

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis



考量容量之國道加油站

轉換充電站之多期佈設最佳化

A multi-period optimization model for the deployment of
capacitated charging station at highway service area

傅安

Fu, An

指導教授：朱致遠 博士

Advisor: James C. Chu Ph.D.

中華民國 113 年 2 月

February, 2024

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY



考量容量之國道加油站轉換充電站之多期佈設最佳化

A multi-period optimization model for the deployment of capacitated
charging station at highway service area

本論文係傅安（R10521515）在國立臺灣大學土木工程學系交通工程
組完成之碩士學位論文，於民國 112 年 6 月 29 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Civil Engineering Transportation Engineering on
29 June, 2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by AN FU (R10521515)
candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance

口試委員 Oral examination committee:

朱致遠

（指導教授 Advisor）

Handwritten signature of Zhu Zhiyuan in blue ink.

陳俊穎

Handwritten signature of Chen Junning in blue ink.

水敬心

Handwritten signature of Shui Jingxin in blue ink.

系主任 Director:

葛宇甯

Handwritten signature of Ge Yuning in blue ink.

摘要



本研究探討國道加油站轉換充電站之多期佈設最佳化，方法採用建立混合整數規劃模型，模式中包含考量電池效率、補充燃料設施組合、多種類充電樁、充電樁建設成本、總預算以及補充燃料設施容量等重要因素，並同時考慮電動運具及非電動運具，使兩種不同燃料之運具能夠被模型捕捉最大總流量。本研究建立之多期充電站佈設最佳化模型之結果在於產生不同國道服務區之不同種類及佈設方式的充電樁數量，並顯示各期之不同運具服務流量及服務率，本研究也透過進行敏感度分析，探討各變量改變後對結果產生之影響，並針對上述考慮之因素給予策略及建議。

關鍵字：多期佈設、充電容量、最佳化

Abstract



This study investigates the multi-period optimal deployment of converting gas stations at highway service area into charging stations. The method utilizes a mixed-integer programming model that considers important factors such as battery efficiency, fueling facility composition, multiple types of charging piles, charging pile construction costs, total budget, and fueling facility capacity. It also takes into account both electric and non-electric vehicles, allowing the model to capture the maximum total flow of the two different types of fuel. The results of the multi-period charging station deployment optimization model generated different quantities of charging piles, with different types and deployment methods, for various service areas along the national highways. The results also show the service flow and service rate of different vehicle types in each period. Sensitivity analysis was conducted to explore the impact of changes in various variables on the results, and strategies and recommendations were provided based on the factors mentioned above.

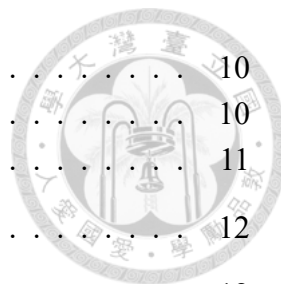
Keywords: Multi-period, Capacitated, Optimization

目次



	Page
口試委員審定書	i
摘要	ii
Abstract	iii
目次	iv
圖次	vi
表次	vii
第一章緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的與內容	2
1.3 研究範圍	2
1.4 研究流程	2
第二章文獻探討	4
2.1 充電站佈設	4
2.1.1 流量捕捉相關	5
2.1.2 多期佈設相關	5
2.1.3 容量相關	6
2.2 文獻探討小結	7
第三章研究方法	8
3.1 問題定義與系統描述	8
3.2 模式假設	9
3.2.1 與需求相關	9
3.2.2 與加油及充電站相關	9
3.2.3 汽車與電動車相關	10
3.3 數學模型建構	10
3.3.1 數學符號	10

3.3.1.1	集合 (Set)	10
3.3.1.2	參數 (Parameter)	10
3.3.1.3	變數 (Variable)	11
3.3.2	目標式	12
3.3.3	路網與補充燃料設施組合設置	12
3.3.3.1	演算法	14
3.3.4	限制式	17
第四章案例測試與分析		21
4.1	案例說明	21
4.1.1	國道資料前處理	23
4.1.2	測試結果	25
4.2	敏感度分析	28
4.2.1	電池容量	28
4.2.2	補充燃料設施容量	32
4.2.2.1	快速充電樁容量	32
4.2.2.2	一般充電樁容量	35
4.2.3	預算相關	39
4.2.3.1	總預算	39
4.2.3.2	快速充電樁建造成本	44
4.2.3.3	一般充電樁建造成本	48
4.2.4	設施相關	51
4.2.4.1	起始油槍數量	51
4.3	小結	55
第五章結論與建議		57
5.1	結論	57
5.2	建議	58
參考文獻		60



圖次



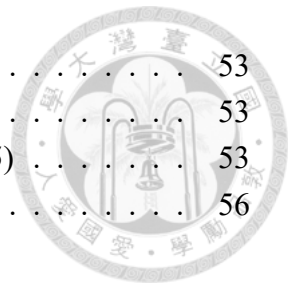
圖 1.4.1	研究流程圖	3
圖 3.3.1	簡易案例示意圖	13
圖 4.1.1	國道一號路網示意圖	22
圖 4.1.2	運具流量服務率 (原始參數)	25
圖 4.1.3	運具服務車流量 (原始參數)	26
圖 4.2.4	電池容量敏感度分析	29
圖 4.2.5	運具流量服務率 (電池容量增加 10%)	30
圖 4.2.6	運具流量服務率 (容量增加 20%)	31
圖 4.2.7	運具流量服務率 (容量增加 30%)	31
圖 4.2.8	快速充電樁容量敏感度分析	32
圖 4.2.9	運具流量服務率 ($Ca_{fast}^{EV}=240$)	34
圖 4.2.10	運具流量服務率 ($Ca_{fast}^{EV}=360$)	34
圖 4.2.11	運具流量服務率 ($Ca_{fast}^{EV}=480$)	35
圖 4.2.12	一般充電樁容量敏感度分析	36
圖 4.2.13	運具流量服務率 ($Ca_{normal}^{EV}=12$)	37
圖 4.2.14	運具流量服務率 ($Ca_{normal}^{EV}=18$)	37
圖 4.2.15	運具流量服務率 ($Ca_{normal}^{EV}=24$)	38
圖 4.2.16	總預算敏感度分析	39
圖 4.2.17	運具流量服務率 ($B_t=500,000$)	40
圖 4.2.18	運具流量服務率 ($B_t=600,000$)	41
圖 4.2.19	運具流量服務率 ($B_t=800,000$)	42
圖 4.2.20	運具流量服務率 ($B_t=1,000,000$)	43
圖 4.2.21	快速充電樁成本敏感度分析	44
圖 4.2.22	運具流量服務率 ($C_{fast}^{RC}=10,000$)	45
圖 4.2.23	運具流量服務率 ($C_{fast}^{RC}=20,000$)	46
圖 4.2.24	運具流量服務率 ($C_{fast}^{RC}=30,000$)	47
圖 4.2.25	一般充電樁成本敏感度分析	48
圖 4.2.26	運具流量服務率 ($C_{normal}^{NEW}=1,000$)	50
圖 4.2.27	運具流量服務率 ($C_{normal}^{NEW}=1,500$)	50
圖 4.2.28	運具流量服務率 ($C_{normal}^{NEW}=2,000$)	51
圖 4.2.29	起始油槍數量敏感度分析	52
圖 4.2.30	運具流量服務率 (原始油槍數量比例 0.25)	54
圖 4.2.31	運具流量服務率 (原始油槍數量比例 0.5)	54
圖 4.2.32	運具流量服務率 (原始油槍數量比例 0.75)	55

表次



表 4.1.1	案例測試之參數設定與說明	23
表 4.1.2	M06A 檔案內容	24
表 4.1.3	各期重建快速充電樁數量(原始參數)	26
表 4.1.4	各期快速重建充電樁數量(無預算限制)	26
表 4.1.5	各期新增快速充電樁數量(原始參數)	27
表 4.1.6	各期新增快速充電樁數量(無預算限制)	27
表 4.1.7	各期新增一般充電樁數量(原始參數)	27
表 4.1.8	各期新增一般充電樁數量(無預算限制)	27
表 4.2.9	各期重建充電樁數量(電池容量增加 10%)	29
表 4.2.10	各期重建充電樁數量(電池容量增加 20%)	30
表 4.2.11	各期重建充電樁數量(電池容量增加 30%)	30
表 4.2.12	各期重建充電樁數量($Ca_{fast}^{EV}=240$)	33
表 4.2.13	各期重建充電樁數量($Ca_{fast}^{EV}=360$)	33
表 4.2.14	各期重建充電樁數量($Ca_{fast}^{EV}=480$)	33
表 4.2.15	各期新增一般充電樁數量($Ca_{normal}^{EV}=12$)	36
表 4.2.16	各期新增一般充電樁數量($Ca_{normal}^{EV}=18$)	36
表 4.2.17	各期新增一般充電樁數量($Ca_{normal}^{EV}=24$)	38
表 4.2.18	各期重建快速充電樁數量($B_t=500,000$)	40
表 4.2.19	各期新增一般充電樁數量($B_t=500,000$)	40
表 4.2.20	各期重建快速充電樁數量($B_t=600,000$)	41
表 4.2.21	各期新增一般充電樁數量($B_t=600,000$)	41
表 4.2.22	各期重建快速充電樁數量($B_t=800,000$)	42
表 4.2.23	各期新增一般充電樁數量($B_t=800,000$)	42
表 4.2.24	各期重建快速充電樁數量($B_t=1,000,000$)	43
表 4.2.25	各期新增一般充電樁數量($B_t=1,000,000$)	43
表 4.2.26	各期重建快速充電樁數量($C_{fast}^{RC}=10,000$)	45
表 4.2.27	各期重建快速充電樁數量($C_{fast}^{RC}=20,000$)	46
表 4.2.28	各期新增一般充電樁數量($C_{fast}^{RC}=20,000$)	46
表 4.2.29	各期重建快速充電樁數量($C_{fast}^{RC}=30,000$)	47
表 4.2.30	各期新增一般充電樁數量($C_{fast}^{RC}=30,000$)	47
表 4.2.31	各期新增一般充電樁數量($C_{normal}^{NEW}=1000$)	49
表 4.2.32	各期新增一般充電樁數量($C_{normal}^{NEW}=1500$)	49
表 4.2.33	各期重建一般充電樁數量($C_{normal}^{NEW}=2000$)	49
表 4.2.34	各期重建一般充電樁數量($C_{normal}^{NEW}=2000$)	49
表 4.2.35	各期重建快速充電樁數量(原始油槍數量比例 0.25)	52
表 4.2.36	各期新增一般充電樁數量(原始油槍數量比例 0.25)	53

表 4.2.37	各期重建快速充電樁數量(原始油槍數量比例 0.5)	53
表 4.2.38	各期新增一般充電樁數量(原始油槍數量比例 0.5)	53
表 4.2.39	各期重建快速充電樁數量(原始油槍數量比例 0.75)	53
表 4.3.40	不同變量之各期服務率比較	56



第一章 緒論



1.1 研究背景與動機

隨著科技的發展，各項數據顯示廢氣排放造成於氣候變遷有愈嚴重的趨勢，並危害人類的生活甚鉅，已成為各國必須重視且著手解決的問題，因此各國相繼提出以 2050 年為目標之淨零排放相關策略與行動。根據史惠慈 & 吳玉瑩 [2021] 之探討，在推動的政策執行面上，歐盟國家最為積極，如挪威、荷蘭等國將於 2030 年，日本、德國、韓國等國將於 2035 年前終止燃油車輛的販售。在政策實施面上，如日本、德國等傳統汽車生產國，較著重於生產面的發展，包含電池、充電站等應用；而像挪威、荷蘭等汽車產業較弱的國家，則借助消費面刺激政策入手，提供電動車駕駛者較為便利的使用環境。

國家發展委員會 et al. [2022] 之中亦將 12 項關鍵策略訂為碳排放淨零之目標，其中一項即為運具電動化即無碳化，在政策期程方面，預計將於 2030 年完成公車和公務車之全面電動化，2040 年則為小客車及機車市售全面電動化，並預計於 2050 年達成零碳排之目標。所謂電動運具即是以電力作為能源的運具，除了相較以汽柴油做為燃料的運具較為環保外，也能夠以再生能源的方式提供電力，進而減少石化能源的使用，電動運具近年來蓬勃發展，主要可分為電動機車、電動汽車和電動公車等類型。

然而截至 2022 年 11 月為止，國內電動運具占比以市區公車最高，但僅有 9.7%，而小客車和機車電動化數量比例更在 5%，根據交通部 [2023] 所述，2022 小客車數量約為 720 萬輛，且未來 20 年期總數僅有些微下降，若要在 2050 年達成全面電動化，必須有對汽車至電動車制定相應的轉換期策略；另外，雖然電動運具有上述優點，電池蓄電量—亦即總行駛距離—仍不足平均汽車的續航力，當電池電量低下就需要充電或更換電池，然而充電速度相比於加油行為緩慢許多，即便已經有具備快速充電能力的設施，也仍舊無法比擬加油的快速，且社會當中充電樁設置也不夠完善，此對於需要長度旅行或通勤的電動車將產生極大的不便，以台灣而言國道之長旅途使用較單一生活圈更容易面對充電所帶來的不便，故本研究希望建立模式，除了考慮國道充電站佈設位置，也最大化未來轉換期之

不同燃料運具的服務量，提供決策者規劃電動和非電動運具之補充燃料設施的長遠計畫方案，並進一步針對不同參數分析其對於整體服務之效益，以面對運具間不同型態燃料轉換之衝擊。



1.2 研究目的與內容

在過往的文獻當中（Kuby and Lim [2005]、Chung and Kwon [2015] 等），充電站的佈設通常是考慮運具全面電動化之情境，且較少結合非電動運具一起討論，從而忽略了轉換期間不同運具的服務水準，另外，在多數假設中（Wang and Lin [2013]、Xie et al. [2018] 等充電站的容量總是無限量的 (Uncapacitated)，使得佈設的設施數量可能被低估。本研究希望藉由考量國道上電動及非電動運具，並對容量進行限制，在給定一日之交通流量及電動車比例的情形下，最佳化國道加油站多期之不同種類充電設施及加油設施數量。

1.3 研究範圍

本研究針對電動及非電動運具進行補充燃料設施佈設最佳化，對於兩種不同燃料之運具，分別考慮單一車種，單一場站，多充電樁種類以及多年期之情況；考量因素包含電池容量、出發時燃料(包含電力、石化燃料)比例、不同補充燃料設施容量以及設施固定成本以及總預算。模式結果為各起訖點交通流量之服務比例，以及充電設施及加油設施之數量，最後針對電池容量、不同設施之容量、建設成本、總預算等細項進行敏感度分析。

1.4 研究流程

本研究的流程如圖1.4.1所示，首先藉由相關資料的蒐集，整理台灣目前對於電動運具的相關政策與進展，以及現行電動運具之基本知識，再透過文獻回顧過往充電站佈設模式的基礎架構，並蒐集過去充電站佈設的求解方法，接著蒐集案例資料及相關參數，建立國道起訖點補充燃料設施組合，在考慮容量以及多種類充電設施下，建構國道充電站最佳化模式，最後分析案例的結果，進行相關細項的敏感度分析，並根據分析結果提出結論與建議。

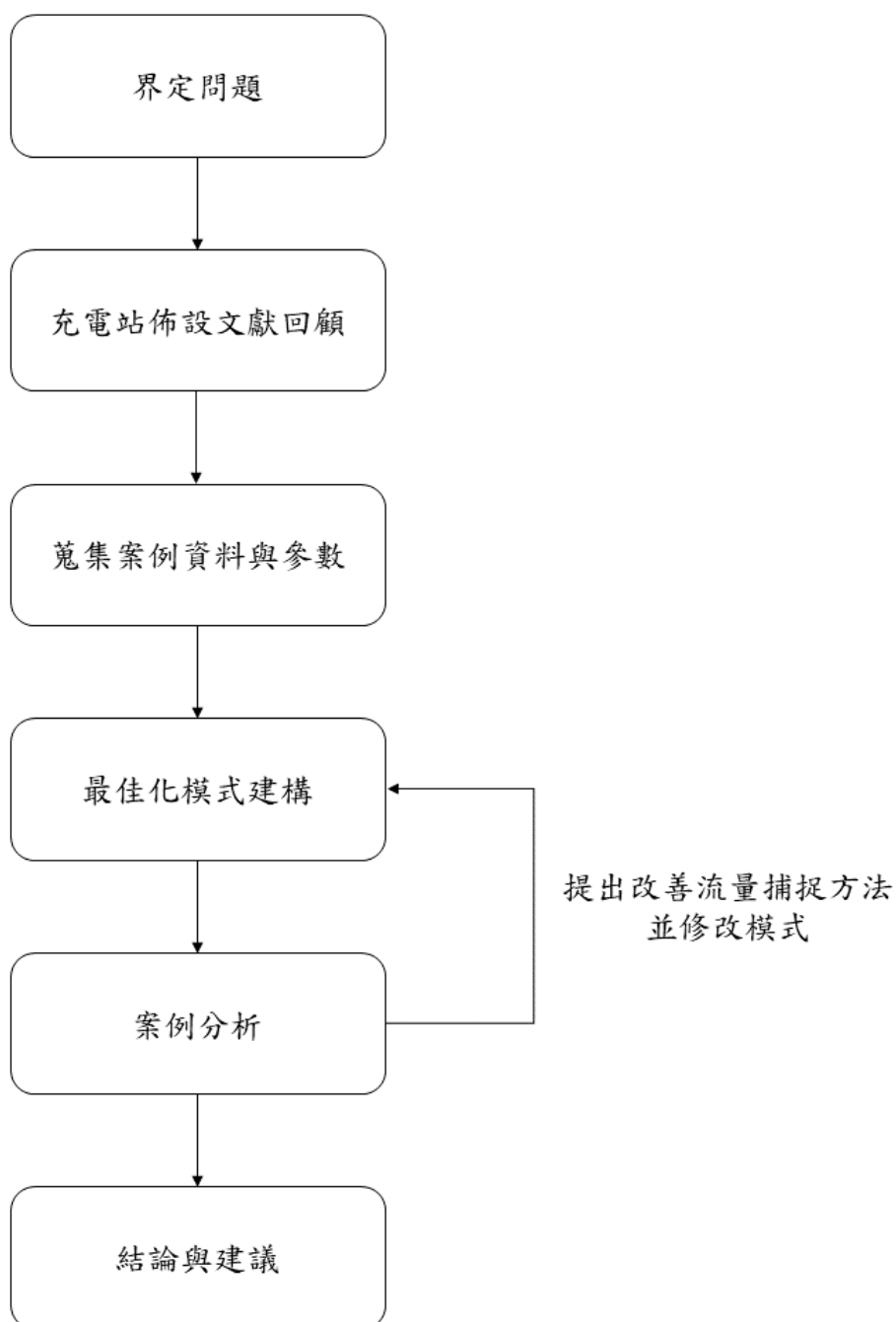


圖 1.4.1: 研究流程圖

第二章 文獻探討



此章節分為兩大類，2.1節針對過往充電站佈設問題進行文獻回顧，首先回顧流量捕捉模型的方式，接著將進一步搜尋關於與容量相關的整數規劃模型如何建置，其中大多為與汽車相關之研究，也包含大眾運輸如公車等運具，對於電動車充電站之佈設，由於電動運具之轉換並非一時之間，應考慮長期計畫進行最佳化，因此將在2.1.2節針對充電站多期佈設進行文獻回顧。

2.1 充電站佈設

充電站佈設延伸於傳統的設施選址模型，此類模型將客戶需求表示在網路的節點上，如Daskin et al. [2002] 和Klose and Drexl [2005]，前者將配送中心的工作和安全庫存成本以及從供應商到配送中心的運輸成本的規模經濟納入考慮，而後者整理了包含基本假設、混和整數規劃模型和該類問題的實際應用，但考慮到電動車的有限行駛里程，長途旅行的電動汽車駕駛通常會超出其行駛範圍，因此需要在從起點到終點的途中對電池進行充電，因而發展出一種處理基於流量需求的汽車充電站選址問題的方法。而充電需求被建模為一組起訖點（O-D）之間的行程，需要適當地放置充電站，以確保兩個連續站點之間的距離不超過行駛範圍。這將使駕駛能夠從起點到終點並返回而不會耗盡電力。

另外，由於電池與相關充電技術的進步，政府也大力推動淨零碳排放，電動運具未來將逐漸增加並取代大部分石化燃油之私人運具，然而此類過程為一漫長轉換期，若單純以完全電動化之情形討論佈設問題，尤其在台灣土地稀缺的條件下，容易忽略其中電動和非電動的衝突，應將其納入長期的規劃中加以討論。在這類文獻中主要以回顧整數規劃模型相關之內容，章節2.1.1將介紹基礎流量捕捉模型，接著在章節2.1.2回顧多期之相關研究內容，並於章節2.1.3將回顧充電站容量相關之限制與作法。



2.1.1 流量捕捉相關

基礎流量捕捉之充電站佈設文獻眾多，其中Kuby and Lim [2005] 的研究是最早將傳統佈設問題整合成流動加油模型 (Flow Refueling Location Model, 以下簡稱FRLM) 之一的文獻，在此研究中 Kuby 等人整理了更早的數學模型，並提出一種確定可以為路徑補充燃料的節點組合演算法，同時針對電動運具也提出如需考慮往返旅程、出發時的電量設定等基礎假設，除此之外，此研究也比較 FRLM 和貪婪演算法的求解表現，結果表明後者可能因為只考慮局部的服務設施而產生次優解，同時也發現 FRLM 幾乎沒有多重解，因為其考慮的設施組合可以避免在附近節點上過多佈設充電站。

除了私人運具外，流量捕捉問題也同樣適用大眾運輸系統，He et al. [2019] 的研究針對電動公車所設置之快速充電站佈設問題進行求解，其目標在於最小化建造成本以及使用電力價格等成本，該模型同時決定了快速充電站的布設位置、儲能系統的安裝以及車載電池的容量，因過去較少考慮不同時間的電力價格成本，使得儲能系統能在不同的時間段充電後，以較低廉的價格為公車供電，此研究為確定性模型，但在現實情況中大型公車的能源消耗是不確定，另外假設出發時為滿電量也可能使測試結果較為侷限。

