

國立交通大學
交通運輸研究所

碩士論文

考量旅行時間可靠度之車輛途程問題
螞蟻族群演算法之應用

指導教授： 馮正民 老師

邱裕鈞 老師

研 究 生： 朱文正

中華民國九十二年六月

考量旅行時間可靠度之車輛途程問題

螞蟻族群演算法之應用

Vehicle Routing Problem with Travel Time Reliability

Application of Ant Colony System

研 究 生：朱文正

Student：Wen-Cheng Chu

指導教授：馮正民

Advisor：Cheng-Min Feng

邱裕鈞

Yu-Chiun Chio

國 立 交 通 大 學

交通運輸研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Traffic and Transportation

College of Management

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirement

For the Degree of

Master of Engineering

In

Traffic and Transportation

June 2003

Taipei, Taiwan, Republic of China

中華民國九十二年六月

考量旅行時間可靠度之車輛途程問題

螞蟻族群演算法之應用

研究生：朱文正

指導教授：馮正民

邱裕鈞

國立交通大學交通運輸研究所

摘 要

由於路網往往受到交通阻塞、違規停車或意外事故等因素影響，因此旅行時間並非是恆定不變的，故有學者開始研究考量隨機旅行時間之車輛途程問題。然而，考量隨機旅行時間車輛途程模式只能得到單一最佳路徑，無法有效反應規劃者需求，故本研究乃導入可靠度工程理論觀念，將路段旅行時間之不確定性轉換為「時窗可靠度」的概念，再結合傳統車輛途程模式，構建一「模糊多目標的車輛途程可靠度模式」，求解總旅行成本最小及總服務失敗機率最小(可靠度最大)之最佳路徑。鑑於螞蟻族群演算法(Ant Colony System)在 VRP 相關問題求解績效已獲得驗證，故本研究亦採用此演算法求解本研究模式。

本研究乃以小規模路網與大規模路網測試本研究模式：小規模路網乃是由 10 個節點所組成，當同時以本研究模式與軟時窗之車輛途程模式求解小規模路網，發現本模式所求得的路徑，其服務失敗機率為 5.8%，而軟時窗模式之服務失敗機率則為 30.33%，表示本模式結果能提供較可靠之指派路徑。同時由敏感度分析可知，(1)當要求之時窗可靠度水準增加，指派路徑會改變以提供更好的服務，而總旅行成本會隨之增加；(2)當個別顧客之時窗可靠度水準提高時，指派路徑會改變以提高其時窗可靠度；(3)當路段之旅行時間標準差變大時，會導至原路徑的旅行成本提高而使得指派路徑發生改變，以尋求準確性更高的路段。大規模路網乃是採用 Solomon 所提出的 R111 標竿範例，研究發現本研究模式可依不同之時窗可靠度水準，提供其最佳之路徑。

關鍵詞：時窗可靠度、車輛途程問題、螞蟻族群演算法

Vehicle Routing Problem with Travel Time Reliability

Application of Ant Colony System

Student : Wen-Cheng Chu

Advisor : Cheng-Min Feng

Yu-Chiun Chio

Institute of Traffic and Transportation
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Since the traffic conditions are affected by many factors such as congestion, illegal parking and incidents, travel time on urban network is often uncertain. The uncertainty of travel time begins to be taken into consideration by some researches on vehicle routing problems. That's so called stochastic vehicle routing problems (SVRP). However, SVRP could only provide an optimal route without further considering the different degree of punctuality required by different customers. Based on the theory of reliability engineering, this research proposes a vehicle routing model with time-window reliability (RTW-VRP) to find an optimal route which has the minimum travel cost and the minimum service failure (i.e. the maximum reliability). Besides, due to the proven excellent performance of Ant Colony System (ACS) in solving vehicle routing problems, this study employs ACS algorithm to solve RTW-VRP.

Two examples, one small-scale network with 10 nodes and another large-scale network with 100 nodes (the Solomon's R111 example), are experimented to validate the RTW-VRP model. The results of small-scale network show that the probabilities of service failure for the proposed RTW-VRP model and VRP model with soft time window (STW-VRP) are 5.8% and 30.33%, respectively. It implies that RTW-VRP model can provide a more reliable route. The results of sensitivity analysis also indicate that the model will provide an optimal route with better service reliability as the required reliability level getting stricter and an optimal route with more stable travel time as variance of travel time enlarging. The results of large-scale network also demonstrate that the RTW-VRP model can provide appropriate routes for different required reliability level.

Keyword : reliability engineering, vehicle routing problem, Ant Colony System.

誌 謝

首先感謝兩年來，所上老師們的傾囊相授，使學生如沐春風、受益良多。此外，感謝論文研討時，汪所長進財、曾教授國雄與許教授鉅秉所提出的批評與建議，使我能提早發現論文的缺失。

論文撰寫期間，非常感謝馮老師正民與邱老師裕鈞的起蒙，讓我能找到研究的方向與方法，研究過程的細心教導，讓我能逐步地完成今天的研究成果；特別是，馮老師介紹我閱讀相關書籍，使我能對問題有更多的了解而且省卻許多摸索的時間，有時更會利用週末時候，聽取我們的研究進度，時時鞭策我們前進，尤其是口試前的模擬，更讓我了解自己的缺點，而對口試能有更充分的準備；此外，特別感謝邱老師幾乎每週都抽空指導我，尤其在演算法與程式語言方面，由於老師的指導，讓我得以順利完成。

論文口試期間，感謝曾教授國雄與胡教授大瀛的寶貴建議，使得本論文能更趨於完善。尤其感謝曾老師對於研究模式的建議，同時指正論文的錯誤；感謝胡老師口試時提出的問題，字字切中要點；

研究所兩年中，感謝所辦洪小姐、柳小姐、助理何小姐玉鳳，和圖書館陳姐等的照顧與幫忙；感謝同門洋寧、吳老、書娟、詠凱，班上同學建華、衍偉、宏儒、老葉、小胖、家宇、家豪和室友維尼、龍哥等相互扶持，使得我的研究生涯不是孤單乏味的；感謝高中同學煌仕與我分享許多資源；感謝耀億堂哥的幫忙與電影；此外，還要感謝大頭學長、常找我吃美食的鈞妮學姐，大學同學阿芳、小真、蛋頭、逸君、洋鼎、桓聖、阿杰、范帥等等。有你們分憂解勞，使得異鄉的我堅強地撐過這段日子，生活也過得多姿多采，真的很高興也很幸運有群好朋友。大家不久便要各奔東西了，總有些許的不捨，但天下無不散的宴席，願祝每個人都能鵬程萬里、飛黃騰達。

最後，感謝我的家人，他們給予我一個美滿的家庭，讓我沒有後顧之憂，能夠全心投入在研究中，雖然每天都會被電話騷擾，但是有時卻又讓人特別的懷念。我想，很難以字句來表達心中的感激，特將此一成果與我的家人分享。

朱 文 正 謹誌于台北
中華民國九十二年六月

目 錄

中 文 摘 要.....	i
英 文 摘 要.....	ii
誌 謝	iii
目 錄	iv
表 目 錄	vi
圖 目 錄	vii
一、緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究方法與範圍	3
1.4 研究內容與流程	5
二、文獻回顧	8
2.1 車輛途程問題及相關問題.....	8
2.2 路網可靠度(Reliability of Network)	17
2.4 多目標規劃法	21
2.4 車輛途程問題之演算法	26
三、考量旅行時間可靠度之車輛途程模式	30
3.1 研究課題分析	30
3.2 模式建立之概念分析.....	32
3.3 可靠度工程理論	34
3.4 旅行時間可靠度指標.....	36
3.5 模式構建	42
3.6 小結	53
四、螞蟻族群演算法	54
4.1 螞蟻族群演算法(Ant Colony System ; ACS)	54
4.2 ACS 之應用 求解多目標問題	66

4.3 螞蟻族群演算法之應用 求解研究模式 (ACS for VRPTW-reliability) ..	70
五、範例測試與敏感度分析	76
5.1 小規模路網.....	76
5.2 大規模路網.....	93
六、結論與建議	96
6.1 結論.....	96
6.2 建議.....	97
參考文獻	98
簡 歷	102

表 目 錄

表 2.1、報酬表(payoff table).....	25
表 2.1、ACS 與其他啟發式演算法比較表	29
表 4-1、局部與整體費洛蒙更新法之差異	63
表 5-1、設計簡例之顧客資料	76
表 5-2、離峰時段之平均路段旅行時間(a_{ij}).....	78
表 5-3、尖峰時刻平均旅行時間增加 / 減少比例(b_{ij}).....	78
表 5-4、測試簡例之求解結果	85
表 5-5、各服務水準之總路徑長	86
表 5-11、情境二設定之時窗可靠度水準	89
表 5-12、情境二時之求解結果.....	90
表 5-13、調整部分路段 值之求解結果	91
表 5-14、情境三之顧客時窗可靠度值	92

圖 目 錄

圖 1.1、車輛途程示意圖	4
圖 1-2、研究範圍示意圖	5
圖 1-3、研究流程圖	7
圖 2.1、車輛途程問題	9
圖 2.2、旅行時間機率化之示意圖	14
圖 2.3、目標式隸屬函數圖	25
圖 3.1、模式思考流程圖	33
圖 3.2、負載與強度之關係圖	35
圖 3.4、旅行時間可靠度示意圖	41
圖 3.5、隨時間變動之隨機旅行時間模式	42
圖 3.6、時窗可靠度之示意圖	44
圖 3.7、抵達時間之累積機率示意圖	45
圖 3.8、研究模式概念圖	49
圖 4.1、自然界螞蟻之行為	55
圖 4.2、螞蟻系統概念圖	57
圖 4.3、螞蟻族群系統演算法	61
圖 4.4、螞蟻合作與否之實驗結果(1)	64
圖 4.5、螞蟻合作與否之實驗結果(2)	65
圖 4.6、接近度 $_{ij}$ 之重要性	65
圖 4.7、MACS-VRPTW 之架構圖	68
圖 4.8、VRP 轉換為 TSP 之示意圖	69
圖 4.9、本研究模式之螞蟻族群演算法流程	74
圖 4.10、本研究之狀態轉換法示意圖	75
圖 5-1、路段旅行時間分佈圖	77
圖 5-2、不同 α 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖	81
圖 5-3、不同 q_0 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖	81
圖 5-4、不同 β 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖	82
圖 5-5、不同 m 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖	82
圖 5-5、考量時窗可靠度之求解結果	84

圖 5-6、軟時窗 VRP 之求解結果	84
圖 5-7、不同時窗可靠度下之總路徑長	86
圖 5-8、不同時窗可靠度下之服務失敗機率值	87
圖 5-9、不同時窗可靠度下之總目標值	87
表 5-10、不同時窗可靠度之各顧客時窗可靠度	88
圖 5-10、時窗可靠度為 0.5 求解結果之時空圖	88
圖 5-11、情境三求解結果之時空圖	92
圖 5-12、時窗水準與總路徑長關係圖	94
圖 5-13、時窗水準與總服務失敗機率之趨勢圖	94

一、緒論

1.1 研究背景與動機

整個物流營運成本中，運輸成本往往占了很大的比例。以美國為例，根據 U.S. Department of Commerce 的研究，美國在物流的花費有 29% 用在存貨(Inventory)方面，8% 用在倉儲(warehousing)方面，4% 用在管理(Administration)方面，還有 1% 用在雜項開支，但是卻有高達 58% 消耗在運輸(Transport)方面，由此可知，如何有效降低運輸成本，將是物流業最重要的課題。因此，國內外有許多車輛途程問題(Vehicle Routing and Scheduling Problem; VRP)的相關研究，期使總運輸成本最小化。傳統車輛途程模式可能考量了容量限制、時窗限制、多車種或是多場站等條件，但往往都將旅行時間視為單一值，可是實際上，由於車況、路況或天氣等因素的影響，車輛行駛之旅行時間並非是一固定值，而是一個變動的情形。然而傳統車輛途程問題並未將旅行時間變異狀況進去，以致模式結果與實務常有很大差距。

近來，電子商務蓬勃發展，而電子商務與物流產業更是存在著一種微妙的關係，即是兩者乃是交互影響彼此的成長，也就是說「電子商務是物流產業未來幾年成長的主要驅動力量之一，而物流也被視為是電子商務成功的關鍵之一」。故 Cranfield University 認為，電子商務乃是促使物流產業每年以 1.5% - 3% 速度成長的驅動力量，尤其是 B2B 部分之電子商務。根據 Boston Consulting Group 預估，全球 B2B 電子商務將於 2003 年達 2.8 兆美元；Garnet Group 更大膽預估將高達 7.2 兆美元，而 IDC 預測，全球 B2B 電子商務將從 2000 年的 2100 億美元(佔整體電子商務的 78%)，成長至 2004 年的 2.2 兆美元(佔整體電子商務的 88%)。在電子商務的驅動下，Banc of America Securities 預估美國物流產業將有 9000 億美元的商機，而國際物流產業商機則將達 2 兆美元。然而，電子商務不但為物流業帶來了新契機，也將影響都市內貨物運送的型態。當客戶從網路訂貨後，業者必須在特定的時間內，將貨物配送到客戶的家中，這種戶對戶(Door to Door)的服務將會在未來都市物流愈來愈明顯。而這種服務方式也就是我們目前所謂的「宅配」。不久的未來，都市物流將會有以下重大的變革：

1. 都市物流將會朝向載貨量較小但運送範圍變大的趨勢；
2. 貨物必須從倉庫直接配送到顧客的家中，業者的運輸成本將會上升，因此如何有效降低運輸成本將更形重要；

3. 有了電子商務後，顧客的旅次將會減少，而業者的旅次卻會增加。這將會使得更多的小貨車進入住宅區的街道，產生噪音、空氣污染和居民安全等問題。因此，電子商務為供應鏈管理帶來了許多的挑戰。如何能迅速、正確而且以較低成本處理一大堆的小額訂單，同時減少對環境的衝擊，發展一套有效率的物流配送系統將是一個重要的課題。

物流業者或快遞業在配送貨物的過程中，常面臨許多的不確定性，而其中影響最大，最難讓業者掌控的，就是「旅行時間之不確定性」。當配送貨物過程中，原本的路線可能因為臨時的施工、交通事故、違規停車或交通壅塞等因素，而使得貨物無法在預定的時間內送達到顧客的手中，這都會造成業者服務品質下降，顧客滿意度遞減等後果，更嚴重者，可能會侵蝕原有客戶，造成市場占有率逐漸下滑。相反的，如果客戶能有效減少不確定性之影響，提高服務可靠度，將有助於提升服務水準，創造更高的利潤。

同時現今科技的日益進步，智慧型運輸系統(Intelligent Transport Systems；ITS)逐漸受到世界各國的矚目。智慧型運輸系統中，有許多系統皆可蒐集到行車旅行時間，像是車牌偵測與影像處理之技術、自動車輛定位系統(Automatic Vehicle Location；AVL)或是地理資訊系統(Geographic Information Systems；GIS)等，皆可提供管理者或是駕駛的行車旅行時間資料。因此，有了這些技術後，將使得管理者能更有效地掌握旅行時間之變動，進而提高商車服務的可靠度同時也增加配送車輛的生產力。

由於傳統車輛途程問題多將旅行時間以一平均值代表之，無法表現出旅行時間之不確定性，因此，所得到的最佳值，雖可能是最小總成本，但卻非是服務最佳化的結果。是故，本研究將於車輛途程問題中，探討旅行時間的不確定性，同時導入可靠度理論，以構建一套考量旅行時間可靠度之車輛途程模式，提供一個更貼近實務、更明確而且更可靠的方法。

1.2 研究目的

基本於前述之背景與動機，本研究之研究目的如下：

1. 國內外有許多研究車輛途程問題(VRP)。本研究將首先回顧國內外 VRP 相關研究，特別是針對時窗限制之車輛途程問題(Vehicle Routing Problem with Time Windows；VRP-TW)，並進行整理與探討，以期能了解車輛途程問題之概貌。
2. 研究「可靠度工程(Reliability Engineering)」理論，同時回顧旅行時間可靠度之

相關文獻。嘗試以可靠度工程理論表現旅行時間之不確定性，得到一適合車輛途程問題的旅行時間可靠度衡量方式，以期減少旅行時間變動對於路徑指派之影響。

3. 嘗試將旅行時間可靠度衡量方法導入車輛途程模式，將路網狀況反應在模式中，減少旅行時間變動影響，增加指派路徑之可靠度，期使車輛途程模式更趨近於現實環境，也更為實用。
4. 回顧車輛途程問題之演算法，研究「螞蟻族群演算法」(Ant Colony System ACS)並求解本研究模式。同時設計一測試範例驗證，並比較與傳統車輛途程模式之差異。
5. 冀望本研究結果能提供實務上之應用，提供業者做為策略分析之工具，作為規劃貨物運送路線之參考，並提供後續研究參考。

1.3 研究方法與範圍

1.3.1 研究方法

本研究主要乃是在既有的車輛途程模式中，加入旅行時間不確定之因素。隨著生活日漸富裕，人們生活水準提高、消費者意識高漲等，業者也開始重視消費者的聲音，促使市場導向興起，消費者對於產品的好壞，不再只是要求物美價廉，而是開始重視產品的售後服務和品質保證，因此工業界開始大力提倡「可靠度」之運用，而生產者也意識到這個問題的重要性，使得可靠度在運用的需求上、研究分析、解決問題等，大大充實了它的內容，由經驗累積與研究發展中擴展成一獨立完整的課題，且在機械、建築、造船或工業管理等不同領域已經開始有許多可靠度理論之相關研究。而可靠度工程之定義，乃是指「運用數學或統計及分析方法，預估某項設備或系統的可靠度，以及找出可藉由改變設計來改善可靠度的一門工程」。本研究將導入可靠度工程之方法，試圖將旅行時間之不確定性以一機率函數表示，然後將旅行時間可靠度與 VRP 結合，再透過適當之啟發式解法求解之，以期減少不確定因素之影響，使得求解結果更切合實際需要。

此外，由於車輛途程問題乃屬 NP-hard 問題，求解問題的複雜度隨路網規模增加而大幅提高，故為求得車輛途程問題之最佳解，現今多採用啟發式解法求解之。本研究將採用 Dorigo 等在 1996 年時所發展的一個啟發式解法——螞蟻族群法 (Ant Colony System；ACS) 求解考量旅行時間可靠度之車輛途程模式。

1.3.2 研究範圍

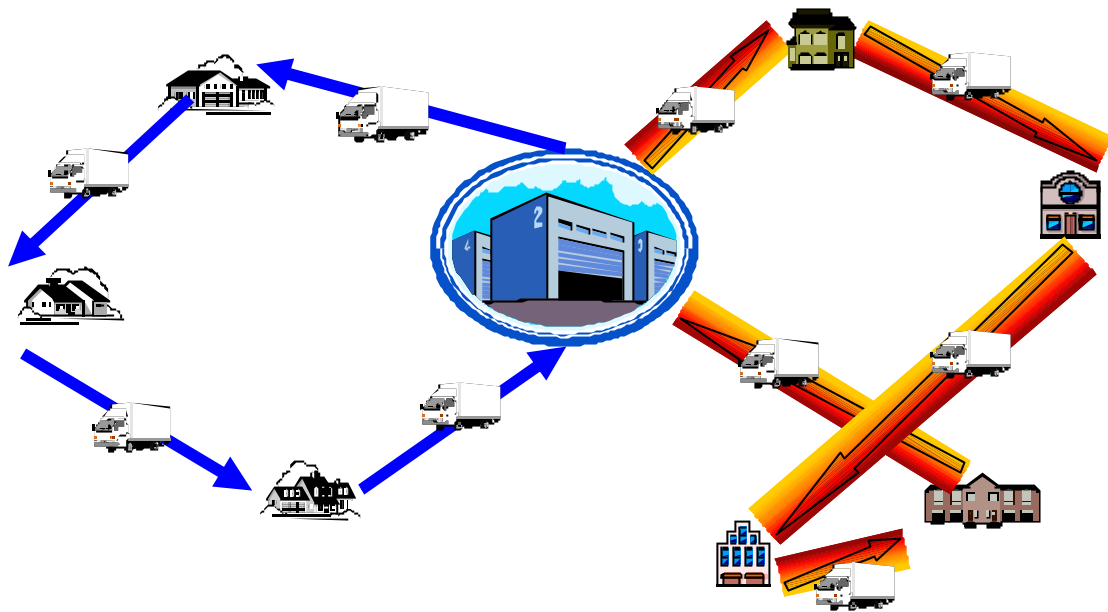


圖 1.1、車輛途程示意圖

本研究乃以時窗限制之車輛途程問題為基本模式架構。因此本研究考量問題之範圍，其定義如下：

每一物流業者擁有：

1. 物流中心

本研究只考量單一物流中心。所有車輛皆由物流中心出發，依序服務顧客後，需再返回原物流中心卸貨。

2. 車輛

車隊皆使用相同之車輛，同時規定路線上所有貨物的重量不得超過車輛之載重，且考量使用車輛之固定成本。

3. 顧客

有多位接受服務的顧客。在每位顧客，有其服務之時窗限制，也就是物流業者必要在規定之某段時間內，完成配送之服務。每一位顧客必須至少被服務一次，同時也僅能被服務一次。在同一顧客，業者必須同時裝卸其所有貨物。

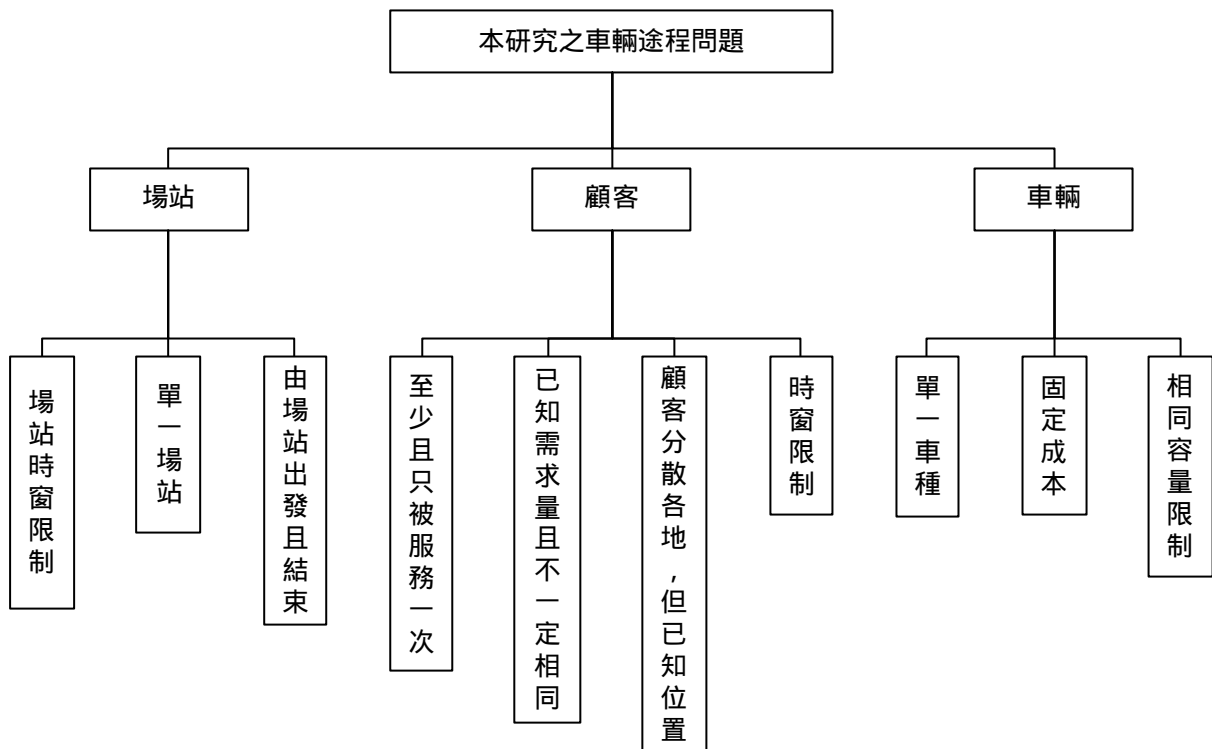


圖 1-2、研究範圍示意圖

1.4 研究內容與流程

1.4.1 研究內容

本研究之研究內容主要有下列六點：

1. 問題之確認與分析

車輛途程問題已發展出許多模式。由於電子商務蓬勃發展，為現代都市物流將會更為頻繁。本研究將針對此一新的物流型態，瞭解其運送問題的特性，訂出本研究之範圍與假設，以做為後續模式構建與範例設計之依據。

2. 文獻回顧

本研究主要回顧三方面之研究：

(1)、彙整國內外相關車輛途程問題之研究。

有關車輛途程問題，從銷售員問題(Travelling Salesman Problems ; TSP)、考量時窗限制而發展出時窗限制之車輛途程問題(Vehicle Routing and Scheduling with time windows ; VRP-TW)、後來又鑑於顧客與旅行時間之隨機性，因此有了隨機性車輛途程問題(Stochastic Vehicle Routing Problem ; SVRP) 到最近發展

的旅行時間機率化之車輛途程問題(Probabilistic Vehicle Routing Problem with time windows)等。由此可知，車輛途程問題的演化史相當豐富，因此，本研究在構建模式前，將先整理車輛途程問題之相關研究，同時可供後續研究參考之用。

(2)、回顧可靠度工程應用之相關研究。

可靠度理論已廣泛應用於系統設計、品質管制和電腦通訊等領域，但是交通運輸方面之研究仍是屈指可數，而本研究將回顧這些文章，冀期對可靠度有基本了解，以建立適合之旅行時間可靠度模式。

(3)、車輛途程問題之演算法

回顧求解車輛途程模式演算法發展架構，將簡單說明禁忌搜尋法、基因演算法和模擬退火法三種啟發式演算法的觀念。

3. 探討旅行時間可靠度之衡量方法

本研究先將回顧可靠度工程之基本理論，思考如何將可靠度工程理論與運輸結合，以提升運輸服務水準。接著蒐集有關旅行時間可靠度之評估研究，再結合可靠度工程理論，建立一套衡量方法。

