次替換，需於換車時間內第二次替換數量等於第一次替換數量；若第一次替換後為電動車，則未必有第二次替換，等號便改成小於等於。限制式(62)為需滿足現有服務班次，同樣依據第一次替換的類型不同分成(62-1)、(62-2)，若第一次換柴油車，則須遵守柴油車的第二次替換時間，為第一次最晚換車時間後一年(E+1)到目標年限(deadline)，於此期間內汰舊換新需滿足現有服務；若第一次換電車則依照正常汰換時間，為第二次最早開始換車時間(Y+L)至第二次最晚可能換車時間(E+L)，於此期間內的汰舊換新需滿足現有服務水準。

$$1 - \sum_{i' \in I', Y \in [E+1, \text{deadline}]} N_{i,n,i',0,Y} \leq \sum_{k \in T} u_{i,n,0,\text{deadline}}^{ok} \quad \forall i \in I, o \in O, n \in F_i \quad (88)$$

$$\sum_{E+1}^{\text{deadline}} N_{R_{i,n,i',0,Y}} = \sum_Y^E N_{i,n,i',Y} \quad \forall i \in I, n \in F_i, i' \in I' - 0 \quad (50-1)$$

$$\sum_{Y+L}^{E+L} N_{R_{i,n,0,0,Y}} \leq \sum_Y^E N_{i,n,0,Y} \quad \forall i \in I, n \in F_i \quad (50-2)$$

$$\sum_{n \in F_i, Y \in [Y, \bar{Y}]} N_{i,n,i',0,Y} = \sum_{n \in F_i, Y \in [Y, \bar{Y}]} N_{i,n,i',Y}, \quad \forall i \in I, i' \in I' - 0 \quad (51-1)$$

$$\sum_{n \in F_i, Y \in [Y, \bar{Y}]} N_{i,n,0,0,Y} \leq \sum_{n \in F_i, Y \in [Y, \bar{Y}]} N_{i,n,0,Y}, \quad \forall i \in I \quad (51-2)$$

$$\sum_{i' \in I', n \in F_i} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} = \sum_{Y=a=E+1}^Y \sum_{i \in I, i' \in I' - 0, n \in F_i} x_{i,n}^{jk} N_{i,n,i',0,Y} a, \quad \forall Y \in$$

$$[E+1, \text{deadline}], \quad jk \in S \quad (62-1)$$

$$\sum_{i' \in I', n \in F_i} u_{i,n,i',0,Y}^{jk} + \sum_n w_{0,n,Y}^{jk} = \sum_{Y \in \underline{Y}+L, E+L} \sum_{i \in I, n \in F_i} x_{i,n}^{jk} N_{i,n,0,0,Y}^{jk}, \forall Y \in [\underline{Y}+L, E+L], jk \in S \quad (62-2)$$

3.5 產量限制問題

在建置模式時，除了加入上述條件外，本研究尚參考製造商生產車輛的產能，增加電動車供應量的限制於此模式中。由於國內電動公車尚未普及，不僅車輛單價高，國內的製造商的供給量也有限，使得模式需考慮供應量方面的限制，才能更貼近真實情況。依據現況普及度，一般柴油公車的供給量對車輛供給上游較不構成困難，因此本研究僅限定電動車的供給量，得出限制式(89)、(90)，限制兩次替換不能超過每年電動車供給量。

ω ：一年所有車輛製造商的供給量。

$$\sum_{n \in F_i, i \in I, i' \in I'} N_{i,n,i',Y} + \sum_n N_{0,n,Y} \leq \omega \quad \forall Y \in [\underline{Y}, E] \quad (89)$$

$$\sum_{n \in F_i, i \in I, i' \in I'} N_{i,n,i',0,Y} + \sum_n N_{0,n,Y} \leq \omega \quad \forall Y \in [\underline{Y}+L, E+L] \quad (90)$$

3.6 小結

綜合前幾小節所述，本研究利用 Li et al. (2018)提出的車隊配置模式做為基礎，將限制式進行修改及新增，擴增模式，以建立替換兩次的車輛配置。除了原有車輛配置、營運班次及路線之規劃，尚提出目標年之概念，因應政策面向全面電動化的時間調整車輛配置。此外，亦參考車輛供應商之產能，根據現有所能供給的電動車車輛數納入模型，使業者在車輛配置上能做有效地安排。此模式期望能協助業者在因應政策及環保意識下，找到既能滿足服務需求又能順應社會環境要求的車隊電動化之可行方案，供業者做決策時之參考依據。後續章節將介紹欲使用的軟體求解此數學模型，並以此模式做小型範例測試，檢驗結果之合理性，之後擴大套用至較大規模範例，檢視成果並確認此模式之適用性。

第四章 案例分析

根據上一章所建立之數學模型進行範例測試與分析。將數學模型中提到的參數先進行設定，隨後代入模型進行最佳化原有車隊之車輛配置，考慮汰換車輛後滿足現有服務之規劃、供應商產能限制，並搭配目標年限概念的不同情境做分析，將在本章節透過範例測試進行解說及結果檢驗。在確認小型範例結果符合邏輯後，將擴大規模模擬真實情境分析，以測試模型的健全能力，是否能應用於真實情況以提供業者做為車隊營運規劃的參考方針。

4.1 範例測試

本研究先透過小型範例測試解說模型操作過程，並檢視結果合理性。模型執行前需先進行參數設定、路線營運範圍相關數值的設定，隨後利用 python 3.6.5 版本結合最佳化軟體 Gurobi 進行數學模式撰寫及規畫求解。Gurobi 是個最佳化求解工具，可對數學模型進行建構與求解，適用於線性規劃、二次項規劃、二次限制式規劃、混合整數線性規劃、混合整數二次項規劃、混合整數二次限制式規劃，適用本研究之問題，因此使用 Gurobi 作為求解工具。