在基礎的流量捕捉模型之上，研究者也考慮不同的議題或方法使此類問題更符合現實情況，如Lee et al. [2014] 假設原點與節點的剩餘燃油範圍遵循機率分佈，以反映使用者的充電行為或技術發展，其目標為最小化電動汽車的無法行駛距離和整個網路的總行駛時間；Xu and Meng [2020] 考慮路徑偏差和非線性彈性需求的充電站的優化部署，而無需預生成路徑和充電組合；Zhao et al. [2023] 開發了一個強化演算法學習模型參數，以解決結合路網和電網的電動汽車充電站部署問題，對於處理大規模問題更有效益。

2.1.2 多期佈設相關

在多期佈設的文獻當中，有關多期的定義係根據其想要研究的目的而進行設定，例如Cavadas et al. [2015] 將研究期間區分為早上和晚上，以此了解都市當中電動汽車之充電需求的改變；Davidov and Pantoš [2017] 則是將一日分為 24 個時段，並依據駕駛之不同時段的位置進行充電站之佈設；Lin et al. [2019] 則是規畫兩期之公車的大型充電站佈設計劃，第一期為 20 年而第二期為 2 年，分別於各期

配置不同數量的充電站以符合電網的可負荷程度；Kadri et al. [2020] 則建立多期之電動汽車流量隨機性模型以靠近現實世界之行為；Chung and Kwon [2015] 和 Li et al. [2016] 均已多年來作為期數之劃分，與本研究之目的相似。

在Chung and Kwon [2015] 的研究當中，其以韓國的高速公路系統作為研究案例進行多期充電站佈設，目標為最大化捕捉流量覆蓋率，在路網建構上參考了Ogden [1999] 之作法，而為了更有效表達不同匝道之連結，在兩條國道相交交流道之結構上額外增加節點以利模式參數設定；此研究除了進行多期最佳化(M-opt) 之外，也測試前向近視方法(F-myopic) 及後向近視法(B-myopic) 兩種方式以比較三者之間結果差異，其結果表明多期最佳化在所有情形下皆能找到最優解，但隨著問題規模的擴張，後向近視法通常也可以提供與多期最佳化相同的解決方案，而雖然此研究討論不同最佳化策略，但其僅為總路徑 3% 的部分建模，其結果是否能說明該方法有效還可以進行更多討論。

在Li et al. [2016] 的研究中討論駕駛有偏移路徑行為的 M^2PRLM 確定性模型，該模型由Huang et al. [2015] 的 PRLM 模型延伸而來，在安裝新充電站的決策過程中同時考慮了多條路徑、有限的車輛範圍和網路參數，其目標在於最小化充電站建置成本。此研究主要決策兩件事情：安裝新的充電站和或搬遷現有充電站，以及前者是在現在或者以後進行，因此在給定的網路下，隨著計劃期的推進，能夠動態地決定哪些節點安裝充電站能使更多的車流量被服務，同時為了應對大規模網路問題而採用基於遺傳演算法的啟發式演算法進行求解。此研究由於要最小化成本，因此在相關議題上有比較詳細的假設和參數設計，並利用駕駛的偏移行為某種程度上處理充電站之容量問題，但在研究中並沒有針對此項議題進行更深入的探討。

2.1.3 容量相關

在容量相關的文獻中，對於如何限制充電裝置之容量有許多不同作法，Upchurch et al. [2009] 的研究當中則是直接假設充電站能服務之總流量，其模型為延伸Kuby and Lim [2005] 之有容量限制的流動加油模型 (Capacitated Flow Refueling Location Model)，在過往的假設中，充電站的容量為無限量，因此只要在某一節點增設充電站後，若車輛經過並且處在充電設施組合當中的流量就會被捕捉，服務的決策變數因而為二元變數，本研究因加入充電頻率及容量之限制，因此能服務到的流量有限，決策變數為連續變數，並可以在單一節點上增加超過一個的設

施，故可以更好地符合真實情形，但在案例測試當中，其單一充電站容量直接假設為路網中最大的路徑流量的 46%，雖然有提供一定程度的限制，但對於大多數路徑而言仍然是超過其總流量的。

Li et al. [2018] 同樣直接假設充電站之容量，但其模式同時考慮廣義低音擴散模型 (Generalized Bass Diffusion Model, 以下簡稱 GBDM) 和 FRLM 兩種模型，其目標為最大化捕捉流量，前者為提供市場對於電動車的需求預測，後者則利用演算法進行求解，其基本流程為越大流量的路徑越快被服務，若該路徑只能被單一節點服務，則優先使其被捕捉，從而同時預測電動車需求並提供多期之最佳化佈設數目；Hosseini and MirHassani [2015] 則引入排隊理論量化容量問題，其目標在於最小化建設成本與排隊時間，透過加入充電效率的參數，能夠得知充電的人須要花多久時間等待前一位使用者或是應該移至下一個充電站，此研究選擇澎湖進行案例測試，因為其所考慮的為慢速充電設施，需要選擇流量不大，且以旅遊相關的地點為主。

2.2 文獻探討小結

在本章節的討論當中，可以發現過往的研究當中，無論是容量相關、多期佈設相關或是兩者同時納入之研究皆有所討論，且多半採用混和整數模型規畫進行求解，但在本研究回顧的文獻當中，卻尚未發現有人討論電動及非電動運具兩者於轉換期時的充電站佈設議題，而在台灣土地成本相對高昂的區域，加油站應可以作為轉換充電站的基點選擇，因此本研究將延伸及參考Upchurch et al. [2009] 和Chung and Kwon [2015] 兩篇文獻，將非電動車運具的流量納入模式，且為了符合現實情況，模型內將考慮補充燃料設施容量、電池續航力、充電樁成本及預算等項目，透過給定的電動車比例和路徑流量，在最大化捕捉流量的目標下，決定多種類充電樁佈設位置與期數。

第三章 研究方法



本研究所建立之混合整數線性規劃延伸自Upchurch et al. [2009]，考慮汽車和電動汽車之補充燃料設施容量和成本等相關限制式，本章節將詳細說明本研究之數學規劃模型之架構建立：3.1節為本研究之問題定義與相關假設；3.2節為說明本研究模式之假設，包含與需求相關、與加油及充電設施相關以及與汽車及電動車相關；3.3節為混合整數規劃模型建構，包含數學符號、目標式、限制式以及路網與補充燃料組合設置等四個模式細項。

3.1 問題定義與系統描述

在未來電動車逐漸成長的情形下，台灣之土地利用已達一定程度的飽和，在無法增加更多土地建設充電設施之情形下，加油站與電動站勢必會面臨相互排擠、轉換的課題，本研究是在探討以臺灣 2050 年所設定之運輸零碳排的目標下，以每五年為一期，即 2025 至 2030 年為第一期，目標 2045 至 2050 年為最後一期之多年期充電站佈設作業。電動車與一般汽車最大的差異來自於燃料為電力，兩者之間補充燃料的時間差異甚大，在過往研究當中由於電動車的滲透率較低，因此假設不受限制的充電站容量是常見的做法，本研究為探討多年期計畫下汽車轉換電動車之議題，因此應使充電站所能提供的服務容量納入模型使其能夠反映現實情境。

在充電行為的考慮上，由於電動車的續航力較低，長距離的駕駛對於充電的需求更為敏感，因此本研究將選擇國道系統做為案例研究，並設定電動車自起點出發時為滿電量，當行駛途經已設定的充電站組合時必須充滿電，若電池在抵達充電站前就已消耗完畢，則判斷該組合無法服務到該車，本研究假設在多年期的情形下電動車技術將會進步，使得續航力能夠提升；而汽車續航力較高，因此在每台氣車出發時會均勻分配油箱的油量使其更加符合一般民眾出門時剩餘油量的情形，汽車途經加油站也必須補足燃料。



3.2 模式假設

本研究為確定性模型 (deterministic)，即已知各期電動車比例與每日起訖點間交通量，不考慮隨機性 (stochastic)，並且考量加油站油槍和充電樁之容量限制，求解國道加油站在各年期之油槍和充電樁佈設數量。目標為最大化捕捉交通流量，其中包含電動車流量和汽車流量。建立本模型所需之主要假設如下，分為與需求相關、與加油及充電站相關以及與汽車與電動車相關：

3.2.1 與需求相關

- 不同期之電動車比例為已知。
- 不同期之起訖點每日流量為已知。
- 起訖點兩點間為最短路徑，駕駛不會有繞駛行為，即不會偏離最短路徑用以補充燃料，也只會國道加油站上補充燃料。
- 汽車與電動車使用者考慮往返旅次。

3.2.2 與加油及充電站相關

- 本研究將決策各期充電樁和油槍佈設數量，並固定其每日能服務之流量，因為有容量限制，每條路線有可能只有部分流量被服務。
- 充電樁佈設具有新增充電樁和汰換油槍轉為充電樁兩種策略，若前一期有建設充電樁，下一期也仍保有該充電樁；油槍被汰換後並不能重建（包含新增油槍和汰換充電樁）。
- 新增充電樁包含快速充電樁和一般充電樁兩種設施。
- 起始油槍佈設位置及數量為已知，後續各期之佈設預算為固定且不可移轉至下一期。



3.2.3 汽車與電動車相關

- 假設汽車為單一車種，不同期之汽車油箱為固定大小，即總行駛距離為固定。
- 假設電動車為單一車種，其電池會隨著計畫期增加其續航力。
- 兩種能源車輛均以固定速率行駛，燃料耗損與行駛距離成正比。
- 當兩種能源車輛在對應的補充燃料配置下遇到對應加油站或充電站，均須補滿燃料。
- 因電動車之續航力較低，假設電動車出發時為滿電量。
- 因汽車之續航力較高，將均勻分配流量以及其出發時油量。

3.3 數學模型建構

3.3.1 數學符號

3.3.1.1 集合 (Set)

- Q : 所有路徑起訖點集合。
- K : 所有潛在充電樁設置位置集合。
- O : 所有汽車起始油量比例之集合。
- T : 所有計畫期之集合。
- H_t^{EV} : 對於 t 期，所有潛在可供電動汽車充電之充電樁位置組合集合。
- H_o^{GV} : 對於起始油量 o ，所有潛在可供汽車加油之油槍位置組合集合。

3.3.1.2 參數 (Parameter)

- f_{qt}^{EV} : 為 t 期時，在最短路徑 q 上電動汽車之流量。
- f_{qot}^{GV} : 對於起始油量 o ， t 期在最短路徑 q 上之汽車之流量。

- 
- $b_{qth_t}^{EV}$ ：為二元參數，若對於 t 期之充電樁位置組合 h_t 可以服務最短路徑 q 則為 1，反之則為 0。
 - $b_{qoh_o}^{GV}$ ：為二元參數，若對於起始油量 o 之油槍位置組合 h_o 可以服務最短路徑 q 則為 1，反之則為 0。
 - e_{qt}^{EV} ：對於最短路徑 q ，電動汽車於 t 期需要充電的往返比例。
 - e_q^{GV} ：對於最短路徑 q ，汽車需要加油的往返比例。
 - $g_{qth_k}^{EV}$ ：對於最短路徑 q ， t 期的電動汽車由充電槍配置 h_t 在每次需要加油的往返中，平均停留在站點 k 的次數。
 - $g_{qoh_o k}^{GV}$ ：對於最短路徑 q ，起始油量 o 的汽車於起始油量 o 之油槍位置組合 h_o 在每次需要加油的往返中，平均停留在站點 k 的次數。
 - Ca_{fast}^{EV} ：每日單一快速充電樁可服務電動汽車之容量。
 - Ca_{normal}^{EV} ：每日單一般充電樁可服務電動汽車之容量。
 - Ca^{GV} ：每日單一油槍可服務汽車之容量。
 - S_k ：對於休息站位置 k ，現年之國道加油槍數量。
 - B_t ：為 t 期時，建設充電樁之預算。
 - C_{fast}^{RC} ：快速充電樁汰換油槍重建之成本。
 - C_{fast}^{NEW} ：增設額外快速充電樁之成本。
 - C_{normal}^{NEW} ：增設額外一般充電樁之成本。

3.3.1.3 變數 (Variable)

決策變數

- r_{kt} ：為連續整數變數，表在 t 期時位置 k 之充電樁汰換油槍數量。
- m_{kt} ：為連續整數變數，表在 t 期時位置 k 之之新增快速充電樁設置數量。
- n_{kt} ：為連續整數變數，表在 t 期時位置 k 之之新增一般充電樁設置數量。

- s_{kt} ：為連續整數變數，表在 t 期時位置 k 之油槍設置數量。

其他輔助變數

- $y_{qth_t}^{EV}$ ：為 0-1 連續變數，表 t 期時在可供充電配置 h_t 下通過最短路徑 q 所捕捉之電動車流量。
- $y_{qoh_o}^{GV}$ ：為 0-1 連續變數，表 t 期時不同起始油量 o 可供油槍配置 h_o 下通過最短路徑 q 所捕捉之汽車流量。

3.3.2 目標式

$$\text{Maximize flow} : \sum_{t \in T} \sum_{q \in Q} \sum_{h_t | b_{qth_t}^{EV} = 1} f_{qt}^{EV} * y_{qth_t}^{EV} + \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} \sum_{q \in Q} \sum_{h_o | b_{qoh_o}^{GV} = 1} f_{qot}^{GV} * y_{qoh_o}^{GV} \quad (3.1)$$

本研究之目標為最大化多期之電動運具和非電動運具被捕捉之交通流量，如目標式3.1所示，所謂捕捉流量，即為車流量是否能夠在其起訖旅程當中被特定補充燃料設施組合所服務，其中牽涉路網、車輛續航力以及補充燃料組合設置等細項，該問題將在章節3.3.3討論。

3.3.3 路網與補充燃料設施組合設置

在本研究當中最短路徑集合 Q 和補充燃料設施組合集合 H_t 和 H_o 為事先決定，本章節將說明如何定義路網與建立補充燃料設施組合。以一簡易示意圖來描述本研究問題，如圖3.3.1所示，該圖為一簡略國道系統，總共具有 4 個節點：O、A、B、D，其中 O、B 為匝道出口，A 為加油站，D 則同時具有匝道口和加油站之功能。

若某一交通量起訖位置分別為 O 和 D，其最快速到達方法為依序經過 O、A、B、D 四個節點，則定義此為一最短路徑 q ，路網之建立方法即為透過行駛路徑加總距離最短之路徑事先決定。

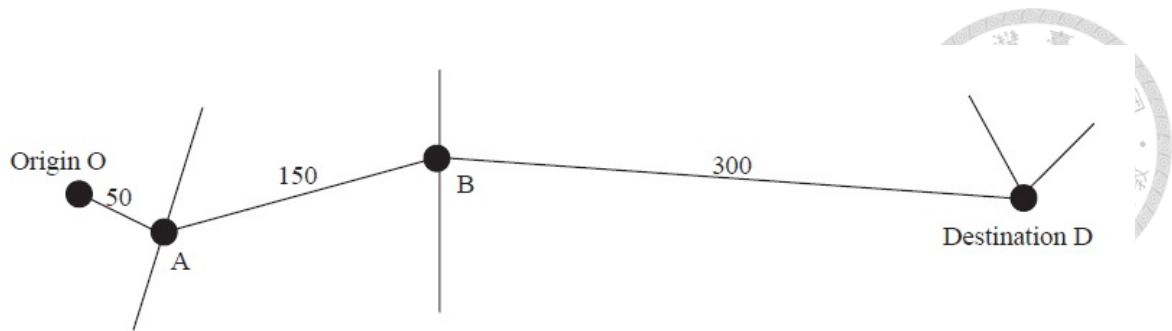


圖 3.3.1: 簡易案例示意圖
資料來源：Kuby, M., & Lim, S. (2005).

接著將討論補充燃料設施組合之設置方式，無論對於電動運具是非電動運具而言，續航力和補充燃料設施的位置兩者是影響駕駛範圍的重要要素，而在此簡易案例當中已經預先決定補充燃料設施設置的組合，分別為 $\{A\}$ 、 $\{D\}$ 、 $\{A, D\}$ 三種設站方式，不同續航力將決定一起迄路徑當中可以補充燃料的設站組合集合。本研究之研究範圍為一日之國道起訖旅次，對於大部分的使用者而言，往返旅次是一普遍的考慮，若運具之續航力為 1000 公里，且於起點為滿燃料量，在此案例當中無論是 A 或是 D 兩個節點都能夠服務到此路徑，甚至因為來回距離正好為 1000 公里，甚至不需要補充燃料也能夠完成此路徑。

若運具續航力為 700 公里，雖然無論是 O、A 都能夠為其補充燃料，但因為其最大續航力已經小於來回路徑距離，若出發時不為滿燃料量，就需要更謹慎考慮補充燃料設施位置；當續航力為 500 公里時，若僅在節點 A 設站，考慮單趟路徑的情況下，在 A 點補充完燃料後，接下來能夠行駛 450 公里到達 D 點完成旅程，但當考慮來回路徑時，卻沒有足夠續航力支持其回到 A 點補充燃料，同樣地，若僅在節點 D 設站，其運具只能完成單趟旅程而無法回到起點，因此在此條件下， $\{A, D\}$ 將會是唯一能夠服務此運具的設站方式。

透過設定續航力，可以針對電動運具及非電動運具建立其相對應之補充燃料設施組合集合，考量國道一日產生之旅次數龐大，本研究採取 Kuby and Lim [2005] 中所提出之演算法建立電動車和汽車之補充燃料設施組合之集合，兩者之間最大的差異在於初始燃料比例之設置，考慮電動汽車對於持距離旅行較為敏感，出發時將會是滿電量，而汽車駕駛則會均勻分配其初始油量，詳細演算法流程可參考 3.3.3.1 節，同時也可從上述討論得知，不同續航力將會影響設施捕捉流量之能力，有關於此項敏感度分析將會在章節 4.2.1 討論。

3.3.3.1 演算法



演算法 1 充電設施組合設置

```
1: 產生所有最短路徑之組合  $Q$ 
2: 可用充電設施組合  $\leftarrow []$ 
3: 產生所有休息站之組合  $H$ 
4: for 當前所有最短路徑  $q$  do
5:   for 計畫期數 do
6:     for 當前休息站組合  $h$  do
7:       續航力  $\leftarrow$  該期電池容量
8:       for 當前最短路徑  $q$  之來回所有節點 do
9:         續航力當前節點減去至下一節點之距離
10:        if 續航力  $i \leq 0$  then
11:          break
12:        else if 當前節點 =  $q$  之終點 then
13:          if 當前節點屬於當前休息站組合  $h$  then
14:            可用充電設施組合增加該休息站組合  $h$ 
15:          else
16:            continue
17:          end if
18:        else if 當前節點 =  $q$  之起點 & 續航力  $\geq 0$  then
19:          可用充電設施組合增加該休息站組合  $h$ 
20:        else if 當前節點 = 當前休息站組合  $h$  then
21:          續航力  $\leftarrow$  該期電池容量
22:        end if
23:      end for
24:    end for
25:  end for
26: end for
27: 更新休息站組合  $H \leftarrow$  充電設施組合  $H_t^{EV}$ 
28: 依組合大小重新排序充電設施組合
29: 需移除之超集充電設施組合  $\leftarrow []$ 
30: for  $i =$  當前所有充電設施組合 do
31:   for  $j =$  當前組合後續之所有充電設施組合 do
32:     if  $j$  屬於  $i$  的子集合 then
33:       需移除之超集充電設施組合增加  $i$ 
34:     end if
35:   end for
36: end for
37: for  $k =$  當前所有需移除之超集充電設施組合 do
38:   充電設施組合移除  $k$ 
39: end for
40: 輸出充電設施組合  $H_t^{EV}$ 
```



演算法 2 加油設施組合設置

```
1: 產生所有最短路徑之組合  $Q$ 
2: 可用加油設施組合  $\leftarrow []$ 
3: 產生所有休息站之組合  $H$ 
4: for 當前所有最短路徑  $q$  do
5:   for 所有起始油量比例  $O$  do
6:     for 當前休息站組合  $h$  do
7:       續航力  $\leftarrow$  油量比例  $o \times$  平均汽車續航力
8:       for 當前最短路徑  $q$  之來回所有節點 do
9:         續航力當前節點減去至下一節點之距離
10:        if 續航力  $i \leq 0$  then
11:          break
12:        else if 當前節點 =  $q$  之終點 then
13:          if 當前節點屬於當前休息站組合  $h$  then
14:            可用加油設施組合增加該休息站組合  $h$ 
15:          else
16:            continue
17:          end if
18:        else if 當前節點 =  $q$  之起點 & 續航力  $\geq 0$  then
19:          可用加油設施組合增加該休息站組合  $h$ 
20:        else if 當前節點 = 當前休息站組合  $h$  then
21:          續航力  $\leftarrow$  平均汽車續航力
22:        end if
23:      end for
24:    end for
25:  end for
26: end for
27: 更新休息站組合  $H \leftarrow$  加油設施組合  $H_o^{GV}$ 
28: 依組合大小重新排序加油設施組合
29: 需移除之超集加油設施組合  $\leftarrow []$ 
30: for  $i =$  當前所有加油設施組合 do
31:   for  $j =$  當前組合後續之所有加油設施組合 do
32:     if  $j$  屬於  $i$  的子集合 then
33:       需移除之超集加油設施組合增加  $i$ 
34:     end if
35:   end for
36: end for
37: for  $k =$  當前所有需移除之超集加油設施組合 do
38:   加油設施組合移除  $k$ 
39: end for
40: 輸出加油設施組合  $H_o^{GV}$ 
```


演算法 (1) 和 (2) 主要架構有兩個迴圈，第一個迴圈（第 4 至 26 行）為挑選出所有可行的補充燃料設施組合，第二個迴圈（第 30 至 36 行）則是檢查其中是否有超集之組合，各部分詳細過程可細分為以下步驟。



步驟一：初始化（第 1 至 2 行）

- 生成所有起訖點 q 的最短路徑組合 Q ，並依順序儲存該路徑的節點。
- 建立一個可用補充燃料設施組合列表，其中包含所有可行的組合，這些組合可以給每個路徑 q 加油。

步驟二：產生所有候補組合（第 3 行）

- 依據所有補充燃料站點產生所有候補組合 H 。例如，對於章節 3.3.3 中所討論的簡單案例，可能的組合為 $\{A\}$ 、 $\{D\}$ 、 $\{A, D\}$ 。