4. 模式之構建與求解

結合旅行時間可靠度與時窗限制之車輛途程模式，構建一新模式，冀期能得到以下結果：

(1)、所得到之結果，乃是最大可靠而且是最小成本之最佳路線。

(2)、將可靠度工程理論導入車輛途程模式。

(3)、提供業者可做為策略分析工具。

(4)、最後，選擇適當啟發式解法求解之。

5. 例題之驗證與分析，並與原模式比較其差異。

設計一範例，進行敏感度分析。再比較本研究構建立模式與原模式之結果差異，證明本模式之優越性。

6. 結論與建議

從上述之研究結果，提出結論及後續研究之建議。

1.4.2 研究流程

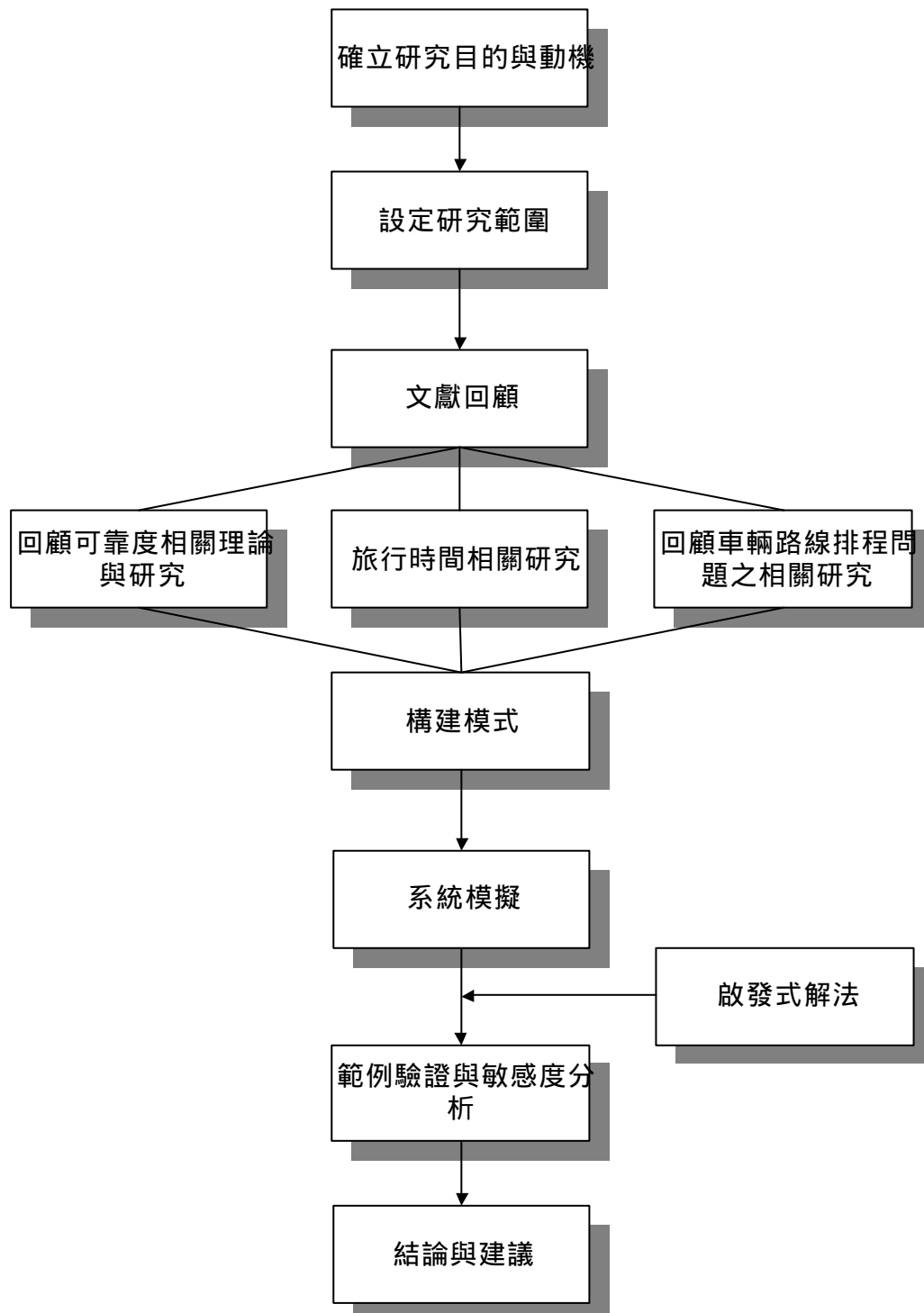


圖 1-3、研究流程圖

二、文獻回顧

本章探討相關文獻，共分成四小節。2.1 小節，本研究將先歸納國內外有關車輛途程問題之研究，依其不同考量的因素予以區分，並簡述其差異。2.2 小節則回顧有關旅行時間可靠度之文獻。2.3 小節則介紹多目標規劃法及說明模糊多目標法。另外，由於車輛途程問題乃屬於NP-hard問題，在求解上有其困難，是故相關演算法之研究也相當豐富，將另於2.4小節加以討論。

2.1 車輛途程問題及相關問題

最早的車輛途程問題是1959年，由Dantzing與Ramser提出的卡車配送問題。接著發展出撥召公車問題(Dial-A-Ride Problem; DARP)、收送貨問題(Pickup and Delivery Problem; PDP)、最短路徑問題(Shortest Path Problems; SP)，以至於後來的銷售員問題(Traveling Salesman Problems; TSP)、車輛途程問題等。同時，為了使車輛途程問題更能切合現實生活，更延伸出時窗限制之車輛途程問題(VRPTW)、多車種車輛途程問題(Fleet Size and Mixed Vehicle Routing Problem; FSMVRP)、隨機車輛途程問題(SVRP)和最近發表的旅行時間機率化之車輛途程問題(P-VRP-TW)。因此，車輛途程問題之研究相當繁多，在本節中，將只針對有考量旅行時間或時窗限制之車輛途程問題加以回顧。在本節將分別說明其相關問題的意義。

2.1.1 車輛途程問題(Vehicle routing and scheduling problems; VRP)

車輛途程問題乃是研究如何將貨車指派到顧客端，以決定最佳化的顧客服務順序及車輛行駛路線的過程。其中，車輛途程問題所需的基本資訊包括有顧客的位置、道路路網、旅行成本和交通管制等。

傳統車輛途程問題(Vehicle Routing Problem; VRP)的定義是：在一路網 $G = (V, A)$ ，其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 代表節點(nodes)的集合， $A = \{(v_i, v_j) : i \neq j, v_i, v_j \in V\}$ 則是節線(arc)的集合。節點 v_1 則是代表場站(depot)或物流中心，而其他節點則分別代表配送城市(cities)或是顧客(customers)。矩陣 $C = (c_{ij})$ 則依節線集合 A 定義之，其每一元素 c_{ij} 可代表由節點 i 到節點 j 的旅行距離、或是旅行成本、或旅行時間。在場站中共有 m 輛車，每一輛車所能承載的容量皆為 Q 。而車輛路線問題則是排列每一車輛運送的路線，使得總成本最小，同時也滿足以下的限制：

1. m 輛車之運送路線均從場站開始出發同時最後須回到原場站；

2. 除場站外，其他每一節點只能由一輛車服務一次，而且至少都被服務一次；
3. 每部門所服務之節點需求總量不得超過車輛容量。

在車輛途程之研究領域，一直有新的模式被提出來，其不外乎是再多考慮一些因素，也就是再加入其他的限制，較常見有以下幾種：

1. 容量限制：每一節點 v_i 有一需求量 d_i ，而任一路線的總需求量不可超過車輛容量。在這類問題通常是指車輛負責到各節點承載貨物、或是將貨物配送到各個顧客手中。
2. 時段限制(Duration constraints)：每一路線之總長度不超過一預定值 L 。
3. 時窗限制(Time window constraints)：每一節點 v_i 必須在 $[a_i, b_i]$ 時段內提供服務。

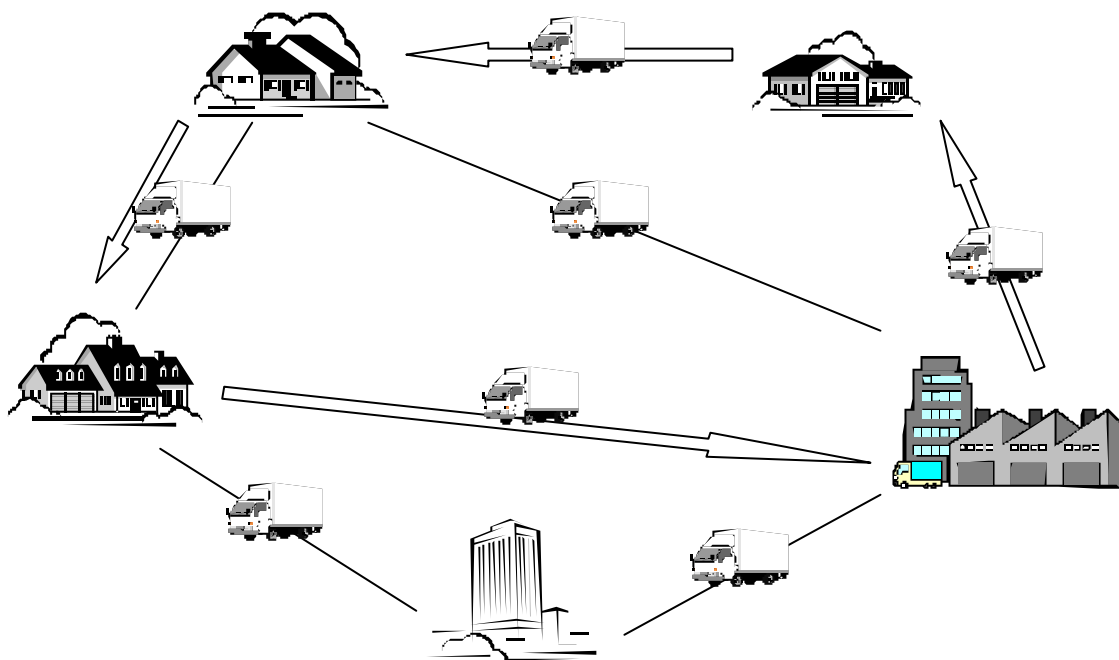


圖 2.1、車輛途程問題

2.1.2 時窗限制之車輛途程問題(Vehicle routing and scheduling with time window ; VRP-TW-F)

時窗限制主要分為兩種，分別為「硬時窗」(Hard Time Window)與軟時窗(Soft Time Window)。硬時窗限定車輛必須於需求點所要求的時窗內到達該需求點；而軟時窗則能夠忍受在非時窗的時間到達，但依其違反的程度給予一懲罰成本。

以下，乃為硬時窗限制之車輛途程數學模式：

目標式

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ijk} \quad \text{式(2-1)}$$

限制式

(1)、確保每一條路徑皆由中心場站出發，且最後一定回到中心場站。

$$\sum_{j=1}^N x_{0jk} \leq 1 \quad k \in K \quad \text{式(2-2)}$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i0k} \leq 1 \quad k \in K \quad \text{式(2-3)}$$

(2)、確保每位顧客只拜訪一次。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N x_{ijk} = 1 \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(2-4)}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ijk} = 1 \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(2-5)}$$

(3)、車輛容量限制

$$\sum_{i=0}^N m_i \sum_{j=0}^N x_{ijk} \leq q_k \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{式(2-6)}$$

(4)、總服務時間之限制

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N x_{ijk} (t_{ij} + f_i + w_i) \leq r_k \quad \text{式(2-7)}$$

(5)、硬時窗限制

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ijk} (t_i + t_{ij} + f_i + w_i) = t_j \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(2-8)}$$

$$t_0 = w_0 = f_0 = 0$$

$$e_i \leq (t_i + w_i) \leq l_i \quad i \in \{0, \dots, N\} \quad \text{式(2-9)}$$

$$x_{ijk} \text{ binary} \quad \text{式(2-10)}$$

其中

決策變數有：

t_i ：抵達節點 i 之時點。

w_i ：在節點 i 之等待時間。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{當車輛由節點 } i \text{ 至節點 } j \text{ 時。 } i \neq j \quad i, j \in \{0, 1, \dots, N\} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

參數有：

k ：代表車輛 k ， $k \in \{1, \dots, K\}$ 。 K 為總車輛數。

N ：為總節點數(總顧客數)。

c_{ij} ：由節點 i 到節點 j 之旅行成本。其中 $i \neq j \quad i, j \in \{0, 1, \dots, N\}$ 。

t_{ij} ：節點 i 到節點 j 之旅行時間，其中 $i \neq j \quad i, j \in \{0, 1, \dots, N\}$ 。

m_i ：節點 i 之需求量。

q_k ：車輛 k 之容量上限。

e_i ：在節點 i 之時窗開始時間。

l_i ：在節點 i 之時窗結束時間。

f_i ：在節點 i 之服務時間。

r_k ：車輛 k 之路徑時間上限，亦可以 l_0 表示，代表場站(節點 0)之時窗限制。

此問題之目標式乃期使總成本最小。而式(2-9)表示抵達時間 t_i 加上等待時間 w_i 必須符合時窗 $[a_i, b_i]$ 的限制。換言之，若是抵達時間 t_i 小於時窗開始時間 e_i 則必須等待到時窗開始才能提供服務。故本小節的數學模式乃為硬時窗限制之 VRP 問題。關於軟時窗限制之 VRP 模式，將於後面的 2.1.4 小節中予以說明。

2.1.3 隨機性車輛途程問題(Stochastic VRP ; SVRP)

隨機性車輛途程問題與傳統 VRP 模式的不同點在於模式中有某些變數具有隨機性，主要有兩種：「隨機性需求」和「隨機旅行時間」。而與傳統車輛途程問題最大的差別在於 求解演算法不同。原本適用於決定性車輛途程問題的一些基本概念，並不適用於隨機性車輛途程問題。而且隨機性車輛途程問題乃是結合了隨機性與整數規劃的特性，因此其演算法也較為複雜。

Gendreau 等(1996)主要將隨機性車輛排程問題分成以下六類：

1. 隨機顧客之推銷員巡行問題(The Traveling Salesman Problem with Stochastic Customers ; TSPSC)
 - (1). 依據上述傳統 VRP 之定義, TSPSC 的模式中, 每一節點 v_i 以機率 p_i 表示之
 - (2). 在第一階段求解時, 先由確定型旅行推銷員問題得到一起始解, 作為車輛運送路線。也就是第一階段所得之路線會經過所有的節點, 而既存之顧客便會出現, 此時有可能發生無法按照第一階段解完成運送任務的情形。因此, 在第二階段求解時, 則需針對可能發生路線失敗的路線擬訂補救方案, 在這方面, 可能會產生成本, 也可能會產生節省成本的情形發生, 所求之路線則會跳過不需要服務的節點而得到最佳解。
2. 隨機時間之銷售員巡行問題(The Traveling Salesman Problem with Stochastic Travel Time ; TSPST)
 - (1). 以成本係數 c_{ij} 代表旅行時間, 同時為一隨機變數。
 - (2). 目標式主要是求在已知時間內, 完成配送之最大機率。
 - (3). 此問題尚未提出相關之數學模式。
3. 隨機旅行時間之多旅行推銷員問題(The m-Traveling Salesman Problem with Stochastic Travel Times ; m-TSPST)

m-TSPST 即是 TSPST 問題由原本的單一車輛延伸到多車輛的問題。而且所有車輛之起迄點都在同一場站。

 - (1). 一般而言, 車輛數目為一決策變數, 而且車輛需考量其固定成本。
 - (2). 每輛車之路徑都一時間限制, 若是超過時限尚未完成者, 則需遭到懲罰值。
4. 隨機需求之車輛途程問題(The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands ; VRPSD)
 - (1). 這類問題在 SVRPs 中是研究最多的課題。
 - (2). 顧客之需求為一隨機變數, 常假設為獨立變數。
 - (3). 主要之研究有:
 - i. 第一位提出 VRPSD 模式是 Tillman(1969)。Tillman 之模式中, 考量多個場

站。同時加入一懲罰值以免發生空車或載重超過車輛容量情形。而其模式乃是根據 1964 年 Clarke 和 Wright 所提出之模式。

- ii. Stewart 和 Golden(1983)提出了機會限制模式(chance constrained model)與兩個 recourse 模式。第一個補救模式乃其懲罰值隨著超出車輛容量之機率成比例增加，而第二個補救模式其懲罰值乃隨著超出車輛容量之期望需求量成比例關係。文中考量多種需求分布同時引用兩種啟發式解法。

5. 隨機顧客之車輛途程問題(The Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers ; VRPSC)

- (1). VRPSC 乃是由 TSPSC 延伸出來。
- (2). 顧客乃以一機率表示，而非是一定值
- (3). 不需要服務之顧客在第二階段之求解中跳過。

6. 隨機顧客與需求之車輛途程問題(The Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers and Demands ; VRPSCD)

- (1). VRPSCD 乃是結合 VRPSC 和 VRPSD 兩者的特性。
- (2). VRPSCD 之問題求解也非常的困難。

但是，由於隨機性參數存在，會發生繞徑失敗(route failure)的情況，也就是依原來的路徑配送貨物，會違反部分限制條件。因此，SVRP 較 VRP 求解困難。(黃金智，1999)

2.1.4 旅行時間機率化之車輛途程問題(Probabilistic vehicle routing problem with time window ; P-VRP-TW)

在 SVRP 中，針對隨機旅行時間之研究較少，因此 Eiichi 等(2001，參閱 City Logistics 書)與 Michael G H Bell et al(2000，參閱 Reliability of Transport Network 書)則提出了一個新的 VRP 模式，也就是本小節所將介紹的「結合旅行時間機率分配之車輛途程問題」(以下皆簡稱 P-VRP-TW)。

P-VRP-TW 問題的定義為：每一貨物運送人均有一個場站和一些顧客。車隊皆使用同一種車輛，負責從顧客端裝載貨物後運送到場站，或是從場站將貨物配送到各個顧客的手中。每位顧客均有其服務時段的限制，規定必須在某一時段內服務顧

客的需求。每天，一輛車可重覆服務多次旅次。但是每位顧客只能由一輛車服務一次而且至少都要予以服務一次。同一顧客之所有貨物乃同時裝載到車上，不可分批載貨。此外，同一路線之總貨物重不可超過貨車的載重容量。在這些條件下，指派車輛到顧客端裝載貨物，決定服務顧客之最佳先後順序。其中，P-VRP-TW 和傳統車輛途程問題的差異就是考量旅行時間之機率分配，而不再將旅行時間視為一定值。如圖 2.2。

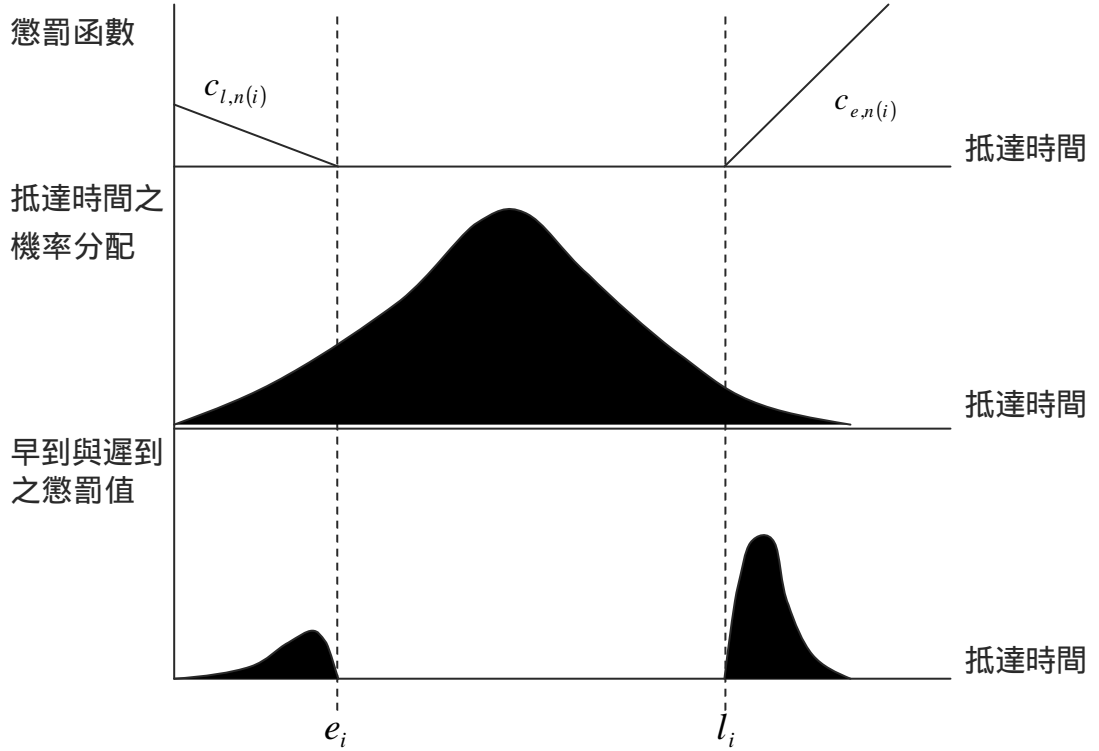


圖 2.2、旅行時間機率化之示意圖

以下列舉出 P-VRP-TW 之數學模式：

目標式

$$\text{Min} \quad C(t_0, X) = \sum_{l=1}^m c_{f,l} d_l(x_l) + \sum_{l=1}^m E[C_{t,l}(t_{l,0}, x_l)] + \sum_{l=1}^m E[C_{p,l}(t_{l,0}, x_l)] \quad \text{式(2-11)}$$

$$\text{其中} \quad E[C_{t,l}(t_{l,0}, x_l)] = c_{t,l} \sum_{i=0}^{N_l} \{T(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)}\} \quad \text{式(2-12)}$$

$$E[C_{p,l}(t_{l,0}, x_l)] = \sum_{i=0}^{N_l} \int_0^{\infty} p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, x_l) \{c_{d,n(i)}(t) + c_{e,n(i)}(t)\} dt \quad \text{式(2-13)}$$

P-VRP-TW 模式之目標式乃追求在貨車容量與時窗限制條件下，俾使總貨物配

送成本最小化。目標式中，構成總成本主要有三種：(1)車輛之固定成本。(2)車輛之營運成本(式 2-12)，此成本與旅行時間和服務時間成正比。(3)懲罰成本(式 2-13)。如果未能在時窗限制內到達，不管是提早或是遲到，都給予一懲罰值。因此，P-VRP-TW 模式乃是以軟時窗限制之車輛途程問題所發展而來。

限制式

1. 車輛至少從場站出發且回到場站。

$$n_0 \geq 2 \quad \text{式(2-14)}$$

2. 所有車輛拜訪過之顧客數和必須等於總顧客數。

$$\sum_{l=1}^m N_l = N \quad \text{式(2-15)}$$

3. 每輛車之載重等於其載運之所有需求量和。

$$\sum_{n(i) \in x_l} D(n(i)) = W_l(x_l) \quad \text{式(2-16)}$$

4. 車輛之容量限制

$$W_l(x_l) \leq W_{c,l} \quad \text{式(2-17)}$$

5. 場站之時窗限制

$$t_s \leq t_{l,0} \quad \text{式(2-18)}$$

$$t'_{l,0} \leq t_e \quad \text{式(2-19)}$$

$$\text{其中 } t'_{l,0} = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \{T(t_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)}\} \quad \text{式(2-20)}$$

由於目標式中必須已知旅行時間之機率分配，故應用一套動態交通模擬模式 BOX 模式(Fujii 等，1994)，求得每小時旅行時間的機率分配。最後，利用 P-VRP-TW 模式與傳統車輛途程模式求算同一範例，由結果可以發現，當道路愈壅擠時，P-VRP-TW 之求解結果明顯較好。

這是既隨機性旅行時間之推銷員問題後，又有模式考量加入旅行時間不確定性之因素，但在 P-VRP-TW 方面的研究仍相當有限，可供後續研究一個新的發展方向。

2.1.5 車輛途程問題其他相關研究

Ahn 與 Shin (1991)認為在都市中，交通壅擠的問題顯而易見，尤其遇到尖峰時間時，旅行時間往往大幅增加。但是有關壅擠而造成旅行時間變動的相關研究，卻

是非常地稀少。之前，Golden與 Assad (1988)先提出有關交通壅擠時之旅行時間相關議題；Alfa (1987)則是在銷售員問題中，加入隨時間改變的旅行時間，卻未考量時窗之限制。因此，此研究為解決同時考量旅行時間與隨時變動的壅擠限制，將提出一個有效的路徑可行性之確認程序(route feasibility check routine),改善現有的啟發式演算法以有效求解之。

- 路段之旅行時間依車輛進入路段時間決定。
- 提出「不可超車(Non-passing property)」假設,即是早出發的車輛一定比較早到達目的地。

Fu 與 Rilett (1998)文中乃是探討「動態兼隨機之最短路徑問題」(The dynamic and stochastic shortest path problem; DSSPP)。此問題考量旅行時間乃是動態的且具有隨機性，因此將旅行時間視為連續時間之隨機模式(continuous-time stochastic process)，進而追求交通路網中之期望最短路徑(expected shortest path)。然而，有鑑於傳統之演算法無法有效解決動態之問題，Fu 與 Rilett 最後提出 k -最短路徑演算法(k -shortest path algorithm)以有效改善求解結果而不致浪費太多運算時間。

Fu(2002)考量共乘大眾運輸服務系統常受限於嚴格的時間限制和隨時變化的交通壅擠狀況。將模式結合一個時間相依、隨機之旅行時間模式，也就是同一路段，不同的時刻進入該路段，則所需的旅行時間不同。同時，考量到抵達時間之隨機性，文中提出「最小可靠度」(minimum reliability)的觀念，其定義為「服務車輛準時抵達時窗內之機率大於一標準值時，稱之為最小可靠度」。為有效求解模式，結合先進先出(first-in-first out；FIFO) (Ahn與 Shin；1991)假設，因此一路徑上之各站抵達時間可以遞迴關係式表示，將可降低運算的複雜度。

2.1.6 小結

傳統時窗限制之車輛途程問題並未考慮旅行時間變動之因素，雖然後來有研究關於隨機性旅行時間之問題，但是這方面的研究卻是非常的稀少。而去年有研究發表了 P-VRP-TW 模式，其主要考量車輛抵達到顧客端之抵達時間為一機率分配，結合軟時窗之概念，如此一來，可趨使車輛選擇較保險之路徑。但是 P-VRP-TW 模式中，需獲知每一路段之機率分配狀況，因此必須仰賴交通模擬模式求得這些資料，所以 P-VRP-TW 必須耗費相當多的運算時間，尤其是應用於大路網時。而考量到旅行時間係為一機率分配，且依車輛進入路段時間所決定，因此引用 Fu 等觀點，將旅行時間同樣視為具有隨機性及動態性。

2.2 路網可靠度(Reliability of Network)

隨著現代人生活水準提高，對於服務品質也愈加要求，因此，系統之穩定性顯得更加重要。其實「可靠度分析」的概念早應用於許多系統之規劃、設計和營運層面，例如通訊網路、自來水系統或天然氣輸送系統等。但是，可靠度分析在於路網(road network)之研究卻是鳳毛麟角。由於現代資訊技術日進千里，智慧型運輸系統近年來在世界各國蓬勃發展。未來，透過更有效的資訊傳遞，將使得管理者能夠再加掌握路網狀況。因此，路網可靠度也愈來愈受到人們的重視。近年來，路網可靠度分析方面，主要有三大研究方向(Iida, 1999)：

1. 發展模式架構，以求得路網可靠度。

但是，由於路網特性不同於水電供應、通訊網路等問題，因此路網的可靠度分析較一般網路困難。因為

- (1). 路網中，乃是多種運具穿梭其中，並非像一般電力、自來水供給、通訊網路等，只有單一物質流；
- (2). 路網上的運具，乃是由每一個「人」所駕駛，由於每個人具有自我思考能力的個體，因此路網可靠度分析中，仍需再考慮駕駛人的路徑選擇行為；
- (3). 一般系統考慮容量可靠度時，只追求起點到終點間所流通之流量最大；然而路網容量可靠度仍需再考量路網的服務水準，例如起迄對間之旅行時間等；
- (4). 路網中有多個起迄對，而且不同起迄對間之流量不可互換或替代。因此，起迄對的需求型態將會影響路網容量可靠度之分析結果。

