

國立成功大學  
工業與資訊管理研究所  
碩士論文

公共電動機車共享系統之最佳車輛佈署策略研究  
A Study on the Optimal Vehicle Deployment for Public  
Electric Scooter Sharing Systems



研究 生：梁瑜庭

指 導 教 授：王逸琳

中華民國一百零二年六月

## 摘要

節能減碳的議題在近年來漸漸受到重視，為了減少溫室氣體的排放，以綠色運輸來解決環境汙染及交通壅塞的概念因應而生，其中又以電力驅動的汽機車及近年來風行的公共自行車共享系統最受矚目。由於都會區交通擁擠且停車空間有限，單人開車浪費空間，多人共駕不夠方便且有安全疑慮，共享自行車不夠便捷又常因天候地形不佳而影響其使用率；反之，機車不但節省空間又便捷舒適，我們預期電動機車將會取代傳統燃油機車，成為通勤族使用捷運、公車等大眾運輸系統的最初及最後一哩路程之銜接工具，甚至可成為中短程通勤之代步工具。有鑑於此，本研究欲結合「電動機車」與「載具共享」兩大綠色運輸的概念，探討都會區中針對通勤需求而設計的公共電動機車共享系統之期初車輛佈署策略。

由於電動機車之續航力對共享系統之方便性影響甚鉅，本研究首度將「充電站」及「電池交換站」等兩類延長電池續航力之技術與設施納入共享系統的規劃考量，提出兩個線性混整數規劃模式來預估各租借站期初應擺放的車數，以滿足一定程度的租借需求，達到預設的服務水準。為使我們提出之數學規劃模式能更貼近現實及正確地反應使用者的租借行為與趨勢，讓更多租借需求的騎乘路線能有更多的電動機車租借流量，我們將電池充耗電速率列入考慮，並以不同起訖需求之相對比例關係來分配電動機車租借流量。

本研究利用最佳化軟體 Gurobi 求解混整數規劃模式，發現隨著模式規模擴大會增加求解時間，同時亦觀察到降低服務水準要求的模式求解更加耗時，因此本研究進一步發展兩個粒子群最佳化演算法  $PSO_{CP}$  與  $PSO_{BE}$  分別用以加速求解使用充電站與使用電池交換站的數學模式，並探討在不同情境下的期初車輛佈署策略，分析比較不同的電池續航力延伸技術以及不同的耗電與充電速率對服務水準與成本的影響，期望研究結果能作為未來相關政府部門及營運者之決策參考。

**關鍵字：**電動機車；載具共享；充電站；電池交換站；混整數規劃；車輛佈署策略；粒子群最佳化演算法

# Abstract

Green transportation has aroused more and more attentions recently, especially by the introduction to the concept of vehicle sharing that promotes shared vehicles to conserve energy, reduce carbon emissions, and improve traffic congestions. The bicycle sharing system has become the most popular vehicle sharing systems so far. However, for some places with bad weather or topography not so convenient for biking, electric scooters (e-scooters) may serve better than bicycles as shared vehicles, since they are as mobile as bicycles, and can move even faster with ease.

This thesis focuses on the initial vehicle deployment at each rental site for a public e-scooter sharing system so that service requirement can be achieved with minimum total cost. In particular, we would like to put optimal number of e-scooters at each rental site in the beginning of each day so that the number of satisfied Origin-Destination demands attains specified service level requirement with minimum number of e-scooters. Two linear mixed integer programming models are proposed based on different ways of recharging batteries: one using the charging stations, and the other using the battery exchange stations. Both models assume uncapacitated rental sites, and available e-scooters are distributed fairly in proportion to their historical OD profile. They differ in how the battery power level changes, where an idle e-scooter recharged in a charging station model gains some battery power within a time period, whereas an idle e-scooter in a battery exchange station model does not gain any battery power, unless the power level is insufficient for one time period in which case the battery will be directly swapped to one with full power level.

We first solve these models by the Gurobi optimizer, and learned that models asking for lower service level requirements take longer time. We then design two particle swarm optimization algorithms, named  $\text{PSO}_{CP}$  and  $\text{PSO}_{BE}$ , respectively for each model. These proposed PSO algorithms can calculate good solutions in much shorter time than Gurobi. Finally, we conduct analyses on the effects in the service level requirements and total costs caused by different battery recharging models, as well as the effects caused by different battery consumption and recharging rates..

**Keywords:** Electric scooter, Vehicle sharing, Charging station, Battery exchange station, Mixed integer programming, Vehicle deployment strategy, Particle swarm optimization

## 誌謝

終於來到了要跟學業告別的階段，兩年的碩士生活說長不長、說短不短，我珍惜這兩年來的點點滴滴，因為這一段過程充滿了酸甜苦辣，往後必定會特別懷念這七百多個日子，而能順利走完這全程，感謝很多人的幫助。

首先，承蒙王逸琳老師不厭其煩的指導，引領我正確的方向，小至論文架構和寫作方式，大至研究方向和研究方法等無不逐一匡正，讓我獲益匪淺以至於能完成論文，在此獻上最深的謝意。而在論文提案和口試期間，感謝陳梁軒老師、林明毅老師以及口試委員李宇欣老師、李家岩老師與孔令傑老師的指正與建議，使得本論文更臻完備。

這兩年來謝謝 lab61205 大家的相伴，深深覺得有你們在很好，很幸運能跟泓毅當夥伴，謝謝你教我很多程式技巧以及在課業上的幫助，經過這兩年讓我們建立了深厚的革命情感，另外還有佳琦、菁蓬、俊偉、敏婷、子欽、宜青、葉卿、佰賢、偉德、琮閔，因為你們讓我覺得 lab 很溫馨歡樂，很喜歡和你們相聚的每個快樂時光。除此之外，謝謝我的好朋友在我低潮時聽我說話、發牢騷，每次聚會見面都能讓我重新充滿電，是你們讓我的碩士生活變得豐富多彩。

最後，感謝我的父母與家人，你們永遠是我的避風港，有你們的支持與鼓勵讓我能無後顧之憂地專注於課業研究中，如今終於要畢業了，願以此論文及碩士學位的榮耀與你們共享。

# 目錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
誌謝 .....	III
目錄 .....	IV
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VIII
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動機與目的 .....	4
1.3 研究問題與範圍 .....	4
1.4 論文架構 .....	6
第二章 文獻探討 .....	7
2.1 電動機車相關文獻 .....	7
2.1.1 電動機車之簡介 .....	7
2.1.2 電動機車產業之發展趨勢 .....	8
2.1.3 台灣電動機車產業之現況發展 .....	10
2.1.4 電動機車相關研究 .....	15
2.1.4.1 充電站之設施規劃問題 .....	15
2.1.4.2 電池交換站之設施規劃問題 .....	16
2.1.4.3 充電策略 .....	16
2.2 載具共享系統相關文獻 .....	17
2.2.1 汽車租借系統 .....	17
2.2.2 自行車共享系統 .....	18
2.2.2.1 設施區位設置 .....	18
2.2.2.2 車輛配置運補 .....	20
2.3 粒子群最佳化演算法 .....	23
2.4 小結 .....	25
第三章 電動機車共享系統車輛佈署問題 .....	26
3.1 問題描述與假設 .....	26
3.1.1 問題描述 .....	26
3.1.2 問題假設 .....	29
3.2 混整數規劃模式 .....	30
3.2.1 參數與變數定義 .....	30
3.2.2 數學模式 .....	31
3.2.2.1 充電柱模式 .....	32
3.2.2.2 電池交換模式 .....	35

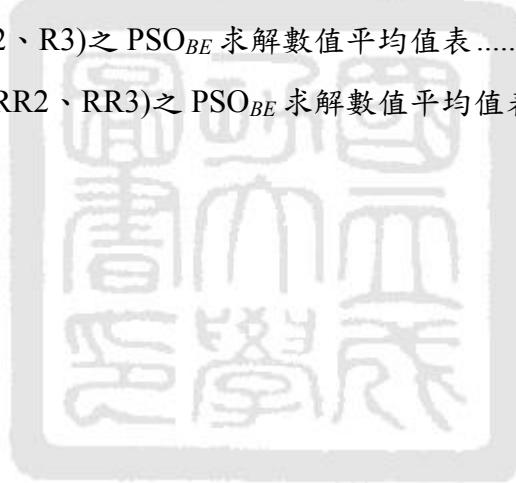
3.3	範例說明 .....	38
3.3.1	充電柱模式 .....	38
3.3.2	電池交換模式 .....	39
3.4	PSO 演算法求解電動機車共享系統車輛佈署問題 .....	41
3.5	小結 .....	44
	第四章 數值分析 .....	45
4.1	建立網路圖 .....	45
4.2	參數設定 .....	52
4.3	數值測試 .....	55
4.3.1	充電柱模式 .....	55
4.3.2	電池交換模式 .....	61
4.3.3	充電柱 VS. 電池交換模式 .....	65
4.3.4	小結 .....	66
	第五章 結論與未來研究方向 .....	67
5.1	結論與貢獻 .....	67
5.2	未來研究方向 .....	69
	參考文獻 .....	71
	附錄 A、PSO <sub>cp</sub> 求解數值 .....	75
	附錄 B、PSO <sub>BE</sub> 求解數值 .....	80



## 表目錄

表 2-1：影響電動機車發展因素表.....	8
表 2-2：電動機車與使用需求分析表.....	9
表 2-3：台灣電動機車產業發展事件表.....	10
表 2-4：普通輕型與小型輕型電動機車之比較表.....	12
表 2-5：電動機車經 TES 測試合格之車款表 .....	13
表 2-6：電動機車能源補充設施之類別表.....	14
表 3-1：電池狀態與剩餘電力對照表(以 6 個狀態為例).....	26
表 3-2：式子(3.5)的三種情況表 .....	32
表 3-3：式子(3.6)的兩種情況表 .....	33
表 3-4：式子(3.27)的三種情況表 .....	36
表 3-5：充電柱模式範例各期各租借站起訖需求表.....	38
表 3-6：電池交換模式範例各期各租借站起訖需求表.....	39
表 4-1：高雄 C-bike 20 個租借站座標表.....	47
表 4-2：租借站相連矩陣表.....	49
表 4-3：各期各租借站之起訖需求值(以 $t=0$ 為例).....	50
表 4-4：相關參數之設定.....	52
表 4-5：情境二各期各租借站總租借需求設定表.....	53
表 4-6：六筆租借需求測試資料表.....	55
表 4-7：情境一(R1、R2、R3)之 Gurobi 求解數值平均值與標準差表.....	55
表 4-8：R1 之 PSO <sub>cp</sub> 與 Gurobi 比較表 .....	59
表 4-9：R2 之 PSO <sub>cp</sub> 與 Gurobi 比較表 .....	59
表 4-10：R3 之 PSO <sub>cp</sub> 與 Gurobi 比較表 .....	60
表 4-11：R1 之 Gurobi 求解數值表.....	62
表 4-12：R1 之 PSO <sub>BE</sub> 與 Gurobi 比較表 .....	62
表 A-1：R1 之 PSO <sub>CP</sub> 求解數值表.....	75
表 A-2：R2 之 PSO <sub>CP</sub> 求解數值表.....	75
表 A-3：R3 之 PSO <sub>CP</sub> 求解數值表.....	76

表 A-4：RR1 之 $PSO_{CP}$ 求解數值表 .....	76
表 A-5：RR2 之 $PSO_{CP}$ 求解數值表 .....	77
表 A-6：RR3 之 $PSO_{CP}$ 求解數值表 .....	78
表 A-7：情境一(R1、R2、R3)之 $PSO_{CP}$ 求解數值平均值表 .....	78
表 A-8：情境二(RR1、RR2、RR3)之 $PSO_{CP}$ 求解數值平均值表 .....	79
表 B-1：R1 之 $PSO_{BE}$ 求解數值表 .....	80
表 B-2：R2 之 $PSO_{BE}$ 求解數值表 .....	80
表 B-3：R3 之 $PSO_{BE}$ 求解數值表 .....	81
表 B-4：RR1 之 $PSO_{BE}$ 求解數值表 .....	81
表 B-5：RR2 之 $PSO_{BE}$ 求解數值表 .....	82
表 B-6：RR3 之 $PSO_{BE}$ 求解數值表 .....	82
表 B-7：情境一(R1、R2、R3)之 $PSO_{BE}$ 求解數值平均值表 .....	83
表 B-8：情境二(RR1、RR2、RR3)之 $PSO_{BE}$ 求解數值平均值表 .....	83



## 圖目錄

圖 1-1：巴塞隆納電動機車充電運作圖 .....	2
圖 1-2：巴塞隆納充電站分布示意圖 .....	3
圖 1-3：高雄市 30 座電池交換站分布示意圖 .....	3
圖 2-1：電動機車 TES 認證之性能及安全測試項目圖 .....	11
圖 2-2：新北市充電站實際圖 .....	14
圖 2-3：PSO 演算法流程圖 .....	24
圖 3-1：以充電柱補充電量的電動機車流量圖 .....	27
圖 3-2：以交換電池補充電量的電動機車流量圖 .....	28
圖 3-3：等比例分配電動機車之概念圖 .....	29
圖 3-4：兩租借站於連續兩期間之流量 .....	31
圖 3-5： $ N =3, T=2$ 充電柱模式求解結果 .....	38
圖 3-6： $ N =3, T=3$ 電池交換模式求解結果 .....	40
圖 3-7：粒子示意圖 .....	41
圖 3-8： $PSO_{CP}$ 與 $PSO_{BE}$ 演算法流程圖 .....	42
圖 4-1：高雄 C-bike74 個租借站分佈示意圖 .....	46
圖 4-2：高雄 C-bike20 個租借站分佈示意圖 .....	48
圖 4-3： $ N =20, T=15,  S =6$ 網路圖 .....	51
圖 4-4：產生不同筆租借需求示意圖 .....	54
圖 4-5：情境一之不同耗充電比下，服務水準對總成本關係圖(Gurobi) .....	57
圖 4-6：情境一之不同耗充電比下，服務水準對總車數關係圖(Gurobi) .....	57
圖 4-7：情境一之不同耗充電比下，服務水準對求解時間關係圖(Gurobi) .....	58
圖 4-8：不同耗充電比下，服務水準對總成本關係圖( $PSO_{CP}$ ) .....	60
圖 4-9：不同耗充電比下，服務水準對總車數關係圖( $PSO_{CP}$ ) .....	61
圖 4-10：不同耗電速率下，服務水準對總成本關係圖( $PSO_{BE}$ ) .....	63
圖 4-11：不同耗電速率下，服務水準對總車數關係圖( $PSO_{BE}$ ) .....	64
圖 4-12：不同耗電速率下，服務水準對總電池交換次數關係圖( $PSO_{BE}$ ) .....	64

圖 4-13：情境一之兩種模式不同耗電速率下，服務水準對總車數關係圖 ..... 65

圖 4-14：情境二之兩種模式不同耗電速率下，服務水準對總車數關係圖 ..... 66



# 第一章

## 緒論

本章共分 4 節，首先描述本研究之研究背景和研究動機與目的，接著定義出研究問題與範圍和論文架構。

### 1.1 研究背景

隨著全球暖化、氣候變遷加劇及石化能源逐漸耗竭，節能減碳已成為國際矚目議題。陸上交通運輸工具每年所排放的二氧化碳，約占全球人致二氧化碳排放量的 16%，因此各國紛紛制定更為嚴苛的車輛二氧化碳排放標準與法規。而在全球石化燃料需求增加的情況下，能源安全問題也使得耗用石化燃料比例較大的交通運輸工具首當其衝。都會區因空間有限、人車擁擠，過多的私人載具乘載率過低又排放廢氣，為政府部門為推行節能減碳最需著力之處。

在此趨勢下，「載具共享」勢在必行，在都會區中尤以公車、捷運、火車等為最普遍之共享載具。然而建置此類大眾運輸系統所費不貲且耗時甚久，若其路網不夠普及或規劃不良，將因方便性不夠而影響其使用率，無法有效減少個人汽機車等私有載具之使用，也因而導致更多空氣污染及能源與空間浪費。為了增加使用者方便性並與大眾運輸系統相輔相成，近年來全世界開始流行個人車輛之共享系統，並可依載具大小將其大略分成汽車、自行車、及機車等三類共享系統。

在「汽車共享系統」方面，歐美部分都會區已有類似 zipcar (<http://www.zipcar.com>) 等自助汽車租借系統，然而該類系統其實大都仍屬單人使用（亦即一台車僅乘載司機一人），雖能減少部分自用車數量，但仍無法有效減少污染及空間與能源的浪費；目前雖有研究鼓吹「多人共乘」的 ride-sharing 概念，但基於人性及安全考量，願意共乘之車友大都僅因彼此熟識，而非因其有相同的目的地或順路，因此「多人共乘」之機制目前仍無法成功推行。此外，租借汽車通常有其較長程之旅運需求，不適用於本研究所欲探討的都會區短程旅運範圍。

「自行車共享系統」近幾年來蔚為流行，儼然成為都會區先進程度的代表指標之

一。由於騎乘自行車不耗能源與空間，較適合短程旅運，本來應能與大眾運輸系統做無縫接軌，解決使用大眾運輸系統之最初及最後一哩銜接路程問題。然而，該系統之使用率卻深受天候、地形及租借站密集程度而影響。舉例來說，台北冬春多雨、夏秋炎熱，高雄夏秋常有颱風；且對通勤需求而言，其住家或工作地點附近並不保證一定設有自行車租借站。以上種種因素直接或間接地造成了目前台北市 YouBike 及高雄市 C-bike 在推行上的困難。

由於機車具有類似自行車不佔空間、方便騎乘停靠的機動特性，又較自行車快捷舒適，若是輔以環保電力驅動，的確比汽車及自行車更適合成為都會區的共享載具，成為與大眾運輸系統結合的最初及最後一哩路程之接駁代步工具。目前已有諸如巴黎<sup>1</sup>及巴塞隆納<sup>2</sup>等先進都市開始著手規劃電動機車共享系統，圖 1-1 和圖 1-2 為巴塞隆納的電動機車共享系統之實際運作圖；由於電動機車目前受限於電池之續航力不長，沒辦法像傳統燃油機車一樣方便，為了讓電動機車使用者享受像加油一樣的方便，台灣環保署也積極建置電池交換營運系統，圖 1-3 即為高雄市 30 個電池交換站的分布示意圖。

本研究擬探討電動機車共享系統之相關議題，試圖將過去自行車共享系統之相關研究及營運經驗運用在電動機車共享系統上，提出更完善且符合現實的電動機車共享系統規劃方式，以提高共享系統的使用率，同時也能增加國人對大眾運輸系統的滿意度，讓相關政府部門或有意經營此共享載具系統之公司單位，在未來設置及營運方面有學術理論上的參考依據。



圖 1-1：巴塞隆納電動機車充電運作圖

<sup>1</sup><http://www.fastcoexist.com/1678936/autolib-electric-car-sharing-launches-in-paris>

<sup>2</sup><http://www.treehugger.com/cars/plug-in-first-electric-motorcycle-charging-stations-in-barcelona.html>



圖 1-2：巴塞隆納充電站分布示意圖



圖 1-3：高雄市 30 座電池交換站分布示意圖

## 1.2 研究動機與目的

近年來各國政府積極發展電動車產業及共享系統，以達到節能減碳的效果，而電動機車共享系統同時結合「電動載具」與「載具共享」等兩項重要的綠色運輸概念，其相關議題新穎，鮮少直接相關文獻。目前與電動機車共享系統較相關的為自行車共享系統，雖然兩者租借性質有些雷同，都是租借需求頻繁，租借時間較短，且以通勤者為主要顧客。然而電動機車的機動性較高，可以騎乘距離較遠，也比較不費力；此外，電動機車與自行車最大差別在於電力問題，一旦將電力問題納入考慮，將會使電動機車共享系統變得比自行車共享系統複雜及困難許多，因此電動機車共享系統的營運模式實為值得探討的新穎議題。

建構電動機車共享系統時，該如何決定租借站位址、租借站容量、期初各租借站擺置車輛數、電動機車車款、電池充耗電速率、充電方式、如何與電池交換站做結合等皆為重要的議題。舉例來說，電動機車的服務水準倚賴其續航力、電池充電速率及其壽命，若選擇較便宜但充電速率慢的車款，勢必導致更多機車佔車位卻不能服務(因必須充電)，因此便宜之充電方式可能緩不濟急，而快速充電又將縮短電池壽命，這都將影響整體系統之營運策略。

本研究將鎖定探討如何在不同服務水準下，考慮需求比例以及電池耗電、充電速率，以決定各租借站期初最佳之擺置車輛數。若期初擺放車數太少，會造成無車可租，降低系統的服務水準；反之，若擺放過多車輛，使用人數未達一定程度，反而造成多餘的電動機車設置成本浪費。因此，各租借站期初擺置車輛數為一重大決策，將會影響整個共享系統的運作。

本研究將針對都會區中通勤需求的電動機車共享系統，設計其最佳之期初車輛佈署方式，希望透過數學模式的求解，可以更有系統地建構共享系統，使整個共享系統可以順利營運，並可達到一定程度的服務水準，以提升通勤族的使用意願，進而達成低碳綠色的樂活效果，同時也可減少交通擁塞的問題。

## 1.3 研究問題與範圍

由於電動機車有電力的問題，建構模式時將比自行車複雜及困難，本研究將電力消耗或補充方式簡化成 Step 型變動，即經過一期就消耗或補充某固定量的電。或許我

們提出之電力充耗變化模式可能稍嫌簡化而與實際情況有些許出入，然而該模式在相關領域為首創，且的確可成功地將電力變化對共享系統的影響預估出來。另外，本研究也考慮了電動機車電池耗電與充電速率，可依據電池發展技術做調整，讓整個問題更貼近實際情況。而不同的耗電與充電速率會影響電動機車在整個共享系統的流動，這部分將與自行車共享系統極為不同，若不考慮電池耗電與充電速率，如同將電動機車的電力視為無限供應，這並不符合現實。

本研究考慮兩種電動機車補充電量的方式：(1)利用充電柱整車充電；(2)利用電池交換設施交換電量不足的電池，不同的補充電量方式對共享系統中的電動機車流量會有不同的影響。若採用充電柱，未被租出的電動機車皆在充電，而電量低於一定門檻的電動機車無法出租，必須經過一段時間充電，直到電力超過該門檻才可出租；反之，若採用電池交換設施，則在電量低到一門檻時即可逕行交換電池，交換完電池後電動機車即可馬上被租出，而電動機車可被出租的電量門檻會受電池耗電速率的影響。

本研究以未滿足的租借需求占總租借需求的比例來衡量服務水準，該概念參考自 Lin and Yang (2011)，該篇以自行車的可用率和租借站的覆蓋率來衡量公共自行車共享系統的服務水準，也就是各租借站的自行車存貨可以滿足一定比例的租借需求，及租借站個數和位址應該設在離所有租借需求的起訖站可抵達之一定距離內，以滿足最多的租借需求。本研究假設租借站之個數及其位置皆為已知，譬如我們可將高雄目前 C-bike 各租借站之空間挪用一部分作為電動機車共享系統使用，或是與統一或全家超商合作在其各門市點外置放數台電動機車及停車架。

文獻中大多假設租借站的容量無上限，亦即不會發生無位可還車的情況，因若同時考慮租借站的容量與依需求比例分配車輛流量的方式，其數學規劃模式將變成非線性而甚難求解 (廖敏婷, 2012)。為了簡化模式，我們假設各租借站的容量無上限，。因此，當一顧客到達某一站欲租車時，只可能發生以下三種情況：(1)順利租到續航力足夠之車、(2)有車可租但其續航力不足以到達其目的地、(3)無車可租。其中，(1)情況表示該顧客可租車出發，電力足夠到達其目的地；反之，(2)及(3)將導致該顧客無法被及時服務，會影響整體租借系統的服務水準。

Shu et al. (2013)假設已知顧客在各時段的起訖點間需求，並以此為分配自行車流量的基礎，提出一線性規劃模型在可極大化車輛使用率下，預估合理的各站期初車輛擺置數量。其目標式以營利事業的角度去追求最大化利潤，與公共車輛共享系統原始之

設計目的不甚相同。本研究以該論文的模式為基礎，假設已有足夠的市場調查或分析資料可得知確定性的租還需求發生時段、大小、起訖站點等資訊，以這些假設為基礎做進一步之研究。本研究第3章數學規劃模型亦以Shu et al. (2013)之模型為基礎，為了使電動機車共享系統更貼近現實，本研究的目標為極小化電動機車設置成本，並以未滿足的租借需求比例來衡量服務水準。此外，由於先前之相關文獻大都僅以流量守恆而未依各起訖點需求相對比例來分配流量，如此一來可能出現數學模式為了追求其設定的目標值而片面犧牲部分的起訖需求，不甚公平合理，因此本研究將以起訖需求之相對趨勢比例關係來合理分配流量。

總括來說，本研究的研究範圍如下所示：

1. 針對都會區通勤族租借需求，以該租借起訖需求比例來分配電動機車流量。
2. 依據電池發展技術，可設定不同的電池充、耗電速率。
3. 以未滿足需求占總租借需求的比例來衡量整個系統的服務水準。
4. 考慮電動機車補充電量的方式，採用充電柱或電池交換設施。
5. 假設已知所有租借站位址及個數，而且各租借站的容量無上限。