步驟三：刪除無法在給定路徑上以給定範圍補充燃料的設施組合（第 4 至 28 行）

- 從路徑 q 的起始節點開始：如果為電動汽車，將起始電量設為滿電量，若為汽車，則是將油量以不同比例均勻分配。
- 移至往返路徑上的下一個節點，並從剩餘燃料範圍中減去行駛距離，按照給定的順序檢查以下四個條件。
 - 如果剩餘燃料範圍小於零，表示在抵達該節點之前燃料將耗盡。從可能組合的列表中刪除該組合，並返回步驟三的開始處，評估下一個組合。
 - 如果該節點是目的地，則：
 - * 如果迄點有一個加油站，則該組合可以給這條路徑加油。將其保留在路徑 q 的組合列表中，並返回步驟三的開始處，評估下一個組合。
 - * 否則，車輛將往回行駛朝向起點，並繼續評估下一節點。
 - 如果該節點是起點，則表示車輛已經返回而沒有耗盡燃料。將該組合保留在路徑 q 的組合列表中，並返回步驟三的開始處，評估下一個組合。



- 如果該節點有一個補充燃料設施，則將剩餘燃料範圍設置為滿電量/滿油量，並移至下一個節點評估。
- 當評估了路徑 q 上所有可能的組合後，並將可用補充燃料設施組合列表替換為 H_t^{EV} 或 H_o^{GV} ，進入步驟四。

步驟四：刪除任何其他剩餘組合的超集，即存在另一個有效組合是該組合的真子集。例如，如果一條路徑可以由節點 {A} 和 {D} 上的設施加油，同時也可以由節點 {A, D} 上的設施加油，則無需考慮較大的組合，只需保留前面兩者。(第 29 至 49 行)

- 根據組合中節點的數量，按降序將組合進行排序，使具有更多節點的組合位於具有較少節點的組合之上。
- 從第一個組合開始。如果該組合是任何其他組合的超集，則將其從路徑 q 的組合列表中刪除。
- 轉到下一個組合，並重複該過程，直到達到路徑 q 的組合列表的結尾。
- 輸出補充燃料設施組合 H_t^{EV} 或 H_o^{GV} 。

3.3.4 限制式

容量相關

$$\sum_{q \in Q} \sum_{h | b_{qh}^{EV}=1} e_q^{EV} * g_{qth_{tk}}^{EV} * f_{qt}^{EV} * y_{qht}^{EV} \leq Ca_{fast}^{EV}(r_{kt} + m_{kt}) + Ca_{normal}^{EV} * n_{kt} \quad (3.2)$$

$$\forall k \in K, \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{q \in Q} \sum_{h_o | b_{qh_o}^{GV}=1} e_q^{GV} * g_{qoh_{ok}}^{GV} * f_{qot}^{GV} * y_{qoh_{ot}}^{GV} \leq Ca^{GV} * s_{kt} \quad (3.3)$$

$$\forall k \in K, \quad \forall t \in T$$

在過往文獻回顧當中，多期充電站佈設問題較少考慮容量限制之條件，本研究延伸Upchurch et al. [2009] 所建立的容量限制的流量充電站佈設模型 (CFRLM)，

式3.2和式3.3分別代表電動運具和非電動運具之容量限制式，右式為單一期經過補充燃料節點 k 而捕捉到的流量數量，其不得超過左式之該節點所擁有設施之總容量。其中右式與目標式3.1不同之處在於考慮了有關起訖旅次 q 當中補充燃料頻率的問題，在本研究當中所設定最佳化的時間範圍為一日，即使電動運具對長距離行駛所需要充電行為更為敏感，國道旅次當中仍然有短距離的駕駛起訖需求，並不會一遇到充電樁就進行充電，而上述情境同樣可以適用於非電動運具，為了使模式更符合現實情境，因此需要將補充燃料頻率納入模式考量之中。

充電頻率由 e_{qt}^{EV} 和 $g_{qth_k}^{EV}$ 兩項參數所描述， e_{qt}^{EV} 為來回起訖路徑 q 之距離與電動車續航力之比值，其計算式為：

$$e_{qt}^{EV} = \frac{\text{來回起訖路徑距離}}{\text{電動車最大續航距離}}$$

其目的在於表示電池充滿電的情況下能夠駕駛幾趟該路徑，舉例來說，若電動車滿電之續航力為 300 公里，而某一起迄旅程來回距離為 100 公里，對於該電動車而言平均駕駛 3 趟才會進行一次充電行為，該參數即為 $\frac{1}{3}$ ，藉此表達一日當中可能充電而被捕捉之頻率，而汽車 e_q^{GV} 也由相同概念計算式決定：

$$e_q^{GV} = \frac{\text{來回起訖路徑距離}}{\text{汽車最大續航距離}}$$

$g_{qth_k}^{EV}$ 則是表達一趟旅程當中途經之補充燃料次數，其參數由下列判斷式決定：

$$g_{qth_k}^{EV} = \begin{cases} 1 & \text{若充電站 } k \text{ 為起訖路徑 } q \text{ 之中間站且位於充電設施組合 } h_t \\ 0.5 & \text{若充電站 } k \text{ 為起訖路徑 } q \text{ 之端點站且位於充電設施組合 } h_t \\ 0 & \text{若充電站 } k \text{ 不位於充電設施組合 } h_t \text{，但仍能服務起訖路徑 } q \end{cases}$$

如上一章節所述，本研究是考慮來回之旅次進而設定充電設施組合，在Upchurch et al. [2009] 所設立的原始參數中，若一車輛在單一旅次當中需要充電，且有對應的充電站，因為考慮了行駛來回路徑之情形，當該充電站為中間站，則去程和回程皆會使用，視為完成 2 次充電行為，而當充電站為端點站，該電動汽車僅會完成 1 次充電行為，然而由於本研究使用之資料為一日之國道所有交通量，若有一去程旅次，其應存在對應之回程旅次，若考慮來回旅次之情形，電動汽車充電所需的服務量會超過實際的需求，因此在參數的設定上，本研究將原來參數之值設為一半以表示單一旅次會遇到的平均充電次數，亦即當充電站為

中間站時，會完成 1 次充電行為，而為端點站時平均會完成 0.5 次充電行為，此相同概念之判斷式也決定汽車 $g_{qoh_o k}^{GV}$ 參數：



$$g_{qoh_o k}^{GV} = \begin{cases} 1 & \text{若充電站 } k \text{ 為起訖路徑 } q \text{ 之中間站且位於充電設施組合 } h_o \\ 0.5 & \text{若充電站 } k \text{ 為起訖路徑 } q \text{ 之端點站且位於充電設施組合 } h_o \\ 0 & \text{若充電站 } k \text{ 不位於充電設施組合 } h_o, \text{ 但仍能服務起訖路徑 } q \end{cases}$$

藉由此兩項參數的設立，雖然本研究為確定性模型，便能夠表達補充燃料頻率此一概念，從而避免過度估算該起訖路徑之交通流量，使最佳化充電設施之佈設能夠以服務長距離旅次為主。

充電站佈設相關

$$r_{k\tau} \geq r_{kt} \quad \tau = t + 1 \dots T, \forall t \in T \quad (3.4)$$

$$m_{k\tau} \geq m_{kt} \quad \tau = t + 1 \dots T, \forall t \in T \quad (3.5)$$

$$n_{k\tau} \geq n_{kt} \quad \tau = t + 1 \dots T, \forall t \in T \quad (3.6)$$

$$s_{k\tau} \leq r_{kt} \quad \tau = t + 1 \dots T, \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$r_{kt} + s_{kt} = S_k \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T \quad (3.8)$$

$$r_{kt}, f_{kt}, n_{kt}, s_{kt} \in \text{Integer} \quad (3.9)$$

本研究考慮多種類之充電樁及不同佈設方式，而考慮未來電動運具數量之成長為一不可逆現象，充電樁在任一期佈設後各期不得拆除，式3.4至式3.6表達此一情境；式3.7則與充電樁相反，在任一期當中加油站油槍不得因任何方式增加；式3.8則限制加油站油槍汰換至充電樁之數量需維持現期加油站油槍總數量。

成本預算相關

$$\sum_{k \in K} C_{fast}^{RC}(r_{k\tau} - r_{kt}) + C_{fast}^{NEW}(m_{k\tau} - m_{kt}) + C_{noraml}^{NEW}(n_{k\tau} - n_{kt}) \leq B_t \quad (3.10)$$

$$\tau = t + 1 \dots T, \quad \forall t \in T$$

式3.10為成本預算相關限制式，其表示每一年期重建快速充電樁以及新增快速、一般充電樁之總成本不得超過該期之預算，且剩餘之預算不得留至下一期使

用。

捕捉流量相關

$$\sum_{h_t | b_{qth_t}^{EV}=1} y_{qth_t}^{EV} \leq 1 \quad \forall q \in Q, \quad \forall t \in T \quad (3.11)$$

$$\sum_{h_o | b_{qoh_o}^{GV}=1} y_{qoh_o}^{GV} \leq 1 \quad \forall q \in Q, \quad \forall o \in O, \quad \forall t \in T \quad (3.12)$$

$$y_{qth_t}^{EV} \geq 0 \quad \forall q \in Q, \quad \forall h \in H_t^{EV}, \quad \forall t \in T \quad (3.13)$$

$$y_{qoh_o}^{GV} \geq 0 \quad \forall q \in Q, \quad \forall o \in O, \quad \forall h_o \in H_o^{GV}, \quad \forall t \in T \quad (3.14)$$

在本研究的假設當中，任一起迄點旅次只要經過國道加油站之節點就必須進行補充燃料行為，然而由於本研究考慮補充燃料設施有容量限制，因此有些旅次可能無法被服務，如式3.11至式3.14所示，對於電動運具或非電動運具而言，任一起迄路徑 q 上交通流量有可能僅部分被捕捉，因此 $y_{qth_t}^{EV}$ 和 $y_{qoh_o}^{GV}$ 為 0-1 的連續變數，用以表達容量限制的影響。

在現實情境下，若任一旅次無法於國道當中補充燃料，則代表可能需要離開匝道口以補充燃料，但該一偏離路徑的行為並不包含在本研究模式討論範圍當中。



第四章 案例測試與分析



在本章節當中，將會運用第三章所建立的模式針對案例進行測試，並於章節4.1中說明選用案例情境及相關參數設定，並於4.1.1節介紹如何處理國道相關資料，接著在4.1.2說明測試結果；

4.1 案例說明

本研究之案例測試以國道一號，即中山高速公路作為主要情境進行最佳化求解，並進行後續分析。國道一號全長 374.3 公里，設有一般交流道 70 個、系統交流道 15 個以及 6 個服務區，全線使用電子收費，雖然不及國道三號之路線長度，但由於建成時間早，途經台灣西部生活圈重要都市，其每日交通流量更勝國道三號，其路網如圖4.1.1所示。交通量方面，本研究利用交通部高速公路局 [2016] 公開之各旅次路徑原始資料 (M06A)，並將該資料進行前處理以符合模式使用，其處理方式將會在下一章節4.1.1介紹。

在參數設定方面，包含外顯參數和隱含參數，前者為成本預算和設施容量，後者則為運具續航力和電動汽車比例等影響補充燃料設施組合之參數。外顯參數方面，本研究欲求解國道加油站轉換充電站之議題，轉換具有兩種方式，其一為油槍汰換為快速充電樁，以 1:1 數量之方式進行重建，其二則為新增充電樁，可設置快速充電樁或一般充電樁，容量方面，假設一般汽車加油時間為 5 分鐘，則單一油槍一日可服務 480 輛汽車，對於快速充電樁，目前 10 分鐘能夠提供約 100 公里之續航力，若駕駛平均花費 20 分鐘進行充電，其單一快速充電樁可服務 120 輛車，而一般充電樁平均需花費 10 至 12 個小時才能完成充電，本研究假設其服務量為快速充電樁之 $\frac{1}{20}$ 倍，則一日可服務 6 輛車；而國道加油站原始油槍數量則依照交通部高速公路局 [2023] 所公布之國道加油站設施數量統計表進行設定。在成本預算方面，總預算參考交通部 [2023] 之規劃，設定為 2,000,000 美元，每個年期平均分配 400,000 美元，快速充電樁建造成本則參考Yang [2018]，重建油槍為充電樁為 40,000 美元，而新增充電樁因包含土地成本為 90,000 美元，而一般充電樁則參考為 2,500 美元，其中每一年期之維護成本已於建造時考慮，故不另外

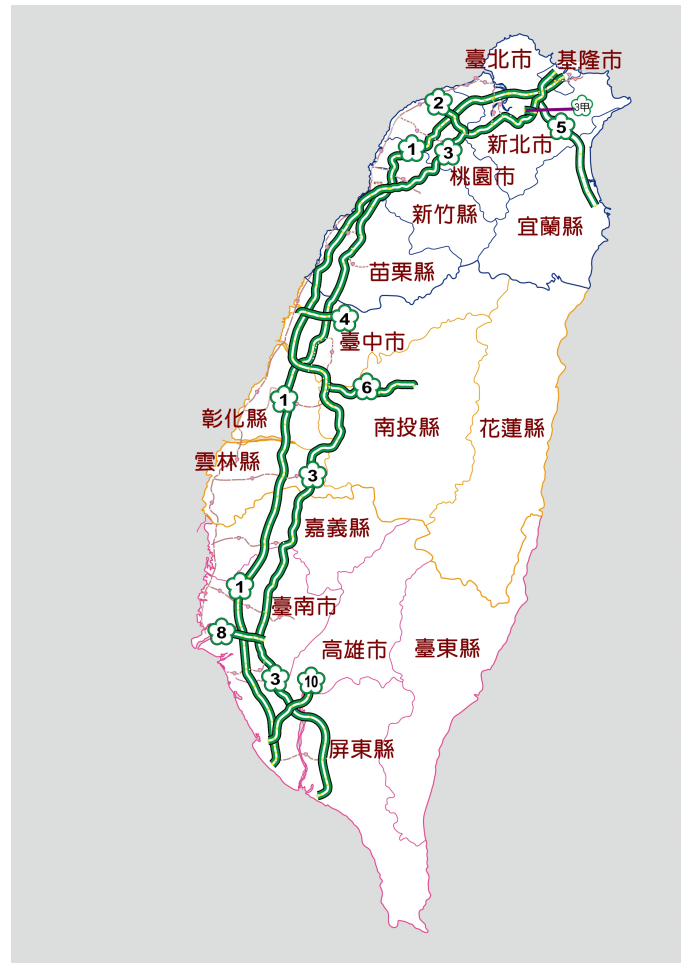


圖 4.1.1: 國道一號路網示意圖
資料來源：行政院全球資料網

增加維護成本項。

隱含參數方面，由於電動汽車續航力較低，對於長距離行駛之充電行為更加敏感，根據DOE [2021] 之統計，電動汽車平均續航力為 349 公里，而一般汽車則為 665 公里，本研究設定前者之續航力為 400 公里，後者續航力則固定為 650 公里，而考慮電動汽車科技之演進，其續航力以線性成長方式於 2050 年增加至 600 公里；在各類運具於起點出發時，假設電動汽車駕駛對長距離行駛較無信心，因此預設以滿電量狀態上路，而汽車由於續航力較高，且加油站佈設數量遠多於充電站，駕駛較不擔心補充燃料問題影響，因此汽車上路時將平均分配油箱油量，分別以每十個百分比（即 10% 至 100%）共分十個油量級距建立補充燃料組合；多年期方面，以 2050 年碳排放淨零之目標，自 2025 年開始，五年為一期，共分五期進行充電樁不設；電動汽車比例方面，將依據交通部 [2023] 分別以五期末年之比例進行參數設定，亦即 2030、2035、2040 年之普及率，假設 2050 年運具完全電動化，並利用線性內插法決定 2040 年之比例。本研究所使用參數細項如

表4.1.1所示。

表 4.1.1: 案例測試之參數設定與說明

外顯參數		
代號	解釋	數值
Ca^{GV}	每日單一油槍可服務汽車之容量	480
Ca_{fast}^{EV}	每日單一快速充電樁可服務電動汽車之容量	120
Ca_{normal}^{EV}	每日單一般充電樁可服務電動汽車之容量	6
S_k	對於休息站位置 k ，現年之國道加油槍數量	依照交通部高速公路局 [2023] 設定
B_t	為 t 年時，建設充電樁之預算。	400,000 美元 (交通部 [2023])
C_{fast}^{RC}	充電樁汰換油槍重建之成本	40,000 美元 (Yang [2018])
C_{fast}^{NEW}	增設額外快速充電樁之成本	90,000 美元 (Yang [2018])
C_{normal}^{NEW}	增設額外一般充電樁之成本	2,500 美元 (公路總局 [2022])
隱含參數		
名稱	解釋	數值
電池容量	隨著科技進步，每一年期之電池容量增加	400、450、500、550、600 (DOE [2021])
油箱容量	固定容量	650 (DOE [2021])
電動汽車比例	以 2050 年為目標年，每一年期之佔比	7.3%、20.3%、43.2%、71.6%、100% (交通部, 2023)
電動汽車出發電量		假設為滿電量
汽車出發油量		假設油量以 10% 至 100% 均勻分布
旅次距離		依國道一號里程數進行設定

4.1.1 國道資料前處理

由於目前台灣之高速公路收費已完全電子化，因此本研究將利用高速公路電子收費系統 (Electronic Toll Collection，以下簡稱 ETC) 處理而得交通量及補充燃料設施組合，高速公路的 ETC 資料，是以 ETC 門架 (以下簡稱門架) 偵測到每輛車通過門架的時間為基準經過統計運算產生。目前門架架設的位置包含：國道一號、國道三號、國道五號、國道三號甲線、汐止五股高架道路與五股楊梅高架道路。高速公路局所開放之資料包含：各類車種通行量統計 (M03A)、站間各車種平均旅行時間 (M04A)、站間各車種平均行駛車速 (M05A)、各旅次路徑原始資料 (M06A)、各類車種旅次平均長度 (M07A)、各類車種旅次數 (M08A) 等六項報表，其中以 M06A 完整記錄旅次行經各門架資料，本文的案例分析即以 M06A 為基準分析。M06A 之資料為各旅次之完整行駛路徑資料，旅次是指一

表 4.1.2: M06A 檔案內容



代號	說明
VehicleType	車種，31 為小客車、32 為小貨車、41 為大客車、42 為大貨車、5 為聯結車
DetectionTime_O	車輛通過本旅次第 1 個偵測站時間
GantryID_O	車輛通過本旅次第 1 個偵測站編號
DetectionTime_D	車輛通過本旅次最後 1 個偵測站時間
GantryID_D	車輛通過本旅次最後 1 個偵測站編號
TripLength	本旅次之行駛距離
TripEnd	旅次結標記 (Y：旅次正常結束；N：異常)
TripInformation	本旅次經過的各個偵測站之通過時間及偵測站編號

資料來源：交通部高速公路局 [2015]

車輛自進入交流道到離開交流道稱為一個旅次，時間範圍為一天，符合本研究所需，其檔案各項目內容及說明如表4.1.2所示，測站編號如表所示。

本研究使用 2023 年 5 月 3 日之 ETC 資料做為測試資料，起訖旅次限於國道一號，首先排除國道一號與其他國道相接或其他國道進入國道一號匝道之起訖旅次，利用 TripEnd 判斷並排除異常之旅次以及將所有車種視為單一車種進行後續處理，接著利用 GantryID_O 和 GantryID_D 判斷每一旅次之進出匝道，並分辨北上和北上車次，在進行偵測站編號比對時，部分編號無法與手冊文件中對應，例如編號 01F0339N，經查詢後為高速公路局之匝道口，此部分資料經增設站點後也納入旅次需求之中，而部分旅次則出現進出國道一號為同一匝道之情形，其原因為匝道口距離之間太短，例如林口交流道北上和南下均具有二次出口，若車輛進入國道後於二次出口離開，ETC 就會將資料記為同一匝道進出，此類旅次因無法判斷距離故將其移除，經過處理後，共計有 4014 種起訖路徑，北上具 761,325 旅次，南下具 1,042,498 旅次，總共為 1,803,823 旅次量，服務區包括中壢、湖口、泰安、西螺、新營和仁德等六個服務區，其中中壢和新營兼具服務區和匝道的功能，最後將資料依照每一期之電動汽車比例分類旅次需求，並經由章節3.3.3.1之演算法分別產生電動汽車和汽車之補充燃料設施組合 H_t^{EV} 和 H_o^{GV} ，以此產生其餘參數，提供模式運作。

4.1.2 測試結果

本模式利用 AMPL 建構，並利用 gurobi 求解，在 Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU @ 2.30GHz 之測試環境下運行，除了利用目前參數進行最佳化求解外，為了瞭解模式的效能，同時也測試在無預算限制之情形，從而比較每一期之兩種不同燃料運具流量之服務率，兩者之測試服務率和所能服務之車流量如圖4.1.2以及圖4.1.3所示，佈設充電樁之數量及位置如表4.1.3至表4.1.8所示。由結果可以發現，以現行汽車之續航力和加油站油槍佈設數量能夠完全服務每一期汽車之交通量，而在電動車的服務率上，除了第一期可服務超過五成的交通量外，之後每一期都逐漸下降，第五期之服務率則僅接近四成；原始參數在充電樁設置方面，每一期的所有預算都以重建快速充電樁為優先，並無新增任何形式之充電樁，以新營服務區佈設最多充電設施，原始案例設置結果分別如表4.1.1、4.1.3和表4.1.5所示；在無預算限制方面，從表4.1.4可以發現第五期會將所有的油槍轉換為充電樁，推測是由於前四期仍有汽車之流量，因此模式選擇以新增快速充電樁為主要佈設方式，只在第五期已無汽車流量時轉換所有油槍為充電樁，另外結合表4.1.6可發現充電樁之佈設只發生在第一期、第三期和第五期，亦即第一期佈設的數量也足以服務第二期之流量，同樣地第三期新增之充電樁也能夠滿足第四期之需求，直到第五期增加充電樁以服務更多轉換車流。

