

國立交通大學
運輸與物流管理學系

碩士論文

電動機車快遞服務車輛排程最佳化問題

Optimal Scheduling Problem for Express Delivery
Services Using E-scooters

研究生：孫瑞璟

指導教授：盧宗成

中華民國一〇八年六月

電動機車快遞服務車輛排程最佳化問題

Optimal Scheduling Problem for Express Delivery Services

Using E-scooters

研 究 生：孫瑞璟

Student : Jui-Jing Sun

指導教授：盧宗成

Advisor : Chung-Cheng Lu

國 立 交 通 大 學

運 輸 與 物 流 管 理 學 系

碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Transportation and Logistics Management

June 2019

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 〇 八 年 六 月

國立交通大學
研究所碩士班
論文口試委員會審定書

本校 運輸與物流管理學系交通運輸 碩士班 孫瑞璟 君

所提論文 電動機車快遞服務車輛排程最佳化問題

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員：

顏上堯

盧秉成

陳俊穎

指導教授：

盧秉成

系主任：

邱毓利

教授

中華民國一〇八年六月十九日

電動機車快遞服務車輛排程最佳化問題

學生：孫瑞璟

指導教授：盧宗成

國立交通大學運輸與物流管理學系碩士班

摘要

宅配與快遞物流業者於都會區內發展機車快遞服務，提供高便利性、高時效性與戶對戶之服務，以因應 B2C 和 C2C 之消費型式，而隨著全球環保意識高漲，在政府積極推廣低碳運具使用下，物流業者逐漸嘗試建立綠能車隊，採用電動機車進行配送工作。然而，目前實務上多數機車快遞業者在進行車輛作業規劃時，仍仰賴快遞員之配送經驗，採用人工指派之方式，但此方法較費時、費力，且當業者採用電動機車執行配送任務時，須額外考量車輛之行駛里程限制以及補充電量問題，若仍透過人工指派方式將更為複雜及困難，且無法求得最佳化規劃結果。

因此，本研究針對機車專件快遞服務，即快遞員至需求之指定地點取貨後，直接送往指定配送地點之服務型式，從機車快遞服務業者之立場，利用時空網路流動技巧，以最小化總營運成本為目標，考慮電動車輛剩餘電量、充電站位置等限制條件，建構一電動機車快遞服務車輛排程模式。而由於本研究所建構之模式屬於整數多商品網路流量問題，為了提高求解大規模範例時之效率，研究以問題分解技巧為基礎之啟發式解法，搭配 Gurobi 最佳化軟體進行求解，並參考國內某機車快遞業者之訂單資料，設計不同情境之範例，以測試模式與啟發式解法之實用性。測驗結果得知，利用啟發式解法對不同情境之範例進行求解，皆能於 30 分鐘內求得和 Gurobi 軟體得到之下限解差距在 8% 內之啟發解，顯示本研究之模式與啟發式解法能有效應用於實務上。研究結果可提供機車快遞服務業者作為未來採用電動機車進行專件配送時之參考。

關鍵字：機車快遞服務、電動機車、時空網路、車輛排程問題，啟發式解法

Optimal Scheduling Problem for Express Delivery Services

Using E-scooters

Student : Jui-Jing Sun

Advisor : Chung-Cheng Lu

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

Abstract

In response to B2C and C2C business models, courier service providers adopt scooters for express delivery service in metropolitan areas, which increases convenience and timeliness for delivery. Besides, along with the growth of environmental awareness, the government actively promote low-carbon transport, which makes courier service providers gradually replace petroleum motorcycles with electric scooters to achieve green logistics. However, courier services providers will need to consider vehicle mileage range and the location of charging stations when planning the routing of a fleet of e-scooters. Therefore, the study addresses the optimization problem of scheduling a fleet of e-scooters that are assigned for paired pickup and delivery services. The study proposes an optimization model which is developed based on the time-space network. The objective is to minimize service providers' total operating cost subject to a set of operating constraints for e-scooters. The model is formulated as an integer multiple-commodity network flow problem, which is characterized as NP-hard. Hence, the study develops a decomposition-based heuristic, with the assistance of the mathematical problem solver, Gurobi, to efficiently solve the problem with practical sizes. Test instances are generated based on the data provided by a Taiwan courier service provider, in order to evaluate the efficiency and effectiveness of the proposed model and the heuristic algorithm. The result shows that the heuristic algorithm takes within 30 minutes to complete the solution process. In addition, the gaps between heuristic solutions and lower bounds that are obtained by Gurobi are less than 8%. As a result, it is shown that the proposed model and heuristic algorithm are effective planning tools for scheduling a fleet of e-scooters that are appointed for paired pickup and delivery services.

Keywords: express delivery services, electric scooters, time-space network, vehicle scheduling problem, heuristic algorithm

致謝

時光飛逝、歲月如梭，兩年的碩士求學生涯即將畫下句點，由衷感謝交通大學運輸與物流管理學系台北校區的教授們，讓我在這兩年的時間內獲得許多寶貴的知識，其中最感謝的是指導教授盧宗成教授，感謝老師這兩年不厭其煩的指導以及無私的付出，即使校務與計畫案繁忙，每個禮拜仍抽空與我討論論文，並且給予許多實質的意見，和精神上的鼓勵，帶領我一步一步完成論文。

感謝我的計畫書審查委員邱裕鈞教授、陳穆臻教授，於論文計畫書給予的寶貴指正與建議，讓我更加仔細思考論文後續之內容；再來要感謝我的兩位口試委員中央大學顏上堯教授、開南大學陳俊穎教授，於繁忙之中撥冗審閱論文，並在口試中針對論文不足之處給予許多實質意見，得以讓論文更加完善。

感謝同實驗室的筱彤、依庭、玟姍、曲平、筠筑、佳宜，雖然因為分隔兩地的關係，碰面時間很少，但在彼此需要協助時，仍相互幫忙和勉勵；感謝時常待在北交研究室的所有同學煥竣、詠然、竹涵、士緯、宇紋、素絢、思禹、衣芸、佑星、彥勳，在同一間研究室一起為論文和計畫案努力，並在我有困難的時候，義不容辭的幫忙，一起在學業或研究上互相切磋底勵和成長。最後，要感謝我的家人，讓我無後顧之憂的讀完研究所，感謝您們默默的包容、支持和鼓勵。

誠心的感謝所有我認識的人，我會好好珍惜於交大所學習到的知識和結下的緣分，並往人生下個重要階段邁進。

孫瑞璟 謹致
中華民國一零八年七月
於台北交大

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的.....	2
1.4 研究方法與流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 城市物流.....	5
2.2 宅配業與快遞業現況.....	7
2.2.1 宅配業與快遞業之比較.....	7
2.2.2 機車宅配與快遞業現況.....	8
2.3 綠色車輛配送相關文獻.....	10
2.4 車輛途程問題相關文獻.....	11
2.4.1 車輛途程問題.....	11
2.4.2 替代能源車輛途程問題.....	12
2.4.3 電動車輛途程問題.....	13
2.5 時空網路相關文獻.....	17
2.6 小結.....	20
第三章 模式建構.....	22
3.1 問題描述.....	22
3.1.1 假設條件.....	23
3.1.2 配送需求時空網路.....	24
3.2 電動機車時空網路.....	24
3.3 電動機車快遞服務車輛排程模式.....	28
3.4 小範例測試.....	30
3.4.1 參數設定.....	30
3.4.2 小範例測試結果.....	31
3.5 啟發式解法.....	33
第四章 範例測試.....	37
4.1 範例設計.....	37
4.1.1 配送路網規劃.....	37

4.1.2 電動機車相關參數設定.....	37
4.1.3 配送需求設定.....	39
4.1.4 模式輸出資料與環境設定.....	39
4.2 範例測驗結果.....	40
4.2.1 啟發式解法求解效果.....	40
4.2.2 情境一求解結果.....	43
4.2.3 情境二求解結果.....	44
4.2.4 情境三求解結果.....	45
4.3 敏感度分析.....	46
4.3.1 訂單量.....	47
4.3.2 車輛續航里程.....	48
4.3.3 發車成本.....	49
第五章 結論與建議.....	50
5.1 結論.....	50
5.2 未來研究方向與建議.....	51
參考文獻.....	52

表目錄

表 2-1 宅配業與快遞業之比較表	7
表 2-2 目前機車宅配與快遞業者現況	9
表 2-3 載貨自行車和廂型車之優勢和劣勢比較	10
表 2-4 替代車種之特性列表	11
表 2-5 替代能源車輛與電動車輛途程問題之整理表	16
表 3-1 小範例之路網資訊	30
表 3-2 小範例配送需求資料	30
表 3-3 小範例之問題規模	31
表 3-4 小範例求解結果	32
表 4-1 Gogoro 商用資費方案	38
表 4-2 大規模範例之問題規模	40
表 4-3 Gurobi 軟體求解結果(大規模範例)	40
表 4-4 小規模範例之問題規模	41
表 4-5 Gurobi 軟體求解結果(小規模範例)	41
表 4-6 啟發式解法之求解結果	41
表 4-7 啟發式解法求解結果(情境一)	43
表 4-8 各電動機車之詳細求解結果(情境一)	43
表 4-9 啟發式解法求解結果(情境二)	44
表 4-10 各電動機車之詳細求解結果(情境二)	44
表 4-11 部分電動機車之詳細求解結果(情境三)	46
表 4-12 訂單量敏感度分析結果	47
表 4-13 車輛續航里程敏感度分析結果	48
表 4-14 發車成本敏感度分析結果	49

圖目錄

圖 1-1 研究流程	4
圖 2-1 城市物流運送產生之影響	5
圖 2-2 點對點網路(Point-to-Point)與軸輻式網路(Hub-and-Spoke).....	8
圖 2-3 車輛排程問題之時空網路圖	17
圖 3-1 電動機車服務成對配送需求之範例	22
圖 3-2 配送需求時空網路圖	24
圖 3-3 電動機車時空網路圖	26
圖 3-4 各電動機車詳細配送情形	32
圖 3-5 第 1 個子問題之示意圖	34
圖 3-6 第 2 個子問題之示意圖	34
圖 3-7 第 n 個子問題之示意圖	35
圖 3-8 啟發式解法流程圖	36
圖 4-1 需求地點和電池交換站分布圖	39
圖 4-2 啟發式解法求解範例一之結果	42
圖 4-3 啟發式解法求解範例二之結果	42
圖 4-4 訂單量敏感度分析結果	47
圖 4-5 車輛續航里程敏感度分析結果	48

第一章 緒論

1.1 研究背景

隨著資訊科技與網際網路之快速發展，近年來電子商務產業蓬勃發展，B2C、C2C 之消費型式興起，使得電子商務市場間之競爭愈來愈激烈，電商業者之競爭對手除了同業網路購物平台外，還包括經營實體店面之零售業，而與傳統經營店面之商家相比，電商業者缺乏實體店面與消費者進行交易，使得想馬上拿到商品之消費者即會選擇至實體店消費。因此，電商業者若要增加其競爭力，不僅需於資訊、金流系統等方面投入資源，掌握與消費者之最後一哩物流配送亦相當重要，使得電商業者紛紛投入資源於後端物流服務方面，以滿足更多消費者之需求。

宅配與快遞業者所提供之最後一哩配送屬於配送服務中之最後一段路程，物流業者從存放貨物之樞紐區經由短途運送送達各顧客之指定地點，雖然此配送服務增加物流車輛之行駛距離、運送成本、降低配送效率，宅配與快遞物流業者為因應電商業造成之消費購物型態改變，並與同業間競爭，仍繼續發展最後一哩服務並逐漸縮短配送貨物之時間，其送件時間從提供數日內送達服務、同天送達服務、至保證訂貨後數小時內送達指定地點之即時送貨服務，以滿足較具時效性之配送任務。此外，於交通擁擠、巷道狹窄的都市地區內，小型貨車或廂型車在複雜巷弄內機動性低，進而增加配送貨物之時間，因此輕便型二輪車輛(如機車與自行車)之高機動性、臨時停車方便等特性，使許多快遞服務業者於都會區內發展機車與自行車快遞服務，例如：全球快遞提供一般機車快遞及專件服務，服務範圍包括台北市、大部份新北市與桃園市桃園區，保證於半日內完成配送服務。而隨著網際網路之發展，O2O 商業模式逐漸興起，例如：GoGoVan 建立快遞平台，顧客可透過平台提交貨物之取貨地點、取貨時間以及欲送達之地點，平台接收到資料後會媒合附近之機車司機執行任務，提供數小時內完成配送任務之服務。

此外，近年來為因應全球氣候變遷，全球各國積極推動節能減碳政策，我國於 104 年 7 月正式實施「溫室氣體減量及管理法」，制定溫室氣體長期減量目標，隨後行政院環保署亦擬定溫室氣體減量推動案，期望各部門能共同承擔減碳責任，其中運輸部門之減碳策略包括推廣低碳運具使用，透過鼓勵各縣市使用電動大客車，並廣設低碳運具之充換電設施，以達到公共運輸工具碳排放量減少之目標。而在私人運具方面，近年政府更積極發展電動機車產業，並配合「空氣汙染防制行動方案」之目標，2030 年公務車輛及公車全面電動化、2035 年新售機車全面電動化，政府以補貼購買電動機車者為誘因，鼓勵民眾汰換傳統汽油機車以電動機車取代之，以減少機車產生之碳排放量。而國營事業中華郵政公司亦於 2018 年初逐步汰換汽油機車為電動機車進行投遞工作，透過建立綠能車隊減少車輛之碳排放量、噪音等影響，降低物流車輛對都市居民生活品質之影響。

1.2 研究動機

目前全球環保意識高漲，由於電動汽機車相較於一般汽油汽機車之優點包括安靜無噪音、零碳排放減少空氣汙染等，能降低汽機車對環境之影響，因此許多國家積極發展電動車產業，並建置車輛之充換電設施，同時推動共享電動車系統、電動公車、電動商用車等，逐漸擴大電動車之使用範圍。而國內電動機車之技術發展已逐漸成熟，各機車業者皆不斷推出充電式電動機車以及換電池式電動機車，其中換電池式電動機車之發展逐漸興盛，業者在六都積極建置換電站，以彌補電動機車較傳統汽油機車續航力差之缺點，增加民眾於都市區域內騎乘電動機車之意願。而在此綠色運輸風潮下，開始有物流業者嘗試採用電動機車進行配送工作，例如：中華郵政、黑貓宅急便等，已導入中華電動車 emoving 作為投遞及宅配運具，嘗試增加電動機車佔其物流總機車數之比例，以電動商用車執行配送任務，減少物流車隊之碳排放量，增加公司環保、永續之企業形象。

機車快遞業者提供之服務類型可分為一般件和專件，一般件為快遞員取貨後，先將貨物送往一中繼點，之後再送往顧客指定之送達地點，所需配送時間較長；專件則為快遞員至需求之指定取貨地點取貨後，直接送往指定之地點，屬於成對配送服務，配送速度快。然而，現行一般機車快遞業者在進行車輛作業規劃時，大多還是仰賴指派員和配送員之經驗，在接收到顧客之配送訂單後，依據營運服務範圍之分區、顧客指定送達時間等條件，透過人工計算後指派適合之任務給配送員。而隨著電子商務之興盛，具高時效性之宅配與快遞配送服務需求大幅增加，使得機車快遞業者在都市區域內之最後一哩配送任務增加。因此，當業者建立綠能車隊，採用電動機車執行配送服務時，須考量車輛之充電問題，與各車輛各時間點之剩餘電量問題，若仍透過人工方式指派任務會更費時，且無法求得最佳車輛作業規劃。然而，目前探討電動車應用於物流車隊之相關文獻，多在探討充換電站之選址問題、電動四輪物流車輛途程問題，較少針對以電動機車進行成對配送服務之車輛排程問題進行研究，因此，本研究將針對此問題建立最佳化模式並進行求解，希望能提供一有系統性之方法幫助物流業者解決此重要之實務問題。

1.3 研究目的

目前實務上多數業者仍採用人工指派之方式，依照配送員之經驗進行各期間之車輛排程規劃，但此方法較費時、費力，且無法求得最佳化之排程結果，而未來快遞業者若是採用電動機車進行配送服務，在車輛排程規劃時就須考量車輛之補充電量問題，進而使得人工排程規劃更為複雜及困難，故本研究目的如下：

1. 從機車快遞服務業者之立場，針對專件快遞服務，考量採用電動機車進行收送件服務時，須考慮車輛剩餘電量、充電站位置等限制條件之車輛排程問題，以最小化總成本為目標，利用時空網路流動技巧，建構一電動機車快遞服務

車輛排程模式。

2. 以實際業者訂單資料為範例背景，測試模式之實用性，所得之研究結果可提供機車快遞服務業者作為未來使用電動機車進行成對配送之車輛排程參考。

1.4 研究方法與流程

就本研究探討之電動機車快遞服務車輛排程模式，擬定研究方法及步驟如下，而研究流程如圖 1-1 所示，

1. 問題確認及研究範圍界定
確認問題、定義欲解決之問題及範圍，以及所需使用之方法與求解工具。
2. 文獻回顧
回顧國內外之相關文獻，回顧範圍包括城市物流、綠色車輛配送、宅配及快遞物流業，以進一步了解研究課題，亦回顧車輛途程問題和時空網路等相關研究，以作為後續建構數學模式以及求解方法之基礎。
3. 電動機車快遞服務車輛排程模式建構
確認研究方向與範圍後，本研究以時空網路模式描述電動機車於各時段各需求地點及電池交換站之流動情形，並考量電動機車之續航力、充電站位置等條件，以最小化總成本為目標，建構一能滿足電動機車快遞服務車輛排程問題之數學模式。
4. 模式求解與數值測驗
研究使用 C++ 程式語言撰寫模式，並發展以問題分解技巧為基礎之啟發式解法，搭配 Gurobi 軟體進行模式求解，研究透過範例測試模式之實用性，最後透過敏感度分析探討不同參數值變化對目標項之影響。
5. 結論與建議
將研究所得之測試結果加以彙總，提出本研究之結論，並針對後續研究發展提出建議。