由於路網之可靠度分析中，充斥了許多的不確定因素。因此，路網可靠度分析所要求之正確率，不必像一般系統工程所要求高標準。

2. 建構交通管理系統，以提供路網使用者高品質的服務水準。

主要可利用兩種方向改進：硬體方面，可建造新的設施，提供更完善的服務；軟體方面，則利用交通管制與控制、指引的方式，促進車流順暢。

3. 在路網規劃、構建與管理最佳化的過程中，結合路網可靠度之觀念，發展一套新的評估程序。

而目前，路網可靠度之研究方面，主要歸納有三種可靠度(Wakabayashi and Iida,

1992 ; Bell and Iida, 1997 ; Chen et al., 1999 ; Bell and Cassir, 2000) :

1. 連接性之可靠度(Connectivity reliability) :

連接可靠度主要是探討路網兩節點間是否相通之機率。有關連接可靠度之研究中，特殊的一個例子便是由 Iida 和 Wakabayashi 在 1989 年所提出的「端點可靠度(terminal reliability)」，端點可靠度主要是探討起迄對間是否有路徑連接兩端，也就是當任一起迄對間至少存在一條路徑可連通兩端點，則這個路網便是一個成功(successful)的路網。由於一條路徑是由一連串的路段(link)所組成，所以進行連接性可靠度分析時，常以 0-1 變數代表每一路段之狀況。當路段可通行時，則變數值為 1，反之則為 0。但是以 0-1 變數代表道路狀況，無法表現出道路狀況介於 0 和 1 之間的情形，因此連接性可靠度較適用於評估異常狀況，像是地震後之路網可靠度等，並不適用於評估平時的路網績效。

2. 容量可靠度(capacity reliability) :

網路之容量可靠度定義「在一起迄對之需求水平下，路網中的道路容量能足以負荷交通需求量而使交通狀況維持在一個可接受的服務品質之機率」。如果單以連接性來評估路網的績效是不夠的。因為除了知道起迄對間是否連接以外，仍需了解路網是否有足夠的容量以應付當時的需求量。有關容量可靠度，已有許多研究將容量可靠度之觀念應用在評估通訊網路、供水系統和電力供應系統等。但是由於道路路網與一般網路問題特性不同，因此道路容量可靠度較為複雜。

3. 旅行時間可靠度(travel time reliability) :

由於交通需求量與道路容量隨著時間而改變，因此難以平均值來評估路網績效，故旅行時間可靠度主要是為了反應起迄對間旅行時間之變動【Asakura and Kashiwadani, 1991】。其主要探討「在一起迄對間，能夠順利在特定時間內完成旅次之機率」。一般而言，旅行時間可靠度適用於評估平時之路網績效。

2.2.1 旅行時間可靠度相關研究

旅行時間可靠度之不確定性可能起因於二種因素，而使得旅行時間可靠度有兩種涵義(Nicholson 和 Du, 1997) :

- (1)、需求量之變動：每天交通量之變動，適用於每日交通狀況下，評估路網績效。
- (2)、網枝容量之變動：可能因為道路毀壞而造成道路容量之改變，適用於一般或異

常時的交通狀況。

歸納相關研究後，旅行時間可靠度(travel time reliability)乃是指在特定之時段內，順利完成一起迄對間旅次的機率(Bell 和 Iida, 1997；Bell 和 Cassir, 2000，參閱 Reliability of Transport Network 書)。有了旅行時間可靠度這項指標，將有助於評估每天車流量變動下的路網績效。

Asakura 和 Lee 等(2000, 參閱 Reliability of Transport Network 書)為了反應駕駛在交通壅擠時之行為，將旅行時間可靠度加入交通指派模式中，構建一新模式——可靠度指派模式(reliability assignment model)。研究中，其旅行時間可靠度之定義為，「無任何旅行時間變動的條件下，用路人能順利於特定時間，到達目的地之機率」。由於旅行時間之變動常是因為道路容量與交通量兩因素所致，因此文中利用可靠度工程理論之概念，其旅行時間可靠度表示為一包含道路容量與旅行需求變數之函數。同時，文中認為路徑乃由路段組成，故路徑之可靠度乃等於路段可靠度之連乘值，如式 2-21。再取路徑可靠度之對數值，則變成一線性函數，如式 2-22，然後構建一可靠度指派模式，其目標式乃追求最大可靠度。

$$R_A = R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_n = \prod_i^n R_i \quad i \in A \quad \text{式(2-21)}$$

$$\ln(R_A) = \ln\left(\prod_i R_i\right) = \sum_i \ln(R_i) \quad \text{式(2-22)}$$

最後，文章利用「可靠度指派模式」與傳統「旅行時間指派模式」進行實例分析、比較。從中，我們可以發現利用前者所得到各路段之流量較趨於一致，也較符合一般的認知。

由於運輸網路上之設施或提供的服務並非是一成不變的，它可能會因為自然災害、人為因素或設施損耗等原因，而造成運輸網路的功能下降，Du 和 Nicholson (1997) 則提出一套理論架構以分析運輸網路之績效。此模式乃以系統剩餘(system surplus)為績效指標，以評估系統服務下滑時對於社經之影響程度。

在路段容量可靠度和旅行時間可靠度之條件下，Lo 和 Tung (2000) 構建一套數學規劃模式以評估路網容量。文中利用機會限制模式分別將容量限制式與旅行時間限制式兩者原本是機率型的式子轉為確定型的式子，如此一來，可不必利用蒙地卡羅模擬結果，因為有時候網路過於龐大時，可節省運算時間。

Yasunori 指出由於時間價值增加，任何延滯都會造成道路使用者的損失，所以路網之穩定性更形重要。

Lam和 Xu (1999)利用部分路段上偵測器所蒐集之資訊，以調查運輸網路之可靠度。文中構建一個交通流量模擬器(traffic flow simulator; TFS)以評估路網可靠度。而研究中之路網可靠度，所指乃是旅行時間可靠度。因此交通流量模擬程序乃先利用原始之起迄點需求和偵測器所得之部分資料預估整體路網之流量、如果路段流量未收斂，則修正起迄點需求，反覆求算路段流量直到收斂為止。收斂後，即可求得路段 / 路徑之旅行時間和其變異，進而得到旅行時間可靠度。

Taylor (1999)闡述了密集網路模式(Dense Network Model)所扮演的角色及其功能，同時探討此模式與其他運輸網路模式之層級關係。另外，作者為評估不同網路之績效優劣，考量了路網的連接性可靠度和旅行時間可靠度兩個層面，建立三種路網可靠度指標，分別為滲透性指標(permeability index)、接近度指標(approachability index)和變曲性指標(tortuosity index)，最後以實例驗證說明。

Chen 等(2002)將容量可靠度導入，做為路網績效之評估指標(Chen, 1999)，同時結合了可靠度分析、不確定性分析、網路均衡模式、敏感度分析和蒙地卡羅理論等方法，發展了一套「整體性可靠度評估程序」(Chen 和 Yang, 2002)，以評估路網績效。可靠度評估程序之流程如下：

1. 先由亂數產生器得到所有節線的容量機率分佈。
2. 利用「網路均衡模式」求算均衡時之各節線流量。
3. 敏感度分析和不確定性分析求算旅行時間之變異值。
4. 計算出旅行時間可靠度值和其不確定性以評估整體路網績效。

Bell 和 Cassir (2002)則使用「羅吉特隨機使用者均衡模式」進行敏感度分析，以預估一般狀況之旅行時間分佈，進而求得旅行時間可靠度，而不是像傳統之研究多是以擬之方式預估旅行時間分配情形。其研究流程為

1. 羅吉特隨機使用者均衡模式(Logit SUE model)。
2. Logit SUE 敏感度分析。
3. 求得隨機使用者均衡時路段流量之敏感度。
4. 進而獲知旅行時間之敏感度。
5. 得到旅行時間變異數之近似值。

由於之前利用「羅吉特隨機使用者均衡模式」已求得旅行時間分配，因此獲得 t_{oj} 和 $Var(t_j)$ 值，代入上述公式中，將可算出各路徑之旅行時間可靠度。

在國內研究方面，有關旅行時間可靠度方面之研究，多是針對大眾運輸工具。

其中,鐘譽偉君(1999)首先應用可靠度工程理論將旅行時間可靠度之不確定性利用機率函數之方式表現出來,以做為運輸管理者或乘客做為決策之用。鐘譽偉之研究中,有鑑於一般大眾難區分旅行時間可靠度與準點之差異,特針對相關名詞予以定義:

- 準確度:運輸系統中旅行時間變異之定量衡量,所指者為旅行時間達到某一準確要求之程度。
- 準點性:意義同上,但為定性名詞。
- 可靠度:為定量名詞,所指為系統達到某一要求之機率,必須考慮被要求對象不確定性,為一供給與需求相對問題。
- 可靠性:意義同上,但為定性名詞。
- 旅行時間可靠度:為有關運輸系統中旅行時間變化之定量衡量,所指為旅行時間達到一要求之機率,必須考慮旅行時間不確定性,且同時考慮旅行時間大小及變異。例如兩旅行時間分布曲線 $f_X(x)$ 與 $f_Y(y)$ 之相對位置:當兩者相距愈大時,則重疊部分會愈小,代表不可靠度愈小;反之,如果兩者愈接近時,則不可靠度愈大;而分布曲線 $f_X(x)$ 與 $f_Y(y)$ 之離散程度:重疊區域之大小也與分配之離散程度有關。離散程度與分配的變異係數有關,變異係數愈大代表離散程度愈嚴重。

基於以上兩因素,若想提高系統旅行時間可靠度,可藉由減少旅行時間長度或是減少實際旅行時間變異,前者則是旅行時間「量」問題的改善,後者則為旅行時間「質」問題的改善。而這兩項觀念,正是貫穿全文的精髓。

由上述文獻,雖然旅行時間可靠度應用於不同的問題,可是最原始的概念卻是一致的,因此,本研究將依此基本觀念,考量如何將旅行時間可靠度有意義地與車輛途程模式相結合。

2.4 多目標規劃法

廣義的多目標規劃方法是指多評準決策(Multiple Criteria Decision Making; MCDM),包括以下幾類:

1. 多目標決策(Multiple Objective Decision Making; MODM)

在無限多個替選方案中尋找較滿意的偏好方案,在目標確認及限制式建立時,並不知道各種替代方案的狀況,以限制條件界定替選方案範圍,再透過數學規劃法

求得非劣解(Non-inferior Solution)或妥協解(Compromise Solution)，再結合決策者的偏好資訊，最後求得偏好解(Preferred Solution)。

2. 多屬性決策(Multiple Attribute Decision Making ; MADM)

又稱多評準評估(Multi-Criteria Evaluation)方法，所處理的決策問題乃在已知有限個方案下，在一組評估準則屬性下，了解決策者之偏好，再評估其間的損益，決定替選方案的優先次序，再挑選一個最佳的方案。

3. 多屬性效用理論(Multi-Attribute Utility Theory)

將決策空間(Decision Space)對映到結果空間(Outcome Space)，再把結果空間對映到效用空間(Utility Space)，在效用空間構建的多屬性效用函數即為衡量決策者內心滿足程度的函數。

4. 公共選擇理論(Public Choice Theory)

又稱「群體決策理論(Group Decision Making Theory)」，強調的是結合不同的領域、專長及偏好態度的一群人，以達到決策支援的目的。

若是多目標規劃再依是否包含不確定因子可分為

1. 確定性多目標規劃

包括有“多目標線性規劃”、“多目標非線性規劃”與“多目標混合整數規劃”等。

2. 不確定性多目標規劃

不確定性多目標規劃依不確定性之描述方法又可分為“機率性多目標規劃”、“模糊多目標規劃”、“灰色多目標規劃”與“灰色模糊性多目標規劃”等。

由於解出之非劣解為許多可能解之集合，因此在最後求解過程中，加入決策者之偏好，而得到一「偏好解」。依決策者在決策過程中所扮演的角色，多目標規劃又可分為四種(Hwang and Yoon, 1981)：

1. 決策者完全不提供偏好資訊(No Articulation of Preference Information)

當規劃者對於問題確認、目標函數與限制式決定後，決策者不須提供任何主觀之偏好資訊，規劃者依據目標式及限制式求出最佳之妥協解，而決策者則接受則規劃者所提供的結果。此法的優點即是其結果不受到規劃者之影響；缺點則是必須對決策者的偏好予以許多的假設。

2. 決策者事前提供偏好資訊(A Prior Articulation of Preference Information)

規劃者解決實際問題前，決策者事先提供本身的偏好資訊，因此所求得之解為滿足決策者之偏好解。此方式的優點為求解容易，成本較低，且結果易為決策者接受，這種上至下的分析方式，頗符合實際決策模式；缺點則難求得決策者真正的價值函數及提供所必須的偏好資訊。

3. 決策者逐漸提供偏好資訊(Progressive Articulation of Preference Information)

此即為互動法(Inter-reactive Method)或交談式法，由於決策者對於問題之認知或理解程度，係受到決策情況與環境之影響，往往只能提供局部的偏好資訊，規劃者再根據這些資訊修改模式並求解，在進行多次反覆過程後，逐漸求得一滿意解。此方式的優點是決策者不需要事先提供偏好資訊；缺點則是決策者無法確保在每一步驟都能提供正確的局部偏好，同時也無法保證在一定次數的求解過程後，能求得一滿意解，此外這種方法也較費時。

4. 決策者事後提供偏好資訊(A Posterior Articulation of Preference Information)

此法為非劣解法，本法不需要決策者的效用函數或提供任何的偏好資訊，完全由規劃者求出問題所有或大部分的非劣解，然後再由決策者選擇其最滿意解。此法的優點在於決策者有更多的選擇機會，而且求解過程中不需要決策者的偏好資訊；缺點則是計算複雜、大規模的問題難以使用此法求解，而且產生的非劣解太多時，會造成決策者無從選擇的情況。

此外，除了以上多目標規劃法之分類，尚有其他整合多目標規劃，如類神經網路(Neural Network)、遺傳基因演算法(Genetic Algorithm)、層級分析法(Analytic Hierarchy Process)和近年來所發展的螞蟻族群演算法(Ant Colony System Algorithm)的引進，使得 MCDM 方法所能處理的問題更廣泛、規模更大，也愈符合現實生活及人類決策之過程。

2.4.1 模糊多目標規劃方法

1965 年由美國控制理論專家 查德(L. A. Zadeh)首先提出模糊集理論(Fuzzy Set Theory)，目前模糊理論已廣泛應用於自動控制、管理科學、作業研究和人工智慧等領域。同時將模糊理論應用於線性、非線性規劃、整數規劃、網路、專家系統和多評準決策等方法。多目標規劃法之目的乃將現實環境複雜的問題，以明確的數學模式表示，但真實世界中，很多狀況並不是那麼地明確清楚，而模糊理論恰能解決這類問題，以提供更有彈性的模式來模擬現實生活中大規模且複雜的系統。Tanaka et

al.(1974)提出「模糊數學規劃」(Fuzzy Mathematics Programming ; FMP)的觀念 ;
Leung(1984/1988)將模糊數學規劃(FMP)問題分成四類 :

1. 明確的目標式和模糊限制式 ;
2. 模糊的目標式與明確的限制式 ;
3. 模糊的目標式和限制式 ;
4. Robust Programming 可能性(Possibility)數學規劃之一種。

Martinson 於 1993 年提出模糊多目標規劃法(Fuzzy Multiobjective Programming ; FMOP)之概念,將限制式的模糊邊界定義為一個「符合限制滿足程度」的隸屬函數,同時轉到目標式,再對每一目標式求出兩個參考值,同時定義一個「達成目標滿意程度」的隸屬函數,最後將總目標式定義為同時滿足各滿意度的交集,再計算一次折衷解(compromise solution)。FMOP 主要的特色:(1)先分別以單目標求解,以取得各目標最好與最壞的兩個參考值(即報酬表, payoff table);(2)以每目標式的兩個參考值定義滿意度的隸屬函數(membership function),再以所有目標滿意度的交集為總目標式,重新求解以求得折衷解;(3)在求解過程中,不須加入決策者的偏好資訊。

Bit et al. (1992、1993a、1993b)歸納出四種模糊多目標規劃法: Zimmermann 的最大最小法、簡單加成法、權重加成法和優先順序法。最小值最大化運算(max-min-Operation)的方法,將多目標轉為單目標求解,說明如下。

步驟一：決定各目標與限制式之上下界

假定決策者對第 i 個目標 f_i , 有最滿意理想值上界 f_i^* 與下界 f_i^- 而此上下界之決定,可由決策者依照其所感認之理想水準,或將此目標視為可行解空間中之函數,經由計算而得。如構建報酬表(payoff table), 報酬表之建立方式如下:

1. 先對個別的目標,乃是求取單目標之最佳解 $f_1^*(x^1), f_2^*(x^2), f_3^*(x^3), \dots, f_k^*(x^k)$;
2. 將上述步驟所求取的各目標最佳解之決策變數值 $x^1, x^2, x^3, \dots, x^k$, 分別代入其他目標函數, 建立報酬表(payoff table)如表 2.1。

表 2.1、報酬表(payoff table)

	f_1	f_2	f_3		f_k
x^1	$f_1^*(x^1)$	$f_2(x^1)$	$f_3(x^1)$		$f_k(x^1)$
x^2	$f_1(x^2)$	$f_2^*(x^2)$	$f_3(x^2)$		$f_k(x^2)$
x^3	$f_1(x^3)$	$f_2(x^3)$	$f_3^*(x^3)$		$f_k(x^3)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
x^k	$f_1(x^k)$	$f_2(x^k)$	$f_3(x^k)$		$f_k^*(x^k)$
f_i^*	$f_1^*(x^1)$	$f_2^*(x^2)$	$f_3^*(x^3)$		$f_k^*(x^k)$
f_i^-	min $[f_1(x^1), f_1(x^k)]$	min $[f_2(x^1), f_2(x^k)]$	min $[f_3(x^1), f_3(x^k)]$		min $[f_5(x^1), f_k(x^k)]$

步驟二：構建隸屬函數

當目標式隸屬函數的圖形如圖 2.3 所示時，

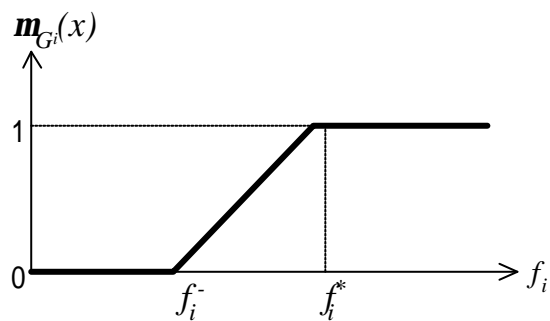


圖 2.3、目標式隸屬函數圖

則對於第 i 個模糊目標之隸屬函數：

$$m_{G_i}(x) = \begin{cases} 0 & , f_i \leq f_i^- \\ \frac{f - f_i^-}{f_i^* - f_i^-} & , f_i^- \leq f_i \leq f_i^* \\ 1 & , f \geq f_i^* \end{cases} \quad \text{式(2.23)}$$

表示目標之理想水準小於或等於 f_i^- 時其隸屬度為 0，大於或等於 f_i^* 時，隸屬度為 1，若在兩點之間則為 0 至 1 之間的單調函數。

步驟三：建立決策集合之隸屬函數

決策集合之隸屬函數 $m_b(x)$ 為

$$m_b(x^*) = \min_{i,j} \{m_{G_i}(x), m_{C_j}(x) \mid i=1,...,k; j=1,...,m\} \quad \text{式(2.24)}$$

式 2-24 中之 max-min Operation 式表示此模式之可行模糊集合為目標式和限制式之交集。由於決策者需要明確之決策提議，所以需要此決策集合中隸屬程度最高之值，故取其最大值，而得到一對應之隸屬函數：

$$\begin{aligned} m_b(x^*) &= \max \min \{m_{G_i}(x^*), m_{C_j}(x^*) \mid i=1,...,k; j=1,...,m\} \\ &\geq \max \min \{m_{G_i}(x), m_{C_j}(x) \mid i=1,...,k; j=1,...,m\} \end{aligned} \quad \text{式(2.25)}$$

步驟四：將多目標化為單一目標求解

最後此問題可轉換成如下明確的 LP 問題來求解：

$$\text{Max } \lambda \quad \text{式(2.26)}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } &\left[\frac{f_i - f_i^-}{f_i^* - f_i^-} \right] \geq \lambda, \quad i=1,...,k \\ &Ax \leq b, \\ &x \geq 0 \end{aligned} \quad \text{式(2.27)}$$

如此便可利用一般線性規劃方式求解。

2.4 車輛途程問題之演算法

一般 VRP 求解方法可分為「最佳解求解方法」與「啟發式解法」兩種。最佳解方法有「分枝限定法」(Branch and Bound)、動態規劃(Dynamic Programming)、切面法(Cutting Plane)。但由於車輛路線問題具有 NP-Hard 的特性，會因節點數的增加使得其運算的複雜度成指數性增加。

Bodin 等(1983)整理車輛路線問題之啟發式解法，分成六類：

1. 先分群再排路線(Cluster First-Route Second)

將所有需求點先大略分為幾個群組，然後再將各個群組分別求取最佳車輛路線，以 Gillete 與 Miller(1974)掃描法(Sweep Procedure)。

2. 先排路線再分群(Route First-Cluster Second)
首先針對所有的需求點建立一條經濟路徑，然後在將此一路線拆成許多適合的路徑。
3. 節省法與插入法(Savings or Insertion Procedure)
最著名的為 Clarke 與 Wright(1964)所提出之節省法。先建立一個起始解。計算每個需求點上的節省值，依照節省值之大小順序構建路線，直到無法節省為止。
4. 改善與交換法(Improvement or Exchange Procedure)
必須仰賴其他方法產生一個起始路線，以迭代的方式利用交換改差法減少路線距離，直到無法改善之後才停止交換。由於 VRP 屬於 NP-Hard 問題，通常無法在短時間內求得最佳解，因而必須犧牲搜尋空間解的完整性，僅針對可能發生最佳解的情形加以探討，以縮短求解時間，即所謂的啟發式解法(Heuristic Method)。此一啟發式解法即是利用改善與交換法，不斷在廣大的搜尋空間中，找尋最佳解。
5. 數學規劃法(Mathematical Programming Approaches)
此法針對放鬆後的數學模式(Relaxed Formulation)進行最佳化處理，如分枝界限法、動態規劃法等。
6. 人機互動法(Interactive Optimization)
一種將人的反應能力納入問題求解過程的一般性解題方法，能夠因應真實世界的限制條件改變來做適當修正，使得最後答案能夠符合真實狀況。

而大致上，可將啟發式解法分成二類：

1. 路徑建構啟發式解法：最鄰近法、節省法、插入法等
2. 最佳化之啟發式演算法則有禁忌搜尋法(Tabu Search)、模擬退火法(Simulated Annealing)或基因演算法(Genetic Algorithm)等，以下將簡單說明其概念：

(1). 禁制搜尋法(tabu search; TS)

禁忌搜尋法係由 Glover and Hansen 於 1986 年提出，為一人工智慧的搜尋方法：在鄰域進行搜尋，並應用人工智慧的記憶機制，將已搜尋過的解紀錄在「禁制清單」(tabu list)，避免重覆性或毫無目標的搜尋。當再尋找下一個鄰近解時，只利用不在禁制清單中的路徑進行交換或插入，以期能找到比目前更好的解。值得注意的是，TS 的機制在於將搜尋結果紀錄於「禁制清單」中，故尋優績效將受到電腦記憶體的限制。而且 TS 也存在所有啟發式解法的問題，便是無法確

保可求得整體最佳解。

(3). 模擬退火演算法

由 Kirkpatrick et al. (1983)所提出,係根據物體退火過程和求解最佳化問題間的類比關係所發展,允許在某一機率值下,目標值可以向上移動,以求跳脫局部最佳解。然而其缺點為運算時間長,執行時間和精確度對控制參數很敏感。

(3). 基因演算法

一種新的人工智慧方面的搜尋技巧,最初由 John Holland 和其學生於 1975 年所發表。基因演算法乃基於「物競天擇」及「遺傳法則」構建而成的演算法。基本精神在於演化與篩選,遺傳演算法最主要的部份是利用三個基本運算元:

(i). 複製:係依據每一染色體之適合度高低,決定其繁衍子代多寡之機制;(ii). 交配:將經過複製過程篩選出之染色體予以配對,再經由彼此間所進行之基因交換行為產生子代;(iii). 突變:針對子代之遺傳基因以一定機率,更動某一基因值,以防止染色體於複製及交配過程中,遺漏重要訊息或落入局部最佳解。依據以上三法則的重覆運作把較差的解淘汰。Malmberg(1996)將遺傳演算法的概念運用於求解 VRPTW 問題。遺傳演算法的缺點在於無法保證一定收斂且求解時間會隨染色體字串位元數的增加成指數性增加。

為了求解考量旅行時間可靠度之車輛途程模式,本研究乃利用螞蟻族群演算法,螞蟻族群演算法乃 1997 年 Dorigo 等新發展的一套人工智慧演算法,其主要是參考自然界螞蟻的行為發展而成,而螞蟻族群演算法主要也是由三個主要的法則所控制,分別為狀態轉換法(state transition rule)、局部更新法(local updating rule)與整體更新法(global updating rule),詳細有關螞蟻族群演算法之運作程序,將在第四章介紹。而從表 2-1 乃探討螞蟻族群演算法(Ant Colony System; ACS)、基因演算法(Genetic Algorithm; GA)、進化演算法(Evolutionary Programming; EP)和模擬退火演算法(Simulated Annealing; SA)四種啟發式演算法之求解績效。其中分別列出各演算法所求得之最佳整數解、最佳實數解與求得最佳整數解之計算次數。由此可看出 ACS 之結果與運算效率幾乎都是最好的。雖然在 50 個城市的範例中,進化演算法所求得之實數解較 ACS 好,但是 ACS 在求解效率方面,卻是大大領先進化演算法。由於螞蟻理論求解結果與效率比起其他啟發式演算法有過之而無不及,故本研究採用螞蟻族群演算法進行求解。

表 2.1、ACS 與其他啟發式演算法比較表

問題規模	ACS	GA	EP	SA	最佳解
50 個城市	425 (427.96) [1,830]	428 (N/A) [25,000]	426 (427.86) [100,000]	443 (N/A) [68,512]	425 (427.96) [1,830]
75 個城市	535 (542.37) [3,480]	545 (N/A) [80,000]	542 (549.18) [325,000]	580 (N/A) [173.250]	535 (542.37) [3,480]
100 個城市	21,282 (21,285.44) [4,820]	21,761 (N/A) [103,000]	N/A (N/A) [N/A]	N/A (N/A) [N/A]	21,282 (21,285.44) [4,820]