## 1.4 論文架構

本論文之架構如下：第一章為緒論，介紹研究背景、研究動機與目的、研究問題與範圍和論文架構。第二章為文獻回顧，簡介目前電動機車產業和發展現況及相關共享系統的相關文獻，包括汽車租借系統與自行車共享系統，另外，也介紹並回顧粒子群最佳化(Particle Swarm Optimization, PSO)演算法；第三章則詳細描述考慮需求比例和電池充耗電速率的電動機車共享系統車輛佈署問題，依電動機車補充電量的方式不同，建構兩混整數規劃模式，並舉範例說明模式，同時發展PSO演算法以提升求解速率；第四章將進行數值分析，首先建構機車租借之時空網路，進行參數設定，再利用最佳化軟體Gurobi和PSO演算法求解，比較兩種求解方式之差異，並進行敏感度分析；最後，第五章總結本研究成果以及提供未來可研究的方向和建議。

## 第二章 文獻探討

本章主要探討電動機車、載具共享系統、PSO 演算法三個議題的相關文獻。在電動機車部分，首先回顧電動機車產業的發展背景，接著介紹國外及我國的產業現況，並說明能源補充設施及其充電方式的相關研究，譬如整車充電方式與抽換電池方式有非常不同的物流問題等等；在載具共享系統部分，由於電動機車共享系統直接相關文獻仍然不多，因此我們參考相關的汽車租借與自行車共享系統的文獻，綜合比較不同載具之共享系統的異同及利弊得失；而為了加速求解電動機車共享系統車輛佈署問題，也回顧了 PSO 演算法相關文獻。

### 2.1 電動機車相關文獻

隨著地球溫室效應所造成的氣候暖化及石化能源逐漸耗竭，節能減碳已成為國際矚目議題，2012 年世界能源統計報告(BP Statistical Review of the World Energy)指出目前石油仍然是全球最主要的能源，截至 2011 年底，全球石油儲量約為 1.653 萬億桶，若按照現在全球每天消耗 0.8 億桶石油的保守估計，上述儲量只可供全球消費 54 年，使得傳統燃油汽機車面臨了重大的挑戰與壓力；此外根據國際能源總署(International Energy Agency)指出，由運輸部門所造成的二氧化碳占整體的四分之一，僅次於工業部門，為了改善汽機車所帶來的污染問題並節省能源，各國政府紛紛致力於發展電動汽車、電動機車、電動自行車等新能源車輛產業。Brown (2010)提到在未來五到十年，電動車輛將會使運輸部門有巨大的轉變。本研究探討主題為電動機車，因此以下僅針對電動機車做相關文獻之探討。

#### 2.1.1 電動機車之簡介

電動機車(Electric Scooter)是以電力為能源，利用充電裝置儲存電能於蓄電池，然後透過控制系統以馬達及傳動系統驅動行駛的機車。目前市面上電動機車的電池可分為鉛酸電池、鋰電池、燃料電池等。電動機車多用 10 安培或 20 安培的鋰電池，品質

好的鋰電池耐久里程約一萬五千公里以上，可充放電 800 次以上，若在每 2 天充電 1 次之使用情形下，連續使用可超過 3 年以上，電池蓄電量仍可維持 85%；鉛酸電池與鋰電池的差別在於重量、價格和壽命循環等，以 20 安培電池為例，鉛酸電池 29 公斤約 6800 元，壽命約 3 年內，鋰電池僅 9 公斤約 2 萬元，易取出充電。而燃料電池是以一般燃料，如氫氣、或由石油、天然氣、甲醇等組成的重組氫，加上正極的氧，將燃燒所釋放的化學能轉成電能。

電動機車除了使用電池作為驅動力來源與傳統燃油機車不同外，其餘並無差異，因此保養及維護方式大致上與傳統燃油機車相同，唯有騎乘時應注意電動機車儀表板上電池輸出管理資訊、電池殘電量及電池溫度，而電池續航力依電池容量而定，目前平均可以達 40 公里以上，爬坡可以輕鬆從地下停車場上到平面馬路約 12 度的坡度，依照不同車款，充飽電約需 2~4 小時。

### 2.1.2 電動機車產業之發展趨勢

根據 Electric Bikes Worldwide Reports 指出，全球電動機車市場成長快速，每年銷售數據逐年成長，其中以中國大陸為最大市場，東南亞國家和印度則為新興市場。影響各國電動機車發展的因素有很多，包括地理環境、車輛使用習慣、政府政策等，本研究將驅動因素和限制因素整理成表 2-1。

表 2-1：影響電動機車發展因素表

驅動因素	限制因素
1.環保意識	1.電動機車成本
2.降低對石油的依賴	2.使用者的接受程度
3.政府補助政策	3.充電環境與續航力
4.陸地交通的需求	4.電池可靠度、安全性和壽命
5.與大眾運輸系統結合	5.產品的認證標準

根據工研院產業經濟與趨勢發展中心(Industrial Economics & Knowledge Center)資料指出，在開發中國家因國民所得較低，因此偏好低價具備基本功能的電動機車，多使用電動機車代步，其電動機車與傳統燃油機車為替代關係；在已開發國家，電動機車的用途多為短程購物、上下班及休閒娛樂等，平均每次使用時間約為 15 分鐘；經調

查電動機車與使用族群之背景，可得表 2-2 之分析結果。

表 2-2：電動機車與使用需求分析表

使用族群	電動機車需求
學生	低
家庭主婦	高
上班族	高
老人	低
家庭短程代步車	高

中國大陸在 1996 年國家科技委員會將電動車輛列入國家工業關鍵工程計畫，於 2007 年 11 月由國家發改委批准發佈了多項電動機車相關法規，規範內容包括電動摩托車和電動輕便摩托車之定義、技術要求、安全要求、測試方法、試驗規程等。目前已有一些大城市(譬如成都)全面禁騎乘引擎機車，只能騎乘電動機車，也有一些城市(譬如廈門、廣州)禁止騎乘機車。中國有許多城市能夠如此全面的改騎電動機車，除了法條規定外，亦要歸功於非常普遍之充電站。舉例來說，在便利商店門邊就有許多投幣充電站，以時間計費；此外，學校和其它公共場所亦常設置整排插頭，供電動機車使用者使用。

歐盟於 2009 年 4 月 30 日公布 EN15194 標準，其為電動助動車(Electrically Power Assisted Cycles, EPAC)的安全標準，規範內容包括電動助動的車輛範圍(電動兩輪和三輪車)，以及整車與零件的測試標準。該標準適用於歐盟成員國以及歐洲自由貿易聯盟國，執行強度則因國家而異，例如法國和英國將它列為強制型的法律，而其它國家將該標準屬於歐洲產品安全管理的一部分。

印度電動機車法規與驗證規範主要為 1988 年制訂的 Motor Vehicle Act 和 1989 年制訂的 Central Motor Vehicles Rules，於 2008 年下半年開始販賣電動機車，大致上分為兩類，一類為馬達功率 250 瓦以下，時速限制不可超過每小時 25 公里，上路不需領牌，是製造商主要生產的車款；另一類為馬達功率超過 250 瓦，性能接近燃油機車，而在印度部分地區購買電動機車可獲得政府補助或減免加值稅。

1998 年日本政府主導成立低公害車輛推動委員會，也鎖定電動車輛為未來發展重

點，在電動二輪車方面有相關法規其依道路交通法規定，電動二輪車必須有牌照，另外還有道路運送車輛法及實行細則，其內容將電動機車和電動自行車明確定義及區隔，並規定電動自行車行駛速度不可超過每小時 24 公里。目前日本也針對以下方向調整政策及法規，包括依據老齡社會發展趨勢對法規進行適當修正、配合全球法規(ISO 技術規範)一致性進行修正、配合新技術發展修正法規、推動電池規格標準化、提升安全性和使用便利性的相關法規。

### 2.1.3 台灣電動機車產業之現況發展

台灣電動機車產業的發展，大致上可分成四階段，第一階段為電動機車之技術開發與推廣示範，第二階段為建立電動車整車與關鍵零組件相關技術，第三階段為電動機車之推廣示範，第四階段為電動機車之獎勵補助，其詳細內容如表 2-3 所示。

表 2-3：台灣電動機車產業發展事件表

時間	事件
1992 年	經濟部能源委員會委託工研院進行為期 4 年的「電動機車發展研究」，並邀請國內廠商，組織成立電動機車關鍵零組件發展聯盟。
1995 年	行政院環保署委託清華大學、交通大學、中興大學等機構，執行「電動機車推廣使用計畫」。
1997 年	能源委員會委託工研院機械所，進行 2 年的「電動機車技術研究發展計畫」。
1998 年	提出「發展電動機車行動計畫」補助購買電動機車。隔年起分四年補助研發推廣工作，至 2003 年停止補助。
2000 年	元月起，行政院環保署規定電動機車銷售量必須達到總銷售量的 2%，以提升電動機車的使用，然而因為電池續航力、消費者使用習慣等問題，市場反應不佳，2003 年 1 月後取消此規定。
2002~2007 年	輕型電動車為行政院「挑戰 2008：國家發展重點計畫」項目之一，由工業局主導推行，並委託工研院進行「高效率電動車輛產業發展與推動計畫」，旨在推廣我國電動車輛發展，帶動相關整車與關鍵零組件技術，並形成電動車輛產業價值鏈之體系。

2009 年	經濟部參考國內外相關標準，訂定「電動機車性能及安全測試規範」(Taiwan E-scooter Standard,簡稱 TES 規範)，作為政府推動電動機車的基礎。
2009 年	經濟部編列 4 年 16 億元經費，補助民眾購買電動機車，以達到 4 年 16 萬輛電動機車的目標。
2010 年	經濟部頒布「經濟部發展澎湖地區電動機車補助實施要點」，以期達成推動目標數量，預期將澎湖打造成為世界級低碳島。
2010 年	經濟部發布「經濟部發展電動機車補助及獎勵實施要點」，施行至 2013 年。
2010 年	行政院環保署為鼓勵民眾使用電動機車，藉由補助經審核通過具有營運技術能力之法人或團體設置電動機車電池交換系統，讓電動機車使用者快速交換電池，達到與加油相同的方便性，以加速電動機車普及，擬定「電動機車電池交換系統補助辦法」

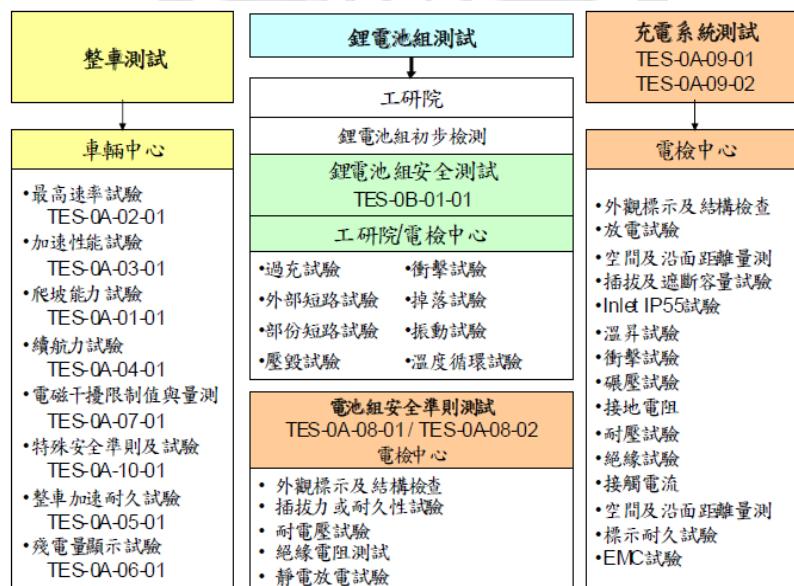


圖 2-1：電動機車 TES 認證之性能及安全測試項目圖

TES 規範(Taiwan Electric Scooter Standard)即為台灣電動機車認證，是全世界第一套針對鋰電池電動機車所訂定之規範，包含爬坡能力、最高速率、加速性、續航性能、整車加速耐久、整車性能、充電系統安全及鋰電池安全等 13 項測試，如圖 2-1 所示，

車廠除了所生產車款須通過 TES 規範技術測試外，尚被要求提供完整的售後服務及維修體系，才算通過經濟部 TES 測試認可。

依照 TES 規範和道路交通安全規則，目前市售電動機車大都登記為輕型機車，又可分成「普通輕型」和「小型輕型」兩類，交通部路政司對此兩類電動機車的定義如下：(1)普通輕型電動機車之馬達及控制器最大輸出馬力在 5 馬力以下、1.34 馬力以上(電動機功率 1000 瓦)或最大輸出馬力小於 1.34 馬力(電動機功率小於 1000 瓦)，且最大行駛速率逾每小時 45 公里；(2)小型輕型電動機車之馬達及控制器最大輸出馬力小於 1.34 馬力(電動機功率小於 1000 瓦)，且最大行駛速率在每小時四十五公里以下。此外，這兩類電動機車在爬坡、續航力、加速度及耐久測試項目上皆有差異，普通輕型之性能要求高於小型輕型，表 2-4 為兩類電動機車的比較表。

表 2-4：普通輕型與小型輕型電動機車之比較表

車型	普通輕型	小型輕型
最高車速	每小時達 45 公里以上	每小時達 45 公里以下
加速性能	0~100 公尺加速時間 12 秒以下	0~50 公尺加速時間 9 秒以下
爬坡能力	18%斜坡時速達 10 公里以上	12%斜坡時速達 10 公里以上
續航力	變速行駛達 50 公里以上	變速行駛達 30 公里以上
整車耐久測試	可達 5000 公里	可達 3000 公里
殘電顯示	電動機車顯示電量不足後，需能騎乘 2 公里以上	
駕照	需要	
安全帽	需要	
掛牌	綠底白字	白底紅字
載人	可	不可

\*註：整車耐久測試：模擬一般道路，主要測試砂塵、震動、衝擊和溫度。

國內電動機車產業越來越熱鬧，有 10 家車廠相繼投入開發，分別為益通動能、光陽、中華汽車、三陽、易維特、見發、東庚、台灣山葉、同喬及綠鑽，截至 2012 年 11 月通過 TES 認可合格的車款已達 23 款，如表 2-5 所示。

表 2-5：電動機車經 TES 測試合格之車款表

編號	車廠	產品型號	合格等級
1	益通動能	EV3A	小輕(抽取式)
2	光陽工業	EA10BB	小輕(抽取式)
3	中華汽車	EM198	小輕(抽取式)
4	中華汽車	EM198(勁裝版)	小輕(抽取式)
5	三陽工業	EA1LU	小輕(抽取式)
6	中華汽車	EM1A6	小輕(抽取式)
7	易維特科技	EVT-4000E-BLM1	輕型(固定式)
8	台灣山葉機車工業	ED06	小輕(固定式)
9	中華汽車	EM1A6	輕型(抽取式)
10	中華汽車	EM1A6(勁裝版)	輕型(抽取式)
11	益通動能	EV3C	小輕(抽取式)
12	東庚企業	DBX	輕型(抽取式)
13	益通動能	IBA3	輕型(固定式)
14	益通動能	IBA3(台規版)	輕型(固定式)
15	中華汽車	EM198(YA140)	小輕(抽取式)
16	中華汽車	EM1A6(20Ah YA11P)	輕型(固定式)
17	三陽工業	ED1LU2	輕型(固定式)
18	光陽工業	EA10FA	輕型(固定式)
19	易維特科技	EVT-168-BLM1	輕型(固定式)
20	見發先進科技	CC-888-6	小輕(抽取式)
21	光陽工業	EA10EA	輕型(固定式)
22	綠鑽	GD-031-T	小輕(抽取式)
23	同喬實業	TC502	小輕(抽取式)

\*註：以上依測試合格順序排列

為鼓勵民眾使用電動機車，政府提供購置誘因，凡購買通過 TES 規範之電動機車，經濟部依照車型等級於 2012 年提供 7200 或 10000 元補助，各地方縣市政府亦配合加碼補助，2012 年尚有補助名額的地區有桃園、宜蘭、新竹、雲林、嘉義及高雄等。在此補助計畫下，國內已推動達 7470 輛，較 2011 年同期之 6107 輛，成長幅度達 22.32%，累計超過 18000 輛，顯示出國人對電動機車接受度及使用量穩定成長中，其中，中華汽車累計銷售量 14089 輛，市占率達 80%，穩居第一名寶座，第二、三名則分別是累計銷售量 872 輛的光陽工業及累積銷量 692 輛的台灣山葉機車工業。因應這股市場成長動能，促使國內機車大廠投入更多心力，研發設計多款新型電動機車，提供消費者更多元化選擇。

Wang (2007)指出電動機車之續航力不佳，原本只適用休閒娛樂導向的短程距離，若想拉長騎乘距離則需要在中途充電，因此能源補充設施就成為關鍵因素。目前政府正積極建設電動機車能源補充設施，希望能藉由完善的充電服務網，提升民眾使用或購買電動機車的意願。能源補充設施類別包含：簡易充電設施、快速充電設施及電池交換系統設施，其規格與補助認定基準如表 2-6。

表 2-6：電動機車能源補充設施之類別表

能源補充設施類別	規格
簡易充電設施	為交流(AC)充電插座，得含充電器，惟充電器需固定於充電設施內
快速充電設施	1. 設置交流(AC)充電插座，充電設施得含充電器，惟充電器需固定於充電設施內。 2. 設置直流(DC)充電插座，充電設施得含充電器，惟充電器需固定於充電設施內，充電器可供應 1C(含)以上充電電流。 C 為電池容量(Ah)，1C 以上充電率的充電電流為 10A 以上。
電池交換系統設施	可使電動機車使用者快速交換電池之設施，包含乘載電池組之櫃體、充電設備、充電管理系統及交換管理系統等，但不包含供交換之電池組。



圖 2-2：新北市充電站實際圖

為了推動電池交換營運系統，使電動機車使用者可隨時到交換站快速換取充飽電的電池，如同騎傳統燃油機車到加油站加油一樣方便，環保署已發布「電動機車電池交換系統補助辦法」和「電動機車電池交換費用補助辦法」，並核定補助城市動力和見發科技兩家電池業者，分別在新北市板橋區和高雄市設置 30 個電池交換站，以見發科技的電池交換系統為例，每個交換站備有 72 顆電池。受限於電動機車使用的電池並未統一規格，且設置電池交換站成本較高，桃園縣環保局結合桃園縣大型在地企業-中華汽車，決定先採用單一廠牌電池規格特性，因地制宜設置「e-moving 免費電池交換站」，目前已累計 50 個站。

而在充電設施的部分，目前通過補助申請建置的共有 459 處 579 座 2096 個充電點，全台已建置完成有 740 處 1562 座充電設施，電動機車使用者可以利用智慧型手機上 Android Market 及 App Store 輸入關鍵字「充電站」下載「TES 電動機車充電站查詢系統 App」，隨時利用手機定位，查詢距離最近的 TES 電動機車充電站及維修站等資訊。

#### 2.1.4 電動機車相關研究

與電動機車相關的文獻中，大多探討電動機車本身硬體技術上的問題，與本研究較無相關，以下只針對與本研究相關的議題做文獻探討，多數是與能源補充設施相關的研究。

##### 2.1.4.1 充電站之設施規劃問題

Wang (2007)提出一個整數規劃模式求解最佳充電站位址及個數，該模式在已知候選點位置和其它合理的假設下，決定最佳的充電站設置位置和個數，利用充電時間來衡量電量情況。其模式同時也考慮了建置充電站的成本、電動機車車輛數目、在候選點可設置充電站的容量、在候選點停留時間等限制，並以澎湖為例來驗證模式，對在不同地方的充電時間和完成一趟旅程所需補充電量的最少時間進行敏感度分析，發現使用較快的充電方式和在候選點停留較長時間充電，可以減少設置充電站的結論。該研究亦試圖找出最短的充電時間和等待時間，結果顯示使用充電速度較快的方式可以減少充電站的設置。

Wang (2008)利用模擬的手法評估確定性充電站點的服務容量和績效分析，考慮隨機需求因子，改善了上篇的假設，包括考慮了在不同時間下各站點的電動機車車輛數目不同、有多組不同起訖點組合、在各站點停留時間非固定等限制，使得模型更貼近

實際情況。

林柔昕 (2011)則研究相同起訖點間的多人旅運，因不同出發時間之差異，及充電設施容量有限之限制，形成一具容量限制之時間動態電力供應設施規劃問題。該篇研究提出五種模式，可分成線性和迴圈路線兩大類，又以充電時間計價迴圈路線模式最為彈性，並以澎湖為例，選定數個固定停靠站，建構兩組用路者的時空網路圖。根據研究結果顯示，在用路者願意等待的情況下，並不需要在每個停靠站都設充電站，因為每個用路者在整趟旅程中只會充足夠完成旅程的最經濟充電量。另外，在敏感度分析中，發現若電動機車的耗費電力比例越大、充電時間轉成電量比例越低，則需設置較多的充電站。

#### 2.1.4.2 電池交換站之設施規劃問題

李其風 (1997)從廠商和政府的立場，以二階數學規劃模式建構電池交換系統之配置方式，希望廠商能獲得最大利潤且政府可決定補貼廠商的方式，使民眾能夠達到最大使用滿意度，由於模式為非線性，因此應用遺傳演算法來求解，並以台北市為實證地區，提出電池交換站配置和政府補貼方式，以供未來擬定相關策略之參考。徐嘉悅 (2011)探討電動機車能源場站之相關問題，建構出電動機車電池交換站設置規劃的模擬模式，將其導入澎湖觀光地區，探討政府不同政策補貼下的影響。

Wang (2008)在已知欲設電池交換站的候選點位置和電動機車一趟旅程的路徑，把電動機車電量換算成可騎乘的距離，利用整數規劃探討最佳的電池交換站位址及其數量，該模式考慮了多條旅遊路線、電池電量的容量限制、電動機車車輛數目、各候選點可設置電池交換站的容量、各電池交換站可服務的車數和建置電池交換站的成本。在目標式的部分，僅考慮設電池交換站的成本，並未考慮充電的成本，但也不會造成多充電的情況，因為沒有強迫每次交換電池後電量都是充滿的，表示若即使只需補充一部分的電量就須換電池，因此可當成是設置電池交換站而非充電站。同樣以澎湖為例來驗證模式，根據敏感度分析的結果，得知當每個電池交換站可服務的車數越多，則需設置的電池交換站個數就越少。

#### 2.1.4.3 充電策略

Fu (2008)從使用者的整體成本或利潤為考量，以彈性的參數評估模式選擇最佳的充電策略以解決電動機車電力問題，其參數乃由電動機車硬體零件和使用效能加以量化而得，再以敏感度分析包括產品壽命、充電價格和尺用者時間價值等因素，根據評

估結果最佳策略為使用電池交換站，價格、作業成本和維修成本等三個指標在此策略上有明顯的優勢。

## 2.2 載具共享系統相關文獻

由於電動機車共享系統方面的文獻很少，若以載具有租借性質的觀點來看，汽車租借系統與機車或自行車共享系統與其類似：兩者在營運期間均必須考慮租借站的站點設置、各期車輛數目之合理配置方式，及如何有效進行車輛配置運補。本節將回顧汽車租借系統與自行車共享系統的相關文獻。

### 2.2.1 汽車租借系統

Edelstein and Melnyk (1977)提到汽車租借站點選擇應考慮三個因素，分別是租借需求分佈、租借站可及性和租借站容納量。首先需了解潛在顧客的需求分佈，以設置適當位置的租借站，汽車的租借需求有平日與假日之分，租借期限通常為一天以上，譬如平日的需求分布在機場附近，假日的需求分佈在觀光遊憩場所附近，租借站若離租借需求越近，則顧客越易租借，因此租借站可及性為重要考慮因素之一。此外，由於汽車租借需求為巢狀需求，容易發生車輛短缺或車輛過剩的問題，而且汽車體積較大，需要一定空間大小才能擺放車輛，因此，應考慮租借站所能擺放的最大車輛數以及各車種的個數，若無法提供顧客預約的車種，將提供價格較高的車種給予顧客。

在汽車租借系統的車輛配置運補方面，Pachon et al. (2003)將短期戰略性的車輛配置和運補問題(Tactical Fleet Planning Problem)分成兩個子問題求解：首先處理車輛配置問題，以一週為週期，在給定車輛總數下，以數學模式求解每個汽車租借站的車輛配置問題，使租車利潤最大；接著將鄰近租借站分組以數學規劃求解組內每天晚上各租借站所要運補的數量，以達到運輸成本最小化。Pachon, Iakovou, and Chi (2006)進一步考慮策略性的車輛分派問題，以一策略性車隊規劃數學模式求解不同種類組合的車輛至各個租借站的分派方式，因應之後每週的車輛配置，並最小化各種汽車類型的持有成本、購買成本、汽車替換成本和損壞成本。Fink and Reiners (2006)將車種分成新車和舊車兩類，為了降低這些因不同車種造成的額外缺貨成本，營運者需利用運補工具重新配置各站內的每一車種的車輛數，因此該研究規劃出以時空網路為基礎的模式以解決短期車輛配置問題，然而其求解時間仍過長，因此 Ernst, Gavrilouk and Marquez

(2010)將車輛配置問題設計為路徑指派問題，並利用啟發式方法求解。Li and Tao (2010)考慮兩個相鄰城市的汽車租借點分布，租借者可自行選擇原地或異地租還，在給定需求資料和車輛總數的情況下，提出兩階段的動態規劃模式處理車輛配置和兩城市間之運輸決策。

## 2.2.2 自行車共享系統

Lin and Yang (2011)認為要設計一完善的公共自行車共享系統需要考慮租借者的旅行成本、租借站的建置成本、自行車道設置成本和系統服務水準。而自行車共享系統成功與否的關鍵因素在於其租借站之位址和自行車數。以下將針對自行車共享系統相關文獻作探討。