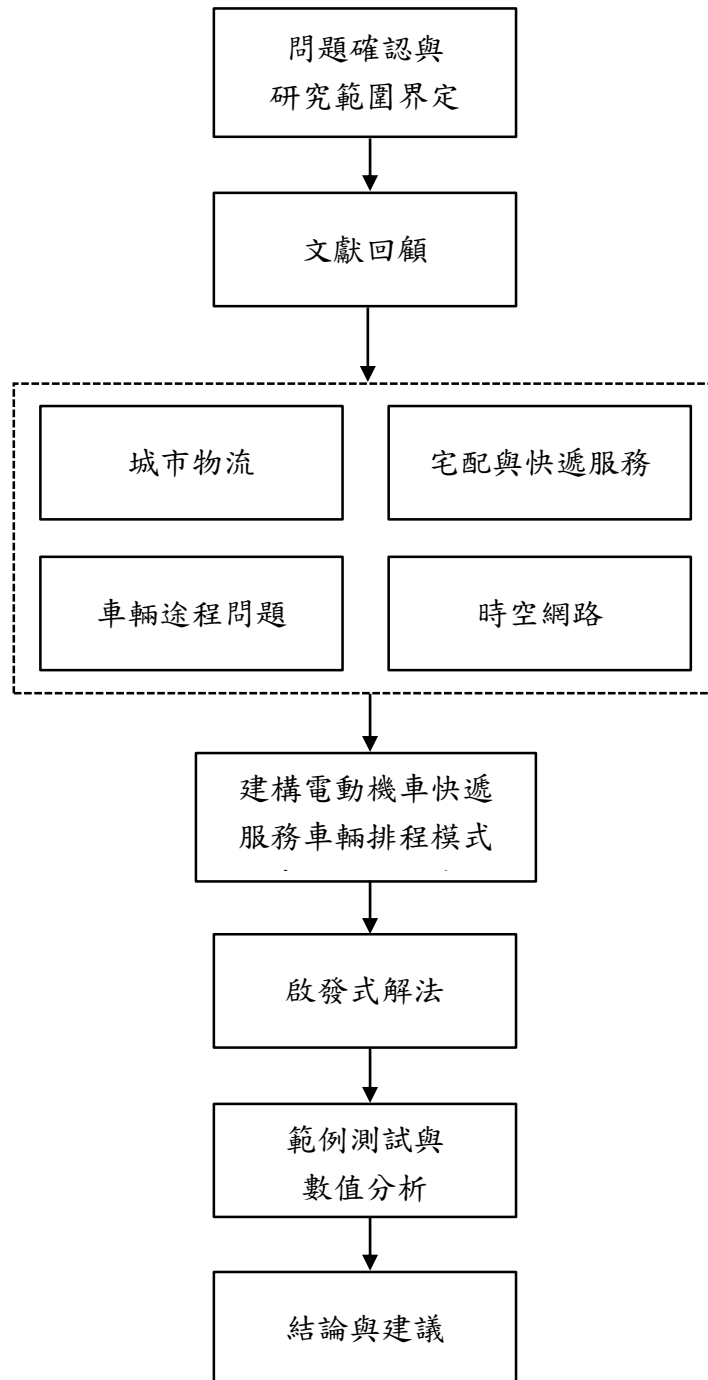


圖 1-1 研究流程
資料來源：本研究整理

第二章 文獻回顧

本研究係建立一電動機車快遞服務之車輛排程模式，由於機車快遞服務屬於城市物流之範疇，因此本章首先於 2.1 節針對城市物流之文獻進行探討，其次於 2.2 節對宅配與快遞業現況進行回顧，並於 2.3 節回顧綠色車輛配送之相關文獻，2.4 節針對車輛途程問題之相關文獻進行探討，包括替代能源車輛與電動車輛途程問題，以進一步了解研究課題，並於 2.5 節回顧本研究建立模式使用到之時空網路模式，最後於 2.6 節作一文獻小結。

2.1 城市物流

物流業者於擁擠的都市區域內進行最後一哩配送，運送途中面臨之交通壅塞、路邊停車困難、以及與其他道路用路人互動密集等問題，此概念被稱之為城市物流(Muñuzuri et al., 2005)。由於全球人口持續成長，加上都市化之趨勢，以及近年來電子商務市場發展逐漸成熟，使得貨物運輸成為城市區域內的主要活動之一，而隨著物流服務之需求提升，城市物流在經濟、環境、社會方面產生許多影響(如圖 2-1)，因此，有關城市物流之議題隨之興起，其中針對都市地區之物流及運輸活動進行規劃、控制及最佳化的過程皆為城市物流之範疇(Buhrkal et al., 2012)，目的為改善運送效率，並同時減少經濟成本與社會外部成本(Dablanc et al., 2013)。

經濟方面	環境方面	社會方面
• 交通擁擠 • 運送效率低 • 資源浪費	• 空氣污染 • 土地擁擠 • 溫室氣體排放	• 噪音汙染 • 交通事故 • 居民生活品質

圖 2-1 城市物流運送產生之影響

資料來源：AustriaTech. (2014)

Savelsbergh et al. (2016) 認為人口成長與都市化、電子商務之成長、配送速度提高、共享經濟之興起、氣候變遷與永續發展為影響城市物流發展之主要因子，以下分別對各因子之發展趨勢作介紹，並說明其對城市物流發展之影響。

1. 人口成長與都市化：隨著時代之演變與發展，越來越多人往都市集中，在 1995 年，全球只有 30% 之人口居住於城市，未來於 2050 年，此比例將增加至 68%。其中各地區之都市化程度皆不同，美洲為目前都市化程度最高之區域，北美有 82%、拉丁美洲有 81% 的人口居住於都市，歐洲亦已達到 74%，而相對這些高都市化程度之國家，亞洲目前僅有 50% 之人口居住於都市內

(United Nation, 2018)。持續成長之都市人口，提供城市物流發展契機之同時，亦增加城市物流於高密度城市內運送貨物之挑戰。

2. 電子商務：隨著科技之進步，網路改變了商業流通之生態，目前網路電商平台之發展已相當成熟，其規模呈現持續成長之趨勢，根據 Ecommerce Foundation (2017)調查，2017 年全球電商貿易中，企業對消費者(B2C)電商模式之年銷售額已達 1.8 兆元，此外，電子商務之成長率在亞太地區高達 50%，其中以中國之電商市場發展最佳，其年營業額已超過 6 千億元。然而，電商承諾將商品配送至顧客住家之最後一哩配送服務，將增加物流業者於城市內之車輛旅行距離，且運送之貨物多為小包裹，物流業者之配送成本亦增加。
3. 配送速度：企業對消費者(B2C)之電商模式，提供將貨物直接運送至顧客手中之配送服務，而電商業者在眾多同業之競爭壓力下，許多業者開始將送貨時間縮短，提供當日配送、3 小時快速到貨、甚至 1 小時內即可到貨等服務，以高效率配送服務吸引消費者，例如：Amazon Prime 於北美洲推出當日訂購當日到貨，PChome 24 小時快速宅配到家服務等，讓消費者不必至實體店面購買亦可當日於家中取得商品。然而，此種最後一哩配送方式增加物流車隊之行駛距離及運送成本，因此，在追求高時效之送貨服務同時，如何降低物流成本是城市物流面臨之挑戰。
4. 共享經濟：根據 DHL Trend Research(2014)指出自共享經濟概念發展興盛後，逐漸衍伸出許多共享模式，其中有兩種主要共享模式，第一種為合作消費(collaborative consumption)，此種共享經濟模式注重於消費者對消費者(C2C)之消費形式，消費者即使無產品之擁有權，亦能透過共享的方式取得其需要之產品與服務，隨著網際網路與行動裝置技術發展成熟，合作消費之經濟模式更加盛行。另一種模式為合作企業(collaborative business)，此種共享經濟模式發生於企業對消費者(B2C)之電商形式，企業之間共享其物流服務之設施與服務，有助於物流業者妥善運用其閒置之載送容量，亦能減少車輛之行駛距離及空車行駛時間。
5. 氣候變遷與永續發展：由於城市內之物流服務數量持續成長，使得都市內之交通事故數、道路壅塞程度上升等，其中物流車輛所產生之碳排放量亦是造成空氣汙染的主因之一。然而，儘管城市物流對居民帶來這些負面效應，但其為人民生活所需，且亦為都市產生許多好處，例如，城市物流之發展能維持產業間之交易活動，促使都市更具競爭力(Browne et al., 2012)。因此，未來在發展城市物流時須考慮社會、經濟、環境等因素，以永續發展為目標，提供高效率之配送服務同時，對城市內居民的生活品質之影響降至最小。

綜合上述因子之發展，可得知持續成長之都市人口與電商規模，增加了高時效性之最後一哩配送需求量，而隨著綠色運輸概念之興起，物流業者於擁擠之都

市區域內提供高時效配送服務時，須同時考量社會與環境方面之影響，以降低經濟成本與社會外部成本。

2.2 宅配業與快遞業現況

目前配送貨物之物流業者主要分為宅配業及快遞業，依公路法第三十四條對營業用汽車公路貨物運輸分為汽車貨運業、汽車路線貨運業及汽車貨櫃貨運業等。其中，汽車貨運業屬於規模較小之業者，無特定服務對象與路線，且運送之貨品種類繁多；汽車路線貨運業為在核定路線上，設置營運所站、集散倉儲設施等，由聯結車、大貨車、小貨車組成不同功能之車隊的業者；汽車貨櫃貨運業是以貨櫃曳引車或聯結半拖車運送貨櫃貨物之業者(張朝能等人，2014)。因此，宅配業應屬於汽車路線貨運業，而快遞業則屬於汽車貨運業。然而，這兩類業別之間的營運模式並不完全相同，本節將先對宅配業與快遞業作一比較，接下來將針對機車宅配及快遞業現況發展作說明。

2.2.1 宅配業與快遞業之比較

宅配業提供企業與消費者(B2C)以及消費者與消費者(C2C)之間的配送服務，近年更提供消費者對企業(C2B)之逆物流，以運送電商貨品、個人小型貨物為主，送達時間通常為交貨之隔日，而近年因電子商務興盛，開始提供 24 小時到貨之服務；快遞業者提供企業與企業(B2B)、B2C 及 C2C 之配送服務，以公司文件、小型包裹為主，貨件當日即可送達顧客之指定地點，而近年因空間群眾外包(spatial crowdsourcing)概念之興起，許多資訊軟體服務業者以共享經濟為基礎，提供 O2O 機車快遞平台，顧客透過手機 APP 即可預約及時專件配送、商品代買等服務，平台媒合顧客和機車司機後，司機於一個時區間內即可完成配送服務。宅配業與快遞業之比較如表 2-1。

表 2-1 宅配業與快遞業之比較表

	宅配業	快遞業
行業別	汽車路線貨運業	汽車貨運業
配送模式	B2B、B2C、C2C、C2B	B2B、B2C、C2C
配送時效	隔日、當日及半日配送	當日及半日配送、1-3 小時
服務種類	電商宅配、個人小型包裹、代收貨款、逆物流	具時效性之電商服務、文件、小型包裹、代收貨款
代表業者	黑貓宅急便、宅配通	全球快遞、全速配

資料來源：本研究整理

2.2.2 機車宅配與快遞業現況

於都市區域內提供最後一哩配送服務須克服交通壅塞、停車不易等困難，才能滿足高時效性之配送服務，然而，當小型貨車或廂型車行駛於複雜且狹小之巷道時，由於車輛機動性低，且停車卸貨不易，將增加配送貨物之時間與成本，因此，輕便型二輪車輛，例如：自行車與機車，其高機動性、臨時停車方便等特性，使宅配及快遞業者能於都市區域內提供快速之最後一哩配送。

台灣目前主要提供機車宅配與快遞服務之業者包含全球快遞、便利袋、全速配、Lalamove、GoGoVan 等業者，上述業者鎖定之目標市場與主要提供之服務皆有所不同。第一，全球快遞提供的機車快遞服務之服務範圍為台北地區、新北部分地區以及桃園市桃園區，依配送時效分為一般快遞與機車專件服務，前者於 2-5 小時內送達，後者則提供 2 小時內配達服務，業務服務以 B2C 與 C2C 為主，服務項目包含文件快遞、小型包裹、高時效性之電子商務快遞等。第二，便利帶服務之配送範圍較大包含全台灣，服務形式為以不同種類之便利袋計價，袋子的價格已包含運送之費用，顧客交付貨品時不需額外付運費，其業務服務以 C2C 為主，配送時效為交件後隔日送達指定地點。第三，全速配之服務範圍亦包含全台灣，以服務 B2C 宅配貨件為營運主軸，客戶群主要為網路購物、銷售業及物流通路業者，其中包括協助新竹物流宅配業者於都會區內配送小件包裹，提供交貨隔日到貨之配送服務。

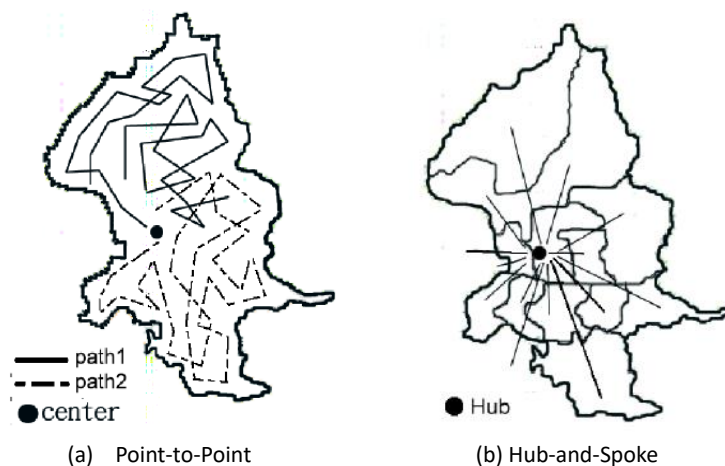


圖 2-2 點對點網路(Point-to-Point)與軸輻式網路(Hub-and-Spoke)

資料來源：Wang (2008)

另外兩個業者，Lalamove 和 GoGoVan 與一般機車快遞及宅配業者不同，其行業別登記為資訊軟體服務業，主要透過共享經濟概念提供最後一哩配送服務，建立 O2O 機車快遞服務平台，顧客於平台上輸入貨物之取貨地點和時間、以及欲送達之地點，平台會依配送距離計算基本運費，顧客確定下單後，平台會媒合附近之機車司機前往指定取貨地點執行任務。主要服務範圍為大台北地區，提供

B2C 與 C2C 即時性之專件配送服務、商品代買等服務，從取貨至送達指定地點通常在 2 小時內即可完成。而此類機車快遞服務平台之優點在於業者無須擁有自己的車隊，即可提供即時性之點對點配送服務，能減少管理車隊及建置配送中心之成本。

此外，各業者經營之網路模式亦不同，目前機車宅配與快遞業之網路模式主要分為點對點網路(Point-to-Point)與軸輻式網路(Hub-and-Spoke)，如圖 2-2 所示，一般而言，點對點網路模式之運作方式是顧客透過電話或網路預約配送服務，調度員依據各配送員之位置安排其接續的配送任務，而配送員在接獲其需執行之任務位置後，需根據其配送經驗安排有效率之車輛路線。點對點網路之結構較簡單，其固定管理成本較低，車輛亦能節省來回配送中心至各分區之時間，但此模式主要仰賴調度員與配送員本身之經驗，使服務品質不穩定且容易延滯配送服務，減少配送員每日平均收送件數量。

軸輻式網路在都市區域內擁有數個配送中心(central hub)，連接外圍之服務分區(spoke)，每個服務分區由一特定配送員負責，配送員需不時往返配送中心及所負責之分區，也因其行駛範圍侷限於其負責之分區內，使軸輻式網路面臨之車輛排程問題較點對點網路簡單，配送員能執行之收送件數量亦較多，而當配送需求量大時，軸輻式網路亦能提高運送效率，縮短平均運送時間，但相對來說，建置配送中心、管理之成本較高，且需發展有組織之網路結構才可與其他業者競爭(Wang, 2008)。目前各家機車宅配及快遞業者現況整理如表 2-2。

表 2-2 目前機車宅配與快遞業者現況

	全球快遞	便利帶	全速配	Lalamove	GoGoVan
行業別	汽車貨運業	汽車貨運業	汽車貨運業	資訊軟體服務業	資訊軟體服務業
服務範圍	大台北地區	全台灣	全台灣	大台北地區	大台北地區
網路模式	軸輻式	軸輻式	軸輻式	點對點	點對點
配送時效	2~5 小時 1~2 小時	取貨隔日	取貨隔日	1~2 小時	1~2 小時
業務類型	B2C、C2C	C2C	B2C	B2C、C2C	B2C、C2C
服務種類	一般文件、電商快遞等	販售不同種類之便利袋	契約客戶小件包裹	一般文件、小型包裹、商品代買	一般文件、小型包裹、商品代買

資料來源：楊孟軒(2015)

2.3 綠色車輛配送相關文獻

近年來各國許多城市，為了減少貨物運送對城市造成之影響，政府鼓勵物流業者與企業合作以低碳排放、低噪音之運具配送貨物，透過測驗計畫，於城市內將部分燃油廂型車替代為載貨自行車(cargo bikes)、電動自行車(e-bikes)或電動機車(e-scooters)，執行貨物配送任務，評估使用輕便型車輛配送小型包裹與信件之可行性以及效益，表 2-3 為載貨自行車與燃油箱型車於各方面之比較。

Nocerino et al. (2016)呈現義大利電動自行車測驗計畫(pro-E-bike pilots)之分析結果，計畫背景為於都市區域內，使用電動自行車與電動機車替代傳統燃油汽機車運送貨物，並分析輕便型電動車輛(light electric vehicles, LEV)之表現，測量項目包含二氧化碳排放量、能源消耗量等，期望透過計畫結果鼓勵物流業者於城市區域內使用低污染之運具。研究分析四個物流業者其不同運具替代方案之效益，第一種為以電動機車替代燃油機車，進行小包裹與信件之配送；第二種為於原車隊中加入電動貨物自行車(e-cargobikes)運送貨物；第三種為以電動貨物自行車替代箱型車；第四種為將箱型車替代為電動自行車(e-bikes)，以達到運送時間窗之要求。分析結果發現，以輕便型電動車輛運送貨物能減少運送途中所排放之二氧化碳量，每天能減少 1.7 至 21 之二氧化碳排放量(kg-CO₂)，且亦能夠降低能源成本，平均每行駛一公里能省 0.036 歐元至 0.194 歐元，顯示以電動車輛運送貨物能帶來環境與經濟永續效益。

表 2-3 載貨自行車和廂型車之優勢和劣勢比較

考量因素	貨物自行車	廂型車
購置成本	◎	
行駛成本(元/公里)	◎	
停車成本	◎	
行駛速度(壅塞區域)	◎	
駕駛訓練	◎	
安全性		◎
載運量		◎
行駛里程		◎
環境影響	◎	

資料來源：Lenz & Riehle (2013)；Choubassi et al. (2016)

Choubassi et al. (2016)以美國郵政服務(U.S. Postal Service)為研究對象，有鑑於郵務車輛老舊，使得維修成本提升，業者有意汰換傳統燃油車輛，使用輕便型車輛，如箱型車、電動輔助自行車和電動自行車，於都市區域內配送貨物及信件，降低車輛碳足跡。因此，此研究站在美國郵政之立場，以美國奧斯汀城市內之三

個區域為研究範圍，評估各區域使用各種替代車種可能產生之經濟效益，研究共考慮五種替代車種，如表 2-4 所示。研究透過容量限制車輛途程模式求得各情境之最小總旅行成本，並發展經濟成本模式利用淨現值(NPV)預估各車種之長期成本，以比較各車種於各情境下之經濟效益。分析結果顯示，電動輔助二輪自行車和電動二輪自行車在各情境下之長期成本皆最高；而電動輔助三輪車和電動三輪自行車在所有情境下之淨現值皆最低，顯示將傳統燃油車替換成電動三輪自行車具成本可行性。

表 2-4 替代車種之特性列表

特性 \ 車種	傳統燃油車(LLV)	箱型車(Van)	電動輔助自行車(Pedelec Bike)		電動自行車(E-Bike)	
			二輪	三輪	二輪	三輪
生命週期(年)	24	20	5	5	5	5
行駛里程(mi)	-	106	75	90	25	30
載貨量(ft ³)	121	148	5	49	5	49
購買成本(/veh)	21538	32301	1244	6491	4058	11236
能源成本(/mi)	0.13	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
維修成本(/mi)	0.15	0.12	0.02	0.02	0.02	0.02

資料來源：Choubassi et al. (2016)

2.4 車輛途程問題相關文獻

本研究欲建立之電動機車快遞服務車輛排程模式屬於車輛途程問題之範疇，因此，本小節先說明基本之車輛途程問題(Vehicle Routing Problem, VRP)，其次探討由車輛途程問題衍生的替代能源車輛途程問題(Alternative Fueling Vehicles Routing Problem)，以及電動車輛途程問題(Electric Vehicle Routing Problem)之相關文獻。

