

國立臺灣大學工學院工業工程學研究所



碩士論文

Institute of Industrial Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

充電站營運商之最佳價格策略

The Optimal Pricing Strategy for Charge Point Operators

傅莉庭

Li-Ting Fu

指導教授: 洪一薰 博士

Advisor: I-Hsuan Hong Ph.D.

中華民國 111 年 7 月

July 2022

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

論文中文題目：充電站營運商之最佳價格策略

論文英文題目：The Optimal Pricing Strategy for
Charge Point Operators

本論文係傅莉庭君（學號 R09546020）在國立臺灣大學工業工程
學研究所完成之碩士學位論文，於民國 111 年 6 月 17 日承下列考試
委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

洪一薰
(指導教授)

洪一薰

吳政鴻

吳政鴻

黃奎隆

黃奎隆

藍俊宏

藍俊宏

系主任、所長： 洪一薰

洪一薰



誌謝

兩年的研究所生涯轉眼間將畫下句點，感謝在這兩年給予我鼓勵及幫助的所有人。首先，謝謝洪一薰教授願意當我的指導教授，除了在研究及課業上給予我們許多協助，也時常鼓勵及提點我們的未來方向。另外，謝謝口試委員：吳政鴻教授、黃奎隆教授及藍俊宏教授提供許多有建設性的建議，讓我的研究論文更加完整。

接著，要感謝研究室的學長姐、同學們及學弟妹們，謝謝語彤學姐在我研究過程中遇到瓶頸時會給予我鼓勵及方向；謝謝郁暄、紹亨、翊瑀這兩年的陪伴，一起度過痛苦的柔性地獄、抱怨永遠看不完的課程影片，也總是一起吃飯、聊天、玩樂等，一起創造了好多回憶。不僅如此，研究低潮或疲憊時我們也會互相協助與鼓勵，很幸運是你們陪我度過這兩年辛苦的研究生活，讓我的這兩年過得不那麼糟糕，也更加有趣，我想畢業後我仍會想念在研究室和你們一起並肩作戰的日子；因為有個性活潑及好相處的學弟妹們，碩二的會議氣氛也較融洽，謝謝你們與我們一起打球，讓我們的生活不那麼無趣，希望未來一年你們也可以順利度過，加油！

最後，我想感謝我的家人們及身邊的朋友們，謝謝我的家人無時無刻都給予我最大的支持，當我有任何煩惱時，不僅聽我訴說，也會給予我許多正向的反饋及建議；謝謝旖庭、子慧、欣晏，雖然大家都不在同地方讀書，甚至隔著半天的時差，但你們總是能理解我在研究上遇到的困境及煩惱，並不斷勉勵我，讓我一次又一次的度過這些挫折，希望未來進入職場的我們仍能一直當對方堅強的後盾，也繼續我們嬌生慣養的旅行；謝謝芸姍、琬淳、沛儒、冠樺及緬玲等一直陪在我身邊，雖然你們都與我在不同階段，但仍一直聽我抱怨及陪我玩樂，也總是能讓我脫離低潮；謝謝文謙在我的論文地獄中一直陪伴著我，帶我去吃美食、出去走走和散散心，讓我的最後幾個月不是痛苦地度過，而是快樂的度過。感謝這兩年間所有給予我幫助及鼓勵的人，謝謝你們！期許自己能夠更堅強的面對下個挑戰。



摘要

隨著氣候變遷造成的環境影響，環保意識抬頭，各國紛紛制定能源轉型政策，降低溫室氣體排放的發展策略。以電動車取代燃油車降低溫室氣體排放，是能源轉型極為重要的一環。加速電動車之發展，首要之務即是布建友善之電動車使用環境，例如促進住宅、商業與公共停車空間廣布充電樁，或是設置電動車充電格位等。因此，城市的充電站規劃十分複雜，不僅牽涉到電力配置、電網容量、停車位等問題，還需考慮充電站的設置位置、充電樁的類型、數量及充電價格等因子。而充電需求預測、充電價格制訂及充電樁數量分配會互相影響，例如，充電需求隨充電價格變動，同時充電之需求預測則影響充電站的設置位置及充電樁的設置數量。然而，充電樁供給量及充電需求也會造成充電價格改變，因此，本研究目的為提出針對停車場之充電設施的最佳規劃，並透過需求預測與價格制定相互影響的關係找出讓充電站營運商可以獲得最大利潤之最佳價格策略。本研究以時空高斯過程 (Spatial-temporal Gaussian process) 建立的電動汽車充電需求預測模型來預測需求，模型中考慮人口數、興趣點個數及停車價格等因子，並建立混整數非線性規劃 (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP) 的最佳化模型以求各充電站之最適充電價格。

關鍵字：電動車、充電站、價格策略、混整數非線性規劃



Abstract

With increasing of environmental awareness for dramatic climate changes, energy policy for cutting greenhouse gas emissions is urgent and critical for every country in the world. Using electric vehicles (EVs) to replace conventional gasoline cars is one of critical aspects to reduce the gas emissions to enhance the energy transition. To increase the use of EVs, an EV-user friendly charging infrastructure and attractive charging price are two important factors. With the consideration of the capacity of electrical power, the sites of charging points, and the numbers of AC/DC chargers, this study determines the pricing strategy and the amount of charging points based on the demand forecasts for EV charging infrastructure. The proposed model is to develop an optimal pricing strategy for charge point operators (CPOs) with the maximization of total profits. In this thesis, a spatiotemporal model is used to forecast the EV charging demands for parking lots. A Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) model is constructed and formulated to calculate the best charging price of different types of EV charging in each charging station . A case study is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed model.

Keywords: Electric Vehicle, Charging Station, Pricing Strategy, MINLP



目錄

口試委員審定書	i
誌謝	ii
摘要	iii
Abstract	iv
目錄	v
圖目錄	vi
表目錄	vii
第 1 章 緒論	1
第 2 章 文獻回顧	4
第 3 章 充電站規劃模型	8
3.1 充電需求預測模型	9
3.2 充電價格最佳化模型	11
3.3 求解方法	19
3.3.1 模型重建方法	19
3.3.2 空間分支定界法	20
第 4 章 案例研究	23
4.1 研究區域	23
4.2 參數設定	28
4.3 結果	30
4.4 敏感度分析	35
第 5 章 結論與未來研究	39
參考文獻	40



圖目錄

4.1	臺北市路外停車場分佈圖	24
4.2	臺北市興趣點個數	25
4.4	臺北市人口數	26
4.6	研究區域示意圖	26
4.7	含停車場分佈之研究區域圖	27
4.8	不同慢充佔比狀況下充電站營運商可獲得的最大利潤	36
4.9	不同慢充佔比下的需求滿足率	38
4.10	不同慢充佔比下的充電樁利用率	38



表目錄

4.1	臺北市興趣點類別	27
4.2	各網格涵蓋之停車場個數	28
4.3	充電裝置之設定參數	30
4.4	各區域之平均停車費用 (單位：NT\$)	31
4.5	需求預測模型之參數估計結果	31
4.6	研究區域之潛在充電需求預測結果	32
4.7	區域 11 之熱點充電站的充電價格 (單位：NT\$)	33
4.8	非熱點充電站的充電價格 (單位：NT\$)	33
4.9	各區域之平均充電價格 (單位：NT\$)	34
4.10	快充及慢充的需求滿足率及充電樁使用率	35
4.11	不同慢充比例下的快充價格 (單位：NT\$)	37
4.12	不同慢充比例下的慢充價格 (單位：NT\$)	37

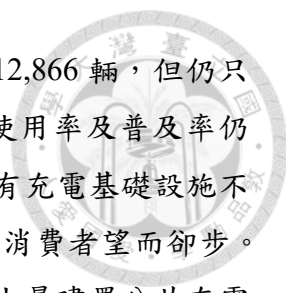


第一章 緒論

隨著科技進步及人口增長，氣候暖化也日益嚴重，而近年來，全球環保意識逐漸升高。致力於推動減碳政策的巴黎協定中，全球有 195 個締約國共同訂定目標：將全球升溫限制於攝氏 1.5 度之內，而為達到此目標，至 2021 年 3 月底，全球已有歐盟等 128 個國家宣示或規劃淨零排放 (Net Zero Emissions) 目標，因此淨零排放已是全球重視的共同目標 (國家發展委員會, 2021)。各國為了達到積極的減碳目標，紛紛制訂能源轉型政策，推動運具電動化及無碳化，例如，禁售燃油車及利用再生能源等。最早開始運具電動化，推動以電動車取代燃油車的國家將是荷蘭及挪威，預計在 2025 年即開始禁售燃油車；英國、德國、比利時及瑞典等國家則是預計於 2030 年不再銷售汽油或柴油新車 (立法院, 2021)；而台灣則於 2017 年推出「空氣污染防制行動方案」，此方案擬訂 2030 年讓公務車輛及市區公車全面電動化，並在 2035 和 2040 年分別禁售燃油機車和燃油汽車 (行政院, 2017)。上述的目標及規則不僅加速電動車的發展，也意味不久後全球將會進入全面電動車的時代。

汽車為多數人重要的交通工具之一，而電動汽車具有溫室氣體排放較低且能源利用效率較高的特點，儘管各國人民的環保意識上升，也都希望可以減緩氣候暖化，但購買及使用電動汽車的人數仍相對低，因持有電動汽車的成本還是相對昂貴，且目前各國的充電基礎設施仍在擴建當中，部份消費者甚至會因為「里程焦慮」(Range anxiety) 而不願意購買電動汽車。而有許多研究結果顯示，消費者購買電動汽車的決定與充電站的可用性或方便性有關 (Krupa et al., 2014; Li et al., 2017a)。Carley et al. (2013) 研究消費者對插電式電動汽車 (Plug-in electric vehicles, PEV) 的購買意願，並評估會增加或減少消費者購買意願的因素。該研究發現若消費者居處附近已設置充電站時，消費者會有較高意願購買電動汽車而非傳統的燃油車，意即，擴增充電站站點有助於電動汽車普及率的提升，因此完善的充電基礎設施規劃與建置，將是各國推行電動車政策的首要步驟之一。

近年來，我國政府有意推廣電動車，除了上段所提之禁售燃油車政策外，也提供免徵牌照稅、燃料稅等各項補貼措施，環保署及各縣市政府更制定了相關的購車補助以提高民眾使用電動汽車之意願。然而，雖然台灣電動汽車登記數量呈



現逐年上升趨勢，截至 2021 年 3 月，電動小客車掛牌數已達 12,866 輛，但仍只佔小客車掛牌總數之 0.2%(經濟部, 2021)，顯示台灣的電動車使用率及普及率仍非常低。而於地狹人稠的台灣推廣電動車窒礙難行的可能原因有充電基礎設施不足、充電樁規格混亂及使用電動汽車的機會成本高等，都會讓消費者望而卻步。因此，經濟部於 2021 年推動「公共充電樁建置」，預計在未來大量建置公共充電樁於中央及地方所屬公有停車場及路邊停車格、高速公路休息區、高鐵、台鐵與機場等附屬停車場等地方(經濟部, 2021)。內政部營建署也曾於 2019 年修訂《建築技術規則》，規定新建物的停車空間構造，應預留供電動車輛充電相關設備及空間(全國法規資料庫, 2019)。由上述政府的政策推動及法案修改可知政府有意擴增充電基礎設施，與此同時，臺灣需要一良好的充電設施規劃，提供充電樁業者共同參與，布建友善之電動車使用環境，促進住宅、商業與公共停車空間廣布充電樁，或是設置電動車充電格位等。

電動汽車充電站中的充電樁可依充電功率分為快速充電(快充)及慢速充電(慢充)，雖各國對快充功率的定義不同，但各國最低的快充功率最低為 20 瓩左右(IEA, 2021)。公共充電樁的慢充及快充有以下幾點差異，首先，主要設置的場所不盡相同，慢充普遍設置於家用充電裝置、路邊停車格、商業設施的停車場及公有或民營停車場；而快充則是多設置於高速公路及重要道路服務區、專用充電站、加油站及超商。再者，兩者充電的時間有顯著差異，以充電類型為 Level 2 的慢充為例，充電時間為 3.5 到 7 小時，而快充的充電時間僅僅為 10 到 30 分鐘(IEA, 2021)。最後，兩者的建置成本也有極大差異，因此不僅會影響充電站規劃的充電樁類型之數量，亦會影響充電樁之設置位置。

電動汽車的充電過程並非和燃油車的加油過程一樣便利及快速，電動汽車的充電過程不僅耗時，還需使用停車位，因此電動車充電設施規劃在推行電動車的 policy 中是非常重要的。各個國家及城市在制定電動汽車充電設施規劃時可以供給端及需求端兩種不同的角度策劃充電樁的設置數量及位置。若以需求端的角度制定策略，需考慮城市發展、建設成本、電力成本及電網的負荷量等；而若以需求端的角度規劃，則需考慮人口數、人口密度、充電站附近的設施及停車、充電費用等。以荷蘭的阿姆斯特丹及英國的倫敦為例，兩城市皆為兩國家中人口較密集的城市，且自有車位率皆低，但在充電樁佈署的策略上有極大的差異。阿姆斯特丹廣設慢充於路邊停車格及停車場，不僅如此，政府也積極地幫助民眾在需要的地點設置充電樁。而倫敦則是設立較多的快充充電站，因為此方法可以減少建造充電樁所需的土地及成本(ICCT, 2020)。由上述可知，有類似特性的城市未必會

有相同的充電設施規劃，而充電設施規劃皆需考慮到各地方的環境、特性及發展目標。

在電動車的電力市場中，充電站營運商和電動車使用者分別為供應者及消費者，供應者會根據需求預測來決定充電價格，而消費者選擇充電站和充電時段亦會受到充電價格影響，因此需求預測及充電價格是會交互影響的。本研究提出針對充電站營運商於一城市停車場的充電站規劃，並透過需求預測與價格互相影響的關係以找出讓充電站營運商利潤最大化之最佳價格策略，此外，本研究採用差別訂價策略制定充電價格。本研究以時空高斯過程 (Spatial-temporal Gaussian process) 建立電動汽車充電需求預測模型來預測需求，再有效分配充電樁設置數量，最後，建立混整數非線性規劃 (Mixed integer nonlinear programming) 的最佳化模型以求各充電站之充電價格。