4.1.1 參數設定

根據第三章有關數學模型的介紹，有關參數的部分可拆成營運相關參數、成本相關參數及路線範圍設定三個部分解說。營運相關參數內容包括車隊相關參數、年份設定、營運限制參數。小範例中假設僅有兩個車隊，分別有三、四台柴油車，能替換的車種有柴油及電動兩種能源，設定一個車隊為 2014 年購入 3 台，另一個為 2015 年購入 4 台，如表 3。柴油車及電動車的生命週期假設為 10 年，年限到需報廢，汰換成新車。此外，考慮上游廠商的產能，限制每年可供應的產量為 5 台電動車。

表 3 車隊相關參數設定

	原有類型 I	購車年份 H	現有車隊 F	第一次替換 類型集合 I'	第二次替換類 型集合 I_R'
車隊 1	柴油	2014	3	柴油、電動	電動
車隊 2	柴油	2015	4	柴油、電動	電動

年份參數設定包含規畫起始年到結束規劃及換車時間。執行車輛配置模型起始年為 2020 年，直到二次替換後的車輛營運結束，作為規畫的結束年，也就是現有車隊最晚換車時間(E)加上第二次替換後的車輛年限。最晚換車時間為現有車隊最晚購入的年份加上車輛年限，2025 年，往後推算可得第二次車隊最晚替換時間為 2035 年，加上可以營運的年限 10 年，因此可得結束規畫年為 2045 年。

表 4 年份參數設定

	起始年	第一次替換 最晚換車時間	第二次替換規劃 開始時間	第二次替換 最晚換車時間	結束年
規劃期間	2020	2025	2030	2035	2045

成本相關參數為營運成本相關項目，並考慮利率與折舊。參考文獻 Li et al. (2018) 所設定的參數，單位營運成本如表 5 所示。依照 Li et al. (2018) 文獻中所提，單位營運成本包含燃料成本、加油或充電站設置成本、電池及維修成本，購車成本則分為電動車及柴油車兩種價格。參考 Li et al. (2018) 文獻設定利率、通貨膨脹率、折舊率，分別為 5%、2%、16%。假設每年廠商的預算上限為 US\$7,500,000，供汰舊換新、額外購車及折舊成本使用。

表 5 成本參數設定

	營運成本 C (US\$/km)	購車成本 P (US\$)
柴油公車	1	300,000
電動公車	0.2	790,000

營運限制參數有最大營運範圍限制、加油時間設定、營運時間。考慮電動車的電池容量限制，以最大行駛距離顯示電動公車與柴油公車間營運特性的不同。這三個參數同樣參考 Li et al. (2018) 文獻，考慮電動公車服務範圍限制，限定電動車最大行駛範圍為 180 公里，每輛公車每日最大服務時間為 18 小時，每次加油或充電時間皆設定 30 分鐘。

表 6 營運限制參數

	每天最大行駛時間 ψ (小時)	最大行駛距離 ϕ (公里)	加油/充電時間 δ (分鐘)
柴油公車	18	無限制	30
電動公車	18	180	30

在進行數學模型求解的前置工作，除了有上述所提的營運參數設定，尚需考慮路線範圍等相關設定，包含路線、營運班次、站點的距離及時間等。因為先利用小範例進行測試，因此站點設置的規模較小，令場站為 O，站點為 1~4，每日車輛由場站出發，營運結束再回到場站，服務的路線為(1,2)、(3,4)，共兩條雙向公車路線。將站點的距離及時間列成表格，並以兩個車隊共七台車為基準，假設現有可行營運班次，提供求解過程的車輛配置有需滿足現有需求的基準。

表 7 站點距離矩陣

距離(km)	1	2	3	4
1	0	25	1	11
2	26	0	19	18

3	1	20	0	15
4	12	18	16	0

表 8 站點時間矩陣

時間(min)	1	2	3	4
1	0	75	3	66
2	78	0	60	54
3	3	60	0	45
4	30	54	45	0

表 9 現有營運班次數

車隊 \ 路線	(1,2)	(2,1)	(3,4)	(4,3)
車隊 1	9	14	15	15
車隊 2	13	18	12	16
總數	22	32	27	31

4.1.2 測試結果

將上述的參數代入數學模型中，利用 Gurobi 套件進行數學模式求解，得出的結果為需汰換車輛的年份、汰換後的類型及每年的路線營運班次。利用 python 3.6.5 的編碼環境，連結至 Gurobi 求解，由於此模型屬於混合整數線性規劃，因此適用 Gurobi 最佳化工具。由於模型較複雜，決策變數規模大，因此引入 Gurobi 中的收斂參數 MIPGAP 進行收斂，如(91)，達到條件即停止，本研究小範例取 0.05、大範例取 0.1 作為停止收斂的參數。此外，採用 Gurobi 參數 Timelimit 作為停止程式的執行，也就是設定停止時間門檻，避免收斂時間太長，未能於可接受時間內產生可行解，小範例取 1.5 天、大範例取 3 天。

$$\text{目標值較高邊界值} - \text{較低邊界值} < \text{MIPGap} * |\text{較高邊界值}| \quad (91)$$

得出的結果，目標值最佳化車隊總成本為 3,241,398.9，求得車輛配置解如表 10 所示。在每年預算上限及產能的限制下，得出符合限制式的車輛汰換組合，車輛汰換年分較分散，每年使用的電動車數量有符合供應量。以使用年限面向檢視此結果，有符合車輛於使用年限內可營運的邏輯，確認符合模型設計概念，並在 2020、2030 年額外購入電動車補足現有車隊電動化後之供給無法滿足需求的缺口。