### 2.2.2.1 設施區位設置

Daskin and Owen (1999)提到運輸是一種將人或物品從一地點承載至目的地或附近的過程。公共運輸系統的目標是提供方便且有效率的服務給社會大眾，可用來判斷一地區的都市化程度。根據發展大眾運輸條例之規定，大眾運輸是指具有固定路線、固定班次、固定場站和固定費率，提供旅客運送服務之公共運輸。長期的大眾運輸規劃主要著重在可預測的未來都市土地使用及旅次需求型態的變化下，運輸系統應如何提供適當的服務，以滿足未來乘客的需要。因此，規劃運輸站的位置佔有很重要的分量。Laporte, Mesa, and Ortega (2000)提出大眾運輸站點設置所需考量的因素共有五項，分別為旅行時間、設施可及性、轉乘運輸的配合、最小化總運輸成本和環境影響評估。公共運輸系統應該以提供所有旅客能用最短旅行時間完成旅次為目標；設施的可及性會影響旅客使用意願，另一方面可以降低旅客或貨物的運輸費用，使得區域內的生產成本降低，提高區域內的產業競爭力，並促進該區域發展。Demetsky and Lin (1982)和Murray (2001)也指出乘客步行到車站約400公尺至500公尺，大約十分鐘之內可到達的距離是最佳的可及性考量限制。除了提供對步行可達範圍內之乘客方便搭乘的服務外，對於欲轉乘之乘客，應給予同樣方便的轉乘服務。因此，車站應該設於方便旅客進出之處，如在主要道路之路口或人群較易聚集之處。公共運輸系統同時應該要以經濟有效的方式來服務民眾，也就是要最小化總運輸成本，而引進新運輸系統的成本包含資本成本及營運成本等。興建大眾運輸設施應該要先進行環境影響評估，以達到國家規定的環保標準或永續發展的規劃。

由於自行車共享系統沒有固定路線和固定班次，其性質介於大眾運輸和私人租借

系統之間。根據上述大眾運輸系統設置的考慮因素中，與自行車共享系統最為相關的為旅行時間、可及性和轉乘運輸的配合。依照目前成功營運的公共自行車租借系統來看，租借站應該設在離大眾運輸系統或重要交通要點附近 300~500 公尺之內，方便使用者將自行車作為連接大眾運輸系統的最初及最後一哩路程之銜接工具，甚至可成為中短程之代步工具。

Daskin and Owen (1999) 將設施區位模式與理論依特性之不同分成：靜態與確定性之區位問題、動態的區位問題、隨機的區位問題等三類。靜態與確定性之區位問題假設所有狀態是確定的，即問題假設輸入之參數為已知，例如：需求、距離等都是已知確定之數值，而所要進行之決策為一次性不會變動的決策。常見的靜態確定性的區位模式有 P 中位問題(P-median Problem)、區位範圍覆蓋問題(Location Set Covering Problem)、最大服務範圍覆蓋性問題(Maximal Covering Location Problem)和固定費用設施區位問題(Fixed Charge Location Problem)等。

自行車共享系統強調租借站的可及性，根據 Church and Revelle (1976) 和 Rado (1988) 的研究，在不同需求量的情況下，當設施離需求點的加權總距離越短，其可及性越高。Hakimi (1964) 提出以設施可及性作為效率評估的模式求解 P 中位問題，將使用者視為均質狀態，並考慮各需求點的不同需求量，以最小化設施與需求點間的總加權距離和為目標，決定預先設定的 P 個設施最佳分布區位。由於適用於靜態設施的區位設置，可同時決定設施最佳個數、區位和服務範圍，因此被廣泛應用於不考慮時效性的非緊急性區位設施之設立，如大眾運輸系統、公家機關等。另外也有研究將區位範圍覆蓋問題應用在大眾運輸站設址上，認為設施的使用價格、搭乘舒適度、方便性、效率以及可及性是決定大眾運輸工具好壞的重要因素，在考量顧客可行走的有效範圍下，希望以最少的運輸站點使每個區域都能被服務到。

Lin and Yang (2011) 利用最大服務範圍覆蓋性問題和轉運點位址問題(Hub Location Problem)的概念，提出考慮服務水準的公共自行車共享系統之網路設計，在兼顧使用者和投資者利益下，建構一個非線性整數規劃模型，再給定候選租借站個數和位址及確定的隨機租借需求，該需求服從常態分配，求解應該從候選租借站中選出哪幾個租借站要蓋、設置哪些自行車道，以及決定租借需求的一整趟路徑。Lin, Yang and Chang (2013) 再進一步提出考慮存貨水準的公共自行車共享系統之網路設計，假設已知的確定性隨機租借需求服從卜瓦松分配，並利用啟發式和 Dijkstra 演算法求解。這兩篇共同

之處在於用來衡量共享系統的服務水準指標，該指標考慮自行車的可用率和租借站的覆蓋率，也就是各租借站的自行車存貨可以滿足一定比例的租借需求，及租借站個數和位址應該設在離所有租借需求的起終站一定距離即可到達。

Shu et al. (2013)假設顧客在各時段的訖點間需求皆已知，並制定自行車共享系統內的自行車利用率(也就是在特定時間內每輛自行車的平均租借次數)，該研究首度以起訖點需求比例來分配自行車流量的基礎，提出一線性規劃模型在可極大化車輛使用率下，探討租借站選址問題並預估合理的各站期初車輛擺置數量。該研究並未限制停車柱上限，可能造成建置成本過高，也未考慮整體系統的服務水準下限。

張立蓁 (2010)綜合過去規劃運輸設施區位文獻，建立出較能符合自行車共享環境之系統，以歷史租借資訊作為已知之租借需求，發展整數規劃模式，並用兩類 PSO 演算法求解最小化設置成本與導致顧客不方便性之服務成本的最佳租借站位址以及容量。之後，洪菁蓬 (2011)除了考慮租借站的建置成本和容納量外，更進一步考慮顧客步行和騎乘時間為隨機變數，租借需求為不確定型態，文獻中證明若騎乘時間服從均勻分配，則可建構出一套可處理隨機性節線長度之混整數規劃模式，並以兩類 PSO 演算法以加速求得最佳機性租借站位址設置問題。

廖敏婷 (2012)假設在已知所有租借需求資訊、候選租借站個數、租借站建置成本和自行車相關成本及服務品質要求等諸多條件下，提出考慮不同起訖租借需求之相對比例關係的非線性混整數學模式，探討最小化成本的自行車租借站選址問題，並利用兩種 PSO 演算法求解此問題。

### 2.2.2.2 車輛配置運補

自行車共享系統的使用者以短程接駁的通勤族為主，且其租借的時間通常不超過半個小時，多為甲地租乙地還，此與私人汽車租借多為原地租還，而且已預先知道顧客會在何時還車大不相同。自行車共享系統站內的車輛變動程度較高，除了要考量租借站內是否有足夠自行車可供租借，還需考慮是否有足夠的空車位供使用者還車，以免顧客等候招致不滿。

在機車或自行車共享系統中，若將機車或自行車視為貨物，運補車為運貨車，則租借站的角色將等同於傳統物流模式的倉儲中心，如此一來在一天營運期間中何時應自哪些租借站運補多少機車或自行車的問題，則與傳統的「存貨途程問題」(Inventory Routing Problem)及「收送貨問題」(Pickup and Delivery Problem)類似。存貨途程問題

和收送貨問題被 Dantzig and Ramser (1959) 定義為車輛途程問題 Vehicle Routing Problem, VRP) 的兩特例。

存貨途程問題主要是以最小成本來規劃運補車的路徑，使得各據點都能達到一定程度的存貨水準。Federgruen and Zipkin (1984) 以 VRP 為基礎發展單期的存貨途程問題，針對系統中配送時程、配送數量以及配送車之路線做規劃後，可以在最小總運輸、存貨和缺貨成本下，有效地將產品配送給客戶。Campbell et al. (1998) 提出兩階段求解存貨途程問題的解法，第一階段先求解要對哪些顧客進行補貨及其補貨數量，並依車輛行駛時間與容量限制等將顧客分群；第二階段再決定顧客群間配送的最佳順序。

張立蓁 (2010)、洪菁蓬 (2011)、王俊偉 (2011) 和廖敏婷 (2012) 皆在其文獻回顧中提到存貨途程問題近年來曾被應用於求解自動販賣機補貨和空櫃調度等路線規劃問題。其中，自動販賣機補貨作業是業者透過補貨車將商品從倉庫運補至各販賣機以供販售，若將自動販賣機與倉庫視為自行車租借站點，而販賣機兜售的商品視為自行車，則整個自動販賣機補貨過程亦可類比為自行車運補過程。兩者較大的差異在於自動販賣機只能藉由補貨車補貨，而自行車租借系統在租借的過程中有可能因為還車人數大於租車人數使得存貨上升，這使得補貨作業變得更加複雜。若將自行車視為空櫃調度問題中之空櫃，自行車租借車站比擬為港口，則港口缺櫃可對應到自行車運補問題的租借站無車可租情形，需調度其它站之自行車至該站補車；反之，港口多櫃則可被視為租借站點無位可還的狀況，需自該站調度自行車至其它租借站，因此，空櫃調度問題與自行車車輛運補問題有些類似性。

收送貨問題則是探討配送載具該如何同時收取顧客的貨物並決定送往其它顧客的路線，依收送貨原則可分為三類，分別為(1)Deif and Bodin (1984) 先送後收原則：若各需求點只有收貨或送貨一種需求，貨車於起點出發後，須先完成所有需求點送貨之需求後，接著才能對站點收貨之需求進行收貨；(2)Hokey (1989) 同時收送原則：若需求點同時具有收貨與送貨之需求時，若貨車行經該站點時，則必須完成收、送貨兩種需求後，貨車才能離開該站點；(3)Golden et al. (1985) 混合收送原則：若各需求點只有收貨或送貨一種需求，貨車於起點出發後，在其行走之路線中會有收、送貨次序混合參雜之情形。傳統的收送貨問題相關文獻大都只考慮確定性模式，也就是需提前知道不同客戶的需求量，因此當要配送的客戶數和需求隨著時間異動時，無法有效進行配送，導致倉儲中心必須加強庫存管理以減少監控客戶存貨狀況與補貨時產生的成本。Xu et

al. (2003)在收送貨問題中加入兼容性限制、最大行車限制等限制以符合真實情況，再利用啟發式求解最佳的途徑規劃。Chemla et al. (2010)和 Benchimol et al. (2011)以混合收送貨問題來看待自行車運補活動，若租借站需要補充自行車，則該租借站可視為收貨之需求點；反之，若租借站需要增加停車位(亦即移走自行車)，則該租借站則視為送貨之需求點，他們皆利用近似貪婪演算法決定運補車在各租借站應提取或下放的適量自行車數。

在自行車租借運補文獻中，可分為兩種類型，靜態自行車運補(Static Bike Repositioning)以及動態自行車運補(Dynamic Bike Repositioning)問題。其中，靜態運補是指當系統進入一個需求近乎零的時段，例如半夜、凌晨等，營運者依據歷史資料的分析，得知開始營業時各租借站內應該擺放的自行車個數後，藉由這個時段運補車輛以調整目前租借站內的存貨狀況，亦可稱之為「隔夜運補」。此種運補方式較單純，只需規畫一次性運補。Raviv et al. (2009)以三種(arc、time、sequence)不同的方式建構三個運補模式，並提出兩階段求解法；Chemla et al. (2010)探討多車運補的情況，利用列生成法求解該問題；Benchimol et al. (2011)在已知運補車容量、各租借站狀態下，利用TSP 求得最短路徑並滿足各站需求。

其實，單靠日間進行靜態運補之效果有限，因其僅靠一次運補來平衡白天各站自行車量，還是可能發生無車可租或無位可還的情形。為了能發揮運補真正效果，應在日間實施動態運補。張立蓁 (2010)參考空櫃調度的概念發展出兩階段自行車運補模式；該研究在其第一階段中建構一含權重衡量的單車種最小成本之多元商品網路流量模式(Ahuja, Orlin, and Magnanti, 1993)，以最小化使用者的不方便性及運補之加權成本總和；其第一階段的求解結果可算出各租借站間在各時段最佳的車輛運補個數及方式，再以此為基準提出一個最小成本流量問題以反推算出最佳的運補車個數及其路線。洪菁蓬 (2011)進一步將起訖點需求改成遵循已知的流量比例方式，並以粒子群演算法求解之。

王俊偉 (2011)以系統模擬的手法，模擬多種營運策略，每一策略擁有不同程度的租借資訊，探討其對系統服務水準的影響，根據其模擬結果可知善用即時與歷史租借資訊可以使自行車的運補更有效率，改善系統的營運效益。

廖敏婷 (2012)先以混整數規劃模式求解自行車共享系統的租借站建置決策和初始自行車配置方式，並探討如何在營運階段中以暫時人力配置和夜間靜態運補自行車有

效地提升整體系統的服務水準，其中暫時人力配置又可分成兩模式：一為站點人力配置模式，針對空停車柱需求較多的站配置暫時人力，以增加顧客還車的方便性；另一則為人力自助運補模式，利用折扣或促銷、贈品等鼓勵方式來招募適量的自願者依系統指示來騎乘自行車，以達到運補的效果。此外，在夜間無人租借時段，以靜態自行車運補的方式指派運補車至各站，將各站期初自行車運補成其期望之配置數量，幫助系統在租借期間降低無車可租與無位可還的次數。

## 2.3 粒子群最佳化演算法

隨著電動機車共享系統的規模擴大，包括租借站個數、租借站相連程度、營運時間長度、電動機車電池狀態個數等參數增加，本研究提出之數學模式將變得複雜以致求解時間隨之增加，因此本研究擬發展啟發式粒子群最佳化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)來加速求解。

PSO 演算法乃由 Kennedy and Eberhart (1995)根據生物學家對鳥群補食的行為研究設計而得，是一種以群體為基礎的搜尋技術，其優點在於快速收斂、較少的參數設定、適用於動態環境的能力等。PSO 演算法為一種模仿群體認知能力與社會行為的演化式演算法，舉例來說，鳥群在有食物的空間中飛行覓食，一開始不知道最佳的覓食位置在哪，每隻鳥只憑著自己的經驗或是直覺(個體認知)飛往牠所覺得較佳的地點搜尋食物。而當其它鳥發現了更佳的覓食地點(群體認知)後，鳥群之間會利用類似廣播的方式溝通行為，漸漸地將其它鳥群引領至較佳的地點，此即為 PSO 演算法以群體智慧來找尋問題最佳解之概念。

PSO 演算法常被應用於求解最佳化問題，亦有文獻利用 PSO 演算法來求解自行車共享系統網路設計相關問題，並獲得不錯的結果。舉例來說，張立蓁 (2010)利用 PSO 演算法求解租借站選址問題，洪菁蓬 (2011)同樣利用 PSO 演算法，求解隨機路徑長度的租借站選址問題和車輛配置運補問題，廖敏婷 (2012)除利用 PSO 演算法求解靜態運補問題外，亦發展  $PSO_D$  與  $PSO_{MIP}$  兩種 PSO 演算法求解在考慮租借需求比例下的租借站選址問題。 $PSO_D$  以兩層 PSO 來求解租借站選址設計問題，先由外層的 PSO 決定站點的設置，當站點設置決定完畢後，便進入內層 PSO 尋找合適的期初自行車數量；而在  $PSO_{MIP}$  中，將非線性租借站選址問題中的站點容量設為無限大，使模式簡化成線性

混整數規劃，並以 CPLEX 求解站點位址。而後將其中一個外層粒子的初始解設為由此簡化模式得到的站點設置結果。由於 PSO<sub>MIP</sub> 與本研究欲求解之電動機車共享系統車輛佈署問題較為類似，因此本研究將參考其編碼方式及演算法來提升求解效率。

在 PSO 演算法中，每一個粒子都是求解問題的一組候選解，粒子群會參考個體的最佳經驗及群體的最佳經驗，來計算新的移動方向，經過不斷地修正與更新之後，粒子群會漸漸接近最佳解。圖 2-3 為 PSO 演算法的流程。

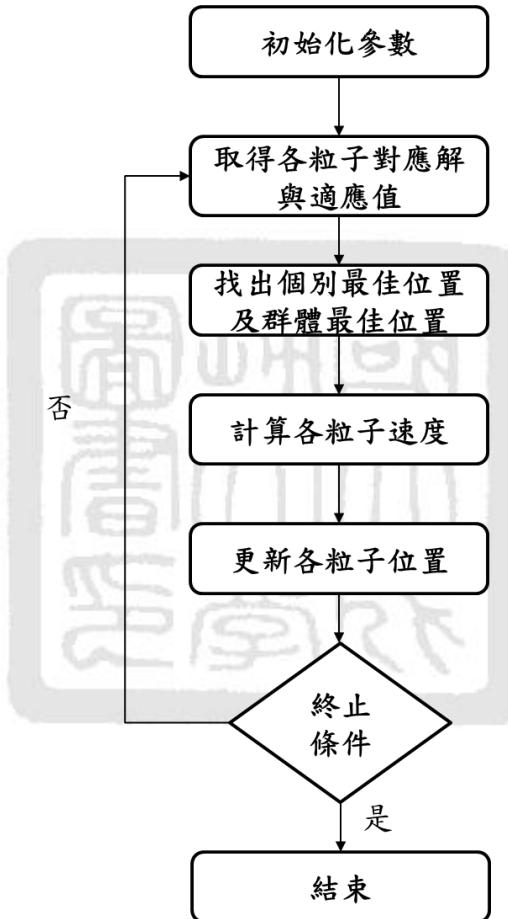


圖 2-3：PSO 演算法流程圖

**步驟 1：** 初始化粒子群的位置和速度，其位置大多使用亂數設定而速度設為零，然後設定每個粒子的個別最佳位置為其初始位置。

**步驟 2：** 轉換粒子群中每一個粒子成為其對應的解並且評估其適應值。

**步驟 3：** 藉由步驟 2 獲得適應值後，更新各粒子的個別最佳位置和群體最佳位置。

**步驟 4：** 透過步驟 3 計算出新的個別最佳位置和群體最佳位置後，更新粒子群中每一

個粒子的速度。

**步驟 5：**由步驟 4 的粒子速度更新各粒子位置。

**步驟 6：**若符合終止條件(譬如到達設定的迭代次數後)，則輸出目前求得之最佳解並停止演算法；否則繼續下一次迭代並回到步驟 2。

## 2.4 小結

綜合上述，本研究大多參考公共自行車共享系統的文獻，並加入電動機車的電力考量，以 Shu et al. (2013)和廖敏婷 (2012)所提出的模式為基礎，同時參考 Lin and Yang (2011)提出的服務水準概念，預估合理的各站期初車輛擺置數量，本研究的服務水準即以未被滿足之需求總數只能佔總租借需求的一部分作為衡量指標，而目標式為在滿足一定服務水準下，極小化電動機車購買成本。此外，本研究擬參考廖敏婷 (2012)提出的 PSO<sub>MIP</sub> 編碼方式以提升求解效率。



## 第三章

# 電動機車共享系統車輛佈署問題

本章共分成 4 節，首先第 1 節會詳細描述電動機車共享系統車輛佈署問題和假設，接著第 2 節將定義出所有參數及變數，並依電動機車補充電量方式不同，建構兩混整數規劃模式來解本問題，第 3 節將舉範例說明模式，第 4 節則是利用 PSO 演算法求解此問題。

### 3.1 問題描述與假設

#### 3.1.1 問題描述

在本研究中，假設租借站數集合為  $N$ ，一天的營業時間共  $T$  期，每期為半小時，同時假設已知租借者的租還車站，因此可得參數  $r_{ij}^t$ ，代表在第  $t$  期時，從租借站  $i$  到租借站  $j$  的總需求量，給定租借站數量  $|N|$  以及添購一電動機車的固定成本  $C$ ，而各租借站  $i$  的初始電動機車數量  $B_i$  即為本研究欲求出之決策變數。

本研究將電力消耗或補充簡化成 Step 型變動，依電動機車電池之電力情況分為  $|S|$  種狀態，以  $|S|=6$  為例，如下表 3-1 電池狀態與剩餘電力對照表所示：狀態 1 為充滿電的情況，即剩餘 100% 的電力可供使用；狀態 2 為剩餘 80% 到 100% 之間的電力可供使用；其它狀態依此類推，因此各租借站電動機車數量為  $|S|$  種狀態之車輛數總和。

表 3-1：電池狀態與剩餘電力對照表(以 6 個狀態為例)

電池狀態( $s$ )	剩餘電力
1	100%
2	80%~100%
3	60%~80%
4	40%~60%

5	20%~40%
6	0%~20%

若採用充電柱來補充電動機車的電量，電量低於一定門檻的電動機車應無法被出租，因其電力不足以撐到還車站，必須充電至少一期，直到電力超過該門檻才可出租。假設每期電池消耗及補充電量分別為  $n_1$  和  $n_2$  個狀態個數，亦即當本期為狀態 1 時租出，則下一期還車時必為狀態  $1+n_1$ ；同理，當本期為狀態 2 時租出，則下一期還車時為狀態  $2+n_1$ ；如此可推論出車輛可被出租的蓄電量門檻為  $n_1$  個狀態，亦即車輛最多只能從狀態  $|S|-n_1$  時被租出，而其在下一期還車時之蓄電量為  $|S|$ ；反之，未被租出的電動機車皆在充電，當本期為狀態  $s=|S|$  時未被租出，則下一期充完電會變成狀態  $s=|S|-n_2$ ，依此類推當下一期充完電狀態  $s=|S|-n_2 \leq 1$  時，都會列為狀態 1。下圖 3-1 為 6 種電池狀態下，耗電充電比為 2:1 情況下(即  $n_1=2$ ， $n_2=1$ )，兩租借站內的電動機車在連續兩期間之流量，其中虛線  $\cdots \rightarrow$  代表順利租出的電動機車流量，實線  $\rightarrow$  代表未被租出的電動機車流量。若在第  $t$  期時，租借者欲租車之租借站車輛不足或只剩下電力不足(狀態  $|S|-n_1$  之後)的車輛，則會發生無車可租的流量  $\bar{y}_{ij}^t$ ，此情形將被歸類為未滿足之需求。

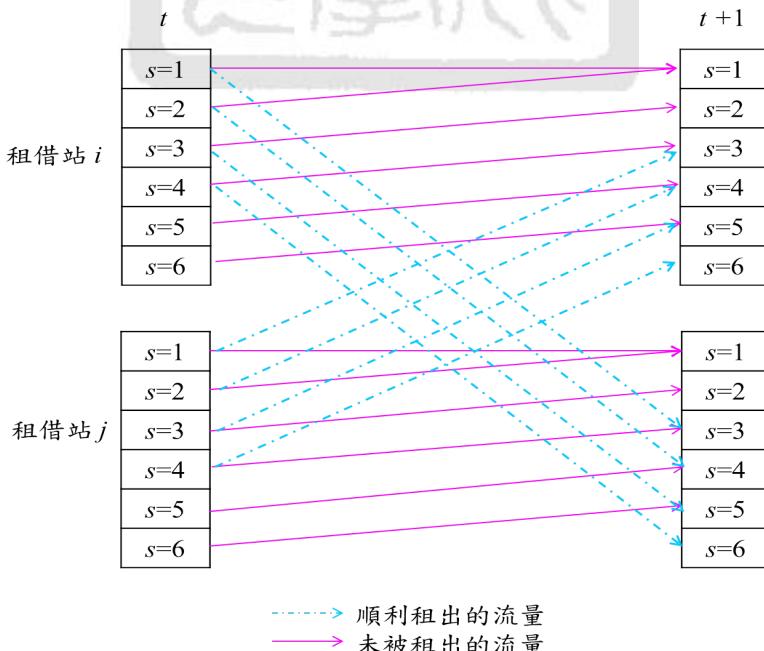


圖 3-1：以充電柱補充電量的電動機車流量圖

若採用電池交換設施來補充電動機車的電量，則未被租出的電動機車並沒有在充電，因此只有當電量低到門檻以下才會進行電池交換補充電量。電動機車可被出租的電量門檻會受電池耗電速率和電池狀態個數的影響。假設每期電池耗電速率為  $n_1$  個狀態，若本期之電力為狀態  $s$  (介於狀態 1 到  $|S|-n_1$ ) 時租出，則其下一期還車時必為狀態  $s+n_1$  (介於狀態  $1+n_1$  到  $|S|$ )；反之，當本期之電力不足時(介於狀態  $|S|-n_1+1$  到  $|S|$ )，會透過交換電池來補充電量，交換完電池將如同充滿電(狀態 1)，可馬上被租出；反之，當本期之電力為狀態  $s$  但未被租出，則其下一期之電力仍然會保持在狀態  $s$  (假設電力不會自然耗損)。下圖 3-2 為 6 種電池狀態下，耗電速率為  $n_1=2$  個狀態，兩租借站內的電動機車在連續兩期間之流量，其中虛線  $\cdots \rightarrow$  代表順利租出的電動機車流量，實線  $\rightarrow$  代表未被租出的電動機車流量。若在第  $t$  期時，租借者欲租車之租借站車輛不足，則會發生無車可租的流量，此即為未滿足之需求量。