本研究可分為四章，第一章為緒論，說明本研究的背景與動機；第二章為文獻回顧，分別整理充電站規劃、電動汽車之需求預測及電動汽車充電價格策略的相關研究及方法；第三章則是問題描述及詳細解釋本研究提出之需求預測模型、充電價格最佳化模型及其求解方法；第四章為個案分析，說明本研究的研究區域、數據來源、資料分析流程及各模型之結果，其結果包含各區域預測之需求量、各停車場之充電樁最佳設置數量及各充電站之最佳充電價格，並利用敏感度分析討論充電類型的需求佔比對其結果之影響；第五章說明本研究的結論與未來研究方向。



第二章 文獻回顧

電動汽車的推廣仍窒礙難行，因為電動汽車的充電設施尚不完善且電動汽車需要一定的充電時間，各國莫不積極推動充電基礎設施之規劃。近年來有許多研究致力於電動汽車充電站 (Electric vehicle charging stations, EVCSs) 的優化規劃問題，EVCSs 的最佳建置方案能夠以最小的社會成本，滿足不同電動汽車車主的充電需求，進而促進電動汽車的發展與廣泛使用。在各類研究中求解 EVCSs 各類優化模型的方法多分為兩種，分別為啟發式演算法 (Heuristic algorithms) 和數學演算法 (Mathematical algorithms)。然而，EVCSs 的優化規劃問題需考慮電動汽車車主複雜的駕駛和停車等行為，而電動汽車車主之行為及電動汽車的潛在需求預測皆會使優化模型更為複雜，故較多研究使用啟發式演算法求解 EVCSs 的優化規劃問題。Sadeghi-Barzani et al. (2014) 提出一非線性混整數模型以計算最佳的快充充電站設置位置及數量，並利用基因演算法 (Genetic Algorithm, GA) 求解該模型。Dharmakeerthi et al. (2013) 在考慮電網的負荷及電動汽車車主的需求下，利用粒子群優化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 求解電動汽車的基礎設施規劃問題。Awasthi et al. (2017) 則利用 GA-PSO 混合演算法 (GA-PSO hybrid algorithm) 在印度普拉亞格拉傑 (Allahabad, India) 的配電系統中尋找充電站的最佳設置位置。Zheng et al. (2013) 以差分進化演算法 (Differential Evolution, DE) 計算配電系統中電動汽車電池充電/交換站的優化問題。仍有少部分研究使用數學演算法求解電動汽車充電站之規劃問題，例如，Davidov and Pantoš (2017) 考慮電動汽車的駕駛行為，但是通過賦予不同的權重於優化模型中，故利用一線性的整數規劃模型即可規劃 EVCSs 問題。Liu et al. (2012) 則利用修改的原始與對偶內點法 (Modified Primal-Dual Interior Point Algorithm, MPDIPA) 求解為非線性規劃模型的 EVCSs 優化問題。

許多研究在針對 EVCSs 的優化規劃問題建立模型時會考慮電動汽車的充電需求，充電站營運商多以利潤最大化為首要目標，因此必須先預測各區域的潛在需求再決定充電站的設置位置及充電樁數量，此方法才能盡可能減少不必要的成本。Pazouki et al. (2015) 和 ISLAM et al. (2016) 皆假設電動汽車充電需求為常數，雖然這是一種簡單且方便的方式，但會減少模型的準確度，因此許多研究致力於利用模擬或數據分析等方式預測電動汽車的充電需求。模擬的方式通常利用演算



法模擬電動汽車駕駛者的駕駛情況或開車習慣，Dong et al. (2016) 和 Zhang et al. (2015b) 利用起點-終點 (Origin-destination, OD) 分析來模擬電動汽車車主的交通行為，亦即判斷車主的行駛起點及目的地，進而推導出電動汽車的充電需求分佈。Zhang et al. (2015a) 和 Zhang et al. (2016) 將電動汽車的充電行為分成兩種類型，分別為緊急充電及目的地充電，根據電動汽車駕駛的停車行為預測不同充電行為所對應到的充電需求，而該研究利用蒙地卡羅模擬方法 (Monte Carlo simulation method) 模擬及預測充電潛在需求。數據分析則是利用統計或機器學習等方法從歷史數據建立預測模型，以推斷電動汽車的潛在充電需求，Flammini et al. (2019) 分析 400,000 次電動汽車充電交易的真實數據集，並透過迴歸分析 (Regression Analysis) 預測電動汽車駕駛的充電行為。Li et al. (2017b) 則利用複線性迴歸模型 (Multiple linear regression model) 探討再生能源、充電站數量、人口密度、汽油價格等因素對電動汽車需求的影響。

若利用數據分析的方式預測電動汽車之充電需求，則需知道造成充電需求的改變因子。Arias and Bae (2016) 利用實際交通量數據和天氣條件，以預測住宅和商業場所的電動汽車充電負載曲線，Li et al. (2017b) 則是探討各種因素對電動汽車需求的影響，其因素包含能源種類在發電中的百分比、充電站的數量、教育水準、人口密度、汽油價格、人均國內生產毛額 (Gross Domestic Product, GDP) 及都市化程度，該研究表示僅前四個因素對需求有明顯正向的關係。Guerra and Daziano (2020) 針對費城的 1545 名車主調查購買電動汽車的偏好，調查受訪者對於充電系統和停車位便利性的付費意願，而此篇研究發現受訪者對充電時間及停車便利性的成本支付意願差異極大。分析居住位置及型態不同的受訪者，發現不同的客群能接受的停車費用也不一樣。由上述文獻可知道該將充電站數量、人口密度及停車費等因素納入考量，透過需求預測模型以預測電動汽車之潛在充電需求。

電動汽車的充電需求分佈不僅會隨時間有所變化，還會隨著空間的不同產生變異，因此可以用時空過程有關的模型以預測潛在的需求事件數量。可以透過時空點過程模型 (Spatio-temporal point process)，亦即建立一個包含事件的歷史資料、空間及時間的函數以預測事件發生的機率 (Reinhart, 2018)。高斯過程 (Gaussian process) 是觀測值出現在一個連續域的隨機過程，因此也可以利用高斯過程模型之函數的觀測值預測未觀測到的事件點數量 (Seeger, 2004)。Xie et al. (2010) 將高斯過程應用在短期的交通流量預測，利用交通量及行程時間等資訊以預測交通流量，而該研究表示針對交通流量方面的預測，利用高斯模型所得之預測結果比利

用支援向量機 (Support Vector Machine, SVM) 方法預測的結果更好。Gilanifar et al. (2020) 則提出了一種多任務學習 (Multi-Task Learning, MTL) 的方法以進行電動汽車充電基礎設施的能量預測，預測電動汽車充電站的充電電力負載，而該方法透過高斯過程模型融合來自多個充電站的數據，以萃取出電動汽車充電數據的共同特徵，進而提高估計和預測的準確性。

電動汽車之充電需求分布會隨時間及空間而有所差異，會影響充電需求分布的因子包含該區的人口密度、充電站數量及停車價格等。電動汽車車主不僅需支付停車費用，還需支付充電費用，故充電價格亦會影響充電需求。而近年來，許多研究致力於電動汽車的充電訂價策略，充電價格是影響電動汽車充電行為的重要因素之一 (SHENG and LI, 2007)，Crow et al. (2016) 和 Turker and Bacha (2018) 的研究表明透過合理的充電價格機制及相關的獎勵政策可以影響電動汽車車主的充電行為，亦即影響充電需求分佈。而各充電站在各時段可使用的充電量會隨著地點及電力的分時訂價 (Time-of-use, TOU) 有所不同，若充電站使用單一價格的策略，將容易造成需求聚集於特定充電站中，進而形成供過於求的狀況發生，則會難以滿足所有消費者的需求，因此許多充電站營運商使用的價格策略為訂定差別費率的動態定價法。各種訂價策略會依不同的標準來制定差別費率，最常使用的標準為 TOU，Gong et al. (2020) 提出基於 TOU 的動態峰值訂價法 (Dynamic Spike Pricing, DSP)，先利用 TOU 將時段分成尖峰、半尖峰及離峰並分別訂出不同價格，而需求預測結果最高的時間間格為高峰時段 (Spike period)，在高峰時段的價格需額外加上固定金額，此方法是為了吸引消費者在離峰時段充電。Aujla et al. (2019) 亦提出基於 TOU 的訂價策略，該研究利用多參數訂價方案 (Multi Parameter Pricing Scheme, MPPS) 制訂價格，利用 TOU、充電站地點及電動車類型的差異訂定不同價格。Moghaddam et al. (2019) 則提出一動態定價模型，以充電站的消費者佔有率為標準調整價格，目的為利用價格的差異以平衡各時段、各地區的充電負載量。

綜觀上述文獻可知現有文獻中較少將需求預測與充電價格策略一併計算，且較少研究以充電站營運商的角度考量整體的充電站規劃，故本研究提出針對充電站營運商於一城市停車場的充電站規劃，並透過需求預測與價格互相影響的關係以找出讓充電站營運商利潤最大化之最佳價格策略。此外，上述文獻皆依據各時段不同的電力負載量訂定差別費率，因此本研究的差別訂價策略除了考慮各時段的電力需求外，也將各區域及各充電類型之需求差異納入考量。由上述文獻可知高斯時空模型適合用於包含空間及時間的充電需求預測，因此本研究以時空高斯

過程建立電動汽車充電需求預測模型來預測需求，再有效分配充電樁設置數量，最後，建立混整數非線性規劃的最佳化模型以求各充電站之充電價格。





第三章 充電站規劃模型

本研究透過三個階段：需求預測、充電樁數量分配及價格最佳化，以求解充電站營運商於停車場的最佳充電站規劃，包含各充電站最佳的充電樁設置數量及類型和充電價格。有別於一般研究將充電需求預測、充電設施選址及充電價格訂定分開討論，本研究提供一套系統性方法以幫助充電站營運商快速規劃一區域之電動汽車充電站，而此方法為利用現有的停車場規劃設置充電樁，並不考慮額外設立專屬的電動車充電站。一套完整的充電設施規劃需涵蓋充電需求預測、充電樁數量分配、充電設施選址、充電價格訂定，而充電站營運商以獲利為最大目標的狀況下，成本最小化也極為重要。充電站營運商除了要決定充電樁的設置數量及位置和充電價格外，還需決定與電力公司所要簽訂的契約容量值。充電站營運商需與電力公司簽訂契約容量以獲得電力，因充電設施的電力消耗極大，故充電站營運商需盡可能精準的估算電力需求以減少成本，並避免造成電網的電力不足而導致電網跳電。

本研究的價格策略並非動態價格策略，而是採差別訂價策略，不僅不同充電類型的充電樁有不同的充電價格，於不同的時段或不同的充電站充電亦有不一樣的充電價格，擬利用價錢影響電動汽車駕駛的充電選擇，進而讓所有充電資源的利用達到最大化。本研究利用需求預測模型所預測之結果，將充電站分為熱點充電站及非熱點充電站，非熱點的充電站採單一訂價，熱點充電站則代表潛在的充電需求集中於此充電站，故熱點充電站會採尖峰及離峰時段的差別訂價，擬利用差別訂價以吸引消費者於離峰時段充電。而各充電站亦會因充電樁的設置數量及停車價格等原因形成差別訂價，期望透過此方法吸引消費者前往需求較少的充電站充電，進而減少電網的負荷並讓資源即充電設施能被有效的利用。

電動汽車充電設施的一連串規劃必須從需求預測開始，需先透過需求預測模型預測出潛在的充電需求，再利用預測出的結果進行充電樁的數量分配，將要設置的充電樁總數量分配至各停車場，並利用需求預測之結果判斷各充電站是否為熱點充電站，最後即可利用各停車場的潛在充電需求及充電樁設置類型之數量計算出各充電站的充電價格及欲與電力公司簽訂之契約容量值。故本研究將在3.1節說明透過初始數據預測各地區、各時段之需求的需求預測模型；3.2節闡述充電裝

數量分配至各區停車場的方法及如何判斷停車場屬於熱點或非熱點充電站，並說明充電價格最佳化模型，以取得在充電站營運商追求利益最大化下的最佳價格策略，且期望讓所有充電站之充電樁可以被有效利用。



3.1 充電需求預測模型

本研究以時空高斯過程建立電動汽車充電需求預測模型來預測各區域之需求事件數(張雯婷, 2020)，因電動汽車充電事件為具有時間性及空間性的數據，故利用時空過程模型以分析及預測具時間性及空間性的資料。時空過程模型又可分為時空點過程模型及高斯過程模型 (Gaussian process)，時空點過程常見的模型如：一般非均勻卜瓦松過程 (Nonhomogeneous Poisson Process, NHPP)、Gibbs 過程 (Gibbs process) 及對數高斯 Cox 過程 (Log Gaussian Cox process, LGCP)，皆由發生在有界的空間域及有限的時間間格中的事件點 (event point) 組成，而電動車充電事件發生的數量可視為空間上和時間上的隨機點過程 (Point process)。若電動汽車充電事件點的發生強度會隨著時間或空間變化而改變，且電動汽車充電事件點發生的位置以及時間是互相獨立的，將會利用非均勻卜瓦松過程模型；倘若電動汽車充電事件點之間具有交互作用的關係，亦即電動汽車充電事件點彼此之間並非互相獨立的，此時便適合利用針對互相排斥現象的 Gibbs 過程模型或針對聚集現象的對數高斯 Cox 過程模型。張雯婷 (2020) 於案例分析先利用時空非均勻 K-函數 (space-time inhomogeneous K-function, STIK-function)(Gabriel & Diggle, 2009) 觀察點過程是否具有完全時空隨機性質，以及有無交互作用的情形，而據觀察結果顯示時空點過程有聚集的情形產生於小於 1 小時且小於 1 公里的距離內，故採用對數高斯 Cox 過程模型為和時空高斯過程模型比較的時空點過程模型。

高斯過程是觀測值出現在一個連續域 (時間或空間) 的隨機過程，每一點的隨機變量均會服從高斯分布，而高斯過程由一平均數函數 (Mean function) 和一協方差函數 (Covariance function) 決定，而該研究使用 Minasny and McBratney (2005) 所提出的馬特恩協方差函數 (Matérn covariance function) 並加上時間的維度，將其擴展成時空高斯過程模型。最後，利用均方誤差 (Mean Square Error, MSE) 及廣泛適用的信息準則 (Widely Applicable Information Criterion, WAIC) 評斷模型的配適程度，兩者皆為數值越低代表模型配適程度越高。因此選擇 MSE 及 WAIC 數值皆小的時空高斯過程模型作為最終模型以預測各區域和各時段電動汽車之充電需求事件數量。