表 10 求解結果-車輛汰換時間

車隊	購車 年分	第 n 台	第一次 舊換新類型	更換年份	第二次 舊換新類型	更換年份
車隊 1	2014	1		2024		2034
		2	柴油	2021	電動	2031
		3		2020		2030

車隊 2	2015	1	柴油	2025	電動	2035
		2		2025		2035
		3		2025		2035
		4		2020		2030
	額外新增車輛		電動 3 台	2020	電動 3 台	2030

由於結果產出每年營運路線之班次，因車輛汰換時間不同，使每年營運路線班次數不同，全數列出會過於冗長，因此僅以汰換車輛期間造成班次變動的年份做舉例，對照服務班次之要求檢試其合理性。結果顯示，第一次替換期間有符合替換車輛其班次缺口由新車補足的邏輯；第二次替換則需考慮年限到需報廢車輛其班次缺口及汰舊換新的缺口，需考慮的因素較第一次替換多，因此以圖示解說。以圖 7 來看，藍色框線為第一次替換後尚在營運的車輛班次數，紅色框線為第二次替換新加入的電動車班次數至少需滿足的服務班次，替換的車輛為第 0 車隊($i=0$)的第 3 台及第 i 車隊($i=1$)的第 4 台，第二次替換會有舊新車營運車輛同時並存的情形，也就是該年總班次數中既有舊車營運班次，同時也有汰舊換新的新車營運班次，將兩種班次數加總需維持原有服務水準，而結果顯示有達到原有班次數的限制，因此確認結果符合邏輯。

車隊班次數\路線	(1,2)	(2,1)	(3,4)	(4,3)	替換車輛數	路線\車隊班次	$i=0$	總數
$i=0$	9	14	15	15	-	(1,2)	3 3 3	9
$i=1$	13	18	12	16	-	(2,1)	4 4 6	14
原有總班次數	22	32	27	31	-	(3,4)	5 5 5	15
2020	7	12	8	9	2+3	(4,3)	5 5 5	15
2021	10	16	13	14	1	路線\車隊班次 $i=1$		
2024	13	20	18	19	1	(1,2)	3 3 3	4 13
2025	22	32	27	31	3	(2,1)	4 4 4	6 18
2030	15+7	20+12	19+8	22+9	2+3	(3,4)	3 3 3	3 12
2031	12+10	16+16	14+13	17+14	1	(4,3)	4 4 4	4 16
2034	9+13	12+20	9+18	12+19	1	尚在營運班次+新替換的班次		
2035	22	32	27	31	3			

圖 7 營運班次結果示意圖-以 8 年為例

4.1.3 情境分析

在 4.1.2 所展示的結果為正常情況下，由規畫起始年到規畫結束，得出的車輛配置及班次數，然而，若引入目標年的概念，會得出不一樣的汰換結果，於此小節進行說明。如前一章節所提到，目標年限落在不同位置會影響替換年限，若是目標年落在第二次替換期間後，替換年限維持不變，結果如同正常情形；若目標年小於第一次替換結束前，表示需要立即全面換成電動公車的時間過短，沒有必要進行二次替換。前者，為情境一，結果如 4.1.2 顯示，後者則因為本研究欲探討二次替換，與一次替換性質及限制式等較不一樣，因此不在此深入探討，所以情境分析是探討落在第二次汰換期間內以及第一次汰換期間後至第二次汰換期間第一輛車的年限到期之間，如圖 3 目

標年限示意圖所示的第二、三情境。假設情境二為目標年訂為 2031 年，情境三為目標年訂在 2030 年。

1. 情境二：目標年訂為 2031 年

若是訂在 2031 年，若第一次替換結果為柴油車，則業者須於第二次替換期間的結束年提前至目標年，也就是由原本第二次替換為 2030 年~2035 年改成 2030 年~2031 年，將目標年提前至第二次替換最晚可能換車時間之前，強制規定於目標年前全面電動化，得出表 11 結果。對照原本正常汰換情境的車輛汰換時間在 2035 年居多，但目標年比 2035 年早，因此汰換年分勢必會有所變動，檢視結果發現車輛汰換提早，移到 2020~2021 年、2030~2031 年汰換，符合目標年前汰換成電動車的規定，並於 2020、2030 年額外購入 3 台。目標值最佳化車隊汰換成本為 3,590,912.1，因為提前目標年使車輛提早進行汰換，與正常汰換年限規劃的原情境相比成本較高，多了約 35 萬。

表 11 目標年落於第一次替換結束後~第二次替換結束前之求解結果-車輛汰換時間

車隊	購車 年分	第 n 台	第一次 舊換新類型	更換年份	第二次 舊換新類型	更換年份
車隊 1	2014	1	柴油	2021	電動	2031
		2		2021		2031
		3		2020		2030
車隊 2	2015	1	柴油	2021	電動	2031
		2		2021		2031
		3		2021		2031
		4		2020		2030
額外新增車輛			電動 3 台	2020	電動 3 台	2030

2. 情境三：目標年訂在 2030 年

若是訂在 2030 年，表示目標年落在第一次汰換之最後一輛車年限至第二次汰換最早可能換車時間，由於在第二次替換時間段前，此時需考慮是否進行第二次替換，何種車輛汰換措施可以成本最小下，於目標年前進行車輛全面電動化，得出的結果如表 12 所示。目標值最佳化車隊汰換總成本為 863,161.4，提早於第二次汰換前更新完車隊，結果顯示藉由第一次替換期間就全面電動化以達到目標年前全數汰換完畢且更換為電動車。由於限制式僅規定若無第二次替換需在目標年是電動類型行駛，車輛傾向 2021 年更換，於 2030 年(目標年)達成電動化服務的目標，使計算營運成本的規劃時間比前兩個情境短，加上選擇第一次便全數汰換成電動車，少了一次購車成本，因此目標式較前兩個情境小。結果也顯示在產能限制下，會分散在不同年份汰換，對於車隊電動化後不足的供給也有提供額外購入電動車之措施。