資料來源：Dorigo,1997

三、考量旅行時間可靠度之車輛途程模式

由於交通狀況受到許多外在因素影響，故交通路網狀況並非一成不變，而影響路網的因素主要可區分成兩種類型：(1)、「重現性干擾」(recurrent disturbance)。其中最明顯的例子，便是路網尖離峰的特性。在每天上下班的尖峰時候，交通需求量常常超出原本路網設計所能負荷的程度而出現壅擠的車潮。而交通尖峰的情況，每天都會周而復始地不斷發生，所以稱為“重現性”干擾。(2)、「非重現性干擾」(Non-recurrent disturbance)。例如天氣、地震與土石流等天然因素或車禍、車輛拋錨等意外事故，由於這些事件都可能是無預警地發生，而且不具有周期性，故這些情況皆屬於“非重現性”干擾，故非重現性干擾對於路網的影響都是短暫的或是持續一段時間而已，並不會每隔一段固定時間就會發生。由於路網會受到種種的干擾而造成原有的服務水準有所變動，因此旅行時間不能單以一固定值表示而是應該呈現一個機率分配的狀況。然而，傳統 VRP 模式多以一個平均旅行時間值代表旅行時間，但實際上，由於路網的交通狀況隨時改變，所以無法單用一數值就能描述出路網的所有狀況，故本研究嘗試將旅行時間視為一機率分配的型態，同時將其套用可靠度理論的觀念，得到一明確的旅行時間可靠度值，再與車輛途程問題結合，期能真實路網狀況下，求得最可靠、準確性最高路徑。

本章內容如下：在 3.1 節，首先闡述本研究所探討之課題；3.2 節將勾勒出本模式構建之思考流程；3.3 節則介紹可靠度工程理論，以了解可靠度之基本概念；在 3.4 節中，彙整說明一些旅行時間可靠度相關模式；3.5 節考量 VRP-TW 問題的特性，提出時窗可靠度之概念與數學模式，最後發展結合了時窗可靠度之車輛途程模式。

3.1 研究課題分析

【1】. 時窗限制之車輛途程問題之特性為何？

一般而言，車輛途程問題的特性有場站(單一 / 多場站)、車輛(單一 / 多車種)、顧客(已知 / 隨機)等。但對於時窗限制之車輛途程問題而言，最重要的是時窗限制。基本上而言，時窗限制大致可分成硬時窗與軟時窗兩種，其定義已於 2.1.2 小節說明。一般來說，硬時窗乃強制限制車輛必須在時窗之內到達顧客端，雖可保證車輛一定在時窗之內到達，但是常常會發生找不到可行解的狀況。而以軟時窗方式考量時，雖無法確保車輛皆在時窗內到達，但卻較有彈性而容易找到可行解，同時也較符合現實狀況，以上便

是以硬時窗與軟時窗方式考量時，兩者之特性與差異。

【2】. 如何考量旅行時間可靠度？

由於可靠度工程理論已普遍應用於各種工程領域，本研究將在 3.3 小節將簡介可靠度工程理論，描述可靠度之基本概念。同時 3.4 小節彙整以往文獻中所構建之旅行時間可靠度指標，建立合適的旅行時間可靠度。

【3】. 何謂旅行時間可靠度？

旅行時間可靠度可能會因為研究者之看法不同，而有些許差異，但是一般而言，所謂的「旅行時間可靠度」乃定義為「在一對起迄對間，能夠順利在特定時間內完成旅次之機率」。故考量旅行時間可靠度時，主要需考量三個要素：(1)「一對起迄對間」，意指界定評估範圍；(2)「特定時間內」，為一門檻值，區別出何謂可靠與不可靠；(3)「順利完成之機率」，為一量化指標。

【4】. 為什麼要考量旅行時間可靠度

由於受到交通需求量之變動、道路容量之縮減、天氣或是意外事故之影響等各種不確定因素，是故路網之交通狀況並非是一成不變，例如一天當中，交通狀況具有尖離峰之特性，則可能會導至行駛相同路線而所需的旅行時間便有所不同，而且在交通量愈壅擠的都市中，兩者相差的幅度就會愈大，但是過去研究往往忽略交通狀況變動的影響。近年來，許多研究開始以「路網可靠度」的角度來研究交通量指派、路網設計或交通管理等課題。因此本研究期能藉由「旅行時間可靠度」將路網之不確定性轉為一定量的指標，使得管理者能更能掌握交通狀況，有效提升路網使用效率且降低整體社會成本。

【5】. 如何將旅行時間可靠度之觀念與時窗限制之車輛途程模式結合？

考量時窗限制之車輛途程問題乃重視的是，車輛是否準時在時窗之內到達，因此本研究中將原本旅行時間可靠度的想法，轉換為「時窗可靠度」之觀念。所謂之「時窗可靠度」乃是指「車輛準時在時窗之內到達顧客處」。有關時窗可靠度，將在 3.5 小節進一步說明之。

【6】. 如何求解考量旅行時間可靠度之車輛途程問題？

由於 VRP 乃屬於 NP-hard 問題，通常以啟發式解法可獲得較好的結果而 Dorigo 於 1996 年首次提出螞蟻族群演算法，且以銷售員問題(TSP)為研究主軸。由於螞蟻族群演算法乃由自然界的螞蟻行為所發展的一套啟發式演算法。當螞蟻蒐集食物時，藉由費洛蒙之間接溝通而得到一條最佳路徑。因此螞蟻族群理論相當適合求解車輛途程問題，由文獻中也可發現螞蟻理論所得到之結果不遜於其他啟發式演算法，甚至更好，因此本研究將採用螞蟻理論求解之。

【7】. 如何供業者作為經營策略分析的工具？

由於「可靠度」可說是一個績效指標，既是指標，乃應用於評估系統或是設備等之優劣，進而提供管理者做為改善、維護甚至設計之用。因此，考量旅行時間可靠度，乃提供物流業者或管理者可依自我需求不同而予以調整，而不單只是被動地接受傳統車輛途程問題唯一解之結果。

3.2 模式建立之概念分析

本研究模式發展的思考流程主要可分成三大部分，如圖 3.1：

1. 時窗限制之 VRP 模式

本研究模式乃是以考量時窗限制之 VRP 模式為基礎，傳統考量時窗限制之 VRP 模式的目的，乃是在容量、時窗等限制條件下，追求最小旅行成本之路徑。有關傳統 VRP 問題之數學模式已於第二章中予以介紹，故在此不再贅述。

2. 發展時窗可靠度

針對時窗限制之 VRP 模式而言，最重要的是車輛能否在時窗內準時抵達顧客端。然而抵達顧客端之時間乃是受到路段旅行時間所影響，當路段之旅行時間值為一機率分配時，則車輛抵達顧客端的時間也必然呈現一個機率分配的情況，故藉由路段旅行時間期望值與標準差，亦可推算出抵達時間之期望值與標準差。考量可靠度理論的基本概念與時窗限制之 VRP 問題的特性後，提出「時窗可靠度」之概念，所謂的「時窗可靠度」是指「車輛能準時在時窗內抵達之機率」，例如當時窗可靠度為 0.8 時，代表有百分之八十的機會，車輛能準時抵

達到顧客處提供服務，有關時窗可靠度之詳細內容將於 3.5 小節中說明之。若是決策者設定一服務門檻值，當時窗可靠度達到服務門檻時即代表服務成功，但未達到服務門檻時，則視為服務失敗，例如當決策者要求服務門檻為 0.8 時，而實際上的時窗可靠度為 0.7 時，則服務失敗的機率則為 0.1。

3. 整合可靠度之 VRP 模式

本研究乃整合時窗可靠度與時窗限制之 VRP 模式，發展出考量旅行時間可靠度之 VRP 模式，以求得服務最可靠(準點可能性最高)而旅行成本最小的路徑。

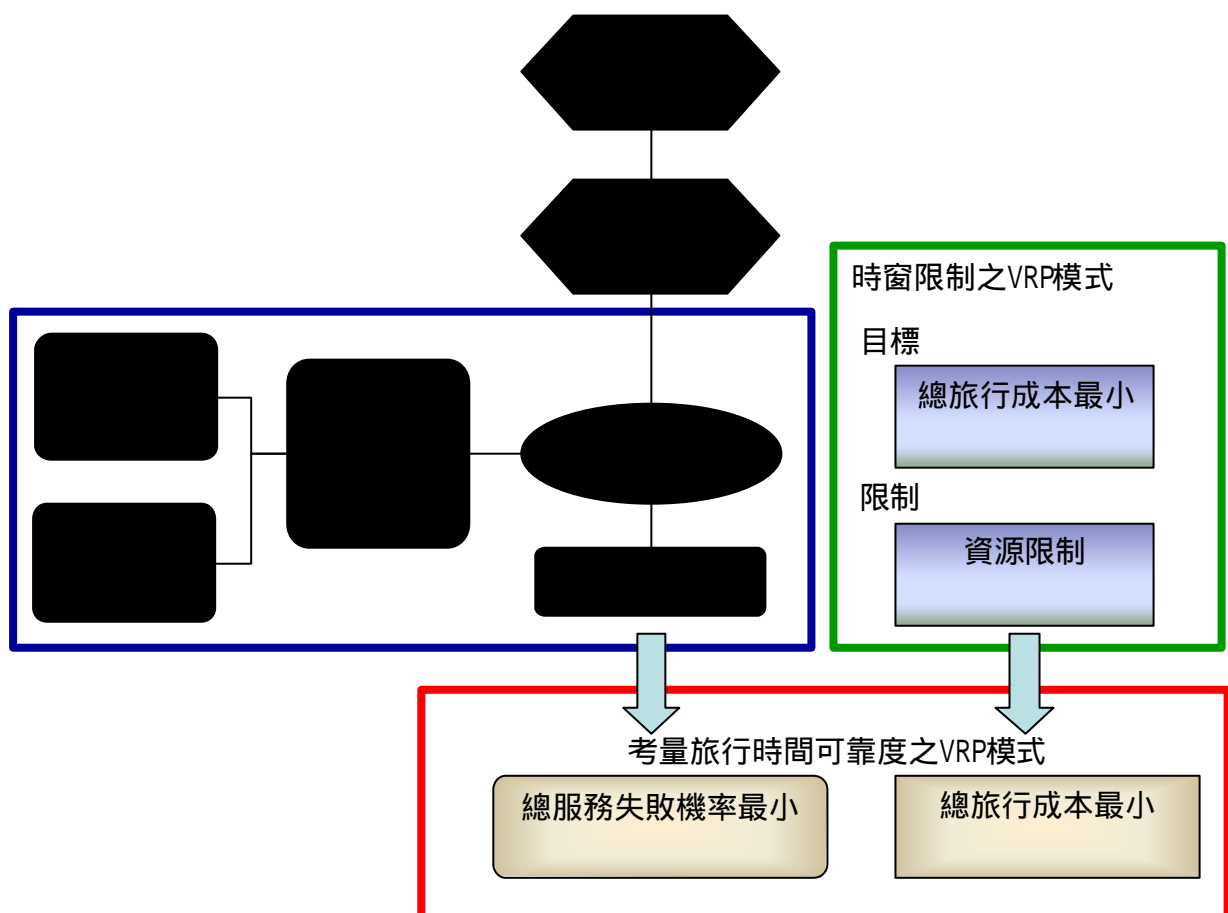


圖 3.1、模式思考流程圖

資料來源：本研究整理

3.3 可靠度工程理論

可靠度工程理論(Reliability Engineering)乃是「運用數學或統計及分析方法，來預估某項設備或系統的可靠度，以及找出可藉由改變設計來改善可靠度的一門工程理論」(張明坤，1996)。因此，可靠度工程乃是以「可靠度」為指標進而改善系統績效，而所謂的可靠度，廣義地說，可靠度代表沒有故障或是操作成功時之情況，以運輸為例，一般人常說捷運系統的可靠性高，可能指的是捷運系統之準點性高，但是又該如何界定準點性的高低呢？故在分析研究方面，為了清楚界定系統是否可靠，則將可靠度予以量化表示。而「可靠度」的正式定義為：「組件、裝置、設備、或系統在一特定時間範圍及規定條件情況下，能順利完成所要求任務的機率」。如此一來，便能很容易地界定系統績效好壞、穩定與否。例如火車依照時刻表準時到站的機率為 52%，則火車到站時間的可靠度即等於是 0.52。

假設一系統承受之負載以 l (load / stress)表示，而系統最大承受的強度(capacity / strength)為 c ，當系統所承受之負載超出其強度的時，代表系統發生失敗，也就是圖 3.2 中實心部分，故以機率型式表示系統失敗機率 p 如式 3-1：

$$p = P\{l \geq c\} \quad \text{式(3-1)}$$

相反的，系統可靠度乃是系統順利完成任務的機率，故「可靠度」表示為

$$r = 1 - p = P\{l < c\} \quad \text{式(3-2)}$$

如果系統之強度 c 為一定值，而負載 l 為一隨機分佈的情形，如圖 3.2 所示。當負載 l 之機率密度函數(PDF)為 $f_l(l)$ ，則負載介於 l 與 $l+dl$ 間的機率為

$$P\{l \leq l \leq l + dl\} = f_l(l)dl \quad \text{式(3-3)}$$

由於系統可靠度為 l 小於 c 的部分，即是圖 3-2 中斜線部分。因此，系統可靠度可表示為

$$r(c) = \int_0^c f_l(l)dl \quad \text{式(3-4)}$$

若是負載之累積機率密度函數(CDF)則表示為下式

$$F_l(l) = \int_0^l f_l(l')dl' \quad \text{式(3-5)}$$

因此，當負載為 c 時，其系統可靠度以累積機率密度函數表示如下：

$$r(c) = \int_0^c f_l(l)dl = F_l(c) \quad \text{式(3-6)}$$

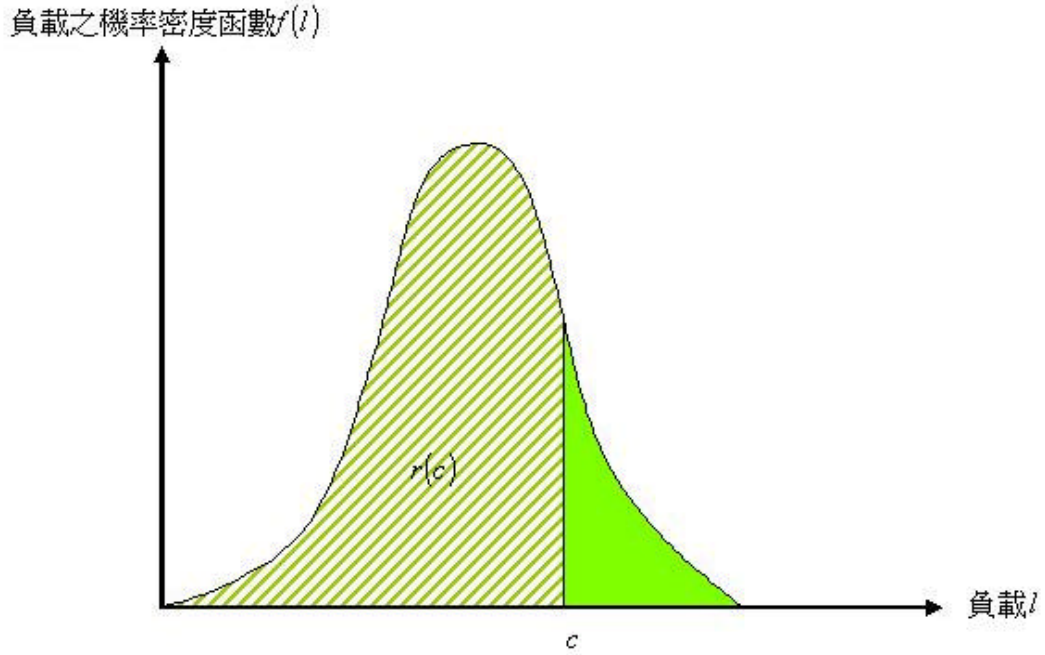


圖 3.2、負載與強度之關係圖

資料來源：本研究整理

但若是強度非是一定值，而也是一機率分佈時，則強度 c 之機率密度函數表示為 $f_c(c)$ ，所以強度介於 c 與 $c+dc$ 間的機率為

$$P\{c \leq c \leq c+dc\} = f_c(c)dc \quad \text{式(3-7)}$$

當強度之累積機率函數表示為下式

$$F_c(c) = \int_0^c f_c(c')dc' \quad \text{式(3-8)}$$

則其可靠度為

$$r = \int_0^{\infty} r(c)f_c(c)dc \quad \text{式(3-9)}$$

由式(3-4)中得到之 $r(c)$ 代入，可得到

$$r = \int_0^{\infty} \left[\int_0^c f_l(l)dl \right] f_c(c)dc \quad \text{式(3-10)}$$

相反的，若先假設負載 l 已知，而強度 c 不確定時，依上述推演之方式，最後可得到系統可靠度為

$$r = \int_0^{\infty} \left[\int_l^{\infty} f_c(c)dc \right] f_l(l)dl \quad \text{式(3-11)}$$

式子(3-10)和(3-11)雖然看起來並不相同，但其實式 3-10 和式 3-11 只是一體兩面的結果而已。

在這小節中，大略說明了可靠度工程理論，主要是說明可靠度之機率概念，以及了解如何以數學式表示可靠度。上述之負載與強度，將會隨系統的不同而名稱有所差異，如 3.4 小節中之第五項與第六項。但是，其基本的觀念卻是殊途同歸。

3.4 旅行時間可靠度指標

在許多研究針對旅行時間可靠度之定義或影響因素都有所不同，所有衍生出不同的旅行時間可靠度指標，以下彙整了一些主要的旅行時間可靠度之衡量方式。

1. Bell 和 Leda(1997)認為旅行時間可靠度主要受到“交通流量”之影響。假定已知路段流量為一常態分配，則路段的旅行時間也必然為常態分配。而一條路徑乃是由多個路段所組合而成，若假設路段間之旅行時間相互獨立，故一路徑之旅行時間機率分配表示為：

$$T \approx N\left(\sum_{a \in P(s)} m_a, \sum_{a \in P(s)} s_a^2\right) \quad \text{式(3-12)}$$

其中， T ：路徑 $P(s)$ 之旅行時間

μ_a ：路段 a 之平均旅行時間

s_a^2 ：路段 a 之旅行時間變異數

Bell 等乃定義「旅行時間可靠度」等於「旅行時間 T 小於上限值 t 之累積機率值」。從式 3-12 已知路徑之旅行時間期望值與變異數，標準化後，則旅行時間可靠度可表示為式 3-13

$$\Pr\{T \leq t\} = \Phi\left[\frac{t - \sum_{a \in P(s)} m_a}{\sqrt{\sum_{a \in P(s)} s_a^2}}\right] \quad \text{式(3-13)}$$

其中， $\Phi(y)$ 為標準常態分配累積機率密度函數，即是在標準常態分配下，由 $-\infty$ 到 y 的機率和。

而式 3-12 說明路徑之旅行時間期望值 / 變異數，等於所有組成路段之旅行時間期望值 / 變異數的加總，因此並未考量路段間旅行時間的相關性。

2. Chen 等(2002)認為原始設計之路段容量可能會受到違規停車、車禍等因素影響而導至服務效能降低，旅行時間增加，故旅行時間可靠度乃是受到“網枝容量”變化所影響。其定義「旅行時間可靠度」為「在特定之時段內，順利完成起迄對間旅次的機率」，故旅行時間可靠度 $t_w(q)$ 表示為

$$t_w(q) = P\left(\frac{u_w(C)}{u_w(C_0)} \leq q\right) \quad \text{式(3-14)}$$

其中， $u_w(C)$ 為受影響路網中，起迄對 w 之旅行時間。
 $u_w(C_0)$ 為原始路網中，起迄對 w 之旅行時間。
 代表服務水準。

式 3-14 表示，旅行時間可靠度 $t_w(q)$ 乃等於 $u_w(C)$ 與 $u_w(C_0)$ 比值至少大於或等於服務水準()之機率。而 值則表示不管道路是否毀壞等任何狀況下，所應提供的服務水準，故 值乃為一參數值。因此，當兩者比值小於可接受之服務水準時，則代表其旅行時間不可靠。

由式 3-14 可得到路網中每一起迄對之旅行時間可靠度，可是當要評估整體路網績效時，常常利用單一指標來描述整個系統之績效，讓人能夠一目了然。以下三種整合起迄對之旅行時間可靠度的方式：

$$(1). t_{\min}(q) = \min_w \{t_w(q)\}$$

在已知服務水準 下，令所有起迄對之旅行時間可靠度最小者當作是整體旅行時間可靠度。此方式雖不須再經過運算即可容易地得到整體路網的指標，但其缺點卻是無法真實地反應整體系統之績效。

$$(2). t_{\text{avg}}(q) = (1/W) \sum_{w=1}^W t_w(q)$$

令所有旅行時間可靠度之平均值代表整體路網的旅行時間可靠度 此方式乃是假設每一旅行時間可靠度之權重相同，也就是說假設路網中每一起迄對，對於整體系統可靠度之影響皆相等並無大小差異。

$$(3). \quad t_{wgt}(q) = \sum_{w=1}^W t_w(q) m_w / \sum_{w=1}^W m_w$$

整體路網之旅行時間可靠度等於每一起迄對之旅次需求量乘以旅行時間可靠度再除以整體路網之旅次需求量。也就是以旅次需求量作為權重，加權平均之後所得到的結果代表整體路網績效。

由於式 3-14 所得到的旅行時間可靠度，乃為「起迄對之旅行時間可靠度」，較適用運輸路網之規劃、設計或評估方面。

3. Bell 和 Cassir(2002)則使用「羅吉特隨機使用者均衡模式」(Logit SUE model)進行敏感度分析，以預估一般狀況之旅行時間分佈，進而求得旅行時間可靠度，而不必像傳統之研究多是模擬之方式預估旅行時間分配情形。文中乃旅行時間可靠度為：

$$R_j = \Pr(t_j < b t_{0j}) = \Phi\left(\frac{t_{0j}(b-1)}{\sqrt{\text{Var}(t_j)}}\right) \quad \text{式(3-15)}$$

其中， R_j 表示路徑 j 之旅行時間可靠度。

為一參數值。

t_j 為旅行時間

t_{0j} 為平均路徑旅行時間

依上述公式，其旅行時間可靠度定義為「路徑 j 之旅行時間(t_j)小於平均路徑旅行時間(t_{0j})乘上 b 倍的機率值」，例如當 b 設定為 1.1 時，代表只要實際旅行時間小於 1.1 倍的平均路徑旅行時間，皆是可容許的範圍，故 b 乃是決定旅行時間上界的一個門檻值。藉由調整 b 值，將可調整旅行時間可靠度之高低。

此外，Lam 和 Xu(1999)研究中對旅行時間可靠度的定義亦同。假設路段或路徑旅行時間為 T 為一常態分配之隨機變數，表示為 $T \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，其中 μ 為路徑之平均旅行時間； σ 為路徑旅行時間之標準差，而旅行時間可靠度等於「旅行時間小於某一上限 t 之機率」。故旅行時間可靠度表示為

$$R = \Pr\{T \leq t\} = \Phi\left[\frac{t - \mu}{\sigma}\right] = \Phi(x) \quad \text{式(3-16)}$$

4. 機會限制模式

機會限制模式已廣泛應用在環境評估分析、供水網路系統之設計等方面 (Guldmann,1983 ; Fuessle 等,1987 ; Jacobs 等,1997)。由於道路容量和旅行時間都非是固定的而是變動的情形，因此適合利用機會限制式將隨機型限制式轉換為確定型限制式以便求解之。

Lo 與 Tung(參見 Reliability of Transport Networks 書)提出「旅行時間超出機率」(travel time exceedance probability)，其定義為「路段旅行時間超出可接受水準($f_a t_a^f$)的機率」，表示如式 3-17。

$$P\{t_a(x_a) \geq f_a t_a^f\} \quad \text{式(3-17)}$$

其中， x_a ：路段 a 之流量。

$t_a(x_a)$ ：路段 a 之旅行時間。

t_a^f ：自由車流時之旅行時間。

f_a ：壅擠因子(congestion factor)， $f_a \geq 1$ 。

式 3-17 中，乃說明了旅行時間受到路段流量的影響。而其「旅行時間可靠度」則定義為「旅行時間超出機率需等於或小於可接受水準」，表示如式 3-18。

$$P\{t_a(x_a) \geq f_a t_a^f\} \leq b_a \quad \text{式(3-18)}$$

其中， b_a ：可接受之旅行時間超出機率值

因此， b_a 和 f_a 兩參數可依管理者的標準不同而設定之。

5. 旅行時間可靠度係為道路容量與交通流量的函數。

Lee 等(參考 Reliability of Transport Networks 書)乃應用可靠度工程理論的觀念，認為旅行時間可靠度受到「道路容量」與「交通流量」的交互影響。其中，交通流量與道路容量分別代表可靠度工程理論的負載 l 和強度 c ，若當交通流量乃利用全有全無指派法求得，故交通流量為一定值；然而道路容量會受到一些突發的意外狀況影響，故道路容量則是呈現一個常態分配的情況。

由於道路容量為一常態分配，故道路容量之機率密度函數則表示為

$$f_c(c) = \frac{1}{s\sqrt{(2p)}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{c-m}{s}\right)^2\right\} \quad \text{式(3-19)}$$

其中， c ：道路容量。

μ ：道路容量之平均值。

s ：道路容量之標準差。

因此，由 3.3 節所闡述的觀念可知，旅行時間可靠度乃是道路容量大於交通流量之機率，也就是圖 3-3 中斜線部分面積，故旅行時間可靠度則為式 3-20。

$$R(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{s\sqrt{(2p)}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-m}{s}\right)^2\right\} ds \quad \text{式(3-20)}$$