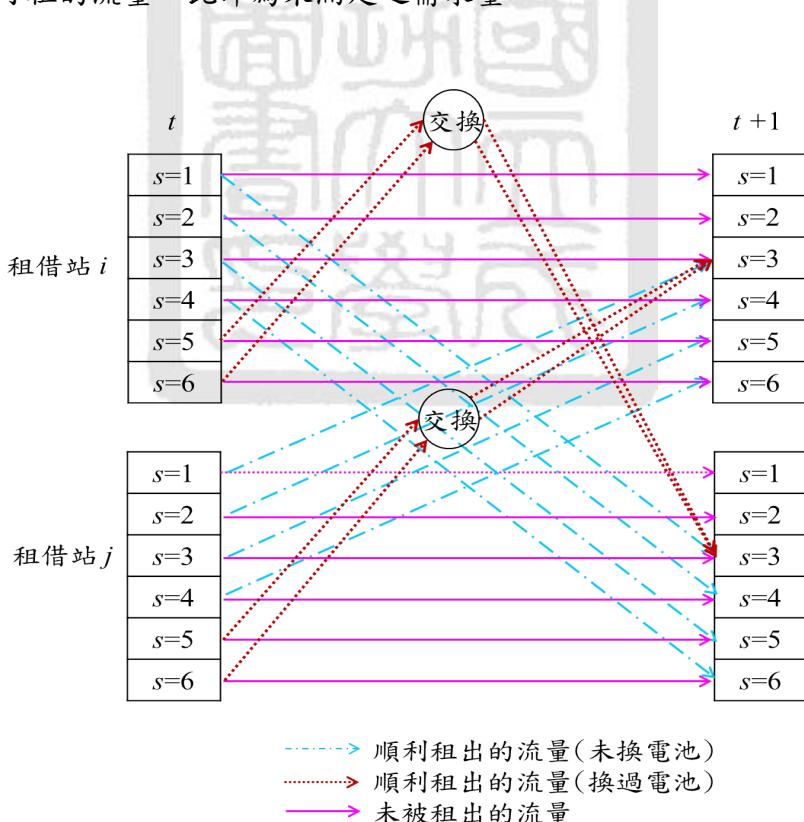


圖 3-2：以交換電池補充電量的電動機車流量圖

本研究以 Shu et al. (2013) 之模式為基礎，假設各時段之顧客起訖需求量為已知，

則車流量應以其與需求量成正比之方式來等比例分配。舉例來說，若在某租借站發生租車需求多於該站現有之電動機車，導致部分租車需求無法被滿足，則模式應依原先已知之起訖需求的相對比例來公平地分配電動機車給不同之起訖需求，亦即較大的起訖需求會被分配較多的電動機車量。

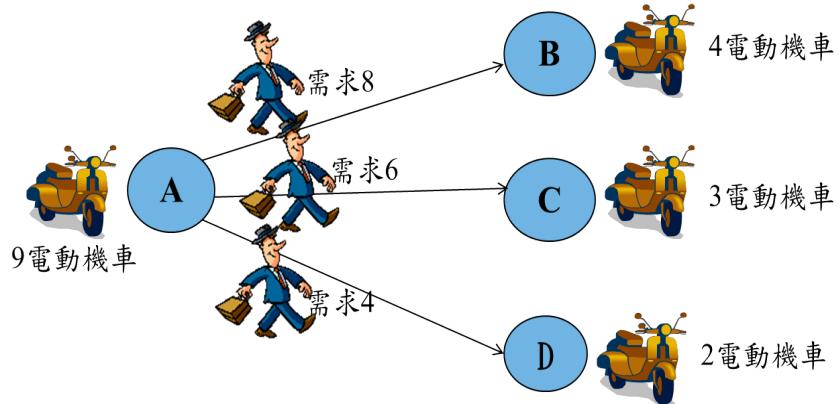


圖 3-3：等比例分配電動機車之概念圖

如上圖 3-3 所示，假設租借站 A 在某時段有三組起訖需求分別為 8、6、4 個人欲自 A 站出發至 B、C、D 站三個不同訖站，因為 A 站目前僅有 9 輛機車可租借(假設電力充足)，因此必須依原起訖需求比例(即 8:6:4)來分配電動機車，因此最後將僅有 4、3、2 人可成功租借，而剩下的 9 人必須再等待其它站有人騎車來還才能再依比例分配車輛。為能正確地將電動機車公平地依流量比例分流，在此我們將放鬆電動機車數量為整數的限制，提出一個以最小化所有電動機車購買成本的混整數規劃模式，求解各租借站期初應擺放之電動機車量。

### 3.1.2 問題假設

針對本問題的情境，我們列出下列假設與限制：

1. 已知所有租借站位址及個數，而且各租借站無容量限制
2. 租借者之起訖點皆為租借站，因此可忽略步行部分
3. 租借系統以每半小時為一期
4. 期初各租借站的電動機車皆為狀態 1(充滿電)。
5. 電池狀態為  $|S|$  種，耗電速率與充電速率分別為  $n_1$  與  $n_2$  個狀態個數。
6. 電動機車單位購買成本和服務水準要求已知。

7. 各租借站都有充電柱或電池交換設施。
8. 所有租借者的起訖需求皆為已知。
9. 不會有原地租還的情形發生，租借者必須在不同的租借站租、還車。
10. 在晚上結束營業後，營運人員將執行電動機車或電池靜態運補，直至其數量與開始營業時相同。

本研究主要的研究對象為通勤族，據統計資料顯示，通勤族多為異地租還(即甲地租乙地還的租借方式)，僅少數會原地租還。其實本研究所提出之模式與解法亦可處理原地租還的需求，然而因為考慮到此類需求相對來說影響不大，為簡化問題，在此我們先假設不會有原地租還的情形發生。

## 3.2 混整數規劃模式

### 3.2.1 參數與變數定義

以下將列出本模式所使用的參數及變數：

#### 參數

$C$	電動機車單位購買成本
$\phi$	服務水準要求
$r_{ij}^t$	在第 $t$ 期時，從租借站 $i$ 到租借站 $j$ 的需求， $t = 0, 1, \dots, T - 1$
$N$	所有租借站點之集合
$N_i$	與租借站 $i$ 相鄰 1~3 公里的租借站所形成之集合(不包含 $i$ 本身)， $i \in N$
$T$	總規劃時程期數
$S$	電池狀態之集合
$n_1$	電動機車耗電速率，經過一期電池狀態減少個數
$n_2$	充電柱充電速率，經過一期電池狀態增加個數
$M$	極大的數
$\varepsilon$	極小的數

#### 變數

$B_i$	租借站 $i$ 期初需購買的電動機車數
-------	---------------------

$y_i^t$	在第 $t$ 期期初，租借站 $i$ 可租出的電動機車數量
$y_{is}^t$	在第 $t$ 期期初，租借站 $i$ 狀態 $s$ 的電動機車數量， $s=1,2,\dots, S $
$w_i^t$	在第 $t$ 期期初，租借站 $i$ 交換電池的次數
$y_{isi}^t$	在第 $t$ 期期末，租借站 $i$ 未被出租的狀態 $s$ 電動機車流量， $s=1,2,\dots, S $
$y_{isj}^t$	在第 $t$ 期期初，在狀態 $s$ 從租借站 $i$ 流向租借站 $j$ 的電動機車數， $s=1,2,\dots, S $
$\bar{y}_{ij}^t$	在第 $t$ 期期初，租借站 $i$ 、 $j$ 之間，因租借站 $i$ 內無車可租的流量
$v_i^t$	$\begin{cases} 1, & \text{在第 } t \text{ 期期初，租借站 } i \text{ 可租出的電動機車足夠應付需求} \\ 0, & \text{在第 } t \text{ 期期初，租借站 } i \text{ 可租出的電動機車不足以應付需求} \end{cases}$

下圖 3-4 說明租借站  $i$  和租借站  $j$  於第  $t$  期至第  $t+1$  期之間可能產生的三類電動機車流量，本研究之數學模式將以此三類流量為基礎，定義出節點間依需求比例的流量恆關係，其中虛線  $\cdots \rightarrow$  代表順利租出的電動機車流量，實線  $\rightarrow$  代表未被租出的電動車存貨流量，虛線  $\cdots \rightarrow$  代表未滿足的租借需求(即無車可租的流量)。

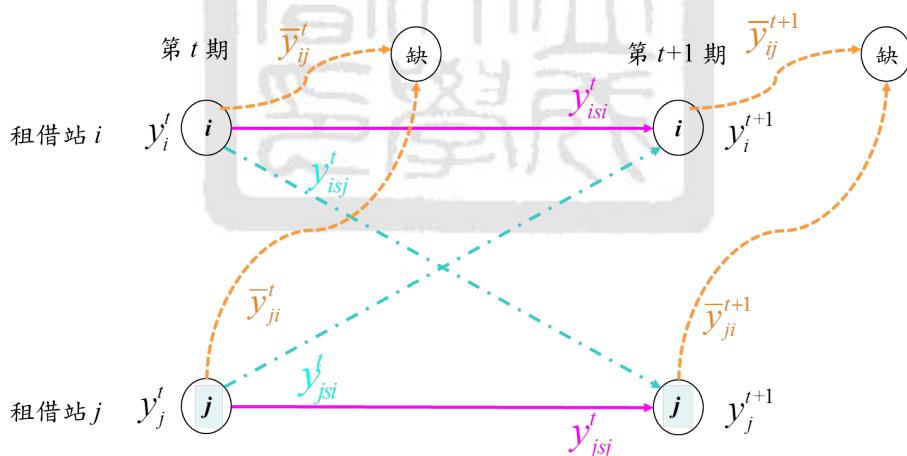


圖 3-4：兩租借站於連續兩期間之流量

### 3.2.2 數學模式

本研究提出的數學模式，可依電動機車電池補充電量的分式分成兩種：一為利用充電柱整車充電的方式；另一則為利用電池交換設施交換電量不足的電池。兩種模式詳細說明如 3.2.2.1 節和 3.2.2.2 節所描述。

### 3.2.2.1 充電柱模式

已知添購一輛電動機車耗費固定成本  $C$ ，而租借站  $i$  之期初總車數為  $B_i$ ，則最小化總電動機車購買成本之目標式如式子(3.1)所示。

$$\min \sum_{i \in N} (C \times B_i) \quad (3.1)$$

式子(3.2)表示在第  $t$  期期初，租借站  $i$  電力足夠可租出的總電動機車數量是由電池狀態 1 到電池狀態  $|S| - n_1$  的機車所組成，式子(3.3)為符合期初各租借站的電動機車皆為充滿電(狀態 1)的假設。

$$y_i^t = \sum_{s=1}^{|S|-n_1} y_{is}^t \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T \quad (3.2)$$

$$y_{is}^t = B_i \quad \forall i \in N, t = 0, s = 1 \quad (3.3)$$

式子(3.4)、(3.5)、(3.6)、(3.7)和(3.8)代表電動機車流量守恆限制式，其中式子(3.4)和(3.5)為流進租借站的流量。式子(3.4)即第  $t$  期期初租借站  $i$  狀態 1 的電動機車量只來自前一期未被租出之狀態為 1 到  $1+n_2$  的電動機車。式子(3.5)代表當期期初各租借站不同狀態下的車數為前一期未被租出的電動機車存貨加上前一期從別站順利租出向該站還車的流量，該式子依狀態的範圍可分成三種情況，整理如表 3-2：當  $2 \leq s \leq n_1$  時，等號右邊只會有前半部，即第  $t$  期期初租借站  $i$  狀態  $s$  的電動機車量只來自前一期未被租出的電動機車流量；當  $|S| - n_2 + 1 \leq s \leq |S|$  時，等號右邊只會有後半部，即第  $t$  期期初租借站  $i$  狀態  $s$  的電動機車量只來自從別的租借站順利租出而還到租借站  $i$  的電動機車流量；而當  $n_1 + 1 \leq s \leq |S| - n_2$  時，第  $t$  期期初租借站  $i$  狀態  $s$  的電動機車量則來自前一期未被租出的電動機車，再加上從別的租借站順利租出而還到租借站  $i$  的電動機車流量。

$$y_{is}^t = \sum_{s'=s}^{s+n_2} y_{is's}^{t-1} \quad \forall i \in N, t = 1, \dots, T, s = 1 \quad (3.4)$$

$$y_{is}^t = y_{i(s+n_2)i}^{t-1} + \sum_{j \in N_i} y_{j(s-n_1)i}^{t-1} \quad \forall i \in N, t = 1, \dots, T, 2 \leq s \leq |S| \quad (3.5)$$

表 3-2：式子(3.5)的三種情況表

s 的範圍	流進的流量意義
$2 \leq s \leq n_1$	未被租出的電動機車存貨
$n_1 + 1 \leq s \leq  S  - n_2$	未被租出的電動機車存貨+從別站順利租出

	還到該站的電動機車流量
$ S  - n_1 + 1 \leq s \leq  S $	從別站順利租出還到該站的電動機車流量

式子(3.6)為流出的流量守恆，也分成兩種情況，整理如表 3-3。當  $1 \leq s \leq |S| - n_1$  時，第  $t$  期期初租借站  $i$  狀態  $s$  的電動機車，可能未被租出而待在租借站  $i$  充電，也可能順利被租出而從租借站  $i$  流向租借站  $j$ ；當  $|S| - n_1 + 1 \leq s \leq |S|$  時，第  $t$  期期初租借站  $i$  狀態  $s$  的電動機車，只會發生未被租出而待在租借站  $i$  充電的情況。

$$y_{is}^t = y_{isi}^t + \sum_{j \in N_i} y_{isj}^t \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1, s = 1, \dots, |S| \quad (3.6)$$

表 3-3：式子(3.6)的兩種情況表

s 的範圍	流出的流量意義
$1 \leq s \leq  S  - n_1$	未被租出的電動機車存貨+從該站順利租出還到別站的電動機車流量
$ S  - n_1 + 1 \leq s \leq  S $	未被租出的電動機車存貨

$\bar{y}_{ij}^t$  表示在第  $t$  期從租借站  $i$  流向租借站  $j$  的未滿足租借者需求，此流量有兩個來源：一為電量不足(狀態  $|S| - n_1 + 1$  之後)；另一則為原本即車輛不足因此無法租借，因此租借需求會等於成功租借出去的車數，再加上租借者無法租借的車數，即式子(3.7)。

$$r_{ij}^t = \sum_{s=1}^{|S|-n_1} y_{isj}^t + \bar{y}_{ij}^t \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.7)$$

式子(3.8)和(3.9)為判斷租借站  $i$  是否有電力足夠的電動機車可應付顧客需求， $v_i^t = 1$  表示目前電力足夠可租出的電動機車足以供給租借者使用，反之， $v_i^t = 0$  則否。

$$y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t \leq Mv_i^t - \epsilon \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.8)$$

$$y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t \geq M(v_i^t - 1) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.9)$$

而式子(3.10)、(3.11)表示在有車可租的情況時(即  $v_i^t = 1$ )，未被租出的電動機車存貨( $\sum_{s=1}^{|S|-n_1} y_{isi}^t$ )等於可租出的電動機車存量減去欲從此站出發至其它站的總需求( $\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t$ )。

$$\sum_{s=1}^{|S|-n_i} y_{isi}^t \leq y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t + M(1-v_i^t) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.10)$$

$$\sum_{s=1}^{|S|-n_i} y_{isi}^t \geq y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - M(1-v_i^t) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.11)$$

若電力足夠可租出的電動機車不足，則由式子(3.12)、(3.13)和(3.14)中的起訖需求比例  $r_{ij}^t / \sum_{\forall j \in N_i} r_{ij}^t$  決定從租借站  $i$  流向租借站  $j$  的缺車數，亦即當  $v_i^t = 1$  時， $\bar{y}_{ij}^t = 0$ ，而  $v_i^t = 0$  時， $\bar{y}_{ij}^t = (\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - y_i^t) \times \frac{r_{ij}^t}{\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t}$ 。

$$\bar{y}_{ij}^t \leq M(1-v_i^t) \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.12)$$

$$\bar{y}_{ij}^t \leq (\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - y_i^t) \times \frac{r_{ij}^t}{\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t} + Mv_i^t \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.13)$$

$$\bar{y}_{ij}^t \geq (\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - y_i^t) \times \frac{r_{ij}^t}{\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t} - Mv_i^t \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.14)$$

式子(3.15)為衡量服務水準的指標，即要達到一定程度的服務水準  $\phi$ ，則未滿足的租借需求頂多只能占總租借需求的一定比例(即  $1-\phi$ )以下。舉例來說，若至少欲滿足  $\phi=80\%$  的租借需求，則未被滿足的需求不可超過  $20\%$ 。

$$\frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{t=0}^{T-1} \bar{y}_{ij}^t}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{t=0}^{T-1} r_{ij}^t} \leq 1-\phi \quad (3.15)$$

式子(3.16)~(3.22)為各變數型態，其中  $v_i^t$  為二元變數，其餘變數皆為非負之實數。

$$v_i^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.16)$$

$$B_i \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N \quad (3.17)$$

$$y_i^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T \quad (3.18)$$

$$y_{is}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T, s = 1, \dots, |S| \quad (3.19)$$

$$y_{isi}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T, s = 1, \dots, |S| \quad (3.20)$$

$$y_{isj}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T, s = 1, \dots, |S| \quad (3.21)$$

$$\bar{y}_{ij}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.22)$$

### 3.2.2.2 電池交換模式

電池交換模式與充電柱模式最大差別，在於不同狀態的電動機車流量方式有些微不同。此模式未租出的電動機車並沒有在充電，其電力將保持與前一期相同之狀態，只有當其電池電量低於 $n_1$ 門檻時，才會被強制交換電池而變成充飽電的狀態。電池交換模式是以充電柱模式為基礎，再修改其部分限制式，如式子(3.24)、(3.26)、(3.27)、(3.28)、(3.29)、(3.32)、(3.33)、(3.45)所示，其餘式子皆與充電柱模式的式子相同。譬如式子(3.23)與(3.1)相同、(3.25)與(3.3)相同、(3.30)及(3.31)與(3.8)及(3.9)相同和(3.34)~(3.44)與(3.12)~(3.22)相同，以下為完整模式。

目標式(3.23)最小化總電動機車購買成本與式子(3.1)相同。

$$\min \sum_{i \in N} (C \times B_i) \quad (3.23)$$

式子(3.24)表示在第 $t$ 期，租借站 $i$ 可租出的總電動機車數量是由電池狀態1到電池狀態 $|S|$ 的機車所組成。不同於充電柱模式，電池狀態 $|S|-n_1+1$ 之後的電動機車只要透過交換電池也可出租。式子(3.25)為符合期初各租借站的電動機車皆為充滿電(狀態1)的假設。

$$y_i^t = \sum_{s=1}^{|S|} y_{is}^t \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T \quad (3.24)$$

$$y_{is}^t = B_i \quad \forall i \in N, t = 0, s = 1 \quad (3.25)$$

式子(3.26)表示在第 $t$ 期，租借站 $i$ 交換電池的次數。

$$w_i^t = \sum_{j \in N_i} \sum_{s'=|S|-n_1+1}^{|S|} y_{js'i}^t \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.26)$$

式子(3.27)和(3.28)為電動機車流量守恆限制式，式子(3.27)為流進租借站的流量，當期各租借站不同狀態下的車數為前一期未被租出的電動機車存貨( $y_{isi}^{t-1}$ )加上前一期從別站未換過電池即順利租出流到該站的流量( $\sum_{j \in N_i} y_{j(s-n_1)i}^{t-1}$ )，再加上前一期交換過電池才從別站順利租出流到該站的流量( $\sum_{j \in N_i} \sum_{s'=|S|-n_1+1}^{|S|} y_{js'i}^{t-1}$ )，該式子依狀態的範圍可分成三種

情況，整理如表3-4。

$$y_{is}^t = y_{isi}^{t-1} + \sum_{j \in N_i} y_{j(s-n_1)i}^{t-1} + \sum_{j \in N_i} \sum_{s'=|S|-n_1+1}^{|S|} y_{js'i}^{t-1} \quad \forall i \in N, t = 1, \dots, T, 1 \leq s \leq |S| \quad (3.27)$$

表 3-4：式子(3.27)的三種情況表

s 的範圍	流進的流量意義
$1 \leq s \leq n_1$	未被租出的電動機車存貨
$s = n_1 + 1$	未被租出的電動機車存貨+從別站未換過電池即順利租出還到該站的電動機車流量+從別站交換過電池才順利租出流到該站的電動機車流量
$n_1 + 2 \leq s \leq  S $	未被租出的電動機車存貨+從別站未換過電池即順利租出還到該站的電動機車流量

式子(3.28)為流出租借站的流量守恆限制式，第  $t$  期租借站  $i$  狀態  $s$  的電動機車，可能未被租出在租借站  $i$  不充電保持相同狀態，也可能順利被租出從租借站  $i$  流向租借站  $j$ 。

$$y_{is}^t = y_{isi}^t + \sum_{j \in N_i} y_{isj}^t \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1, s = 1, \dots, |S| \quad (3.28)$$

$\bar{y}_{ij}^t$  表示從租借站  $i$  流向租借站  $j$  的未被滿足之租借者需求，由於我們假設電力不夠的話隨時可換得充飽電的電池，因此未滿足之租借需求僅可能肇因於其原本之車輛數本來就不足，而非像充電站模式那般會有車卻電量不足(狀態  $|S|-n_1+1$  之後)的情況，

因此租借需求會等於成功租借出去的車數( $\sum_{s=1}^{|S|} y_{isj}^t$ )加上租借者無法租借的車數( $\bar{y}_{ij}^t$ )，即

式子(3.29)。

$$r_{ij}^t = \sum_{s=1}^{|S|} y_{isj}^t + \bar{y}_{ij}^t \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.29)$$

式子(3.30)和(3.31)為判斷租借站  $i$  是否有足夠的電動機車可應付顧客需求，其中  $v_i^t = 1$  表示目前有足夠數量的電動機車足以供給租借者使用(即  $y_i^t \geq \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t$ )，反之， $v_i^t = 0$  則否。

$$y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t \leq M(v_i^t - \varepsilon) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.30)$$

$$y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t \geq M(v_i^t - 1) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.31)$$

而式子(3.32)、(3.33)表示在有車可租的情況時(即  $v_i^t = 1$ )，未被租出的電動機車存

貨( $\sum_{s=1}^{|S|} y_{isi}^t$ )等於可租出的電動機車存量減去欲從此站出發至其它站的總需求( $\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t$ )。

$$\sum_{s=1}^{|S|} y_{isi}^t \leq y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t + M(1-v_i^t) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.32)$$

$$\sum_{s=1}^{|S|} y_{isi}^t \geq y_i^t - \sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - M(1-v_i^t) \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.33)$$

若可租出的電動機車不足(即  $v_i^t = 0$ )，則由式子(3.34)、(3.35)和(3.36)中的起訖需求

比例  $r_{ij}^t / \sum_{\forall j \in N_i} r_{ij}^t$  來決定從租借站  $i$  流向租借站  $j$  的缺車數。

$$\bar{y}_{ij}^t \leq M(1-v_i^t) \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.34)$$

$$\bar{y}_{ij}^t \leq (\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - y_i^t) \times \frac{r_{ij}^t}{\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t} + Mv_i^t \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.35)$$

$$\bar{y}_{ij}^t \geq (\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t - y_i^t) \times \frac{r_{ij}^t}{\sum_{j \in N_i} r_{ij}^t} - Mv_i^t \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.36)$$

式子(3.37)為衡量服務水準的指標，即要達到一定程度的服務水準  $\phi$ ，未滿足的租借需求頂多只能占總租借需求的一定比例(即  $1-\phi$ )以下。

$$\frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{t=0}^{T-1} \bar{y}_{ij}^t}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{t=0}^{T-1} r_{ij}^t} \leq 1-\phi \quad (3.37)$$

式子(3.38)~(3.45)為各變數型態，其中  $v_i^t$  為二元變數，其餘變數皆為非負之實數。

$$v_i^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.38)$$

$$B_i \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N \quad (3.39)$$

$$y_i^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T \quad (3.40)$$

$$y_{is}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T, s = 1, \dots, |S| \quad (3.41)$$

$$y_{isi}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T, s = 1, \dots, |S| \quad (3.42)$$

$$y_{isj}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T, s = 1, \dots, |S| \quad (3.43)$$

$$\bar{y}_{ij}^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, j \in N_i, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.44)$$

$$w_i^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in N, t = 0, \dots, T-1 \quad (3.45)$$

上述模式是假設電池交換設施中的電池無數量上限，隨時都可以換到充飽電的電池。若要進一步預估電池交換設施中的電池數量，並考慮電池成本，則需要修改上述模式，再加入限制式。

### 3.3 範例說明

本節將以兩個範例分別說明充電柱補充電量模式和電池交換補充電量模式，詳細描述於 3.3.1 節和 3.3.2 節。

#### 3.3.1 充電柱模式

以下將以一個 3 個租借站、 $T=2$  的小例子，說明 3.2.2.1 節所提出之混整數規劃模式。假設已知電動機車單位成本 50 和各期各租借站之起訖需求，如表 3-5 所示，A 站分別可到達 B、C 站，同理，B、C 站也可到達 A 站，總租借需求量為 30。