表 12 目標年於第二次替換前之求解結果-車輛汰換時間

車隊	購車 年分	第 n 台	第一次 舊換新類型	更換年份
車隊 1	2014	1	電動	2021
		2	電動	2021
		3	電動	2024
車隊 2	2015	1	電動	2021
		2	電動	2021
		3	電動	2025
		4	電動	2025
額外新增車輛			電動 2 台	2024
			電動 1 台	2025

4.2 模擬分析

經過 4.1 的範例測試，了解模型的操作及檢驗結果合理性後，本小節進行擴大範例規模模擬真實資料進行分析。為了測試模型對現實生活中的應用及貢獻，將藉由模擬現實資料的方式測試，檢視是否為現實世界中可行的方案，可做為業者做決策時的參考依據。同樣使用 Gurobi 套件，以 Python3.6.5 的環境下撰寫程式碼並進行模型求解。以下會介紹參數的設定及求解結果，並進行目標年的情境分析。

4.2.1 參數設定

參數相關設定中，針對模擬公車營運資料作相關參數修改，分成營運參數、成本參數、範圍參數作討論。營運相關參數除了因擴大車隊規模作的參數修改，其餘不變，如表 13，車輛總數為 58 台，購入年份有 2012~2015 年。範圍參數中的路線資料擴大，為 4 條路線、雙向行駛，路線設計為以 2 為中心向外發散的路網，如圖 8 所示，其餘模擬資料的參數表於表 14、表 15 呈現。然而於模型求解中路線站點的名稱不能重複，若重複求解會出錯，因此設置虛擬點 3~5，虛擬點的距離及時間參數與點 2 相同，對照表如表 16。

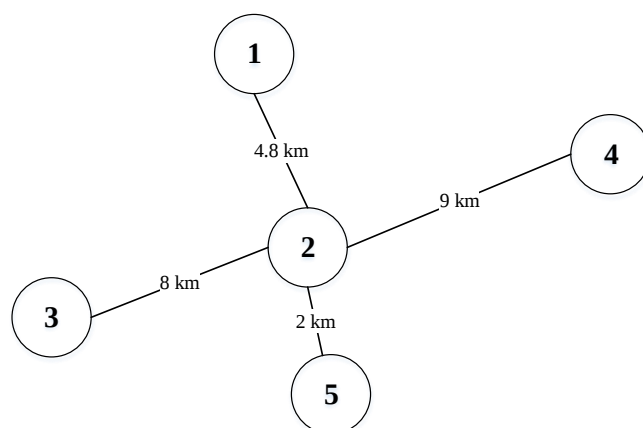


圖 8 模擬分析路線圖

表 13 模擬資料之車隊相關參數

	購車年份 H	現有車隊 F
車隊 1	2012	16
車隊 2	2013	13
車隊 3	2014	8
車隊 4	2015	21

表 14 模擬資料之站點距離矩陣

距離(km)	1	2	3	4	5
1	0	4.8	16	15	5
2	4.8	0	8	9	2
3	16	8	0	4	8
4	14	9	4	0	10
5	5	2	8	10	0

表 15 模擬資料之站點時間矩陣

時間(min)	1	2	3	4	5
1	0	32	21	19	13
2	40	0	40	42	18
3	21	40	0	8	17
4	18	41	7	0	15
5	12	18	17	15	0

表 16 路線對照表

修改前路線	修改後路線	班次數
(2,1)	(2,1)	12
(1,2)	(1,2)	11
(2,3)	(3,6)	21
(3,2)	(6,3)	21
(2,4)	(4,7)	13
(4,2)	(7,4)	13
(2,5)	(5,8)	20
(5,2)	(8,5)	20

4.2.2 模擬測試結果

將上述的模擬參數代入數學模型，利用 Gurobi 套件進行數學模式求解，得出的結果有：需汰換車輛的年份、汰換後的類型及每年的路線營運班次，此小分節以第一種情境，也就是第二次汰換時間區間正常的情境，的結果進行說明。由於此問題規模比範例測試的大，決策變數規模更大，因此同樣引入 Gurobi 中的收斂參數 MIPGAP 進行

收斂，達到條件即停止，此規模範例本研究取 0.1 作為停止收斂的參數。本小分節以第一種情境，落在第二次汰換期間後，進行結果說明，後續小分節會列出其他情境下之結果，檢視車隊汰換之組合。

正常汰換區間下的情境模型求解得出結果如表 17。目標值為 32,213,523.8，檢視結果有符合限制式，像是不可超過年限營運、電動車輛每年有供應量限制等，班次總數也滿足原服務班次。車輛汰換措施結果顯示大多是選擇在車隊年限到期時購車換車，而產能限制為 45 台，恰好現有每一個車隊的車輛數均未超過每年供應量限制，依年限到期時間，每年替換一批不同購車年分車隊並不違反限制式，因此以模型求解結果會依據各車隊報廢年限到期時進行車隊更新，僅有少部分選擇提早換車購車。此外，模擬資料在設計上，可能每輛車一天分配到的班次數不多或是路線長度不長等原因，即使換成電動車仍可以同樣車輛數滿足顧客需求，因此未受到電動公車的營運範圍限制影響而需額外購車。