其中， x ：交通流量，為一定值。

μ ：道路容量之平均值。

s ：道路容量之標準差。

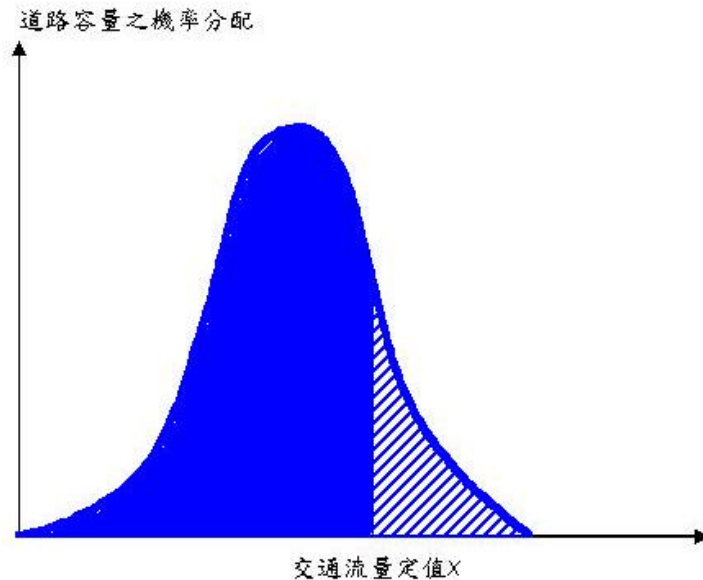


圖 3-3、道路容量與交通流量示意圖

資料來源：本研究整理

6. 旅行時間可靠度取決於預設與實際之旅行時間的關係。

國內鐘譽偉君(1999)同樣以可靠度工程之觀念建立旅行時間可靠度指標。與 Lee 等不同的是，鐘譽偉乃是以實際旅行時間與預設旅行時間分別代表負載與強度。因此，構建旅行時間可靠度時，定義隨機變數 X 為預設旅行時間，隨機變數 Y 為實際旅行時間，則運輸系統之旅行時間可靠度可表示為

$$\text{旅行時間可靠度} = P(Y < X) \quad \text{式(3-21)}$$

故此乃將「旅行時間可靠度」定義為「實際旅行時間 Y 小於預設旅行時間 X 的機率」。若是預設時間為定值時，如圖 3.4，則旅行時間可靠度表示為 $P_s = P(Y < x)$ 。相反的，不可靠之機率，即實際旅行時間大於預設旅行時間的機率，表示為 $P_F = P(Y > x)$ 。而失敗或不可靠機率 P_F ，即是圖 3.4 之斜線部分。

因此假設實際旅行時間 Y 為常態隨機變數，符合 $N(m_Y, s_Y)$ ，則可靠度為

$$P_s = P(Y < x) = \Phi\left(\frac{x - m_Y}{s_Y}\right) = \Phi(b) \quad \text{式(3-22)}$$

其中， b ：可靠度指標或安全指標。

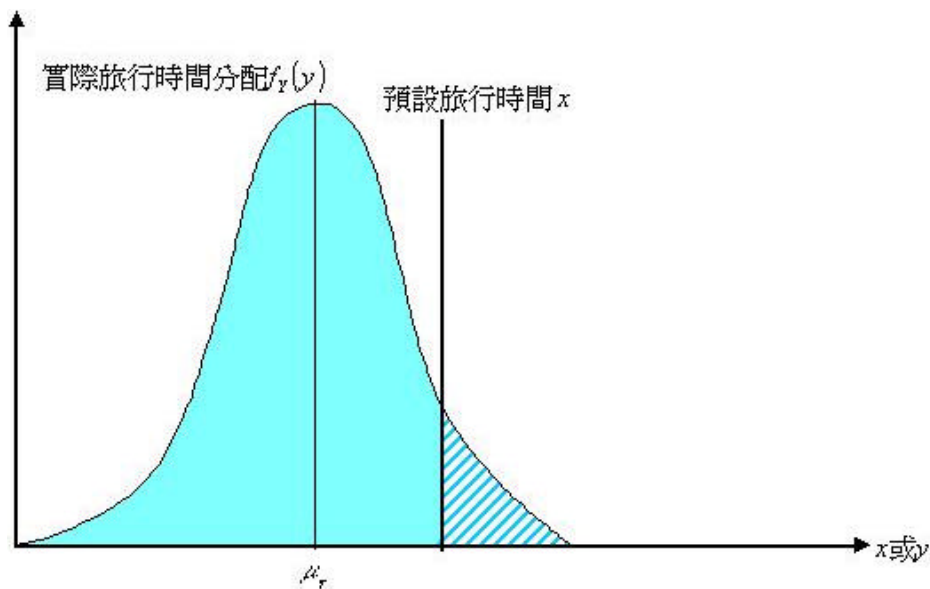


圖 3.4、旅行時間可靠度示意圖

資料來源：鐘譽偉，1999

在 3.2 節中，列舉了六種旅行時間的不同看法，因此導出不同的旅行時間可靠度表示方式。但是，其基本觀念卻都是相同的，也就是 3.1 小節所提及的「可靠度」即是「負載小於或等於強度的機率」。接下來的小節中，將逐步說明如何結合旅行時間可靠度，發展出本研究模式。

3.5 模式構建

3.5.1 旅行時間之連續性與隨機性

一般而言，旅行時間乃會隨時間變遷而改變，好比同一路段，尖峰時候或離峰時候之旅行時間便有所不同。因此，路段旅行時間應該為一個隨機變數且其機率分配隨時間改變，也就是路段旅行時間為進入路段時間的函數，表示為 $\{t_{ij}(D_i), D_i \in T\}$ ，其中 $t_{ij}(D_i)$ 代表車輛於時點 D_i 進入路段 ij 之旅行時間。故當不同時點進入同一路段時，則其通行之旅行時間也將有所不同，如此才能表現出旅行時間的兩種重要的特性「時間連續性」(continuous-time)與「隨機性」(stochastic)。圖 3.5 乃是由同一路段，在不同進入時點之平均旅行時間值與旅行時間標準差所繪製而成。

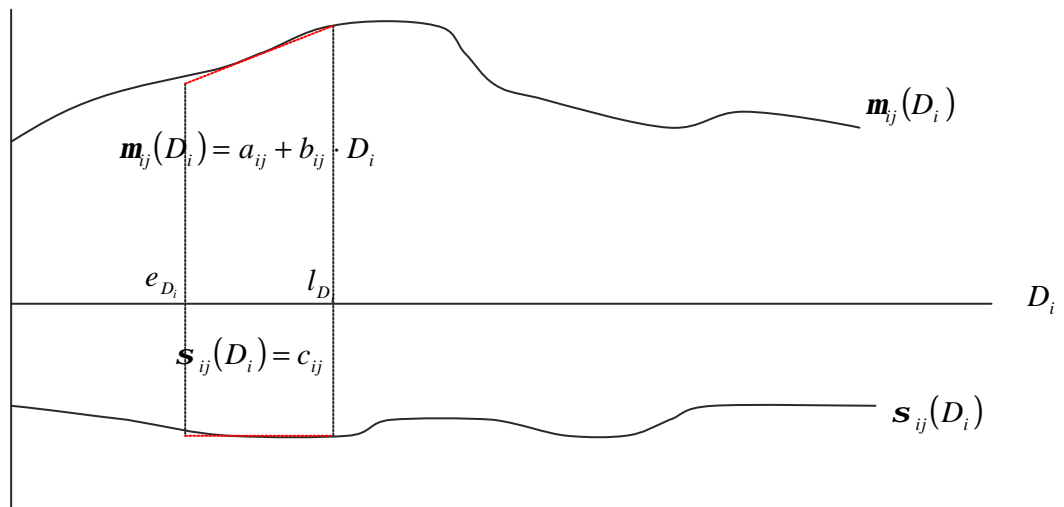


圖 3.5、隨時間變動之隨機旅行時間模式

資料來源：Fu 與 Rilett, 2000

當抵達時間 D_i 落在時窗 $[e_{D_i}, l_{D_i}]$ 時，旅行時間平均值 $\mu_{ij}(D_i)$ 和標準差 $s_{ij}(D_i)$ 可表示為(Fu 與 Rilett, 2000)：

$$m_{ij}(D_i) = a_{ij} + b_{ij} \cdot D_i \quad \text{式(3-23)}$$

$$s_{ij}(D_i) = c_{ij} \quad \text{式(3-24)}$$

$$e_{D_i} \leq D_i \leq l_{D_i} \quad \text{式(3-25)}$$

其中， a_{ij} 、 b_{ij} 與 c_{ij} 係為參數。由於旅行時間之平均值與標準差皆是抵達時間之函數，所以當不同時間進入同一路段時，則 a_{ij} 、 b_{ij} 與 c_{ij} 參數值即不同，因此旅行時間之機率分配便有所不同。

由於 VRP 模式之目標乃是追求一條最佳路徑，而路徑乃是由多條路段組合而成，但是兩連續路段間之旅行時間必然存在共相關性，因此一路徑之平均旅行時間 / 旅行時間標準差無法單純以所有路段之平均旅行時間 / 旅行時間標準差的總和表示之。故當以上述方式考量上下游路段間旅行時間連續性，將可有效解決路段間旅行時間的相關性問題，是故，本研究中，乃以式 3-23 與式 3-24 計算路段之平均旅行時間與旅行時間標準差，同時假設由於藉由過去經驗資料的累積以及 ITS 的發展，故可知 a_{ij} 、 b_{ij} 與 c_{ij} 三個參數值。

3.5.2 時窗可靠度(Time Windows Reliability)

雖然已知路段旅行時間之平均數與標準差，但是對於時窗限制之車輛途程問題而言，其重點乃是在於車輛能否準時在時窗之內到達，由此看出，時窗限制之車輛途程問題中，最重要的二個因素乃是「時窗」和「準時到達與否」。然而抵達顧客端的時間乃受到旅行時間之影響，當旅行時間為隨機變數時，抵達時間也將會是隨機變數，故抵達時間會有一機率分配的狀況，如圖 3.6 所示。因此當抵達時間 A_j 小於時窗開始時間 e_j 時，則車輛太早抵達目的地，故須等待到時窗開始之後才能服務顧客；相反的，當抵達時間 A_j 大於時窗結束時間 l_j 時，則車輛無法準時提供顧客服務，代表服務不可靠，影響顧客對於服務提供者之忠誠度。因此，為反應出服務提供者之服務品質，同時又考量旅行時間變動情形，在此提出「時窗可靠度」(time windows reliability)觀念。而本研究中，「時窗可靠度」乃定義為：

時窗可靠度係指車輛準時在時窗內抵達到目的地之機率。

如圖 3.3 所示，時窗可靠度即是圖中斜線區域。故時窗可靠度 R_j 以機率表示為

$$R_j = \Pr(e_j \leq A_j \leq l_j) \quad \text{式(3-26)}$$

其中， A_j ：抵達顧客處之時間。

e_j ：時窗開始時間。

l_j ：時窗結束時間。

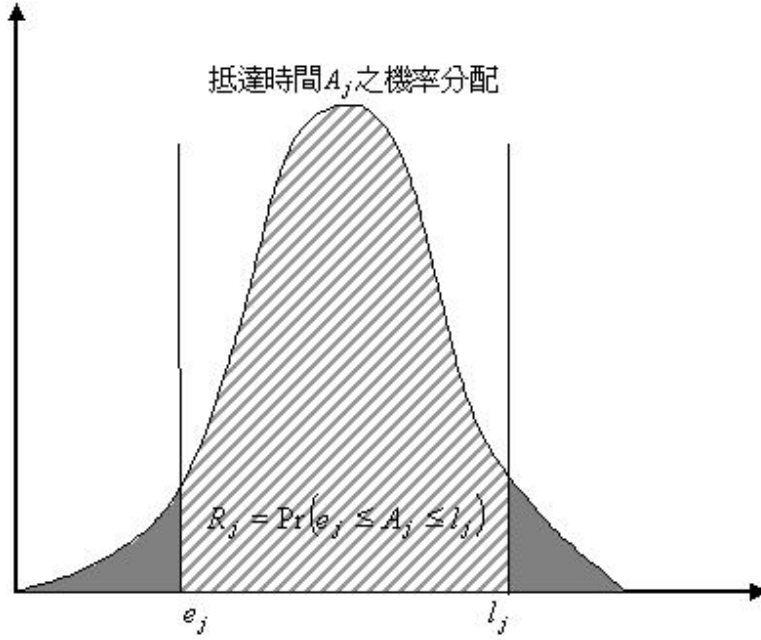


圖 3.6、時窗可靠度之示意圖

資料來源：本研究整理

假設路段旅行時間為常態分配時，則抵達時間 A_j 亦為常態分配，以標準常態分配之累積機率密度函數求算時窗可靠度時，如圖 3-7，則式 3-26 可改寫為式 3-27：

$$R_j = \Phi \left[\frac{l_j - E(A_j)}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}} \right] - \Phi \left[\frac{e_j - E(A_j)}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}} \right] = \Phi \left[\frac{l_j - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}} \right] - \Phi \left[\frac{e_j - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}} \right] \quad \text{式(3-27)}$$

其中， $E(A_j)$ 或 \bar{A}_j 均為抵達時間之期望值 / 平均值； $\text{Var}(A_j)$ 表示為抵達時間之變異數。而已知計算標準常態分配之累積機率密度函數（ $\Phi(u)$ 值）之公式為（參見可靠度工程導論）：

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) dx \quad \text{式(3-28)}$$

而將一般常態分配標準化後，其累積機率密度函數則轉換為式 3-29。

$$\Phi\left(\frac{x-m}{s}\right) = F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2ps}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{s}\right)^2\right] dt \quad \text{式(3-29)}$$

故將式 3-27 以式 3-29 代入，即可求得時窗可靠度值如式 3-30。

$$\begin{aligned} R_j &= \Phi\left[\frac{l_j - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}}\right] - \Phi\left[\frac{e_j - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}}\right] \\ &= \int_{-\infty}^{l_j} \frac{1}{\sqrt{2p \cdot \text{Var}(A_j)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}}\right)^2\right] dt - \int_{-\infty}^{e_j} \frac{1}{\sqrt{2p \cdot \text{Var}(A_j)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}}\right)^2\right] dt \end{aligned} \quad \text{式(3-30)}$$

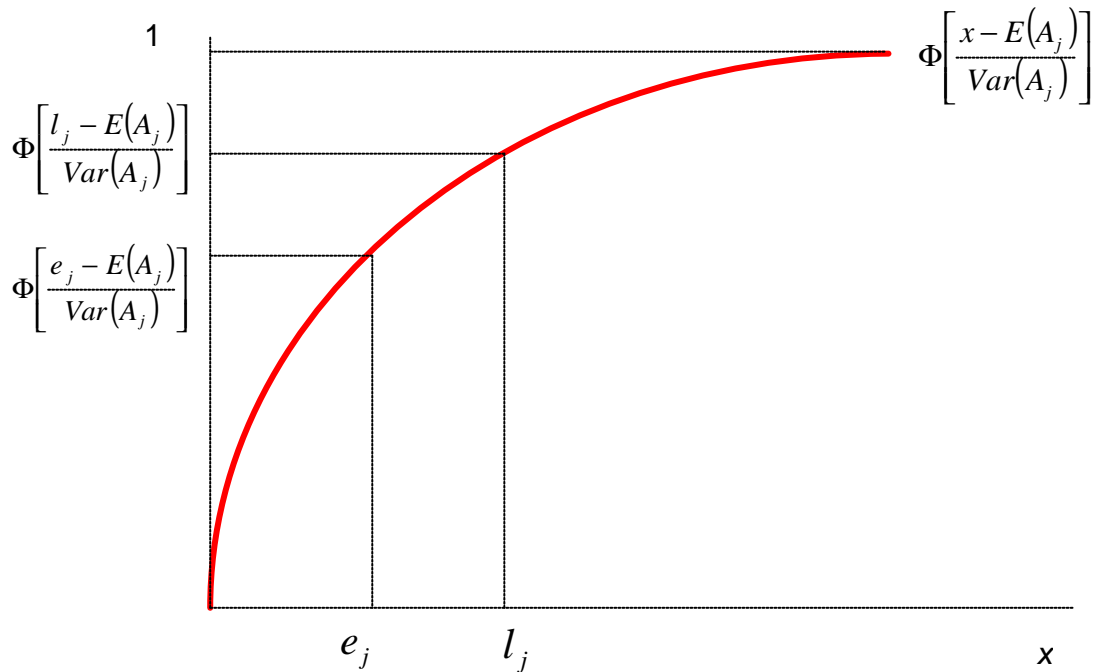


圖 3.7、抵達時間之累積機率示意圖

資料來源：本研究整理

3.5.2 小節逐步地說明時窗可靠度發展之概念，最後推導出時窗可靠度之數學表達方式，以計算出時窗可靠度值。然而目前僅可求知路段旅行時間平均值與標準差，

而計算時窗可靠度時，則需要抵達時間 A_j 之平均值與變異數，但是由於抵達時間乃受到路段旅行時間之影響，故在下一小節中，將說明如何藉由路段旅行時間求得抵達時間平均值與變異數。

3.5.3 抵達時間之期望值與變異數

為了計算出時窗可靠度，則必須輸入抵達時間 A_j 之期望值與變異數資料。而抵達時間之分配乃受到路段旅行時間影響，因此，須先藉由路段旅行時間推導出抵達時間之機率分配，本小節中，將說明如何推導抵達時間之期望值與變異數。

1. 抵達時間平均數？期望值 $\overline{A_j}$

傳統 VRPTW 模式計算抵達時間之數學式如式 3-31

$$A_j = A_i + w_i + s_i + t_{ij} \quad \text{式(3-31)}$$

式 3-31 乃說明「到 j 點之抵達時間 A_j 」等於「 i 點之抵達時間 A_i 」、「 i 點之等待時間 w_i 」、「 i 點之服務時間 s_i 」與「 i 點到 j 點之旅行時間 t_{ij} 」之總和。而傳統 VRPTW 模式中， t_{ij} 乃指旅行時間平均值，因此，為了反應旅行時間之特性，令 t_{ij} 等於 $\mu_{ij}(D_i)$ ，其中 D_i 為進入路段的時間，也就是服務完顧客 i 後，準備出發的時間，故式 3.31 可轉換成式 3-32

$$\overline{A_j} = \overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i} + \overline{m_{ij}}(D_i) \quad \text{式(3-32)}$$

$\overline{A_i}$ 、 $\overline{A_j}$ 分別為顧客 i 和顧客 j 之抵達時間期望值； $\overline{s_i}$ 為顧客 i 處之平均服務時間。且由於顧客 i 處之出發時間 D_i 可表示為

$$D_i = \overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i} \quad \text{式(3-33)}$$

故由顧客 i 至顧客 j 之抵達時間平均值 / 期望值 $\overline{A_j}$ 可轉換成下式表示

$$\begin{aligned} \overline{A_j} &= \overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i} + \overline{m_{ij}}(D_i) = \overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i} + \overline{m_{ij}}(\overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i}) \\ \text{其中 } \overline{m_{ij}}(\overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i}) &= a_{ij} + b_{ij} \cdot (\overline{A_i} + \overline{w_i} + \overline{s_i}) \end{aligned} \quad \text{式(3-34)}$$

其中， a_{ij} 與 b_{ij} 將隨 $(\overline{A_i} + w_i + \overline{s_i})$ 值而改變。

2. 抵達時間 A_j 之變異數

已知抵達時間之平均值 $A_j = A_i + w_i + s_i + \mu_{ij}(D_i) = D_i + \mu_{ij}(D_i)$ ，可推導求得抵達時間變異數為(Fu 與 Rilett,1998)

$$Var[A_j] = \{1 + m'_{ij}(E[D_i])\} \cdot Var[D_i] + s_{ij}^2(E[D_i]) \quad \text{式(3-35)}$$

將 μ_{ij} 與 c_{ij} 分別以式 3-23 和式 3-24 代入，得式 3-36。

$$Var[A_j] = \{1 + b_{ij}\} Var[D_i] + c_{ij}^2 \quad \text{式(3-36)}$$

由於 $D_i = A_i + w_i + s_i$ ，則求算抵達時間 D_i 值可歸納有以下兩種狀況：第一種是當配送車輛在時窗開始前即抵達時，則必須等到時窗開始後才能提供服務，故出發時間 D_i 等於時窗開始時間 e_i 再加上服務時間 s_i ；第二種情況乃是配送車輛在時窗開始之後到達，則出發時間 D_i 直接等於抵達時間 A_i 加上服務時間 s_i ，如式 3-37。

$$\begin{cases} D_i = e_i + s_i & \text{當 } A_i \leq e_i \\ D_i = A_i + s_i & \text{當 } A_i > e_i \end{cases} \quad \text{式(3-37)}$$

但是因為服務時間由服務提供者所掌控，故假設服務時間為一固定值，而時窗開始時間 e_i 亦為一固定值，所以出發時間 D_i 之變異數近似為

$$Var[D_i] = Var[A_i] \quad \text{式(3-38)}$$

同時，假設配送車輛都準時由場站出發，故在場站之出發時間變異數為零，如式 3-39。

$$Var[D_0] = Var[A_0] = 0 \quad \text{式(3-39)}$$

因此將式 3-38 代入式 3-36，則抵達時間變異數為式 3-40。

$$Var[A_j] = \{1 + b_{ij}\}Var[A_i] + c_{ij}^2 \quad \text{式(3-40)}$$

推導求得抵達時間之期望值與變異數後，即可求算時窗可靠度值。在本章最後一小節中，將整合時窗可靠度與傳統時窗限制之 VRP 模式，發展本研究之模式。

3.5.4、數學模式架構

本小節乃分成四部分說明：(1)首先，描述本研究模式之假設前提；(2)定義本研究問題之特性；(3)以一概念圖表現本研究模式之其本觀念；(4)列出考量旅行時間可靠度之 VRP 問題之數學模式。

1. 本模式假設前提

- (1). 假設由於過去經驗、資料的累積以及未來 ITS 先進科技的發展，將可得到路段之旅行時間資料，本研究模式假設已知 a_{ij} 、 b_{ij} 與 c_{ij} 三個參數值。
- (2). 假設路段之旅行時間為常態分配時，故抵達時間與出發時間亦為常態分配，且僅受前一位顧客處之抵達時間(出發時間)之分配所影響。
- (3). 假設由於考量服務時間可受業者自行控制，故服務時間(s_i)視為一定值。
- (4). 假設配送車輛皆準時由場站出發，且在場站，並無服務時間。

2. 問題之定義

本研究問題之定義：

- (1). 路網幾何描述：本研究問題主要是有一路網 $G=(V,A)$ 乃是由許多節點與節線所組成。其中 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_N\}$ 為節點(node)的集合，而 $A = \{(v_i, v_j) : i \neq j, v_i, v_j \in V\}$ 是節線(arc)的集合。節點 v_0 則代表場站(depot)或是物流中心。而其他節點則分別代表配送的顧客(customers)。同時，每一條節線對應一個旅行成本 c_{ij} 。
- (2). 場站：本研究問題只考量單一場站，而且所有配送車輛皆由場站出發同時最後必須回到場站。
- (3). 車輛：在場站中，共有 K 輛貨車，且具有相同的載重限制 Q_k ，故本研究問題乃

是單一車種的問題。同時，每輛貨車有其固定成本 c_v 與營運時間長度限制 r_k ，當多使用一輛車時，就會多增加一固定成本，而且車輛到達容量限制或營運時間限制時，則必須要回到場站。

- (4). 顧客：服務 N 位顧客，而且已知每位顧客之位置，而且每位顧客皆只能被服務一次。而且，每位顧客有其接受服務之時窗限制，配送車輛要盡量在時窗內服務顧客。
- (5). 目標：決定巡訪顧客順序之最佳路線，使得總旅行成本最小且總服務失敗機率最小。

3. 研究模式概念圖

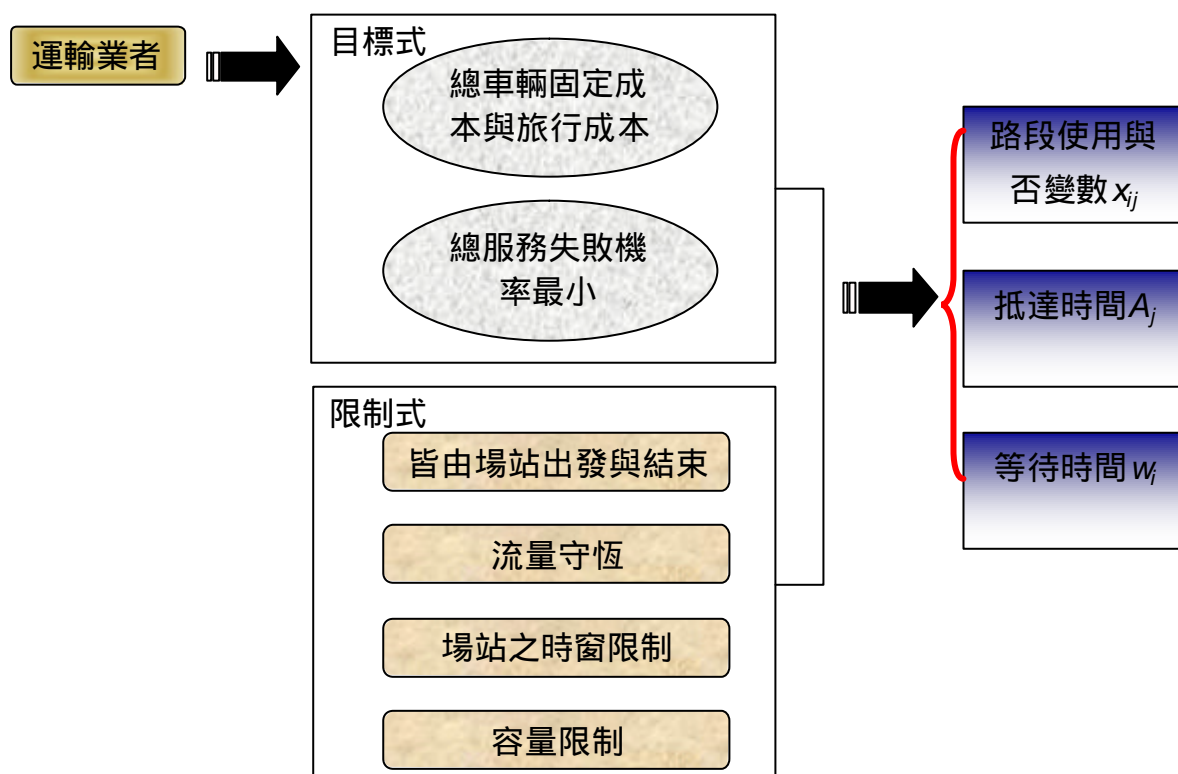


圖 3.8、研究模式概念圖
資料來源：本研究整理

4. 本研究之模式

(1) 變數說明

參數有：

k ：代表車輛 k ， $k \in \{1, \dots, K\}$ 。 K 為總車輛數。

N ：總顧客數。

c_{ij} ：由顧客 i 到顧客 j 之運輸成本，其中 $i \neq j$ ， $i, j \in \{0, 1, \dots, N\}$ 。

c_v ：使用車輛之固定成本。

t_{ij} ：由顧客 i 行駛到顧客 j 所花費之旅行時間，其中 $i \neq j$ ， $i, j \in \{0, 1, \dots, N\}$ 。

d_i ：顧客 i 之需求量。

Q_k ：車輛 k 之容量限制。

e_i ：在顧客 i 之時窗開始時間。

l_i ：在顧客 i 之時窗結束時間。

s_i ：在顧客 i 處之服務時間。

r_k ：車輛 k 之總行駛時間限制。

LOS_j ：要求之時窗可靠度水準，可視同顧客 j 要求之服務品質；或是業者 j 對於顧客之重視程度。

決策變數有：

A_i ：抵達到顧客 i 之時間。

w_i ：在顧客 i 處之等待時間。

$Var[A_j]$ ：抵達時間 A_j 之變異數。

R_j ：顧客 j 處之時窗可靠度值。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{當車輛行駛路段 } ij \text{ 時。 } i \neq j, i, j \in \{0, 1, \dots, N\} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} 1, & \text{有使用車輛 } k \text{ 時,} \\ 0, & \text{無使用車輛 } k \text{ 時。} \end{cases}$$