原時空高斯過程模型的參數為興趣點個數、人口數、交通便捷程度、道路交通量、氣溫、相對溼度、氣壓和日累積雨量，另外還加入空間上和時間上的隨機效應及時間與空間上交互作用的隨機效應。而該研究利用檢查參數估計的 95% 的信賴區間是否包含零以表達參數的重要性或顯著性，於個案研究的結果顯示交通便捷程度、道路交通量、氣溫、相對溼度、氣壓和日累積雨量的顯著性較低，而只有興趣點個數、人口數及時間和空間的隨機效應屬於顯著的參數，故本研究採用此三種顯著的參數：興趣點個數、人口數及時間和空間的隨機效應，以預測各區域和各時段電動汽車之充電需求事件數量。

電動汽車的充電過程需要佔用停車位，電動汽車之消費者也多利用停車的過程順便充電，所以消費者除了需要支付充電成本之外還需支付停車成本，亦代表不只上段說明的各種參數會影響電動汽車的充電需求，價格變數也會改變電動汽車的充電需求。故本研究的時空高斯過程模型的參數除了興趣點個數、人口數及時間和空間的隨機效應外，還加入以停車費用或充電費用代表的價格參數，時空高斯過程模型的設定如下。假設發生在網格座標 u ，時間 t 的電動車充電事件數量 $Z(u, t)$ 服從高斯分配

$$Z(u, t) \sim STGP(\eta(u, t), \sigma_e^2) \quad (3.1)$$

其中 σ_e^2 為變異數，平均值 $\eta(u, t)$ 則為

$$\eta(u, t) = \beta_0 + \beta_1 POI(u) + \beta_2 Pop(u) + \beta_3 Price(u, t) + H(u, t) \quad (3.2)$$

$\eta(u, t)$ 可代表平均而言，在網格 u 、時間 t 電動汽車充電事件點數量 (張雯婷, 2020)； β_0, \dots, β_3 為模型參數； $POI(u)$ 是網格座標 u 的興趣點個數； $Pop(u)$ 是網格座標 u 的人口數； $Price(u, t)$ 是網格座標 u 、時間 t 的價格變數。另外， $H(u, t)$ 是網格座標 u 、時間 t 的時間與空間的隨機效應，增加模型的靈活性。定義

$$H(u, t) = aH(u, t-1) + \xi(u, t) \quad (3.3)$$

其中， $t = 2, \dots, T$ ， $|a| < 1$ 且 $H(u, 1) \sim Normal(0, \sigma/(1-a^2))$ 。 $\xi(u, i)$ 為假設時間上獨立且平均值為零的高斯場 (gaussian field)，當 $u \neq v$ 時之時間與空間的共變

異數函數 (covariance function) 為

$$Cov(\xi(u, t), \xi(v, r)) = \begin{cases} 0, & \text{if } t \neq r \\ Cov(\xi_u, \xi_v), & \text{if } t = r \end{cases} \quad (3.4)$$



另外，本研究利用馬特恩協方差函數預測變異數 σ_e^2 ，馬特恩協方差函數如下

$$\frac{\sigma^2}{\Gamma(v)2^{v-1}}(\kappa\|u - u'\|)^v K_v(\kappa\|u - u'\|) \quad (3.5)$$

其中 v 需大於零且用於測量高斯過程的平滑程度；需大於零且代表縮放程度，其代表空間相關性近乎為零的距離； Γ 為伽瑪函數 (Gamma function)，其 $\Gamma(v)$ 代表在 v 的伽瑪函數值； K_v 則為 Abramowitz and Stegun (1972) 提出的第二種修正貝索函數 (Bessel function)； $\|u - u'\|$ 為網格座標 u 及 u' 之間的歐式距離 (Euclidean distance)； σ^2 為邊際變異數 (Marginal variance)，計算方式如下

$$\sigma^2 = \frac{\Gamma(v)}{\Gamma(2)(4\pi)\kappa^{2v}\tau^2} \quad (3.6)$$

本研究由上述的時空高斯過程模型預測各區域之電動汽車的潛在需求，其模型包含對電動汽車之充電需求較顯著的三個變數，分別為各區域之人口數、興趣點個數及價格變數。而因現今電動汽車的歷史充電資料尚不充足，故若無法利用各區域之平均充電價格代表價格變數，可用各區域之平均停車費用以衡量價格對充電需求的影響。

3.2 充電價格最佳化模型

本節將充電站營運商的充電價格策略問題建模為混整數非線性規劃模型，並詳細介紹建模方法與步驟。因充電價格最佳化模型的輸入變數包含各充電站之充電樁數量及各充電站屬性(熱點充電站、非熱點充電站)，充電站屬性會影響該充電站之充電價格策略，故本節除了闡述充電價格的最佳化模型外，亦會說明分配充電樁數量及判斷熱點充電站之方法。

電動汽車的充電基礎設施經常規劃於路邊停車格、路外停車場或類似加油站形式的充電區，然而，為減少規劃及計算的複雜度，本研究的規劃不將充電樁設於路邊停車格或類似加油站的充電區，而僅將充電樁設置於停車場中。除了利用

建立數學規劃模型求得充電樁之設置位置外，也以簡化方式計算充電樁的最佳設置數量，如利用車樁比或停車格數量等判斷方式，而因本研究僅考慮停車場之充電樁設立，故先利用3.1節的需求預測模型預測出各區域之需求數量後，將需求數量轉換成各區域需設立的總充電設施數量，再依照各停車場之小型車停車格數分配欲設置的充電樁數量。

當在此充電站充電的電動汽車駕駛過多，或是充電需求遠高於其他充電站時，此充電站便為熱點充電站。本研究將利用此一簡單方式，判斷各區域之熱點充電站。若要判斷各區域中哪些停車場屬於充電潛在需求集中的熱點地區，需先進行需求預測，以預測之結果來判斷。由3.1節的需求預測模型可知影響各區域之潛在充電需求的變數為各區域之人口數、興趣點各數以及價格變數，而因本研究僅考慮將充電樁設立於停車場內，故利用各停車場之停車費為價格變數。然而，在每個區域中因人口數及興趣點各數皆相同，因此僅各停車場之停車費會影響潛在的需求變化。因需求預測模型求出之潛在需求為各區域之總需求數量，所以需先將總需求事件數分成不同類型的充電需求事件數，再利用各停車場間的停車價格變化量與需求變化量的關係，計算出各停車場之對應需求事件數，最後再將各類型‘充電需求皆高於停車場之平均需求事件數’的停車場歸類於熱點充電站。

本研究利用最佳化概念建立數學規劃模型以求充電站營運商在利潤最大化下的最佳價格策略，然而，此數學規劃模型的價格策略並非動態價格策略，此模型是依照需求預測結果將所有充電站分為熱點及非熱點，在熱點的充電站會採尖峰及離峰時段的差別訂價，在非熱點的充電站則是採單一訂價。另外，不同的充電類型也會有不同價格，故此模型不僅利用充電類型產生差別訂價，也分別利用不同充電站點或充電時段產生差別訂價，盼透過價格差異影響需求變化，進而增加需求滿足率及充電樁利用率以讓資源利用率達到最大化。因此，此模型的決策變數為各充電站、各時段、各充電類型的充電價格及欲與電力公司簽訂的契約容量，而充電價格最佳化模型的符號定義如下。



決策變數

獨立變數

D 與電力公司訂定的契約容量

p_{tuj}^k 於充電時段 t 、區域 u 中之充電站 j 且充電類型為 k 的充電價格

Y_l 電力使用量是否於階段 l 中, $Y_l = 1$, 若否 $Y_l = 0$

相依變數

Q_{tu}^k 於時段 t 、區域 u 之充電類型為 k 的需求事件量

q_{tuj}^k 於時段 t 、區域 u 中之充電站 j 且充電類型為 k 的需求事件量

P_{uj}^{kr} 於充電時段 r 、區域 u 中之充電站 j 且充電類型為 k 的充電價格

集合

T 時間間格之集合

U 區域網格之之集合

J_u 區域 u 的充電站點集合

K 充電類型集合

PE 熱點時段之集合

H 熱點充電站之之集合

l 契約容量之階段集合

索引

t 時間間隔索引, $t \in \{1, \dots, T\}$

j 充電站點索引, $j \in \{1, \dots, J_u\}$


u 區域索引, $u \in \{1, \dots, U\}$

k 充電類型索引, $k \in \{1, \dots, K\}$

r 充電時段類型索引, $r \in \{General, Peak, Off - Peak\}$

l 契約容量之階段索引, $l \in \{1, \dots, L\}$

參數



α^r	充電時段 r 的快充、慢充價格關係係數
θ^k	充電類型 k 的尖峰、離峰價格關係係數
$\min P_{uj}^{kr}$	於充電時段 r 、區域 u 中之充電站 j 且充電類型為 k 的價格下界
$\max P_{uj}^{kr}$	於充電時段 r 、區域 u 中之充電站 j 且充電類型為 k 的價格上界
ω	契約容量的超約比例
MC	電力公司每月的基本電費
δ^m	月份的數量
δ^y	年份的數量
τ^y	一年的天數
τ^m	一個月的天數
FC	一年的固定成本
EC_t	電力公司每時段 t 的流動電費
E^k	充電類型 k 的平均充電量
h_{uj}	區域 u 中的充電站 j 是否屬於熱點充電站, $h_{uj} = 1$, 若否 $h_{uj} = 0$
γ_u^k	區域 u 中充電類型 k 的需求佔比
ρ_{tuv}^k	充電類型 k 於時段 t 、區域 u 且充電站 j 到 v 之需求與價格變動量的轉換率
$\Delta \bar{q}_{tuv}^k$	於時段 t 、區域 u 且充電類型為 k , 充電站 j 到充電站 v 的需求變動量
$\Delta \bar{P}_{tuv}^k$	於時段 t 、區域 u 且充電類型為 k , 充電站 j 到充電站 v 的價格變動量
c_{uj}^k	於區域 u 的充電站 j 且充電類型為 k 的充電樁設置數量
F_{tuj}	於充電時段 k 、區域 u 的充電站 j 的停車費用
ψ^k	充電類型 k 的充電需求與該類型之充電樁設置數量的差異上界

假設充電站營運商的目標為追求利潤且越高越好，價格最佳化模型的目標則為最大化利潤，故目標函式為

$$\begin{aligned} \max_{p_{t u j}^k, D} \quad & \delta^y \cdot [\tau^y \cdot \sum_t \sum_u \sum_j \sum_k (p_{t u j}^k \cdot A Q_{t u j}^k \cdot E^k) - \delta^m \cdot [\sum_l (D \cdot Y_l \cdot MC) \\ & + \sum_t \sum_u \sum_j \sum_k (A Q_{t u j}^k \cdot E^k \cdot EC_t)] - FC] \end{aligned} \quad (3.7)$$

其利潤可由充電站營運商的收入和成本相減而得。由充電價格 $p_{t u j}^k$ 、實際有接受充電服務的需求數量 $A Q_{t u j}^k$ 及平均各類型 k 的充電量 E^k 相乘，可求得區域 u 中的各充電站 j 於每時段 t 的各充電類型之充電收入，而再將各區域、各充電站、各種充電類型及所有時段的收入加總及乘以一年的天數 τ^y 便為充電站營運商的年度收入。實際可以被充電站營運商服務的消費者有限，所以會出現供不應求的狀況，而僅有有充電樁之停車位可以提供充電服務，故實際可以充電之需求事件數 $A Q_{t u j}^k$ 的計算方式為如下

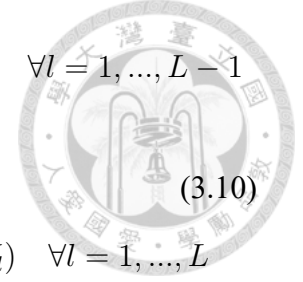
$$A Q_{t u j}^k = \min(q_{t u j}^k, c_{t u j}^k) \quad \forall t, \forall u, \forall j, \forall k \quad (3.8)$$

為從各充電站之需求事件量 $q_{t u j}^k$ 及充電樁設置數量 $c_{t u j}^k$ 中取最小值。此模型的成本可分為固定成本及變動成本，固定成本 FC 為每年充電站的建設、營運及維護成本，包含充電樁的建設、充電設施的修繕和保養及管理充電站的人力等花費。而變動成本為每月的電力成本，假若電力公司採用時間電價計費，則電力成本由基本電費及流動電費組成，基本電費按契約容量 D 計算並需考慮超約罰款的部分，流動電費則依各時段的實際用電量計算，此模型利用實際有接受充電服務之事件數 $A Q_{t u j}^k$ 及其對應的平均充電量 E^k 相乘再加總以代表每月的實際用電量。

充電價格最佳化模型的限制式部份可分成契約容量限制、需求限制、利潤限制及價格限制。首先是限制契約容量的部份，當每個月的最大電力需求超過與電力公司簽訂的契約容量時為超約用電，此時需付出更高的成本，亦即繳交超約罰款，而電力公司通常會對超約用電計收幾倍的基本電費，故電力的基本電費如同階梯訂價，會依據超約比例分成 l 段不同價格。此模型加入二元變數 Y_l 於目標式及限制式中，用以判斷繳交成本最小的基本電費，並計算充電營運商於最大化利潤下與電力公司簽訂的最適契約容量大小。契約容量的限制式部份如下

$$D \geq \tau^m \cdot \sum_t \sum_u \sum_j \sum_k (A Q_{t u j}^k \cdot E^k) - M \left(\sum_l Y_l \right) \quad (3.9)$$

$$D(1 + \omega \cdot l) \geq \tau^m \cdot \sum_t \sum_u \sum_j \sum_k (AQ_{tuj}^k \cdot E^k) - M(1 - \sum_l Y_l) \quad \forall l = 1, \dots, L-1$$



(3.10)

$$D[1 + \omega \cdot (l - 1)] \leq \tau^m \cdot \sum_t \sum_u \sum_j \sum_k (AQ_{tuj}^k \cdot E^k) - M(1 - Y_l) \quad \forall l = 1, \dots, L$$