2.4.1 車輛途程問題

Dantzig and Ramser (1959)首先提出車輛途程問題(Vehicle Routing Problem, VRP)，基本 VRP 問題定義為，一車隊由 m 個同質車輛組成，車輛之最大載運量皆為 C ，從同個場站出發拜訪 N 個顧客點，各顧客有對應之需求量 q_i ，兩點之間有固定之旅行距離 d_{ij} ，在決定 m 個路徑其總旅行距離最小下，須滿足以下限制式：(1)所有車輛皆起始於場站，並於結束後返回場站；(2)所有顧客點僅能被拜訪一次；(3)所有顧客之需求皆被滿足；(4)路徑拜訪之顧客點其總需求量不能超過車輛之載運量。

車輛途程問題被廣泛應用於垃圾回收、物流宅配等方面，而後續為了符合實

際之需求特性，開始加入需求之條件及限制式，進而衍生出多種 VRP 問題，例如：考量顧客對於其被拜訪的時間有所要求，車輛須於特定時間內到達顧客點，屬於含時窗之車輛途程問題(VRP with Time Windows, VRPTW)；考慮多個場站之車輛途程問題(Multi-Depot VRP)；考量車輛之有限行駛距離，屬於距離受限之車輛途程問題(distance-constrained VRP)，以及其他衍生 VRP 問題。

2.4.2 替代能源車輛途程問題

隨著環境永續之概念興起，許多國家開始發展替代石油之替代能源，例如：生物柴油、液化天然氣、壓縮天然氣等，並逐漸有汽車產業生產使用替代能源之車輛，以減少車輛之二氧化碳排放量。然而，此類車輛其續航力較傳統汽油車輛差，且缺乏補充能源之設施，因此，有學者們開始探討在車輛最大行駛距離有限下，以及車輛行駛途中需拜訪密度低的補充能源站之情況下，如何規劃替代能源車輛之作業途程，此類問題類似距離受限之車輛排程問題，而最大不同點在於替代能源車輛途程問題多加考慮延長車輛行駛距離之情況。其中最具代表性之相關研究為 Erdoğan and Miller-Hooks (2012)，其詳細介紹如下。

Erdoğan and Miller-Hooks (2012) 提出綠能車輛途程問題(Green Vehicle Routing Problem, GVRP)，其探討之車輛為使用替代燃料作為動力之車輛，稱為替代燃料車輛(Alternative Fueling Vehicles, AFVs)，其行駛距離受剩餘燃料量影響，當剩餘燃料量無法行駛至下個需求點時，車輛須至燃料補充站(Alternative Fueling Stations)補充燃料，此研究所設計之燃料補充站位置並非與顧客點位於同個位置。研究站在以替代燃料車輛為車隊之業者角度，考慮有限行駛距離、有限燃料補充設施與顧客需求下，以最小化車輛總行駛距離為目標，規劃每日替代燃料車輛之排程。研究提出 Modified Clarke and Wright Savings 演算法(MCWS)和 Density-Based Clustering 演算法(DBCA)求解 GVRP，其中 MCWS 方法之特性為透過插入產生成本最小之燃料補充站以修復不可行之路徑，並以節省成本值為基準，合併各可行路徑，建構最佳 GVRP 路線解；DBCA 方法之特性則是先依據相對位置將顧客點及燃料補充站作分群，再利用 MCWS 方法對各群集建構車輛路線。

最後，研究考慮了需求之分布情形和燃料補充站數量，隨機產生四種小型範例，並以醫療紡織用品供應商為實際大型範例，測試兩種啟發式演算法之求解績效，結果顯示，兩種啟發式演算法在四種小型範例中，求得之平均目標值與 CPLEX 求得之最佳解有 2%至 10%的差異，此外，當燃料補充站數量增加時，車輛之總行駛距離會下降；當車輛之最大行駛距離增加時，總行駛距離會下降且服務顧客數量會增加。

2.4.3 電動車輛途程問題

隨著電動車之技術發展逐漸成熟，加上全球環保意識上漲，運輸物流相關業者開始採用電動車輛進行配送與載送服務，例如：電動商用物流車、電動計程車等，因此，越來越多學者開始於綠色車輛途程問題中增加使用電動車輛須考量之實際條件，其中包含不同充電速率之充電設施、車輛可於充電站進行部分充電等情況，進而衍生出更加複雜之電動車輛途程問題。電動車輛途程問題之相關文獻回顧如下。

Conrad and Figliozzi (2011)提出考慮補充電量之車輛途程問題(Recharging Vehicle Routing Problem, RVRP)，車輛需服務預先安排之顧客，而在行駛距離有限下，車輛需於中途之顧客點進行充電作業，以便繼續完成後續任務。研究延伸行駛距離受限之車輛途程問題(Capacitated VRP, CVRP)，以最小化使用車輛數為第一目標式，最小化車輛總成本為第二目標式，提出考慮車輛容量限制、時窗限制、車輛剩餘電量限制等因素之 CRVRP 問題，以及放鬆顧客時窗限制之 CRVRP 問題。研究以重複建構與改善策略之啟發式解法進行求解，並利用 Solomon (1987)設計之範例進行測驗，以及對車輛最大行駛距離與充電成本進行敏感度分析。

Wang and Cheu (2013)根據 Erdogan and Miller-Hooks (2012)提出的 GVRP 問題，設計含充電站及時窗限制之成對配送問題 (Paired PDPTW with Charging Station)，規劃服務預定需求之電動計程車隊之排程作業。研究以新加坡計程車隊為背景，將其車隊全數改為電動車輛服務，建構新加坡服務預定需求之電動計程車隊問題，其目標為最小化車輛數及車輛總行駛距離。研究發展二階段啟發式解法求解大型範例，第一階段用最早時窗插入法(earliest time window insertion heuristic)建構起始解，第二階段用交換和重置方法結合禁忌搜尋法去改善起始解。並以新加坡商業中心為實際範例，測試求解品質，研究結果發現，各乘客要求上車之時間偏差越大，求得之路線數或所需計程車數越少。

Schneider et al. (2014)提出含時窗限制之電動車輛途程問題(Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows, EVRPTW)，考慮顧客之時窗限制、電動車充電時間、車輛剩餘電量以及車輛載運容量之限制，目標為最小化執行車輛數和車輛總旅行距離，研究設計之電動車充電所需時間非一固定值，而是依到達充電站之剩餘電量而有所不同。研究結合變動鄰域搜尋法(VNS)和禁忌搜尋法(TS)發展一啟發式演算法 VNS/TS 求解 E-VRPTW 問題，以變動鄰域搜尋法隨機產生解，再利用禁忌搜尋法改善其解，並以模擬退火法(SA)為接受改善解或未改善解之準則。最後，研究自行設計 E-VRPTW 問題之範例測試 VNS/TS 求解績效，結果顯示，VNS/TS 能於有效時間內求得一啟發解。此外，研究利用其他相關車輛途程問題之範例測試其研究方法之表現，其中相關車輛途程問題包括 MDVRPI、GVRP、VRPTW，從各基準範例之測試結果可得知，VNS/TS 演算法皆能以更短之時間求出啟發解，且其求得之解與目前最佳解之差異極小，有些甚至能改善目

前最佳解之上界，為範例求得新的目前最佳解。

Felipe et al. (2014)衍伸 Erdogan and Miller-Hooks (2012)提出的 GVRP，加入電動車輛可部分充電(partial recharge)及各充電站配有不同充電設施之考量，意即各充電設施之充電率與單位成本不同，且車輛於充電站未必要充滿電才可離開，依此概念提出考慮多種充電技術及部分充電之綠色車輛途程問題(Green Vehicle Routing Problem with Multiple Technologies and Partial Recharges, GVRP-MTPR)，研究考慮剩餘電量限制、使用充電設施限制、車輛容量限制等因素，以最小化車輛之充電成本為目標，建構 GVRP-MTPR 模式。研究利用鄰域區域搜尋方法(neighborhood local search)以及模擬退火法(SA)求解問題，其中鄰域結構包括充電站重新配置、2-opt、重新穿插顧客點、以及結合前三種之區域搜尋演算法(48A)。研究自行設計範例測試區域搜尋演算法與模擬退火法求解 GVRP-MTPR 之績效，並以 Erdogan and Miller-Hooks (2012)提出的 GVRP 範例，與 Schneider et al. (2014)提出之 E-VRPTW 範例測試其提出的研究方法之求解績效。結果顯示，在小型範例中，區域搜尋演算法之求解時間較 Erdogan and Miller-Hooks (2012)和 Schneider et al. (2014)提出之演算法短，在大型範例中，模擬退火法之求解績效較其他演算法佳。研究最後亦測試充電站配置不同充電設施及不同數量對總充電成本之影響。

Keskin and Çatay (2016)以 Schneider et al. (2014)提出之 EVRPTW 問題為基礎，放鬆原問題中車輛需充滿電才可離開充電站之條件，同樣考慮車輛容量限制、顧客時窗限制、車輛剩餘電量，並以最小化車輛行駛距離為目標，提出考慮部分充電及時窗限制之電動車輛途程問題(EVRPTW and Partial Recharges, EVRPTW-PR)，EVRPTW-PR 與考慮充滿電之車輛途程問題不同在於，車輛返回場站之剩餘電量可以是零。研究利用適應性大規模鄰域搜尋演算法(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)求解，其中移除演算法(removal algorithms)包含移除顧客點及移除充電站方式；插入演算法(insertion algorithms)包含插入顧客點及插入充電站方式，ALNS 演算法求解過程為於建構初始解後，移除一些顧客點或充電站來破壞原可行解，之後再插入被移除之顧客點至路徑中之其他位置，以及插入充電站至更佳之位置，並以模擬退化法為接受可行解之準則。最後，研究以 Schneider et al. (2014)設計之 EVRPTW 範例測試演算法求解績效，結果顯示，ALNS 演算法求解小型範例時能在極快時間內求出最佳解，而在求解大型範例時，若是 unlimited 部分充電之充電量，求得之平均行駛距離較須充滿電之方式少 1.64%，顯示部分充電之策略能有效縮短車輛行駛距離。

Barco et al. (2017)考量電動車輛使用之電池的生命週期、電池充電狀態、以及電池損耗成本之因素，建立電動車輛途程問題(EVRP)，其目標為最小化能源消耗成本，其中成本包括充電成本及車輛旅行途中造成之電池損耗成本，考慮限制條件包含時窗限制、車輛容量限制、剩餘電量等。研究利用差分進化演算法(differential evolution)求解電動車輛途程問題，並以基因演算法為基準，比較兩種

演算法之求解績效。最後，研究以哥倫比亞某機場至附近景點之接駁巴士為案例，探討以電動車輛取代原本汽油接駁巴士之可行性，並依據充電站位置、充電率、考慮電池損耗成本與否設計不同情境，以了解在各種情況下之車輛充電排程結果。

Yang and Sun (2015)提出電動車電池交換站選址和車輛途程問題(Electric Vehicles Battery Swap Stations Location Routing Problem, BSS-EV-LRP)，研究站在欲經營自身電動車車隊之物流公司角度，探討決定電池交換站之位置及數量問題，以及從單一場站出發之電動車輛送貨路徑問題，目標為最小化電池交換站建構成本和車輛旅行成本。研究發展兩個啟發式演算法求解 BSS-EV-LRP，第一個為 TS-MCWS 演算法，結合禁忌搜尋法和 Modified Clarke and Wright Savings 演算法；第二個為 SIGALNS 演算法，其使用四種演算法分別解決各階段之子問題，第一階段在不考慮電動車續航力下，利用調整掃描演算法建構車輛路徑起始解；第二階段利用反覆貪婪演算法，以最小化建構及配置成本為目標，將電池交換站後選位置分佈至各車輛路徑起始解中；第三階段利用適應性大規模鄰域搜尋法，重新規劃車輛之路徑排程；最後利用改善演算法改善目前解。研究透過不同大小的 CVRP 範例測試兩種演算法的績效，結果顯示 SIGALNS 之平均求解效率較 TS-MCWS 快，且所需要建構之電池交換站數量也較少。研究最後也探討電動車之行駛距離能力對於建構與運送成本、減少環境汙染成本之影響，結果發現，若提高電動車之續航能力，能使總成本降低。

Hof et al. (2017)利用適應性變動鄰域搜尋演算法(adaptive variable neighborhood search)求解 Yang and Sun (2015)提出之電動車電池交換站選址和車輛途程問題(BSS-EV-LRP)，目標為最小化電池交換站建構成本與車輛旅行成本。研究透過 Yang and Sun (2015) 提出之 BSS-EV-LRP 範例為基準範例測試 AVNS 演算法之績效，並與 Yang and Sun (2015) 所提出之 SIGALNS 演算法求解結果作比較，結果顯示 AVNS 演算法能改善 SIGALNS 演算法所求得之最佳解，且能減少設置之電池交換站數量。

表 2-5 替代能源車輛與電動車輛途程問題之整理表

作者 (年份)	研究問題	目標值	考慮限制條件	演算法
Conrad and Figliozzi (2011)	以電動車輛執行取貨服務之途程規劃	最小化使用車輛數、車輛總成本	車輛容量限制、顧客時窗限制、車輛剩餘電量	啟發解：途程建構演算法與改善演算法
Erdoğan and Miller-Hooks (2012)	以替代能源車輛執行配送任務之途程規劃	最小化行駛距離	車輛最大行駛時間、車輛剩餘能源	啟發解：利用修正式節省法和密度基礎群集演算法建構起始解，並配合改善演算法
Wang and Cheu (2013)	以電動計程車服務已預約需求之途程規劃	最小化車輛數、行駛距離	顧客時窗限制、車輛剩餘電量	啟發解：途程建構演算法與改善演算法
Schneider et al. (2014)	以電動車輛執行送貨服務之途程規劃	最小化車輛數、行駛距離	車輛容量限制、顧客時窗限制、車輛剩餘電量	啟發解：變動鄰域搜尋法結合禁忌搜尋法
Felipe et al. (2014)	以電動車輛執行取貨服務之途程規劃，允許車輛部分充電	最小化車輛之充電成本	車輛容量限制、車輛剩餘電量、使用充電設施限制	啟發解：鄰域區域搜尋演算法、模擬退火法
Yang and Sun (2015)	以電動車輛執行送貨服務之途程規劃並考慮電池交換站選址問題	最小化電池交換站建構成本和車輛旅行成本	車輛容量限制、車輛剩餘電量	啟發解：禁忌搜尋法結合修正式節省法、四階段啟發式演算法 (SIGALNS)
Keskin and Çatay (2016)	以電動車輛執行送貨服務之途程規劃，允許車輛部分充電	最小化行駛距離	車輛容量限制、顧客時窗限制、車輛剩餘電量	啟發解：適應性大規模鄰域搜尋演算法
Barco et al. (2017)	以電動巴士執行機場接送服務之途程規劃	最小化能源消耗成本	車輛容量限制、顧客時窗限制、車輛剩餘電量	啟發解：差分進化演算法

資料來源：Schiffer & Walther (2017)；本研究整理

2.5 時空網路相關文獻

時空網路模式(time-space network model)是以網路流量模式表示欲解決之問題，其與連結型網路流量模式(connection-based flow model)最主要之差異在於，連結型網路流量模式是以節點作為班次(旅次)，而節點之間的連接節線表示兩班次(旅次)可被同一車輛執行。然而，時空網路模式則是以網路之節線作為班次(旅次)，以節點表示各班次(旅次)其開始與結束之地點及時間。時空網路之好處在於能避免產生所有班次(旅次)之間可互相連結(compatible trip)之節線，因此，與連結型網路流量模式相比，能在不影響可行解範圍下，減少約 97%的節線數量(Bunte & Kliewer, 2009)。

許多研究將時空網路模式應用於航空排班問題以及公共運輸車輛排程問題，舉例來說，圖 2-3 為車輛排程模式之時空網路圖，以一個場站為一層時空網路，在節點方面有場站節點和營運站節點兩種；節線方面則包含各場站首班班次發車時刻之場站節點與起點節點連接之起始節線、各場站末班班次結束時刻與迄點場站連接之返回節線、連接營運站之間的班次節線、於場站與營運站停等一時段之車輛等待節線、前一班次與銜接之班次場站不同，車輛空駛於場站間之空駛節線、以及迄點節點連接起點節點之循環節線，透過上述節點與節線能方便計算車輛勤務起迄時間、工作時間、發車數量等。

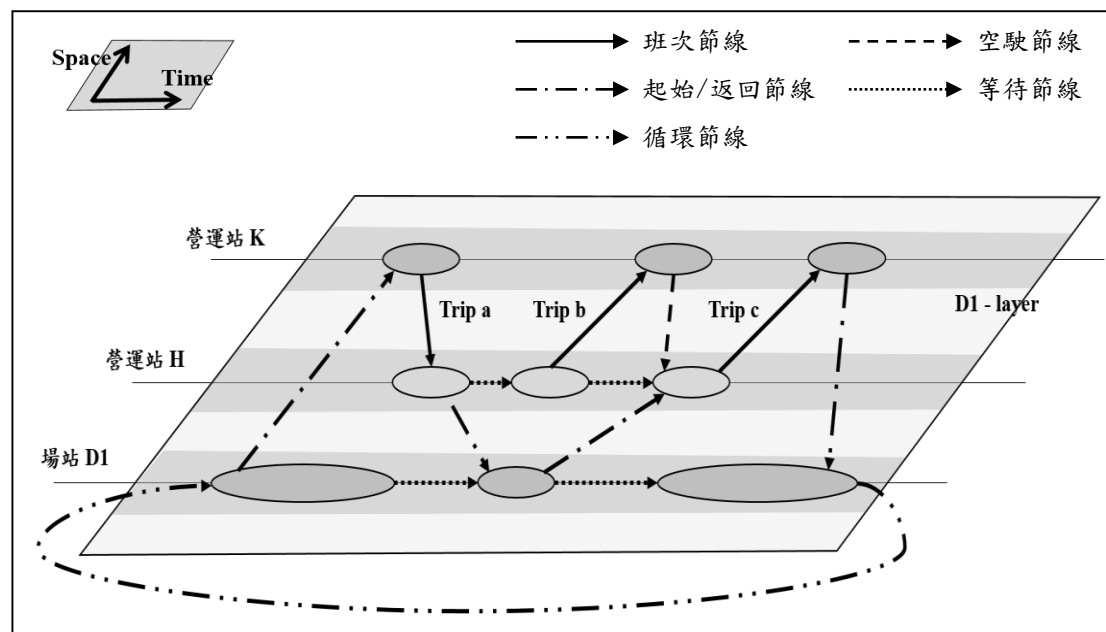


圖 2-3 車輛排程問題之時空網路圖

資料來源：Kliewer et al. (2006)

Kliwer et al. (2006) 探討多場站多車種之公車車輛排程問題(Multiple-Depot Multiple-Vehicle-type Bus Scheduling Problem)，以時空網路方式建構車輛排程模式，以減少產生之節線數量，研究為了提高求解實際大型範例之效率，透過 latest-first-matches 方法將空駛節線數量減少，以車輛於同營運站之等待節線替代可能產生之空駛節線，形成混和整數規劃問題，在使用 CPLEX 最佳化軟體求得最佳解後，針對車輛等待節線之變數，採用班次先進先出(FIFO)與班次後進先出(LIFO)之分解策略對各單場站之最佳解進行勤務分解，並固定相同勤務變數後，重新求解多場站多車種車輛排程問題，最後，結果顯示，研究提出之方法能在可接受時間內求得實際公車之班表。