(2) 目標式

本研究模式的目標式主要為兩部分：目標一乃追求「總旅行成本最小」，而總成本乃是由「使用車輛之固定成本」與「營運成本」所組成；目標二乃是求「總服務失敗機率最小」，所謂「服務失敗機率」乃指實際時窗可靠度小於預設之可靠度的差值，換言之，當實際時窗可靠度大於預設之可靠度時，則無服務失敗的情況發生。當服務失敗機率愈小時，則代表配送車輛在預設之可靠度條件下，順利完成的機會就愈高。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{k=1}^K c_v d_k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N c_{ij} x_{ij} \quad \text{式(3-41)}$$

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^N \max(0, LOS_j - R_j) \quad \text{式(3-42)}$$

$$\text{其中, } R_j = \Phi \left[\frac{l_j - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}} \right] - \Phi \left[\frac{e_j - \bar{A}_j}{\sqrt{\text{Var}(A_j)}} \right] \quad \text{式(3-43)}$$

(3) 限制式

式 3-44 表示由場站出發之路徑最多只有一條；同理，式 3-45 表示進入場站之路徑最多也只有一條，此乃確保每一條路徑皆由中心場站出發，且最後一定回到中心場站。

$$\sum_{j=1}^N x_{ojk} \leq 1 \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{式(3-44)}$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i0k} \leq 1 \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{式(3-45)}$$

式 3-46 表示由顧客 i 出去之路徑只有一條；式 3-47 則表示進入顧客 j 之路徑也只能有一條，乃確保每位顧客只拜訪一次。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N x_{ijk} = 1 \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(3-46)}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ijk} = 1 \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(3-47)}$$

式 3-48 乃為容量限制式，每輛車行駛之路徑上，所有顧客的總需求量不可大於車輛的容量上限。

$$\sum_{i=0}^N d_i \sum_{j=0}^N x_{ijk} \leq Q_k \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{式(3-48)}$$

式 3-49 為車輛總服務時間之限制，當車輛之旅行時間、等待時間與服務時間之加總不大於車輛營運時間之限制。

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N x_{ijk} [\overline{m}_{ij} (\overline{A}_i + \overline{w}_i + \overline{s}_i) + \overline{w}_i + \overline{s}_i] \leq r_k \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{式(3-49)}$$

式 3-50 乃計算到各顧客之平均抵達時間，其中在場站之抵達時間、等待時間和服務時間皆為零。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ijk} [\overline{A}_i + \overline{w}_i + \overline{s}_i + \overline{m}_{ij} (\overline{A}_i + \overline{w}_i + \overline{s}_i)] = \overline{A}_j \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(3-50)}$$

$$\overline{A}_0 = \overline{w}_0 = \overline{s}_0 = 0$$

式 3-51 乃計算抵達時間變異數，且一開始由場站出發時，其抵達時間之變異數乃設定為零。

$$Var[A_j] = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \{(1 + b_{ij}) Var[A_i] + c_{ij}^2\} x_{ijk} \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad \text{式(3-51)}$$

$$Var[A_0] = 0$$

式 3-52 乃確認是否有使用車輛 k ，由於式 3-52 乃說明 x_{ijk} 和 δ_k 乃為 0 或 1 的變數，因此當車輛 k 被使用時，則 x_{ijk} 必為 1，故為符合式 3-52 則 δ_k 必為 1；相反的，若是未使用車輛時， x_{ijk} 和 δ_k 則為 0。

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N x_{ijk} \cdot (\delta_k - 1) = 0 \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{式(3-52)}$$

$$x_{ijk}, d_k \text{ binary}$$

式(3-53)

3.6 小結

本章中，首先建立可靠度之基本觀念、彙整目前有關旅行時間可靠度之不同定義與模式，同時考量旅行時間的連續性與隨機性以解決路段間之相關性且反旅行時間變動狀況，接著提出時窗可靠度之概念，再說明如何獲得抵達時間之期望值與變異數，最後整合時窗可靠度與 VRP 模式，發展出考量旅行時間可靠度之 VRP 模式。接著在後面章節，將再說明如何套用啟發式演算法求解本研究模式，同時應用設計範例實驗之。

四、螞蟻族群演算法

由於 VRPTW 為一個 NP-hard 最佳化之問題，代表 VRPTW 問題求解之複雜度會隨路網的擴大而急速增加，因此，近年來許多研究 VRPTW 問題時，多利用啟發式解法，如基因演算法 (Genetic algorithm; GA)、模擬退火演算法 (Simulated annealing ; SA) 或禁忌搜尋法 (tabu search) 等，求解之。而本研究模式當然亦為一個 NP-hard 的問題，故為了求得最佳解，本研究將採用最近發展的一個啟發式解法「螞蟻族群法」求解研究模式。

本章內容如下：4.1 節將先介紹最早提出的螞蟻演算法 (Ant System)，以及後來發展的螞蟻族群演算法；4.2 節將探討如何應用螞蟻族群理論求解多目標問題；最後，4.3 小節將說明螞蟻族群理論求解本研究模式時之整體架構與流程。

4.1 螞蟻族群演算法 (Ant Colony System ; ACS)

螞蟻族群演算法係 Dorigo (1996) 基於自然界螞蟻行為所發展出來的一個人工智慧啟發式演算法。自然界螞蟻外出覓食時，會在行經巢穴與食物間的路徑上，留下一種化學物質，稱為費洛蒙 (pheromone)，而螞蟻乃是藉由費洛蒙當作是間接溝通的“通訊設備”，與其他螞蟻間相互傳遞訊息。因此當螞蟻蒐尋食物時，如圖 4.1，一開始時，螞蟻皆隨機選擇前進的方向，並且留下費洛蒙，而後來的螞蟻將會依費洛蒙來選擇相同路徑，則它們也會留下費洛蒙，以加強該路徑的費洛蒙濃度。如果否，則費洛蒙會隨著時間流逝而揮發消失。由於中間路徑較短，故螞蟻直接通過中間路徑的速度較其他路徑快，因此一段時間下來，最短的路徑所累積之費洛蒙較其他路徑多，也使得更多螞蟻選擇此路徑，所以在加強效果的作用下，很快地所有的螞蟻都會使用中間的路徑。而螞蟻族群演算法便是利用這個基本的概念來尋找問題的最佳解。

總言之，螞蟻系統演算法之主要特性：

1. 正回饋機制：可促使演算法快速求得好的結果。
2. 分散運算：避免太早收斂，掘限於區域解中。
3. 可結合與路徑構建之貪心演算法使用：有助在尋優過程初期找到可接受的結果

同時，螞蟻系統具有以下的不可或缺特性：

1. 多功能性：可應用於各種類似的問題。
2. 健全性：僅需做小幅度修改即可應用於其他組合性的最佳化問題。

3. 族群為基礎之方法：允許正向回饋之尋優。

在現今已有許多研究應用螞蟻理論求解一些 NP-hard 問題，如對稱或不對稱之銷售員問題(symmetric/asymmetric TSP)、程序訂購問題(Sequential Ordering Problem; SOP)、二次分配問題(Quadratic Assignment Problem; QAP)和車輛途程問題等等。

在 4.1.1 小節，先介紹 Dorigo(1996)最早提出之螞蟻系統演算法(Ant System; AS)。4.1.2 小節，Dorigo(1997)改良了之前的螞蟻系統理論，加入了「區域更新法」發展出螞蟻族群系統演算法。

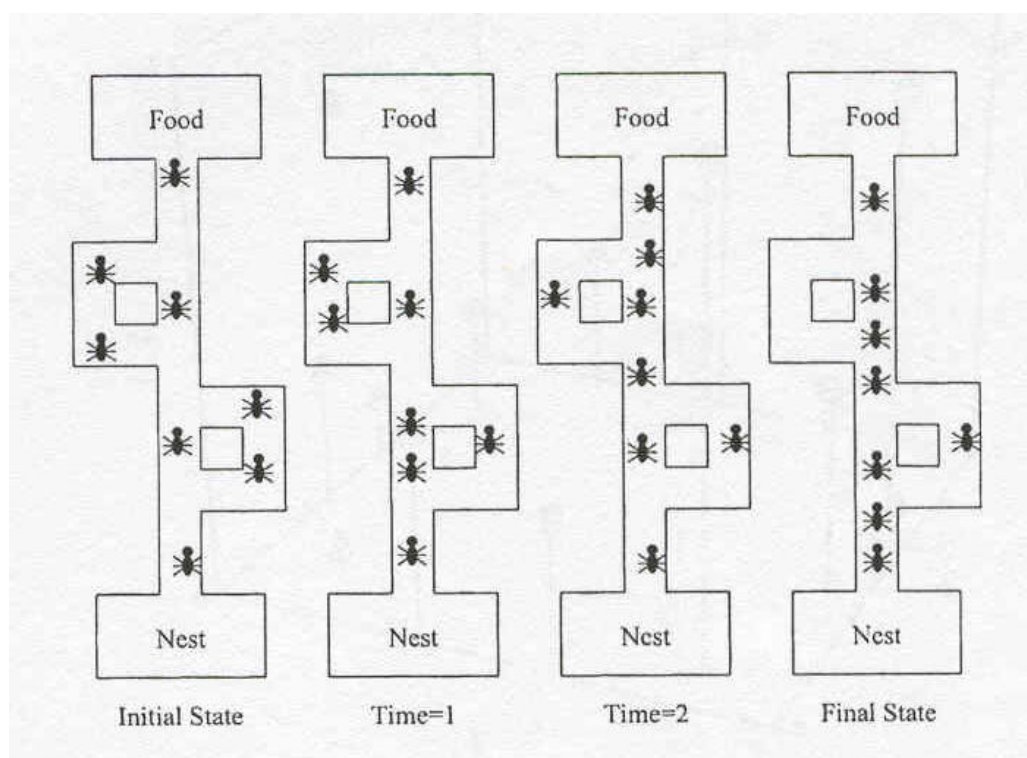


圖 4.1、自然界螞蟻之行為

資料來源：McMullen, 2001

4.1.1 螞蟻系統(Ant System)

Dorigo 等(1996; 1997)介紹螞蟻系統乃以銷售員問題(以下簡稱 TSP)為求解之問題，故本小節將以 TSP 為研究主軸說明螞蟻系統之概念。簡單而言，TSP 問題乃是已知有 N 個城市且每個城市只能經過一次的條件下，求出一條路徑剛好拜訪完所有城市同時總成本最小。故螞蟻系統(以下簡稱 AS)求解 TSP 的觀念是：一開始先將一

定數量的人工螞蟻 (artificial ants) 隨機放在任一城市上，每隻螞蟻依轉換機率隨機選擇下一個拜訪城市，一旦螞蟻拜訪完所有城市時，便會計算其行經路徑的長度，並且在最短路徑的每一節線上均加上一定比例的費洛蒙。另外，揮發機制 (evaporation mechanism) 則會定期降低所有路徑一定數量的費洛蒙。而每隻螞蟻選擇下一城市的轉換機率則與該連接之距離成反比，與其費洛蒙濃度成正比。當距離愈短、費洛蒙濃度愈高的節線被選擇的機率愈高。故人工螞蟻乃是 AS 進行隨機尋優的基本單位(agent)，具有以下的特性：

1. 人工螞蟻乃依轉換機率選擇下一個拜訪的城市，而轉換機率乃是由距離與費洛蒙值所決定。
2. 為避免人工螞蟻選擇已拜訪過之城市，AS 乃利用類似禁忌清單(tabu list)的觀念控制人工螞蟻無法選擇已拜訪過之城市，直到完成路徑為止。
3. 當路徑完成後，會在走過的路徑上留下費洛蒙值。

但是，AS 雖然是模仿自然界中螞蟻之行為所發展的演算法，但人工螞蟻與自然界螞蟻仍有四點差異：

1. 人工螞蟻具有某一程度之記憶；而自然螞蟻並沒有記憶能力。
2. 人工螞蟻不全然是瞎的，當它進行路徑選擇時，會考慮費洛蒙及距離後才決定，而其中能分辨距離長短的機制類似於視覺能力，此與自然螞蟻完全依賴費洛蒙不同。
3. 螞蟻系統演算法中，為方便費洛蒙濃度及螞蟻位置的更新，時間是離散的。並不像真實生活中，時間乃是連續的。

一般而言，AS 係為一演算法，人工螞蟻利用殘留於路段上之費洛蒙交換彼此資訊，透過通力合作的方式得到問題之最佳解。如圖 4.2 所示，AS 簡單地說就是每隻螞蟻利用「狀態轉換法」(state transition rule)逐步構架構完路徑，所有螞蟻完成路徑後，得到最小成本的路徑再套用「整體更新法」改變所有路段之費洛蒙值，如此反覆運算直到達到停止條件為止。以下，將詳細說明 AS 中的「狀態轉換法」與「整體更新法」(global updating rule)，以及 AS 整個運算流程：

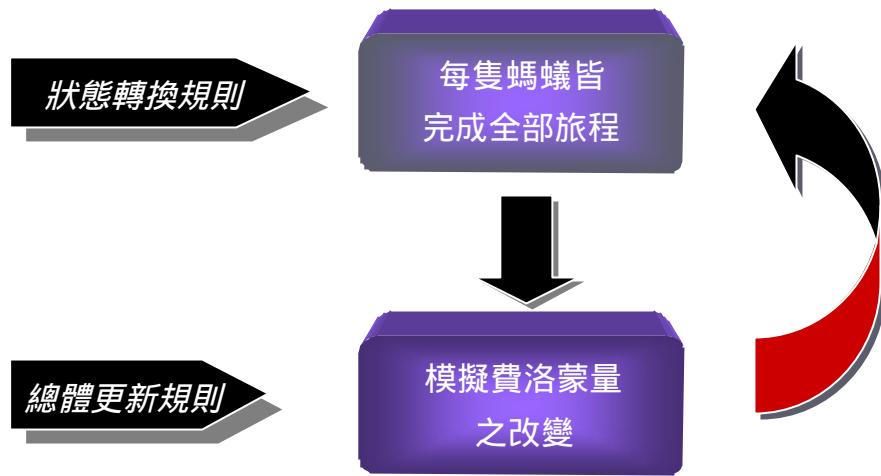


圖 4.2、螞蟻系統概念圖

資料來源：本研究整理

AS 操作步驟如下：

步驟一：起始狀態及參數設定：包括各路段費洛蒙起始值（ t_{ij} ）費洛蒙衰退參數（ ρ 或 τ ）螞蟻隻數（ m ） α 值、演算法停止條件等。一般而言，費洛蒙起始值可設定為： $t_{ij} = t_0 = (NL_{nn})^{-1}$ ， N 為節線總數， L_{nn} 為以貪心解法（greedy heuristic）所求解的總距離。費洛蒙衰退參數（ ρ 或 τ ）可設為 0.8~0.9 間。 α 值則以試誤法嘗試之，一般設 $\alpha > 1$ 。

步驟二：建構路徑：首先將 m 隻螞蟻各自隨機選擇某一城市為起點，每隻螞蟻依「狀態轉換法」(state transition rule)選擇下一個到訪之城市，逐步完成一趟完整的旅程(tour)。而狀態轉換法，又稱為隨機比例法(random-proportional rule)，乃計算螞蟻 k 由城市 i 的移動到下一個城市 j 之機率，機率值大者，愈有可能是螞蟻 k 的下一個目的地。狀態轉換法如式 4-1：

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{t_{ij} \cdot [h_{ij}]^b}{\sum_{u \in J_k(i)} t_{iu} \cdot [h_{iu}]^b} & \text{if } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-1)}$$

其中， t_{ij} ：代表路段 ij 之費洛蒙。

$\frac{1}{d_{ij}}$ ：為城市 i 與城市 j 間距離之倒數。

$J_k(i)$ ：位於城市 i 之第 k 隻螞蟻尚未拜訪過之城市集合。

α ：決定費洛蒙與距離兩者間相對重要性之參數， $\alpha > 0$ 。

人工螞蟻選擇城市時，主要依據兩種評估指標 分別是「接近度」(Closeness)與「費洛蒙」(Pheromone)。接近度 $\frac{1}{d_{ij}}$ ，又稱為期望值(desirability values)或能見度(visibility)等。在求解 TSP 問題時， $\frac{1}{d_{ij}}$ 設為距離的倒數，其值屬於靜態，不會隨著尋優過程而作更動。然而費洛蒙則會受到揮發或累積的影響，故費洛蒙 t_{ij} 在尋優過程中會有所變動。且由公式中可知，當接近度值 $\frac{1}{d_{ij}}$ 或是費洛蒙值 t_{ij} 愈大時，則到都市 j 之機率值便愈大，換言之，當距離越短，費洛蒙值越高，則機率較高。

此外，為了趨使螞蟻經過所有的城市且只能經過一次，在狀態轉換法中導入禁忌清單的觀念，也就是公式 4-1 中的 $J_k(i)$ 。 $J_k(i)$ 乃紀錄螞蟻 k 尚未拜訪過的都市，由式 4-1 可知，當已經拜訪過之都市不屬於 $J_k(i)$ 集合中，故其選擇機率為零，因此可避免螞蟻重覆經過同一都市。螞蟻便依此原則逐步建構其路徑，一直到螞蟻走完所有都市為止。

步驟三：更新費洛蒙濃度：當所有螞蟻皆完成它們的旅程後，則執行「整體更新法」(global updating rule)。整體更新法主要是模擬費洛蒙之改變情形，也就是原殘留路段上之費洛蒙會隨時間消逝而逐漸揮發，而螞蟻巡行過之路段則會再留下新的費洛蒙，使得此路段之費洛蒙量增加。整體更新法的計算方式如式 4-2：

$$t_{ij} = (1 - \alpha) \cdot t_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta t_{ij}^k \quad \text{式(4-2)}$$

其中， α ：費洛蒙衰退參數， $0 < \alpha < 1$ 。

m ：總螞蟻數

Δt_{ij}^k ：第 k 隻螞蟻在路段 ij 之費洛蒙量。其值決定於

$$\Delta t_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{當第 } k \text{ 隻螞蟻曾經過路段 } ij \text{ 時} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

L_k ：第 k 隻螞蟻所構建之總路徑長度。

Q ：為一常數。

為了模擬費洛蒙素揮發的情形，以 τ_{ij} 代表費洛蒙素揮發的比例，因此值乃介於 0 和 1 之間。費洛蒙素 τ_{ij} 之初值乃設為一正數，但隨著螞蟻使用路段次數之多寡而使得各路段之費洛蒙素有所不同。由式 4-2 可知，透過費洛蒙素更新程序，當總路徑長度 L_k 愈大， $1/L_k$ 則愈小，也表示所留下來的費洛蒙素越少；反之， $1/L_k$ 則愈大，表示所留下來的費洛蒙素越多。將使得較短路徑得到較多的費洛蒙素，因為透過費洛蒙素間接傳遞資訊機制，將會趨使結果逐漸收斂於一最佳解。

步驟四：測試停止條件：依此程序，重覆循環運算。直到達到研究者設定之條件，殊如達到運算次數或時間上限，或是收斂到某一程度時才停止。

4.1.2 螞蟻族群系統 (Ant Colony System ; ACS)

Dorigo and Gambardella(1997)則再進一步提出螞蟻族群系統 (Ant Colony System ; 以下皆簡稱 ACS)，其基本概念與 AS 相同，然而，ACS 與 AS 主要有三點差異：

1. 變更「狀態轉換法」

ACS 之「狀態轉換規則」修改如下：

$$j = \begin{cases} \arg \max_{j \in J_k(i)} \{ \tau_{ij} \cdot [\eta_{ij}]^b \} & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{其他} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{式(4-3)} \\ \text{式(4-4)} \end{matrix}$$

q ：為一隨機變數，其數值在 0 與 1 之間呈均勻分布。

q_0 ：為一參數， $0 \leq q_0 \leq 1$ 。

S ：隨機變數，其值乃由 AS 之狀態轉換法(式 4-1)所決定。

ACS 之狀態轉換法再進一步將螞蟻的選擇行為區分為「追隨」(Exploitation) 與「探索」(Exploration) 兩種狀況。所謂的「追隨」, 字面上的意義乃是指追隨前人的累積經驗, 也就是如式 4-3, 當隨機變數 q 不大於 q_0 時, 人工螞蟻直接選擇費洛蒙素與接近度綜合考量效果最大的; 而「探索」意指發現新事物, 如式 4-4, 當 q 大於 q_0 , ACS 的轉換規則與 AS 完全相同, 也就是當費洛蒙素越高或距離越短者, 則機率就越高。但值得注意的是, 機率越高, 代表選中的機會較大, 但不代表結果一定就是機率最大者。因此, 螞蟻有可能會進而發掘到更佳の解, 而不會太早收斂。因此 ACS 之狀態轉換法乃以 q_0 決定螞蟻之行為會偏向「追隨」或是「探索」, 也就是可藉由控制 q_0 則調整「追隨」與「探索」間的相對重要性。

2. 變更「整體更新法」

AS 在進行費洛蒙更新時, 係以每隻螞蟻所得到的結果進行更新, 如式(4-2) 乃加總所有螞蟻所殘留的費洛蒙量。但 ACS 只有表現最好的那一隻螞蟻才會遺留費洛蒙。故其更新方式為:

$$t_{ij} = (1 - a) \cdot t_{ij} + a \cdot \Delta t_{ij} \quad \text{式(4-5)}$$

其中, a : 整體費洛蒙衰退參數, $0 \leq a \leq 1$ 。

$$\Delta t_{ij} = \begin{cases} \frac{Q}{(L_{gb})} & \text{如果路段 } ij \text{ 屬於最佳解時} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

Q : 為一常數。

L_{gb} : 所有螞蟻完成之旅程中之最佳解, 也就是最短之路徑長度。

3. 加入「局部更新法」(local updating rule)

兩者最大的差異, 乃是 ACS 加入「區域費洛蒙更新法」(local pheromone updating rule) 的觀念, 即當每一隻螞蟻由選擇完下一節點時, 即針對該路段作一次費洛蒙的更新。其更新方式如下:

$$t_{ij} = (1 - r) \cdot t_{ij} + r \cdot t_0 \quad \text{式(4-6)}$$

其中， ρ ：區域費洛蒙衰退參數， $0 < \rho < 1$ 。

t_0 ：費洛蒙之起始值。通常設定 $t_0 = (NL_{nn})^{-1}$ ， N 為總城市數， L_{nn} 乃是以貪心解法所求解之總路徑長。

局部更新法將會使得拜訪過之路段上費洛蒙減少，因此拜訪過的路徑對於螞蟻的吸引力將會愈來愈小，最後導至螞蟻偏向發掘新路徑，可避免螞蟻拘限在某一狹隘的範圍內。

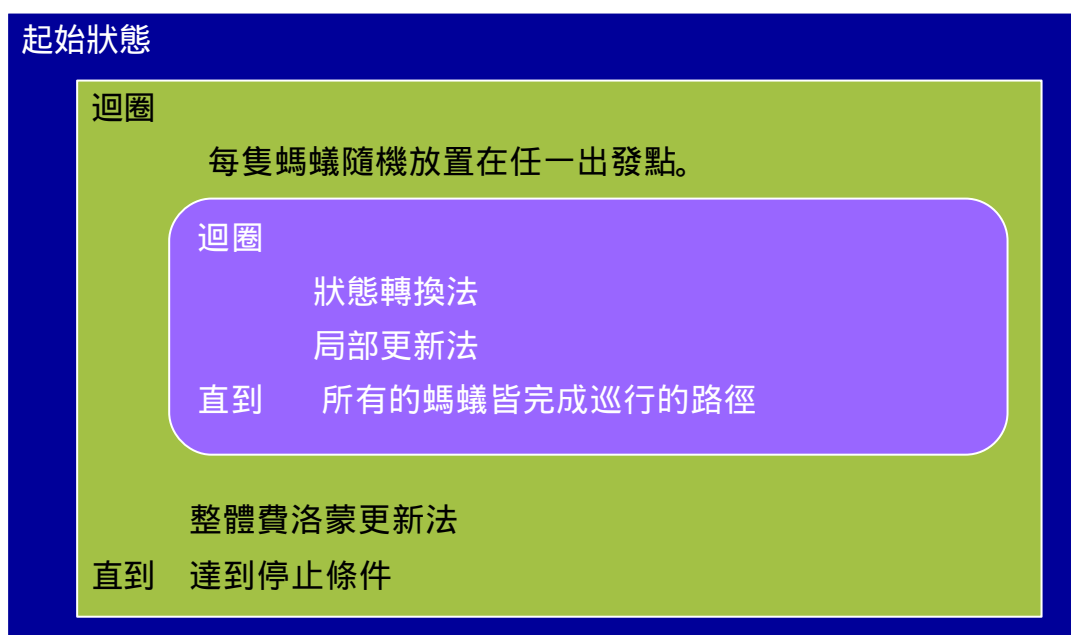


圖 4-3、螞蟻族群系統演算法

資料來源：Dorigo 等，1997

基本上，ACS 之程序與 AS 大同小異，如圖 4-3。以下將逐步說明 ACS 之運算流程：

ACS 的操作步驟如下：

步驟一： 起始狀態及參數設定：包括各路段費洛蒙起始值 (t_0)、費洛蒙衰退參數 (ρ 或 α)、人工螞蟻隻數 (m)、值、演算法停止條件。一般而言，費洛蒙起始值可設定為： $t_{ij} = t_0 = (NL_{nn})^{-1}$ ， N 為節線總數， L_{nn} 為以貪心解法 (greedy heuristic) 所求解的總距離。費洛蒙衰退參數 (ρ 或 α) 可設為 0.8~0.9 間。值則以試誤法嘗試之，一般設 $\beta > 1$ 。

步驟二：建構路徑：首先，每隻人工螞蟻隨機被指派到任一城市， m 隻人工螞蟻平行建構各自的路徑，人工螞蟻乃運用「狀態轉換法」逐步完成旅程，直到拜訪完所有的都市為止。當位於城市 i 之螞蟻選擇下一個目的地 j 時，其狀態轉換法如下：

$$j = \begin{cases} \arg \max_{j \in J_k(i)} \{ [t_{ij}] \cdot [h_{ij}]^b \} & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-7)}$$

其中， q ：為一隨機變數，其數值在 0 與 1 之間呈均一分布。

q_0 ：為一參數， $0 \leq q_0 \leq 1$ 。

S ：隨機變數，其值由下式所決定。

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{t_{ij} \cdot [h_{ij}]^b}{\sum_{u \in J_k(i)} t_{iu} \cdot [h_{iu}]^b} & \text{if } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-8)}$$