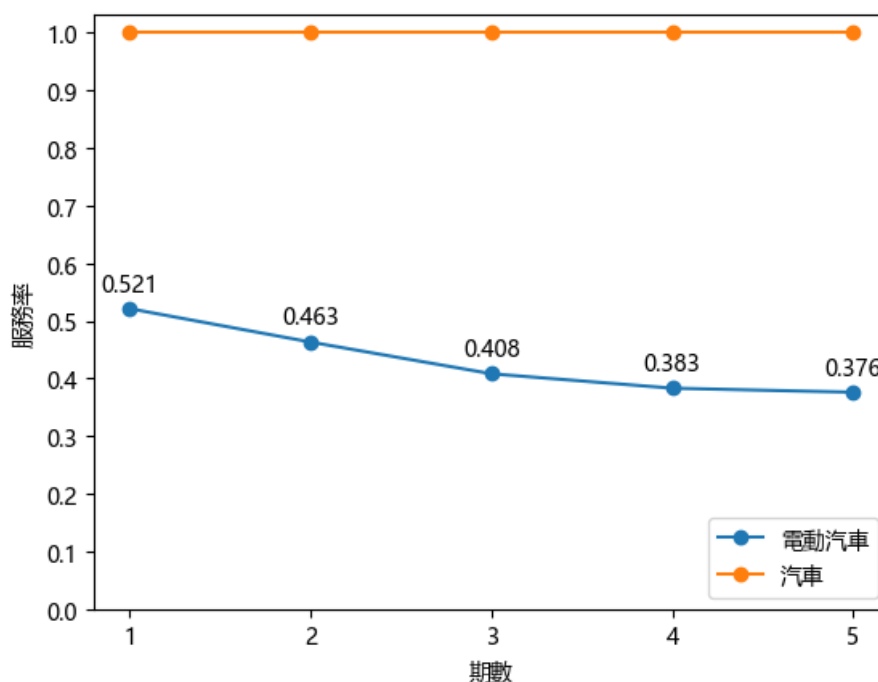


圖 4.1.2: 運具流量服務率 (原始參數)

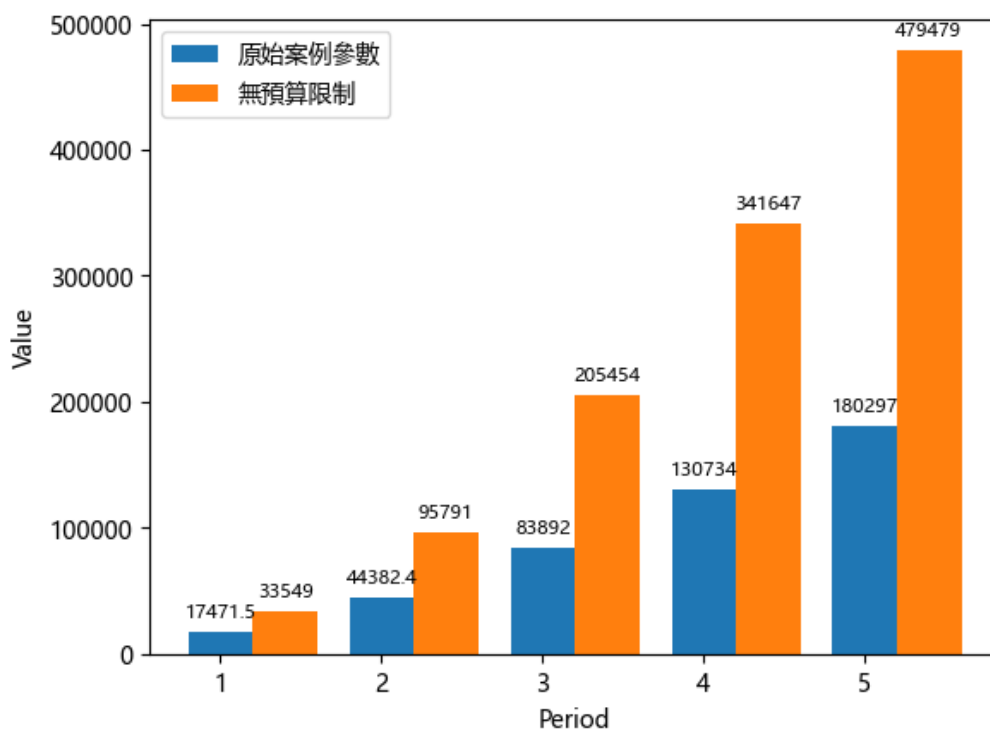


圖 4.1.3: 運具服務車流量 (原始參數)

表 4.1.3: 各期重建快速充電樁數量 (原始參數)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	6	6	4	4	24
湖口服務區	1	2	1	2	2	8
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	0	1	0	2
新營服務區	1	0	1	0	2	4
仁德服務區	2	2	2	2	2	10

表 4.1.4: 各期快速重建充電樁數量 (無預算限制)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	0	0	24	24
湖口服務區	0	0	0	0	48	48
泰安服務區	0	0	0	0	72	72
西螺服務區	0	0	0	0	68	68
新營服務區	0	0	0	0	48	48
仁德服務區	0	0	0	0	48	48

表 4.1.5: 各期新增快速充電樁數量 (原始參數)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	0	0	0	0
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

表 4.1.6: 各期新增快速充電樁數量 (無預算限制)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	34	0	73	0	9	116
湖口服務區	16	0	33	0	0	49
泰安服務區	21	0	37	0	0	58
西螺服務區	29	0	58	0	0	87
新營服務區	17	0	33	0	0	50
仁德服務區	25	0	48	0	0	73

表 4.1.7: 各期新增一般充電樁數量 (原始參數)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	0	0	0	0
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

表 4.1.8: 各期新增一般充電樁數量 (無預算限制)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	0	0	0	0
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0



4.2 敏感度分析

為了測試模型的穩健程度以及深入探討不同變量對結果的影響，本研究將進行敏感度分析，首先針對電動汽車不同年期的電池容量——亦即續航力——進行探討，分析不同充電設施組合設置以及來回起訖路徑頻率對於交通量服務率以及充電設施佈設的影響。電池容量愈大，續航力愈長，原來無法服務之起訖路徑也能夠被納入充電設施組合涵蓋的範圍中，進而影響被服務的交通量。

探討完電池容量後，後續會針對快速及一般充電樁容量、總預算、快速及一般充電樁成本以及初始油槍數輛進行各項的細部分析，期望透過測試了解不同因素產生的影響。在此章節所測試之不同變量的結果，無論是重建或新增充電樁，若該項敏感度測試有部分策略並未設置任何充電樁，則不會額外建置表格而改以內文敘述。

4.2.1 電池容量

在案例測試當中，隱含參數將電池容量續航力之不同其數的成長設定為 400、450、500、550 以及 600 公里，400 公里是基於目前電動車平均續航力而假設第一期的續航力而得，並考慮接下來 20 年電池容量將進步 150% 而得第五期之 600 公里續航力，其中計劃其為平均分配進步容量。在本小節當中將分別以增加每一期容量之 10%、20% 以及 30% 來分析電池容量之成長對於運具流量服務率之影響；增加 10% 後各期電池續航力為 440、495、550、605、660 公里，增加 20% 後各期為 480、650、600、660、720 公里，而增加 30% 後分別是 520、585、650、715 和 780 公里。

當電池容量有所增加，與其他單純調整其他變量不同，首先會需要重新設置補充燃料設施組合，當電動運具之續航力改變，就表示原來能服務或不能服務的補充燃料設施位置就會有所變動，而改變充電設施組合 H_t^{EV} 後， b_{qtht}^{EV} 和 $g_{qtht,k}^{EV}$ 也會需要重新設定參數，最後則是會對 e_{qt}^{EV} 之值產生最大的影響，因其比例之計算式與電動車最大續行距離相關。

從測試結果來看，無論是當各期電池容量增加 10%、20% 或 30% 時，雖然整體而言會因為某些充電設施組合改變而對電動運具流量服務率有正向的影響，但其增加幅度與原始參數案例比較幾乎沒有差別，即使電池容量增加 30%，第五期

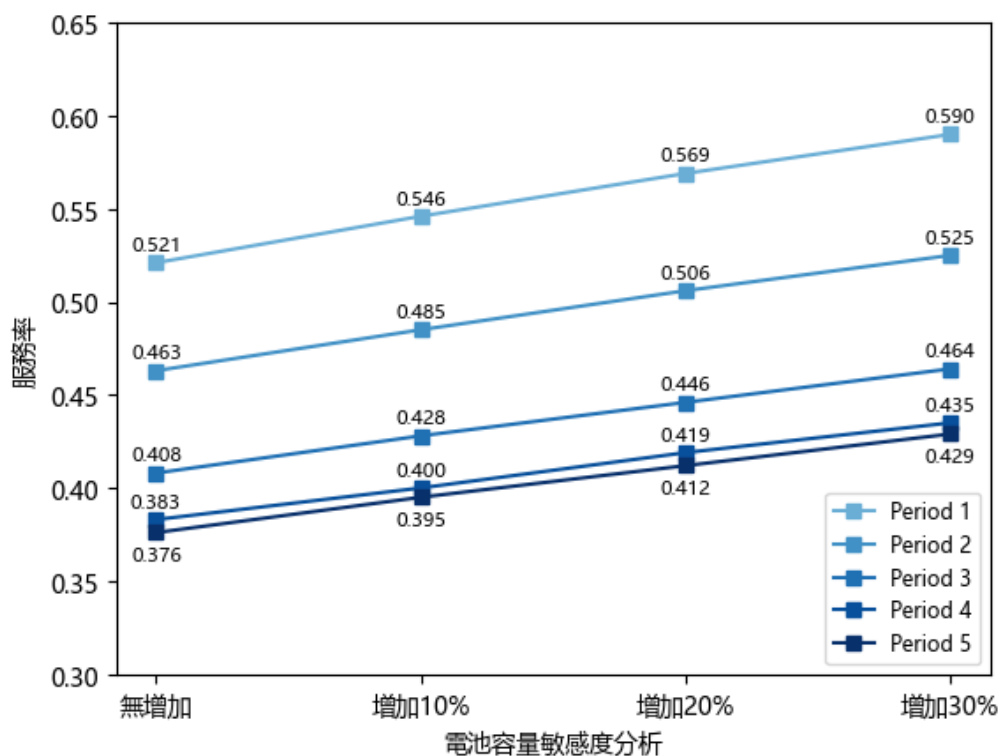


圖 4.2.4: 電池容量敏感度分析

之服務率仍只有 42.9%，與原來案例相比只增加 5.3%，而從表4.2.9至表4.2.10可以觀察到各方案決定設置充電樁的期數、數量以及位置也幾乎沒有改變。以目前國道一號一日中所產生的旅次和原始設定電動車最大續航力 400 公里而言，即便考慮其往返距離，實際上單日也鮮少有旅次會駕駛超過 400 公里，而當電池容量提升後，雖然有額外捕捉到原來沒有辦法服務的長距離旅次，但因為其數量較少，因此對於整體電動運具服務率並沒有顯著的提升效果。

表 4.2.9: 各期重建充電樁數量 (電池容量增加 10%)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	5	7	4	4	24
湖口服務區	1	2	1	2	1	7
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	0	0	1	2
新營服務區	1	0	1	1	1	4
仁德服務區	2	3	1	2	3	11

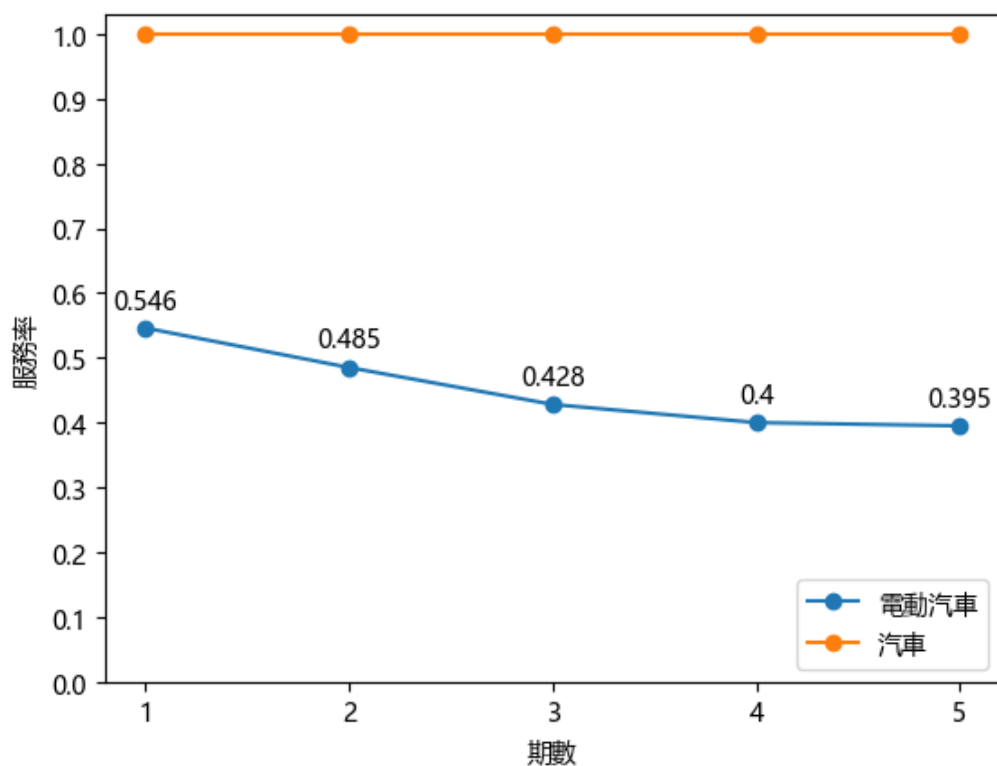


圖 4.2.5: 運具流量服務率 (電池容量增加 10%)

表 4.2.10: 各期重建充電樁數量 (電池容量增加 20%)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	5	6	5	4	24
湖口服務區	1	2	1	1	2	7
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	1	1	0	3
新營服務區	1	0	1	0	1	3
仁德服務區	2	3	1	2	3	11

表 4.2.11: 各期重建充電樁數量 (電池容量增加 30%)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	5	6	5	4	24
湖口服務區	1	2	1	1	2	7
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	1	0	1	3
新營服務區	1	0	1	1	0	3
仁德服務區	2	3	1	2	3	11

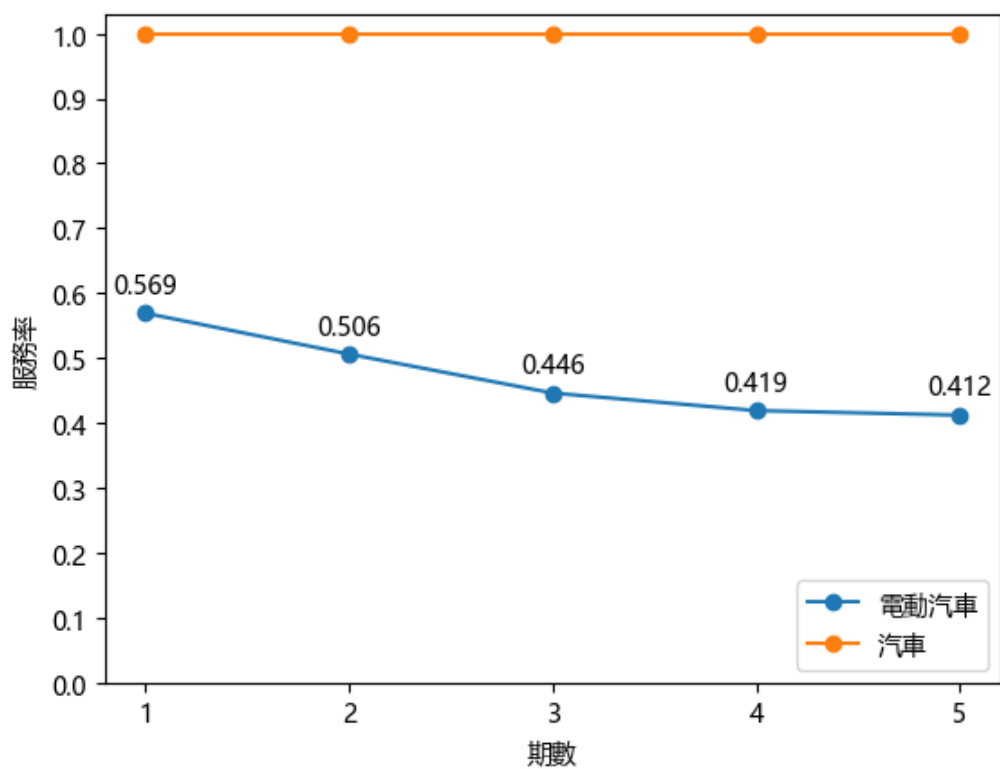


圖 4.2.6: 運具流量服務率 (容量增加 20%)

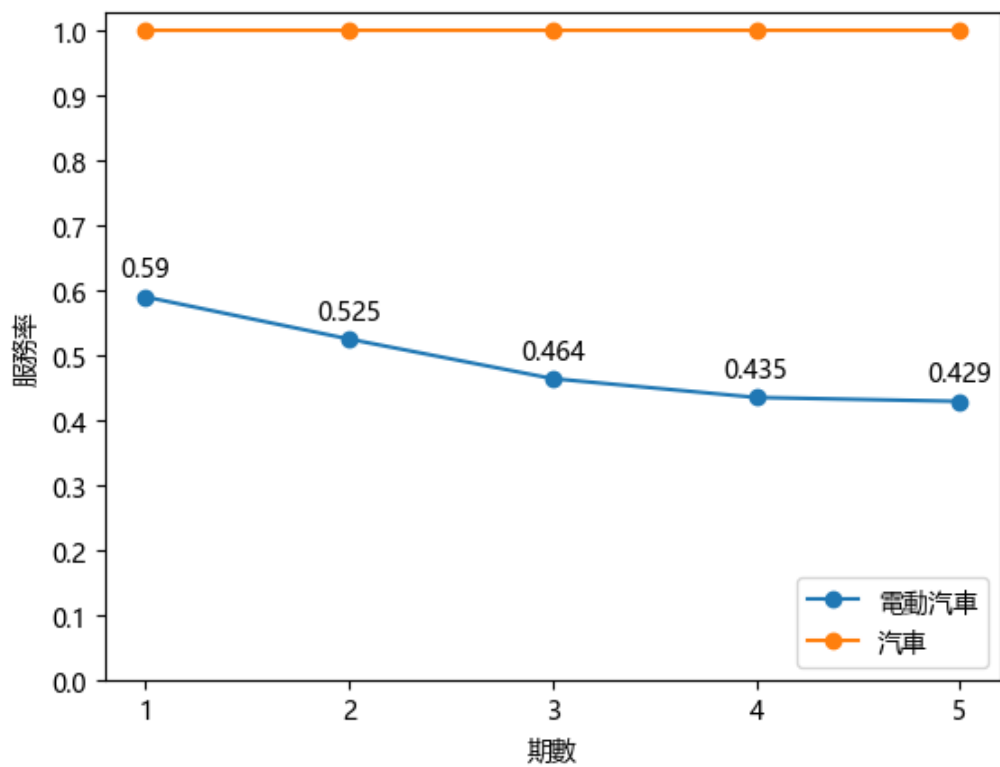


圖 4.2.7: 運具流量服務率 (容量增加 30%)



4.2.2 補充燃料設施容量

本研究考慮充電樁和油槍兩種補充燃料設施，充電樁又可以細分為快速及一般充電樁，三者差異在於容量大小不同，從原始參數之測試可發現，模式優先選擇快速充電樁進行設置，若增加各個種類充電樁之容量大小，應對能服務之運具流量產生影響，故以下將更改補充燃料設施容量進行分析。

4.2.2.1 快速充電樁容量

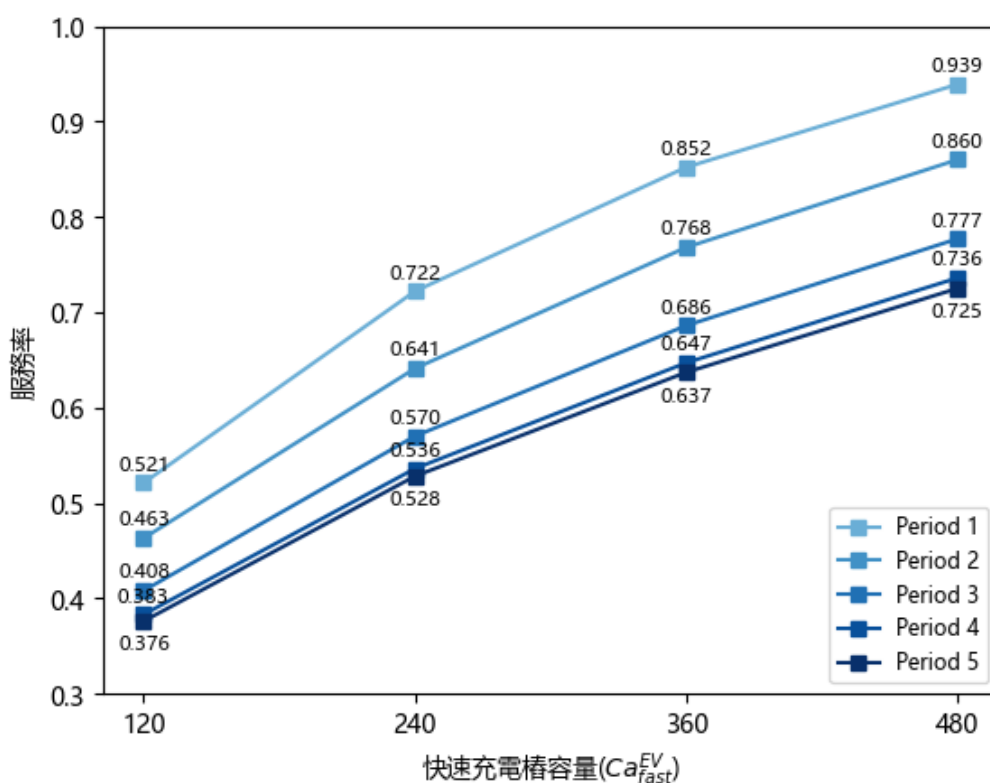


圖 4.2.8: 快速充電樁容量敏感度分析

在原始參數中，單支快速充電樁容量設定為每天服務 120 次車流量，在此章節中將快速充電樁進行 2、3、4 倍之提升，最大值與單一油槍之容量相等，此為基於電動運具之技術進步用以取代汽車的假設。與原案例進行比對，在快速充電樁提高的情形下，每一期的服務率都呈現正向成長，但有逐漸趨緩的態勢，其中在容量為 480 時，第五年期服務率為 72.5%，與原始案例相比增加將近兩倍，雖然不同期之間服務率增加，但在不同容量之間第一期至第五期之服務量仍呈現下降的趨勢；在充電樁佈設方面，與原始參數案例相同，模式僅選擇重建充電樁之方式，並沒有任何新增設施之作法，同樣地，在容量參數的提升下重建快速充電

樁仍以中壢服務區和仁德服務區設置為主，且因為容量增加而不需要全部重建中壢服務區之油箱後，將大部分剩餘預算下能建造之充電樁轉移給仁德服務區，其趨勢也符合車流量通過不同服務區數量的統計資料。