(3.11)

$$D \geq 0 \quad (3.12)$$

$$Y_l \geq Y_{l+1} \quad \forall l = 1, \dots, L - 1 \quad (3.13)$$

$$Y_l \in \{0, 1\} \quad (3.14)$$

其中限制式(3.13)代表二元變數的從屬關係。另外，此模型的決策變數契約容量 D 屬於大於零的連續變數。

此價格模型的需求限制部份包含充電價格與充電需求事件之間的關係及各充電站的需求量分配，此模型利用3.1節需求預測模型的數學式(3.2)以表達充電價格與充電需求事件數量的關係，如同3.1節需求預測模型的假設(假設發生在網格座標 u ，時間 t 的電動車充電事件數量 $Z(u, t)$ 服從高斯分配)，並直接利用數學式(3.2)中的 $\eta(u, t)$ 代表在網格 u 、時間 t 電動汽車充電事件點數量。另外，不僅各停車場之停車費用會改變充電需求，充電價格也會造成充電需求的變化，故價格變量為停車費及充電價格的總和。而充電價格會因充電類型的不同而有所區別，因此，此模型會因充電類型不同共有 k 種價格變數，需利用數學式(3.16)代表需求預測模型中數學式(3.2)的價格變數 $Price(u, t)$ ，也意味在網格座標 u ，時間 t 的電動車充電事件數量 $\eta(u, t)$ 亦需隨之改變，故利用 $\bar{\eta}(u, t)^k$ 代表不同充電類型 k 在網格座標 u ，時間 t 的電動車充電事件數量(3.16)。上述計算網格需求量之公式如下

$$Q_{tu}^k = \gamma_u^k \cdot \bar{\eta}(u, t)^k \quad \forall t, \forall k, \forall u \quad (3.15)$$

$$\bar{\eta}(u, t)^k = \beta_0 + \beta_1 POI(u) + \beta_2 Pop(u) + \beta_3 Price'(u, t)^k + H(u, t) \quad \forall t, \forall k, \forall u \quad (3.16)$$

$$Price'(u, t)^k = \frac{1}{n(J_u)} \sum_j^{J_u} (F_{tuj} + p_{tuj}^k) \quad \forall t, \forall k, \forall u \quad (3.17)$$

其中數學式(3.16)除了價格變數 $Price'(u,t)^k$ 之外的參數及變數皆和3.1需求預測模型中數學式(3.2)的設定相同； γ_u^k 為區域 u 中充電類型 k 的需求佔總需求量的比例，數學式(3.15)則是透過 γ_u^k 將各區域、各時段的總需求事件數分為各充電類型的需求數量，此外，所有充電類型的充電需求佔比總和須為 1。因數學式(3.15)僅能得出各區域 u 中充電類型 k 的總需求事件數，故需將需求事件數細分到各充電站以利計算各充電站之充電價格。在此模型中會影響需求事件數的變數為興趣點個數、人口數及包含停車費及充電價格的價格變數，而在同個區域中的充電站擁有相同的興趣點個數及人口數，故會影響各充電站間之需求差異的變數僅剩價格變數，亦即只有停車費及充電價格會造成各區域中的需求於各充電站間流動。本研究利用需求與價格變化量的轉換率計算出充電站對應之需求 q_{tuj}^k ，計算公式如下

$$\sum_j^{J_u} q_{tuj}^k = Q_{tu}^k \quad \forall t, \forall k, \forall u \quad (3.18)$$

$$\Delta \bar{q}_{tujv}^k = \rho_{tujv}^k \cdot \Delta \bar{P}_{tujv}^k \quad \forall j, \in J, \forall k, \forall u, \forall t \quad (3.19)$$

其中可將一區域的各充電站之停車費代入需求預測模型求得轉換率 ρ_{tujv}^k ，代表各區域價格與充電需求變化量之間的關係。當供過於求時會造成資源浪費，而供不應求則因為實際可以被充電站營運商服務的消費者有限，僅有有充電樁之停車位可以提供充電服務，也會損失可賺取的利益，為盡量避免上述情況發生，利用資源限制讓需求事件數與充電樁之設置數量的差異可以在一定範圍之內，其資源限制式如下

$$\sum_j |q_{tuj}^k - c_{uj}^k| \leq \psi^k \quad \forall t, \forall k, \forall u \quad (3.20)$$

其中參數 ψ^k 會因充電類型的差異而有所不同，可以依充電站營運商接受差異的程度調整。

最後為價格限制的部份，包含價格上下界、快充和慢充之間的價格關係、尖峰時段和離峰時段的價格關係等，皆是針對價格變數的限制，限制式如下

$$p_{tuj}^k = P_{uj}^{kG} \quad \forall t, \forall u, \forall j \notin H, \forall k \quad (3.21)$$

$$p_{tuj}^k = P_{uj}^{kP} \quad \forall t \in PE, \forall u, \forall j \in H, \forall k \quad (3.22)$$

$$p_{tuj}^k = P_{uj}^{kO} \quad \forall t \notin PE, \forall u, \forall j \in H, \forall k \quad (3.23)$$



$$P_{uj}^{Rr} \leq \alpha^r \cdot P_{uj}^{Fr} \quad \forall j, \forall r, \forall u \quad (3.24)$$

$$P_{uj}^{kO} \leq \theta^k \cdot P_{uj}^{kP} \quad \forall j \in H, \forall r, \forall u \quad (3.25)$$

$$\min P_{uj}^{kr} \leq P_{uj}^{kr} \quad \forall j, \forall k \forall r, \forall u \quad (3.26)$$

$$P_{uj}^{kr} \leq \max P_{uj}^{kr} \quad \forall j, \forall k \forall r, \forall u \quad (3.27)$$

$$P_{uj}^{kr} \geq 0 \quad (3.28)$$

此模型的熱點充電站有兩種價格，分別為尖峰時段的充電價格 P_{uj}^{kP} 及離峰時段的充電價格 P_{uj}^{kO} ，而非熱點充電站則是接採單一價格 P_{uj}^{kG} ，但為方便模型計算，價格變數多以 p_{tu}^k 表示，故需利用限制式(3.21)至限制式(3.23)歸類各時段 i 的充電價格分別屬於熱點的尖峰價格 P_{uj}^{kP} 、離峰價格 P_{uj}^{kO} 或者非熱點的單一價格 P_{uj}^{kG} 。限制式(3.24)和限制式(3.25)分別為確保充電類型之間及充電時段之間的差異，充電類型分別為快充及慢充，而充電時段則是只有熱點充電站會區分成尖峰時段及離峰時段。限制式(3.26)和限制式(3.27)即為價格變數的上界及下界，下個段落會說明如何利用預測的需求事件數調整各充電價格的上下界以促使各充電價格產生差異。另外，此模型的決策變數充電價格 p_{tu}^k 如限制式(3.28)所示，皆為大於零的連續變數。

價格模型中之價格變數 P_{uj}^{kr} 的上界 $\max P_{uj}^{kr}$ 和下界 $\min P_{uj}^{kr}$ 皆為給定的參數，而本研究利用3.1節需求預測模型預測之需求事件數、設置之充電裝數量 c_{uj}^k 及給定之初始價格 \bar{P}_u^k 調整各價格變數的上界及下界。首先，參考電力成本以設定 k 組適用於各區域 u 、各充電站 j 及各充電時段 r 的價格上界 $\max P^k$ 及下界 $\min P^k$ 。接著用一簡單的概念針對各充電站 j 調整價格變數的上界及下界，假若供不應求的時段較多，則需提高此充電站之充電價格以降低消費者前來充電的意願，故提高下界，反之若供過於求，則應降低此充電站之充電價格亦即降低下界。然而，在熱點的充電站因將時段分為尖峰時段及離峰時段，所以會有四種狀況產生，分別為兩時段皆供過於求、兩時段皆供不應求及各一時段供過於求和供不應求。而當尖峰時段為供不應求且離峰時段為供過於求時，價格上界及下界的調整幅度會增加，反之則會減少調整幅度，其餘狀況則依時段各自調整。

本研究以(3.7)為目標式並在(3.9)到(3.28)的限制條件下求最佳解亦即充電站營運商之最佳的價格策略，而此價格模型中包含連續變數及二元變數，故為混整數非線性模型。儘管在求解模型前可將含有絕對值的限制式(3.20)轉為線性方程式，但此模型仍有限制式包含決策變數與相依變數相乘，因此仍為較複雜的混整數非

線性模型，因此會在3.3節闡述此價格模型之求解方法。



3.3 求解方法

此節介紹本研究提出之充電價格最佳化模型的求解過程，首先，本研究利用基本的模型重建方法將部分非線性項轉為線性 (Asghari et al., 2022)，以降低充電價格最佳化模型的計算複雜度，再利用空間分支定界法 (Spatial Branch and Bound, Spatial BB) 求解此混整數非線性規劃模型。此外，3.1節的需求預測模型為時空高斯過程模型，當電動汽車充電事件點的觀察值較多且網格數量龐大時，概似函數將是維度很高的多元常態分布 (Multivariate Normal Distribution)，此狀況下將難以利用最大概似估計法估計參數，故本研究利用Fong et al. (2010) 提出的演算法：巢狀拉普拉斯法 (Integrated Nested Laplace Approximation, INLA)，是一種近似貝氏推論 (Bayesian Inference) 的方法以估計電動汽車的潛在充電需求，而此方法可以利用開源軟體 R 的 INLA 套件實現 (Blangiardo and Cameletti, 2015; Illian et al., 2013; Fong et al., 2010)。

3.3.1 模型重建方法

3.2節的充電價格最佳化模型為混整數非線性規劃模型，目標式(3.7)的實際可以充電之需求事件數 (AQ_{tuj}^k) 為取各充電站之需求數量及充電裝設置數量的最小值。而最小運算符 (Minimum operators) 為一非線性項，Mohammadi et al. (2020) 提出一方法利用加入線性限制式以取代非線性項來加速求解最佳化問題的效率，其方法將額外增加連續變數以代表該非線性項，如式子3.8。此外，還需增加以下限制式以取代目標式的非線性項。

$$AQ_{tuj}^k \leq q_{tuj}^k \quad \forall j, \forall t, \forall u, \forall k \quad (3.29)$$

$$AQ_{tuj}^k \leq c_{uj}^k \quad \forall j, \forall t, \forall u, \forall k \quad (3.30)$$

式子(3.29)及式子(3.30)可確保實際可以充電之需求事件數會小於或等於各充電站之需求數量及充電裝設置數量。然而，儘管已用 AQ_{tuj}^k 取代非線性項，此模型的目標函式仍為二次的非線性方程式，且因模型的變數包含連續變數及整數，故屬於混合整數二次規劃 (Mixed-Integer Quadratic Programming, MIQP) 問題。

若模型的目標式及限制式皆由非線性方程式組成，則此模型為混合整數二次約束規劃 (Mixed-Integer Quadratically-Constrained Programming, MIQCP) 問題，比起線性規劃 (Linear Programming, LP) 問題，MIQCP 問題的求解難度與時間會大幅增加，因此為減少計算複雜度，在求解之前會先將限制式中的非線性方程式轉為線性方程式，如模型中的資源限制式(3.20)即可轉換成線性方程式。限制式(3.20)中含有絕對值項，含有絕對值項的方程式會讓求解最佳化問題的過程更加困難，因為該方程式有時並不是一個連續可區分的函數，然而，可以透過線性方法解決此問題 (Mangasarian and Meyer, 2006; Mangasarian, 2007, 2009; Caccetta et al., 2011)。本研究利用加入鬆弛變數 (slack variable) z_{tuj}^k 及限制式的方式將資源限制式(3.20)轉為多個線性方程式，加入的限制式如下

$$-z_{tuj}^k \leq q_{tuj}^k - c_{uj}^k \quad \forall j, \forall t, \forall u, \forall k \quad (3.31)$$

$$q_{tuj}^k - c_{uj}^k \leq z_{tuj}^k \quad \forall j, \forall t, \forall u, \forall k \quad (3.32)$$

$$\sum_j z_{tuj}^k = \psi^k \quad \forall t, \forall u, \forall k \quad (3.33)$$

針對一個限制式(3.20)，總共會增加 j 個鬆弛變數 z_{tuj}^k ，並利用 $2j + 1$ 個線性方程式取代原限制式，藉由此方式以減少求解過程之計算時間及複雜度。

3.3.2 空間分支定界法

分支定界法 (Branch and Bound) 為一種對可行解進行窮舉的演算法，多用來求解混合整數線性規劃 (Mixed-integer linear programming, MILP) 的問題，此方法共有三個步驟：分支 (Branch) 為選擇一個結點並在下一階段將此結點分為數個新結點；定界 (Bound) 為計算所有新結點的上界值 (Upper bound) 或下界值 (Lower bound) 並利用洞悉法做判定，若為最小化問題即找下界值，最大化問題則尋找上界值；洞悉 (Fathoming) 為判斷節點是否為可行解 (Horst et al., 2000)。本研究用來求解充電價格最佳化模型的方法為空間分支定界法，是一種用於尋找全域優化問題 (Global optimization problems) 之確定解的分治法 (Divide and Conquer)，和普通的分支定界法不同的是會先將問題劃分為多個更小的子問題 (Subproblem)，再利用凸鬆弛 (Convex relaxation) 方法求解子問題，而後面的步驟則皆與普通的分支定界法相同 (Pozo et al., 2011; Stein et al., 2013)。