表 17 模擬資料之求解結果-車輛汰換時間

車隊	購車 年分	n 台	第一次 舊換新類型	更換年份	第二次 舊換新類型	更換年份
車隊 1	2012	1	柴油	2021	電動	2031
		15	柴油	2022	電動	2032
車隊 2	2013	10	柴油	2023	電動	2033
車隊 3	2014	1	柴油	2021	電動	2031
		7	柴油	2024	電動	2034
車隊 4	2015	21	柴油	2025	電動	2035

4.2.3 模擬資料之情境分析

藉由目標年的概念進行情境分析，得出的結果同樣依目標年分成三種情境：落在第二次汰換期間後、落在第二次汰換期間的第一輛車的年限到至第二次汰換期間最晚可能換車時間前、第一次汰換之最後一輛車年限到至第二次汰換期間第一輛車的年限到期。其中情境一已於上一小節展示，本小節探討剩餘兩種情境在目標年概念下，模擬資料代入數學模型求解後所得的車輛汰換組合結果。與 4.1.3 的目標年假設相同，假設情境二為目標年訂為 2031 年，情境三為目標年訂在 2030 年。

1. 情境二：目標年訂為 2031 年

將目標年訂在第二次換車期間內進行模型求解，目標值為 37,724,150.6，車輛汰換時間如表 18，車輛於目標年 2031 年前全數汰換完畢。結果於車輛年限內營運，並滿足現有服務班次數，在電動車供應量限制下於 2031 年前全面電動化，並得出車輛汰換時間。檢視結果，分攤兩次替換完畢，分別為 2030 年 13 台、2031 年 45 台，而第一次替換則因報廢年限造成的車輛班次缺口限制式，使第二次於

2030、2031 年替換連帶影響第一次替換時間，因此第一次換車時間為 2020、2021 年。檢視結果可以發現若該車輛尚未到報廢年限，會於目標年到再汰換，而在產能限制下超出供應量的車輛便往前分攤汰換。

表 18 情境二之模擬資料求解結果-車輛汰換時間

車隊	購車 年分	n 台	第一次 舊換新類型	更換年份	第二次 舊換新類型	更換年份
車隊 1	2012	6	柴油	2020	電動	2030
車隊 1		10	柴油	2021	電動	2031
車隊 2	2013	13	柴油	2021	電動	2031
車隊 3	2014	5	柴油	2020	電動	2030
車隊 3		3	柴油	2021	電動	2031
車隊 4	2015	2	柴油	2020	電動	2030
車隊 4		19	柴油	2021	電動	2031

2. 情境三：目標年訂在 2030 年

將目標年訂在第二次換車期間前、第一次替換期間後進行模型求解，目標值為 25,383,126.4，車輛汰換時間如表 19，車輛選擇替換一次，於目標年 2030 年前全數電動化。此情境為目前政策期望達到的目標：於 2030 年前車隊全面電動化，將營運資料加入模型求解，在滿足現有服務班次及電動公車供應量有限的情況下，得出車輛汰換的時間配置。檢視結果，由於此情境為第二次汰換前、第一次汰換後的時間區段內，因此會考慮是否二次替換車輛，而模型求解會選擇直接換成電動車，於目標年前達成目標，在供應量一年 45 台的限制下分攤至 2021~2025 年替換完畢。由求解結果可看出，車輛未超過使用年限，並滿足現有服務班次數的條件下，幾乎大多數選擇於自身車輛的報廢年限汰舊換新並電動化，推測可能原因是距離目標年太短，汰換兩次不僅有多一次購車成本，尚有折舊成本，目標式最小化成本下較不會選擇替換兩次的方案，對業者而言也較無效益。

表 19 情境三之模擬資料求解結果-車輛汰換時間

車隊	購車 年分	n 台	第一次 舊換新類型	更換年份
車隊 1	2012	1	電動	2021
車隊 1		15	電動	2022
車隊 2	2013	13	電動	2023
車隊 3	2014	8	電動	2024
車隊 4	2015	21	電動	2025

4.3 敏感度分析

本小節欲探討供應量及電動公車價格的變動對於換車年份的影響。4.2 提到不同目標年下模擬資料產生的汰換結果，大多選擇於供應量限制下，於該車報廢年限接近才換車，且若換車兩次大多先換成柴油，接近目標年才換成電動公車。推測可能有此結果的原因為電動公車的價格比柴油車高出 2 倍多，於最小化車隊汰換成本下會傾向接近強制換成電動車的時點才進行汰換。目前設定每年供應量為 45 台，依照汰換結果推測若車輛尚未到報廢年限，會接近目標年才汰換，再依照每年供應量條件往前面年份分攤汰換，本研究透過對產能敏感度分析來驗證此推測。電動公車供應量及價格是影響換車年份組合的重要因素，價格更是業者最關心的項目之一，影響業者車輛電動化之意願，因此本研究對這兩個因素進行敏感度分析，在有目標年限壓力的兩種情境下，設定目標年為 2030 年及 2034 年，檢視不同目標年汰換結果的變化。其中，從 4.2.3 中得知目標年落在第一次汰換之最後一輛車年限到至第二次汰換期間第一輛車的年限到期下，可考慮是否二次替換，而結果顯示為僅替換一次且於目標年 2030 年前全面電動化，已達到替換一次直接換成電動車的結果，並不會因為電動公車價格降低而使汰換組合有所改變，僅有目標值降低，因此便不加入敏感度分析。

4.3.1 供應量

當目標年為 2030 年時，屬於情境三，對供應量設定進行敏度分析，檢視車輛汰換年份的變化。進行敏感度分析時，將供應量設為 15、20、25 檢視換車年份變化，情境三可考慮是否替換兩次，而結果顯示均僅替換一次，但汰換年份有些微變化，如圖 9。在供應量充足下，也就是供應量為 25 台時，車輛於報廢年限汰換；在供應量有限的情況下，依照每年供應量條件往前面年份分攤汰換，如供應量為 15、20 台的情況下，購車年分為 2015 年有 21 台車，原本於 2025 年全數一次汰換完畢，然而在供應量條件的設定下，顯示於 2024 年提早汰換，分攤換車需求。