表 4.2.12: 各期重建充電樁數量 ($Ca_{fast}^{EV}=240$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	3	4	5	5	4	21
湖口服務區	1	2	1	2	2	8
泰安服務區	1	1	0	0	1	3
西螺服務區	1	0	1	0	1	3
新營服務區	1	0	1	1	0	3
仁德服務區	3	3	2	2	2	12

表 4.2.13: 各期重建充電樁數量 ($Ca_{fast}^{EV}=360$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	2	4	4	4	3	17
湖口服務區	2	0	2	1	2	7
泰安服務區	1	1	0	1	1	4
西螺服務區	1	1	0	1	1	4
新營服務區	1	1	0	1	0	3
仁德服務區	3	3	4	2	3	15

表 4.2.14: 各期重建充電樁數量 ($Ca_{fast}^{EV}=480$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	2	3	3	4	3	15
湖口服務區	1	1	2	1	2	7
泰安服務區	1	0	1	1	0	4
西螺服務區	1	2	0	0	1	4
新營服務區	1	1	1	0	1	4
仁德服務區	3	3	3	4	3	16

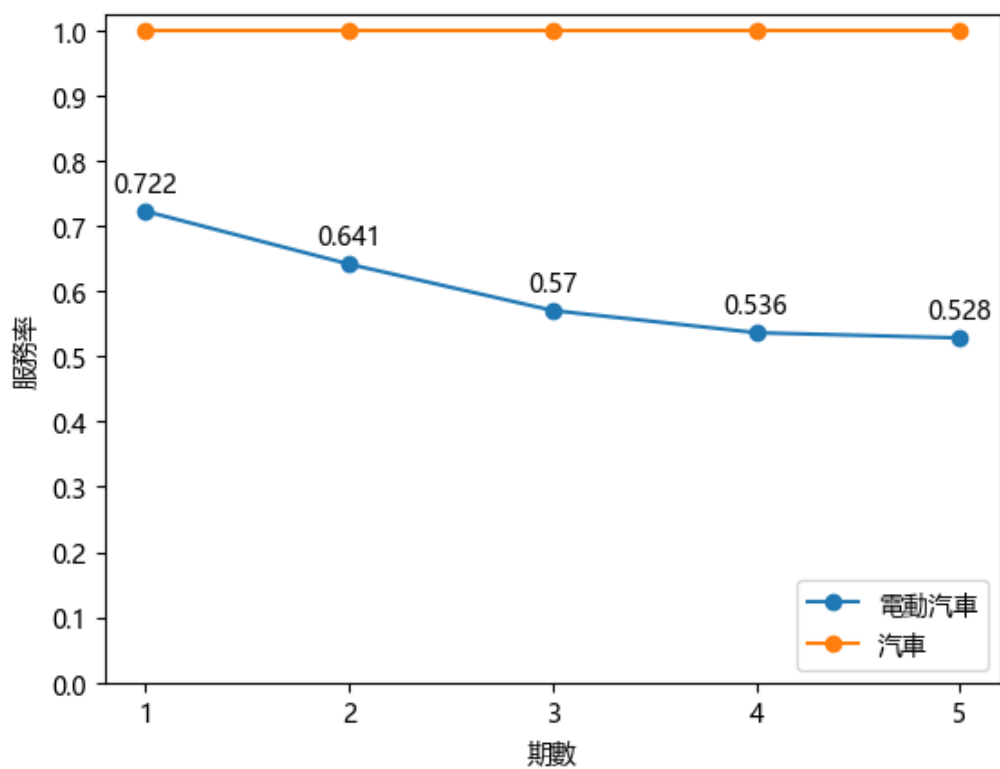


圖 4.2.9: 運具流量服務率 ($Ca_{fast}^{EV} = 240$)

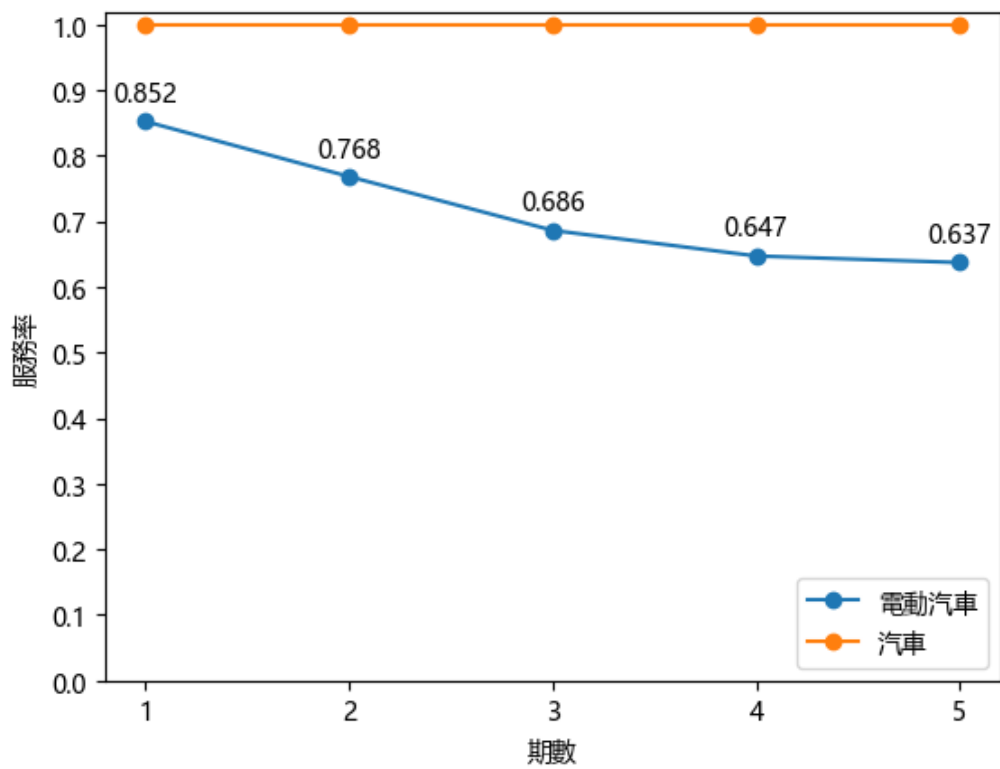


圖 4.2.10: 運具流量服務率 ($Ca_{fast}^{EV} = 360$)

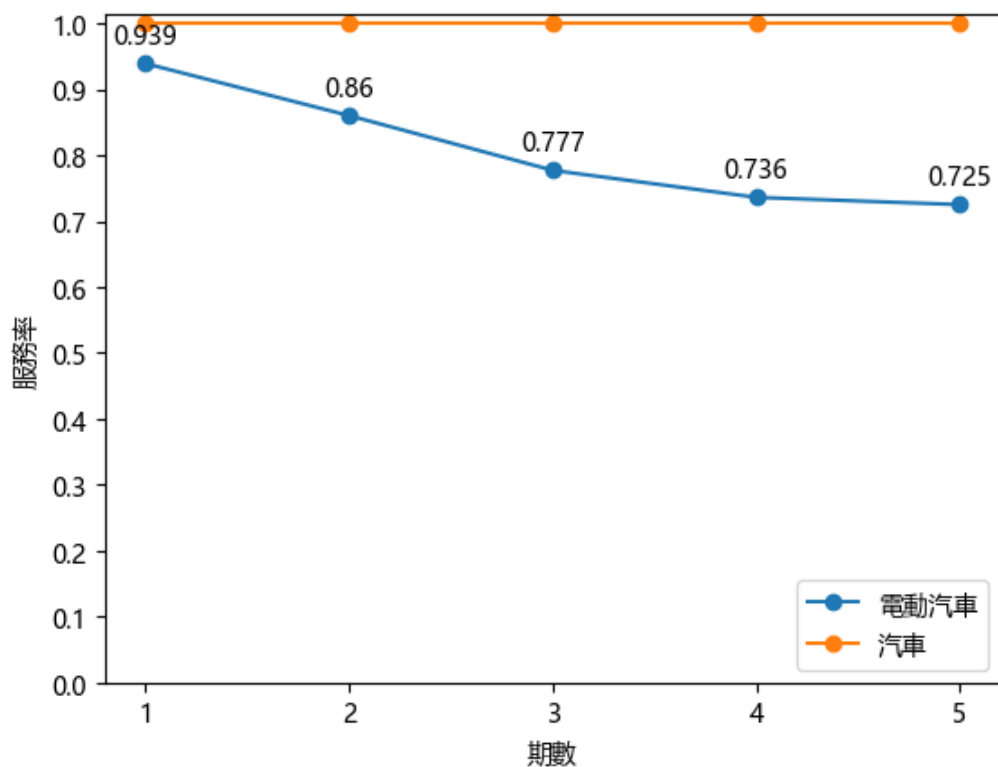


圖 4.2.11: 運具流量服務率 ($Ca_{fast}^{EV}=480$)

4.2.2.2 一般充電樁容量

在上述的參數設置下進行測試後，並無任何新增快速或一般充電站之作法被模式選擇，在原來的設想當中，由於一般充電樁設置成本低廉，係為重建快速充電樁之 $\frac{1}{16}$ 倍成本，即便容量不多，可能以較為彈性之方式捕捉電動汽車流量，故本章節將增加一般充電樁之容量進行分析。

在原始參數中，單支一般充電樁容量設定為每天服務 6 次車流量，在此將一般充電樁分別以容量 12、18 以及 24 次車流量進行測試，並與原始案例比較，當容量經過調整後，新增一般充電樁取代所有快速充電樁之建設，並以中壢、湖口以及仁德服務區為主要設置地點，此點與快速充電樁設範圍一致，從運具流量服務率方面觀察，當一般充電樁容量改變為 24 後，第一期運具服務量為 87.7%，第五期則有 65.6%，與快速充電站容量設置為 480 時相比各期差距為 6% 左右，其效益可見一斑。從實務的觀點來討論，快速充電樁之成長不如一般充電樁來得容易，且一般充電樁於汽車停車格就能夠設置，其彈性大過前者之土地需求，然而實際上一般充電樁需要 10 至 12 小時才能夠充滿電，即使容量提升，也尚需要 3 至 4 小時的充電時間，一般旅次並不會在國道服務區停等如此長時間，因此對於長距

離之旅次是否能在服務區就補充足夠的電量尚待更全面的考量。

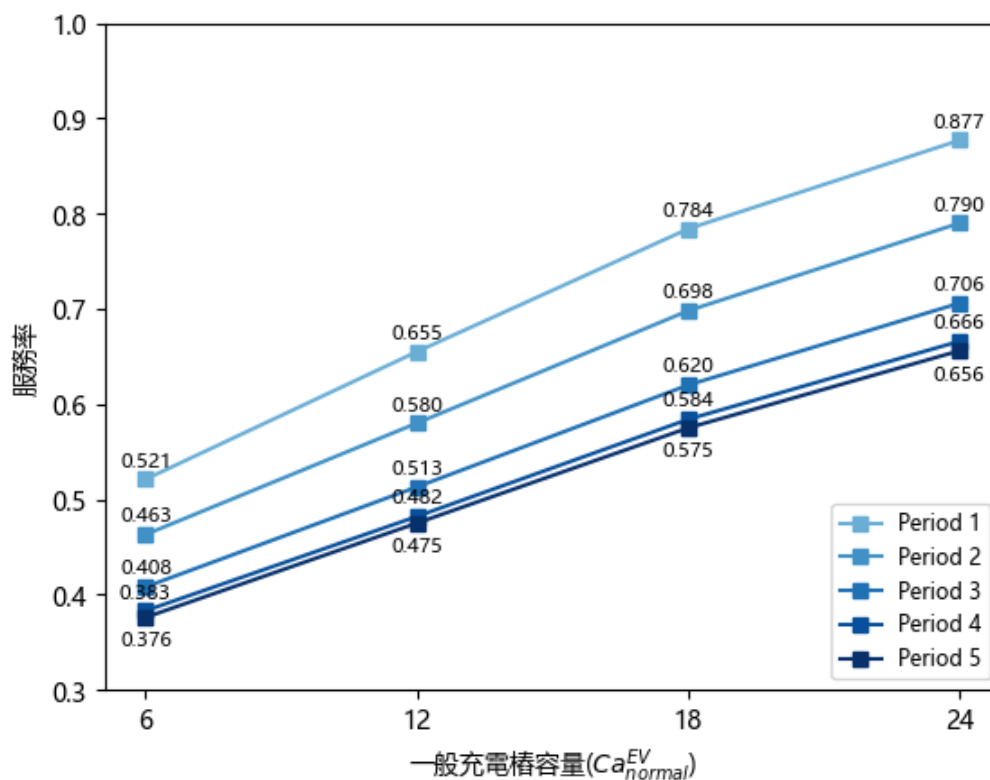


圖 4.2.12: 一般充電樁容量敏感度分析

表 4.2.15: 各期新增一般充電樁數量 ($Ca_{normal}^{EV}=12$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	56	70	87	91	73	377
湖口服務區	22	24	26	19	24	115
泰安服務區	12	11	6	0	9	38
西螺服務區	12	10	10	4	10	46
新營服務區	10	12	8	7	9	46
仁德服務區	48	33	23	39	35	178

表 4.2.16: 各期新增一般充電樁數量 ($Ca_{normal}^{EV}=18$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	47	62	69	77	57	312
湖口服務區	18	22	24	26	24	114
泰安服務區	15	11	11	8	14	59
西螺服務區	13	12	9	13	13	60
新營服務區	14	7	9	12	12	54
仁德服務區	53	46	38	24	40	201

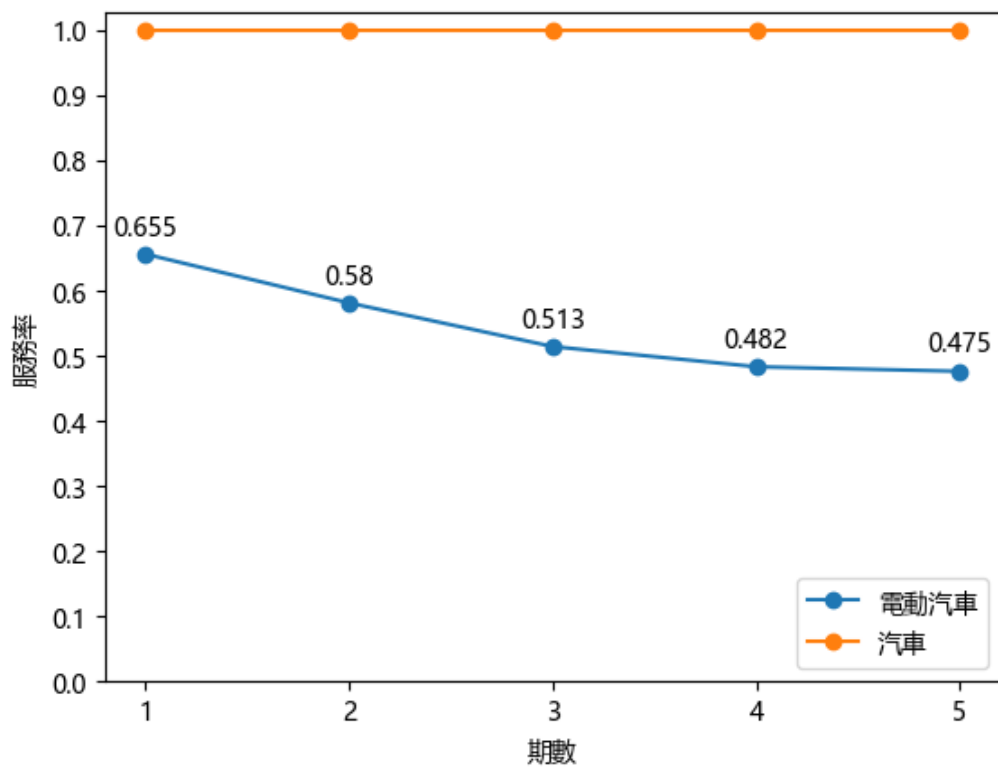


圖 4.2.13: 運具流量服務率 ($Ca_{normal}^{EV} = 12$)

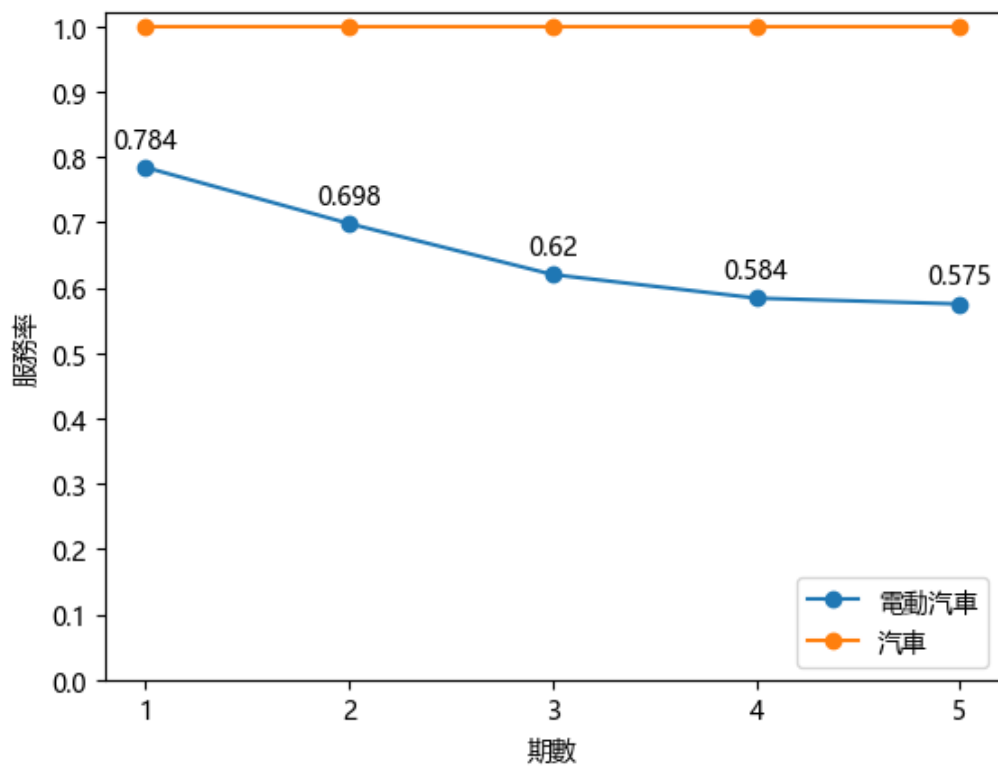


圖 4.2.14: 運具流量服務率 ($Ca_{normal}^{EV} = 18$)

表 4.2.17: 各期新增一般充電樁數量 ($Ca_{normal}^{EV}=24$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	44	36	65	62	66	273
湖口服務區	14	31	26	19	12	102
泰安服務區	17	11	11	9	12	60
西螺服務區	9	8	13	0	29	79
新營服務區	11	9	12	6	10	56
仁德服務區	41	31	23	49	10	252

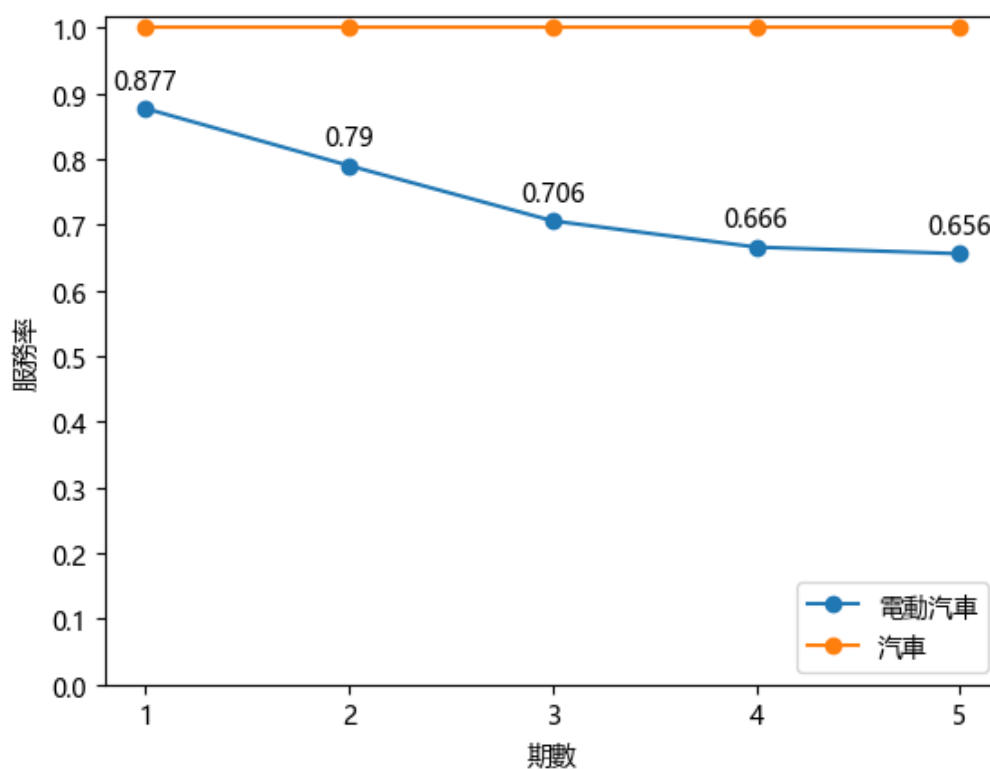


圖 4.2.15: 運具流量服務率 ($Ca_{normal}^{EV}=24$)



4.2.3 預算相關

本小節將進行與預算相關的敏感度分析，分別包括總預算、快速充電樁建造成本以及一般充電樁建造成本等三個方面進行測試，以分析此類變量對於運具服務率的影響。

4.2.3.1 總預算

在本研究目前的參數設定下，每一期最多只能夠建設 10 支快速充電樁，因此將以 500,000、600,000、800,000 以及 1,000,000 分別進行案例測試。