Gintner et al. (2005)亦是利用時空網路模式探討多場站多車種車輛排程問題，並透過 latest-first-matches 方法減少車輛之空駛節線，而由於研究考慮多種公車種類，因此其時空網路以一場站和車種之組合為一層。研究發展 fix-and-optimize 啟發式演算法，以求解大型實際公車排程問題，此方法先將多場站多車種之車輛排程問題依場站個數分解為多個單一場站車輛排程問題，並求解各單一場站車輛排程問題後，從全部解中決定穩定旅次鏈(stable chain)，並固定這些連續旅次鏈後，重新求解多場站多車種之車輛排程問題，此方法能大幅縮小原問題之範圍。研究以實際公車時刻表及德國慕尼黑城市為範例測試 fix-and-optimize 啟發式演算法之求解績效，研究結果顯示，啟發式解法所得之近似解與最佳解之差異小於 1%，且求解所需時間亦大幅下降。最後，研究測試將不同場站設為不同群集(depot group)，亦即車輛出發之場站與返回之場站可以不同，結果發現，透過場站群集能使用較少之時間找到更好的近似解。

吳銘偉(2010)考量保全公司運鈔車每日護運路線缺乏變化性，使得被搶劫之風險增加，因此，研究以保全公司營運成本最小化為目標，考慮路線所需之變化性和安全性，構建時空相似度幫助決策者考慮車輛先前所行駛過之路線與抵達時間，並利用時空網路流動技巧建構運鈔車護運作業排程模式。研究以國內保全公司中壢服務區之營運資料進行相關範例測驗，以 CPLEX 數學規劃軟體進行模式求解，並發展啟發解演算法，將時空網路切割多個時段，分階段求解。研究結果得知，運用啟發式解法所求得之目標值與 CPLEX 數學規劃軟體進行求解後之目標值差距約 0.17%，且能大幅縮短求解時間，顯示研究發展之模式和演算法在實務上可有效提供決策者作為參考。

Yan and Chen (2011)發展多對多起迄之小客車共乘配對問題，考慮時窗限制、乘客類型、車輛類型、乘客要求、車輛容量限制等實際營運時之限制條件，並以時空網路流動技巧建構模式，網路包括車輛流、提供車輛之乘客流、未提供車輛之乘客流時空網路。此模式之目標為最小化共乘系統總成本，包括車輛旅行成本、乘客時間成本、未被服務到乘客之懲罰成本。為了能求解大型實務範例，研究發展拉式鬆弛法暨次梯度法之演算法，以在合理時間內求得最佳解，演算法先藉由

放鬆車輛容量限制式建構放鬆問題，求解下限解，再透過以拉式鬆弛法為基礎之啟發式解法求解上限解，並透過次梯度方法修正拉式乘數之值，反覆求解上限、下限解，直到收斂為止。最後，研究透過電腦隨機產生不同網路規模之範例測試演算法之求解績效，結果顯示，啟發式演算法能在合理時間內求得收斂率在 3% 內之最佳解。

楊瑞宇(2012)以公共自行車租賃系統營運業者之立場，探討每日各租賃站之最佳車輛配置規劃，研究考量實務上需求不確定性之情況，以時空網路流動技巧建構穩健公共自行車配置最佳化模式，目標為最小化業者營運總成本，其中包含供給成本、車輛滯留成本、調度成本、顧客流失懲罰成本，並以穩健最佳化技巧表達需求不確定之情形。研究以新北市自行車租賃系統為範例，測試模式於實務應用之績效，以 GAMS 最佳化軟體進行模式求解。研究結果顯示，以穩健最佳化方式配置系統車輛，求解出之配置車輛數高於目前實務配置數量，使得供給成本、滯留成本和顧客流失成本增加，但調度之人工作業成本則減少，使業者能以較有效率之方式佈署各租賃站之車輛數。

Yan et al. (2014)探討發生重大災害後，車輛運送補給物料至各搶修地點之排程規劃，研究利用時空網路流動方式表示車輛及補給物料之流動情況，在考量實務上旅行時間之隨機性與其他營運限制等因素，以最小化總營運成本為目標，建構隨機旅行時間下物料後勤補給排程模式，此外，研究亦以固定平均旅行時間替代隨機旅行時間，簡化原問題成確定性補給排程模式。研究以問題分解技術為基礎發展一啟發式演算法，其方法為將原問題根據時窗分解出一小型子問題，利用 CPLEX 軟體求解子問題，之後固定第一個子問題求得之解，在分解出一子問題進行求解，直到滿足全部修復地點之補給需求。最後，研究以台灣 921 地震之災害情況為背景，使用 Yan and Shih (2009)研究中之緊急道路搶修工程之排程計畫，與 Yan et al.(2012)研究之資料結構測試隨機性排程模式、確定性排程模式與實務排程規劃之表現，結果得知，利用研究提出之啟發式演算法求解隨機排程模式，在可接受時間內所得之目標成本值皆低於確定性排程模式與實務排程規劃，分別減少 17.35%和 61.75%，顯示考慮隨機性旅行時間之物料後勤補給排程模式較確定性排程模式與實務規劃有效率。

林韋捷(2015)以公共電動車系統營運者之立場，探討每日營運前各租賃站電動車輛佈署問題，以時空網路方式建構一公共電動車系統車輛配置模式，模式之目標為業者總利潤最大化，考量之限制條件包括電動車之電量消耗和充電限制等。研究以台灣日月潭風景區之電動車共享系統為參考範例，並設計不同車隊規模之情境作為測試例題，以 Lingo 數學規劃軟體進行求解，研究結果顯示，未來顧客需求增加時，業者若能擴大車隊規模，或增加車輛調度次數，能減少顧客流失成本，以提升業者之營運總利潤。

Mahmoudi and Zhou (2016)探討車輛共乘服務系統最佳化問題，屬於考慮時

窗限制與取貨送貨之車輛途程問題(VRPPDTW)，研究於二維度之時空網路中加入乘客搭乘狀態(passenger carrying state)指標，以表示乘客於各時間和空間點是否位於車輛上，並設置乘客之虛擬上、下車節點，以方便計算乘客之時窗，基於此三維度之車輛網路建構 VRPPDTW 模型，目標為最小化車輛總旅行成本。研究利用以拉式鬆弛為基礎之演算法將多車輛途程問題分解成多個單一車輛途程問題，並以時間相依之動態規劃演算法求解放鬆後之單一車輛時間相依最小成本路徑問題。最後，研究以小型範例以及實際網路形成之大型範例測試演算法之求解效率及求解品質。

Lu et al. (2018)提出混合計程車隊排程問題(mixed taxi fleet scheduling problem, MTFSP)，計程車隊由充電式電動車輛與傳統汽油車輛組成，研究考量電動車之剩餘電量及其他限制條件，在滿足所有事先預約之確定性需求下，以混合車隊總營運成本最小化為目標，利用時空網路流動技巧建構混合車隊之排程模式。研究為了在合理時間範圍內求解大型範例，發展兩種啟發式解法，第一種為車輛分解法(network decomposition by vehicles)，此方法分為兩階段，第一階段先針對電動車時空網路求解，第二階段再根據第一階段之結果，加入汽油車時空網路進行求解，以滿足電動車未服務到之剩餘需求。第二種為時間分割法(network decomposition by time)，將時空網路依照時間點數量分割為多個部分，按照時間點早晚順序，對各時間分割進行指派程序。最後，研究依據台灣計程車隊之資料產生測試範例，測驗啟發式解法之求解績效，測試結果顯示，時間分割法與車輛分解法皆有良好之求解效率和品質。

2.6 小結

本研究由城市物流相關文獻得知，城市物流之發展主要受都市化、電子商務、顧客對時效之要求、共享經濟和環境永續等因素之發展影響，因此，如何在高密度都市區域提供高效率之最後一哩配送服務，同時降低行駛距離、運送成本以及對環境之影響，是宅配與快遞物流業者所面臨之挑戰。近年來逐漸有業者採用輕便型二輪車輛執行貨物配送任務，例如，載貨自行車(cargo bikes)、電動自行車(e-bikes)或電動機車(e-scooters)等，其高機動性、臨時停車方便性以及低汙染之特性，使業者能於都會區域內提供高時效的最後一哩配送服務。

另外，由車輛途程問題之相關文獻得知，隨著環境永續之概念興起，逐漸有研究探討使用替代能源車輛與電動物流車輛途程問題，以最小化車輛旅行距離(成本)為目標，且除了考量時窗限制、容量限制等條件外，亦考慮車輛剩餘能源或電量所能行駛之距離、充電站之充電速率、充電設施等特性，以反應電動車輛執行配送作業時所遇到之實際限制，而大多文獻透過發展啟發式解法提高求解大型範例之效率，其中常使用之演算法包含鄰域搜尋法、禁忌搜尋法等。最後，由時空網路相關文獻得知，將時空網路流量模式應用於車輛排程問題時，能減少網

路產生之節線數量，並可透過啟發式解法在可接受時間內得到好的求解品質。

綜合上述文獻得知，目前討論應用電動車進行物流作業之研究多使用電動四輪車進行配送任務，且多只針對單一送貨和單一取貨之配送模式，較少針對電動機車應用於都市內之成對配送服務作探討。而在台灣利用機車之高機動性進行最後一哩配送能提高業者之配送效率，且若是經由一系統性之作業規劃，將能進一步減少車輛之行駛距離及成本。因此，在愈來愈多業者於都市區域內提供機車宅配與快遞服務之趨勢下，本研究將使用時空網路流動技巧，在考慮電動機車輛之剩餘電量、充電站位置等條件下，建構電動機車快遞車輛排程最佳化模式，期望提供業者一系統性之電動機車輛排程方式。

第三章 模式建構

本章將針對研究提出之電動機車快遞服務車輛排程模式進行詳細介紹，首先 3.1 節為問題描述，說明本研究探討之電動機車快遞服務其營運方式，接下來 3.2 節為電動機車之時空網路，本研究利用時空網路方式描述各車輛於各需求地點及電池交換電站之流動情形，而後 3.3 節是根據時空網路建構之電動機車快遞服務車輛排程模式，3.4 節為小範例測試，透過本研究自行設計之小規模範例驗證模式之正確性，最後，3.5 節為啟發式解法，詳細說明啟發式解法之求解方法。

3.1 問題描述

機車快遞服務業者提供高便利性、高時效性與戶對戶之服務，其服務類型分為一般件和專件，一般件為快遞員取貨後，會將貨物送往中繼點，之後再送往顧客指定之送貨地點，所需配送時間較長；專件則為快遞員取貨後直接送往指定之地點，配送時間快。當快遞業者在安排各汽油機車輛之服務排程時，主要考慮之因素包括，前一個需求之送貨地點與下一個需求之取貨地點之間的距離，以及下一個需求之取貨時間，在滿足各需求之要求的同時，以最小化車隊之總運送距離與成本為目標。然而，當業者改以電動機車車隊執行配送任務後，除了須考慮上述之因素外，尚須考慮電動機車輛之行駛里程限制，車輛在各需求點之剩餘電量所能行駛的最遠距離，若是車輛之續航力不足，車輛需至附近的電池交換站更換成電量飽和的電池，以便進行後續的配送服務。

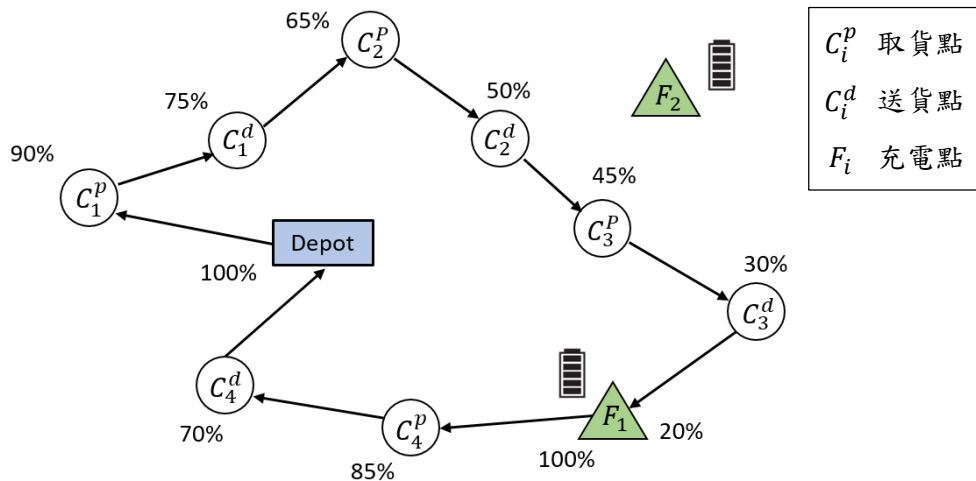


圖 3-1 電動機車服務成對配送需求之範例

本研究所探討的機車快遞服務類型為以電動機車服務已預約之成對配送需求，所有需求皆於規劃時間截止前已知，車輛需從場站出發執行配送任務，而執行完最後一個配送任務後需返回至同一場站。圖 3-1 為簡單範例，電動機車從場站出發執行四個成對配送任務，沿途有兩個充電站，車輛到達各節點之剩餘電量

以百分比之方式標示於各節點旁。車輛從場站出發前往需求 1 的取貨點，執行第一個配送任務，而車輛在執行完第三個配送任務後，前往充電站 1 進行充電，到達充電站時之剩餘電量為 20%，充完電後為滿電量 100%，並繼續服務需求 4 之配送需求，將需求 4 之貨物送至指定地點後，車輛駛回場站。

因此，於車隊服務時間內，在電動機車行駛距離有限之情況下，站在機車快遞服務業者之角度而言，如何規劃各電動機車在執行任務時之排程，使得能滿足所有顧客之配送需求，同時減少車輛未執行配送任務之行駛里程，避免電量之消耗，以達到總成本最小化，為營運電動機車快遞服務車隊相當重要的課題。本研究站在機車快遞服務業者的立場，考量營運時間內各電動機車排程問題，追求總營運成本最小化，在車隊規模固定與配送需求已知之假設前提下，利用時空網路流動方式及數學規劃方法，建構電動機車快遞服務車輛排程模式。

3.1.1 假設條件

本研究提出數項基本假設與限制如下：

(1) 所有配送需求皆為已知且固定

本研究假設顧客的需求皆為確定性，配送需求的取貨地點與時間及送貨地點與時間皆為已知，送達時間為取貨時間加上快遞員取貨和交貨之服務時間和兩需求點之間的旅行時間。

(2) 車輛之旅次起迄點與電池交換站之資訊皆為已知

在電動機車快遞營運之範圍內，所有配送需求及其他旅次的起迄地點之地理資訊皆為已知，另外，電池交換站之數量與地理資訊亦為已知。

(3) 車輛行駛之平均旅行時間及旅行成本皆為固定且已知

電動機車於路網內行駛之各旅次，其平均旅行時間和旅行成本皆為已知且固定。為了簡化模式，本研究並不考慮道路擁塞、號誌故障等隨機情況。

(4) 電動機車車隊規模為已知，且為單一車種

為求簡化模式呈現與求解，本研究之電動機車車隊之車輛數為已知，且車輛之種類皆相同。

(5) 電動機車之剩餘電量之上、下限值為已知

為避免車輛於途中消耗完所有電量，以及考慮電池充放電循環過程造成之損耗，因此，實務上電動車輛之剩餘電量訂有一上下限值，而本研究訂定電動機車之電池剩餘電量上下限值為已知。

(6) 各電池交換站之電池數量充足

電池交換站能同時容納多台車輛進行電池交換作業，且所有車輛之作業時間皆相同，車輛於電池交換站離開後之剩餘電量達電量上限值。

3.1.2 配送需求時空網路

本研究假設顧客之配送需求皆於系統進行各時段之車輛路線作業規劃前得知，而配送需求之資訊包含需求之取貨地點、時間點、需求之送貨地點以及時間點，其中送達之時間點為取貨時間加上快遞員取貨和交貨之服務時間，以及兩需求點之間的平均旅行時間。本研究將已知的配送需求表示於時空網路中，如圖 3-2 所示，時空網路圖之縱軸代表時間延續，橫軸代表各配送需求地點之空間分布，其中節點代表各需求地點，連接兩節點之節線即為快遞員需前往服務之配送需求，本研究於後續之電動機車時空網路中稱之為任務節線。

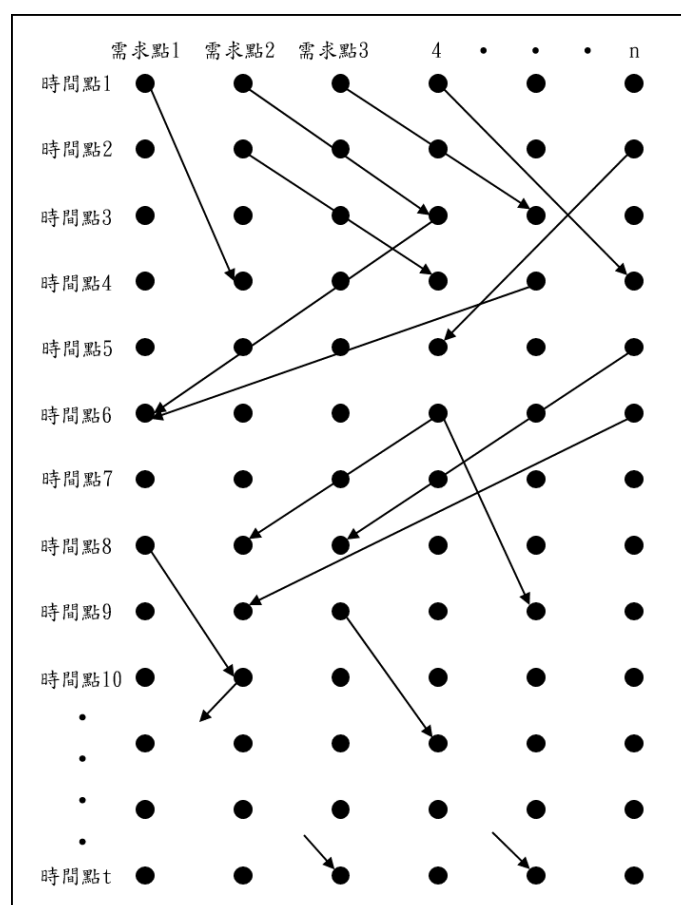


圖 3-2 配送需求時空網路圖

3.2 電動機車時空網路

本研究建構之電動機車時空網路模型，主要用於描述電動機車在各需求地點與電池交換站之流動情形，而所有電動機車於營運前皆從場站發車，並在完成其任務時間內最後一個任務後駛回場站。本研究以每一輛電動機車為單位進行分層，一層時空網路對應車隊內的一輛電動機車，時空網路圖中之縱軸代表時間延續，本研究時空網路之規劃時程長度設為 4 小時，作業排程之時間間距設為 10 分鐘；橫軸代表各配送需求地點和各電池交換站之空間分布。未來使用此模式時，

可依不同需求點、充電站數量及規劃時程考量，作相對應之修改。時空網路涵蓋節點和節線兩項要素，節點代表顧客之需求地點和電池交換站在某時間和空間下之時空狀態，節線代表電動機車在兩時空點之間的移動狀況，如圖 3-3 所示。

本研究建構之業者車隊車輛時空網路中，節點共分為四種，「起點節點」、「迄點節點」、「需求節點」、「電池交換站節點」，說明如下：

1. 起點節點

起點節點代表各電動機車之出發場站，車輛在執行第一個配送任務前，會從起點出發至指定需求之取貨地點等待取貨。

2. 迄點節點

迄點節點代表各電動機車之返回場站，各車輛執行完其任務時間內之最後一個任務後，會從需求之送貨地點行駛回迄點場站，或是從電池交換站返回迄點場站。同時，經由匯集節線流入迄點節點之總量，代表系統所使用之電動機車數。此外，起點節點與迄點節點在空間上皆是指電動機車所屬之同一場站。