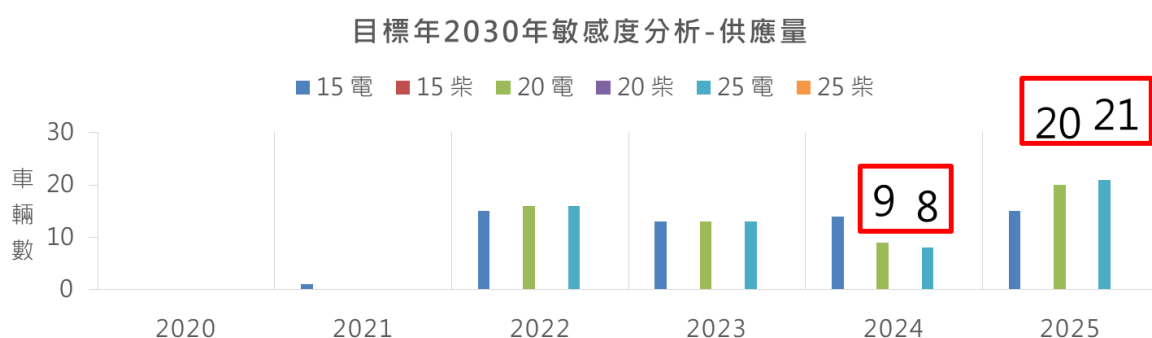


圖 9 供應量敏感度分析-目標年 2030 年

當目標年為 2034 年時，屬於情境二，同樣對供應量設定進行敏度分析，檢視車輛汰換年份的變化。將供應量設為 25、30、35 檢視換車年份變化，情境二下會有兩次汰換結果，進行敏感度分析，得出圖 10，可看出汰換年份因供應量限制有些微變化。若車輛尚未到報廢年限但須完成車隊全面電動化，會接近目標年再汰換，再依照每年供

應量條件下往前面年份分攤汰換車輛，如現有車隊中，購車年分 2015 年 21 台、2014 年 8 台，因為目標年的設定，全於 2034 年進行更換，但當供應量不足後，可從供應量設定 25 台的長條圖中看出，需更換的車輛往前一個年份提早車輛汰換，以分攤電動公車的需求。

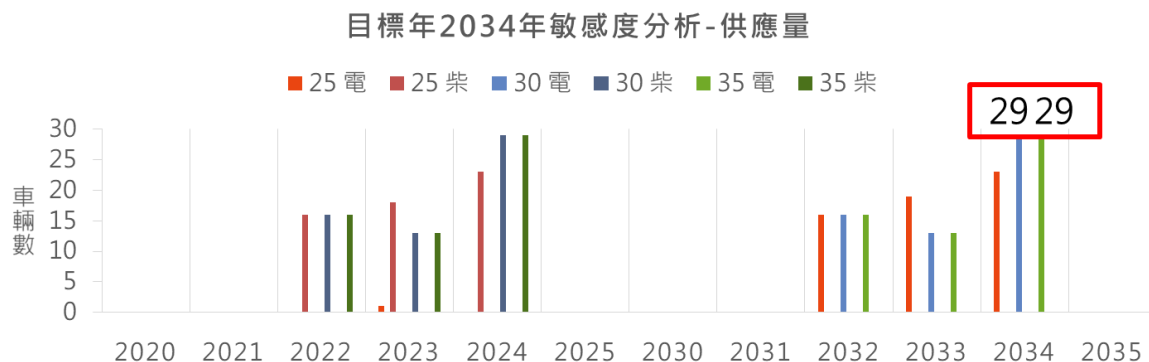


圖 10 供應量敏感度分析-目標年 2034 年

4.3.2 電動公車價格

固定其他參數，於目標年 2034 年的情境下變動電動公車價格檢視車輛汰換情形。電動公車價格原本設定 US\$790,000，以 US\$290,000~US\$590,000 間隔 US\$100,000 檢視其敏感度及變動結果，柴油車價格則固定 US\$350,000。以汰換車輛數來看，如圖 11，圖例為在不同電動車價格下替換車輛總數，其中原 cost 為原電動車價格 US\$790,000，圖例由上到下(cost2 ~ cost5)分別代表電動公車價格為 US\$290,000 到 US\$590,000，電動公車價格的變動對換車時間點並無明顯趨勢，汰換車輛數並未因電動公車價格的變化而呈現明顯集中或分散年份汰換。接著檢視電動公車價格的變化是否會影響兩次替換的類型，使業者於第一次替換時便積極更新車隊促使其電動化，結果如圖 12 的長條圖所呈現。在原本電動公車參數的設定下，均於第二次替換期間才使車隊全面電動化，而隨著電動公車的價格降低，車隊有提早電動化的趨勢，尤其當電動公車價格降到比柴油車輛低時，超過一半的數量會於第一次替換期間車輛電動化，可見電動公車價格對於業者選擇車隊電動化時間的早晚是個重要的影響因素，而此結果可以供政府做為制定相關措施時的參考依據，像是針對電動公車價格提供補貼誘因，提供可行的配套措施促使業者配合政策，達成於制定的年限前全面電動化之目標。