表 3-5：充電柱模式範例各期各租借站起訖需求表

時間	t=0			t=1		
	A	B	C	A	B	C
迄 起						
A	0	6	0	0	2	7
B	6	0	0	4	0	0
C	4	0	0	1	0	0

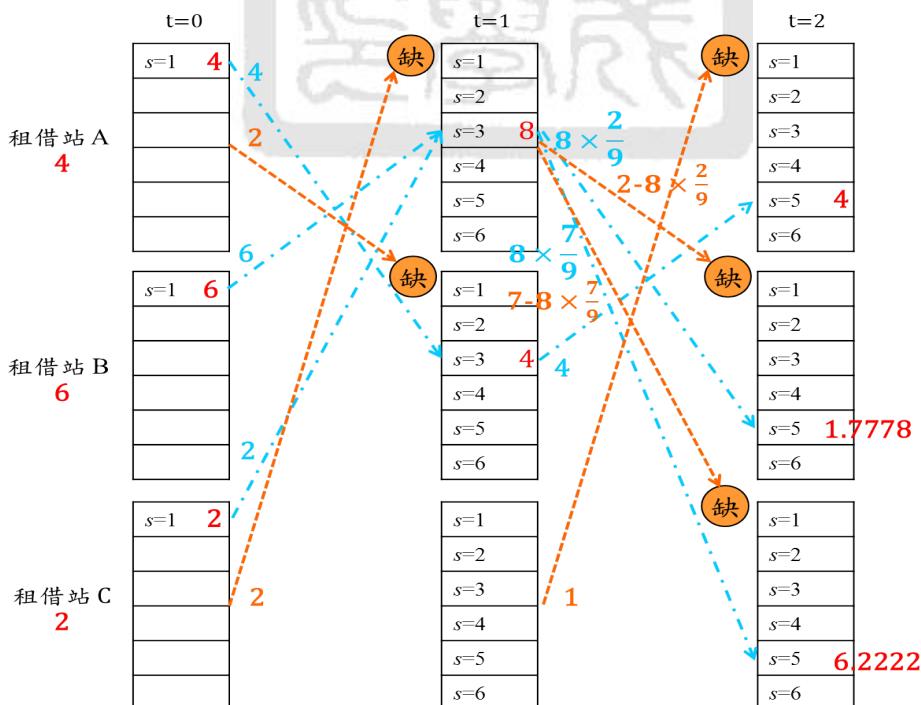


圖 3-5： $|N|=3, T=2$  充電柱模式求解結果

根據上圖可知，在電池有 6 個狀態，耗充電速率分別為 2 與 1 個狀態個數，欲達到服務水準 80%，透過本研究提出的模式，可求出 A、B、C 各站期初最佳擺放電動機車數分別為 4、6、2 共 12 台電動機車，需花費總成本 600，才可以滿足 80% 的需求；此結果僅 6 個需求未被滿足，而這 6 個未滿足需求分別發生在  $t=0$  時有 4 個(A 到 B 站 2 個未滿足需求和 C 站到 A 站 2 個未滿足需求)，在  $t=1$  時有 2 個(A 到 B 站 0.2222 個未滿足需求、A 到 C 站 0.7778 個未滿足需求和 C 站到 A 站 1 個未滿足需求)。而不同狀態的電動機車在各期之間的流量，如圖 3-5 所示。其中虛線— $\rightarrow$  代表順利租出的電動機車流量，虛線…… $\rightarrow$  代表未滿足的租借需求即無車可租的流量，本範例供不應求，因此各期皆無閒置的機車存貨流量。

### 3.3.2 電池交換模式

以下將以一個 3 個租借站、 $T=3$  的小例子，說明 3.2.2.2 節模式。假設已知電動機車單位成本 50 和各期各租借站之起訖需求，如表 3-6 所示，A 站分別可到達 B、C 站，同理，B、C 站也可到達 A 站，總租借需求量為 48。

表 3-6：電池交換模式範例各期各租借站起訖需求表

時間 迄 起	$t=0$			$t=1$			$t=2$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
A	0	4	5	0	0	8	0	7	4
B	6	0	0	5	0	0	1	0	0
C	3	0	0	2	0	0	3	0	0

在電池有 6 個狀態，耗電速率為 2 個狀態個數時，欲達到服務水準 80%。則透過本研究提出的模式，可求出 A、B、C 各站期初最佳擺放電動機車數分別為 5.4、7.6、3 共 16 台電動機車，需花費總成本 800，交換電池 7.4 次，才可以滿足 80% 的需求，僅 9.6 個需求未被滿足。

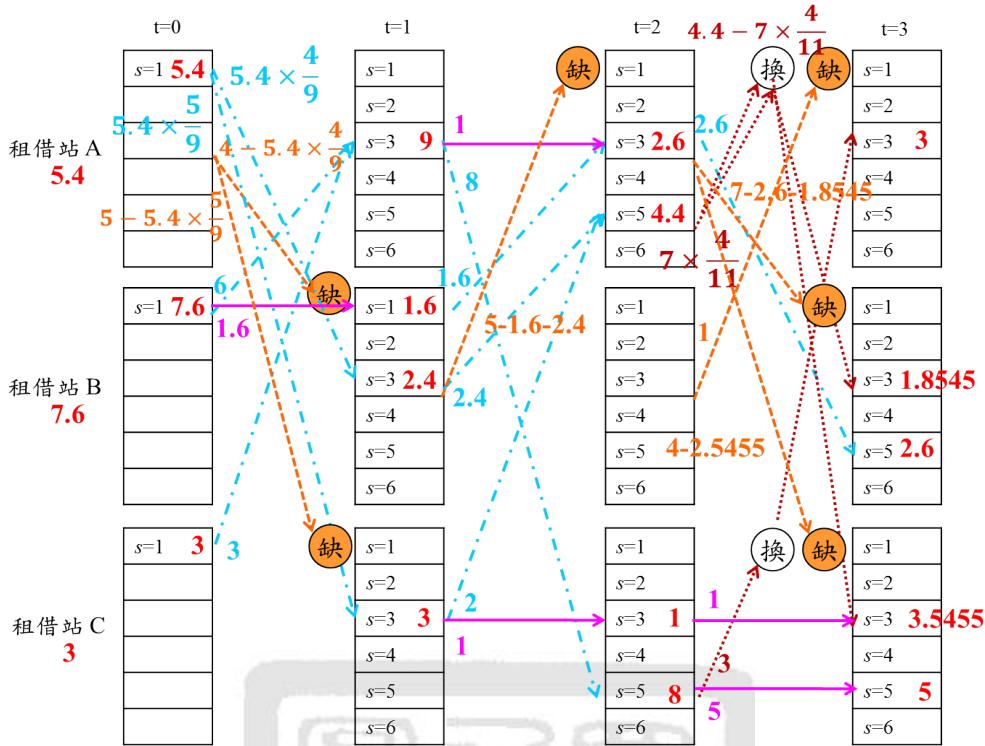


圖 3-6： $|N|=3, T=3$  電池交換模式求解結果

根據上圖可知，未滿足的需求分別發生在  $t=0$  時有 3.6 個(A 到 B 站 1.6 個未滿足需求和 A 站到 C 站 2 個未滿足需求)，在  $t=1$  時有 1 個(B 到 A 站 1 個未滿足需求)，在  $t=2$  時有 5 個(A 到 B 站 2.5455 個未滿足需求、A 到 C 站 1.4545 個未滿足需求和 B 站到 A 站 1 個未滿足需求)。電池交換的部分，在  $t=2$  時，A 到 B 站有 1.8545 台電動機車是經過電池交換才順利租出，有 2.6 台電動機車是未經交換電池即被租出，A 到 C 站並沒有未經交換電池即租出的電動機車流量，順利租出的電動機車都是經過電池交換共 2.5455 台；C 到 A 站雖然還有剩餘 1 台狀態 3 的電動機車不需要換電池即可租出，但模式並未限制電量多的車要先租出，由於我們假設電池沒有數量上限，隨時都有充滿電的電池可換，因此 C 到 A 站的 3 個租借需求都是租到交換過電池的電動機車。其餘流量如圖 3-6 所示，其中虛線 $\dashrightarrow$ 代表未換電池即順利租出的電動機車流量，虛線 $\longrightarrow$ 代表換過電池才順利租出的電動機車流量，虛線 $\cdots\cdots\rightarrow$ 代表未滿足的租借需求即無車可租的流量，實線 $\rightarrow$ 代表未被租出的電動機車存貨流量。

### 3.4 PSO 演算法求解電動機車共享系統車輛佈署問題

在 3.2 節中所提出的充電柱模式和電池交換模式皆為困難的混整數規劃模式，會隨著共享系統的規模擴大(包括租借站個數、租借站相連程度、營運時間長度、電動機車電池狀態個數等參數增加)，而花費更長的求解時間。為了提升求解效率，本研究提出兩個粒子群最佳化演算法，分別為  $PSO_{CP}$  與  $PSO_{BE}$  來加速充電柱和電池交換模式之求解。這兩演算法的概念大致上相同，僅在不同電池狀態的電動機車在共享系統中的流動方式有所差異， $PSO_{CP}$  是以充電柱補充電量， $PSO_{BE}$  則是以交換電池的方式來補充電量。

首先定義  $p_i^m(r)$  為第  $r$  迭代第  $m$  個粒子下租借站  $i$  的位置，每個位置對應的解即為期初須擺放的車輛數， $v_i^m(r)$  為第  $r$  迭代第  $m$  個粒子下租借站  $i$  的速度，若有 10 個粒子，20 個租借站，其粒子示意圖，如圖 3-7 所示。

粒子 1 (m=1)	$p_1^1(r)$	$p_2^1(r)$	.....	$p_{19}^1(r)$	$p_{20}^1(r)$
粒子 2 (m=2)	$p_1^2(r)$	$p_2^2(r)$	.....	$p_{19}^2(r)$	$p_{20}^2(r)$
⋮					⋮
粒子 10 (m=10)	$p_1^{10}(r)$	$p_2^{10}(r)$	.....	$p_{19}^{10}(r)$	$p_{20}^{10}(r)$

圖 3-7：粒子示意圖

以下將詳細介紹兩演算法的流程與步驟：

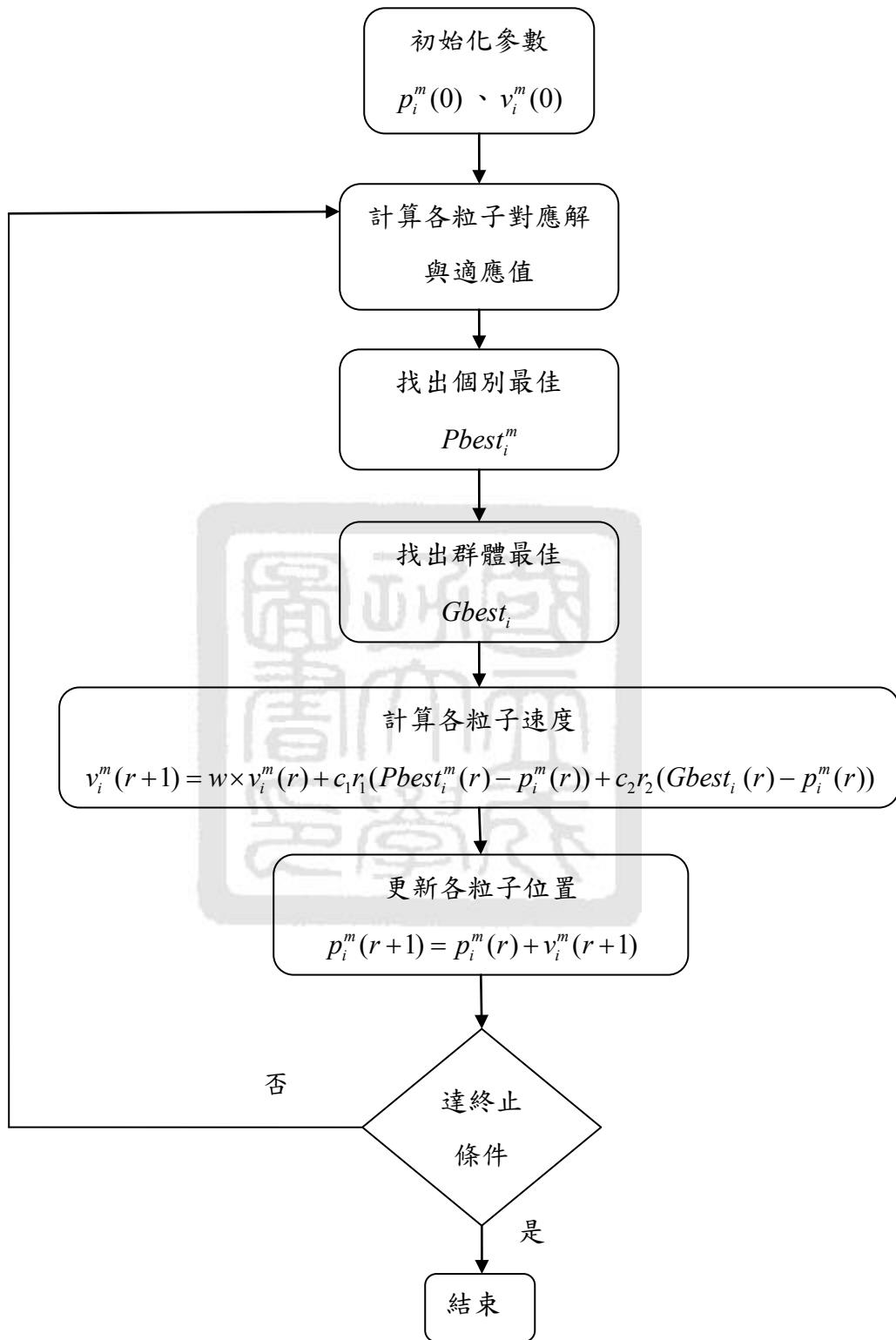


圖 3-8：PSO<sub>CP</sub> 與 PSO<sub>BE</sub> 演算法流程圖

詳細步驟如下：

1. **初始化參數**：每個粒子代表車輛佈署問題的一組解，即各租借站期初須擺放的電動機車數，一開始要先產生初始粒子位置和速度，即  $p_i^m(0)$  與  $v_i^m(0)$ ，分別表示初期第  $m$  個粒子下租借站  $i$  位置與速度參數。 $v_i^m(0)$  是介於  $[0,1]$  之間的隨機亂數，粒子  $p_i^m(0)$  值產生的方式有四種：(1)利用 Gurobi 軟體求解 3.2 節模式在高服務水準下(例如:100%、99%、98%、97%、95%、93%服務水準) 所得之  $B_i$  來當該粒子的初始位置值；(2)從  $[0.85 \times B_i, 1.15 \times B_i]$  的範圍中，隨機產生一亂數當該粒子的初始位置值；(3)從  $[0.5 \times B_i, 1.5 \times B_i]$  的範圍中，隨機產生一亂數當該粒子的初始位置值；(4)直接隨機產生亂數，並調整該粒子的初始位置值加總與 100%服務水準的總車數相同。
2. **計算粒子對應解與適應值**：過多次迭代後，粒子位置可能為負值，此時需先將粒子位置轉換成其對應的解，即期初須擺放的車數。在此我們直接將粒子位置加上絕對值來當作粒子所對應的解，接著依據適應值函式計算出每個粒子的適應值，以判斷每一粒子之好壞。適應值函式以 3.2 節模式的目標式為基礎，再加上當系統無法達到預設之服務水準要求所引發的懲罰成本(亦即違反式子(3.15)或(3.37)時，需要加上一懲罰值)，完整的適應值函式如式子(3.46)，適應值越小即代表此粒子的表現越好。

$$\text{fitness function} = C \times \sum_{i \in N} |p_i^m(r)| + \text{penalty} \times \max \left\{ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{t=0}^{T-1} \bar{y}_{ij}^t - (1-\phi) \times \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{t=0}^{T-1} r_{ij}^t, 0 \right\} \quad (3.46)$$

3. **找出個別最佳解**：計算完適應值後，找出每一粒子  $m$  到目前第  $r$  迭代為止的搜尋過程中最佳解  $Pbest_i^m(r)$ 。
4. **找出群體最佳解**：根據每一粒子新的最佳解  $Pbest_i^m(r)$ ，更新所有粒子到目前為止所搜尋的群體最佳解  $Gbest_i(r)$ 。
5. **更新各粒子速度與對應的解**：以式子(3.47)和(3.48)進行速度與位置更新，其中  $c_1$  與  $c_2$  表示加速度常數(acceleration constants)，設為 0.2 和 0.4， $r_1$  與  $r_2$  則為介於  $[0, 1]$  之間的隨機變數， $w$  為權重值介於  $[0.8, 1.2]$  之間。

$$v_i^m(r+1) = w \times v_i^m(r) + c_1 r_1 (Pbest_i^m(r) - p_i^m(r)) + c_2 r_2 (Gbest_i(r) - p_i^m(r)) \quad (3.47)$$

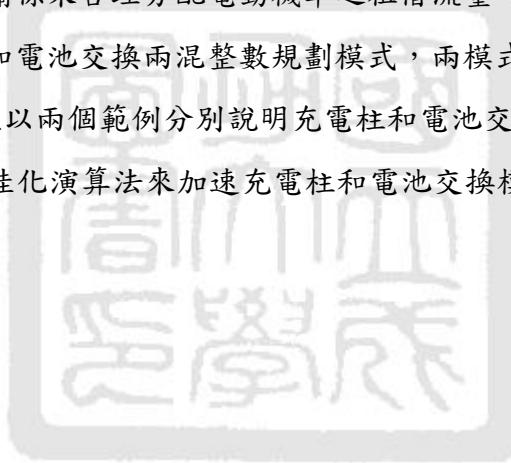
$$p_i^m(r+1) = p_i^m(r) + v_i^m(r+1) \quad (3.48)$$

6. 終止條件：判斷是否達到終止條件，終止條件可分成兩種，一種是達到迭代次數( $r$ )上限，本研究是採此方式來當終止條件；另外一種則是達到設定的門檻值( $\delta$ )，也就是當所有粒子群之適應值與目前最好的適應值之間的差距低於門檻值時，則停止演算法的操作。RPD 是指相對誤差百分比 (Relative Percentage Deviation)，是一種判斷求解品質優劣的指標，該值愈小愈好，其計算方式如式子(3.49)。

$$RPD = \frac{fitness - best\ fitness}{best\ fitness} \times 100\% \quad (3.49)$$

### 3.5 小結

本章在已知租借需求起訖點和所需花費的成本下，考慮電池耗、充電速率，以不同起訖需求之相對比例關係來合理分配電動機車之租借流量。依電動機車補充電量的方式不同，建構充電柱和電池交換兩混整數規劃模式，兩模式皆可求解各租借站期初之最佳車輛佈署方式，並以兩個範例分別說明充電柱和電池交換模式，最後提出  $PSO_{CP}$  與  $PSO_{BE}$  兩個粒子群最佳化演算法來加速充電柱和電池交換模式之求解。



## 第四章 數值分析

### 4.1 建立網路圖

#### 步驟 1：選定租借站位址和個數

本研究假設已知所有租借站位址和個數，因此將利用高雄 C-bike 各租借站之位置資料，目前共有 74 個租借站，其分佈位置如圖 4-1 所示，本研究從中任意選取捷運沿線的 20 個租借站當作電動機車共享系統之租借站，此 20 個租借站的詳細座標如表 4-1 所示，其分佈位置如圖 4-2 所示。

#### 步驟 2：計算租借站間距離並判斷租借站是否相連

根據選定的租借站座標，分別計算各租借站之間的距離，若租借站間的距離介於 1~3 公里，則代表這兩個租借站可相連，即此兩租借站間會有租借需求，反之，若距離在 1~3 公里之外，則代表兩租借站不可相連，亦即不會有任何租借需求，表 4-2 為租借站是否相連的矩陣表，其中 1 表示相連，0 表示不相連。

#### 步驟 3：將相連的租借站給定租借需求

依步驟 2 的矩陣表來判斷是否需要配置一隨機需求量，當表 4-2 顯示為 1 時，則在兩租借站間配置隨機需求量，如表 4-3 所示，以  $t=0$  為例，各租借站之起訖需求值。

依上述步驟建立一個使用充電柱補充電量的共享系統網路圖，該網路圖為 20 個租借站、15 期、6 個電池狀態、耗充電比為 2:1，各租借站間相連情況依表 4-2 作連結，詳見圖 4-3。

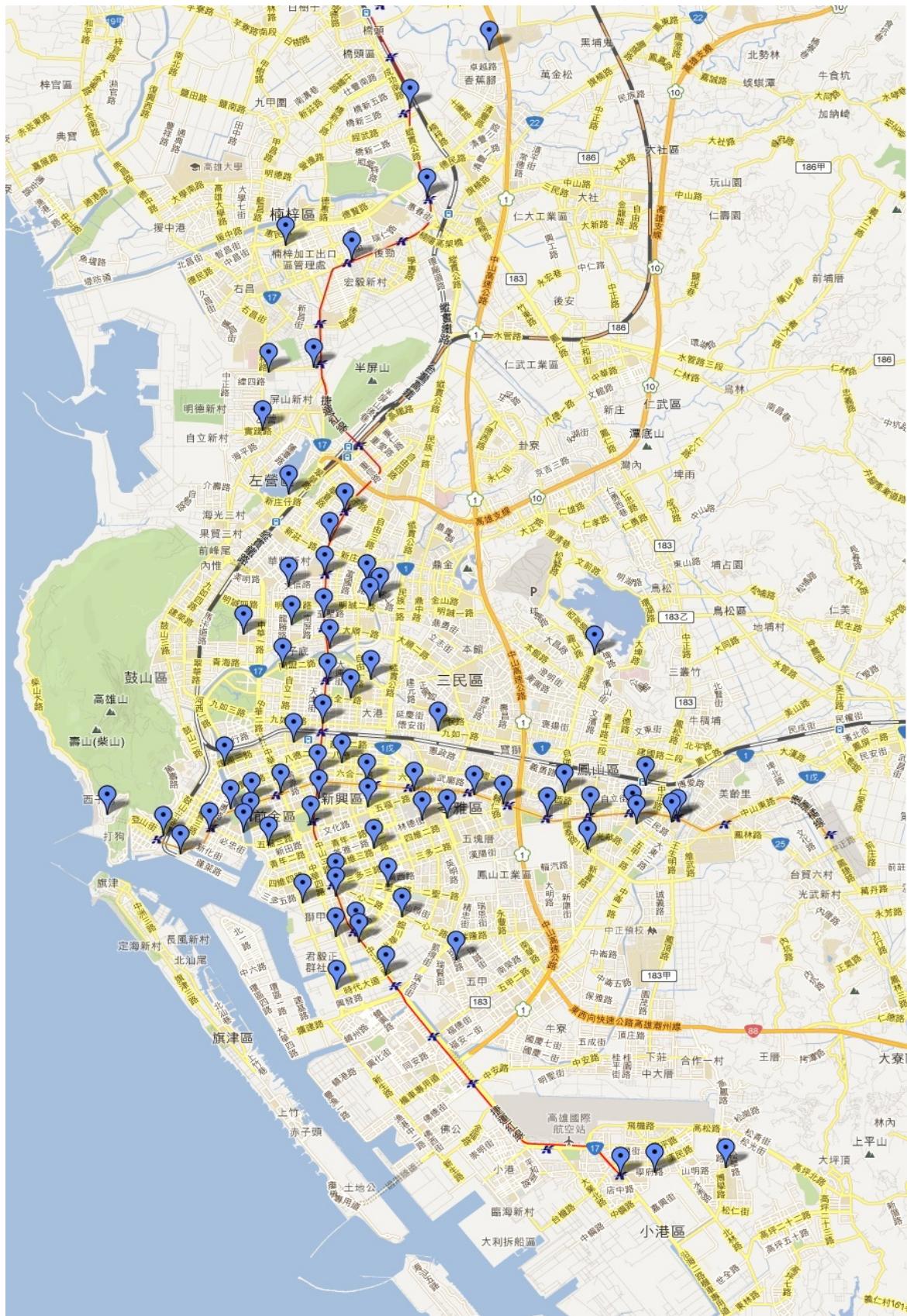


圖 4-1：高雄 C-bike74 個租借站分佈示意圖

表 4-1：高雄 C-bike 20 個租借站座標表

編號	租借站名稱	WGS84 (以度為單位)		TWD97 (以公尺為單位)	
		經度座標	緯度座標	X 座標	Y 座標
1	生態園區站	120.306427	22.676779	178730.87	2508658.97
2	巨蛋站	120.303085	22.666086	178381.89	2507476.5
3	凹子底站	120.302864	22.658953	178355.48	2506686.74
4	後驛站	120.303505	22.648127	178415.74	2505487.62
5	後火車站	120.302727	22.641096	178332.13	2504709.43
6	美麗島站	120.301796	22.632664	178232.06	2503776.17
7	中央公園站	120.300591	22.624033	178103.7	2502821.01
8	三多站	120.304871	22.614372	178538.69	2501749.15
9	新光中山站	120.304893	22.611961	178539.71	2501482.17
10	獅甲站	120.308418	22.606043	178899.06	2500825.16
11	正勤站	120.308884	22.604256	178946.06	2500627.06
12	凱旋站	120.313477	22.598598	179415.4	2499998.35
13	西子灣站	120.275429	22.622206	175516.07	2502631.06
14	鹽埕埔站	120.283211	22.622845	176316.41	2502697.95
15	市議會站	120.29557	22.629421	177590.37	2503420.07
16	新興區公所站	120.310242	22.631124	179099.45	2503601.59
17	文化中正站	120.318314	22.6297	179928.48	2503440.09
18	五塊厝站	120.328636	22.629059	180989.21	2503364.29
19	技擊館南站	120.333656	22.627411	181504.43	2503179.48
20	衛武營站	120.341087	22.625345	182267.3	2502947.31