步驟三：局部更新費洛蒙：螞蟻每走過一路段，便會執行「區域更新法」以重新計算各路段的費洛蒙素。局部更新法之計算方式如下：

$$t_{ij} = (1 - r) \cdot t_{ij} + r \cdot t_0 \quad \text{式(4-9)}$$

其中， r ：局部費洛蒙衰退參數， $0 < r < 1$ 。

t_0 ：費洛蒙之起始值。通常設定 $t_0 = (NL_{mn})^{-1}$ ， N 為總城市數， L_{mn} 乃是以貪心解法所求解之總路徑長。

步驟四：整體更新費洛蒙：當所有螞蟻皆完成路徑後，才執行整體更新法。在整體更新法中，只有最短路徑上才會留下費洛蒙。

$$t_{ij} = (1 - a) \cdot t_{ij} + a \cdot \Delta t_{ij} \quad \text{式(4-10)}$$

其中， α ：整體費洛蒙衰退參數， $0 < \alpha < 1$ 。

$$\Delta t_{ij} = \begin{cases} \frac{Q}{(L_{gb})} & \text{如果路段 } ij \text{ 屬於最佳解時} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

Q ：為一常數。

L_{gb} ：所有螞蟻完成之旅程中之最佳解，也就是最短之路徑長度。

步驟四：測試停止：重覆以上步驟，如此一直循環，直到符合停止條件為止，可能已達到預先設定之運算次數；已達到預設之 CPU 運算時間；或在已知的反覆運算中，其解沒有任何改善等。其停止條件乃由使用者自我訂定。

表 4-1、局部與整體費洛蒙更新法之差異

	局部更新法	整體更新法
執行時間	於螞蟻建構路徑過程中執行；	螞蟻建構完成後，才執行；
執行效用	減少常用節線上之費洛蒙量，使螞蟻趨向發掘那些尚未被拜訪過之節線，增加結果產生之多樣性。	強化相鄰最佳解之結果，使 ACS 能很快收斂，找到最佳解。
計算方式	$t_{ij} = (1 - r) \cdot t_{ij} + r \cdot t_0$ $\sigma = (NL_{mn})^{-1}$	$t_{ij} = (1 - a) \cdot t_{ij} + a \cdot \Delta t_{ij}$ $\Delta t_{ij} = \frac{Q}{(L_{gb})} \text{ 或 } 0$

資料來源：本研究整理

4.1.3 螞蟻族群演算法之探討：

在 4.1.3 小節中，將探討 ACS 演算法中一些參數之設定：

1. 螞蟻之最佳數目

Dorigo(1997) 求出最佳螞蟻數式之計算公式，如 4-7 表示，

$$m = \frac{\log(j_1 - 1) - \log(j_2 - 1)}{q_0 \cdot \log(1 - r)} \quad \text{式(4-11)}$$

但是現在仍無法得到 j_1 與 j_2 之函數型式。然而，經過實驗發現當 $(j_1-1)/(j_2-1) \approx 0.4$ 時，則 ACS 之結果最佳。因此當 q_0 為 0.9 且 α 為 0.1 時，則可求出最佳的螞蟻數目為 10 隻。

2. 螞蟻間之合作行為

Dorigo(1997)以兩種簡單的方式驗證螞蟻間利用費洛蒙連繫，相互合作，可以促使求解更有效率。第一個實驗結果，如圖 4-4，螞蟻之間的相互合作會改變機率，相互合作之螞蟻有較高的機率值，以促使螞蟻群能很快地發現最佳解。

第二個實驗，乃將兩群螞蟻求得之路徑長與所花費的時間製作成一關係圖，如圖 4-5。由圖中，雖然開始時，無合作之螞蟻求得之結果較好，但有相互合作之螞蟻透過費洛蒙間之加強學習的效果，可比無合作之螞蟻較快求得最佳解。

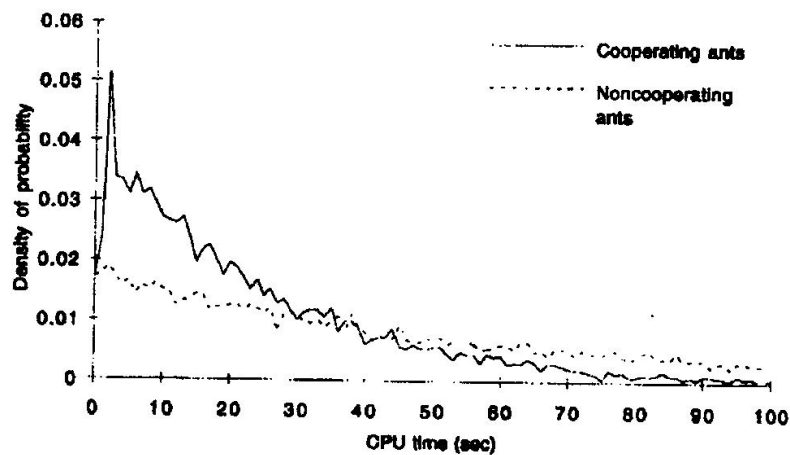


圖 4-4、螞蟻合作與否之實驗結果 (1)

資料來源：Dorigo,1997

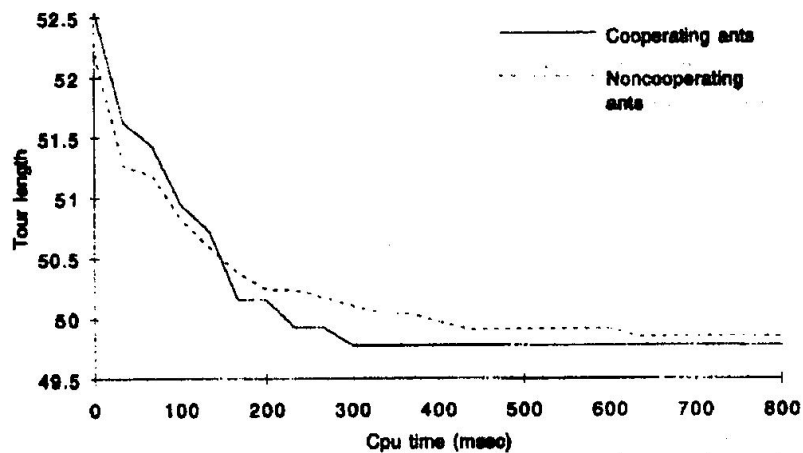


圖 4-5、螞蟻合作與否之實驗結果(2)

資料來源：Dorigo,1997

3. 費洛蒙與接近度 $_{ij}$ 之重要性

實驗證明接近度 $_{ij}$ 能使螞蟻演算法在合理的時間內找到較好的解。實驗為表現在 ACS 未考量啟發函數之情形，將參數 $_{ij}$ 設為 0，如此一來，每一條路段之接近度 $_{ij}$ 皆相同(都等於 1)，故接近度 $_{ij}$ 便失去作用。圖 4-6 中，標準之 ACS 之求得之路徑長度最小，故最好；其次是未考量啟發函數之 ACS 演算法，結果最差的是未有費洛蒙機制之 ACS 演算法。

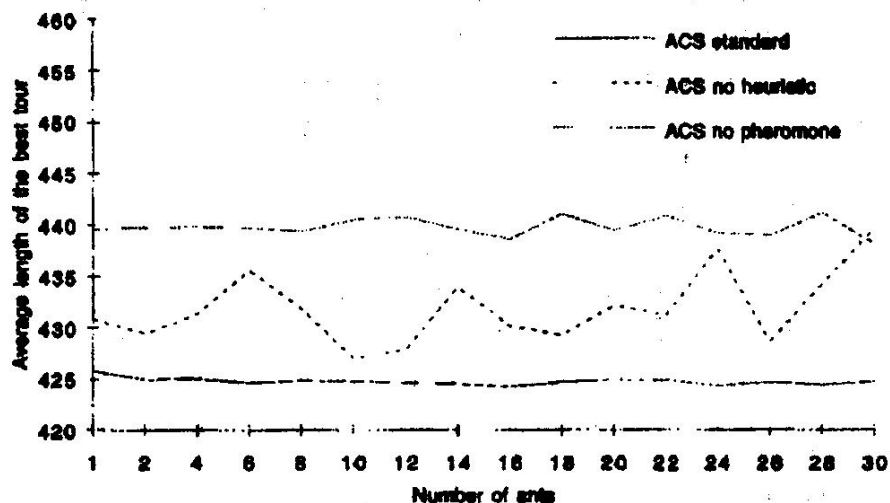


圖 4-6、接近度 $_{ij}$ 之重要性

資料來源：Dorigo,1997

4.2 ACS 之應用 求解多目標問題

由於本研究模式乃是一多目標問題，故在本節中，將探討兩篇應用 ACS 求解多目標之研究，4.2.1 小節，則是以螞蟻理論求解時窗限制之車輛途程問題，其目標式乃是同時追求使用車輛與距離最佳化。4.2.2 小節提出改良螞蟻理論以求解多層次目標且時窗限制之車輛途程問題。

4.2.1 螞蟻族群演算法求解時窗限制之車輛途程問題

Changchien 與 Wu(2002)乃應用 ACS 求解 VRPTW 問題 文中，改良螞蟻族群演算法以求解時窗限制和容量限制之車輛路徑問題，其中此車輛途程問題之目標式乃同時追求車輛數及距離最小值 最後，以改良之 ACS 求解 Solomon 提出之標竿範例 (標竿範例網址是：<http://web.cba.neu.edu/~msolomon/home.htm>)，同時比較基因演算法和模擬退火法所得到之結果，結果發現，由螞蟻族群系統所得到之結果較其他兩種演算法為佳。

而 VRPTW 與 TSP 問題較不同的是，VRPTW 多考量了車輛容量限制、每位顧客之時窗限制與場站的時窗限制。當累積載貨量超出容量限制或路線時間超出場站時窗限制時，則車輛必須先回到場站再出發。因此，每隻螞蟻巡訪顧客的過程中，每位顧客只能拜訪一次，但是可經過場站多次。同時，當螞蟻回場站後，則將時間與載重皆予以歸零，然後繼續拜訪其他尚未服務的顧客，如此重覆循環，直到拜訪完所有的顧客為止。

由於考量了容量限制與時窗限制，Changchien 與 Wu 提出一個改良之螞蟻族群演算法，此與原始演算法主要有二點差異：

1、 加入篩選(filtering)機制

原本演算法中， $J_k(r)$ 乃儲存了所有尚未拜訪過的據點，因此螞蟻由 $J_k(r)$ 中挑選出下一個前往的據點。但在 VRPTW 問題中，這些未拜訪過的據點必須再經過容量限制和時窗限制的篩選，最後，螞蟻才由這些未拜訪過、同時符合容量與時窗限制之城市中，挑選出下一個適當的目的地。

2、 修改「狀態轉移準則」

令 $h_{ij} = 1/(d_{ij} + w_j)$ ，其中 w_j 是到 j 點時之等待時間，此乃表示螞蟻將會選擇距離較近而且等待時間較短的據點。此外，為促使螞蟻優先選擇時窗較短之據點，故令 WC 為時窗長度的倒數，故改良之狀態轉換法為：

$$s = \begin{cases} \arg \max_{j \in R_k(i)} \{ [t_{ij}] \cdot [h_{ij}]^b \cdot [WC]^g \} & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-12)}$$

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[t_{ij}] \cdot [h_{ij}]^b [WC]^g}{\sum_{u \in R_k(i)} [t_{iu}] \cdot [h_{iu}]^b [WC]^g} & \text{if } j \in H_k(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-13)}$$

其中， WC ：在據點 u 之時窗長倒數。

b ：為一參數，乃反映時窗長短之重要性。

$H_k(i)$ ：表示尚未巡訪過且符合容量與時窗限制之城市集合。

4.2.2 螞蟻族群演算法求解多層次目標之 VRPTW

Gambardella 等(參考 A New Ideas on Optimization 書, 1999)乃首次提出求解時窗限制之車輛途程問題之多螞蟻族群演算法 (A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows; MACS-VRPTW)。MACS-VRPTW 乃是一個以螞蟻族群演算法為基礎所發展的方法，以求解時窗限制之多層次目標的車輛途程問題,此乃是首次以多螞蟻族群演算法求解多目標之問題。在研究中,所考量的 VRPTW 問題有兩個目標式：目標一、求路徑數 / 車輛數最小；目標二、求總旅行時間最小，而且目標一(路徑數最小化)較優先於目標二(旅行時間最小化)。

MACS-VRPTW 演算法中，兩個目標分別藉由兩群螞蟻間之協調以求得最佳解。但是兩群螞蟻各自有自己獨特的費洛蒙，代表兩目標式求解時互不影響，兩群螞蟻間乃藉由主程式 MACS-VRPTW 中之所儲存之最佳解 y_{gb} 互相連繫，而 y_{gb} 之初值乃由最鄰近法(nearest heuristics)求得 VRPTW 之可行解。MACS-VRPTW 之概念圖如圖 4-7，以下將說明 MACS-VRPTW 運算方式：

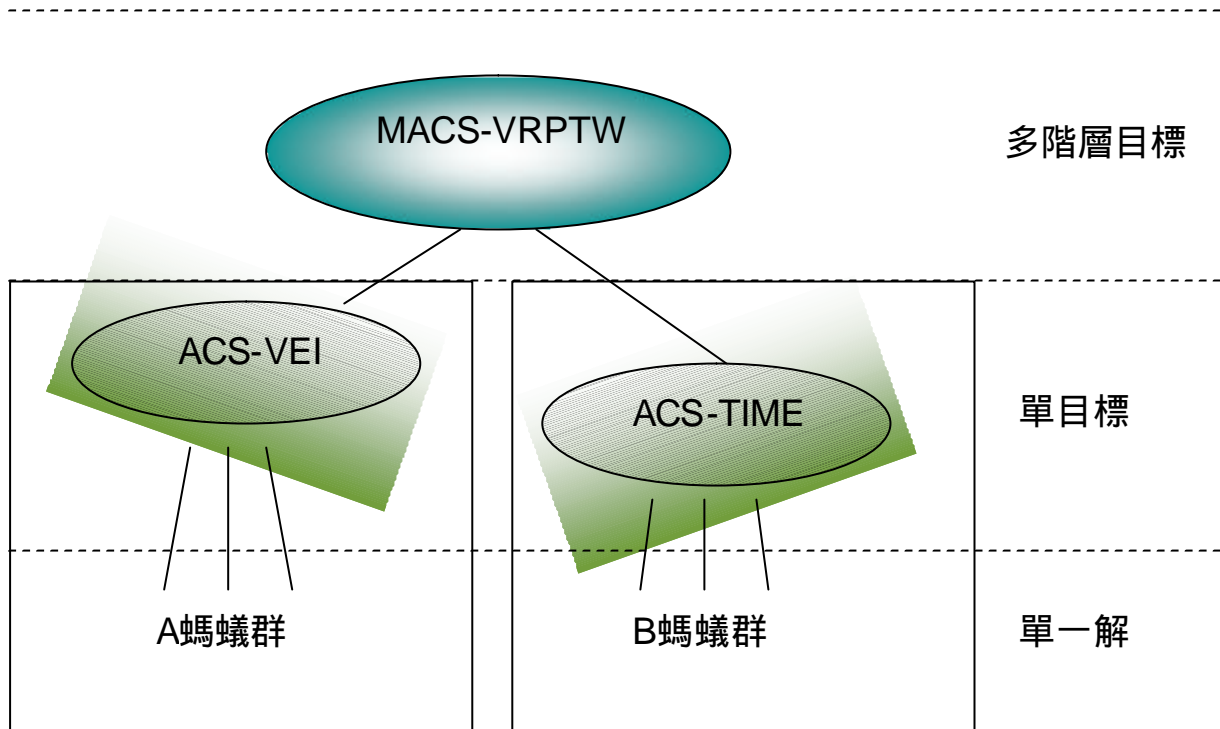


圖 4-7、MACS-VRPTW 之架構圖

資料來源：Corne, Dorigo 和 Glover, 1999

第一群螞蟻(ACS-VEI)目標是求路徑 / 車輛數最小化，故 ACS-VEI 乃嘗試減少車輛的使用，因此當 MACS-VRPTW 中所儲存的可行解 y_{gb} 是使用 v 部車輛時，則 ACS-VEI 會以 $(v-1)$ 部車輛的條件下，嘗試搜尋可行解。ACS-VEI 中，以一變數 $y_{ACS-VEI}$ 儲存涵蓋顧客數最多的值，但是 $y_{ACS-VEI}$ 不一定要是可行解。因此，ACS-VEI 不同於傳統 ACS 應用於 TSP 的概念。傳統 ACS 求解 TSP 時乃是追求目標式最小化，而 ACS-VEI 卻是以拜訪過之最多顧客數者為最佳解，故 ACS-VEI 以 IN_j 代表顧客未被拜訪過的次數， IN_j 乃應用於計算狀態轉換法中之機率值，當 IN_j 越大，被巡訪之機率就越高。每次循環完後，ACS-VEI 乃進行兩次整體更新法則遺留下費洛蒙，一是对拜訪顧客最多之路徑 $y_{ACS-VEI}$ 留下費洛蒙值。二是最少車輛數且最短旅行時間之路徑 y_{gb} 上留下費洛蒙素。實驗證明，這種雙重更新的方式可以大大改善求解效率。

而第二群螞蟻(ACS-TIME)則是在使用與 y_{gb} 相同車輛數的條件下，求算旅行時間最小之路徑。ACS-TIME 族群中，若有 m 隻螞蟻時，則會產生 y_1, \dots, y_m ，共 m 個解。因此當 m 個解中有比原來 y_{gb} 較佳者，則會將新解傳回 MACS-VRPTW 中取代

原來的 y_{gb} 。然後再進行整體更新法則。

ACS-VEI 與 ACS-TIME 兩群螞蟻一旦得到較 y_{gb} 好的解時，則更新 MACS-VRPTW 儲存之 y_{gb} 值。如果 ACS-VEI 求出使用之車輛較原 y_{gb} 解少時，則 MACS-VRPTW 會重新計算，以較少的車輛求最佳解。

因此構建路徑的過程中，MACS-VRPTW 較傳統 ACS-TSP 不同的是：

(1)、應用螞蟻族群演算法構建出 VRP 問題的路徑時，乃將原本一個場站看似成多個虛擬場站，其個數與使用的車輛數相同，而且各虛擬場站間並無距離的存在，如圖 4-8。如此一來，便將原本的 VRP 問題轉換為猶如是 TSP 問題，所有的顧客與虛擬場站皆是由單一路徑所串聯而成的。

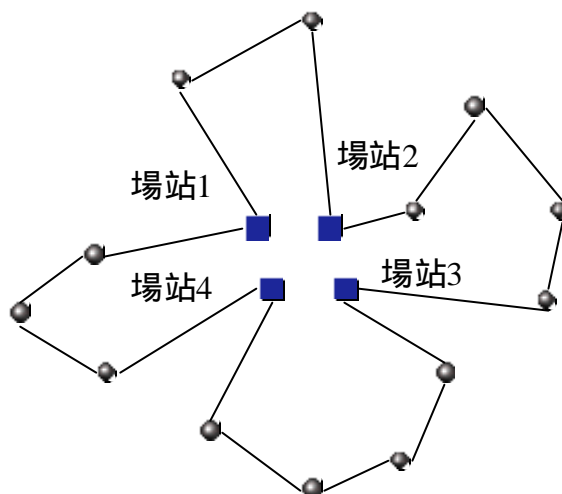


圖 4-8、VRP 轉換為 TSP 之示意圖

資料來源：Corne, Dorigo 與 Glover , 1999

(2)、傳統接近度 α_{ij} ，Gambardella 稱之為吸引程度(attractiveness)，乃為距離之倒數；但 MACS-VRPTW 演算法中， α_{ij} 便同時考量了旅行時間 t_{ij} 、時窗 $[e_j, l_j]$ 與顧客未被拜訪過之次數 (IN_j)。

最後，研究利用 Solomon 之指標範例與現有的演算法比較，不管在求解結果或是運算時間方面，MACS-VRPTW 都相當具有競爭力。

4.3 螞蟻族群演算法之應用 求解研究模式 (ACS for VRPTW-reliability)

由於螞蟻族群演算法可解決多目標之問題、而且求解之績效較其他啟發式演算法好等優點，故本研究乃應用螞蟻族群演算法求解考量旅行時間可靠度之車輛途程模式。

然而螞蟻族群演算法套用於模式求解時，會因問題不同而有所修改以符合求解問題之特性。以下將說明螞蟻族群演算法求解本研究模式之程序，如圖 4-9：

1. 輸入資料。

首先，輸入研究問題之基本資料，主要可區分成兩種：一為顧客資料，包括各顧客之需求量、接受服務之時窗起點與終點、服務時間與要求之可靠度(或可視為服務水準)；二則為路網資料，包括各顧客間之距離長度、平均旅行時間長、尖峰時旅行時間增加比例(b_{ij})與旅行時間標準差(c_{ij})等。

2. 螞蟻一開始皆由場站出發。

由於本研究模式中，每位顧客皆有時窗限制，考量「時間累計」的特性，故螞蟻統一皆以場站為出發點，且出發時間也從零開始計算，隨著螞蟻逐一巡訪，時間則會逐漸累加。

3. 篩選符合條件之顧客點。

螞蟻族群演算法利用類似禁忌清單的方式紀錄尚未巡行過之顧客點，而且因為時窗限制之 VRP 模式又多考量了車輛容量限制與時窗限制，因此需再透過篩選機制後，最終清單中則皆是尚未巡訪過且同時滿足車輛容量限制與時窗限制等條件之顧客點。若是未有任何一顧客滿足所有條件時，螞蟻則返回場站，且載重歸零，出發時間亦由零開始重新計算。

4. 以「狀態轉換法」選擇下一個巡訪的顧客。

由於為了反應旅行時間之連續性與隨機性，依第三章所描述，假設旅行時間為進入路段時間之函數，同時再計算時窗可靠度，為了讓本研究採用之狀態轉換法能一目了然，將狀態轉換法之運算流程繪製如圖 4-10 所示。

當得到所有符合條件之顧客集合後，則需要再得到前後兩顧客間之旅行時間資料。由於一路段之平均旅行時間與旅行時間標準差乃是由螞蟻進入路段之

時間所決定，詳細內容請參閱 3-5-1 小節。換言之，為了決定旅行時間平均值與標準差，必須得到螞蟻準備出發的時間。車輛途程問題，皆可求解得到決策變數 A_i ，也就是平均抵達顧客 i 之時間，再藉由抵達時間 A_i 、時窗開始時間 e_i 與服務時間 s_i 則可得到在顧客 i 的出發時間 D_i ，進而得到平均旅行時間 μ_{ij} 與旅行時間標準差 σ_{ij} 。最後求得到顧客 j 之平均抵達時間 A_j 與抵達時間變異數 $Var(A_j)$ 。因此，時窗可靠度則為

$$R_j = \Pr(e_j \leq A_j \leq l_j) = \Phi\left[\frac{l_j - E(A_j)}{\sqrt{Var(A_j)}}\right] - \Phi\left[\frac{e_j - E(A_j)}{\sqrt{Var(A_j)}}\right] \quad \text{式(4-14)}$$

$$= \int_{-\infty}^{l_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot Var(A_j)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \bar{A}_j}{\sqrt{Var(A_j)}}\right)^2\right] dt - \int_{-\infty}^{e_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot Var(A_j)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \bar{A}_j}{\sqrt{Var(A_j)}}\right)^2\right] dt$$

為了使螞蟻朝向時窗可靠度較大的方向前進，在狀態轉換法中，除了考量費洛蒙值之多少與距離之長短等外，再加入一「可靠度吸引值」 RR_j ：

$$RR_j = 1 - \max[0, (LOS_j - R_j)] \quad \text{式(4-15)}$$

其中 LOS_j 乃代表預計之時窗可靠度，當 R_j 小於 LOS_j 時，則 A_j 值愈大時，則 RR_j 值愈大；相反的，若是當 R_j 大於 LOS_j 時，則 RR_j 值皆等於 1。式 4-11 主要當實際的時窗可靠度小於預計之服務水準時，則越接近預計服務水準的顧客點，其機率越大，而當實際的時窗可靠度大於或等於預計之服務水準時，則其選擇機率皆相同。此外，而 $\omega_{ij} = 1/(t_{ij} + w_j)$ ，其中 t_{ij} 為平均旅行時間， w_j 則為等待時間，故本研究模式將透過下列之狀態轉換法選擇下一個巡訪的顧客：

狀態轉換法

$$s = \begin{cases} \arg \max_{j \in J_k(r)} \{ [t_{ij}] \cdot [h_{ij}]^{b_1} \cdot [RR_j]^{b_2} \cdot [WC]^{b_3} \} & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-16)}$$

其中，若 $q > q_0$ 時，則 S 由式 4-13 決定：

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[t_{ij}] \cdot [h_{ij}]^{b_1} \cdot [RR_j]^{b_2} \cdot [WC]^{b_3}}{\sum_{u \in J_k(r)} [t_{iu}] \cdot [h_{iu}]^{b_1} \cdot [RR_u]^{b_2} \cdot [WC]^{b_3}} & \text{if } j \in H_k(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{式(4-17)}$$

其中， RR_j ：在據點 j 之可靠度吸引值。

1、 2、 3：為參數，乃權衡接近度、可靠度吸引值與時窗長短三者間之相對重要性。

WC ：在據點 j 之時窗長倒數。

$H_k(i)$ ：為符合所有條件之顧客集合。

5. 執行「局部更新法」，變更其費洛蒙值。

當人工螞蟻決定下一個巡訪的顧客，乃以「局部更新法」改變該路段之費洛蒙值，局部更新法之計算方式如下：

$$t_{ij} = (1 - r) \cdot t_{ij} + r \cdot t_0 \quad \text{式(4-18)}$$

其中， r ：局部費洛蒙衰退參數， $0 < r < 1$ 。

t_0 ：費洛蒙之起始值。通常設定 $t_0 = (NL_{mn})^{-1}$ ， N 為總顧客數， L_{mn} 乃是以貪心解法所求解之總路徑長。

6. 儲存最佳解。

判斷是否 m 隻螞蟻皆已完成路徑，如果否，則繼續重覆 1 到 5 之步驟；如果所有螞蟻都已完成，則檢視 m 個解中，是否有比原儲存的目標結果更好的解，如果較原來的解，則替代原來的目標結果，成為“最佳解”。如果沒有，則不更新最佳解。

7. 執行「整體更新法」加強最佳解的費洛蒙值。

所有螞蟻都構建完其路徑，同時也決定新的最佳解時，則利用「整體更新法」更新所有路段之費洛蒙值，所有的路段都會揮發一部分的費洛蒙值，但是如果此路段屬於最佳路徑時，則會留下新的費洛蒙。整體更新法之計算方式如下：

$$t_{ij} = (1 - \alpha) \cdot t_{ij} + \alpha \cdot \Delta t_{ij} \quad \text{式(4-19)}$$

其中, α : 整體費洛蒙衰退參數, $0 < \alpha < 1$ 。

$$\Delta t_{ij} = \begin{cases} \frac{Q}{L_{gb}} & \text{如果路段 } ij \text{ 屬於最佳解時} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

Q : 為一常數。

L_{gb} : 所有螞蟻求出結果中之最佳解值。

8. 測試停止條件。

本研究中乃設定 ACS 執行 250 次停止, 因此若循環次數尚未達到停止條件時, 則反覆上述步驟 1~7, 直到達到所設定之停止條件時即結束程式, 輸出最佳結果。