3. 需求節點

需求節點為各顧客所指定之取貨地點與送貨地點，取貨地點與送貨地點可由業者之訂單資料整理而得。取貨地點與送貨地點是成對的，電動機車於一需求節點取貨後，將直接行駛至對應之需求節點送貨，且在執行配送任務時，車輛不能行駛至電池交換站進行電量補充。電動機車移動時會從起點節點移至一需求節點，或從一執行完的需求節點移至另一需求節點，或是從一電池交換站移至一需求節點取貨。

4. 電池交換站節點

電池交換站為當車輛之剩餘電量所能行駛的最遠距離無法完成後續任務時，車輛前往補充電量之節點。車輛只能在未載運貨件時行駛至電池交換站節點，且各電動機車於電池交換站之作業時間皆相同。

本研究建構之電動機車時空網路中，節線共分為八種，「發車節線」、「任務節線」、「滯留節線」、「空渡節線」、「充電節線」、「匯集節線」、「不服務節線」、「虛擬節線」，其節線成本、消耗電量與流量上下限設計說明如下：

1. 發車節線

發車節線為電動機車開始服務前，從起點節點連接至需求節點之節線，代表電動機車在執行第一個配送任務前行駛至佈署地點，準備按規劃之排程移動。節線成本為支付快遞員之薪資成本加上電動機車旅行成本，其中旅行成本包括電量消耗成本、電池管理成本、車輛保養維修成本。節線消耗電量為一固定負值，為車輛從起點移動至佈署需求地點所消耗之電量估計值。節線流量上限設為 1，表示此車輛佈署至該地點，下限為 0，表示此車輛未佈署至該地點。

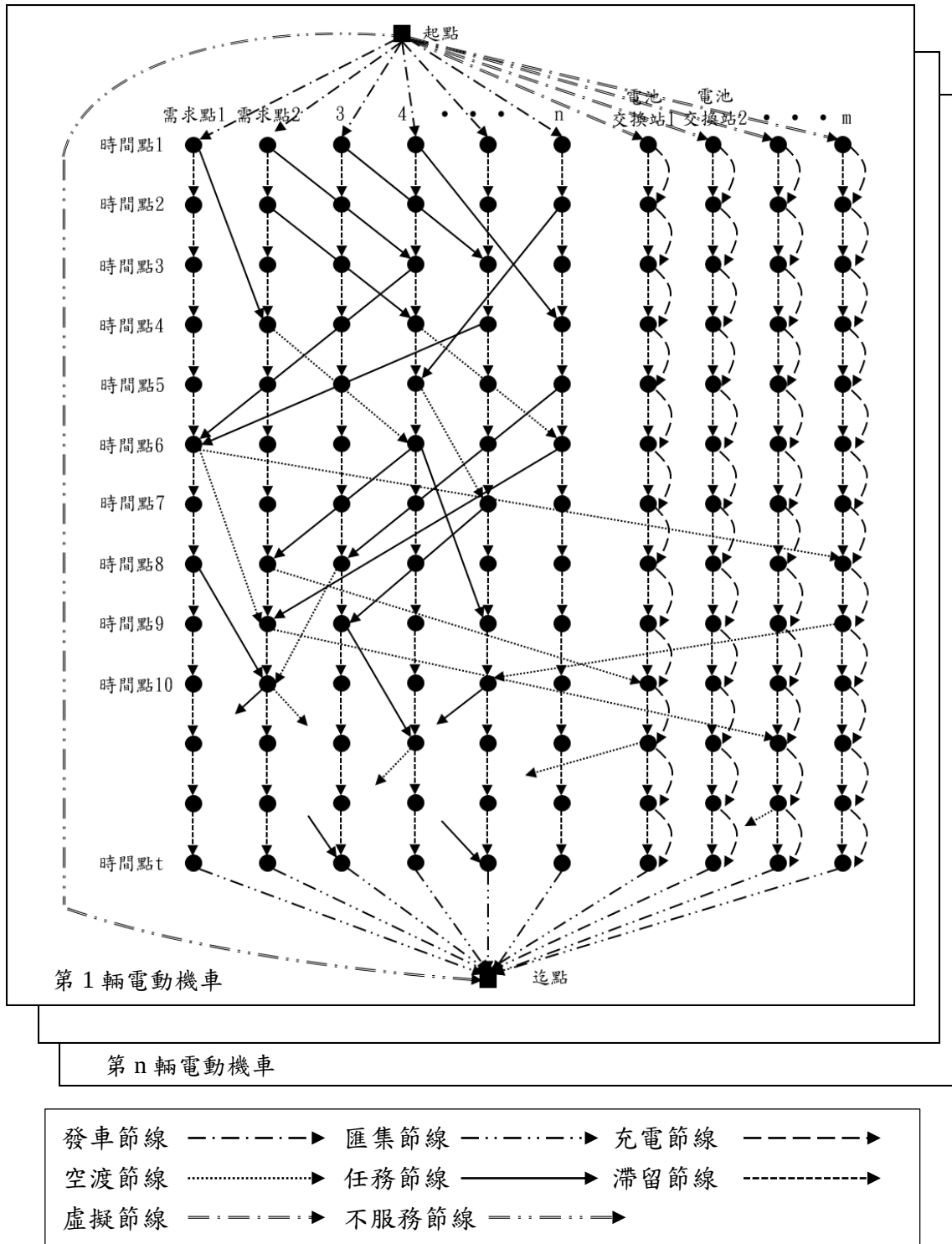


圖 3-3 電動機車時空網路圖

2. 任務節線

任務節線為電動機車從一特定需求節點移動至對應之需求節點之節線，代表車輛執行特定單一配送任務，節線成本為電動機車旅行成本，其中包含電量消耗成本、電池管理成本、車輛保養維修成本，節線之消耗電量為車輛從取貨地點移動至指定送貨地點所消耗之電量估計值。而為反映車輛在載運貨物狀態下，因負

重增加導致耗電量增加之情形，本研究設計任務節線之成本與消耗電量為一固定負值乘以額外加成。節線流量上限為 1，表示此車輛執行該配送任務，下限為 0，表示此車輛未執行該配送任務。

3. 滯留節線

滯留節線為電動機車於需求地點或電池交換站滯留一時段之連接線，此節線僅有時間上之移動。車輛滯留時在同一節點無任何移動，不引發成本及電量損耗，因此節線成本與消耗電量皆為 0。節線流量上限為 1，表示此車輛在該節點該時段停留，下限為 0，表示此車輛未在該節點該時段滯留。

4. 空渡節線

空渡節線為電動機車在未載貨之情況下，從一需求節點連接至另一需求節點的節線、從一電池交換站節點連接至一需求節點，或是從一需求節點連接至一電池交換站節點之節線，代表車輛在未載運貨物之狀況下，前往下個需求地點取貨或是前往電池交換站補充電量。節線成本為電動機車旅行成本，其中包含電量消耗成本、電池管理成本、車輛保養維修成本。節線耗費電量為一固定負值，與該路段的旅行距離相關，代表電動機車損失一定量之電力。節線流量上限為 1，表示此車輛從該需求地點移至下個需求地點取貨，或是此車輛從該需求地點移至電池交換站，下限為 0，表示此車輛未在該時段該空間移動。

5. 充電節線

充電節線為電動機車於電池交換站進行作業時，停留一時段之連接線，補充電量後車輛之剩餘電量達電量上限值。節線所耗費的時間為進行電池交換之作業時間與快遞員之休息時間，所有電動機車之耗費時間皆相同。由於電量消耗成本已包含在車輛旅行成本中，因此充電節線之成本為 0。節線消耗電量為一固定正值，電動機車進行完電池交換作業後，其剩餘電量皆為電量上限值。節線流量上限為 1，表示此車輛在該時段該電池交換站進行電量補充，下限為 0，表示此車輛未在該時段到該電池交換站進行作業。

6. 匯集節線

匯集節線為電動機車於當日執行任務時間結束後，從需求節點或是電池交換站節點連接至迄點節點之節線。節線成本為車輛旅行成本，其中包含電量消耗成本、電池管理成本、車輛保養維修成本。節線消耗電量為一固定負值，為車輛從需求地點或電池交換站移動至迄點場站所消耗之電量估計值。節線流量上限為 1，表示此車輛從該需求地點或是電池交換站行駛回迄點，下限為 0，表示此車輛未在該時段從該空間移動至迄點。

7. 不服務節線

不服務節線為電動機車停留在起點場站，節線自起點節點連接至迄點節點之節線，代表目前佈署至系統之電動機車數量已足夠，該車輛停留在場站。節線成

本與消耗電量皆為 0。節線流量上限為 1，表示此車輛停留在場站，下限為 0，表示此車輛被指派至系統執行配送任務。

8. 虛擬節線

為了維持系統之節線流量守恆，虛擬節線為從起點節點連接至電池交換站節點之節線。節線消耗電量為 0，節線成本為一固定值。節線流量上限為 1，表示此車輛被佈署至電池交換站，下限為 0，表示此車輛未被佈署至電池交換站。

3.3 電動機車快遞服務車輛排程模式

根據前一節所述之電動機車時空網路，本研究所建構之電動機車快遞服務車輛排程模式，求解目標為最小化機車快遞服務業者總營運成本，其決策變數為服務開始前各電動機車之排程規劃。模式所使用之集合、參數及變數之定義說明如後，而數學模式如式(3-1)至式(3-7)所示。

集合

K	所有業者車隊電動機車時空網路的集合
N^k	第 k 層電動機車時空網路中之所有節點集合
D^k	第 k 層電動機車時空網路中之需求節點集合
E^k	第 k 層電動機車時空網路中之電池交換站節點集合
S^k	第 k 層電動機車時空網路中之起點集合
F^k	第 k 層電動機車時空網路中之迄點集合
A^k	第 k 層電動機車時空網路中之所有節線集合
B^k	第 k 層電動機車時空網路中之任務節線集合
C^k	第 k 層電動機車時空網路中之充電節線集合

參數

c_{ij}^k	第 k 層電動機車時空網路中，節線 (i, j) 之成本
r_{ij}	未被執行之配送任務節線 (i, j) 之懲罰成本
a_i^k	第 k 層電動機車時空網路中，節點 i 之供給或需求，當 a_i^k 值為 1 時表示點 i 屬於 S^k ；值為 -1 時表示點 i 屬於 F^k ；值為 0 時表示點 i 屬於 D^k, E^k
q_{ij}	從需求節點 i 至需求節點 j 之配送任務數量
e_{ij}^k	第 k 層電動機車時空網路中，車輛行經節線 (i, j) 所消耗的電量
e_{max}	電動機車電池容量上限
e_{min}	電動機車電池容量下限
M	一極大值

決策變數

- x_{ij}^k 第 k 層電動機車時空網路中節線 (i, j) 的流量
 w_{ij} 未被執行之配送任務節線 (i, j) 的流量
 y_i^k 第 k 層電動機車時空網路中，車輛到達節點 i 的剩餘電量

數學定式

Min

$$\sum_{k \in K} \sum_{ij \in A^k} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{ij \in B^k} r_{ij} w_{ij} \quad (3-1)$$

Subject to

$$\sum_{j \in N^k} x_{ij}^k - \sum_{h \in N^k} x_{hi}^k = a_i^k \quad \forall i \in N^k, k \in K \quad (3-2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k + w_{ij} = q_{ij} \quad \forall ij \in \bigcup_k B^k \quad (3-3)$$

$$y_j^k \leq y_i^k + e_{ij}^k + M(1 - x_{ij}^k) \quad \forall ij \in A^k, k \in K \quad (3-4)$$

$$e_{min} \leq y_i^k \leq e_{max} \quad \forall i \in N^k, k \in K \quad (3-5)$$

$$y_i^k = e_{max} \quad \forall i \in S^k, k \in K \quad (3-6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in A^k, k \in K \quad (3-7)$$

式(3-1)為最小化電動機車發車成本、旅行成本加上未服務配送需求之懲罰成本，本研究之目標式考量業者之車隊數量有限，可能發生無法滿足某些顧客配送需求之情形，將無法由業者自身車隊滿足之配送任務進行外包，因此，設計各配送任務一懲罰成本，代表外包配送需求產生之成本。

式(3-2)表示節點之流量守恆限制式，此外，由於模式為根據 3.2 節之電動機車時空網路所建構，以網路之節線作為車輛之旅次，以節點表示到達之起迄地點及時間，因此，式(3-2)亦表示車輛到達各節點之時間守恆限制式。

式(3-3)表示被服務與未被服務之配送需求總合，需等於需求節點 i 至需求節點 j 之配送任務數量，且每個配送任務僅由一台車輛執行。

式(3-4)表示電動機車行經節線 (i, j) 後之剩餘電量。在此式中，當節線流量 x_{ij}^k 等於 1 時，車輛於下游節點 (j) 之剩餘電量需小於等於車輛於上游節點 (i) 之剩餘電量減去節線 (i, j) 所消耗的電量。其中發車節線、任務節線、空渡節線和匯集

節線之 e_{ij}^k 為負值，充電節線之 e_{ij}^k 為正值。

式(3-5)為每輛電動機車於各節點之剩餘電量必須介於電池容量下限值與上限值之間。式(3-6)表示電動機車於起點場站之剩餘電量為電量上限值，代表出發前車輛之電量充足。式(3-7)表示節線流量決策變數為二元變數。

3.4 小範例測試

為驗證本研究所發展之電動機車快遞服務車輛排程模式之正確性，研究自行設計一小規模之範例，以 C++ 程式語言撰寫模式，並使用 Gurobi 數學規劃軟體進行模式求解。

3.4.1 參數設定

本研究設計之小範例路網內有 3 個需求地點，分別為地點 A、B、C，1 個電池交換站；規劃時程為上午 8 點至中午 12 點，共 4 個小時，節點之時間間距為 10 分鐘，共有 25 個時間點；車隊內有 2 台電動機車準備執行配送任務，車輛於電池交換站進行作業之時間為 10 分鐘；規劃時程內共有 11 個專件須執行。

本研究自行假設路網內各區域與電池交換站之行駛距離，路網資訊如表 3-1 所示。電動機車之剩餘電量上限為 2.46 kWh，下限為 0.54 kWh，車輛每公里消耗電量為 0.025 (kWh/km)；車輛行駛每公里產生成本為 2 元；每位快遞員之平均每日薪資為 1200 元。

表 3-1 小範例之路網資訊

	起迄場站	地點 A	地點 B	地點 C	電池交換站 1
起迄場站	0	8	12	8	8
地點 A	8	0	12	8	6
地點 B	12	12	0	12	8
地點 C	8	8	12	0	6
電池交換站 1	8	6	8	6	0

(單位：公里)

本研究自行產生之配送需求資訊如表 3-2 所示。另外，此小範例之問題規模如表 3-3 所示。

表 3-2 小範例配送需求資料

配送需求	收貨地點	收貨時間	送貨地點	送達時間
專件 1	A	8:00	B	8:30
專件 2	C	8:00	A	8:20
專件 3	B	8:40	A	9:10

專件 4	C	8:50	B	9:20
專件 5	A	9:30	C	9:50
專件 6	A	9:40	B	10:10
專件 7	A	10:20	C	10:40
專件 8	B	10:40	C	11:10
專件 9	C	10:50	A	11:10
專件 10	A	11:30	C	11:50
專件 11	B	11:30	A	12:00

表 3-3 小範例之問題規模

電動機車時空網路規模	
時空網路層數	2
網路節點數	204
網路節線數	848
數學式規模	
二元變數數量	848
整數變數數量	424
連續變數數量	204
限制式數量	1485

3.4.2 小範例測試結果

本研究將自行假設之相關參數與配送需求代入模式中，求得業者最低營運成本為 2836 元，第一台電動機車之營運成本為 1382 元，第二台電動機車之營運成本為 1454 元，所有配送需求皆被服務，第一台車輛執行 6 個專件，第二台車輛執行 5 個專件，表 3-4 為模式求解結果，各電動機車詳細配送資訊如圖 3-4 所示。

第 1 台電動機車於服務時間開始前，從起點場站出發至地點 A 準備服務專件 1，由地點 A 送至地點 B，之後於地點 B 服務專件 3 需求，送達專件 3 之送貨地點後，車輛滯留一時段等待服務專件 5，執行完專件 5 後，車輛空渡至電池交換站進行電池交換作業，補充完電量後，車輛空渡至地點 A，繼續服務專件 7、專件 9 以及專件 10，最後由地點 C 返回迄點場站。

第 2 台電動機車於服務時間開始前，從起點場站出發至地點 C 準備服務專件 2，由地點 C 送至地點 A，於地點 A 滯留一時段後，空渡回地點 C 執行專件 4，由地點 C 送至地點 B 之後，空渡至地點 A 服務專件 6，執行完專件 6 後，車輛空渡至電池交換站進行電量補充，之後車輛空渡回地點 B，繼續服務專件 8 和專件 11，最後由地點 A 返回迄點場站。

表 3-4 小範例求解結果

最佳解	最佳解詳細資訊	求解時間
總成本： 2836 元	第 1 台車輛營運成本：1382 元，執行需求：6 件 第 2 台車輛營運成本：1454 元，執行需求：5 件	≤ 1(秒)

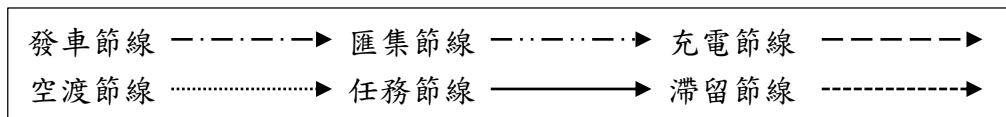
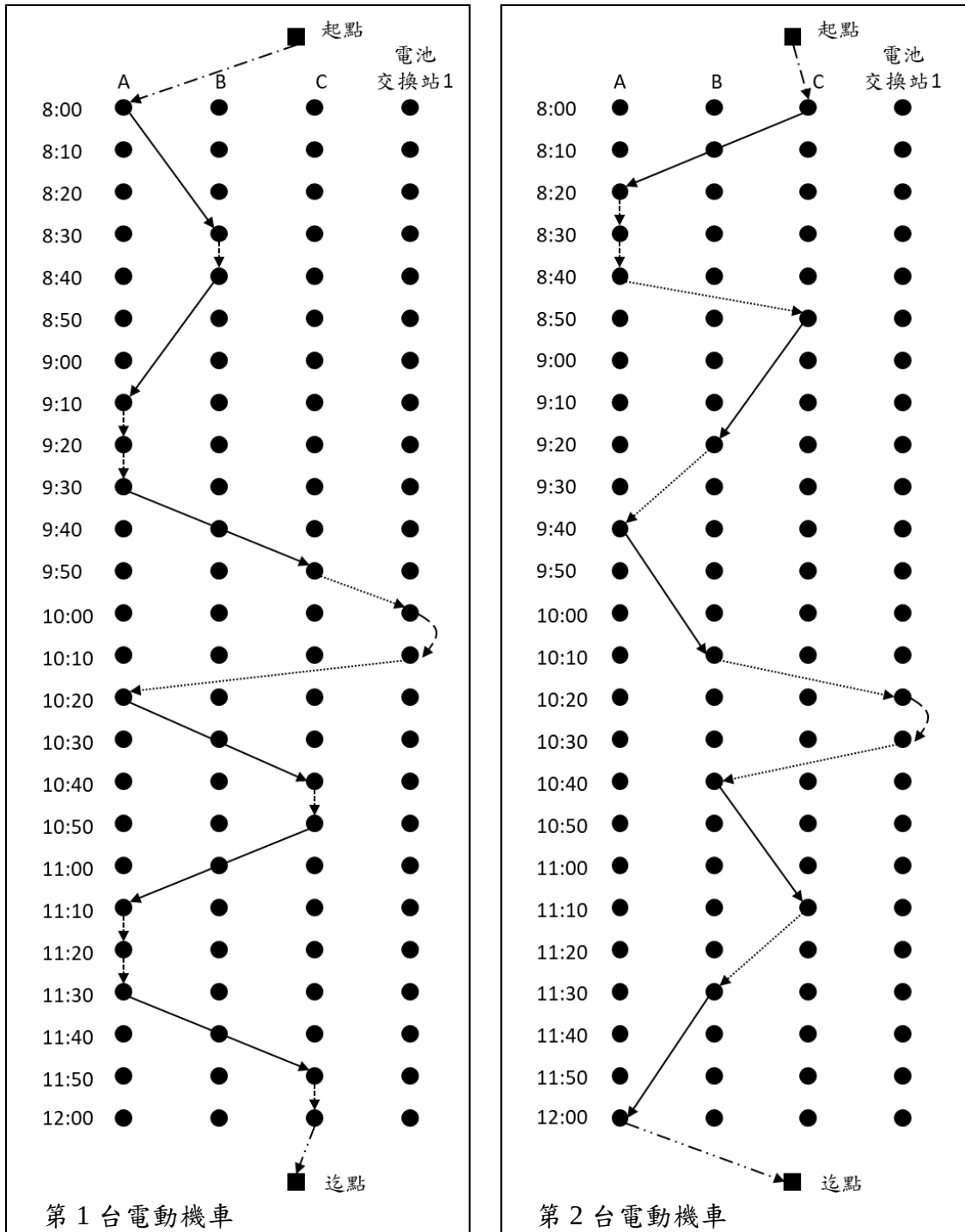