充電價格最佳化模型屬於 MINLP 問題亦屬於 MIQCP 問題，許多市面上知名

的數學規劃優化器如 Gurobi Optimizer 及 CPLEX Optimizer 等軟體皆利用空間分支定界法求解 MIQCP 問題，透過此方法在疊代中不斷減少變量域並提高 MIQCP 的線性或混合整數線性鬆弛量 (Castro, 2016)。空間分支定界法最早由 Horst and Tuy (2013) 提出，Quesada and Grossmann (1995)、Ryoo and Sahinidis (1995) 和 Ryoo and Sahinidis (1996) 將其方法延伸並讓其方法更加完整，利用以下簡化的模型以說明空間分支定界法的求解過程 (Stein et al., 2013; Pozo et al., 2011)。

$$\min_{x,y} f(x,y) \quad (3.34)$$

$$s.t. \quad g(x,y) \leq 0 \quad (3.35)$$

$$h(x,y) = 0 \quad (3.36)$$

$$x^L \leq x \leq x^U \quad (3.37)$$

$$y \in [y^L, \dots, y^U] \quad (3.38)$$

3.2節價格最佳化模型的決策變數又分為連續變數 ($p_{t_{u,j}}^k, D$) 及整數 (Y_l)，其完整的一組解包含上述三種變數，此節定義 x 向量為一組完整解的連續變數，且必須有上界 x^U 及下界 x^L ，而 y 向量則代表一組完整解的所有整數，亦需有整數上界 y^U 及整數下界 y^L 。另外， S 為一組解的候選點集合，其一組解包含所有的連續變數及整數，且可分為 j 個子集合 S_j ； $f(x,y)$ 為目標式，等同於數學式(3.7)，而因價格最佳化模型為最大化問題，故此節將乘以負號以求最小化問題； $g(x,y)$ 為價格最佳化模型中為不等式的限制式； $h(x,y)$ 為價格最佳化模型中為等式的限制式。而不論是目標式或限制式，所有函數 $f(x,y)$ 、 $g(x,y)$ 及 $h(x,y)$ 都至少在某個子集合 S_j 的開集上是連續可微的， s_j^L 和 s_j^U 分別為一組解 (x,y) 在 S_j 中的下界及上界。空間分支定界法的目標微找到一最佳可行解 (x^*,y^*) 可滿足以下數學式

$$f^*(x,y) \leq f(x,y) + \epsilon \quad (3.39)$$

其中 ϵ 為給定且大於零的容忍偏差，而空間分支定界法的主要步驟如演算法1所示。其主要步驟2利用凸鬆弛法確保求解出該區域中目標值的下界。本研究利用上述之空間分支定界法求解為 MIQCP 的充電價格最佳化模型，以取得各充電站、各充電類型及各充電時段的最佳充電價格。

Algorithm 1 空間分支定界法

初始化:

- 設定最佳目標值 $U = \infty$ 和其對應的最佳解 $-\infty < (x^*, y^*) < \infty$
- 設定收斂的容忍誤差 $\epsilon > 0$

主要步驟:

Step 1: 選擇一個子區域 S_j

Step 2: 計算目標值之下界

if 利用該子集合 S_j 中 (x_j^L, y_j^L) 計算出的下界 l 小於 U then
進行 Step 3

else

回到 Step 1

end if

Step 3: 計算目標值之上界

利用該子集合 S_j 中 (x_j^U, y_j^U) 求解原問題，以求目標值的上界 u

Step 4: 修剪區域

if $u \leq U$ then

設 $(x^*, y^*) = (x_j^U, y_j^U)$ 及 $U = u$ ，且去除所有下界 l 大於 U 的子區域

else

回到 Step 1

end if

Step 5: 檢查區域

if $l - u \leq \epsilon$ then

U 即是全域最佳解

if 有子區域尚未搜索 then

回到 Step 1

else

停止

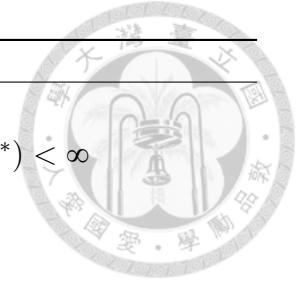
end if

else

進行 Step 6

end if

Step 6: 將區域再分成更小的子區域(分支)，並回到 Step 1





第四章 案例研究

本章節將第二章所闡述的需求預測模型及充電價格最佳化模型運用到實際案例當中，並以人口密度及停車場數量較為密集的臺北市中山區的部分範圍為研究區域，並採用張雯婷(2020)個案研究中臺北市電動汽車充電需求的相關數據(研究時間為2020年1月22日至2020年3月20日)，以預測各區域之充電需求。本研究首先在具有 Intel Core i7-10700、2.90 GHz 的處理器和 RAM 8.0 GB 的電腦上運行，並透過 R 4.1.1 建立電動汽車充電需求預測模型，以獲得臺北市各區域方格中潛在的充電需求量。另外，本研究利用 Python 3.7.6 撰寫程式碼，並在具有 Intel Core i5-1035G7、1.20 GHz、1.50 GHz 的處理器和 RAM 16.0 GB 的電腦上運行，透過 Gurobi Optimizer 9.1.0 求解充電價格最佳化模型，以求充電營運商獲得最大利潤的最佳價格策略，其求解結果包含各充電站之充電價格、契約容量之大小、充電樁之設立位置及數量。

因需要用於需求預測模型的資料如人口數、興趣點個數及停車場，多是與空間相關的資料，故利用地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 處理資料，其可以將各類資訊以圖層的方式儲存。本研究將收集到的資料透過 QGIS 進行整理，此軟體可以讓使用者方便及快速地透過圖層分析、處理地理資訊，並視覺化地理統計資料。另外，若劃分成過小的網格則會造成計算複雜度大幅上升，因此本文將研究區域劃分成 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 大小的網格，以便計算。

4.1 研究區域

臺北市於臺灣直轄市、縣、市人口密度的排名第一，人口密度為每平方公里 9287.70 人(內政部, 2022)，而截至民國 110 年 4 月底，臺北市油電混合汽車計登記達 3.8 萬輛，純電動汽車計登記則達 4,714 輛(臺北市政府主計處, 2021)，為全台電動汽車登記數量最多的縣市。臺北市不僅地狹人稠，自有車位率也較低，故充電站之規劃更為重要。

電動汽車之充電過程因所需時間較長，即使現在的充電技術較為進步，然而利用快速充電讓電動汽車可以充 80% 的電量，也至少需要 20 分鐘。所以，電動

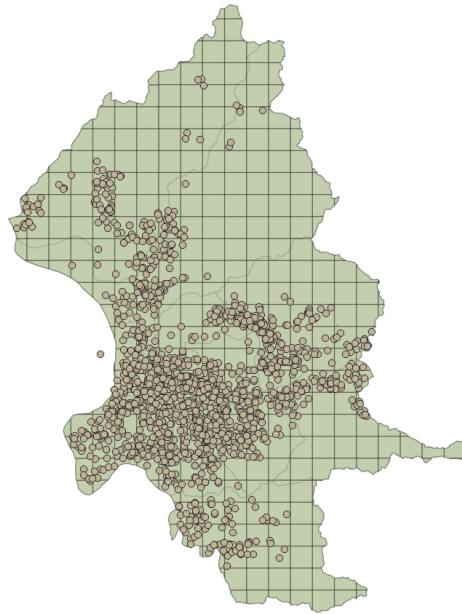


圖 4.1: 臺北市路外停車場分佈圖

汽車使用者難以參照燃油車車主以加油為目的方式，前往加油站加油。電動汽車之使用者多半利用停車時間順便充電，此時便需要長時間佔用停車位。而臺灣的自有車位比例約 69%，雖遠高於仰賴公共充電設施的荷蘭 (30%)，但因臺灣住宅型態有 48% 為集合式住宅 (經濟部, 2021)，家中安裝充電樁困難度高於多數為獨棟住宅的英美國家，故地狹人稠的臺北市更需要仰賴於各停車場的公共充電設施，故本研究考慮將充電設施設立於包含平面式、立體式、機械式或塔臺式等路外停車場，圖4.1為臺北市路外停車場之分布圖。

Palanca et al. (2020) 及 Wagner et al. (2013) 皆透過分析餐廳、飯店及商業大樓等興趣點 (Points of Interest, POI) 以找出合適的充電站設置位置。因興趣點可視為車輛使用的目的地，進而構成電動汽車潛在的充電位置。依上所述，電動汽車車主會利用長時間停留的時間順便充電，故本研究利用張雯婷 (2020) 整理的臺北市興趣點個數作為預測充電需求的依據之一。其共收集了 21845 個興趣點，並分成八個類別：政府機關、旅遊景點、購物、運動與娛樂、交通設施、教育與醫療、商業服務、居住與餐飲，細項如表4.1所示。計算每個網格涵蓋的興趣點個數後，將其繪製成臺北市的空間網格形式，由圖4.2可看出興趣點數量於臺北市的大同區、中山區、松山區、中正區、大安區及信義區之交界處較為密集。

臺北市的人口分布也會影響電動汽車的潛在充電需求，根據研究調查顯示，許多電動汽車車主傾向於晚上回家休息時才進行充電 Hardman et al. (2018)，故人口較為集中的地區，充電需求也會隨之增加。本研究收集臺北市各行政區的人口

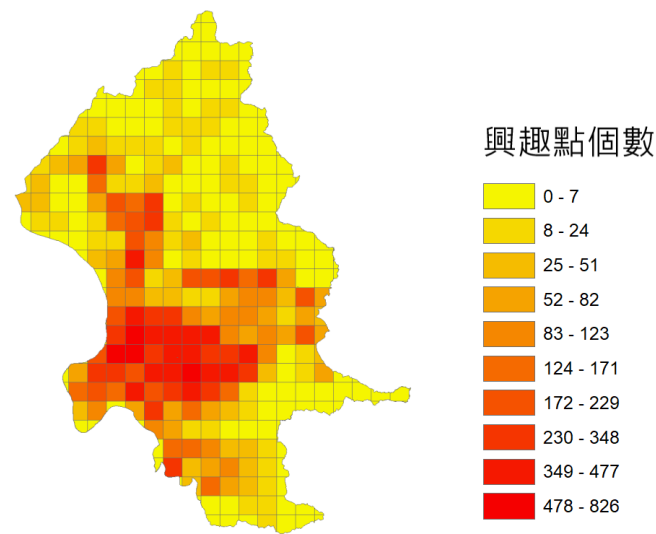


圖 4.2: 臺北市興趣點個數

註：取自張雯婷(2020)的案例研究

數，而受限於人口數資料之特性，因此本研究假設人口是均勻散佈在各行政區中，並無集中之現象。本研究將其資料網格化後，結果如圖4.4，可看出人口集中於臺北市的大同區、中山區、松山區、中正區、大安區、信義區、士林區及文山區的部分區域。

本研究為減少複雜度，故只考慮將充電裝置設置於停車場內，而根據圖4.1可看出路外停車場集中於臺北市的大同區、中山區、松山區、萬華區、中正區、大安區及信義區，而在士林區、文山區、內湖區及南港區的部分區域也相當集中。但若採取所有路外停車場作為研究範圍，模型的計算複雜度會大幅提升，故需縮小範圍。而因3.1的需求預測模型不僅考慮停車場的停車費(價格變數)，還考慮人口數及興趣點個數，所以將上述所提及的三個變量(價格變數、人口數分布狀況及興趣點個數分布狀況)也考慮在內後，將研究區域縮小為於三個變量分布皆較密集的中山區部分區域，其結果如圖4.6所示，圖中黃色的區域便為本研究的研究區域，圖4.7則為包含其網格 ID 及路外停車場分布的研究區域圖。

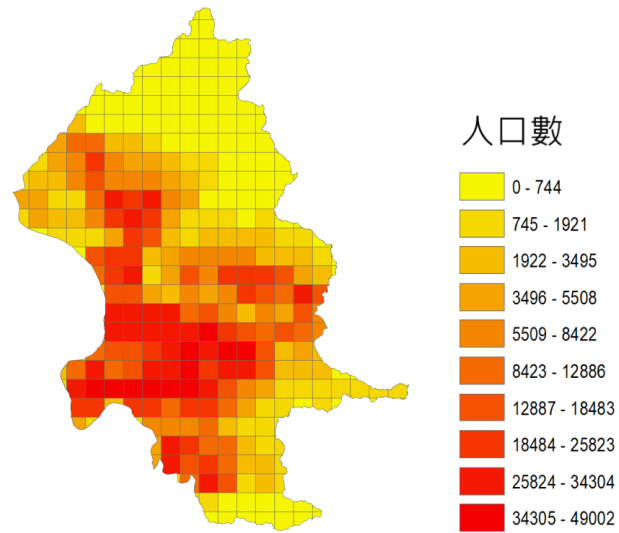


圖 4.4: 臺北市人口數

註：取自張雯婷 (2020) 的案例研究

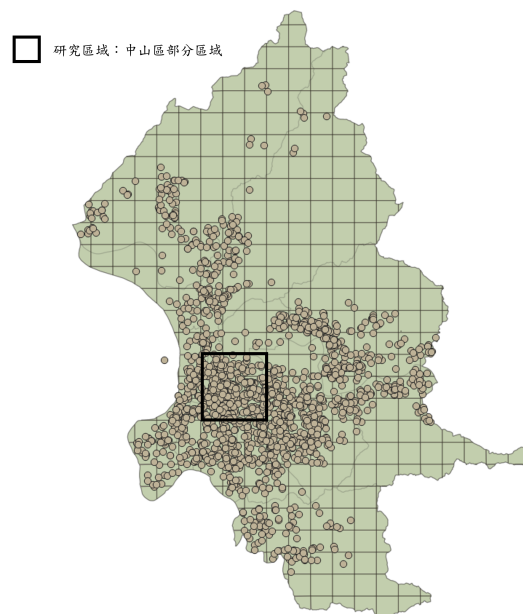


圖 4.6: 研究區域示意圖



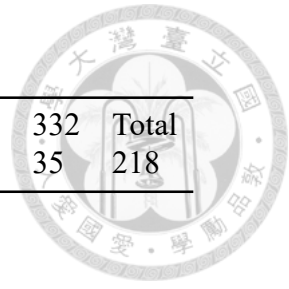
圖 4.7: 含停車場分佈之研究區域圖

表 4.1: 臺北市興趣點類別

類別	細項	個數
政府機關		617
旅遊景點	公園、遊樂園、...	799
購物	超市、百貨公司、...	6326
運動與娛樂	運動中心、電影院、...	586
交通設施	停車場、加油站、...	3241
教育與醫療	學校、醫院、診所、...	4836
商業服務	銀行、金融保險、...	3481
居住與餐飲	飯店、餐廳、咖啡廳、...	1959
總計		21845

表 4.2: 各網格涵蓋之停車場個數

網格編號	11	27	84	182	236	266	280	330	332	Total
路外停車場個數	9	29	10	32	25	34	18	26	35	218