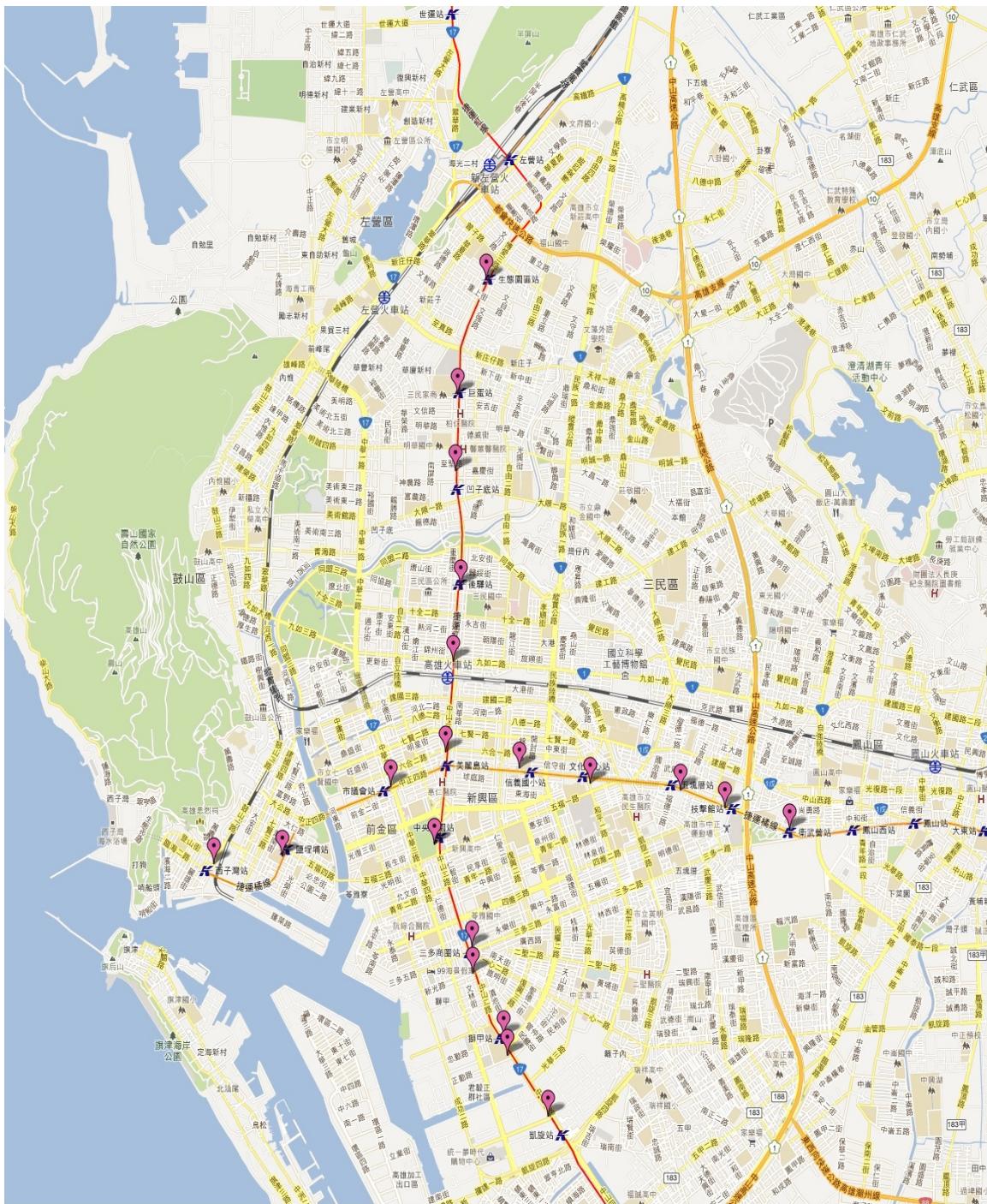


圖 4-2：高雄 C-bike20 個租借站分佈示意圖

表 4-2：租借站相連矩陣表

站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
5	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	
6	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	
7	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	
9	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
15	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	
16	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	
17	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	
18	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	

表 4-3：各期各租借站之起訖需求值(以 t=0 為例)

t=0		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
站		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	1	0	0	2	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	9	7	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	0	2	8	4	0	0	0	
5	0	4	4	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	2	0	4	6	5	0	
6	0	0	2	5	0	0	0	8	9	0	0	0	4	0	0	0	1	2	0	0	
7	0	0	0	1	2	0	0	4	0	4	3	0	0	4	0	4	9	2	0	0	
8	0	0	0	0	5	2	7	0	0	0	5	5	0	0	8	3	4	4	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	9	0	9	3	3	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	5	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	8	7	0	0	0	0	0	0	0	2	8	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	4	1	4	3	6	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	
15	0	0	0	5	7	0	0	5	5	4	0	0	4	6	0	4	4	0	0	0	
16	0	0	0	6	3	0	3	9	6	3	7	0	0	1	5	0	0	0	9	0	
17	0	0	0	4	3	4	8	7	9	0	3	0	0	0	8	0	0	7	1	6	
18	0	0	0	0	0	1	8	9	0	0	0	0	0	0	0	5	6	0	0	7	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	3	0	0	
															⋮						

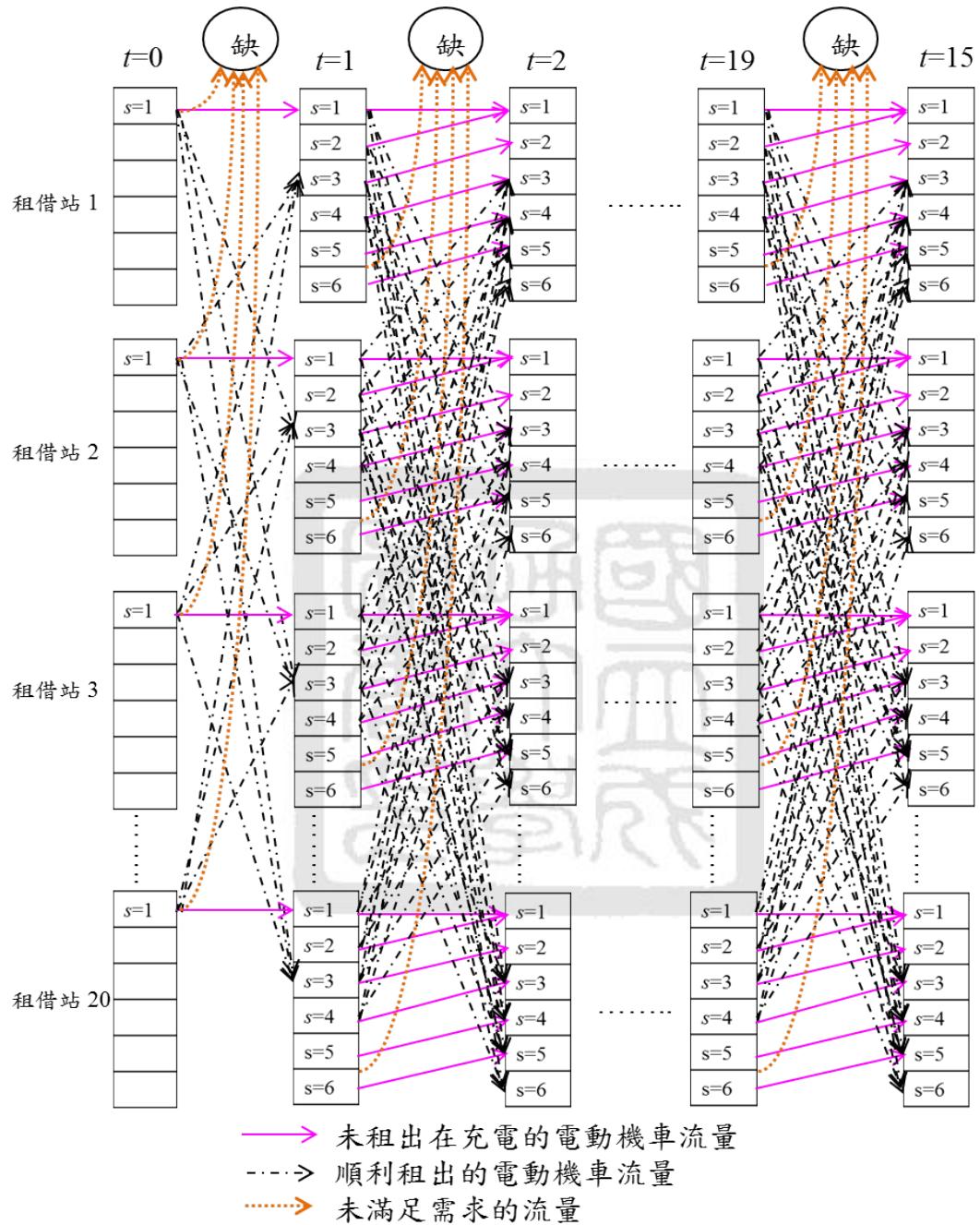


圖 4-3： $|N|=20, T=15, |S|=6$  網路圖

## 4.2 參數設定

本研究進行數值測試的相關參數設定如表 4-4 所示，為了使參數的設定更符合實際情況，本研究以中華汽車推出的新款電動機車 e-moving plus/漾為例，其電池從電量零到充飽電約要 4 小時，平均每充電 20 分鐘可得 4 至 5 公里續航力。若以時速 30 公里而言其續航力大概為 60 公里，而根據資料統計，一般市區機車通勤族平均每天騎約 10 至 15 公里，換算下來，單趟騎乘距離約 5 至 7.5 公里，充電約 30 分鐘即可達成。因此我們把電池狀態分成 6 格，每期 30 分鐘，每過一期 30 分鐘會耗電一格大概可騎 10 公里，充電 30 分鐘可得 5 公里續航力，所以最符合實際情況的耗充電比為 2：1。但考慮到未來電動機車電池充電技術或續航力可能提升，因此我們也設定了其它比率（1：1 及 1：2）的耗充電比和電池狀態個數，並假設耗電比較快的電動機車單位成本較低，充電比較快的電動機車單位成本較高。

表 4-4：相關參數之設定

參數	數值
$C$	50,60,72
$r_{ij}^t$	[0,30]
$\phi$	50%~100%
$ S $	5
$n_1 : n_2$	2 : 1, 1 : 1, 1 : 2
$ N $	20
T	15
M	100000
$\varepsilon$	1
Gurobi gap	0.05
Gurobi 求解時間限制(秒)	100000
$r_1$ 、 $r_2$	[0, 1]
w	[0.8, 1.2]

$c_1$	0.2
$c_2$	0.4
粒子數	20
PSO 終止條件(迭代次數)	300

以 Gurobi 進行求解時，求解過程中的 gap 作為衡量 Gurobi 求解品質好壞的指標，為了避免因為要收斂到最佳解即 gap 達到 0%，而導致求解時間太長，因此設定 gap 達 5%以內即可停止 Gurobi 求解，而 gap 在達不到 5%以內時，設定最多只會求解 100000 秒，並記錄此時的 gap 值，gap 公式如下：

$$gap = \frac{\text{best integer solution-lower bound}}{\text{best integer solution}}$$

本研究產生兩種租借情境：情境一為較均勻的租借需求，每個站到可相連的站租借需求都差不多，若某個站可相連的站很多，則會使該站的需求變很大，整個系統不同租借站在不同期下的租借需求差異可能很大；情境二則為較符合實際情況的租借需求，即租借時段有尖峰和離峰時段、租借站有熱門與否的差別，各租借站的總租借需求分成大站尖峰、大站離峰、中站尖峰、中站離峰、小站尖峰和小站離峰六種，假設每種情況都有一租借需求範圍，個別從該範圍隨機取一值當該站該期的總需求，表 4-5 為情境二各期各租借站總租借需求範圍設定表。

表 4-5：情境二各期各租借站總租借需求設定表

租借時段 \ 站點熱門程度	小站	中站	大站
離峰	[0,3]	[7,10]	[15,20]
尖峰	[3,7]	[10,15]	[20,30]

為了避免求解結果成為特例，我們將兩種租借情境分別產生三筆具同樣參數設定的隨機租借需求測試資料，因此本研究共有六筆租借需求測試資料。假設已知歷史租借需求資訊，包括每期每個租借站的總需求數，以及由該站到其它租借站的比例，本

研究產生租借需求的方式為將歷史資訊每期每個租借站總需求數乘上 10%為其可能增減的範圍，而需求比例則乘上 5%為其可能增減的範圍，再將總需求數和需求比例相乘產生該情境租借需求的範圍，並從此範圍中產生亂數。

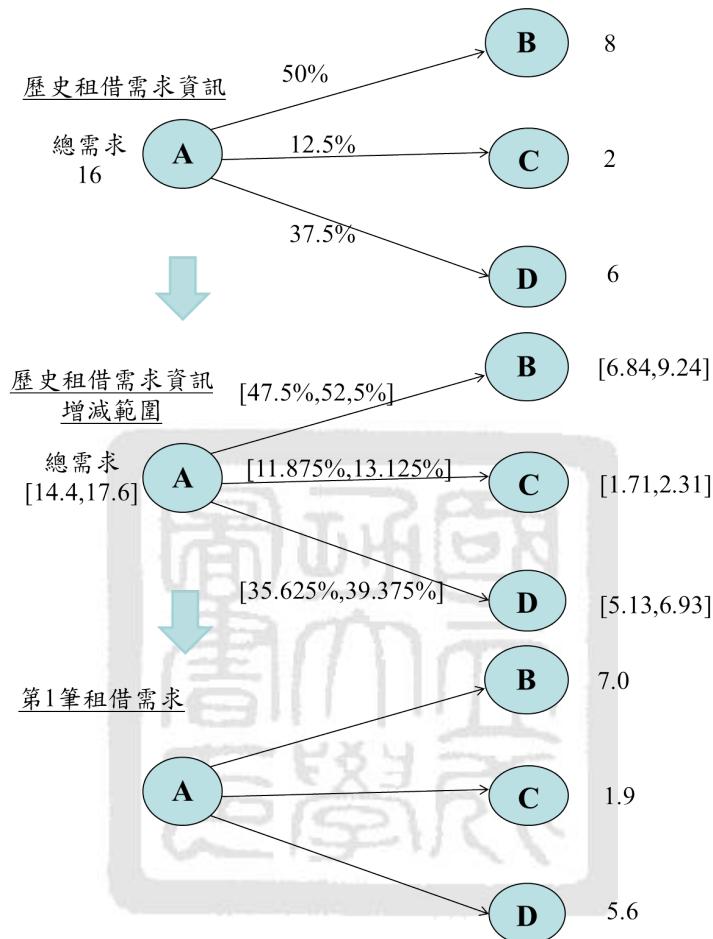


圖 4-4：產生不同筆租借需求示意圖

舉例來說，如圖 4-4，若歷史資料從 A 站要到其它 B、C、D 站的個別需求分別是 8、2、6，可算出總需求為 16，需求比例分別為 50%、12.5%、37.5%，此時先計算其可能增減的範圍，即總需求範圍會介於 14.4 到 17.6，從 A 站到 B 站的需求比例範圍介於 47.5% 到 52.5%，因此，從 A 到 B 站的租借需求會介於 6.84 到 9.24 範圍間。同理，從 A 到 C 站的租借需求會介於 1.71 到 2.31 範圍間，從 A 到 D 站的租借需求介於 5.13 到 6.93 範圍間。接著在這三個範圍中各自產生亂數，該亂數即為此情境下從 A 到 B、C、D 站的個別租借需求量，依照上述方法，共產生兩種情境六筆租借需求資料如表 4-6。

表 4-6：六筆租借需求測試資料表

筆數 租借情境	1	2	3
情境一	R1	R2	R3
情境二	RR1	RR2	RR3

## 4.3 數值測試

在建立好上述問題之後，本研究將使用 Corei7 處理器之個人電腦，並在 Windos 7 作業系統下，使用最佳化軟體 Gurobi 5.1.0 版和 PSO<sub>CP</sub> 與 PSO<sub>BE</sub> 進行求解，以下為兩種模式之數值測試與分析。

### 4.3.1 充電柱模式

在已知各期各租借站租借需求，給定電動機車固定單位成本  $C$  情況下，先以 Gurobi 測試 3.2.2.1 節混整數規劃模式。本研究設定耗充電比 2:1 的電動機車單位成本為 50，耗充電比 1:1 的電動機車單位成本為 60，是耗充電比 2:1 電動機車的 1.2 倍，同理，耗充電比 1:2 的電動機車單位成本 72，是耗充電比 1:1 電動機車的 1.2 倍。

根據 Gurobi 測試的結果，發現隨著共享系統的規模擴大和不同的參數設定會使求解時間變長，為了改善求解效率，在利用 Gurobi 求解的過程中，本研究嘗試以 warm start 的方式來求解，以較高服務水準所求出的結果當其它服務水準的初始解，或是以 100% 服務水準的各租借站期初須擺放的車數取平均值當初始解，但 warm start 帶來的改善幅度並不大，下表 4-7 為情境一(R1、R2、R3 三筆租借需求資料)求解數值平均值與標準差表。

表 4-7：情境一(R1、R2、R3)之 Gurobi 求解數值平均值與標準差表

耗充電比	服務水準	目標值		總車數		求解時間(秒)	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
2 : 1	100%	75970.23	414.40	1519.40	8.29	1.00	0.12
2 : 1	90%	67482.18	376.59	1349.64	7.53	42.32	19.71

2 : 1	80%	59347.04	339.60	1186.94	6.79	784.70	65.39
2 : 1	70%	51395.73	438.43	1027.91	8.77	1662.77	1025.16
<hr/>							
1 : 1	100%	62160.00	300.00	1036.00	5.00	2.34	0.03
1 : 1	90%	50636.54	342.36	843.94	5.71	6524.88	1793.22
1 : 1	80%	44685.49	517.37	744.76	8.62	14507.32	3543.24
1 : 1	70%	39818.97	823.36	663.65	13.72	29679.05	2824.49
<hr/>							
1 : 2	100%	74592.00	360.00	1036.00	5.00	2.05	0.19
1 : 2	90%	53007.69	967.70	736.22	13.44	12163.44	1829.44
1 : 2	80%	46866.03	359.75	650.92	5.00	18749.00	8424.95
1 : 2	70%	41115.06	364.36	571.04	5.06	24187.82	13696.44

根據上表可以得知，不同耗充電比，在不同服務水準下，三筆租借需求測試資料目標值(總成本)、總車數、求解時間的平均值和標準差；若標準差越大，代表三筆測試資料的數值和其平均值之間差異越大，也就是數值的分散程度越大。在耗充電比為 2：1 時，不同服務水準下，總成本和總車數的標準差差異不大，代表與平均值的差異程度相差不大，即三種需求求出的結果分散程度差不多；但不同服務水準下的求解時間標準差差異很大，又以服務水準 70% 的標準差最大高達 1025.16，是服務水準 100% 時標準差的 8543 倍，表示不同租借需求情況對求解時間的影響很大。在耗充電比為 1：1 時，服務水準 70% 和 80% 下，總成本和總車數的標準差值較大，服務水準 70% 的標準差是服務水準 100% 的 2.74 倍，而服務水準 70%、80% 和 90% 下，求解時間的標準差都大於 1500，在耗充電比為 1：2 時，服務水準 90% 下，總成本和總車數的標準差值較大，是其它服務水準的 2.69 倍左右，在求解時間的部分，服務水準 70%、80% 和 90% 的標準差皆大於 1800。

以情境一 R1、R2、R3 的求解數值平均值為例，從下圖 4-5 可看出在不同耗充電比下，服務率與總成本之間的關係，可以發現在任何服務水準下，使用耗充電比 1：1 的電動機車所花的總成本較低，以達到 100% 服務水準為例，使用耗充電比 2：1、1：1、1：2 的電動機車個別需花費的總成本為 75970.23、62160.00、74592.00。由於本研究假設充電快的電動機車單位成本較高，此結果可能是受電動機車單位成本的影響，若僅核對求解結果的電動機車個數如圖 4-6，可以發現在任何服務水準下，使用耗充電

比 1:2 的電動機車，期初擺放較少的電動機車即可達到同樣的服務水準。這樣的結果很符合常理，因為在共享系統中使用充電較快的電動機車，會比使用充電較慢的電動機車有較多的電力足夠的車子提供給租借者，因此期初只需要擺放較少的電動機車即可達到相同服務水準。然而，在服務水準 100% 時，使用 1:1 和 1:2 的電動機車期初所需擺放的車數是相同的，也就是說在這樣的服務水準下，若兩種電動機車的成本相同時，並不一定要使用充電較快的電動機車。

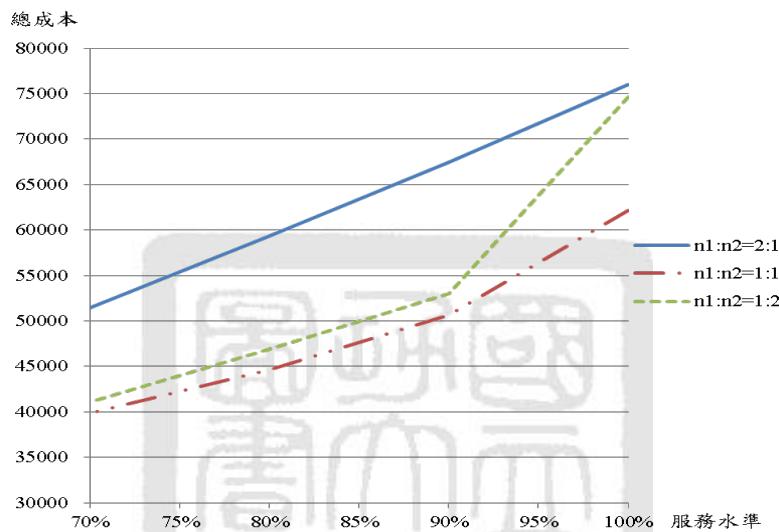


圖 4-5：情境一之不同耗充電比下，服務水準對總成本關係圖(Gurobi)

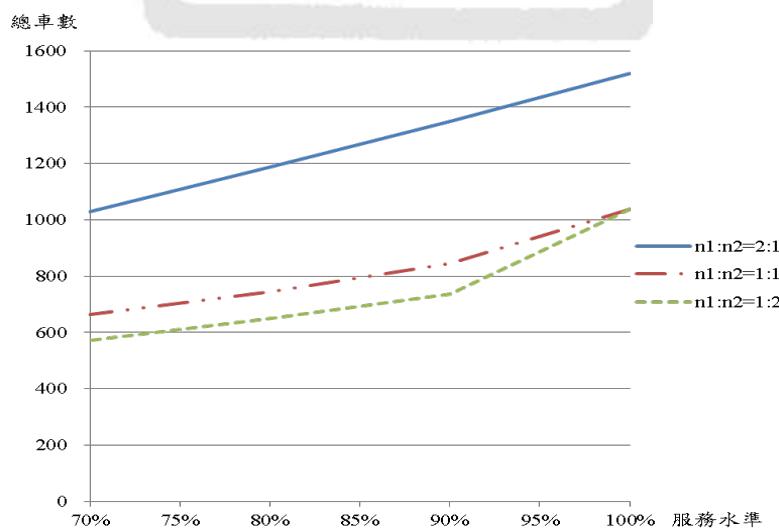


圖 4-6：情境一之不同耗充電比下，服務水準對總車數關係圖(Gurobi)

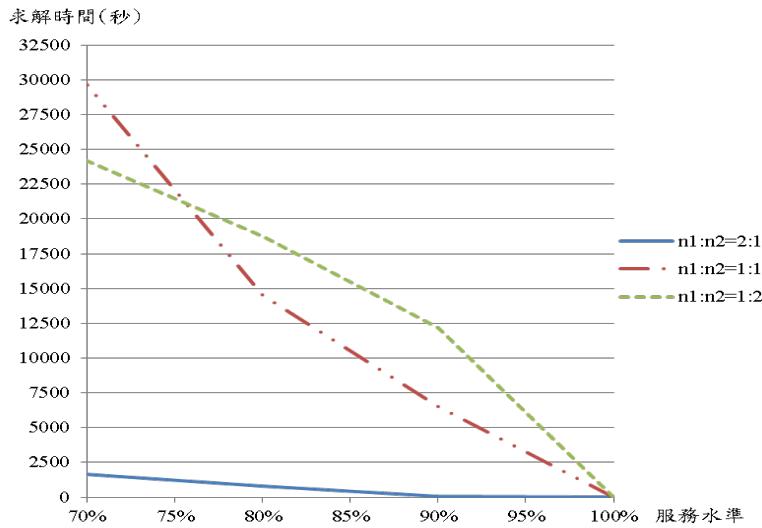


圖 4-7：情境一之不同耗充電比下，服務水準對求解時間關係圖(Gurobi)

圖 4-7 為不同耗充電比下，服務水準和求解時間之關係，可以明顯看出不論使用哪種耗充電比，隨著服務水準的降低求解時間會增加，推測這樣的結果是因為較低的服務水準其可行解區域較大，因此收斂時間較長。使用耗充電比 2:1 的電動機車其求解時間遠短於其它兩種耗充電比，只有在服務水準 100%時，三種耗充電比的求解時間差異不大，約 1 到 2 秒內即可求出最佳解，而在服務水準 70%時，使用耗充電比 1:1 的求解時間較長，在其它情況時，則是使用耗充電比 1:2 的求解時間較長。以耗充電比 1:2 為例，欲達到 100%、90%、80%、70%的服務水準時，情境一平均求解時間分別為 2.05、12163.44、18749.00、24187.82 秒。

為了縮短低服務水準的求解時間，本研究以 PSOcp 來加速求解，並比較其與 Gurobi 求解之差異。使用 PSOcp 測試時我們皆設定 20 個粒子，迭代 300 次，其餘參數設定如表 4-4。在測試過程中，我們曾試圖改變 PSOcp 演算法的參數設定，但經試驗後發現改變參數對於演算法的作用不大，因此我們使用 Gurobi 高服務水準下的求解結果當部分粒子位置的初始值，希望能較快收斂到較好的解。以情境一作分析，表 4-8 到 4-10 為 R1、R2、R3 之 PSOcp 與 Gurobi 比較分析表。計算 PSO 與 Gurobi 解的差異公式如下：

$$\text{差異} = \frac{\text{PSO適應值-Gurobi目標值}}{\text{Gurobi目標值}}$$

根據下面三個表可發現無論哪種耗充電比或服務水準下，約 5000~8000 秒 PSOcp

可解到和 Gurobi 解之差異在大約 3%以內，而在某些情況下此差異為負值，這代表 PSOcp 的解比 Gurobi 該 gap 下的解更好，會發生這樣的情況是因為 Gurobi 求解太過費時，因此我們設定 Gurobi gap 達到 5%即停止，因此當 PSOcp 的解優於 Gurobi 時，就會導致再者在目標值的差異為負值。