圖 3-4 各電動機車詳細配送情形

3.5 啟發式解法

本研究所建構之模式屬於整數多商品網路流量問題(Integer Multi-commodity Network Flow Problem)，當求解問題規模大時，難在合理時間內透過精確解法求得最佳解，因此，本研究發展一啟發式解法，透過問題分解技巧(problem decomposition)，縮減主問題範圍並逐一求解各子問題，詳細解法說明如下：

首先，決定分割整體時空網路之時間切割長度 m (例如：20 分鐘)，將主問題切割成規模較小的子問題，其中第一個子問題之規劃時程(planning horizon)為 $[0, m]$ ，第二個子問題之規劃時程為 $[0, 2m]$ ，以此延伸子問題之規劃時程長度，依序建構子問題並透過 Gurobi 最佳化軟體進行求解，重複建構及求解子問題，直到所有需求皆被服務，或子問題規劃時程長度已達到總規劃時程長度。其中為了縮小子問題之求解範圍，若 Gurobi 軟體求得之第 n 個子問題結果中，其供給節線和任務節線流量值為 1，則在建構第 $n+1$ 個子問題時，須固定上述節線流量值再進行求解。步驟流程如圖 3-8 所示，詳細求解步驟如下列所述。

Step 1 輸入資料與參數設定

輸入電動機車快遞供給和需求相關資訊，包含路網資料、配送需求資料、電動機車耗電量、電動機車旅行成本。

Step 2 建構整體網路

根據 3.2 節所述建構多層電動機車時空網路。

Step 3 分割整體網路

將整體網路依照時間切割長度 m ，分割成 n 個子問題，第 n 個子問題之規劃時程起始時間為 t_0 ，規劃時程結束時間為 t_n ，其中 $t_n = nm$ ，且 t_n 小於等於總規劃時程長度。圖 3-5 為第 1 個子問題之示意圖，圖 3-6 為第 2 個子問題之示意圖，為保持子問題之節點流量守恒，於分割時間點處之節點增加虛擬匯集節線連接至迄點節點，其中虛擬匯集節線之成本和耗電量皆為零。圖 3-7 為最後一個子問題之示意圖。

Step 4 建構第 n 個子問題並求解

建構第 n 個子問題，其規劃時程起始時間為 t_0 ，結束時間為 t_n ， $t_n = nm$ ，透過 Gurobi 軟體進行求解，並繼續 step 5。

Step 5 檢查是否求解完成

若所有需求皆被服務或子問題規劃時程長度 t_n 達到總規劃時程長度，則繼續 step 6；若尚有需求未被服務，則固定子問題求解結果中，供給節線和任務節線流量值為 1 之節線值，並設定 $n = n + 1$ ，返回 step 4。

Step 6 輸出結果

停止求解並輸出電動機車車輛排程。

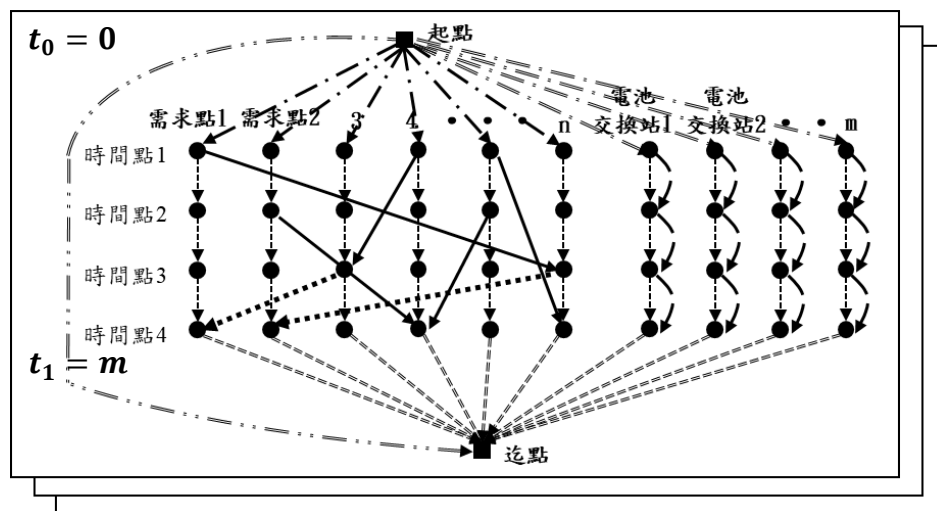


圖 3-5 第 1 個子問題之示意圖

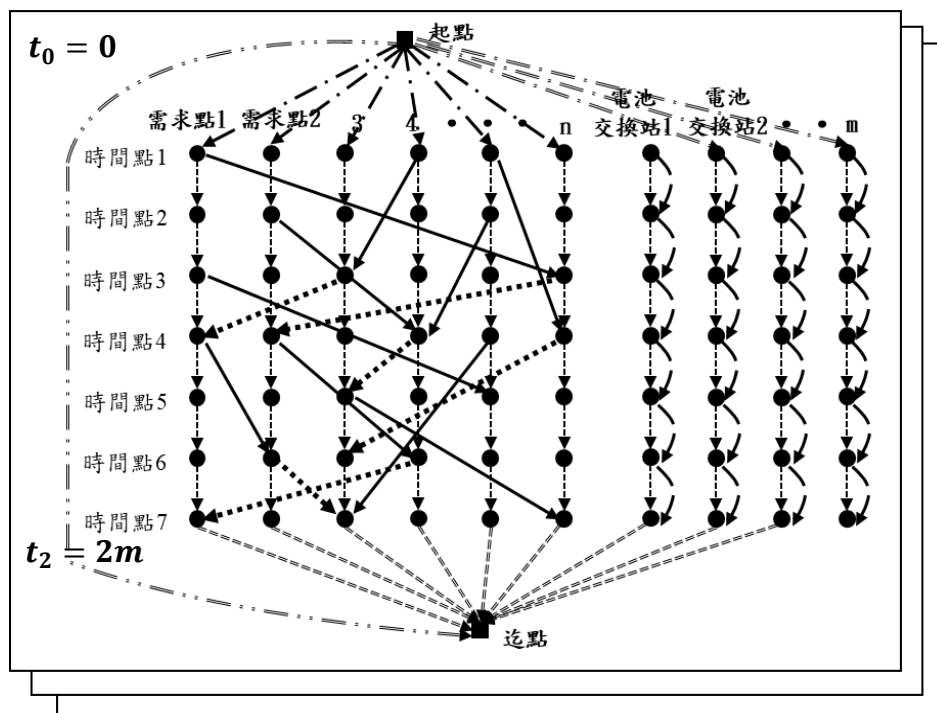


圖 3-6 第 2 個子問題之示意圖

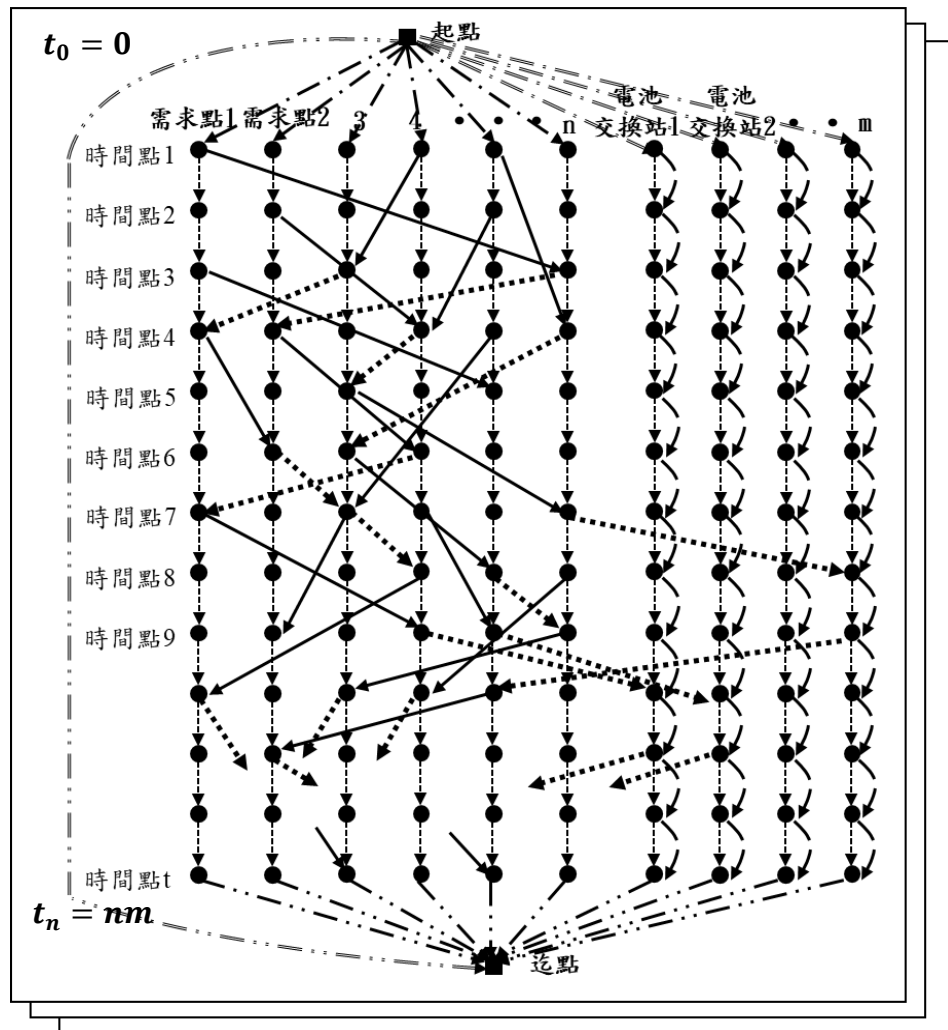


圖 3-7 第 n 個子問題之示意圖

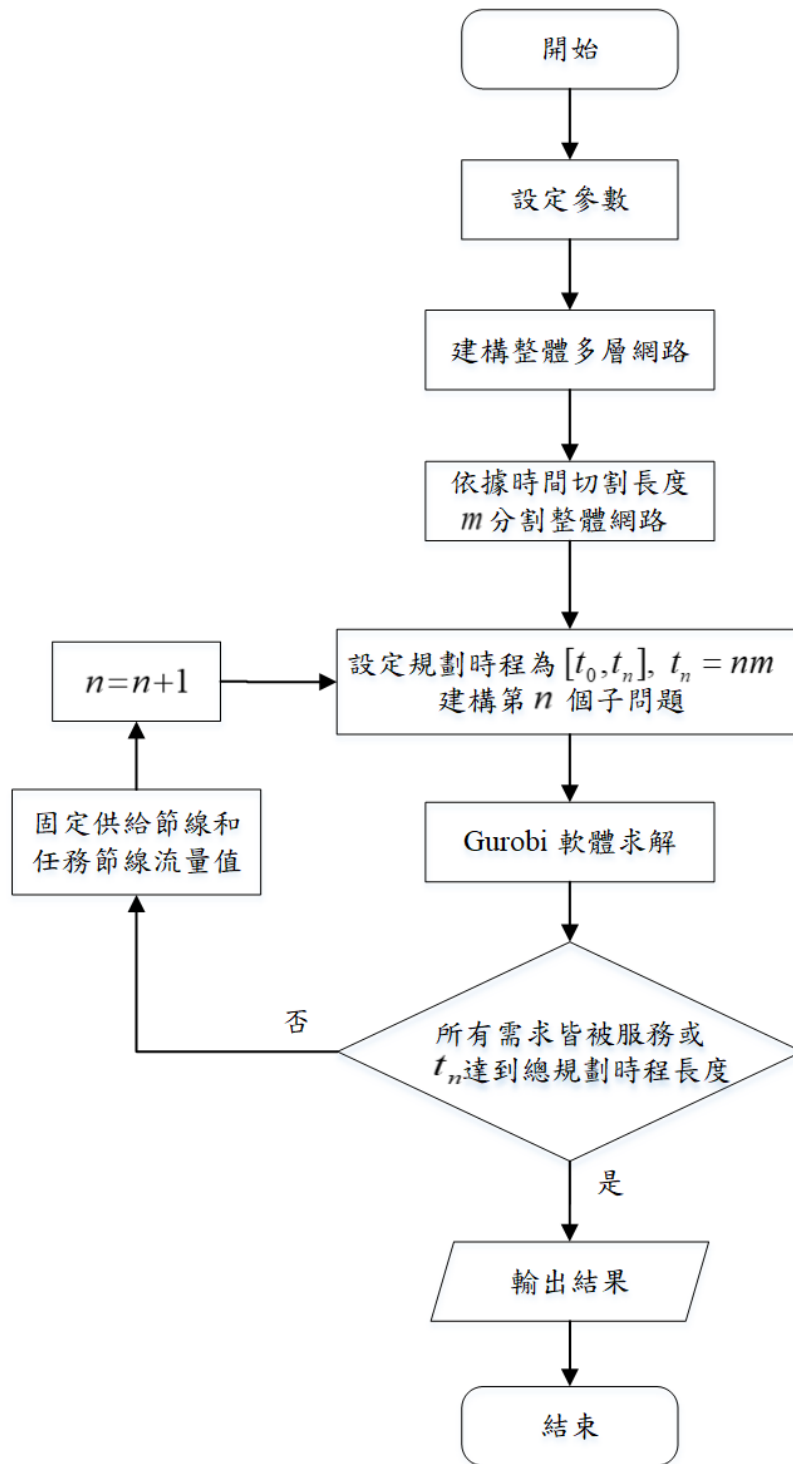


圖 3-8 啟發式解法流程圖

第四章 範例測試

為測驗本研究發展之電動機車快遞服務車輛排程模式於實際應用之績效，本研究以國內某機車快遞公司為參考範例，進行訂單資料蒐集與分析，經由整理與合理假設後，產生測試輸入之資料，包括路網規劃、電動機車隊相關參數及配送需求。本章節分為三個部分，4.1 節為範例設計，說明輸入參數之設定，4.2 節為範例測驗結果，4.3 節為敏感度分析。

4.1 範例設計

本研究測試所需之輸入資料包括配送之路網資訊、電動機車配送途中引發之各種成本值、及各需求起迄點之訂單量。本研究參考快遞業者之歷史訂單資料，設計配送路網，並產生各起迄點間之配送需求量；另外，依據電動機車業者提供之數據，設定車輛每公里之消耗電量及旅行成本，其中旅行成本包括電量消耗成本、電池管理成本、車輛保養維修成本，詳細設計方式說明如下。

4.1.1 配送路網規劃

本研究以國內某機車快遞業者之歷史訂單資料為例，依據業者提供之一日專件訂單資訊進行路網規劃，其配送範圍以台北市和新北市為主。由於本研究規劃時程為 4 小時，因此，僅篩選訂單配送於早上九點至下午一點內完成之資料，經整理後得知，訂單中許多需求起迄地點相近，兩點之旅行距離小於 1 公里，旅行時間不到 5 分鐘。因此，為了配合本研究建構之電動機車時空網路，作業排程時間為 10 分鐘一單位，以及簡化模式複雜度。本研究將相鄰之需求起迄地點進行群聚，並以各群聚之中心點作為代表點，最後歸納出 18 個需求地點，並於需求地點間選定 6 個電池交換站地點供電動機車進行電量補充，需求地點和電池交換站於配送範圍內之分布情形如圖 4-1 所示。

本研究依據 Google Maps 網站計算之最短車輛行駛距離，建立各需求地點與電池交換站之起迄距離矩陣，並以此距離矩陣配合車公里消耗電量和車公里旅行成本，計算出電動機車於各旅次產生之固定消耗電量和旅行成本。另外，各旅次之平均旅行時間則依據所得之旅行距離除以車輛平均行駛速率計算而得。

4.1.2 電動機車相關參數設定

本研究以睿能電池交換式電動機車為車隊使用之車種，設計於規劃路網範圍內車輛執行任務時之平均速率為每小時 40 公里。並參考電動機車業者提供之車種規格表之性能數據，作為輸入模式之電動機車相關數值，包含電池容量、車輛每公里消耗電量等。從業者提供之資料得知，睿能電池交換式電動機車具備之抽取式電池之電池容量為 2.74 千瓦小時(kWh)；若以時速每小時 40 公里行駛，車

輛每公里消耗電量為 0.03 千瓦小時(kWh)。而實務上，考量電池充放電循環過程造成之損耗，以及為了避免車輛於配送途中消耗完所有電量，導致無法執行後續任務，本研究根據實務情形，將電池剩餘電量之上限值設為電池容量之 90% (2.46 kWh)；電池剩餘電量之下限值設為電池容量之 15% (0.41 kWh)，車輛執行任務期間，其剩餘電量會介於設定之上下限值之間。

在各旅次之成本計算方面，本研究所考慮之成本包含薪資成本、旅行成本、未服務之懲罰成本等參數，各參數設定方式分別說明如下。

(1) 薪資成本

電動機車之發車成本中包括固定成本和變動成本，固定成本為支付快遞員之薪資成本，變動成本為車輛之旅行成本，本研究參考機車快遞業者提供之資訊，以單月工作 22 日計算，設計快遞員之平均基本薪資約為 1182 (元/日)。