4.2 參數設定

本節分別闡述需求預測模型及價格最佳化模型在案例研究中需使用的資料來源及參數設定。首先，需求預測模型需利用大量歷史資料以找出最適參數後，再進行需求預測，因此在需求預測模型中的研究範圍為整個臺北市。本研究將臺北市劃分成 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 大小的網格後，獲得總數為 332 格的網格資料，並以此計算最適參數。需求預測模型中會影響充電需求的三個變數分別為人口數、興趣點個數及價格變數，其中，人口數及興趣點個數已於 4.1 節說明。有鑒於臺灣並無公開的電動汽車充電之歷史資料，故本研究無法直接利用充電價格資料估計價格變數的最適參數。因此，本研究價格變數的替代方案為停車場之停車費做為充電需求預測的價格變數。一般而言，考慮於路外停車場設置充電裝置，而影響駕駛者選擇停車場的因素不外乎就是駕駛者的目的地以及停車場的停車費用，因此利用停車場之停車費代表影響充電需求預測的價格變數。本案例研究依據政府公開的路外停車場資料 (臺北市停車管理工程處, 2022)，將資料整理後，計算每個網格的平均停車價格以代表價格變數。

本案例研究僅針對臺北市其中 9 個網格 ($U = 9$) 的區域做充電站規劃，利用充電價格最佳化模型計算充電站營運商在此 9 個網格中營運充電站的最佳價格策略。此 9 個網格共包含 218 個有完整資料且有足夠停車格可以設置充電裝置的路外停車場，各網格所包含的停車場數量列於表 4.2。另外，表中的 u 代表網格編號， j 代表充電站編號，而平均停車費 $F_{u,j}$ 則是該停車場每小時的平均停車費用。

充電站營運商在本案例研究中僅提供兩種充電類型的充電服務，分別為快充及慢充。各國多以充電功率 22 瓩為快充及慢充的分界線，而國際設置案例中的路外與路邊停車格大多設置 7 22 瓩的充電樁 (IEA, 2021)，故本研究的慢充充電樁之功率 E^R 設為 7 瓩。目前臺灣的 DC 直流快速充電的功率多為 50 瓩以上，以提供快充服務的特斯拉超充站為例：都市超級充電站的最大功率為 60 瓩、V2 超級充電站的最大功率為 120 瓩、V3 超級充電站的最大功率為 250 瓩 (特斯拉, 2022)。然而，電動汽車並不是所有時間都使用最大功率充電，若於特斯拉的 V3 超級充電站充電，實際上只有電池電量低電量的時候會使用到 250 瓩最大功率進行充電，

接著功率會慢慢遞減，因此本研究將快充功率 E^F 設定為臺灣目前市面上最常見的快充裝置之功率：60 瓩。另外，在充電最佳化模型中會將各區域的需求事件量 \bar{Q}_{tu} 依照各區域之慢充佔比 γ_u^R 分成快充需求 Q_{tu}^F 及慢充需求 Q_{tu}^R 。且本案例研究參照經濟部推動公共充電樁的第一階段「示範推廣期」之辦法，將各區域之慢充需求量設為總需求量的 60% ($\gamma_u^R=0.6$)，快充需求量設為總需求量之 40% (經濟部, 2021)。

本研究採差別訂價策略，包含各充電站間的差別訂價和各時段的差別訂價，亦代表各充電站、各充電類型及各充電時段會有不同的價格。首先會依照需求預測之結果，將高於該區平均需求量的充電站視為熱點充電站，而僅有熱點充電站採各時段的差別訂價，亦即尖峰、離峰時段的差別訂價，因電力成本參考台電高壓電力的二段式時間電價 (台灣電力公司, 2018)，故尖峰時段亦設定為與台電相同的時段：早上 7 點至晚上 10 點，離峰時間則為其他時段。此外，本案例研究為簡化計算，以小時為時間間格 ($T=24$)。

充電價格最佳化模型目標為求充電站營運商營運一年的最大利潤，故需計算變動成本及固定成本，其變動成本為每月的電力成本，固定成本則包含建設充電裝置之成本、營運及維護成本。臺灣的電力皆由台電提供，充電站營運商屬於有大型電力需求的高壓用戶，需與台電簽訂契約以獲得電力，因此電力成本參照台電高壓電力的二段式時間電價 (台灣電力公司, 2018)。台電的時間電價將每月的電力成本分為基本電費及流動電費，基本電費採用一般的經常契約，將每月 1 瓩的基本電費 MC 設為 NT\$ 217.3，流動電費 EC_t 則直接採用週一至週五的尖峰時間電價每度電 NT\$ 3.29 及離峰時間電價每度電 NT\$ 1.37，為方便計算，時間電價價格皆採取價格較高夏月價格當作電力成本。另外，與台電簽訂契約還需考慮到超約罰款，當超約用電容量在契約容量 10% ($\Omega=0.1$) 以下部分，按 2 倍計收基本電費；超約用電超過契約容量 10% 部分，按 3 倍計收基本電費 (台灣電力公司, 2022)。因此，台電契約容量的基本電費屬於三階段的階梯式訂價 ($L=3$)。

Luo et al. (2018) 選取能科科技股份有限公司生產的三種典型充電設施作為研究案例的充電裝置代表，以計算投資及營運成本，而本研究的慢充及快充之充電功率正好與該研究選擇的其中兩個充電裝置代表一致，皆為 7 瓩及 60 瓩，故本研究亦選擇充電設施 NCCP-AC220-7000-GB05 及 NCCP-DC750-060K-GB01 作為慢充及快充之代表，所選充電裝置的參數如表 4.3 所示。另外，充電設施的年度營運及維護成本不易直接計算，因此假設各充電裝置的年度維護及營運成本為投資成

表 4.3: 充電裝置之設定參數

	NCCP-AC220-7000-GB05	NCCP-DC750-060K-GB01
充電功率 (kW)	7	60
投資成本 (NT\$)	11,790	165063
年度營運及維護成本 (NT\$)	1,179	16506
使用壽命 (年)	10	10

本的 10% (Zhang et al., 2015a)。

充電價格最佳化模型中需先設定一組快充及慢充的價格上界及下界，避免此模型為求最大化利潤而求解出不合理的充電價格。以國際使利用 AC 交流電充電的平均成本為每度 US\$ 0.089 至 US\$ 0.266 (Comparethemarket, 2022) 為參考，換算成台幣約為 NT\$ 2.65 至 NT\$ 7.91，因而將慢充的價格下界 $minP^R$ 及上界 $maxP^R$ 分別設為 NT\$ 3.00 及 NT\$ 7.00。快充價格則是參考特斯拉超級充電站於臺灣的收費價格，超級充電使用費以每度 NT\$ 7.00 至 NT(特斯拉, 2022)，為避免快充的價格區間與慢充的價格區間有重疊的部份，故本研究假設快充的價格下界 $minP^F$ 及上界 $maxP^F$ 分別為 NT\$ 8.00 及 NT\$ 15.00。另外，綜觀依據上述的針對慢充充電價格及快充充電價格的討論，假設於非熱點充電站的快充、慢充價格相關關係係數為 0.8；於熱點充電站且為尖峰時段的快充、慢充價格相關關係係數為 0.7；於熱點充電站且為離峰時段的快充、慢充價格相關關係係數為 0.8。而不論充電類型為快充或慢充，其尖峰、離峰價格相關關係係數皆設為 0.9，此設定參閱台電各類型時間電價之流動電費的尖峰及離峰價格 (台灣電力公司, 2018)。因該研究區域 (中山區) 之停車場多數並無提供電動汽車之充電服務，再加上臺灣目前公開的電動汽車充電歷史資料較少，故各區的原始充電價格 \bar{P}_u^k 是利用各區停車場之平均停車費用與本案設定之充電費用換算求出，其結果列於表 4.4。

4.3 結果

本節將闡述案例研究之所有結果，其結果包含利用 3.1 節的需求預測模型預測研究區域之潛在充電需求、使用充電樁數量最佳分配法計算各停車場之最適充電樁數量及透過 3.2 充電價格最佳化模型求解各充電站之最佳充電價格。另外，充電價格最佳化模型中，有一計算充電需求事件數量的數學式 3.15，此數學式之參數設定需採用需求預測模型的參數估計結果，因而將時空高斯過程模型的參數估計結果



表 4.4: 各區域之平均停車費用 (單位: NTS)

u	停車費 F_u	快充價格 \bar{P}_u^F	慢充價格 \bar{P}_u^R
11	68.10	13.08	5.90
27	69.74	13.23	5.99
84	57.00	12.11	5.35
182	86.22	14.67	6.81
236	72.00	13.43	6.10
266	71.02	13.34	6.05
280	71.62	13.39	6.08
330	73.64	13.57	6.18
332	71.43	13.38	6.07

表 4.5: 需求預測模型之參數估計結果

參數	估計值	標準誤差	95% 信賴區間	顯著與否
截距項	1423.798	1.602	[1420.653, 1426.941]	是
人口數	5145.033	5.203	[5134.818, 5155.240]	是
興趣點個數	-94.067	0.096	[-94.256, -93.879]	是
價格變數	-1619.39	1.69	[-1622.709, -1616.075]	是
σ_e^2	-7.966	0	[-7.966, -7.966]	是
σ^2	4.917	0	[4.917, 4.918]	是
a	0.961	0	[0.961, 0.961]	是

列於表4.5。

本研究將人口數、興趣點個數及各停車場之平均停車費的資料標準化後才代入模型計算，故表4.5的參數估計結果是針對標準化後的數值。此外，表中的95%信賴區間是為了判斷該參數於模型中是否為顯著的參數，當該參數的95%信賴區間中並未包含0時，代表此參數在95%的信心水準下是顯著的。而由表4.5顯示人口數、興趣點個數及以停車費代表的價格變數皆對需求預測有較顯著的影響。影響的程度則和參數的估計值的大小成正比關係，而參數為正數或負數則分別代表對需求預測有正面或負面關係，以人口數的參數估計值為例，增加一單位的人口數會讓預測的充電需求增加5145.033單位，意味充電需求會隨人口數的增加而提高。興趣點個數及價格變數則與充電需求呈負面關係，當興趣點個數上升或停車費的價格提升皆會降低電動汽車的充電需求。

本研究以表4.5的估計值為充電需求預測模型之參數，並利用4.1節的人口數、興趣點個數及各路外停車場之停車費的資料預測一天中每小時的電動汽車潛在充電需求，研究區域之需求預測結果列於表4.6，其平均需求事件數為該區域每小時

表 4.6: 研究區域之潛在充電需求預測結果

網格編號	平均需求事件數	最大需求事件數	最小需求事件數
11	32	56	3
27	136	182	90
84	277	313	236
182	295	417	225
236	231	272	208
266	274	343	208
280	110	187	57
330	148	223	103
332	600	707	550



的平均需求量。因預測的潛在充電需求包含電動汽車各類型之充電需求，故本案例研究參照經濟部推動公共充電樁的第一階段「示範推廣期」之辦法，將慢充電量設為總需求量的 60%，快充需求量設為總需求量之 40% (經濟部, 2021)。以各區域慢充及快充的需求事件數為依據，再根據各停車場之停車格數計算出各充電站最佳之充電樁數量。充電樁之設置數量及充電站是否屬於熱點充電站皆會影響充電價格最佳化模型的求解結果，因此，本研究不僅利用預測的充電需求計算最佳充電樁設置數量，還利用此結果判斷其充電站是否為熱點充電站，若此充電站為熱點充電站，則 $h_{uj} = 1$ 。

本案例研究利用充電價格最佳化模型計算充電站營運商一年的最大利潤，並求解出各充電站之各種充電類型、各種充電時段的價格，充電價格的各項結果列於表 4.9 至表 4.10。本研究希望可以在讓充電站營運商賺取最大利潤的狀況下，透過各充電站、各充電時段及各充電類型之間的差別訂價以影響需求，進而讓所有充電裝置能被有效利用。因此利用此結果及各區域之原始充電價格分別計算充電站一年可獲得之最大利潤，並將兩者作比較，前者(差別訂價)的目標值為 NT\$156,196,078.9，而後者(原始訂價)的目標值則為 NT\$ 145,682,698.2，前者的利潤明顯高於後者。因為 3.2 節的充電價格最佳化模型的目標式(3.7)並不是利用需求數量計算利潤，而是利用實際可以充電的需求進行計算，所以充電站營運商採差別訂價策略確實可以改變需求，並讓實際可以充電的需求事件量增加，亦及讓充電設施盡可能地被有效利用。此外，充電站營運商欲與電力公司簽訂的最適契約容量 (D) 的求解結果為 1323.57 瓩。

因各區域之充電價格的結果皆相似，故僅列出區域 11 之各充電站、各充電類型及各充電時段的充電價格以利說明，另外，若表中的結果無顯示價格代表此充

表 4.7: 區域 11 之熱點充電站的充電價格 (單位：NT\$)

u	j	快充尖峰價格	快充離峰價格	慢充尖峰價格	慢充離峰價格
11	6	N/A	N/A	8	7.2
11	7	15	13.5	8	7.2
11	8	N/A	N/A	8	7.2

表 4.8: 非熱點充電站的充電價格 (單位：NT\$)

u	j	快充價格	慢充價格
11	0	13.93	6.89
11	1	14.16	7.30
11	2	N/A	7.48
11	3	14.92	7.45
11	4	14.92	7.44
11	5	14.17	7.41

電站並無設置此充電類型之充電裝。首先，以表4.7及表4.8來看區域 11 中各充電站的充電價格，各區域中的各充電站會因停車場之停車價格及充電樁數量的不同影響該充電站之需求，進而影響到充電價格。由結果可知當各充電站的充電樁數量相似但停車費有差異時，若停車費較高，充電費用則會較低，非熱點之充電站 0 的停車費略高於其他非熱點充電站，而該充電站之充電價格略低於其他充電站，此外，雖然充電站 3 至充電站 5 的停車費皆相同，但因充電站 5 所設置的充電樁較多，故該充電站之充電價格略低於充電站 3 和充電站 4。而皆屬於熱點之充電站 6 至充電站 8 的停車費用與充電樁數量都相近，所以此三個充電站之慢充價格也相同。

各區域中各充電站間的差異皆如同上述，但因難以直接利用表4.7及表4.8的結果比較各區域之平均充電價格差異，故將各區域之各種類的平均充電價格結果整理於表4.9。由表4.9可看出區域 182 每小時的平均停車費遠高於其他區域，而該區之各種充電價格則略低於其他區域，因電動汽車車主充電除了需繳交充電費用外還需繳交該停車場之停車費，所以車主會考慮兩者價格的加總，不僅如此，該區域足夠的充電樁數量也是原因之一。雖區域 280 的充電價格也略低於其他區域，但並不是因為該區域之停車費用較高，而由表4.10的需求滿足率及充電樁利用率可以判斷原因為該區的充電裝置有供過於求的狀況。此外，區域 11 及區域 27 的充電價格明顯高於其他區域，因為此兩區域之充電樁數量皆較少且停車費用較低，而由區域 11 的需求滿足率及充電樁利用率可判斷該區有供不應求的狀況，故