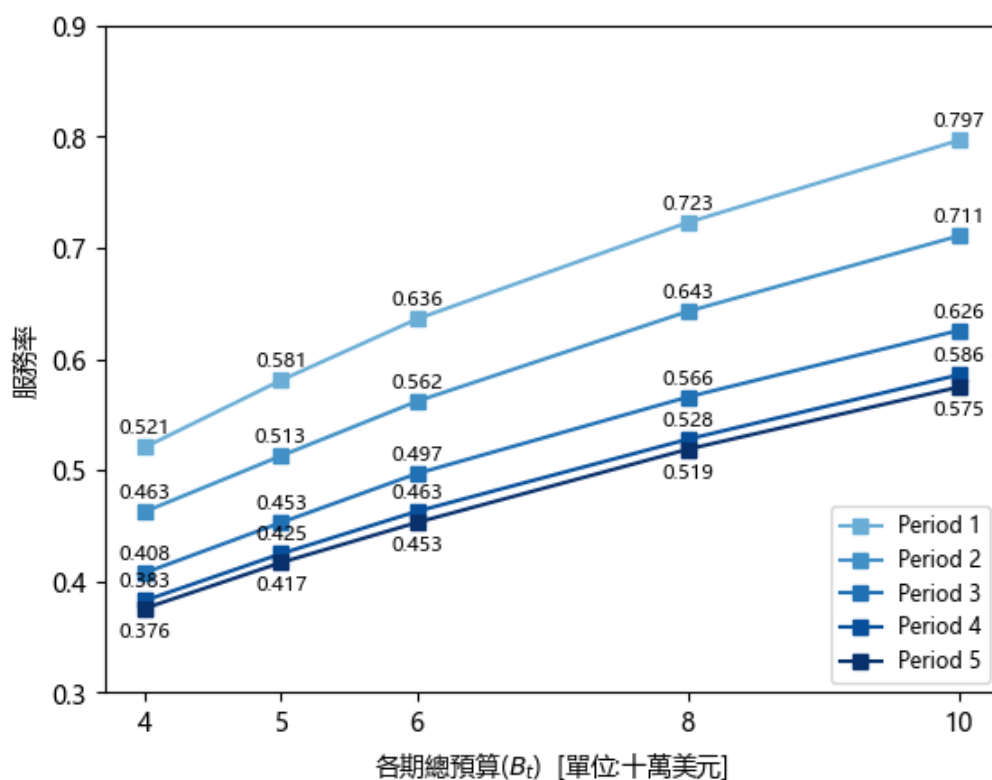


圖 4.2.16: 總預算敏感度分析

當總預算為 500,000 時，第一期服務率為 41.7%，而第五期為 58.1%，從表和表可以發現與原始參數案例重建充電樁幾乎相同，主要為湖口和仁德服務區增加充電樁，而中壢服務區則還要另外設置 40 座一般充電樁；當總預算增加無論為 600,000、800,000 或 1,000,000 時，電動運具服務率都沒有明顯的攀升，第五期服務率最高為 57.5%，係原始參數案例服務率 1.5 倍左右，這是因為主要交通流量皆有經過中壢服務區，然而該服務區能轉換之油槍數目有限，同時新增快速充電樁成本過於高昂，即使在總預算增加後能夠增設一般充電樁，對於整體服務率並沒

有產生明顯的效益，也就是說在目前的成本及容量考慮下，增加總預算並不能夠使各期整體服務率有更多的助益。

表 4.2.18: 各期重建快速充電樁數量 ($B_t=500,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	6	7	3	3	24
湖口服務區	2	2	1	3	2	10
泰安服務區	1	0	1	0	1	3
西螺服務區	1	0	1	1	2	5
新營服務區	1	1	0	1	1	4
仁德服務區	3	2	2	4	3	14

表 4.2.19: 各期新增一般充電樁數量 ($B_t=500,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	8	8	8	8	8	40
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

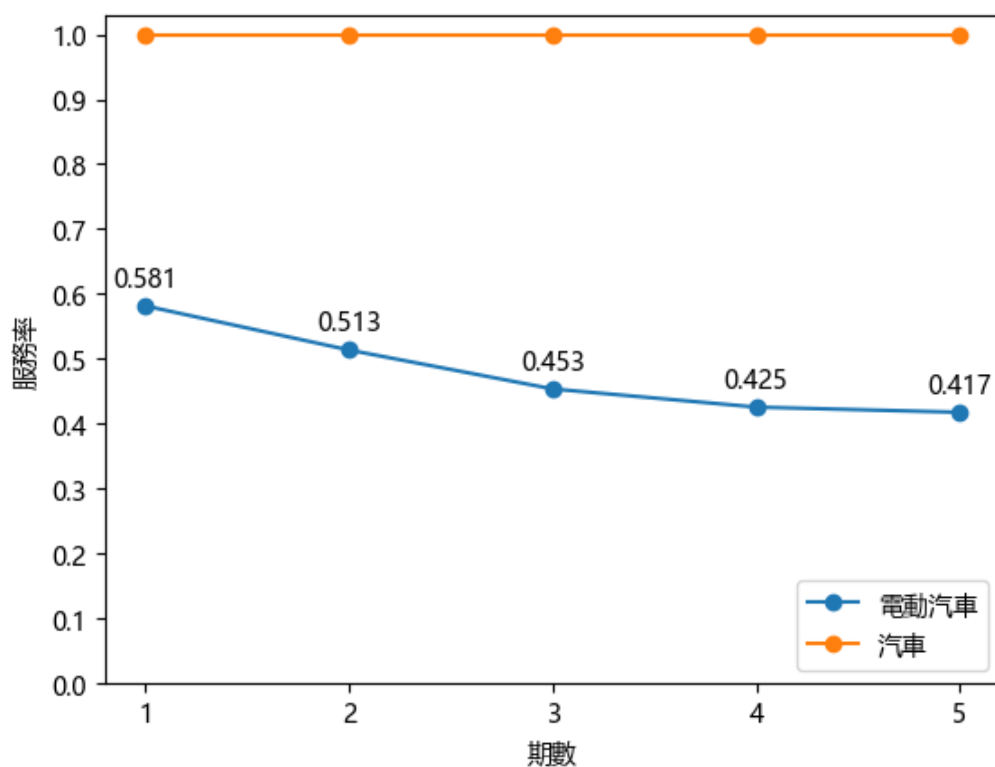


圖 4.2.17: 運具流量服務率 ($B_t=500,000$)

表 4.2.20: 各期重建快速充電樁數量 ($B_t=600,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	6	6	7	2	3	24
湖口服務區	2	2	3	3	1	11
泰安服務區	1	1	0	1	1	4
西螺服務區	1	1	1	1	1	5
新營服務區	1	1	1	1	1	5
仁德服務區	4	4	3	4	3	19

表 4.2.21: 各期新增一般充電樁數量 ($B_t=600,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	0	48	64	112
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

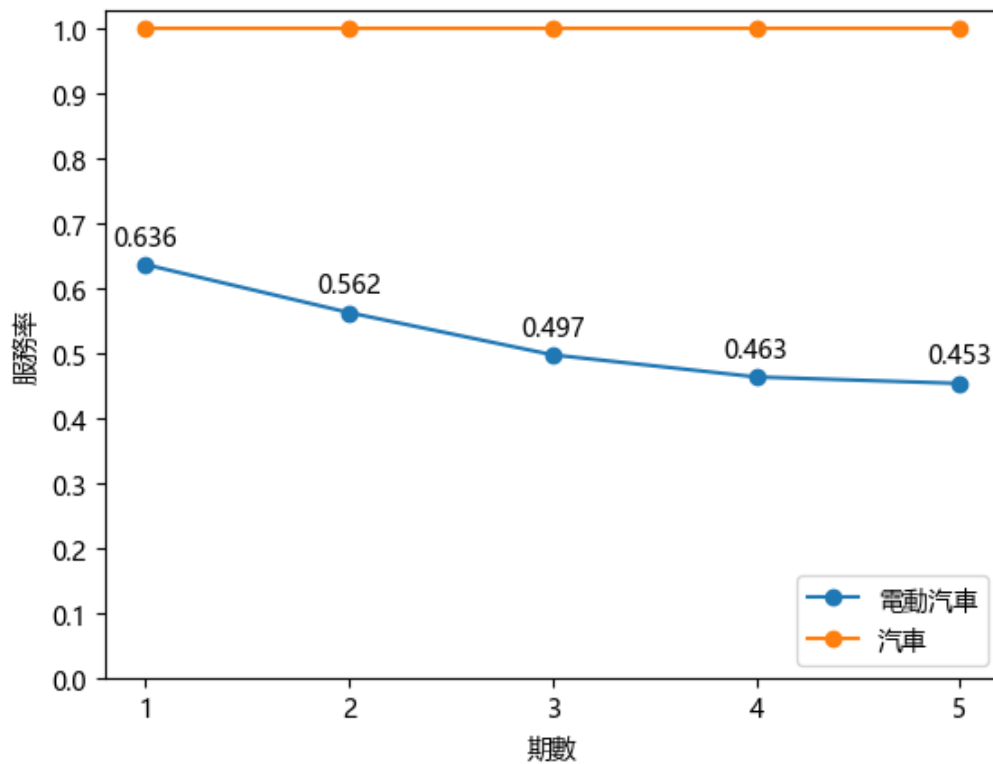


圖 4.2.18: 運具流量服務率 ($B_t=600,000$)

表 4.2.22: 各期重建快速充電樁數量 ($B_t=800,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	6	8	5	2	3	24
湖口服務區	3	2	4	4	3	16
泰安服務區	2	1	2	0	1	6
西螺服務區	1	2	2	0	1	6
新營服務區	1	2	1	2	0	6
仁德服務區	7	5	4	4	5	25

表 4.2.23: 各期新增一般充電樁數量 ($B_t=800,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	32	128	112	272
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

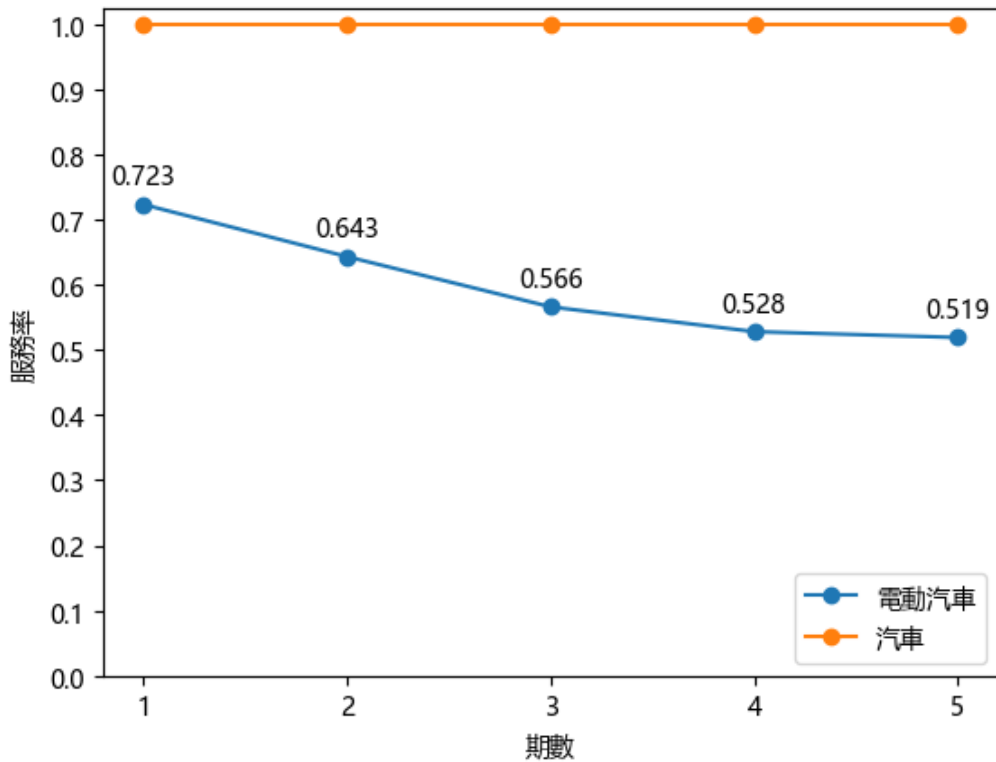


圖 4.2.19: 運具流量服務率 ($B_t=800,000$)

表 4.2.24: 各期重建快速充電樁數量 ($B_t=1,000,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	7	9	3	2	3	24
湖口服務區	3	4	4	4	3	18
泰安服務區	2	2	2	2	2	10
西螺服務區	2	2	2	1	2	9
新營服務區	3	0	2	2	1	8
仁德服務區	8	8	7	5	7	35

表 4.2.25: 各期新增一般充電樁數量 ($B_t=1,000,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	80	144	112	336
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

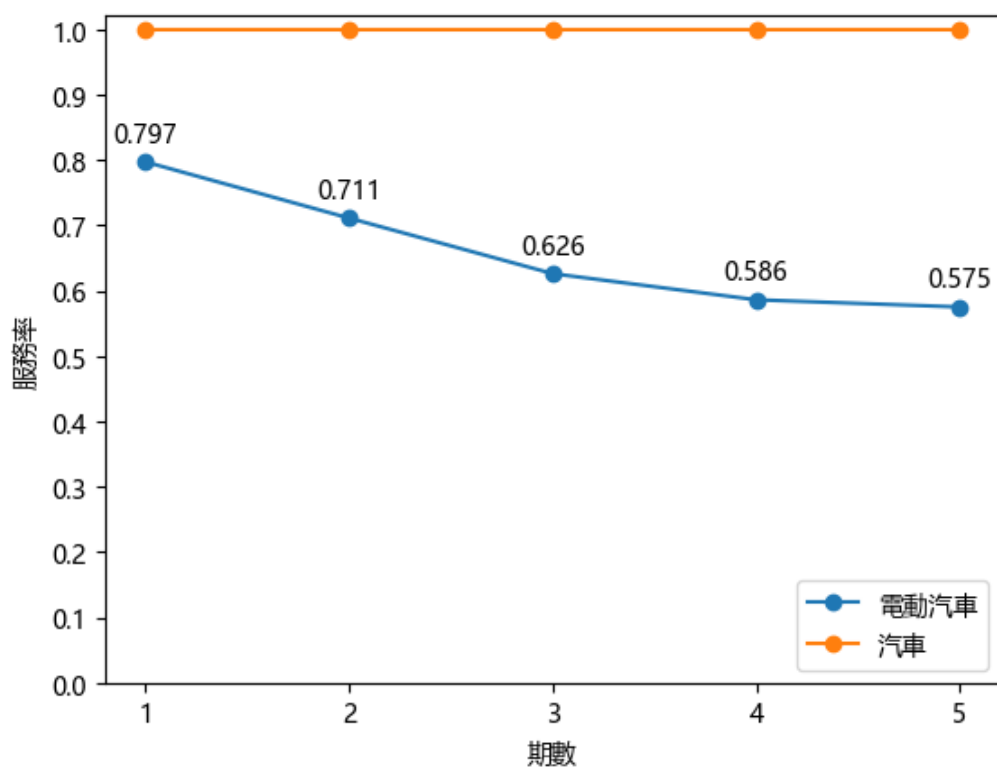


圖 4.2.20: 運具流量服務率 ($B_t=1,000,000$)

在多年期的問題當中，有關於固定資產的設置成本或預算的計算當中，殘值 (Residual value) 議題是經常被考慮到的部分，雖然說本研究只有五期，但實際上充電樁在五期計畫之後仍舊會一直存在並被使用，若在模式當中考慮到其之後的價值，可能會在前面的計畫期中更積極設置充電樁，但在本研究當中，每一期的預算皆完全使用，且即使如此第五期一即運具完全電動化一仍舊無法完全服務電動運具之流量，換言之，即使殘值問題會影響充電樁之設置，也沒有多餘預算可以被使用，也因此本研究在目前的參數設置下並沒有考慮殘值的問題。

4.2.3.2 快速充電樁建造成本

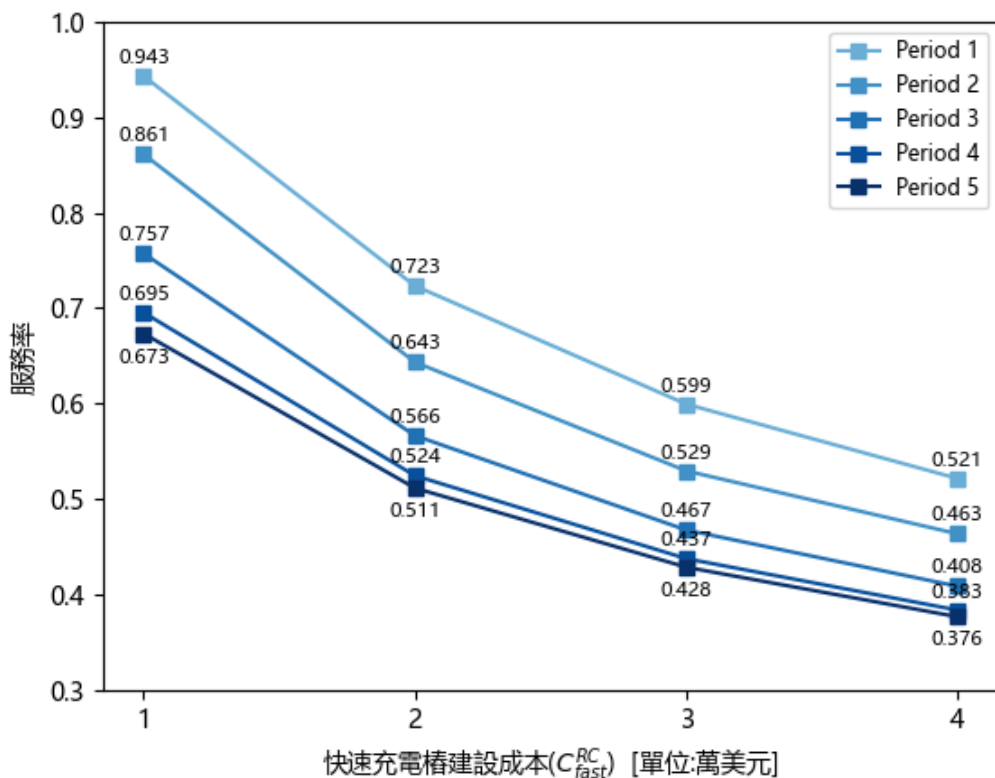


圖 4.2.21: 快速充電樁成本敏感度分析

隨著科技進步，充電樁建造成本也會隨之下降，本小節將分別以 30,000、20,000、10,000 三者調整快速充電樁之成本，對於新增快速充電樁而言，其與重建之差別來自於需要土地取得之成本，但即便技術演進，土地資源依舊相對更難取得，因此在此研究並不會討論土地成本下降之可能。

當快速充電樁建造成本為 10,000 時，第一期運具服務率為 94.3%，第五期則為 67.3%，係原始參數案例之 1.8 倍，雖然此方案所得出的結果與將快速充電樁容量設為 480 時相近，但當成本調整為 20,000 和 30,000 時，兩者第五期的電動運

具服務率分別為 51.1% 和 42.8%，比起將容量調整為 360 和 240 時有一定差距，但若觀察兩者之快速充電樁之佈設方式，會發現改變容量時，通過流量較多的中壢、仁德服務區並沒有如改變成本時佈置相當數量的充電樁，反而是在其餘的服務區佈設更多快速充電樁，但這是因為在容量的提升下，並不需要花費額外的預算就能夠在中壢、仁德服務區產生一樣的服務效益，因此能將剩餘預算分配給其餘服務區，而當建造成本降低為 10,000 時，因為成本低廉而使模式採取一樣的方式將剩餘預算提供給各服務區使用。

表 4.2.26: 各期重建快速充電樁數量 ($C_{fast}^{RC}=10,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	7	10	2	2	3	24
湖口服務區	5	7	8	11	10	41
泰安服務區	6	2	4	6	6	24
西螺服務區	6	4	4	9	10	33
新營服務區	6	3	6	8	7	30
仁德服務區	10	14	16	4	4	48

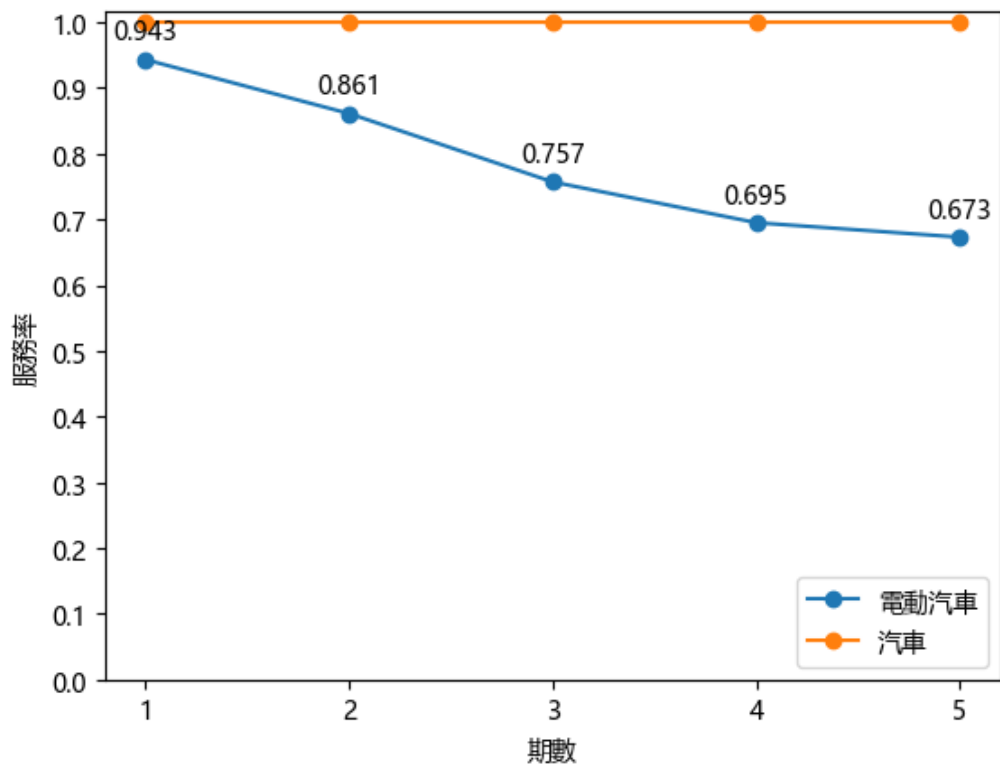


圖 4.2.22: 運具流量服務率 ($C_{fast}^{RC}=10,000$)

表 4.2.27: 各期重建快速充電樁數量 ($C_{fast}^{RC}=20,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	6	8	5	2	3	24
湖口服務區	3	2	4	5	4	18
泰安服務區	2	1	2	2	2	9
西螺服務區	1	2	2	2	2	9
新營服務區	1	2	1	3	2	9
仁德服務區	7	5	6	6	7	31