(2) 旅行成本

本研究設計之旅行成本包括電量消耗成本、電池管理成本和車輛保養維修成本，本研究依照電動機車業者之電池服務資費方案準則，費率計價方式為按里程計費，且若車輛每個月總行駛里程超過 1600 公里，將視為從事商業用途，須適用商用資費方案。因此，根據業者提供之商用資費方案，如表 4-1 所示，本研究設計電動機車之平均電池服務費用為 $(1.3+1.5+2)/3=1.6$ (元/公里)，其中包含電量消耗成本和電池管理成本；當電動機車行駛里程達 4000 公里時之定期保養費用為 638 元，因此，本研究設計車輛之保養維修成本為 $638(\text{元})/4000(\text{公里})=0.16$ (元/公里)。車輛行駛各旅次之旅行成本為 1.76 (元/公里)，而為反映車輛在載運貨物狀態下，因負重增加導致耗電量增加之情形，本研究設計車輛執行配送任務時之旅行成本為空渡旅次之 1.1 倍。

表 4-1 Gogoro 商用資費方案

項目	費用	每公里費率(元/公里)
服務月費	799 元 (含 600 公里騎乘里數)	1.3
額外里程	1.5 元 (600-1600 公里)	1.5
	2 元 (1600 公里以上)	2

(3) 未服務之懲罰成本

考量實際營運情形，當業者自身電動機車隊無法滿足顧客配送需求時，業者會將訂單進行外包，針對此種情況，本研究設計各配送任務一懲罰值，代表外包配送需求所產生之成本。本研究依照機車快遞平台按里程數計價方式，設計外包機車快遞運送各配送需求之成本，而為配合實務上，業者不樂見外包訂單之情況發生，因此，本研究將按里程數計算而得之訂單外包成本乘以一固定值(研究將此值訂為 20)，計算而得各配送需求之懲罰成本。

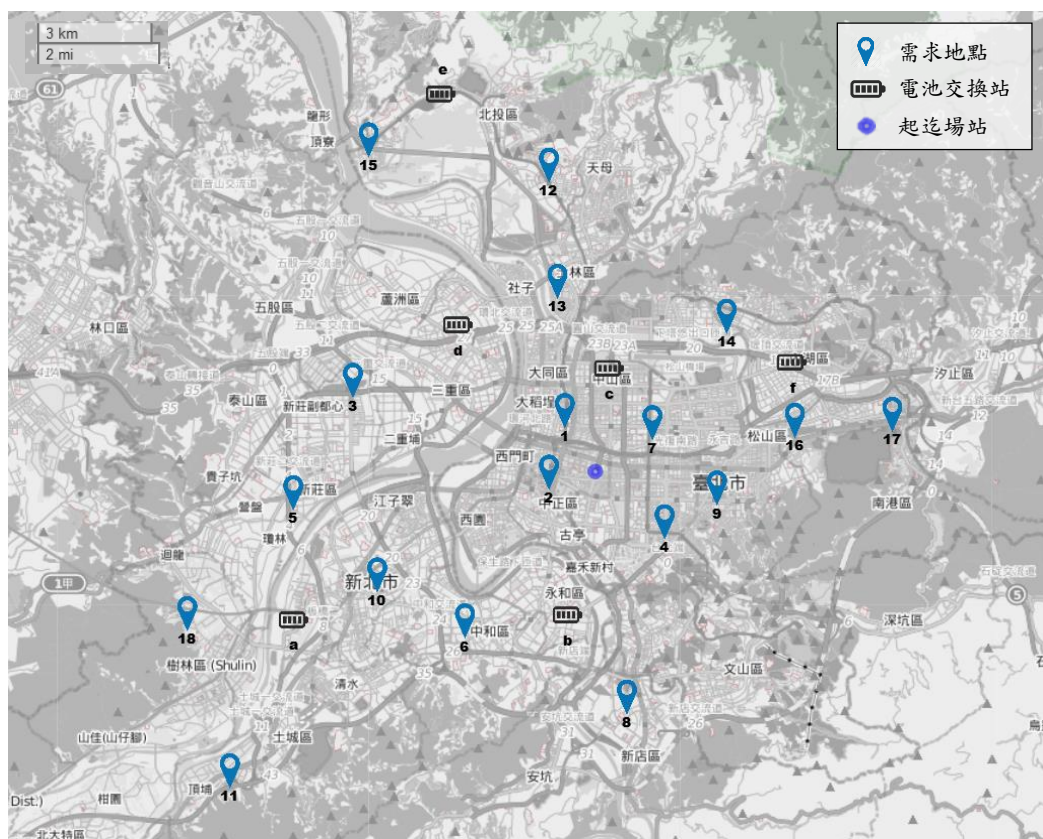


圖 4-1 需求地點和電池交換站分布圖

4.1.3 配送需求設定

本研究主要參考業者提供之歷史訂單資料中之需求起迄地點和需求取貨時間，設計配送需求資料，其中需求起迄地點依據本研究規劃之 18 個需求地點進行設計；需求取貨時間參考歷史訂單資料；需求送達時間則是依據取貨時間加上取貨和交貨之服務時間和兩地點之平均旅行時間而得，本研究設定各需求之服務時間皆為 10 分鐘。將需求起點、需求迄點、需求取貨時間和送達時間，根據時空網路之設計進行編制，產生輸入模式之配送需求資料。

本研究設計兩種情境之大規模範例，第一種情境是平日離峰，車隊共有 22 台電動機車準備執行專件快遞，專件訂單量為 110 件；第二種情境是平日尖峰，車隊內共有 27 台電動機車準備配送專件訂單，而專件訂單量增加為 140 件。

4.1.4 模式輸出資料與環境設定

模式輸入資料包括配送路網資訊、專件訂單資訊、車隊規模、電動機車電量消耗率、快遞員薪資成本、電動機車旅行成本、外包成本。模式輸出資料包括目標值、求解時間、車輛執行需求量、車輛行駛里程數、充電車輛數。

本研究以 Microsoft Window 10 為作業平台，使用 C++ 程式語言撰寫所構建之數學模式，並利用 Gurobi 最佳化軟體進行模式求解，於 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @1.60GHz 1.80GHz, 12.0 GB RAM 之個人電腦上執行得到求解結果。

4.2 範例測驗結果

本研究將各旅次之耗電量、旅行成本、剩餘電量上下限值等參數代入所建構之電動機車快遞服務車輛排程模式，兩種情境範例之電動機車時空網路規模與數學模式規模如表 4-2 所示，經由 Gurobi 軟體求解兩個小時後，所得之目前最佳解與下限解之差距仍有 80% 以上，如表 4-3 所示，顯示使用 Gurobi 軟體求解，無法於有限時間內，求得可接受之目標值，因此，本研究使用 3.5 節所述之啟發式解法進行大規模範例求解。而在求解大規模範例前，本研究設計兩個小規模範例測試啟發式演算法之求解效果，藉由減少配送路網內需求點、電池交換站點數量、以及車隊數量，縮減範例之問題規模，使 Gurobi 軟體能於一小時內求得可接受差距範圍之目前最佳解，並將啟發解與目前最佳解進行比較。

表 4-2 大規模範例之問題規模

		情境一	情境二
電動機車 時空網路規模	時空網路層數	22	27
	網路節點數	13244	16254
	網路節線數	283690	348867
數學式規模	二元變數數量	283690	348867
	整數變數數量	12895	12921
	連續變數數量	13244	16254
	限制式數量	323949	398277

表 4-3 Gurobi 軟體求解結果(大規模範例)

	情境一	情境二
求解時間(秒)	7200	7200
目前最佳解	148330.0	293945.1
下限解	26272.7	31545.7
差距(%)	82.3	89.3

註：差距(%)=[(目前最佳解-下限解)/目前最佳解]*100%

4.2.1 啟發式解法求解效果

本研究設計兩個小規模範例測試啟發式解法之求解效果，第一個小規模範例有 8 個需求地點、2 個電池交換站，服務時間為 4 小時，車隊內有 8 台電動機車須執行 42 個訂單；第二個小規模範例有 9 個需求地點、3 個電池交換站，服務

時間為 4 小時，車隊內有 10 台電動機車須執行 45 個訂單，其他輸入模式之相關參數值則如 4.1 節所述，小規模範例之問題規模如表 4-4 所示。

表 4-4 小規模範例之問題規模

		範例一	範例二
電動機車 時空網路規模	時空網路層數	8	10
	網路節點數	2016	3020
	網路節線數	19504	33860
數學式規模	二元變數數量	19504	33860
	整數變數數量	2438	3386
	連續變數數量	2016	3020
	限制式數量	25666	43065

由於電動機車配送一需求其最短執行時間(服務時間加上旅行時間)為 20 分鐘，因此，本研究應用啟發式解法時，設計最短之時間切割長度為 20 分鐘。本研究分別測試以 20、30、40 分鐘為時間切割長度之啟發式解法，將所求得之目標值與利用 Gurobi 最佳化軟體求解一小時所得之目前最佳解進行比較，測驗啟發式解法進行不同時間切割長度之求解效果，而兩種方法所求得之目標值差距之計算方式為 $[(\text{啟發解}-\text{目前最佳解})/\text{啟發解}] \times 100\%$ 。表 4-5 為透過 Gurobi 軟體求得之結果，表 4-6 為各時間切割長度之啟發式解法之求解結果。

表 4-5 Gurobi 軟體求解結果(小規模範例)

	範例一	範例二
求解時間(秒)	3600	3600
目前最佳解	10361.3	11773.7
下限解	10351.2	11743.8

表 4-6 啟發式解法之求解結果

	範例一			範例二		
時間切割長度	20 分鐘	30 分鐘	40 分鐘	20 分鐘	30 分鐘	40 分鐘
求解時間(秒)	5.01	12.08	17.26	105.85	79.21	97.34
啟發解	10412.8	10395.9	10383.7	11888.7	11889.6	11851.6
差距(%)	0.49	0.33	0.22	0.97	0.97	0.66

註：差距(%)= $[(\text{啟發解}-\text{目前最佳解})/\text{啟發解}] \times 100\%$

比較表 4-5 和表 4-6 得知，利用啟發式解法求解小規模範例一，能於 20 秒內求得與目前最佳解差距在 0.5 % 內之啟發解，其中當時間切割長度為 20 分鐘，所求解時間最短，而當時間切割長度為 40 分鐘，所求得之啟發解與目前最佳解之差距最小；利用啟發式解法求解小規模範例二，能於 110 秒內求得與目前最

佳解差距在 1 %內之啟發解，其中當時間切割長度為 30 分鐘，所需求解時間最短，而當時間切割長度為 40 分鐘，所求得之啟發解與目前最佳解之差距最小。圖 4-2 和 4-3 為比較各時間切割長度之啟發式解法之求解效果。

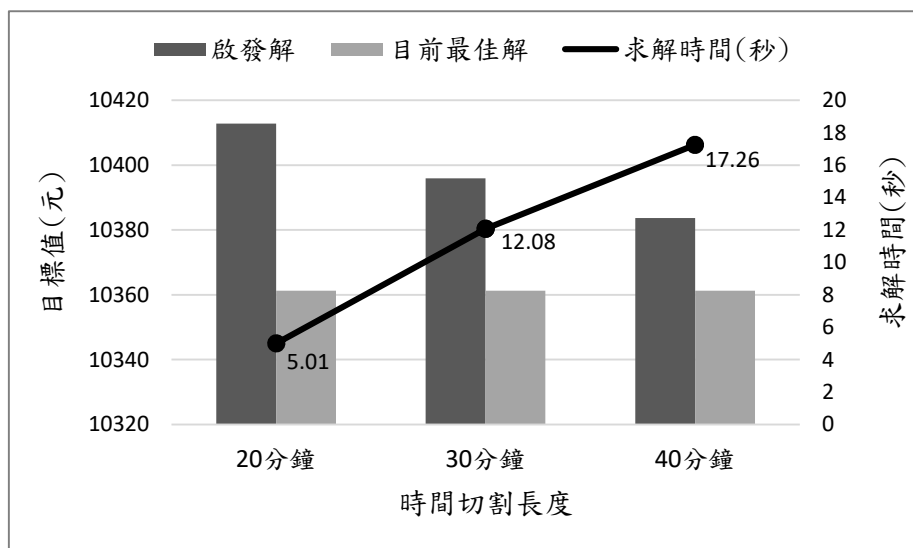


圖 4-2 啟發式解法求解範例一之結果

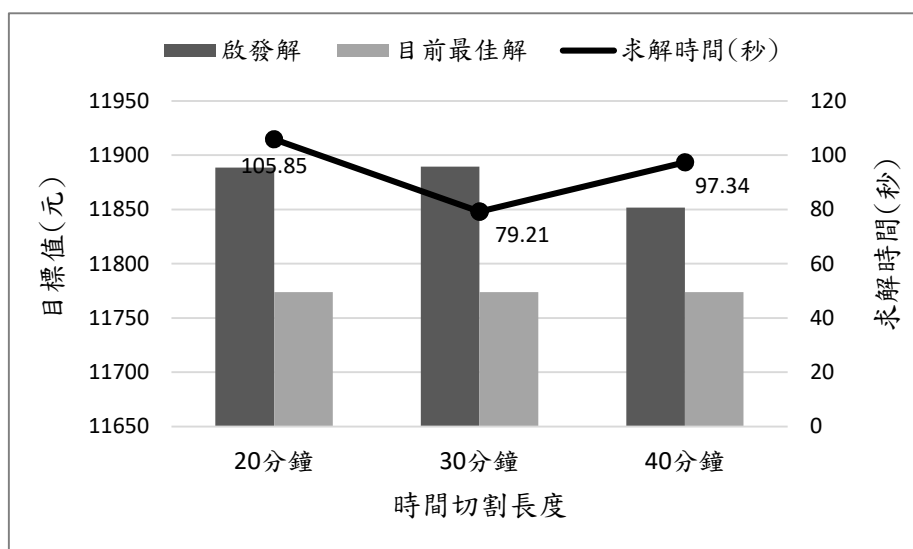


圖 4-3 啟發式解法求解範例二之結果

綜合上述啟發式解法之求解結果，本研究考量使用啟發式解法求解大規模範例時，若將時間切割長度設為 40 分鐘，雖然求得之啟發解與目前最佳解之差距小，但其縮小子問題之規模有限，仍無法於有限時間內求得一可接受之啟發解。而若將時間切割長度設為 20 分鐘，雖然能大幅縮減子問題之規模，但其求解時間和品質較不穩定，因此，同時考量啟發解之求解時間和求解品質，本研究選擇以時間切割長度為 30 分鐘之啟發式解法進行後續之大規模範例求解。

4.2.2 情境一求解結果

本研究將相關參數與配送需求代入模式中，透過啟發式解法求得機車快遞業者最低營運成本為 27584.3 元，車隊內 22 台電動機車，共有 21 台車輛執行配送任務，1 台車輛未執行專件配送，110 件需求皆被服務。表 4-7 為比較啟發式解法與 Gurobi 軟體求解大規模範例情境一之求解結果，由表得知，Gurobi 軟體求解兩個小時所得之目前最佳解仍與下限解差距達 82.3%，而使用啟發式解法求解僅需 11 分鐘左右之時間，即求得與下限解差距 5% 內之目標值。表 4-8 為各車輛營運成本、執行訂單量、行駛里程數、是否進行電量補充之詳細資訊。

表 4-7 啟發式解法求解結果(情境一)

	Gurobi	啟發式
求解時間(秒)	7200.0	689.2
目前最佳解	148330.0	27584.3
下限解	26272.7	26272.7
差距(%)	82.3	4.8

註：差距(%)=[(目前最佳解-下限解)/目前最佳解]*100%

表 4-8 各電動機車之詳細求解結果(情境一)

車輛編碼	營運成本	執行訂單量	行駛里程數	是否換電池
車輛 1	1345.0	7	87.4	v
車輛 2	1358.7	6	95.1	v
車輛 3	1358.6	7	96.0	v
車輛 4	1287.6	6	56.6	
車輛 5	1291.9	7	59.1	
車輛 6	1299.9	6	62.9	
車輛 7	1290.8	4	57.7	
車輛 8	1287.0	2	56.7	
車輛 9	1327.1	7	77.4	v
車輛 10	1365.0	4	98.6	v
車輛 11	1349.5	4	89.8	v
車輛 12	1302.4	8	63.9	
車輛 13	1295.9	6	60.1	
車輛 14	1279.3	3	52.3	
車輛 15	1275.8	3	47.0	
車輛 16	1290.1	6	57.6	
車輛 17	1321.9	6	74.9	v
車輛 18	1274.0	3	49.1	

車輛 19	-	-	-	-
車輛 20	1291.0	4	58.0	
車輛 21	1347.6	5	88.8	v
車輛 22	1345.2	6	87.8	v

由表 4-8 得知，於 4 小時之規劃時程中，由場站發車執行配送任務之 21 台電動機車中，共有 9 台車輛須於途中進行電量補充，其平均營運成本為 1346.5 元，平均行駛里程為 88.4 公里；無須進行電量補充之 12 台車輛，其平均營運成本為 1288.8 元，其平均行駛里程為 56.8 公里。

4.2.3 情境二求解結果

本研究將相關參數與配送需求代入模式中，透過啟發式解法求得業者最低營運成本為 34173.3 元，車隊內 27 台電動機車，共有 26 台車輛執行配送任務，1 台車輛未執行專件配送，140 件需求皆被服務。表 4-9 比較啟發式解法與 Gurobi 軟體求解大規模範例情境二之求解結果，由表得知，Gurobi 軟體求解兩個小時所得之目前最佳解與下限解差距仍高達 89.3%，而使用啟發式解法進行求解，能於 25 分鐘內求得與下限解差距 7.7%之啟發解。表 4-10 為各車輛營運成本、執行訂單量、行駛里程數、是否進行電量補充之詳細資訊。

表 4-9 啟發式解法求解結果(情境二)

	Gurobi	啟發式
求解時間(秒)	7200.0	1459.8
目前最佳解	293945.1	34173.3
下限解	31545.7	31545.7
差距(%)	89.3	7.7

註：差距(%)=[(目前最佳解-下限解)/目前最佳解]*100%

表 4-10 各電動機車之詳細求解結果(情境二)

車輛編碼	營運成本	執行訂單量	行駛里程數	是否換電池
車輛 1	1313.9	7	70.0	v
車輛 2	1314.6	6	71.8	v
車輛 3	1371.6	6	102.2	v
車輛 4	1344.7	6	86.9	v
車輛 5	1298.1	6	62.3	
車輛 6	1299.1	6	58.8	
車輛 7	1310.5	6	68.9	v
車輛 8	1350.3	6	90.6	v
車輛 9	1301.0	7	63.0	

車輛 10	1298.5	6	62.0	
車輛 11	1320.7	3	74.4	v
車輛 12	1297.9	5	61.6	
車輛 13	1332.0	5	80.4	v
車輛 14	1242.0	2	32.2	
車輛 15	1308.3	6	67.8	v
車輛 16	1343.4	5	86.2	v
車輛 17	1318.2	8	73.5	v
車輛 18	1284.2	4	54.8	
車輛 19	1261.7	4	42.4	
車輛 20	1255.7	3	39.8	
車輛 21	1320.5	6	73.5	v
車輛 22	-	-	-	-
車輛 23	1338.3	5	84.2	v
車輛 24	1367.2	4	99.7	v
車輛 25	1295.7	5	60.5	
車輛 26	1328.4	7	79.1	v
車輛 27	1356.8	6	93.9	v

由表 4-10 得知，於 4 小時之規劃時程中，由場站發車執行配送任務之 26 台電動機車中，共有 16 台車輛須於途中進行電量補充，其平均營運成本為 1333.7 元，平均行駛里程為 81.4 公里；無須進行電量補充之 10 台車輛，其平均營運成本為 1283.4 元，其平均行駛里程為 53.7 公里。

4.2.4 情境三求解結果

本研究額外設計比情境二規模大的範例，測試啟發式解法若求解更大規模問題時，其求解效果如何，情境三中車隊內有 40 台電動機車準備執行專件快遞服務，訂單量為 200 個。