表 4.9: 各區域之平均充電價格 (單位：NT\$)

<i>u</i>	快充		慢充		快充	慢充
	尖峰	離峰	尖峰	離峰		
11	15.00	13.50	8.00	7.20	14.42	7.33
27	14.88	13.39	7.94	7.14	14.14	7.32
84	14.34	12.91	7.65	6.88	13.64	7.00
182	12.32	11.09	7.62	6.86	13.66	7.65
236	14.71	13.21	7.99	7.19	14.62	7.63
266	14.17	12.76	7.17	6.44	14.61	7.57
280	12.35	10.78	7.39	6.65	12.99	7.76
330	13.81	12.43	7.69	6.92	12.36	7.27
332	14.45	13.31	7.63	7.05	14.04	7.11
平均	14.00	12.60	7.68	6.93	13.83	7.40

充電價格較高。

充電價格策略將各類型之充電費用區分成三種，分別是熱點充電站的尖峰價格、非熱點充電站的離峰價格及非熱點充電站的單一價格，由表4.9的結果顯示，不論充電類型為快充或慢充，平均價格由大到小為熱點充電站的尖峰價格、非熱點充電站的單一價格及熱點充電站的離峰價格。另外，以熱點充電站的平均價格來說，快充的尖峰時段及離峰時段的價差較慢充明顯，快充的尖峰及離峰時段價差約為台幣 1 至 2 元，而慢充的尖峰及離峰時段價差則皆在台幣 1 元內。

本研究之充電價格最佳化模型的目的除了讓充電站營運商透過此價格策略獲得最高利潤外，也希望可以盡可能滿足電動車車主的充電需求，並讓充電設施的利用率達到最大化。表4.10列出各區域之各充電類型的充電需求滿足率及充電樁實際的使用率，充電需求滿足率為實際可以接受充電服務的需求數量於總需求量的佔比，充電樁的使用率則為實際有提供充電服務的充電樁佔比。由結果可知慢充的需求滿足率皆偏高，代表慢充的有較高比例的充電需求可以確實充電，而不僅代表充電樁數量足夠，也代表各充電站間的差別訂價有成功分散需求，避免需求集中於部分充電站而導致無法獲得充電服務。然而，有部分區域的慢充充電樁利用率僅有五成至六成，代表慢充的充電裝置有供過於求的情況發生。快充需求的需求滿足率較低，以最低的區域 11 為例，此區域的快充充電樁利用率已達百分之百，代表雖然該區的充電樁數量不足，但該區的需求事件並無集中在特定的充電站，以至於有電動汽車充電需求無法被滿足。從各區域的充電裝置使用率可看出各區域之平均使用率皆可達到六成以上，而僅有區域 332 明顯略低，由表4.9可

表 4.10: 快充及慢充的需求滿足率及充電樁使用率

u	快充		慢充	
	需求滿足率	充電樁利用率	需求滿足率	充電樁利用率
11	39.2%	100.0%	74.0%	81.1%
27	90.5%	100.0%	91.0%	99.9%
84	81.5%	74.6%	73.8%	67.7%
182	77.7%	62.9%	87.7%	69.2%
236	88.1%	71.6%	98.3%	53.0%
266	63.3%	87.2%	89.4%	72.2%
280	68.0%	77.3%	93.2%	67.2%
330	52.3%	61.8%	100.0%	60.4%
332	66.4%	37.8%	97.8%	55.6%
平均	69.7%	74.8%	89.5%	69.6%

看出該區之平均充電價格也已高於其他區域，代表該區價格無法依據目前限制之價格上下界內達到價格差異，以至於無法讓需求分散。此外，儘管快充需求及慢充需求的平均滿足率及充電樁利用率已近乎達七成以上，但本案例研究仍可以再調整充電樁設置數量以改善此結果。

4.4 敏感度分析

在需求預測模型及充電價格最佳化模型中都是先估算出電動汽車之總潛在需求數量後，再將總需求事件數依比例區分為各充電類型之充電數量，然而，滿足電動汽車車主的充電需求的充電裝置類型比例難以量化，故採用敏感度分析，透過調整充電裝置類型佔總需求量的佔比，觀察其對求解結果之影響，而在本案例中，充電站營運商提供兩種充電服務，分別為 60 瓩的快充服務及 7 瓩的慢充服務。本研究為一完整的充電站規劃，包含需求預測、充電樁數量分配及充電價格訂價。其中各類型之充電樁的分配和需求預測之慢充佔比有關，但因充電樁建造後，充電樁數量及類型較難改變，因此敏感度分析僅針對充電最佳化模型中的不同慢充佔比 (γ_u^R) 進行求解，並分析其於目前設定的最佳充電樁數量下之結果。另外，因參考經濟部推動公共充電樁的第一階段「示範推廣期」之辦法，而此辦法中的慢充需求量預估為總需求量的 60%，故本研究針對慢充佔比 (γ_u^R) 為 40%、50%、60%、70% 及 80% 的情況求解。

本案例研究的研究區域共有 9 個區域，但若於敏感度分析中比較全部區域

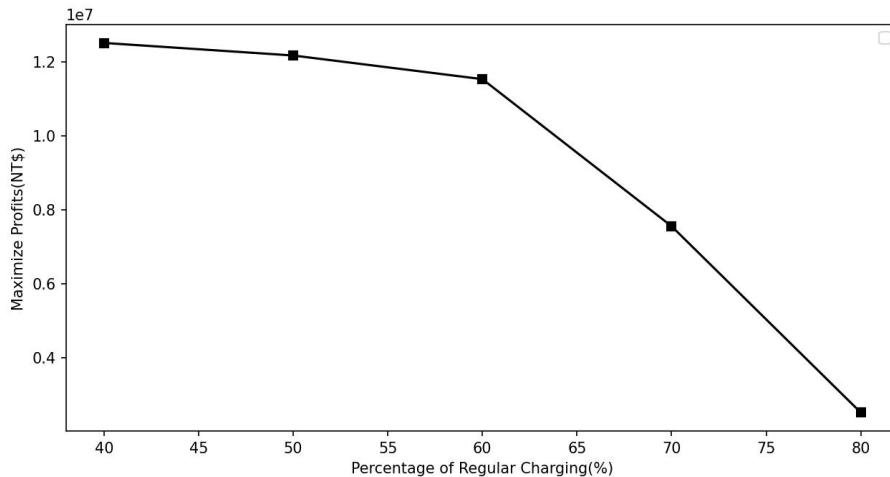


圖 4.8: 不同慢充佔比狀況下充電站營運商可獲得的最大利潤

之充電站的充電價格結果，較不容易直接看出差異，故本研究僅選取其中一區域做敏感度分析。從圖4.2的興趣點個數圖及4.4的人口數可看出除區域 332 之外，各區域間的差異不大。因此，選擇熱點充電站及非熱點充電站數量皆類似，及各停車場停車費用差異較明顯的區域 280，做為敏感度分析的研究區域。圖4.8即為區域 280 於不同慢充佔比之情況下充電站營運商所獲得的最大利潤，結果顯示當慢充佔比越高，獲利越低，而從圖中的曲線看出當慢充佔比低於 60% 時，最大利潤增加的幅度漸漸趨緩。因本研究是利用慢充佔比為預測需求量之 60% 的情況下設立的充電裝置計算充電站營運商的最佳利潤，所以當慢充佔比高於 60% 時，會產生多餘的快充充電樁，儘管快充之充電價格較高，但由表4.3可知快充充電樁的投資成本、年度營運及維護成本皆為慢充充電樁之成本的 14 倍左右，故可以推斷此為讓充電站營運商獲得之最大利潤大幅降低的原因之一。

調整慢充佔比會改變區域中各充電站的需求分佈，但並不是所有改變的需求數量大小都足以造成充電價格的變化，表4.11及表4.12僅分別列出快充及慢充價格有產生差異的充電站及其時段。區域 280 有 8 個充電站為熱點充電站及 10 個充電站為非熱點充電站，其中分別有 3 個熱點充電站及 5 個非熱點充電站有產生價格差異。由表4.11的結果可知熱點充電站中快充的離峰時段價格僅有在快充需求大幅降低亦即慢充佔比增加時，價格會隨之降低，其餘價格皆一致，而非熱點充電站 ($h_{uj} = 0$) 的快充價格則是在慢充佔比較低時才有較顯著的差異。另外，屬於熱點充電站的充電站 11 之快充價格及慢充價格皆有變化，而慢充價格之差異也僅發生在快充充電需求大幅減少的狀況，其不論是當慢充佔比為 40%、50% 及 60% 時皆相同。由上述價格變化及充電站營運商可獲得的最大利潤變化來看，當實際的慢充充電需求佔比在 40% 至 60% 間改變時，對整體獲利及各充電價格的影響並

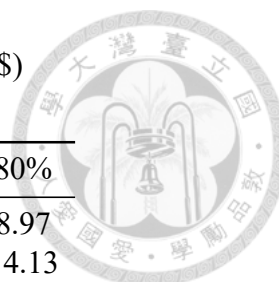


表 4.11: 不同慢充比例下的快充價格 (單位：NT\$)

j	h_{uj}	時段	40%	50%	60%	70%	80%
1	1	離峰	13.46	13.46	13.46	13.46	8.97
4	0	全時段	11.87	13.11	13.40	14.15	14.13
7	0	全時段	11.43	12.66	12.96	13.70	12.81
8	0	全時段	10.98	12.22	12.51	12.37	12.37
10	0	全時段	10.09	11.33	12.08	11.48	11.48
11	1	尖峰	15.00	15.00	13.62	11.12	11.12
11	1	離峰	13.50	13.50	12.25	10.01	8.75
13	0	全時段	10.09	11.33	11.63	11.48	11.48

表 4.12: 不同慢充比例下的慢充價格 (單位：NT\$)

j	h_{uj}	時段	40%	50%	60%	70%	80%
6	1	離峰	3.47	5.65	5.65	5.65	5.65
11	1	尖峰	7.98	7.98	7.98	7.78	7.78
11	1	離峰	7.18	7.18	7.18	7.00	7.00

不大，但若慢充需求佔比上升至 70% 以上，充電站營運商勢必要調整其設置之充電裝置數量以減少損失的利潤。

在電動車的充電市場中，並不是剛好所有的需求都能被滿足，儘管本研究希望透過差別訂價以分散需求，仍會有充電站發生供不應求或供過於求的狀況，故利用實際可以接受充電服務的需求數量衡量不同慢充佔比之下的需求滿足率及充電樁利用率，其結果如圖 4.9 及圖 4.10 所示。慢充的需求佔有率在慢充佔比超過 60% 時逐漸下降，而充電樁利用率在慢充佔比達到 50% 以上時，曲線變得趨緩，代表當慢充需求增加，會產生有需多充電站出現供不應求的狀況，而快充則是有相反的情況發生。因此，慢充佔比會影響各類型之充電樁的數量分配，進而影響充電站營運商的收益。

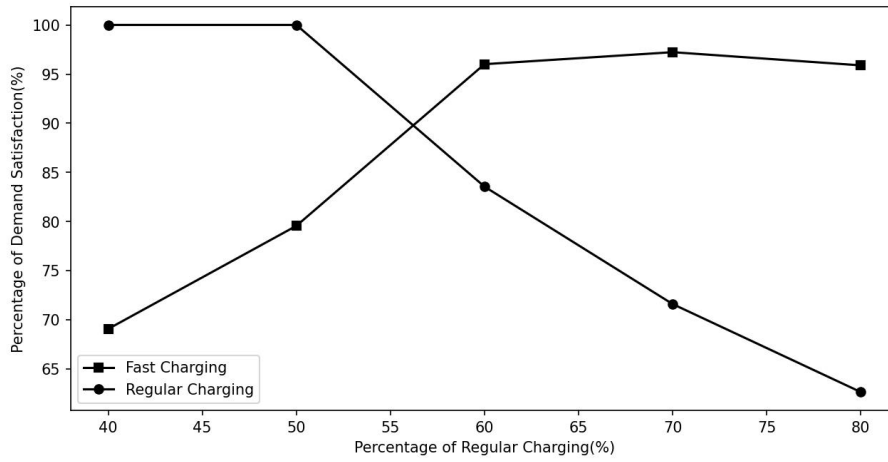


圖 4.9: 不同慢充佔比下的需求滿足率

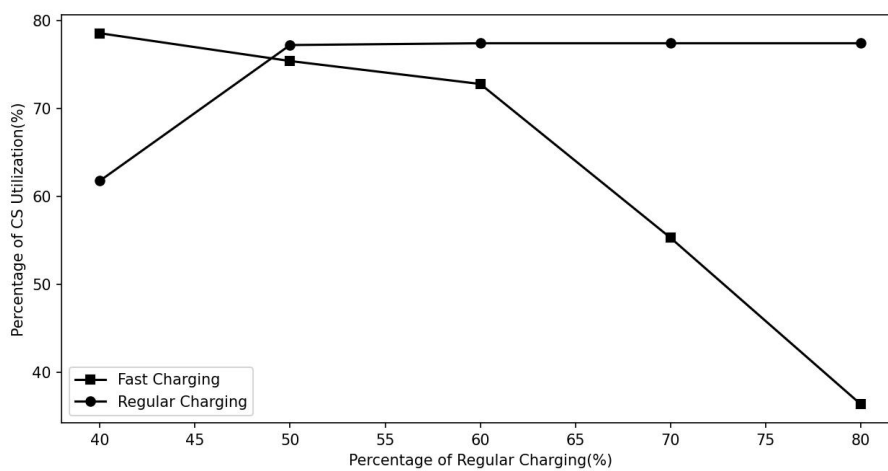


圖 4.10: 不同慢充佔比下的充電樁利用率



第五章 結論與未來研究

隨著全球環保意識增長，近年來，各國積極推行電動汽車之相關政策，而為了增加人民購買及使用電動汽車的意願，充電基礎設施的規劃則相當重要。電動汽車車主大多會選擇停車時順便充電，因此本研究提出針對停車場的充電站規劃，其規劃包含預測潛在的充電需求、分配充電樁設置數量及計算充電價格。另外，因需求預測會影響充電樁數量的設置及充電價格的制訂，而充電價格也會造成充電需求的改變，因此本研究先利用高斯時空過程模型預測電動汽車的潛在需求數量，再分配充電樁數量至各停車場，最後利用混整數非線性模型求解各充電站、各類型充電設施的充電價格，其目標為讓充電站營運商透過此規劃獲得最大利潤。