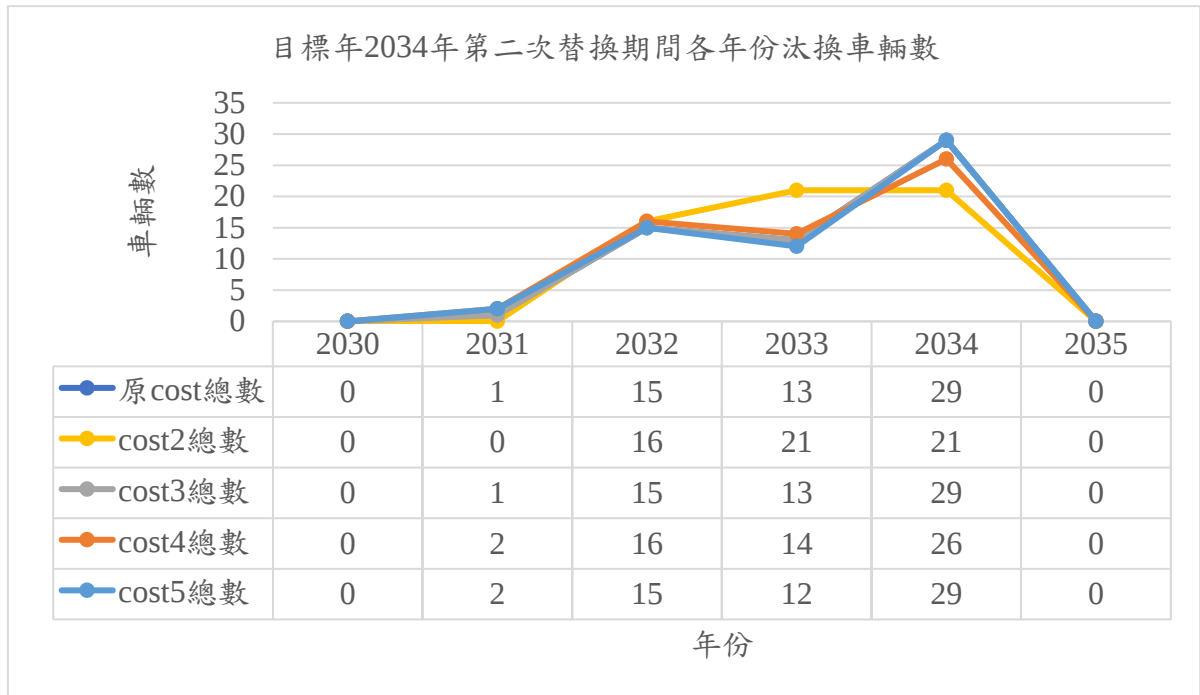


圖 11 電動公車價格敏感度分析-目標年 2034 年第二次替換期間汰換之車輛數分布

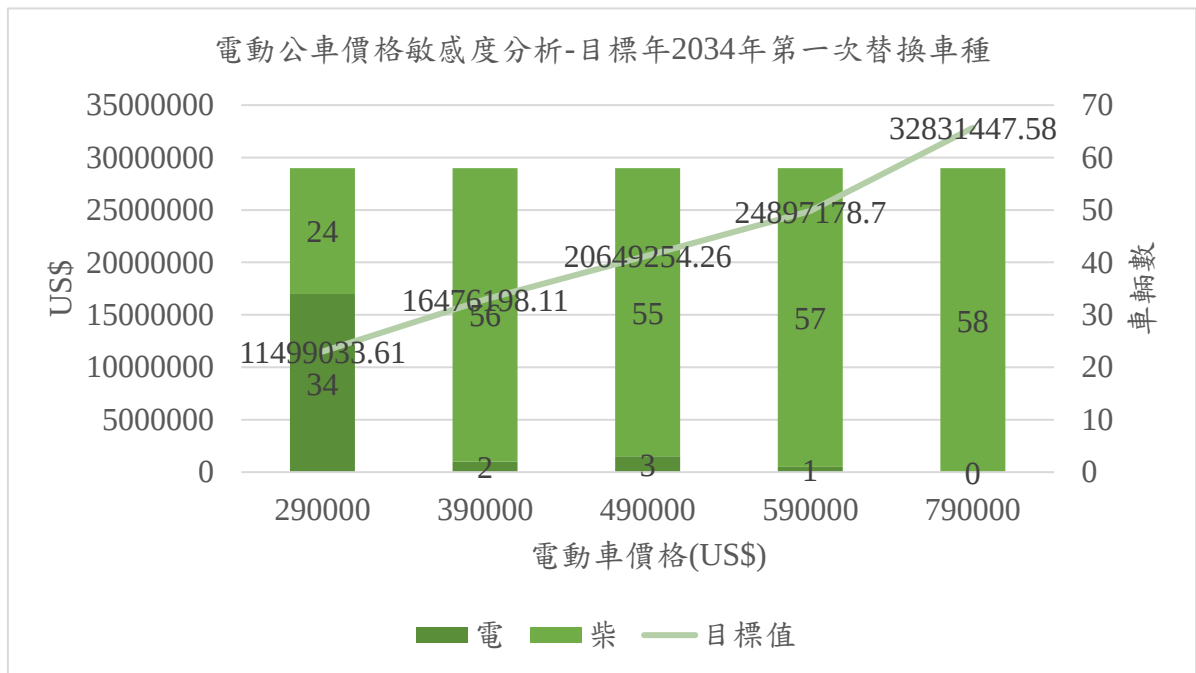


圖 12 電動公車價格敏感度分析-目標年 2034 年第一次替換之類型

4.4 小結

本章節利用範例測試模型的可行性，並擴大規模，模擬路線、車隊、班次等營運資料代入模型中求解，檢視汰換車輛結果是否對業者為可行的方案，並將業者汰換車隊所需考量的重要因素供應量及電動公車價格進行敏感度分析，檢視供應量及電動公車價格的變動對於汰換年期的影響。本章節介紹模型測試，透過參數設定及公車營運