表 4-8：R1 之 PSOcp 與 Gurobi 比較表

耗充電 比	服務 水準	PSOcp 適應值	PSOcp 求解時間 (秒)	Gurobi 目標值	Gurobi 求解時間 (秒)	Gurobi gap	PSOcp 與 Gurobi 差異
2:1	90%	67745.62	5821.83	67094.00	20.05	0.03%	0.97%
2:1	80%	60018.55	6297.28	58998.00	840.11	0.00%	1.73%
2:1	70%	51868.64	6329.70	50922.00	864.91	0.00%	1.86%
1:1	90%	51130.08	6524.30	50313.00	4544.83	0.00%	1.62%
1:1	80%	46817.21	7238.31	44256.00	10660.53	0.00%	5.79%
1:1	70%	39063.79	5938.66	40110.28	30785.36	4.77%	-2.61%
1:2	90%	54826.28	6826.46	52332.69	12199.07	0.00%	4.76%
1:2	80%	46950.59	5808.56	46582.29	15491.58	0.14%	0.79%
1:2	70%	40793.55	5691.95	40703.04	8492.17	0.00%	0.22%

表 4-9：R2 之 PSOcp 與 Gurobi 比較表

耗充電 比	服務 水準	PSOcp 適應值	PSOcp 求解時間 (秒)	Gurobi 目標值	Gurobi 求解時間 (秒)	Gurobi gap	PSOcp 與 Gurobi 差異
2:1	90%	68434.95	5985.81	67506.53	57.54	0.13%	1.38%
2:1	80%	60185.61	5909.99	59366.78	801.42	0.10%	1.38%
2:1	70%	51691.82	5514.83	51787.20	2819.01	1.15%	-0.18%
1:1	90%	52846.55	7570.81	50601.58	8039.49	0.08%	4.44%
1:1	80%	45199.71	6703.75	44540.63	17637.44	0.14%	1.48%
1:1	70%	38999.89	6304.93	38889.57	26468.86	1.27%	0.28%
1:2	90%	54621.47	7115.50	52573.99	10316.44	0.02%	3.89%
1:2	80%	46996.79	6808.08	46745.16	28316.33	0.04%	0.54%

1:2	70%	41262.56	6658.62	41394.80	33717.11	1.23%	-0.32%
-----	-----	----------	---------	----------	----------	-------	--------

表 4-10：R3 之 PSOcp 與 Gurobi 比較表

耗充電 比	服務 水準	PSOcp	PSOcp	Gurobi	Gurobi	Gurobi	PSOcp
		適應值	求解時間 (秒)	目標值	求解時間 (秒)	gap	與 Gurobi 差異
2:1	90%	68800.75	8194.16	67846.00	49.36	0.00%	1.41%
2:1	80%	60722.67	6138.25	59676.35	712.58	0.02%	1.75%
2:1	70%	52873.17	6066.14	51478.00	1304.39	0.00%	2.71%
1:1	90%	52055.24	7358.61	50995.04	6990.32	0.22%	2.08%
1:1	80%	45555.91	6746.06	45259.85	15224.00	1.13%	0.65%
1:1	70%	41233.01	5755.32	40457.08	31782.92	4.57%	1.92%
1:2	90%	55490.06	6955.70	54116.37	13974.80	2.00%	2.54%
1:2	80%	47762.48	7344.96	47270.64	12439.10	0.28%	1.04%
1:2	70%	42020.54	5893.04	41247.36	30354.18	0.00%	1.87%

圖 4-8 和圖 4-9 是 PSO<sub>CP</sub> 的測試結果，詳細數據可參見附錄 A，以情境一 R1、R2、R3 的求解數值平均值和情境二 RR1、RR2、RR3 的求解數值平均值為例，分別探討使用不同耗充電比的電動機車對共享系統總成本和總車數之影響。

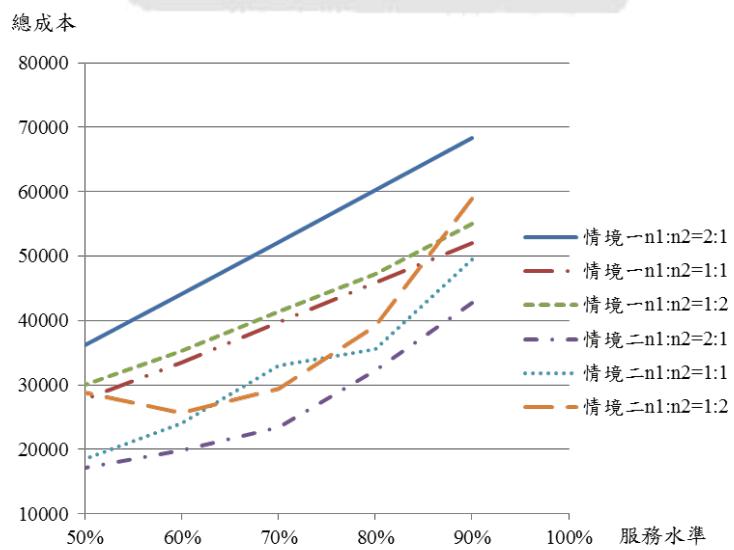


圖 4-8：不同耗充電比下，服務水準對總成本關係圖(PSO<sub>CP</sub>)

由圖 4-8 可明顯發現情境一在任何耗充電比下，系統需花費的總成本皆會隨服務水準降低而減少，這樣的結果與 Gurobi 測試的結果一致(圖 4-5)，一樣是使用耗充電比 1：1 的電動機車所花的總成本較低；而情境二是使用耗充電比 2：1 的電動機車所花的總成本較低。在耗充電比 1：2、服務水準 50%時， $PSO_{CP}$  收斂的解較差，造成總成本並非隨服務水準降低而平滑的下降。

若更進一步只考慮車數的情況如圖 4-9，可以發現情境一在任何服務水準下，使用耗充電比 1：2 的電動機車，期初擺放較少的電動機車即可達到同樣的服務水準，與 Gurobi 測試的結果一致(圖 4-6)，情境二僅在服務水準 50%時，使用耗充電比 1：1 的電動機車，期初擺放的車數較少，而在其餘服務水準下，一樣是使用耗充電比 1：2 的電動機車，期初擺放的車數較少。

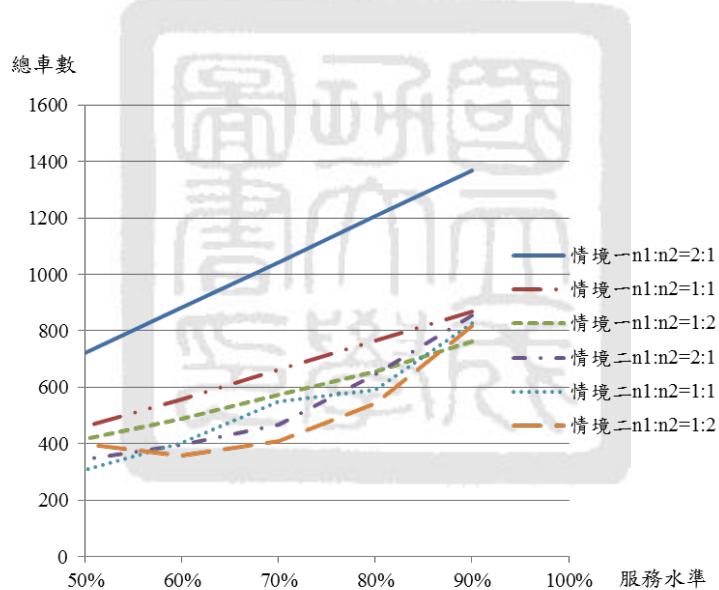


圖 4-9：不同耗充電比下，服務水準對總車數關係圖( $PSO_{CP}$ )

### 4.3.2 電池交換模式

在已知各期各租借站租借需求，給定電動機車固定單位成本  $C$ ，不考慮電池成本情況下，一樣先以 Gurobi 測試 3.2.2.2 節混整數規劃模式。本研究設定耗電速率 2 的電動機車單位成本為 50，耗電速率為 1 的電動機車單位成本為 60，是耗電速率 2 之電動機車成本的 1.2 倍。

下表 4-11 為 R1 之 Gurobi 求解數值表，當服務水準為 100%時，不論耗電速率為

多少，求解時間都很快，約 2 秒內就可以解到最佳解(gap=0%)。然而，隨著服務水準降低時，求解時間將變得很長，即使是以 warm start 的方式來進行 Gurobi 求解，其求解效率亦改善不大。以服務水準 80%為例，在求解到 100000 秒時，耗電速率為 2 的 gap 值僅達到 39.43%，耗電速率為 1 的 gap 值僅達到 40.91%，與本研究預設的 gap 接受值 5%還相差很遠。

表 4-11：R1 之 Gurobi 求解數值表

耗電速率	服務水準	目標值	總車數	總電池交換次數	求解時間(秒)	gap
2	100%	52050.00	1041.00	3289.00	0.42	0.00%
2	90%	35293.11	705.86	3127.39	100000.80	10.96%
2	80%	41263.21	825.26	3209.21	100000.23	39.43%
1	100%	62460.00	1041.00	1525.54	1.89	0.00%
1	90%	47323.46	788.72	1339.69	100000.18	20.52%
1	80%	50579.18	842.99	1336.62	100000.09	40.91%

為了提升求解效率與求解品質，本研究以  $PSO_{BE}$  來加速求解，並比較與 Gurobi 求解之差異。使用  $PSO_{BE}$  測試時我們亦使用 20 個粒子，迭代 300 次，並以 Gurobi 高服務水準下的求解結果當部分粒子的初始位置值。由於 Gurobi 求解效果不佳，在此僅以 R1 之服務水準 80%、90%的測試例來比對分析，表 4-12 為 R1 之  $PSO_{BE}$  與 Gurobi 比較分析表。根據下表可以發現， $PSO_{BE}$  與 Gurobi 差異都呈負值，表示  $PSO_{BE}$  花 8000 多秒就能解到比 Gurobi 當前 gap 值下的解還好，由此可突顯採用  $PSO_{BE}$  求解電池交換模式效果不錯。

表 4-12：R1 之  $PSO_{BE}$  與 Gurobi 比較表

耗電 速率	服務 水準	$PSO_{BE}$ 適應值	$PSO_{BE}$ 求解時間 (秒)	Gurobi 目標值	Gurobi 求解時間 (秒)	Gurobi gap	$PSO_{BE}$ 與 Gurobi 差異
2	90%	35013.92	8916.20	35293.11	100000.80	10.96%	-0.79%
2	80%	26705.28	8603.33	41263.21	100000.23	39.43%	-35.28%
1	90%	44053.84	8596.25	47323.46	100000.18	20.52%	-6.91%

1	80%	31556.64	8815.57	50579.18	100000.09	40.91%	-37.61%
---	-----	----------	---------	----------	-----------	--------	---------

圖 4-10 到圖 4-12 為 PSO<sub>BE</sub> 測試結果，詳細數據可參見附錄表 B，以情境一 R1、R2、R3 的求解數值平均值和情境二 RR1、RR2、RR3 的求解數值平均值為例，探討使用不同耗電速率的電動機車對共享系統總成本、總車數、總電池交換次數之影響。

根據圖 4-10，情境一和情境二不論在任何服務水準下，使用耗電速率為 2 的電動機車共享系統需花費的總成本遠低於耗電速率為 1 的電動機車，推測發生這樣的情況可能是因為耗電速率為 2 的電動機車單位成本本來就比較低，而非期初擺放的車數真的比較少，其對應的總車數的比對分析可見圖 4-11。另外，兩種情境在降低服務水準時，系統需花費的總成本大致上是呈遞減的，僅在情境二下，耗電速率為 2、服務水準為 50% 和耗電速率為 1、服務水準為 60% 時呈現不平滑的情況，我們猜測這樣的結果可能肇因於三筆測試資料尚未收斂到比較好的解，以至於需花費較多成本。

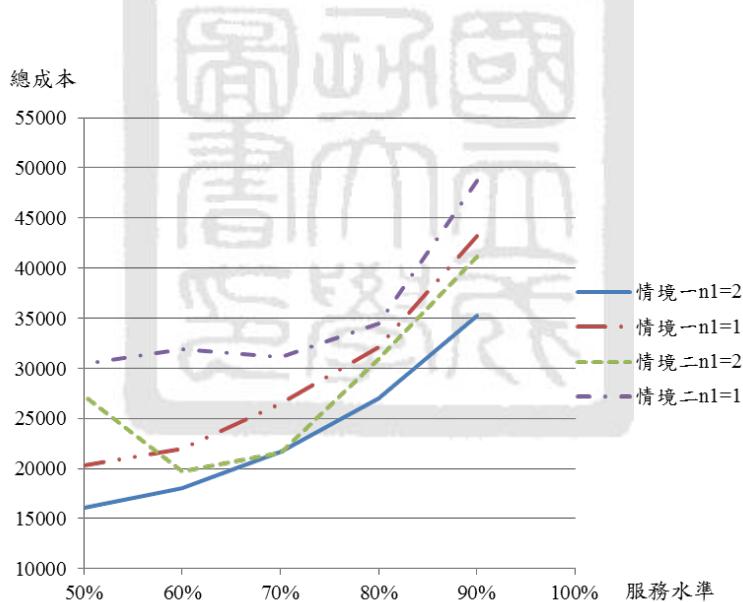


圖 4-10：不同耗電速率下，服務水準對總成本關係圖(PSO<sub>BE</sub>)

圖 4-11 顯示求解結果之總車數變化，以情境一而言，在任何服務水準下，使用耗電速率 2 和耗電速率 1 的電動機車相比下差異並不大。以情境二而言，服務水準 60% 和 70% 時，耗電速率 2 的解平均收斂的特別好，與耗電速率 1 的解相差 138 和 87 台車；然而，在其它服務水準時，則和情境一一樣，耗電速率對總車數影響不大，因此可以推斷兩種耗電速率總成本差異較大是受其不同單位成本的影響較大。由不同耗電速率

時，各服務水準下的總車數差異不大的結果看來，本研究推測只要一定數輛的車數即能達到設定的服務水準。由於本研究目前未考慮電池成本，當有車卻電力不足時，只要透過電池交換的方式即可租出，而這些電池充電的花費我們並未納入考量，將來應該同時考慮電動機車和電池的單位成本才會使共享系統的營運規劃更完整。

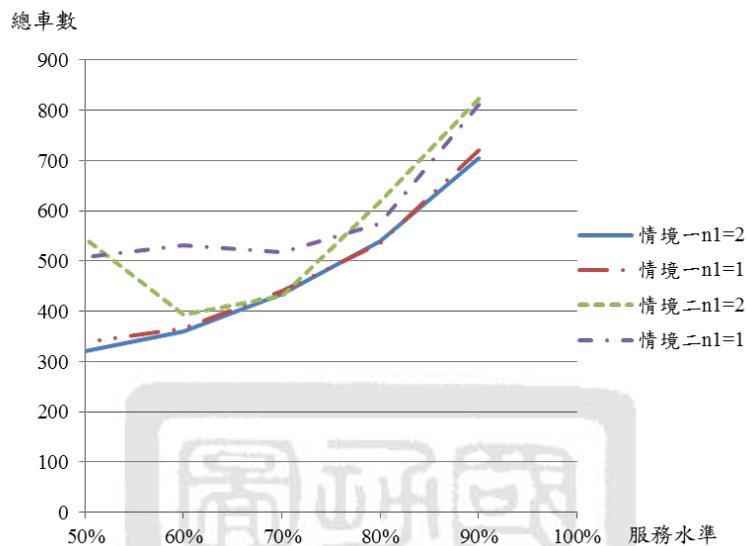


圖 4-11：不同耗電速率下，服務水準對總車數關係圖(PSO<sub>BE</sub>)

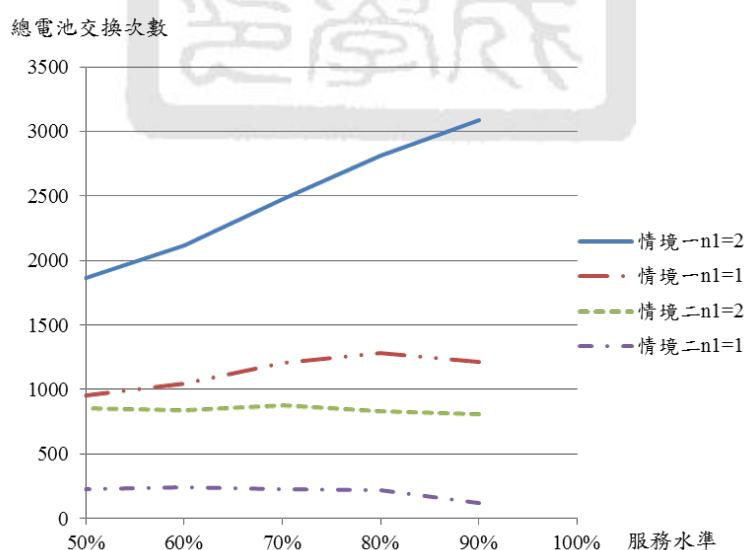


圖 4-12：不同耗電速率下，服務水準對總電池交換次數關係圖(PSO<sub>BE</sub>)

最後我們探討使用不同耗電速率對電池交換設施的使用頻率影響，由於我們的模

式未考慮電池成本，相當於電池個數無數量限制，因此以總電池交換次數來衡量對電池交換設施的頻率。由上圖 4-12 可以看出，不論在任何服務水準下，使用耗電速率為 2 的電動機車在整個共享系統中總電池交換次數較多。此結果相當合理，因為使用耗電較快的電動機車，較會導致低於可租出電量門檻的電動機車數量比較多，因此更會透過交換電池來讓這些車變成充滿電再租出以達到設定的服務水準。而使用耗電速率 2 的電動機車共享系統中總電池交換次數約是使用耗電速率 1 的電動機車兩到四倍左右，若進一步考慮電池成本和交換電池的成本時，這將會是影響整個系統總成本的關鍵因素之一。

### 4.3.3 充電柱 VS. 電池交換模式

本研究因電動機車電池補充電量的方式不同，提出了充電柱和電池交換模式，在個別測試完兩種模式的數值後，我們將以  $PSO_{CP}$  和  $PSO_{BE}$  求解結果比較兩種模式差異。

首先探討兩模式在不同耗電速率(耗電速率分別為 1 和 2)下對共享系統的影響，以情境一 R1、R2、R3 求解結果平均值為例，在不同服務水準時所求出的總車數，如圖 4-13 所示，不論是哪種模式或哪種耗電速率下，較高的服務水準皆需要較多的電動機車才能達到該要求，相當符合常理判斷。而不管耗電速率為 1 或 2 時，採用電池交換模式的總車數皆較少，這是因為當電池電量低於可租出門檻時，電池交換模式可以透過交換電池使該台車仍可出租，但若採用充電柱模式時則必須將其充電而無法馬上出租，因此需要較多的電動機車才能達到相同的服務水準。

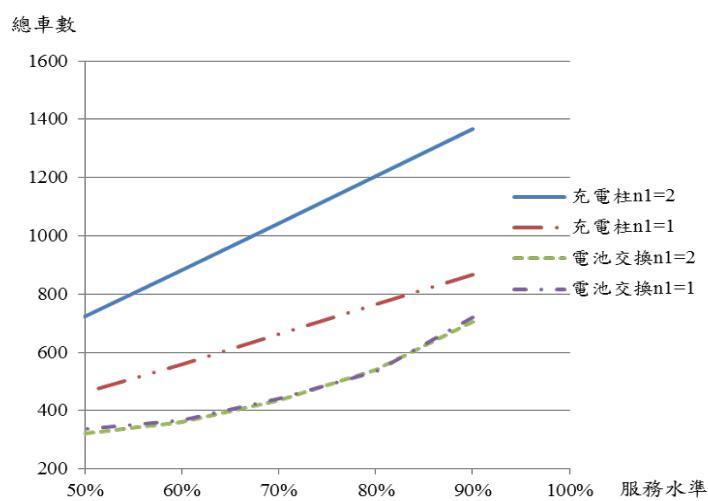


圖 4-13：情境一之兩種模式不同耗電速率下，服務水準對總車數關係圖

若以情境二 RR1、RR2、RR3 求解結果平均值為例，如圖 4-14 所示，在耗電速率為 2 情況下，服務水準高於 60% 時，採用電池交換模式的總車數較少；反之，服務水準低於 60% 時，採用充電柱模式的總車數較少；在耗電速率為 1 情況下，服務水準高於 70% 時，採用電池交換模式的總車數較少；但服務水準低於 70% 時，採用充電柱模式的總車數較少，這樣的結果可推論當不需要滿足很多租借需求時，使用充電柱模式即可滿足一定程度的需求。

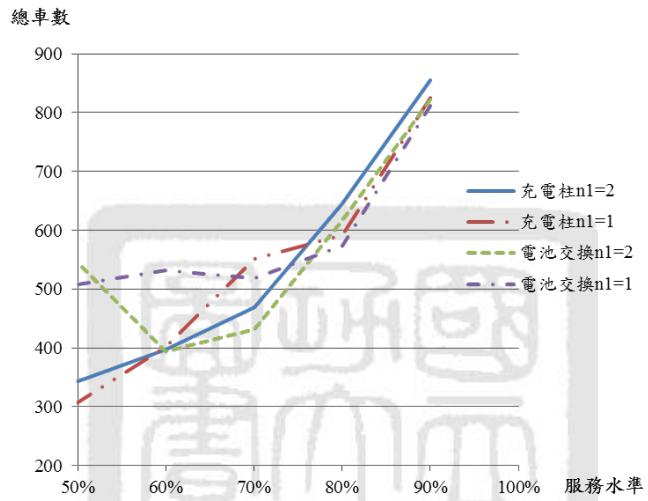


圖 4-14：情境二之兩種模式不同耗電速率下，服務水準對總車數關係圖

#### 4.3.4 小結

本章先介紹電動機車共享系統租借之時空網路，本研究利用高雄市 Cbike 租借站位置資料來建構共享系統的網路，接著介紹參數設定，為了讓參數更符合實際情況，本研究參考了電動機車實際使用情況，另外也說明本研究的租借需求資料之產生方式，最後利用最佳化軟體 Gurobi 和 PSO<sub>CP</sub> 和 PSO<sub>BE</sub> 演算法求解電動機車共享系統的車輛佈署問題，並比較分析兩種求解方式之差異。在數值測試過程中發現，當高服務水準(接近 100%)時，採用 Gurobi 可以很快求出最佳解，反之降低服務水準時，採用 PSO<sub>CP</sub> 和 PSO<sub>BE</sub> 求解效率較佳。

## 第五章

# 結論與未來研究方向

### 5.1 結論與貢獻

綠色交通近年來已成為國際間矚目議題，推行綠色交通不但能節能減碳，減少環境汙染，同時也能減少交通擁塞。綠色交通提倡載具共享的觀念，依載具大小可分成汽車、機車、自行車，由於機車具有類似自行車不佔空間、方便騎乘停靠的機動特性，又較自行車快捷舒適，若是輔以環保電力驅動，確實比汽車及自行車更適合成為都會區的共享載具，我們預期電動機車共享系統將會成為繼自行車共享系統之後的新一代都會區的綠色交通系統，成為與大眾運輸系統結合的最初及最後一哩路程之接駁代步工具。本研究想要探討電動機車共享系統的營運模式，鎖定探討期初各租借站最佳之擺置車輛數、電池充耗電速率和充電方式，這些決策將會影響整個共享系統的運作。

在文獻探討的部分，我們首先回顧電動機車產業的發展背景，接著介紹國內外的產業現況與電源補充設施及其充電方式的相關研究。由於電動機車共享系統相關議題新穎，鮮少直接相關文獻，我們大多參考公共自行車共享系統的文獻，綜合比較不同載具之共享系統的異同及利弊得失，並加入電動機車的電力考量，以 Shu et al. (2013) 和廖敏婷 (2012) 所提出的模式為基礎，同時參考 Lin and Yang (2011) 提出的服務水準概念。

本研究試圖將過去自行車共享系統之相關研究及營運經驗運用在電動機車共享系統上，期望可提出完善且符合現實的電動機車共享系統規劃，以提高共享系統的使用率，同時也能增加國人對大眾運輸系統的滿意度。在模式建構部分，本研究在已知租借需求起訖點和所需花費的成本下，考慮電池耗、充電速率，以起訖需求之相對比例關係來合理分配流量，依電動機車補充電量的方式不同，建構兩混整數規劃模式，分別為充電柱模式和電池交換模式。兩模式皆在求解各租借站期初最佳擺置車輛數，利用這兩個模式可求得在不同期數下，各租借站不同電池狀態下順利租出和未被租借的電動機車數，同時也可求得在哪些租借站會發生未滿足的需求。透過充電柱模式可知

此未滿足的需求是因為有車但電量不足或是原本就車輛不足所造成的，而電池交換模式的未滿足需求則皆來自於原本就車輛不足所造成；此外，電池交換模式還可求出在各期各租借站電池交換的次數，未來可進一步衡量電池交換設施的使用率。