表 4.2.28: 各期新增一般充電樁數量 ($C_{fast}^{RC}=20,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	8	8	8	8	8	40
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

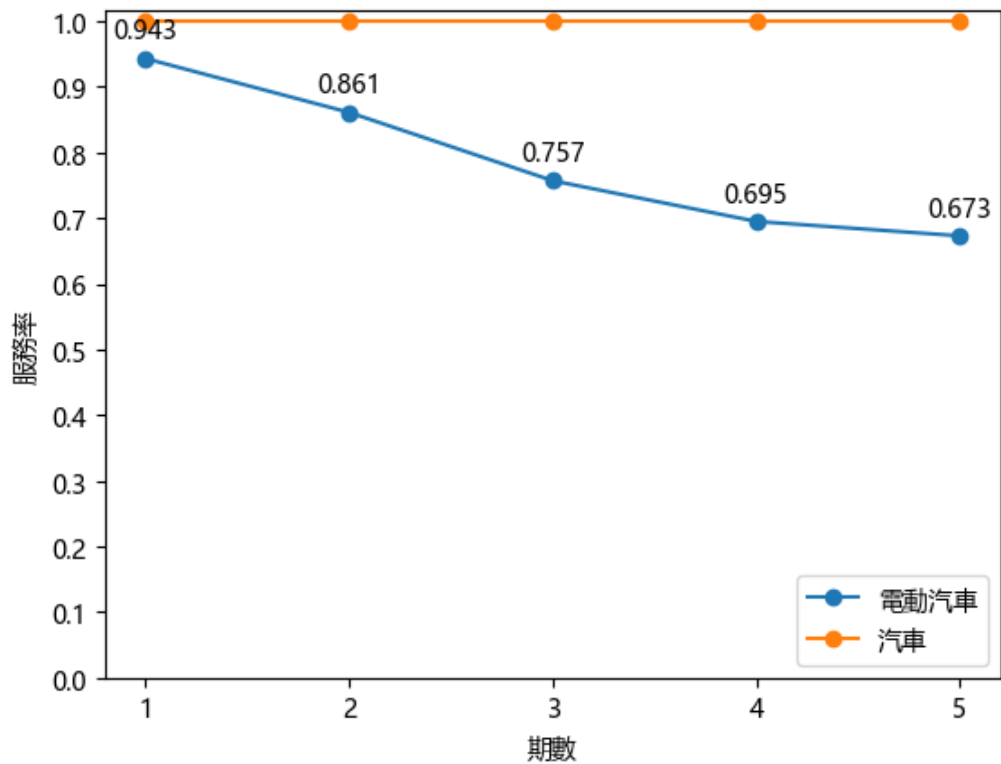


圖 4.2.23: 運具流量服務率 ($C_{fast}^{RC}=20,000$)

表 4.2.29: 各期重建快速充電樁數量 ($C_{fast}^{RC}=30,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	5	6	8	2	3	24
湖口服務區	2	2	2	2	3	11
泰安服務區	1	0	1	1	1	4
西螺服務區	1	1	0	2	1	5
新營服務區	1	1	0	2	1	5
仁德服務區	3	3	2	4	4	16

表 4.2.30: 各期新增一般充電樁數量 ($C_{fast}^{RC}=30,000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	4	4	4	4	20
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

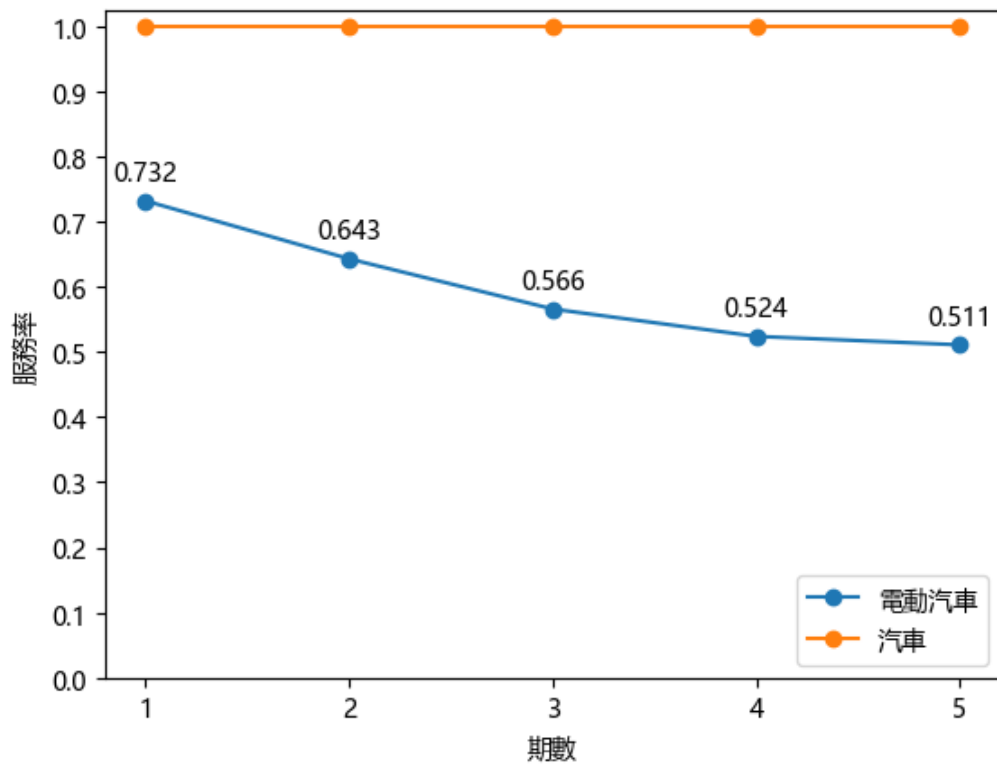


圖 4.2.24: 運具流量服務率 ($C_{fast}^{RC}=30,000$)

4.2.3.3 一般充電樁建造成本

在電動車充電需求增加的情形下，一般充電樁之技術也隨之發展，因此建設成本也會下降，本小節將分別以 1000、1500、2000 三種不同一般充電樁成本測試對於運具服務率之影響。

當一般充電樁成本為 1,000 時，第一期電動運具服務率為 72.5%，第五期僅有 52.8%，為原始參數案例之 1.4 倍，而成本為 1,500 和 2,000 時，第五期的服務率分別為 43.4% 和 37.7%，與原始案例相比幾乎沒有太多的成長，測試的三種成本案例當中幾乎都是以建設一般充電樁為主，只有當成本為 2,000 時在中壢服務區佈設了 19 座快速充電樁，其原因是因為此成本與原始參數相同，與另外兩者相比，此方案在中壢服務區建設的一般充電樁大幅減少，但由於一般充電樁的容量較低，即使大量佈設也無法產生顯著的效益。

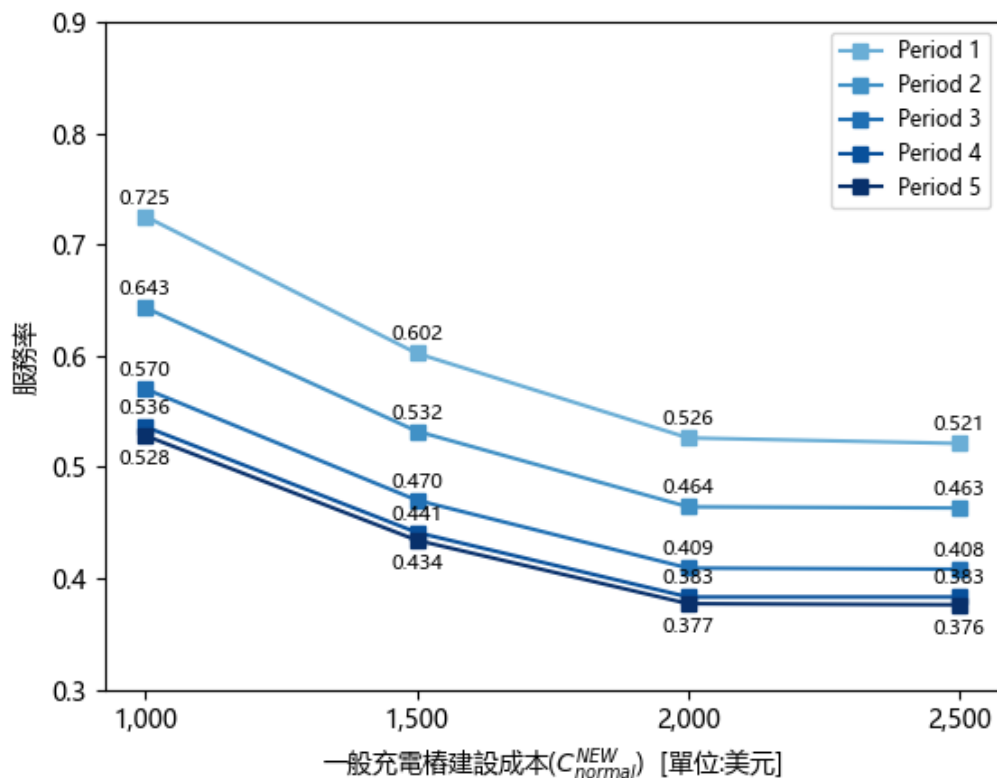


圖 4.2.25: 一般充電樁成本敏感度分析

另外，以將成本設置為 1,000 的方案進一步討論，服務區即使有許多停車位，其是否能在第一期就提供超過 100 個車位給電動汽車使用將會是需要去討論的，依據現有的法規，若車位被規劃為充電停車位，即代表一般汽車無法進行使用，這可能使得原有之車位不足以服務尚有汽車之期數，在此方案中，中壢服務區需

要設置 836 支一般充電樁，以土地方面而言，仍須要進一步去設定相關的條件和參數才能符合現實情形。



表 4.2.31: 各期新增一般充電樁數量 ($C_{normal}^{NEW}=1000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	134	148	202	202	150	836
湖口服務區	46	62	58	84	63	313
泰安服務區	33	28	11	16	24	112
西螺服務區	29	31	24	16	28	128
新營服務區	26	23	33	10	26	118
仁德服務區	132	108	72	72	109	493

表 4.2.32: 各期新增一般充電樁數量 ($C_{normal}^{NEW}=1500$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	108	115	176	157	128	684
湖口服務區	36	50	30	11	35	162
泰安服務區	19	13	7	0	6	45
西螺服務區	20	13	13	21	19	88
新營服務區	17	11	20	10	16	74
仁德服務區	66	62	20	67	62	277

表 4.2.33: 各期重建一般充電樁數量 ($C_{normal}^{NEW}=2000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	5	5	0	4	19
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	0	0	0	0	0	0

表 4.2.34: 各期重建一般充電樁數量 ($C_{normal}^{NEW}=2000$)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	10	14	6	107	0	137
湖口服務區	30	24	30	23	30	137
泰安服務區	12	5	6	9	10	42
西螺服務區	12	12	0	9	0	33
新營服務區	12	23	13	13	15	76
仁德服務區	44	32	45	39	45	205

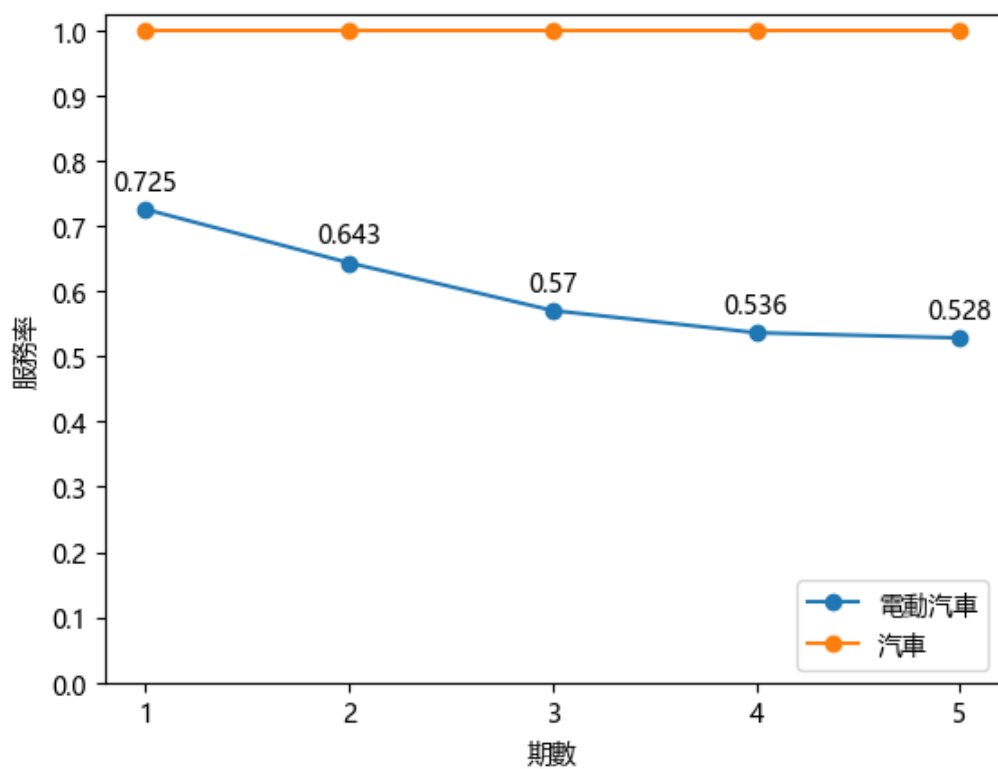


圖 4.2.26: 運具流量服務率 ($C_{normal}^{NEW} = 1,000$)

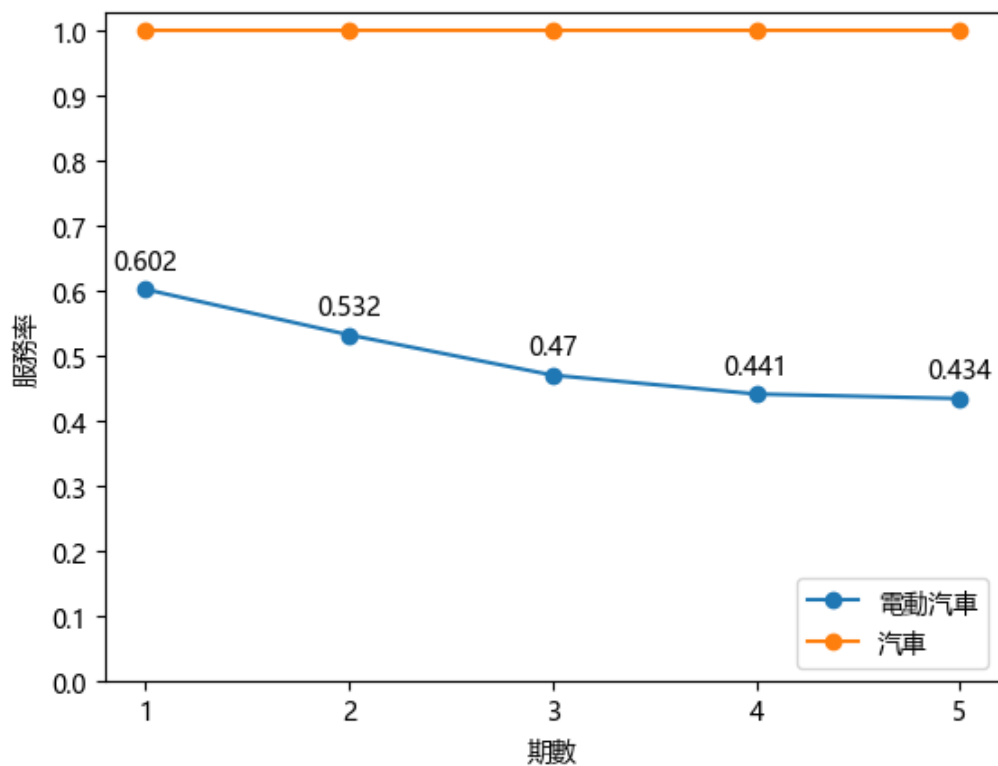


圖 4.2.27: 運具流量服務率 ($C_{normal}^{NEW} = 1,500$)

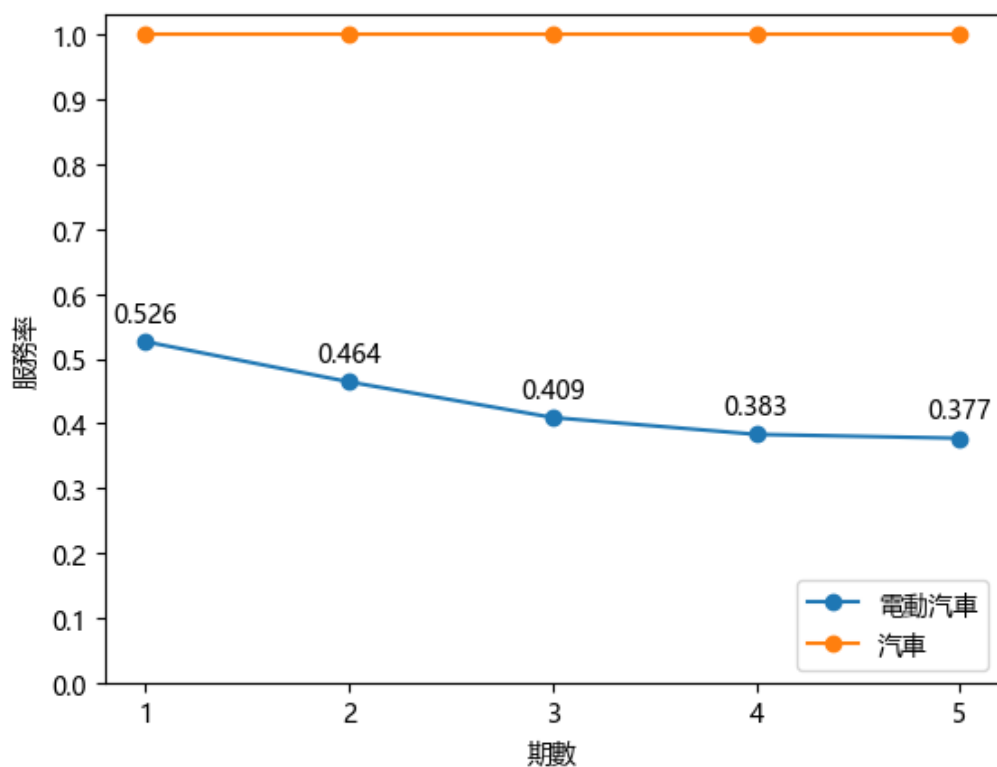


圖 4.2.28: 運具流量服務率 ($C_{normal}^{NEW}=2,000$)

4.2.4 設施相關

4.2.4.1 起始油槍數量

從從上述各項變量的敏感度分析來看，以目前國道各服務區所設置之油槍完全能夠一甚至超過一服務所有汽車流量，其原因包含原來油槍數目較多，並且擁有較充電樁更多之容量，同時也因為受限於總預算之考量，因此除了中壢服務區之外，其他服務區在進行每期充電樁設置的時候，並不會與原來油槍需要服務的流量產生衝突，進而有出現油槍和充電樁妥協的行為，亦即哪種設施之留存或設置會使捕捉流量最大化，故以下將進行加油站不同起始油槍數量設定之敏感度分析，並觀察其對能服務之運具流量產生什麼影響。

本小節將分別設置各服務區之油槍數量為原來數量比例之 0.25、0.5、0.75 倍，經由測試之後，在運具流量服務率方面，當油槍數量為 0.25 和 0.5 時，其服務率較原始參數案例下降，但在設定為 0.75 的比例時已經回復到與原案例相同的水準，可以說明即使將油槍數量縮減為現在之 0.75 倍，仍足以應付目前國道一號在未來各期中的汽車交通流量；從圖4.2.28可以觀察到當比例為 0.25 第一期和第二期的運具流量服務率已小於 100%，而在重建快速充電樁數量上，除了中壢

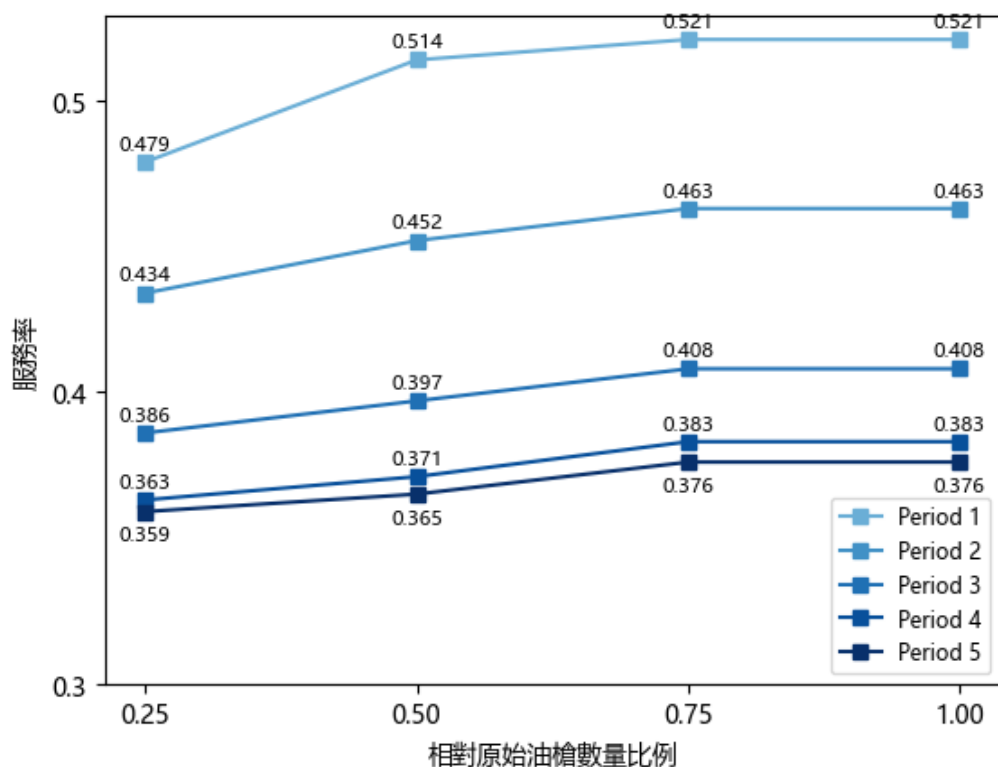


圖 4.2.29: 起始油槍數量敏感度分析

之外的其他服務區設置數量其實與原始參數案例結果並無多大差異，而在加油站無法在中壢服務區重建更多充電樁時，模式選擇以新增一般充電樁的方式以求服務更多流量，但與原始案例相比仍有些許差異，而當比例為 0.5 時，如圖 4.2.30 和表 4.2.38 所示，雖然對於中壢服務區而言快速充電樁數量仍然不足，但在部分預算用於佈設一般充電樁之情形下汽車流量已經完全能被服務，由以上的分析可以得知即使大部分的服務區只保留原來數量 0.25 倍的油槍，仍能夠正常服務各期的汽車流量，考慮到運具電動化為必然且必要的目標，可將該類服務區規劃為優先建設快速充電站以利未來更多電動汽車流量之發展。