資料輸入，以目標年劃分三種情境，使用 Gurobi 套件求解模型得出結果，列出求得的車輛汰換年分配，綜合上述結果，可知三種不同情境於符合收斂參數下，個別可行的車輛換車時間。從範例測試結果來看，車輛使用年限、供應量限制皆符合模型設計，而求解得出車輛汰換年分組合的同時，可得營運班次資訊，因汰舊及車輛報廢年限到期而產生的班次缺口也藉由更新車隊之新車補足，維持現有服務水準之班次數。擴大範例規模模擬實際情形，同樣以目標年分成三種情境檢視車隊汰換結果，車隊均能於目標年前全面汰換成電動公車，且符合現有服務水準。由模擬資料的結果可知，車輛會傾向接近使用年限再進行汰換，若是目標年距離太近會傾向替換一次便全面電動化；若是目標年比報廢年限早，車輛會依照供應量限制於目標年前分攤更新車輛，最佳化公車汰換年分。對電動公車供應量及價格進行敏感度分析，可看出於供應量的限制下，會往前分攤更換需求，而價格的變動雖然汰換時間點無明顯變動趨勢，但當價格降越低，車隊越容易提早電動化，於第一次替換便換成電動公車。藉由模擬資料模擬可能情形，透過數學模型求解，提供汰換方案供客運業者於更新車輛時做參考，而敏感度分析的結果也可供政府做為擬定可行的配套措施之參考依據，促使業者配合政策，達到目標年前車隊全面電動化。

第五章 結論與建議

本章節歸納並解釋結果，確認數學模型之適用性，提出一些觀點供未來可深入研究或可能的改善建議給予後續研究精進。綜合前面章節，從闡述研究的問題背景引出研究目的，於整理相關文獻時，研究的問題於文獻中不足的部分進行改善，建立數學模型達到研究目的，而後再以範例測試檢驗模型的合理性，並擴大資料規模模擬現實生活情形，並進行相關影響因素的敏感度分析，探討結果與因素間的變動關係，供業者於汰換車隊決策時的參考依據。後續小節以測試後的結果進行結論整理，並提出未來相關研究可以改善或繼續研究的建議。

5.1 結論

1. 在滿足供應量限制及維持原有服務班次限制下，利用數學模型求解，將現有柴油車隊於目標年前全面電動化，得出車輛汰換年分的配置結果，達成研究目的。
2. 藉由模擬資料測試不同目標年情境的結果來看，可知車輛汰換年分組合與目標年限的壓力及車輛的報廢年限有關，依照目標年及報廢年限的早晚選擇汰換時間。
3. 以敏感度分析的結果來看，供應量限制會影響汰換年分組合，於符合限制下從報廢年限及目標年限往前提早分攤公車汰換需求。
4. 敏感度分析的結果顯示，電動公車價格是影響車輛電動化時間的重要因素，補貼款提高，使業者負擔價格越低越容易於第一次替換時即替換成電動公車，達到車隊全面電動化之目標。由此結果可預期電動公車補貼款能協助公車電動化的推行，可供政府制定價格相關配套措施。
5. 本研究以業者角度探討車輛電動化之汰換年期，建立漸進式汰舊換新車輛的數學模型，達成研究目的，模型求得之結果可作為業者決策時之參考依據，也可供政府於擬定相關配套措施時作為改善之參考資料。

5.2 建議

1. 本研究假設可以隨時充電，且並未限定充電站數量，而充電站的位置及數量對於車輛的路線班次有關，可能會影響到車輛汰換結果，建議未來可加入此因素考量對車輛汰換年期的影響。

2. 本研究假設規劃期間需求固定，長期規劃下可能會因需求變動，導致服務班次需作調整，進而影響到車輛汰換結果，因此未來研究可考慮需求可能變動的情形下對車輛電動化之汰換年期的影響，求得結果能更貼近實際情形。
3. 本研究考慮一家業者進行車輛汰換年期規劃，未考慮多家業者競爭下使供應量不同的問題，未來研究可探討不同業者加入市場對每年電動車輛供應量的影響，更能符合實務上的需求。
4. 本研究透過數學模型求解，雖有設定收斂條件，但由於模型內有行駛路線班次問題，以混合整數規劃求解效率仍有待改善，未來研究可藉由其他演算法等方式，像是利用模擬退火法的通用性及易於開發特性套用本研究數學模型的邏輯進行演算法建構，於合理時間內有效求得近似解。

參考文獻

1. 經濟部能源局。(2019)。107 年度我國燃料燃燒 CO2 排放統計與分析。
2. 交通部。(2017)。能源轉型白皮書-運輸部門節能計畫。
3. Li, J. Q. Battery-electric transit bus developments and operations : A review. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(3), 157-169, 2016.
4. Lajunen, A., & Lipman, T. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy*, 106, 329-342, 2016.
5. Wang, Y., Huang, Y., Xu, J., & Barday, N. Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E*, 100, 115-132, 2017.
6. Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., Li, J. M., Birky, A. K., & Ward, J. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 122, 588-600, 2017.
7. Rogge, M., Hurk, E., Larsen, A., Sauer, D. U. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211, 282-295, 2018.
8. Teoh, L. E., Khoo, H. L., Goh, S. Y., Chong, L. M. Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. *International Journal of Transportation Science and Technology*, Vol.7(1), pp.10-25, 2017.
9. Li, L., Lo, H. K., Xiao, F., Cen, X. Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs. *Transportation Research Part D*, 60, 104-108, 2018.
10. Ercan, T., Zhao, Y., Tatari, O., Pazour J. A. Optimization of transit bus fleet's life cycle assessment impacts with alternative fuel options. *Energy*, 93, 323-334, 2015.