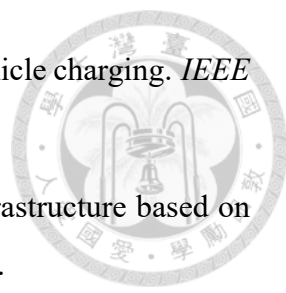
案例研究表明，針對地狹人稠的臺北市，人口數對潛在充電需求具有正相關性，而興趣點個數及停車場之停車費用對潛在充電需求具有負相關性，另外，各充電站之充電價格則與各停車場之停車費用有負相關性。本研究除了讓各充電站採差別訂價策略外，還依需求預測之結果將充電站分為熱點充電站及非熱點充電站，而在熱點充電站使用尖峰時段及離峰時段的差別訂價，研究案例的結果可知差別訂價可以讓充電站營運商獲得更高的利潤，而充電站營運商可以藉由調整需求的充電類型佔比、充電價格的上下界或充電樁數量分配方式等，以提高充電需求滿足率及充電裝置利用率。

希望可以透過完善的充電基礎設施規劃及合理的充電價格提高民眾選擇電動汽車之意願，進而讓電動汽車普及。本研究僅考慮路外停車場之充電設施，故未來的研究方向可將路邊停車格、高速公路休息區或交流道附近的充電站等地方納入充電站規劃中。另外，不同類型之充電樁需求較難區分，因此未來可以找出對各種充電類型需求之顯著的影響因素或判斷方法，以讓模型可以更準確的預測各種充電類型的潛在充電需求，並讓模型計算出更合適的充電樁設置數量及充電價格。

參考文獻



- Arias, M. B. and Bae, S. (2016). Electric vehicle charging demand forecasting model based on big data technologies. *Applied energy*, 183:327–339.
- Asghari, M., Fathollahi-Fard, A. M., Mirzapour Al-e hashem, S., and Dulebenets, M. A. (2022). Transformation and linearization techniques in optimization: A state-of-the-art survey. *Mathematics*, 10(2):283.
- Aujla, G. S., Kumar, N., Singh, M., and Zomaya, A. Y. (2019). Energy trading with dynamic pricing for electric vehicles in a smart city environment. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 127:169–183.
- Awasthi, A., Venkitesamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., and Singh, A. K. (2017). Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm. *Energy*, 133:70–78.
- Blangiardo, M. and Cameletti, M. (2015). *Spatial and spatio-temporal Bayesian models with R-INLA*. John Wiley & Sons.
- Caccetta, L., Qu, B., and Zhou, G. (2011). A globally and quadratically convergent method for absolute value equations. *Computational optimization and applications*, 48(1):45–58.
- Carley, S., Krause, R. M., Lane, B. W., and Graham, J. D. (2013). Intent to purchase a plug-in electric vehicle: A survey of early impressions in large us cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18:39–45.
- Castro, P. M. (2016). Spatial branch and bound algorithm for the global optimization of miqcps. In *Computer Aided Chemical Engineering*, volume 38, pages 523–528. Elsevier.
- Comparethemarket (2022). Globally charged. Retrieved from <https://www.comparethemarket.com/car-insurance/content/cost-of-charging-an-electric-car-globally/>.

- 
- Crow, M. et al. (2016). Cost-constrained dynamic optimal electric vehicle charging. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2):716–724.
- Davidov, S. and Pantoš, M. (2017). Planning of electric vehicle infrastructure based on charging reliability and quality of service. *Energy*, 118:1156–1167.
- Dharmakeerthi, C., Mithulananthan, N., and Saha, T. (2013). Planning of electric vehicle charging infrastructure. In *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pages 1–5. IEEE.
- Dong, X., Mu, Y., Jia, H., Wu, J., and Yu, X. (2016). Planning of fast ev charging stations on a round freeway. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(4):1452–1461.
- Flammini, M. G., Prettico, G., Julea, A., Fulli, G., Mazza, A., and Chicco, G. (2019). Statistical characterisation of the real transaction data gathered from electric vehicle charging stations. *Electric Power Systems Research*, 166:136–150.
- Fong, Y., Rue, H., and Wakefield, J. (2010). Bayesian inference for generalized linear mixed models. *Biostatistics*, 11(3):397–412.
- Gilanifar, M., Parvania, M., and El Hariri, M. (2020). Multi-task gaussian process learning for energy forecasting in iot-enabled electric vehicle charging infrastructure. In *2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 1–6. IEEE.
- Gong, L., Cao, W., Liu, K., and Zhao, J. (2020). Optimal charging strategy for electric vehicles in residential charging station under dynamic spike pricing policy. *Sustainable Cities and Society*, 63:102474.
- Guerra, E. and Daziano, R. A. (2020). Electric vehicles and residential parking in an urban environment: Results from a stated preference experiment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79:102222.
- Hardman, S., Jenn, A., Tal, G., Aksen, J., Beard, G., Daina, N., Figenbaum, E., Jakobsson, N., Jochem, P., Kinnear, N., et al. (2018). A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62:508–523.
- Horst, R., Pardalos, P. M., and Van Thoai, N. (2000). *Introduction to global optimization*. Springer Science & Business Media.

Horst, R. and Tuy, H. (2013). *Global optimization: Deterministic approaches*. Springer Science & Business Media.

ICCT (2020). Consulting report - electric vehicle charging guide for cities. Retrieved from <https://theicct.org/publication/electric-vehicle-charging-guide-for-cities/>.

IEA (2021). Global ev outlook 2021. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.

Illian, J. B., Martino, S., Sørbye, S. H., Gallego-Fernández, J. B., Zunzunegui, M., Esquivias, M. P., and Travis, J. M. (2013). Fitting complex ecological point process models with integrated nested laplace approximation. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(4):305–315.

ISLAM, M., Shareef, H., and Mohamed, A. (2016). Optimal siting and sizing of rapid charging station for electric vehicles considering bangi city road network in malaysia. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 24(5):3933–3948.

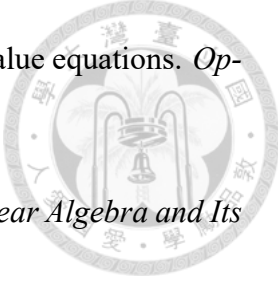
Krupa, J. S., Rizzo, D. M., Eppstein, M. J., Lanute, D. B., Gaalema, D. E., Lakkaraju, K., and Warrender, C. E. (2014). Analysis of a consumer survey on plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 64:14–31.

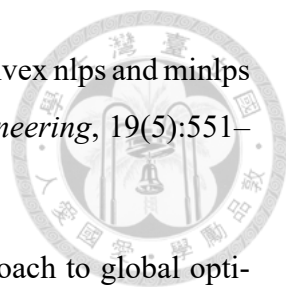
Li, S., Tong, L., Xing, J., and Zhou, Y. (2017a). The market for electric vehicles: indirect network effects and policy design. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(1):89–133.

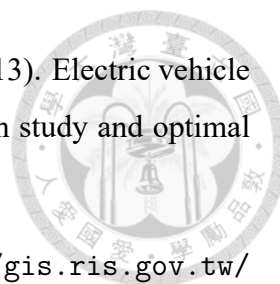
Li, X., Chen, P., and Wang, X. (2017b). Impacts of renewables and socioeconomic factors on electric vehicle demands—panel data studies across 14 countries. *Energy Policy*, 109:473–478.

Liu, Z., Wen, F., and Ledwich, G. (2012). Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, 28(1):102–110.

Luo, L., Gu, W., Zhou, S., Huang, H., Gao, S., Han, J., Wu, Z., and Dou, X. (2018). Optimal planning of electric vehicle charging stations comprising multi-types of charging facilities. *Applied energy*, 226:1087–1099.

- 
- Mangasarian, O. (2009). A generalized newton method for absolute value equations. *Optimization Letters*, 3(1):101–108.
- Mangasarian, O. and Meyer, R. (2006). Absolute value equations. *Linear Algebra and Its Applications*, 419(2-3):359–367.
- Mangasarian, O. L. (2007). Absolute value equation solution via concave minimization. *Optimization Letters*, 1(1):3–8.
- Moghaddam, Z., Ahmad, I., Habibi, D., and Masoum, M. A. (2019). A coordinated dynamic pricing model for electric vehicle charging stations. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(1):226–238.
- Mohammadi, S., Al-e Hashem, S. M., and Rekik, Y. (2020). An integrated production scheduling and delivery route planning with multi-purpose machines: A case study from a furniture manufacturing company. *International Journal of Production Economics*, 219:347–359.
- Palanca, J., Jordán, J., Bajo, J., and Botti, V. (2020). An energy-aware algorithm for electric vehicle infrastructures in smart cities. *Future Generation Computer Systems*, 108:454–466.
- Pazouki, S., Mohsenzadeh, A., Ardalan, S., and Haghifam, M.-R. (2015). Simultaneous planning of pev charging stations and dgs considering financial, technical, and environmental effects. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 38(3):238–245.
- Pozo, C., Guillén-Gosálbez, G., Sorribas, A., and Jiménez, L. (2011). A spatial branch-and-bound framework for the global optimization of kinetic models of metabolic networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(9):5225–5238.
- Quesada, I. and Grossmann, I. E. (1995). A global optimization algorithm for linear fractional and bilinear programs. *Journal of Global Optimization*, 6(1):39–76.
- Reinhart, A. (2018). A review of self-exciting spatio-temporal point processes and their applications. *Statistical Science*, 33(3):299–318.

- 
- Ryoo, H. S. and Sahinidis, N. V. (1995). Global optimization of nonconvex nlps and minlps with applications in process design. *Computers & Chemical Engineering*, 19(5):551–566.
- Ryoo, H. S. and Sahinidis, N. V. (1996). A branch-and-reduce approach to global optimization. *Journal of global optimization*, 8(2):107–138.
- Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., and Kazemi-Karegar, H. (2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, 125:289–299.
- Seeger, M. (2004). Gaussian processes for machine learning. *International journal of neural systems*, 14(02):69–106.
- SHENG, X.-p. and LI, C.-r. (2007). Applicability analysis of demand side price mechanism in china. *Power Demand Side Management*, 9(6):6–8.
- Stein, O., Kirst, P., and Steuermann, P. (2013). An enhanced spatial branch-and-bound method in global optimization with nonconvex constraints. *Optimization Online*.
- Turker, H. and Bacha, S. (2018). Optimal minimization of plug-in electric vehicle charging cost with vehicle-to-home and vehicle-to-grid concepts. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11):10281–10292.
- Wagner, S., Götzinger, M., and Neumann, D. (2013). Optimal location of charging stations in smart cities: A points of interest based approach.
- Xie, Y., Zhao, K., Sun, Y., and Chen, D. (2010). Gaussian processes for short-term traffic volume forecasting. *Transportation Research Record*, 2165(1):69–78.
- Zhang, H., Hu, Z., Xu, Z., and Song, Y. (2015a). An integrated planning framework for different types of pev charging facilities in urban area. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5):2273–2284.
- Zhang, H., Hu, Z., Xu, Z., and Song, Y. (2016). Optimal planning of pev charging station with single output multiple cables charging spots. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5):2119–2128.
- Zhang, L., Shaffer, B., Brown, T., and Samuelson, G. S. (2015b). The optimization of dc fast charging deployment in california. *Applied energy*, 157:111–122.



Zheng, Y., Dong, Z. Y., Xu, Y., Meng, K., Zhao, J. H., and Qiu, J. (2013). Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning. *IEEE transactions on Power Systems*, 29(1):221–229.

內政部 (2022). 全國人口資料庫統計地圖. 取自於：<https://gis.ris.gov.tw/dashboard.html?key=B07>.

全國法規資料庫 (2019). 建築技術規則建築設計施工編. 取自於：<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?pcode=D0070115&flno=62>.

台灣電力公司 (2018). 電價表及說明. 取自於：<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=1439&cid=2643&cchk=561d0bcf-12ea-4b75-87ae-70f93a60e49b>.

台灣電力公司 (2022). 電價知識專區. 取自於：<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=213&cid=352&cchk=52452a93-48e7-47ab-9cd3-b0c6836cf15e>.

國家發展委員會 (2021). 巴黎協定 (paris agreement). 取自於：https://www.ndc.gov.tw/News_Content.aspx?n=01B17A05A9374683&sms=32ADE0CD4006BBE5&s=618CEF2D03B9697F.

張雯婷 (2020). 基於時空過程模型預測電動汽車充電需求. 臺灣大學工業工程學研究所碩士論文, page 臺北市.

特斯拉 (2022). 超級充電站. 取自於：https://www.tesla.com/zh_tw/supercharger.

立法院 (2021). 電動車產業化相關問題研析. 取自於：<https://www.ly.gov.tw/Pages/Detail.aspx?nodeid=6590&pid=208610>.

經濟部 (2021). 電動汽車充電基礎設施推動初步規劃草案. 取自於：http://www.parking.org.tw/document/meeting/1100708%E9%9B%BB%E5%8B%95%E8%BB%8A%E5%85%85%E9%9B%BB%E5%9F%BA%E7%A4%8E%E8%A8%AD%E6%96%BD%E6%8E%A8%E5%8B%95%E8%A6%8F%E5%8A%83%E8%AA%AA%E6%98%8E_%E4%BA%A4%E9%80%9A%E9%83%A8%E8%A8%8E%E8%AB%96%E7%89%88_%E7%B2%BE%E7%B0%A1%E7%89%88.pptx.

臺北市停車管理工程處 (2022). 臺北市路外停車場. 取自於：<https://data.gov.tw/dataset/128290>.

臺北市政府主計處 (2021). 市政統計週報-交通運輸. 取自
於：https://dbas.gov.taipei/News.aspx?n=1A92853853322CF6&sms=AC3003A760CEDBAC&_CSN=9244F59F04B36BF1.

行政院 (2017). 電動車輛產業相關產業政策. 取自於：<https://ic.tpex.org.tw/policy.php?ic=A300>.