表 4.2.35: 各期重建快速充電樁數量 (原始油槍數量比例 0.25)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	0	1	2	3	6
湖口服務區	2	1	1	2	1	7
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	0	0	1	2
新營服務區	1	0	1	1	0	3
仁德服務區	2	2	2	2	2	10

表 4.2.36: 各期新增一般充電樁數量 (原始油槍數量比例 0.25)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	69	96	80	32	32	309
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	11	0	0	0	0	11

表 4.2.37: 各期重建快速充電樁數量 (原始油槍數量比例 0.5)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	3	2	2	2	3	12
湖口服務區	2	1	1	2	1	7
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	0	0	1	2
新營服務區	1	0	1	1	0	3
仁德服務區	1	3	2	1	2	9

表 4.2.38: 各期新增一般充電樁數量 (原始油槍數量比例 0.5)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	0	64	64	48	48	224
湖口服務區	0	0	0	0	0	0
泰安服務區	0	0	0	0	0	0
西螺服務區	0	0	0	0	0	0
新營服務區	0	0	0	0	0	0
仁德服務區	11	0	0	0	0	11

表 4.2.39: 各期重建快速充電樁數量 (原始油槍數量比例 0.75)

T	一	二	三	四	五	Total
中壢服務區	4	6	6	4	4	24
湖口服務區	1	2	1	2	2	8
泰安服務區	1	0	0	1	0	2
西螺服務區	1	0	0	1	0	2
新營服務區	1	0	1	0	2	4
仁德服務區	2	2	2	2	2	10

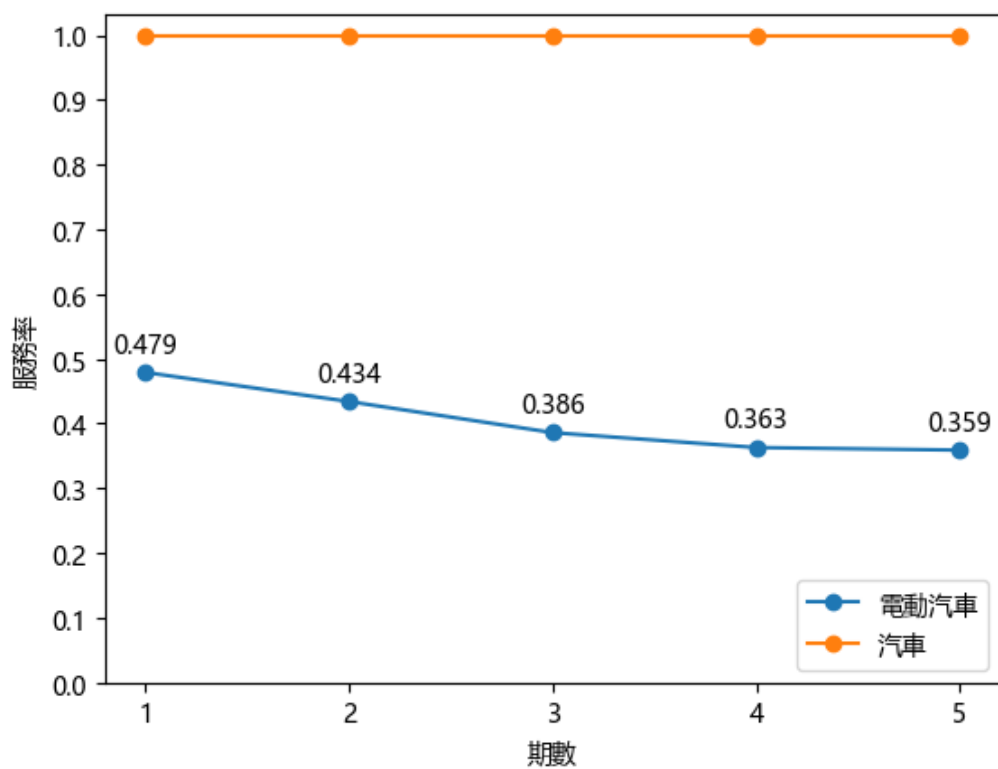


圖 4.2.30: 運具流量服務率 (原始油槍數量比例 0.25)

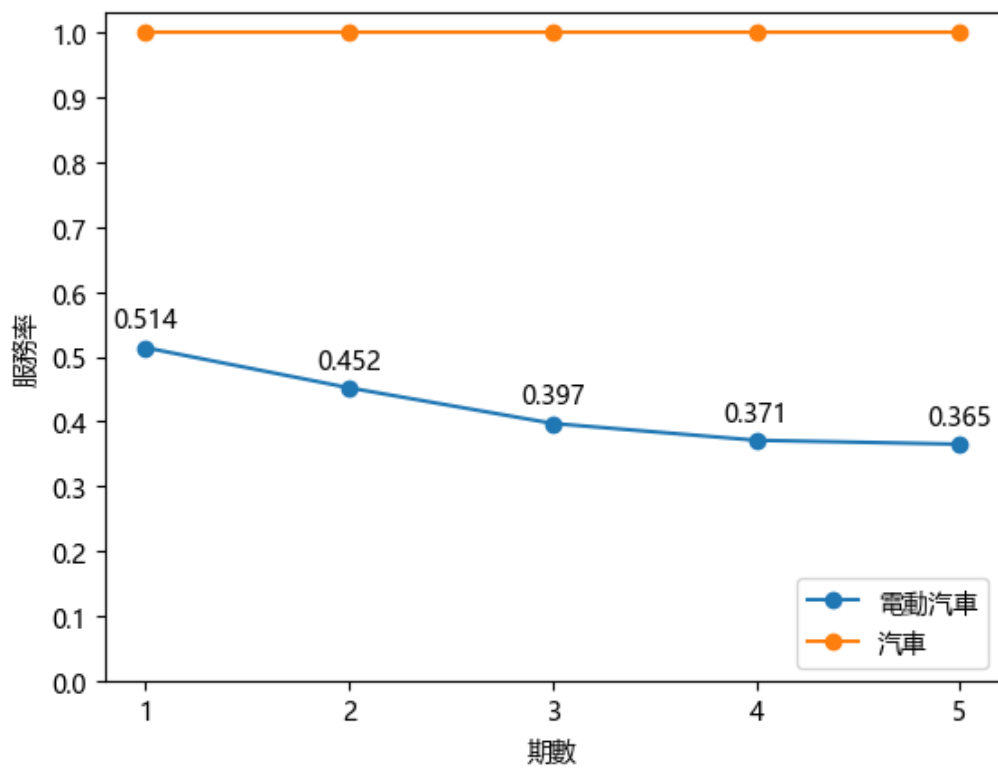


圖 4.2.31: 運具流量服務率 (原始油槍數量比例 0.5)

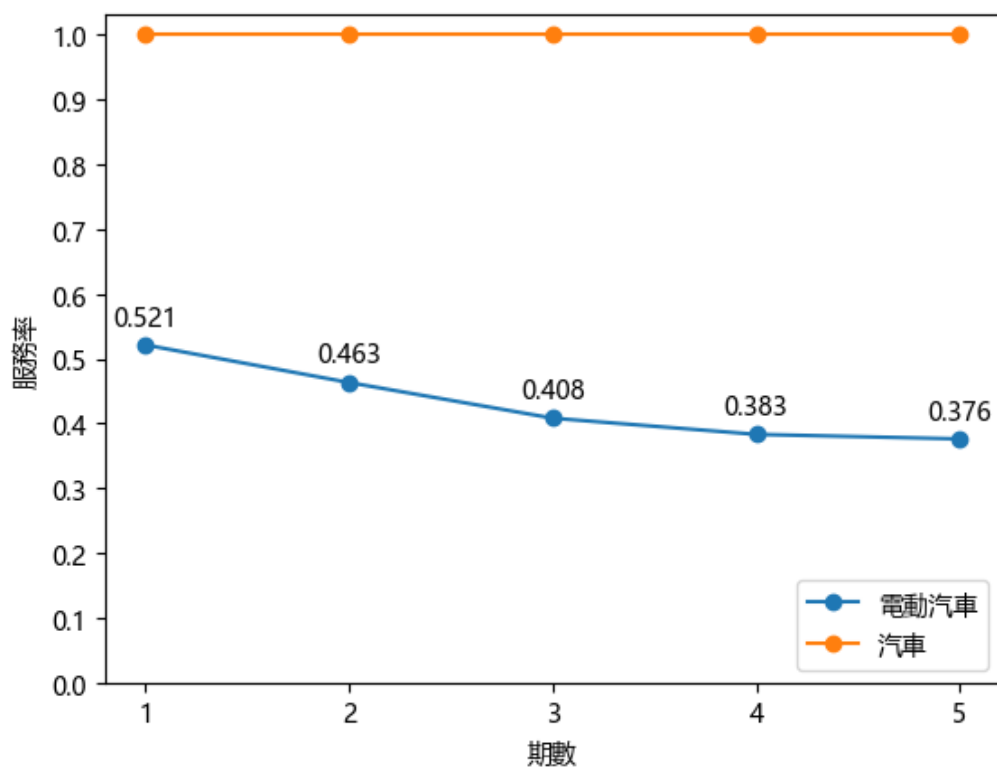


圖 4.2.32: 運具流量服務率 (原始油槍數量比例 0.75)

4.3 小結

透過敏感度分析可以得知，改變總參數對於各期之運具服務率之影響，若以 2050 年達成淨零碳排放為目標，本研究更關心完全電動運具化——第五期之運具流量服務率，下表將列出改變參數後第五期服務率增減的數值。

從表4.3.40可以得知，當快速充電樁容量提升 4 倍時，第五期之電動運具服務率相較原案例成長 1.8 倍，是所有方案中上升最多的，其原因在於快速充電樁不需要全部重建於中壢或仁德服務區也能夠獲得捕捉相同的流量，剩餘之預算可以用於其餘服務去以服務原本無法無法捕捉之電動汽車流量；與提升快速充電樁容量相似，當快速充電樁成本降低為 10,000 時，其第一期服務率為所有方案中最高的 94.3%，但第五期流量服務率為 67.3%，並不如前者來得捕捉更多流量，其主要原因為能轉換之油槍數量有限，在表4.2.14中可以發現中壢服務區建設 15 之快速充電樁，總服務量為 7200 次車流量，然而即使設施固定成本降低，也僅能將加油站所有 24 支油槍為轉換為充電樁，其總服務量為 2880，與前者有 4 倍之差，雖然此方案中第一期流量的被服務率為最高，然而由於最多通過流量的服務區捕捉程度有所差異，而直接影響了第五期電動運具流量的服務率，。

表 4.3.40: 不同變量之各期服務率比較

變量名稱	變量	第一期服務率	第二期服務率	第三期服務率	第四期服務率	第五期服務率
原案例		52.1%	46.3%	40.8%	38.3%	37.6%
電池容量 (原案例各期增加比例)	+10%	54.6%	48.5%	42.8%	40%	39.5%
	+20%	56.9%	50.6%	44.6%	41.9%	41.2%
	+30%	59%	52.5%	46.4%	43.5%	42.9%
快速充電樁容量 (車流量)	240	72.2%	64.1%	57.0%	53.6%	52.8%
	360	85.2%	76.8%	68.6%	64.7%	63.7%
	480	93.9%	86%	77.7%	73.6%	72.5%
一般充電樁容量 (車流量)	12	65.5%	58%	51.3%	48.2%	47.5%
	18	78.4%	69.8%	62%	58.4%	57.5%
	24	87.7%	79%	70.6%	66.6%	65.6%
總預算 (美元)	500,000	58.1%	51.3%	45.3%	42.5%	41.7%
	600,000	63.6%	56.2%	49.7%	46.3%	45.3%
	800,000	72.3%	64.3%	56.6%	52.8%	51.9%
	1,000,000	79.7%	71.1%	62.6%	58.6%	57.5%
快速充電樁成本 (美元)	10,000	94.3%	86.1%	75.7%	69.5%	67.3%
	20,000	72.3%	64.3%	56.6%	52.4%	51.1%
	30,000	59.9%	52.9%	46.7%	43.7%	42.8%
一般充電樁成本 (美元)	1,000	72.5%	64.3%	57%	53.6%	52.8%
	1,500	60.2%	53.2%	47%	44.1%	43.4%
	2,000	52.6%	46.4%	40.9%	38.3%	37.7%
起始油槍數量 (原案例數量比例)	0.25	47.9%	43.4%	38.6%	36.3%	35.9%
	0.5	51.4%	45.2%	39.7%	37.1%	36.5%
	0.75	52.1%	46.3%	40.8%	38.3%	37.6%

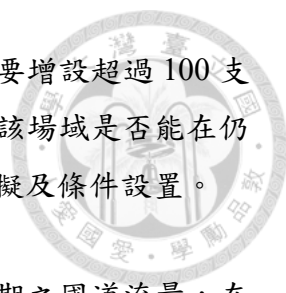
第五章 結論與建議



5.1 結論

本研究建立之多期充電站佈設最佳化模型可以在給定電動運具比例和交通流量的條件下，為國道加油站提供佈設充電樁數目的最佳化計算，並最大化電動運具及非電動運具之整體流量捕捉服務率，模式中考慮許多真實因素，其中包含充電頻率、電池容量、充電設施成本、建設預算及多種類充電樁。從原始參數案例可以發現，若以目前充電樁成本及容量進行佈設，並不足以提供足夠的量能以滿足各期之電動汽車流量，透過敏感度分析可以得知，對於目前國道加油站之油槍數目而言，以本研究所設定之容量能提供之服務量遠超過各期之汽車總流量，以下為整理各變量之敏感度分析之討論：

- 現有國道加油站的油槍當縮減為目前數目之 0.75 的比例，仍足以完全供應各期汽車流量。
- 電動車電池容量的增加雖然能使電動運具服務率提升，但效益十分有限，更因為續航力之增加，減少原來其他旅次充電的頻率，即使涵蓋更多不同的充電設施組合，卻無法在高成本的快速充電樁條件下增加服務率。
- 本研究所進行的敏感度測試當中，皆沒有採用新增快速充電樁之方案，其主要原因仍在於土地成本過高，使得模式優先重建油槍為快速充電樁，再者會選擇一般充電樁，並無剩餘預算新增快速充電樁，若未來充電樁需求更明顯時，政府能夠以補助的方式降低建造成本，使電動和非電動運具兩者產生更大效益。
- 對於快速充電樁和一般充電樁而言，無論是增加容量或是降低成本都能夠取得相當程度的效益，但在第五期——即運具完全電動化時最多也只有 72.5% 的電動運具服務率，並不能有效服務所有流量，但若以實際情形考慮，將現有之快速充電樁容量增加 4 倍或是降低成本至 10,000 之作法也無法在短時間內實現，因此還需配合額外充電節點之設置，不能單純依靠國道充電設施來滿足充電的需求。

- 
- 在一般充電樁的分析當中，單期之國道服務區有可能會需要增設超過 100 支充電樁，以現有裝設方式而言會以配合停車位安裝為主，該場域是否能在仍有汽車之計畫期提供如此數量的停車位需要進行後續的研擬及條件設置。

本研究之時間尺度係利用一日之車流量去對應未來 25 年各期之國道流量，在此情形下許多參數因而被簡化或是以一宏觀尺度進行模式的建立，無論是原始案例或是敏感度分析當中關於參數之設定均以一實際值進行假設並且測試，雖然各個參數之值均有所參考，但在長時間的多期研究當中，即使本研究在部分參數有將時間因素納入考慮，是否就能夠代表未來之發展仍有待商榷，另外，在容量設定當中，如一般充電樁一日可服務 6 輛電動汽車，然而該種類充電樁所需要花費充電之時間並無法實際服務完成一台低電量的車輛，其表示不同剩餘電量之車輛應會有相對應的充電時間，甚至可能影響駕駛人在選擇充電設施時優先考慮一般而非快速充電樁。雖然本研究試圖建立一符合現實世界的模型以供有關單位進行規劃，但設定具體之數值同時也部分限制了長期規劃的發展，這些問題後續皆可進行更深入的討論使本研究更臻完備。

5.2 建議

- 未來建議可以增加隨機性條件，例如本研究所利用之各年份之國道交通量為定值，可增添隨機性使其更符合現實世界的狀況求取最佳化。
- 在本研究當中假設駕駛沒有偏離行為，未來可增加匝道口之充電站節點佈設，使駕駛人能夠選擇額外充電站以服務更多流量。
- 未來建議可於模式中加入國道三號進行討論，由於兩者之服務範圍相近，在不同充電設施之配置下，是否會影響駕駛人改變原有通勤習慣或增加不同旅次。
- 本研究所考量之容量為單純假設充電樁及油槍之可服務流量，未來可配合偏離行為，使用排隊時間之服務水準來檢視模型之最佳化程度。
- 未來建議可以考慮成本折舊與殘值問題，未來或許可以考量加入充電樁損壞之隨機性等情形，更詳細設定成本與預算方面參數，包括維護成本、重置成本等項目，使問題更符合現實情況。

- 
- 本研究將電動氣車起始電量設為滿電量，當未來電動車電池容量更高，可以比擬汽車起始油量考慮更符合現實情況之起始電量分配情形，以配合充電樁佈設所需。
 - 本研究目前假設只要遇到補充燃料設施都必須補充滿燃料，但無論是加油或是充電並不限制每次一定要充滿，尤以充電時間較加油更長，未來建議可考慮充電之隨機性以符合現實情況。

參考文獻



Joana Cavadas, Gonalo Homem de Almeida Correia, and Joao Gouveia. A mip model for locating slow-charging stations for electric vehicles in urban areas accounting for driver tours. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 75: 188–201, 2015.

Sung Hoon Chung and Changhyun Kwon. Multi-period planning for electric car charging station locations: A case of korean expressways. European Journal of Operational Research, 242(6):677–687, 2015.

Mark S Daskin, Collette R Coullard, and Zuo-Jun Max Shen. An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results. Annals of operations research, 110(1-4):83–106, 2002.

Sreten Davidov and Miloš Pantoš. Planning of electric vehicle infrastructure based on charging reliability and quality of service. Energy, 118:1156–1167, 2017.

U.S. DOE. 2021 all-electric vehicles had a median driving range about 60% that of gasoline powered vehicles : <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1221-january-17-2022-model-year-2021-all-electric-vehicles-had-median>, 2021.

Yi He, Ziqi Song, and Zhaocai Liu. Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. Sustainable Cities and Society, 48:101530, 2019.

Meysam Hosseini and SA MirHassani. Selecting optimal location for electric recharging stations with queue. KSCE Journal of Civil Engineering, 19(7):2271, 2015.

Yongxi Huang, Shengyin Li, and Zhen Sean Qian. Optimal deployment of alternative fueling stations on transportation networks considering deviation paths. Networks and Spatial Economics, 15:183–204, 2015.

Ahmed Abdelmoumene Kadri, Romain Perrouault, Mouna Kchaou Boujelben, and Céline

- 
- Gicquel. A multi-stage stochastic integer programming approach for locating electric vehicle charging stations. Computers & Operations Research, 117:104888, 2020.
- Andreas Klose and Andreas Drexl. Facility location models for distribution system design. European journal of operational research, 162(1):4–29, 2005.
- Michael Kuby and Seow Lim. The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. Socio-Economic Planning Sciences, 39(10):125–145, 2005.
- Yong-Gwan Lee, Hyo-Seung Kim, Seung-Young Kho, and Chungwon Lee. User equilibrium–based location model of rapid charging stations for electric vehicles with batteries that have different states of charge. Transportation research record, 2454(1): 97–106, 2014.
- Shengyin Li, Yongxi Huang, and Scott J Mason. A multi-period optimization model for the deployment of public electric vehicle charging stations on network. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65:128–143, 2016.
- Yushan Li, Fengming Cui, and Lefei Li. An integrated optimization model for the location of hydrogen refueling stations. International Journal of Hydrogen Energy, 43(42): 19636–19649, 2018.
- Yuping Lin, Kai Zhang, Zuo-Jun Max Shen, Bin Ye, and Lixin Miao. Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 107(2):423–443, 2019.
- Joan M Ogden. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a southern california case study. International Journal of Hydrogen Energy, 24(11):709–730, 1999.
- Christopher Upchurch, Michael Kuby, and Seow Lim. A model for location of capacitated alternative-fuel stations. Geographical Analysis, 41(9):85–106, 2009.
- Ying-Wei Wang and Chuah-Chih Lin. Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 58(8):76–87, 2013.

Fei Xie, Changzheng Liu, Shengyin Li, Zhenhong Lin, and Yongxi Huang. Long-term strategic planning of inter-city fast charging infrastructure for battery electric vehicles. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 109(3):261–276, 2018.

Min Xu and Qiang Meng. Optimal deployment of charging stations considering path deviation and nonlinear elastic demand. Transportation Research Part B: Methodological, 135:120–142, 2020.

Woosuk Yang. A user-choice model for locating congested fast charging stations. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 110:189–213, 2018.

Zhonghao Zhao, Carman KM Lee, and Jiage Huo. Ev charging station deployment on coupled transportation and power distribution networks via reinforcement learning. Energy, 267:126555, 2023.

交通部. 臺灣 2050 淨零轉型「運具電動化及無碳化」關鍵戰略行動計畫, 2023.

交通部高速公路局. 國道高速公路計程電子收費階段交通資料蒐集支援系統 (traffic data collection system,tdcs) 使用手冊 (v3.0), 2015.

交通部高速公路局. 各旅次路徑原始資料 (m06a) : <https://data.gov.tw/dataset/37760>, 2016.

交通部高速公路局. 國道加油站設施數量統計表 : <https://data.gov.tw/dataset/88625>, 2023.

公路總局. 公共充電樁設置及區域充電需求評估計畫, 2022.

史惠慈 & 吳玉瑩. 國際電動車產業政策對臺灣的啟示. 經濟前瞻, (198):116–122, 2021.

國家發展委員會 et al. 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明, 2022.