透過第 4 章的數值測試，本研究發現隨著共享系統的規模擴大和不同的參數設定會使 Gurobi 求解時間變長，即使以 warm start 的方式進行求解，仍無法提昇求解效率。為了提升求解效率，本研究發展了  $\text{PSO}_{CP}$  和  $\text{PSO}_{BE}$  演算法來加快求解，經嘗試後發現使用 20 個粒子，迭代 300 次，並以 Gurobi 高服務水準下的解當部分粒子位置的初始值，即可收斂到不錯的結果。在充電柱模式中， $\text{PSO}_{CP}$  與 Gurobi 的解差異大多低於 3% 內，且在較低服務水準的情況下， $\text{PSO}_{CP}$  僅需數千秒的求解時間即可求得品質極佳之解；在電池交換模式中，Gurobi 在求解服務水準 90% 以下的測試例時，其求解品質都不好，即使求解時間長達十萬秒時，gap 值仍遠大於設定的 5%；反之，若採用  $\text{PSO}_{BE}$  求解同一測試例，可在數千秒時間內即可收斂到比 Gurobi 求解十萬秒更好的解。目前  $\text{PSO}_{CP}$  和  $\text{PSO}_{BE}$  的表現還不錯，但仍有改善空間，若要確保能收斂到更好的解或是求解更大規模的共享系統，勢必再要增加粒子數、迭代次數，然而如此一來求解時間也會隨之拉長。

本研究利用「均勻需求」與「尖離峰、大小站需求」等兩種情境，各產生三筆租借需求資料對充電柱和電池交換模式進行數值測試，針對測試結果分析不同耗電與充電速率對服務水準與總成本、總車數和求解時間的影響。在「充電柱模式」下，若提高服務水準的要求，則期初須擺置較多車輛，總成本較高；使用 Gurobi 求解時，高服務水準的求解時間較短。此外，在任何服務水準下，使用耗充電比 2 : 1 的電動機車，其求解時間較短。除了情境二在服務水準 50% 以外，情境一和情境二在其它服務水準下，使用耗充電比 1 : 2 的電動機車時，期初擺放較少的電動機車即可達到同樣的服務水準。在「電池交換模式」下，不論任何服務水準，使用耗電速率 2 的電動機車需花費的總成本遠低於使用耗電速率 1 的電動機車。由於未考慮電池成本，我們發現不同耗電速率在各服務水準下的總車數差異並不大，表示只要一定數輛的車數就夠達到設定的服務水準，當有車卻電力不足時，透過電池交換的方式，該車還是可以被租出；而使用耗電速率 2 的車時，其總電池交換次數是使用耗電速率 1 的兩到四倍左右。最後我們比較充電柱和電池交換模式，以情境一而言，不管耗電速率 1 或 2，任何服務水準下，採用電池交換模式的總車數較少，以情境二而言，當不需要滿足很多租借需

求時，反而使用充電柱模式的總車數較少。

## 5.2 未來研究方向

至目前為止，本研究雖對公共電動機車共享系統的租借網路做整體探討，但仍有未臻完善之處，以下列舉幾個未來可延伸之議題：

1. 考慮連續型電力的情況：本研究為了簡化模式之建構，假設電力消耗或補充呈 Step 型變動，可能會與實際情況有些許出入，未來可以連續型電力來模式化，可能會變得複雜許多。
2. 加入電池成本考量的電池交換模式：本研究在電池交換模式中，並未考慮電池的成本，相當於有無限量的電池可供交換，只要需要交換電池就能換到一充滿電的電池，較不符合實際，若加入電池單位成本，可進一步推估各電池交換設施應該擺置多少電池，才能最符合經濟效益。
3. 考慮電池交換設施中的電池充電速率：本研究在電池交換模式中，僅考慮到電動機車電池的耗電速率，並未考慮到交換後電力低於可租出門檻的電池需要在電池交換設施中充電多久才能再被交換。舉例來說，可以增加一參數表示電力不足的電池經過幾期時間的充電，即可變成充飽電的電池以供交換，若加入此考量後，會讓電池交換模式更貼近現實。
4. 考慮騎乘距離，每個租借需求有不同的耗電速率：本研究目前並未考慮租借者在兩借站的騎乘距離，僅假設若騎乘在任意可相連的兩站間會消耗固定的電力，即減少固定的電池狀態個數。未來可以進一步考慮每個租借需求的騎乘距離，舉例來說，有 50%的租借需求，耗電速率為 2，即經過一期電動機車的電池狀態會減少 2 格；有 20%的租借需求，會在兩租借站間繞來繞去，騎乘距離較遠，耗電速率為 3；有 30%的租借需求，耗電速率為 1，表示在兩租借站間騎乘距離較短，只會減少 1 個電池狀態。
5. 租借需求起訖點配對資料量取得：租借需求是影響整個共享系統運作的關鍵因素，本研究假設已知租借需求起訖點資料，但未對真正的租借需求資訊取得多加著墨，僅以隨機產生的方式來配置租借需求起訖點，未來在共享系統建置前可透過問卷發放等方法，實際調查潛在租借者的需求分布，若能取得

真實的租借需求資訊，會讓求解結果更具有參考價值。

6. **混合充電柱和電池交換模式**：本研究目前都是純充電柱模式或純電池交換模式，即所有租借站都是設置充電柱或電池交換設施，並未考慮在一共享系統中，有些租借站是設置充電柱，有些租借站則是設置電池交換設施。若能建構混合的模式，可使模式更有彈性，可能會比純充電柱模式或純電池交換模式表現較佳，因為在需求多的租借站可以設置電池交換設施，可以快速的將無法租出的車變成可租出的車，反之，在需求少的租借站可能只要設充電柱就可以滿足少量的租借需求。



# 參考文獻

## 中文文獻

王俊偉(2011),「以系統模擬探討公共自行車租借系統之建置及營運策略」，國立成功大學工業與資訊管理學系碩士論文。

李其風(1997),「電動機車電瓶交換站配置方式之研究」，國立交通大學交通運輸所碩士論文。

林柔昕(2011),「電動汽機車旅運需求電力供應設施規劃」，國立成功大學交通管理學系碩士論文。

洪菁蓬(2011),「公共自行車租借系統之最佳租借站位址設置及車輛運補策略之研究」，國立成功大學工業與資訊管理學系碩士論文。

徐嘉悅(2011),「電動機車能源場站設置規畫之研究：以台灣澎湖為例」，雲林科技大學全球運籌管理研究所碩士論文。

許家興(2009),「電動車電池類型與電池基礎介紹」，車輛研測資訊，頁13-18。

張立蓁(2010),「都會區公共自行車租借系統之設計與營運方式研究」，國立成功大學交通管理學系碩士論文。

廖敏婷(2012),「考慮需求比例及暫時人力配置之公共自行車租借系統管理策略研究」，國立成功大學工業與資訊管理學系碩士論文。

## 英文文獻

Ahuja, R. K., Magnanti, T. L. and Orlin, J. B.(1993), Network flows : theory, algorithms, and applications, Prentice-Hall, New Jersey.

Benchimol, M., Benchimol, P., Chappert, B., De La Taille, A., Laroche, F., Meunier, F., and Robinet, L.(2011), Balancing the stations of a self-service bike hire system, RAIRO-Operations Research.

Brown, S., Pyke, D., and Steenhof, P.(2010), Electric vehicles : The role and importance of standards in an emerging market, Energy Policy, 38(7), 3797-3806.

Campbell, A., Clarke, L., Kleywegt, A. and Savelsbergh, M.(1998), The inventory routing problem, In T. Crainic and G. Laporte, editors, Fleet Management and Logistics, Kluwer Academic Publishers.

Chemla, D., Meunier, F. and Calvo, R. W.(2010), Balancing a bike-sharing system with multiple vehicles.

Church, R. L. and ReVelle, C. S.(1976), Theoretical and computational links between the p-median,location setcovering and the maximal covering location problem, Geographical Analysis, 8, 406-415.

Dantzig, G. and Ramser, J.(1959), The truck dispatching problem, Management Science, 6(1), 80-91.

Daskin, M. and Owen, S.(1999), Location models in transportation, Handbook of Transportation Science, 311–360.(Boston/Dordrecht/London : Kluwer Academic Publishers)

Deif, I. and Bodin, L.(1984), Extension of the Clarke and wright algorithm for solving the vehicle routing problem with backhauling, Kidder, Proceedings of the Babson Conference on Software Uses in Transportation and Logistic Management, 75-96.

Demetsky, M. and Lin, B. B. M.(1982), Bus stop location and design, Transportation Engineering Journal of ASCE, 108, 313-327.

Edelstein, M., and Melnyk, M.(1977), The Pool Control System, Interfaces, 8(1-Part-2), 21-36.

Ernst, A. T., Gavrilouk, E. O. and Marquez, L.(2011), An efficient lagrangean heuristic for rental vehicle scheduling, Computers and Operations Research, 38(1), 216-226.

Federgruen, A. and Zipkin, P.(1984), A combined vehicle routing and inventory allocation problem, Operations Research, 32, 1019-1032.

Fink, A. and Reiners, T.(2006), Modeling and solving the short-term car rental logistics problem, Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 42(4), 272 – 292.

Fu, T. T.(2008), A multi-criteria parametric evaluation of the refuelling strategies for scooters, Journal of Engineering Design, Volume 19, Issue 3.

Golden, B. L., Baker, E. K., Alfaro, J. L. and Schaffer, J. R.(1985), The vehicle routing problem with backhauling:two approaches, working paper MS/S 85-017, University of Maryland, College Park.

Hakimi, S. L.(1964), Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. Operations Research, 12(3), 450-459.

Hokey, M.(1989), The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points, Transportation Research Part A : General, 23(5), 377-386.

Laporte, G., Mesa, J. A., and Ortega, F. A.(2000), Optimization methods for the planning of rapid transit systems, European Journal of Operational Research, 122(1), 1-10.

Li, Z. and Tao, F.(2010), On determining optimal fleet size and vehicle transfer policy for a car rental company, Computers & Operations Research, 37(2), 341-350.

Lin, J. R. and Yang, T. H.(2011), Strategic Design of Public Bicycle Sharing Systems with Service Level Constraints, Transportation Research Part E, 47(2), 284-294.

Lin, J. R., Yang, T. H. and Chang, Y. C.(2013), A Hub Location Inventory Model for Bicycle Sharing System Design: Formulation and Solution, Computers & Industrial Engineering, 65(1), 77-86.

Murray, A. T.(2001), Strategic analysis of public transport coverage, Socio-Economic Planning Sciences, 35(3), 175-188.

Rado, F.(1988), The euclidean multifacility location problem. Operations Research, 36(3), 485-492.

Raviv, T., Tzur, M., and Forma, I. A.(2010), Static Repositioning in a Bike-Sharing System : Models and Solution Approaches, Working Paper.

Pachon, J. E., Iakovou, E., Ip, C., and Aboudi, R.(2003), A Synthesis of Tactical Fleet Planning Models for the Car Rental Industry, IIE Transactions, 35(9), 907-916.

Pachon, J., Iakovou, E. and Chi, I.(2006), Vehicle fleet planning in the car rental industry, Journal of Revenue and Pricing Management, 5(3), 221-236.

Xu, H., Chen, Z. L., Rajagopal, S. and Arunapuram, S.(2003), Solving a practical pickup and delivery problem, Transportation Science, 37, 347-364.

Wang, Y. W.(2007), An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations, Transportation Research Part D : Transport and Environment, 12(3), 231-237.

Wang, Y. W.(2008), Locating battery exchange stations to serve tourism transport : A note, Transportation Research Part D 13 193-197.

Wang, Y. W.(2008), Simulation of service capacity an electric scooter refueling system, Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 13, Issue 2, Pages 126–132.

Shu, J., Chou, M., Liu, Q., Teo, C. P., and Wang, I. L.(2013), Models for Effective Deployment and Redistribution of Bicycles within Public Bicycle-Sharing Systems, Operations Research (accepted in Aug, 2013).

## 網站資料

BP Statistical Review of World Energy : <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7>

[500&contentId=7068481](#)

Electric Bikes Worldwide Reports(EBWR) : <http://www.ebwr.com/>

IEK 產業情報網 : <http://ieknet.iek.org.tw/signoff.do>

International Energy Agency(IEA) : <http://www.iea.org/>

TES 電動機車產業網站 : <http://proj.moeaidb.gov.tw/lev/default.asp>

台灣電動車產業聚落交流平台 : <http://www.ev.org.tw/Home/Index>

綠色能源產業資訊網 : <http://www.taiwangreenenergy.org.tw/>

電動機車聯合測試服務中心 : <http://www.tes.org.tw/index.htm>

交通部網站 : <http://www.motc.gov.tw/>

經濟部工業局網站 : <http://www.moeaidb.gov.tw/external/view/tw/index.html>

經濟部能源局網站 : <http://www.moeaboe.gov.tw/>



## 附錄 A、PSO<sub>CP</sub> 求解數值

表 A-1 : R1 之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值表

耗充電比	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數
2:1	90%	67745.62	5821.83	1354.91	806.01
2:1	80%	60018.55	6297.28	1200.37	1605.26
2:1	70%	51868.64	6329.70	1037.37	2419.43
2:1	60%	43795.80	5376.38	875.92	3230.30
2:1	50%	35872.83	6558.66	717.46	4036.85
1:1	90%	51130.08	6524.30	852.17	803.06
1:1	80%	46817.21	7238.31	780.29	1438.20
1:1	70%	39063.79	5938.66	651.06	2420.60
1:1	60%	33247.02	6341.81	554.12	3229.81
1:1	50%	27604.65	6853.07	460.08	4036.94
1:2	90%	54826.28	6826.46	761.48	806.77
1:2	80%	46950.59	5808.56	652.09	1613.57
1:2	70%	40793.55	5691.95	566.58	2422.16
1:2	60%	35114.55	5441.78	487.70	3225.76
1:2	50%	30841.45	7053.02	428.35	3950.70

表 A-2 : R2 之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值表

耗充電比	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數
2:1	90%	68434.95	5985.81	1368.70	784.09
2:1	80%	60185.61	5909.99	1203.71	1602.34
2:1	70%	51691.82	5514.83	1033.84	2433.24
2:1	60%	43734.73	5517.17	874.69	3244.55
2:1	50%	36033.16	5286.20	720.66	4055.68
1:1	90%	52846.55	7570.81	880.78	810.59
1:1	80%	45199.71	6703.75	753.33	1621.20
1:1	70%	38999.89	6304.93	650.00	2428.33
1:1	60%	33286.09	5966.46	554.77	3236.47

1:1	50%	27591.85	6882.06	459.86	4053.19
1:2	90%	54621.47	7115.50	758.63	799.39
1:2	80%	46996.79	6808.08	652.73	1619.88
1:2	70%	41262.56	6658.62	573.09	2419.56
1:2	60%	35196.36	7363.93	488.84	3234.52
1:2	50%	29462.60	6954.59	409.20	4044.46

表 A-3 : R3 之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值表

耗充電比	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數
2:1	90%	68800.75	8194.16	1376.02	804.42
2:1	80%	60722.67	6138.25	1214.45	1635.61
2:1	70%	52873.17	6066.14	1057.46	2453.62
2:1	60%	44700.57	5223.55	894.01	3273.34
2:1	50%	36472.98	5324.04	729.46	4085.09
1:1	90%	52055.24	7358.61	867.59	815.09
1:1	80%	45555.91	6746.06	759.27	1635.95
1:1	70%	41233.01	5755.32	687.22	2455.19
1:1	60%	33847.24	10827.34	564.12	3270.91
1:1	50%	28015.44	6115.97	466.92	4091.26
1:2	90%	55490.06	6955.70	770.70	817.47
1:2	80%	47762.48	7344.96	663.37	1635.75
1:2	70%	42020.54	5893.04	583.62	2455.07
1:2	60%	35449.04	10232.70	492.35	3272.92
1:2	50%	29612.78	7476.65	411.29	4090.77

表 A-4 : RR1 之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值表

耗充電比	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數
2:1	90%	42854.85	6704.65	857.10	335.63
2:1	80%	29719.99	6773.42	594.40	671.29
2:1	70%	23117.16	6647.53	462.34	996.81
2:1	60%	19760.08	6454.17	395.20	1342.31

2:1	50%	15533.81	6202.08	310.68	1671.44
1:1	90%	49386.23	7751.68	823.10	334.55
1:1	80%	33312.56	8044.76	555.21	669.01
1:1	70%	38434.43	8184.95	640.57	598.50
1:1	60%	29628.65	7902.63	493.81	820.52
1:1	50%	24269.87	7742.86	404.50	1092.80
1:2	90%	58891.31	8055.81	817.93	332.76
1:2	80%	37585.63	7885.57	522.02	670.51
1:2	70%	28483.21	7941.20	395.60	1006.79
1:2	60%	18126.53	8106.49	251.76	1302.78
1:2	50%	36364.52	8084.29	505.06	759.00

表 A-5 : RR2 之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值表

耗充電比	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數
2:1	90%	42077.20	6922.15	841.54	339.78
2:1	80%	32054.03	6724.97	641.08	680.31
2:1	70%	23557.77	6376.91	471.16	1018.08
2:1	60%	19508.49	6845.35	390.17	1361.50
2:1	50%	17161.73	6585.05	343.23	1584.53
1:1	90%	48503.51	7897.95	808.39	340.27
1:1	80%	34538.73	8249.90	575.65	677.23
1:1	70%	30065.76	7224.85	501.10	888.91
1:1	60%	21798.07	7645.77	363.30	1017.09
1:1	50%	15599.50	7789.59	259.99	1445.65
1:2	90%	58572.64	8089.87	813.51	335.00
1:2	80%	37285.05	8469.33	517.85	680.42
1:2	70%	25531.25	7070.39	354.60	1020.46
1:2	60%	28694.66	7526.15	398.54	1015.19
1:2	50%	16358.70	7657.94	227.20	1472.97

表 A-6 : RR3 之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值表

耗充電比	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數
2:1	90%	43423.09	6390.69	868.46	342.56
2:1	80%	35088.44	7656.61	701.77	687.26
2:1	70%	23712.07	7238.46	474.24	1034.62
2:1	60%	20370.30	6518.16	407.41	1378.94
2:1	50%	18893.65	6460.27	377.87	1655.45
1:1	90%	50724.11	6765.55	845.40	342.25
1:1	80%	38722.18	8191.88	645.37	641.24
1:1	70%	30704.99	7018.75	511.75	845.05
1:1	60%	20845.61	6349.30	347.43	1378.01
1:1	50%	15453.77	6302.71	257.56	1495.40
1:2	90%	59303.56	6803.06	823.66	344.33
1:2	80%	42648.47	8413.14	592.34	688.58
1:2	70%	34215.74	7427.65	475.22	965.12
1:2	60%	30386.76	6841.49	422.04	883.04
1:2	50%	33754.91	6311.38	468.82	984.39

表 A-7 : 情境一(R1、R2、R3)之 PSO<sub>CP</sub> 求解數值平均值表

耗充電比	服務水準	適應值	總車數
2:1	90%	68327.11	1366.54
2:1	80%	60308.94	1206.18
2:1	70%	52144.54	1042.89
2:1	60%	44077.03	881.54
2:1	50%	36126.33	722.53
1:1	90%	52010.62	866.84
1:1	80%	45857.61	764.29
1:1	70%	39765.56	662.76
1:1	60%	33460.12	557.67
1:1	50%	27737.31	462.29
1:2	90%	54979.27	763.60

1:2	80%	47236.62	656.06
1:2	70%	41358.88	574.43
1:2	60%	35253.32	489.63
1:2	50%	29972.28	416.28

表 A-8：情境二(RR1、RR2、RR3)之  $PSO_{CP}$  求解數值平均值表

耗充電比	服務水準	適應值	總車數
2:1	90%	42785.05	855.70
	80%	32287.49	645.75
	70%	23462.33	469.25
	60%	19879.63	397.59
	50%	17196.40	343.93
1:1	90%	49537.95	825.63
	80%	35524.49	592.07
	70%	33068.40	551.14
	60%	24090.78	401.51
	50%	18441.05	307.35
1:2	90%	58922.50	818.37
	80%	39173.05	544.07
	70%	29410.07	408.47
	60%	25735.98	357.44
	50%	28826.04	400.36

## 附錄 B、PSO<sub>BE</sub> 求解數值

表 B-1 : R1 之 PSO<sub>BE</sub> 求解數值表

耗電速率	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數	總電池交換次數
2	90%	35013.92	8916.20	700.28	803.18	3077.91
2	80%	26705.28	8603.33	534.11	1614.45	2794.13
2	70%	21466.31	8587.83	429.33	2422.76	2459.32
2	60%	17870.55	8567.92	357.41	3222.61	2101.66
2	50%	17623.22	8550.69	352.46	3393.83	2054.69
1	90%	44053.84	8596.25	734.23	806.92	1196.02
1	80%	31556.64	8815.57	525.94	1614.09	1311.47
1	70%	26857.22	8744.26	447.62	2413.71	1178.76
1	60%	21594.60	8806.33	359.91	3214.85	1045.68
1	50%	21297.46	8539.47	354.96	3295.95	1042.01

表 B-2 : R2 之 PSO<sub>BE</sub> 求解數值表

耗電速率	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數	總電池交換次數
2	90%	35503.11	8388.09	710.06	802.60	3064.45
2	80%	26906.14	8545.30	538.12	1619.48	2794.65
2	70%	21483.46	8343.97	429.67	2431.59	2470.38
2	60%	17947.75	8681.94	358.95	3244.35	2110.81
2	50%	15311.81	8288.92	306.24	4051.02	1755.23
1	90%	41244.38	8141.97	687.41	800.15	1235.88
1	80%	32349.14	8171.42	539.15	1621.17	1227.29
1	70%	26095.35	8209.72	434.92	2433.39	1227.14
1	60%	22577.68	8319.09	376.29	3234.79	1025.50
1	50%	20817.27	8399.96	346.95	3615.57	948.73

表 B-3 : R3 之 PSO<sub>BE</sub> 求解數值表

耗電速率	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數	總電池交換次數
2	90%	35116.73	8478.70	702.33	818.20	3120.37
	80%	27256.32	8468.71	545.13	1636.41	2854.65
	70%	22208.30	8356.67	444.17	2449.31	2507.55
	60%	18139.26	8616.10	362.79	3267.71	2126.77
	50%	15281.01	8294.35	305.62	4091.92	1777.34
1	90%	44403.15	8267.06	740.05	818.25	1214.74
	80%	32368.23	8218.84	539.47	1636.72	1312.09
	70%	26561.42	8229.07	442.69	2454.77	1209.87
	60%	21661.14	8372.49	361.02	3273.56	1056.41
	50%	18640.17	8453.20	310.67	4091.52	866.86

表 B-4 : RR1 之 PSO<sub>BE</sub> 求解數值表

耗電速率	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數	總電池交換次數
2	90%	39609.82	8340.43	792.20	335.11	807.16
	80%	31908.63	8455.75	638.17	597.12	814.16
	70%	17118.24	7940.80	342.36	1005.03	886.18
	60%	17137.20	8054.82	342.74	977.95	884.60
	50%	29899.30	8655.06	597.99	718.97	843.05
1	90%	47353.29	8493.55	789.22	335.34	112.84
	80%	30919.84	8238.61	515.33	671.09	243.13
	70%	35908.38	7883.56	598.47	807.10	201.04
	60%	26428.99	7943.35	440.48	845.89	254.99
	50%	27330.31	8062.22	455.51	898.95	236.93

表 B-5 : RR2 之 PSO<sub>BE</sub> 求解數值表

耗電速率	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數	總電池交換次數
2	90%	41461.65	8399.17	829.23	339.87	840.28
2	80%	33084.46	9516.93	661.69	658.13	796.86
2	70%	15460.77	8335.81	309.22	1019.81	909.50
2	60%	23255.17	8368.28	465.10	932.54	800.82
2	50%	24276.69	8802.26	485.53	732.49	882.17
1	90%	48786.25	8159.76	813.10	340.37	125.65
1	80%	29969.81	8093.80	499.50	680.76	257.73
1	70%	30937.06	8172.93	515.62	839.58	220.17
1	60%	36926.15	8285.06	615.44	688.05	252.49
1	50%	27556.36	8132.74	459.27	842.49	249.82

表 B-6 : RR3 之 PSO<sub>BE</sub> 求解數值表

耗電速率	服務水準	適應值	求解時間(秒)	總車數	總缺車數	總電池交換次數
2	90%	42351.70	8746.22	847.03	344.81	773.75
2	80%	27662.41	9727.01	553.25	686.84	890.65
2	70%	32067.46	7911.36	641.35	638.07	829.23
2	60%	18712.40	9965.34	374.25	1099.38	841.75
2	50%	27682.83	7892.66	553.66	778.29	839.96
1	90%	49972.22	8547.78	832.87	344.79	129.01
1	80%	42405.23	9719.55	706.75	601.07	161.58
1	70%	26382.01	7828.00	439.70	885.48	268.80
1	60%	32350.92	7817.06	539.18	784.38	222.75
1	50%	36531.16	7806.26	608.85	651.90	191.43

表 B-7：情境一(R1、R2、R3)之  $\text{PSO}_{BE}$  求解數值平均值表

耗電速率	服務水準	適應值	總車數	總電池交換次數
2	90%	35211.26	704.23	3087.57
	80%	26955.92	539.12	2814.48
	70%	21719.36	434.39	2479.09
	60%	17985.85	359.72	2113.08
	50%	16072.01	321.44	862.42
1	90%	43233.79	720.56	1215.55
	80%	32091.34	534.86	1283.62
	70%	26504.66	441.74	1205.26
	60%	21944.48	365.74	1042.53
	50%	20251.63	337.53	952.53

表 B-8：情境二(RR1、RR2、RR3)之  $\text{PSO}_{BE}$  求解數值平均值表

耗電速率	服務水準	適應值	總車數	總電池交換次數
2	90%	41141.06	822.82	807.06
	80%	30885.17	617.70	833.89
	70%	21548.82	430.98	874.97
	60%	19701.59	394.03	842.39
	50%	27286.28	545.73	855.06
1	90%	48703.92	811.73	122.50
	80%	34431.63	573.86	220.81
	70%	31075.82	517.93	230.01
	60%	31902.02	531.70	243.41
	50%	30472.61	507.88	226.06