本研究將相關參數與配送需求代入模式中，透過啟發式解法求得業者最低營運成本為 51379.8 元，求解時間為 1992.2 秒，車隊內 40 台電動機車，共有 39 台車輛執行配送任務，1 台車輛未執行專件服務，200 件需求皆被服務。由場站發車執行配送任務之 39 台電動機車中，共有 20 台車輛須於途中進行電量補充，其平均營運成本為 1341.3 元，平均行駛里程為 84.8 公里。表 4-11 為部分車輛之營運成本、執行訂單量、行駛里程數、是否進行電量補充之詳細資訊。

表 4-11 部分電動機車之詳細求解結果(情境三)

車輛編碼	營運成本	執行訂單量	行駛里程數	是否換電池
車輛 1	1329.3	5	79.1	v
車輛 2	1360.2	6	95	v
車輛 3	1295.9	5	60.8	
車輛 4	1298.5	7	61.6	
車輛 5	1364.8	7	97.1	v
車輛 6	1331.3	4	79.8	v
車輛 7	1352.5	5	91.4	v
車輛 8	1345.5	5	88.2	v
車輛 9	1355.1	4	93.3	v
車輛 10	1270.4	2	47.2	
車輛 11	1300.6	8	61.9	
車輛 12	1297.3	6	62.2	
車輛 13	1331.5	4	79.4	v
車輛 14	1309.8	4	67.8	v
車輛 15	1296.4	7	64.5	
車輛 16	1328.9	6	78.4	v
車輛 17	1289.4	2	57.9	
車輛 18	1347.4	6	88.9	v
車輛 19	1339.2	5	83.3	v
車輛 20	1346.2	5	87	v
車輛 21	-	-	-	-
車輛 22	1276.2	4	50.4	
車輛 23	1289.1	5	57.3	
車輛 24	1295.9	4	64.1	
車輛 25	1368.7	5	99.7	v

4.3 敏感度分析

本研究欲探討模式輸入資料之數值改變時，對於模式目標值之影響，因此，針對重要參數進行敏感度分析，包含訂單量、車輛續航里程、發車成本。本研究以 4.2.1 節設計之小規模範例中之範例二為基礎情境，並利用 Gurobi 軟體進行求解。基礎情境之配送路網內有 9 個需求地點，3 個電池交換站，4 小時之規劃時程中，車隊內有 10 台電動機車準備執行任務，專件訂單量共有 45 個。

4.3.1 訂單量

本研究基礎情境中，車隊內有 10 台電動機車準備執行 45 個專件，研究固定車隊的車輛數，並調整訂單數量，分別將數量減少為 40 個、增加為 50、55、60 個，探討減少和增加需求量，對於總營運成本、使用車輛情形之影響。表 4-12 為不同訂單量下之求解結果，圖 4-4 為不同訂單量下求得之目標值。

表 4-12 訂單量敏感度分析結果

	訂單量(個)				
	40	45 (base)	50	55	60
目標值(元)	11627.0	11773.7	13024.3	13086.6	15505.0
使用車輛數(台)	9	9	10	10	10
服務需求量(個)	40	45	50	55	59
未服務需求量(個)	0	0	0	0	1
充電車輛數(台)	0	2	2	3	4
求解時間(秒)	211.54	574.10	735.06	1615.16	3273.17
目標值變化(%)	-1.2%		+10.6%	+11.2%	+31.7%

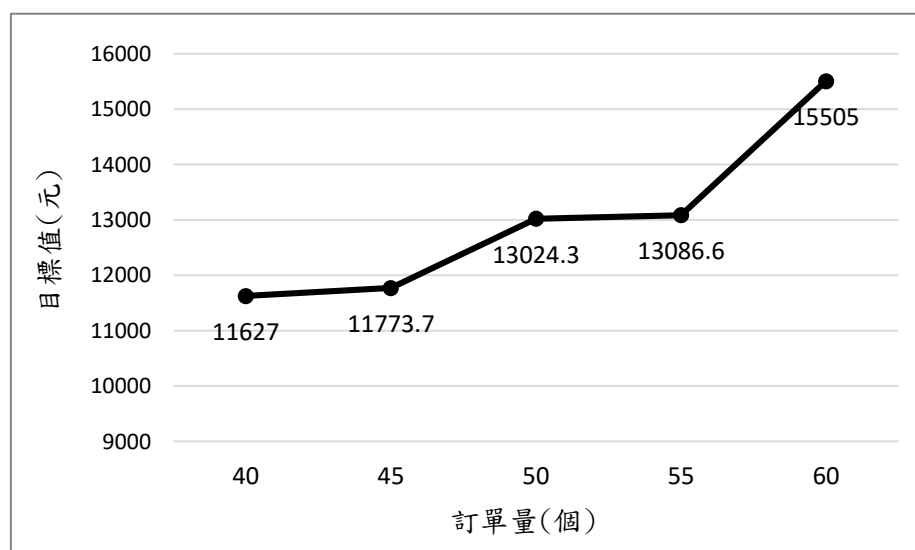


圖 4-4 訂單量敏感度分析結果

由表 4-12 得知，當訂單量由 45 個減少為 40 個時，總營運成本為 11627 元，減少了 1.2%，使用 9 台車輛進行配送。當訂單量增加為 50 和 55 個時，皆使用 10 台車執行任務，所有需求皆被服務，總營運成本分別為 13024.3 元和 13086.6 元，由於服務需求量和使用車輛數增加，使目標值分別增加 10.6%和 11.2%。而當訂單量增加為 60 個時，使用 10 台車輛進行配送任務，60 個需求中有 1 個訂單未被服務，總營運成本為 15505 元，其中懲罰成本為 2300 元。

4.3.2 車輛續航里程

本研究以電池容量為 2.74 千瓦小時(kWh)之電動機車為車種，車輛每公里消耗電量為 0.03 千瓦小時(kWh)，電池剩餘電量之上限值為 2.46 kWh、下限值為 0.41 kWh，車輛續航里程為 68.3 公里，研究調整電動機車之續航里程，分別將車輛之電池容量增加 20%和減少 20%，而車輛之電量消耗率則保持 0.03 (kWh/km)，探討提升和縮減車輛之續航能力，對於總營運成本以及車輛補充電量情形之影響。表 4-13 和圖 4-5 為不同續航里程之求解結果。

表 4-13 車輛續航里程敏感度分析結果

	續航里程(公里)		
	54.8	68.3 (base)	82.2
目標值(元)	12945.7	11773.7	11743.8
服務需求量(個)	45	45	45
使用車輛數(台)	10	9	9
充電車輛數(台)	4	2	0
求解時間(秒)	4164.0	574.1	4.0
目標值變化(%)	+10.0		-0.25

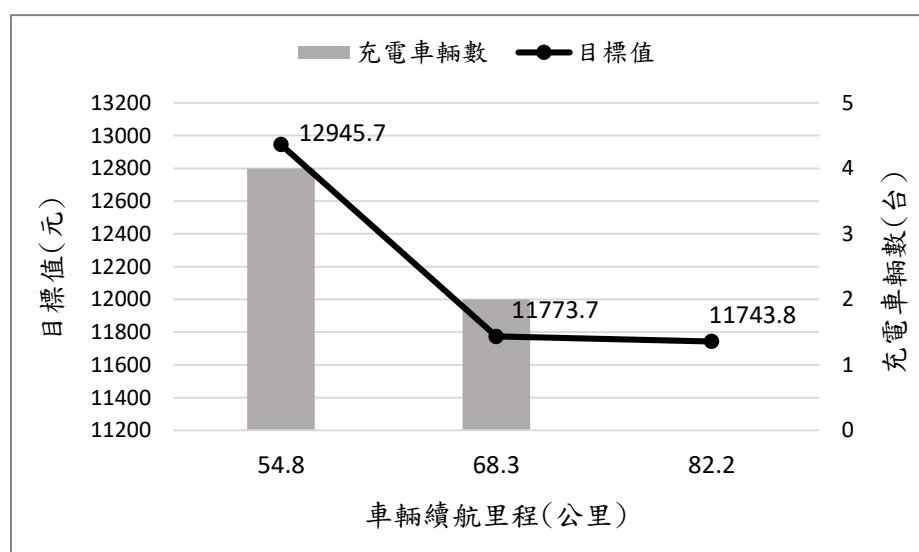


圖 4-5 車輛續航里程敏感度分析結果

由表 4-13 和圖 4-5 得知，當車輛續航里程由 68.3 公里增加為 82.2 公里時，總營運成本減少 0.25%，使用車輛數仍為 9 台，但因續航能力提升，於配送過程中，執行任務之車輛無須至電池交換站進行電量補充；當車輛續航里程由 68.3 公里縮減為 54.8 公里時，總營運成本增加 10%，使用車輛數增加為 10 台，配送過程中有 4 台車輛須進行電量補充。

4.3.3 發車成本

本研究設計之發車節線中之成本包含固定成本和變動成本，其中固定成本為支付快遞員之薪資成本，變動成本為車輛的旅行成本，包含電量消耗成本、電池管理成本和車輛保養維修成本。而於敏感度分析中，研究不考慮發車成本中之固定成本，僅考量車輛行駛產生之變動成本，探討發車成本變動對於發車數量及總營運成本之影響。表 4-14 為發車成本敏感度分析結果，由表得知，當發車成本僅包含車輛之旅行成本時，其總營運成本為 1084.6 元，使用車輛數為 10 台，與含固定成本之求解結果相比，因發車時無須考慮額外固定成本(如：薪資成本等)，僅考慮車輛旅行成本，因此，所有準備執行專件快遞之車輛皆出場站執行任務，亦由於使用車輛數較多，使每台車輛之平均行駛里程較短，且無車輛須進行電量補充。

表 4-14 發車成本敏感度分析結果

	含固定成本	不含固定成本
目標值(元)	11773.7	1084.6
固定成本(元)	10638	0
旅行成本(元)	1135.7	1084.6
服務需求量(個)	45	45
使用車輛數(台)	9	10
充電車輛數(台)	2	0
求解時間(秒)	574.1	811.1

第五章 結論與建議

隨著環保意識高漲，政府積極推動電動公車、電動機車等綠色運具，而在此綠色運輸風潮下，開始有物流業者嘗試採用電動機車進行配送工作，然而，目前實務上多數機車快遞服務業者仍依照配送員之經驗進行車輛規劃，若未來業者發展綠能車隊，使用電動車輛配送需求時，須額外考慮車輛之續航力限制，若仍採用人工指派方式，將更為費時及困難。因此，本研究針對以電動機車進行成對配送服務之車輛排程問題進行探討，從機車快遞服務業者之立場，期望幫助業者在使用電動機車配送專件快遞時，能滿足所有顧客之配送需求，同時考量車輛續航力限制，以追求花費最低之營運成本。在本章中將提出本研究之結論以及後續研究可進行改善之處。

5.1 結論

1. 本研究以機車快遞服務業者之角度，針對屬於成對配送之專件快遞服務，即為快遞員至需求之指定取貨地點取貨後，須直接送往指定地點之服務，以最小化總營運成本為目標，包含發車成本、車輛旅行成本以及未服務需求之懲罰成本，並透過時空網路流動技巧搭配數學規劃，建立一電動機車快遞服務車輛排程模式。
2. 本研究提出之模式屬於 NP-hard 問題，求解規模大的範例時，無法於合理時間內透過精確解法求得最佳解，因此，本研究發展以問題分解技巧為基礎之啟發式解法，將主問題依照時間切割長度 m (例如：20、30、40 分鐘)，切割成 n 個規模較小的子問題，依序建構子問題並使用 Gurobi 最佳化軟體求解，且須固定各次求解結果中供給節線和任務節線之流量值，以縮小求解範圍，經由重複建構及求解，直到子問題規劃時程長度達到總規劃時程長度。
3. 本研究參考國內某機車快遞業者之歷史訂單資料，設計配送路網以及配送需求，產生兩種情境之大規模範例，分別為平日離峰(22 台車輛、110 個需求)與平日尖峰(27 台車輛、140 個需求)，測試模式與啟發式解法之實用性。研究將所得之啟發解與 Gurobi 軟體求得之下限解進行比較。由測驗結果得知，使用啟發式解法求解大規模範例情境一，能於 12 分鐘內求得與下限解差距 5% 內之啟發解，而求解情境二亦能於 25 分鐘內求得與下限解差距 8% 內之啟發解。
4. 本研究針對訂單量、車輛續航里程、發車成本參數進行敏感度分析，分析結果得知，在車隊數量固定下，當需求量增加，使用車輛數及總營運成本皆會增加。當車輛續航里程增加，總營運成本會減少，且須補充電量之車輛亦會減少；當車輛續航里程縮減，總營運成本會增加，而配送過程中須進行電量

補充之車輛亦會增加。最後，當發車成本中僅考慮變動成本(如：車輛之旅行成本)，無考慮額外固定成本(如：薪資成本等)時，所使用之電動車輛數較多。

5.2 未來研究方向與建議

1. 本研究參考機車快遞服務業者歷史訂單資料後，假設需求之取貨地點與時間及送貨地點與時間皆為已知且固定，而實際配送過程中，取貨及送達時間具變動性，可於後續研究中考慮旅行時間之隨機性，建構一電動機車快遞服務排程模式。
2. 本研究假設車輛至電池交換站補充電量時，皆能取得充飽電量之電池，而實務方面，於尖峰時刻，熱門的電池交換站可能有不具備充飽電量電池之情況，可於後續研究中考慮部分充電情形，設計各電動機車於電池交換站進行補充電量後，其車輛之剩餘電量皆不相同。
3. 本研究設計之規劃時程長度為 4 個小時，並假設所有需求皆為已知之情形，為更貼近實務狀況，可於後續研究考量需求會隨著時間逐漸進入系統，發展動態電動機車快遞服務排程模式。
4. 本研究所設計之啟發式演算法透過問題分解技巧，將主問題分割成問題規模較小之子問題後，經由 Gurobi 最佳化軟體求解，建議未來研究可發展一電動機車是否進行充電之指派規則，各子問題依循此指派規則安排車輛行駛路線，不仰賴 Gurobi 軟體求解，以縮減求解時間。

參考文獻

1. 吳銘偉 (2010)。保全公司運鈔車護運作業排程規劃之研究。國立中央大學土木工程研究所碩士論文，桃園縣。
2. 林韋捷 (2015)。公共電動車系統車輛配置最佳化模式。國立臺北科技大學資訊與財金管理系研究所碩士論文，台北市。
3. 張朝能、翁美娟 (2014 年 2 月)。台灣汽車貨運業之現狀與未來發展趨勢。物流技術與戰略雜誌，第 67 期。
4. 楊瑞宇 (2012)。穩健公共自行車租用系統車輛配置模式。國立臺北科技大學資訊與運籌管理研究所碩士論文，台北市。
5. 楊孟軒 (2015)。城市物流之快遞服務任務指派模式。國立交通大學運輸與物流管理學系研究所碩士論文，新竹市。
6. AustriaTech. (2014). Electric fleets in urban logistics: Improving urban freight efficiency in small and medium-sized historic towns. Retrieved from https://www.bmvit.gv.at/verkehr/elektromobilitaet/downloads/emobil_urbanlogistics_annex.pdf
7. Bunte, S., & Kliwer, N. (2009). An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, 1(4), 299-317.
8. Buhrkal, K., Larsen, A., & Ropke, S. (2012). The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254.
9. Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D., & Visser, J. (2012). Reducing social and environmental impacts of urban freight transport: A review of some major cities. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 19-33.
10. Barco, J., Guerra, A., Munoz, L., & Quijano, N. (2017). Optimal Routing and Scheduling of Charge for Electric Vehicles: A Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 16.
11. Conrad, R. G., & Figliozzi, M. A. (2011). The recharging vehicle routing problem. In T. Doolen, & E. VanAken (Eds.), *Proceedings of the 2011 industrial engineering research conference*. USA: Reno.
12. Choubassi, C., Seedah, D. P. K., Jiang, N., & Walton, C. M. (2016). Economic Analysis of Cargo Cycles for Urban Mail Delivery. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2547, 102-110.
13. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem.

Management science, 6(1), 80-91.

14. Dablanc, L., Giuliano, G., Holliday, K., & O'Brien, T. (2013). Best Practices in Urban Freight Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2379, 29-38.
15. Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100-114.
16. Ecommerce Foundation. (2017). Global B2C Ecommerce Country Report 2017. Retrieved from <https://www.ecommercefoundation.org/free-reports>
17. Felipe, Á., Ortuño, M. T., Righini, G., & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, 111-128.
18. Gintner, V., Kliwer, N., & Suhl, L. (2005). Solving large multiple-depot multiple-vehicle-type bus scheduling problems in practice. *OR Spectrum*, 27(4), 507-523.
19. Hof, J., Schneider, M., & Goeke, D. (2017). Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops. *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, 102-112.
20. Kliwer, N., Mellouli, T., & Suhl, L. (2006). A time–space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1616-1627.
21. Keskin, M., & Ç atay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 111-127.
22. Lenz, B., & Riehle, E. (2013). Bikes for Urban Freight? Experience in Europe. *Transportation Research Record*, 2379(1), 39-45.
23. Lu, C.-C., Yan, S., & Huang, Y.-W. (2018). Optimal scheduling of a taxi fleet with mixed electric and gasoline vehicles to service advance reservations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 479-500.
24. Muñozuri, J., Larrañeta, J., Onieva, L., & Cortés, P. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities*, 22(1), 15-28.
25. Mahmoudi, M., & Zhou, X. (2016). Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state–space–time network representations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 89, 19-42
26. Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2016). A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem. *Transportation Research*

Part C: Emerging Technologies, 70, 113-128.

27. Nocerino, R., Colorni, A., Lia, F., & Luè, A. (2016). E-bikes and E-scooters for Smart Logistics: Environmental and Economic Sustainability in Pro-E-bike Italian Pilots. *Transportation Research Procedia*, 14, 2362-2371.
28. Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). 50th Anniversary Invited Article—Goods Distribution with Electric Vehicles: Review and Research Perspectives. *Transportation Science*, 50(1), 3-22.
29. Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *Transportation Science*, 48(4), 500-520.
30. Savelsbergh, M., & Woensel, T. V. (2016). 50th Anniversary Invited Article—City Logistics: Challenges and Opportunities. *Transportation Science*, 50(2), 579-590.
31. Schiffer, M., & Walther, G. (2017). The electric location routing problem with time windows and partial recharging. *European Journal of Operational Research*, 260(3), 995-1013.
32. United Nations. (2018). World urbanization prospects: the 2018 revision. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
33. Wang, I.-L. (2008). Distribution of small packages in metropolitan area by motorcycle courier services. *International Journal of Integrated Supply Management*, 4(1), 88-101.
34. Wang, H., & Cheu, R. L. (2013). Operations of a Taxi Fleet for Advance Reservations Using Electric Vehicles and Charging Stations. *Transportation Research Record*, 2352(1), 1-10.
35. Yan, S., & Chen, C.-Y. (2011). An optimization model and a solution algorithm for the many-to-many car pooling problem. *Annals of Operations Research*, 191(1), 37-71.
36. Yan, S., Lin, C.-K., & Chen, S.-Y. (2014). Logistical support scheduling under stochastic travel times given an emergency repair work schedule. *Computers & Industrial Engineering*, 67, 20-35.
37. Yang, J., & Sun, H. (2015). Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers & Operations Research*, 55, 217-232.
38. Gogoro 台灣官方網站，2019，擷取自：<https://www.gogoro.com/tw/>