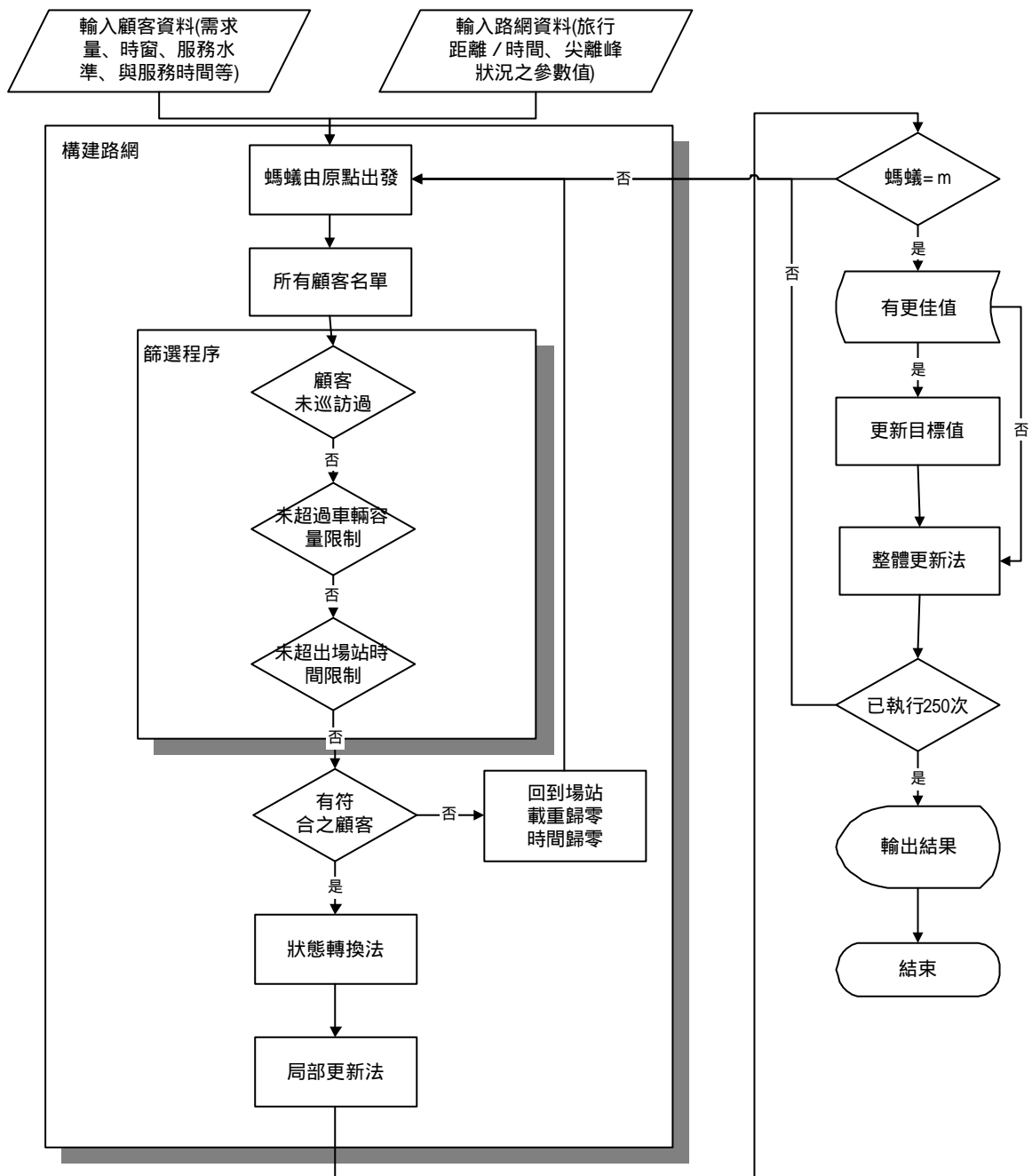


圖 4-9、本研究模式之螞蟻族群演算法流程

資料來源：本研究整理

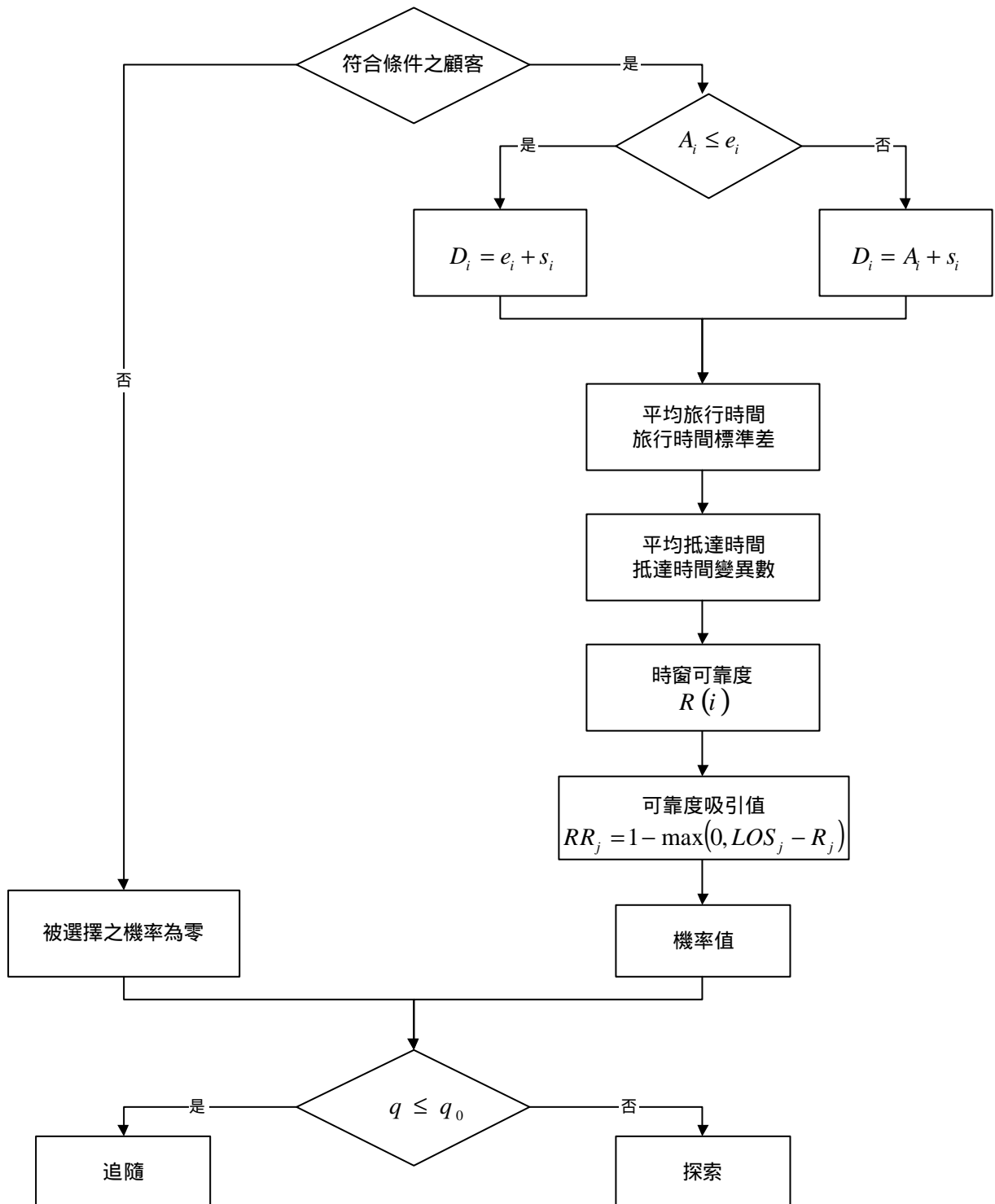


圖 4-10、本研究之狀態轉換法示意圖

資料來源：本研究整理

五、範例測試與敏感度分析

本章將以範例驗證本研究模式之結果，同時進行敏感度分析。在 5.1 節中，主要分成三小節：5.1.1 小節先闡述小規模路網之內容；5.1.2 小節則以此範例測試螞蟻族群理論各參數值之設定結果；5.1.3 小節，以本模式與軟時窗之 VRP 模式套用螞蟻族群理論求解此設計範例，比較兩者之結果。5.2 小節乃進行敏感度分析。5.3 節中，乃引用 Solomon 所發表之標竿試題，應用考量旅行時間可靠度之 VRP 模式求解，比較結果。

5.1 小規模路網

5.1.1 問題說明

1. 顧客資料

本節中，將以此測試路網驗證本研究模式之執行結果。設計範例中，將總共有十位顧客等著接受服務。每位顧客之詳細資料如表 4-1，其中顧客之需求量乃設定有 10、20、30、40 與 50 單位共五種需求量；時窗長度則有 30、40、50 與無時窗限制共四種狀況；同時，設定每位顧客之服務時間皆相同。此外，車輛容量限制設定為 100 單位，當車輛達到容量上限時，則需返回場站。

表 5-1、設計範例之顧客資料

項目	需求量	時窗開始	時窗結束	服務時間
顧客 1	10.0	20.0	50.0	10.0
顧客 2	10.0	0.0	30.0	10.0
顧客 3	20.0	70.0	100.0	10.0
顧客 4	40.0	60.0	90.0	10.0
顧客 5	30.0	50.0	80.0	10.0
顧客 6	30.0	無時窗限制		10.0
顧客 7	40.0	10.0	40.0	10.0
顧客 8	50.0	無時窗限制		10.0
顧客 9	20.0	40.0	90.0	10.0
顧客 10	50.0	30.0	70.0	10.0

資料來源：本研究整理

2. 路網資料

(1) 平均旅行時間

假設路段旅行時間資料為已知，而且為常態分配。故本測試範例中，乃假設每一路段之旅行時間分佈如圖 5-1。當車輛離峰時進入路段，則路段旅行時間為一定值(a_{ij})，而各路段之離峰時平均旅行時間如表 5-2 所列。若當車輛進入路段的時間介於 30 分至 70 分之間，則路網正逢尖峰時候，故平均旅行時間會較離峰時高；當進入路段時間介於 30 分到 50 分時，平均旅行時間(μ_{ij})呈現逐漸上升的趨勢，以數學式表示為

$$\mu_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \cdot D_i \quad \text{式(5-1)}$$

D_i 為車輛進入路段的時間。設計範例中，設定 b_{ij} 等於 $a_{ij}/50$ ，也就是當一路段平時旅行時間為 10 分鐘時，則其尖離峰之平均旅行時間最多相差 4 分鐘；而當進入路段時間介於 50 分到 70 分時，由於車潮逐漸疏解，故平均旅行時間越來越小，表示為

$$\mu_{ij} = a_{ij} - b_{ij} \cdot D_i \quad \text{式(5-2)}$$

其中 a_{ij} 和 b_{ij} 兩參數之設定如表 5-2 與 5-3 所示。

平均旅行時間

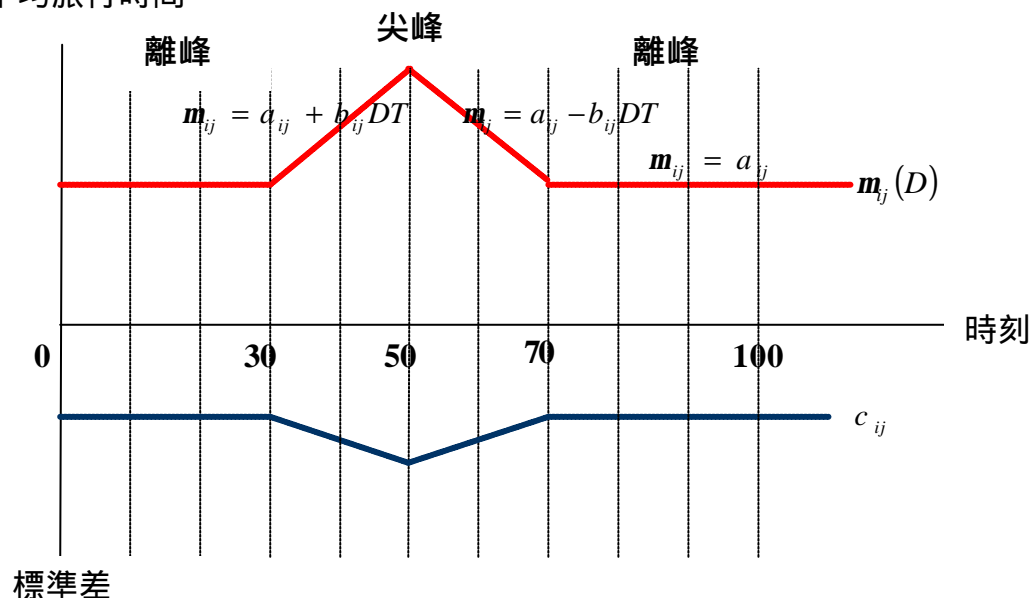


圖 5-1、路段旅行時間分佈圖

資料來源：本研究整理

表 5-2、離峰時段之平均路段旅行時間(a_{ij})

場站	場站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
場站	場站	10.0	15.0	10.0	25.0	20.0	15.0	25.0	10.0	10.0	20.0
1	10.0		25.0	25.0	5.0	10.0	15.0	5.0	20.0	15.0	20.0
2	15.0	25.0		15.0	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	25.0
3	10.0	25.0	15.0		20.0	15.0	10.0	25.0	15.0	20.0	10.0
4	25.0	10.0	10.0	20.0		10.0	25.0	10.0	15.0	15.0	20.0
5	20.0	10.0	10.0	15.0	10.0		10.0	15.0	10.0	20.0	25.0
6	15.0	15.0	10.0	10.0	25.0	10.0		10.0	20.0	25.0	20.0
7	25.0	10.0	10.0	25.0	10.0	15.0	10.0		10.0	15.0	20.0
8	10.0	20.0	20.0	15.0	15.0	10.0	20.0	10.0		25.0	25.0
9	10.0	15.0	20.0	20.0	15.0	20.0	25.0	15.0	25.0		10.0
10	20.0	20.0	25.0	10.0	20.0	25.0	20.0	20.0	25.0	10.0	

資料來源：本研究整理

表 5-3、尖峰時刻平均旅行時間增加 / 減少比例(b_{ij})

場站	場站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
場站	場站	0.20	0.30	0.20	0.50	0.40	0.30	0.50	0.20	0.20	0.40
1	0.20		0.50	0.50	0.10	0.20	0.30	0.10	0.40	0.30	0.40
2	0.30	0.50		0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.50
3	0.20	0.50	0.30		0.40	0.30	0.20	0.50	0.30	0.40	0.20
4	0.50	0.20	0.20	0.40		0.20	0.50	0.20	0.30	0.30	0.40
5	0.40	0.20	0.20	0.30	0.20		0.20	0.30	0.20	0.40	0.50
6	0.30	0.30	0.20	0.20	0.50	0.20		0.20	0.40	0.50	0.40
7	0.50	0.20	0.20	0.50	0.20	0.30	0.20		0.20	0.30	0.40
8	0.20	0.40	0.40	0.30	0.30	0.20	0.40	0.20		0.50	0.50
9	0.20	0.30	0.40	0.40	0.30	0.40	0.50	0.30	0.50		0.20
10	0.40	0.40	0.50	0.20	0.40	0.50	0.40	0.40	0.50	0.20	

資料來源：本研究整理

(2)旅行時間標準差

一般而言，在尖峰時候，由於平均旅行時間增加，而旅行時間變異也將隨之增加，故為了區分尖離峰狀況的不同，適當反應尖峰時候之旅行時間變異較離峰時候大，故尖峰時候之旅行時間標準差應該也需大於離峰時候的旅行時間標準差，如圖 5-1 所示。依 Taylor(1999)之研究，建議平均旅行時間與旅行時間標準差之關係式為

$$s = g\sqrt{t} \quad \text{式(5-3)}$$

其中 t 為平均旅行時間； s 為旅行時間標準差； g 為一常數，乃隨路段類型而改變，式 5-3 說明當平均旅行時間越高時，則旅行時間標準差將越大，故本設計範例依據式 5-4 設定旅行時間標準差值(c_{ij})，故旅行時間標準差表示為

$$c_{ij} = \sqrt{m_{ij}} \quad \text{式(5-4)}$$

此乃代表假設所有路段 m_{ij} 值皆等於 1，同時標準差等於是平均旅行時間 μ_{ij} 之平方根，由於平均旅行時間 μ_{ij} 值尖峰時會較離峰時大，故標準差 c_{ij} 尖峰時亦會較離峰時大。

本設計範例，主要考量到旅行時間隨時間變動且具有隨機性，同時設定旅行時間增加 / 減少比例(b_{ij})、旅行時間標準差(c_{ij})與旅行距離皆和平均旅行時間(a_{ij})成同一比例，也就是當兩路段 a_{ij} 相同時，則 b_{ij} 、 c_{ij} 與旅行距離也相同。

5.1.2 參數設定分析

俾使本研究模式套用螞蟻族群演算法時，能得到最佳的結果，本小節中，主要針對四種參數測試螞蟻族群演算法求解之結果：

1. 權衡因子 α 、 β 與 γ 值：旅行時間倒數、時窗可靠度與時窗長度三者間之權衡關係。本小節中，乃考量 (1,2,1)、(2,2,1)和(2,3,1)三種情境。
2. q_0 值：狀態轉換律中，權衡該追隨或發掘之門檻值。由於參考文獻多採用 0.9 或 0.98，故在此，將測試 0.9 與 0.98 兩情境。
3. 費洛蒙衰退參數 ρ 值：本小節中將測試 0.1 和 0.2 兩種狀況。

4. 螞蟻數目 m ：螞蟻數目 m 分別輸入 5、10 和 20 的數值，檢視螞蟻數對於結果的影響。

在進行參數分析時，螞蟻族群演算法中參數開始設定為： m (螞蟻數)=10， ρ =(費洛蒙衰退比例)=0.1， $q_0=(160 \cdot n)^{-1}$ ，其中 160 乃利用貪心解法所求得之最短路徑長。各參數測試結果如下：

1. α 、 β 與 γ 值：

轉態轉換法中，計算機率之公式如下：

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[t_{ij}] \cdot [h_{ij}]^{b_1} \cdot [RR_j]^{b_2} \cdot [WC]^{b_3}}{\sum_{u \in J_k(r)} [t_{iu}] \cdot [h_{iu}]^{b_1} \cdot [RR_u]^{b_2} \cdot [WC]^{b_3}} & \text{if } j \in H_k(i) \text{ 式(5-5)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中， α 、 β 、 γ 值乃是分別權衡接近度、時窗可靠度和時窗長短三者對於機率之影響大小，故在此實驗中，將考量三種情況：(1,2,1)表示時窗可靠度較其他二者重要；(2,2,1)表示時窗可靠度與接近度同樣重要，且比時窗長短影響重要；(2,3,1)表示時窗可靠度之影響大於接近度，接近度之影響又大於時窗長短。經實驗結果可知，如圖 5.2，當 $(\alpha, \beta, \gamma)=(1,2,1)$ ，其路徑長與時窗可靠度間結果較穩定，當時窗可靠度上升時，所求解之路徑長也會逐漸上升。因此，將 (α, β, γ) 設定(1,2,1)。

2. q_0 值

當 q_0 值愈大，代表螞蟻多偏向「追隨」之行為，一般研究多設定 q_0 值為 0.9 或 0.98，故在此將以此兩數值實驗之。由圖 5.3 的結果可知，當 q_0 值等於 0.9 時，所求得之路徑長較 0.98 時好，故設定 q_0 值為 0.9。

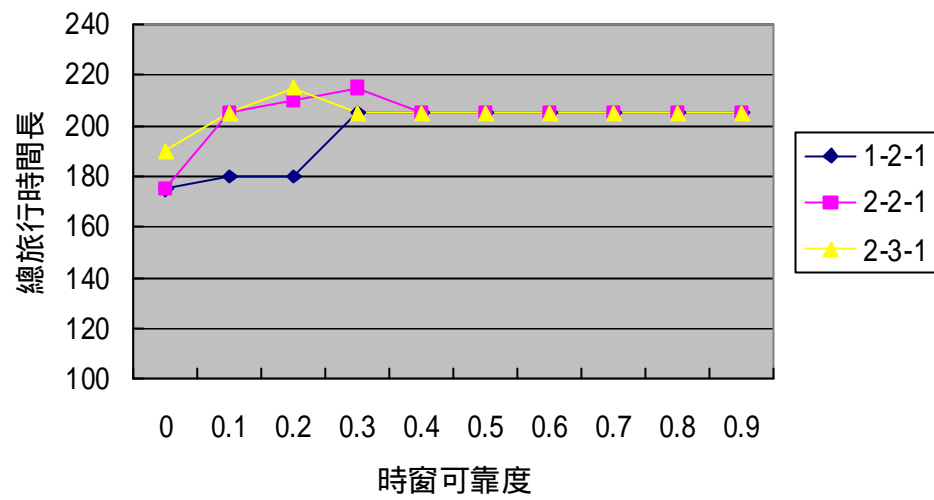


圖 5-2、不同 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖

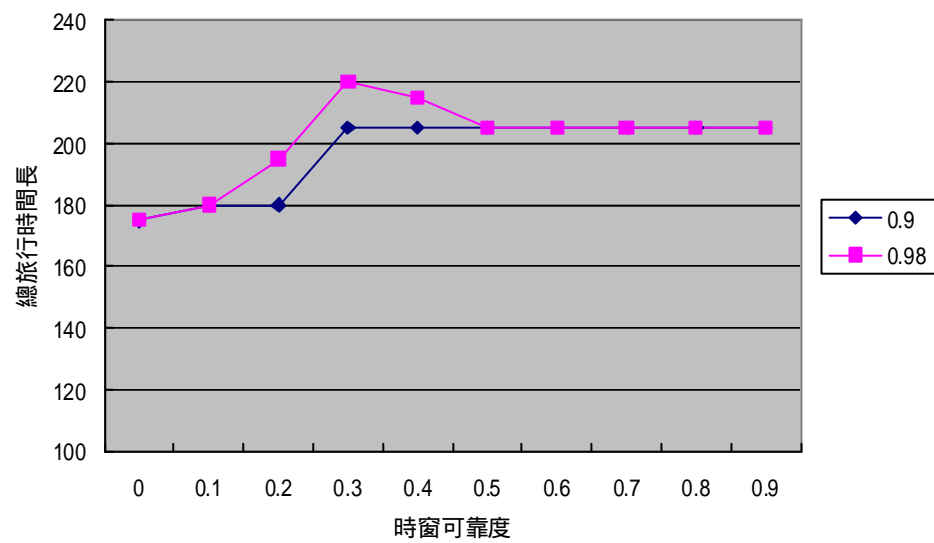


圖 5-3、不同 q_0 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖

3. 測試費洛蒙衰退參數 值：

值乃輸入 0.1 與 0.2 實驗之,由圖 5.4 可知,當 值為 0.1 之結果較 0.2 好,故設定 值為 0.1。

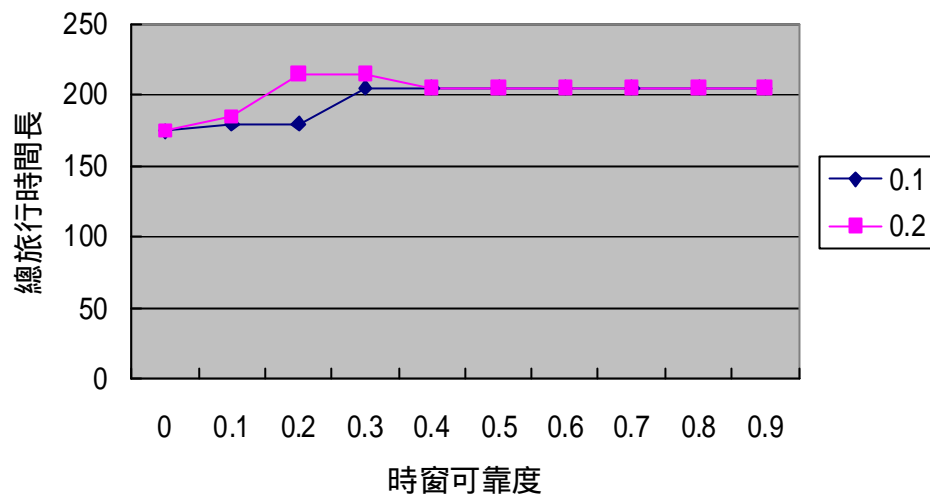


圖 5-4、不同 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖

4. 蟻蟻數目 m 值

在實驗中，將嘗試用 5、10 和 20 隻螞蟻求解，同時繪製成圖 5.5。10 隻螞蟻之結果較其他兩者為佳，故設定螞蟻數目為 10。

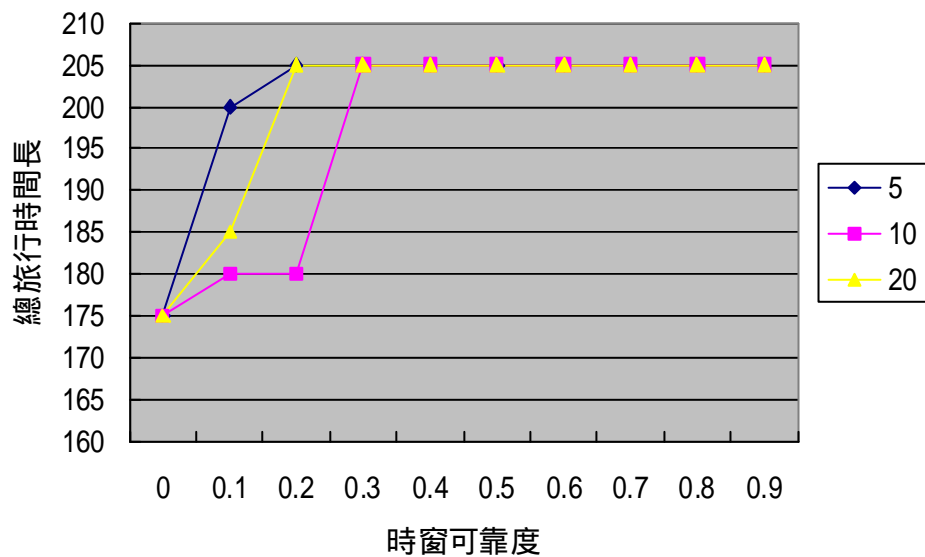


圖 5-5、不同 m 值下，時窗可靠度與總路徑長關係圖

經過上述實驗證明後，以下之結果分析與敏感度分析時，參數設定如下：參數皆設定為： $m=10$ ， $q_0=0.9$ ， $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)=(1,3,1)$ ， $\beta=-0.1$ ， $\rho=(160 \cdot n)^{-1}$ 。

5.1.3 結果分析

本小節中，將比較本研究模式與軟時窗限制之 VRP 模式結果，兩模式求解測試範例時，皆利用 ACS 進行求解。利用 ACS 求解軟時窗限制之 VRP 模式時，由於軟時窗模式並未考量時窗可靠度，故執行「狀態轉換法」時，單考量費洛蒙值、旅行時間加上等待時間的倒數和時窗長度而已，且設定遲到的懲罰成本乃是早到懲罰成本的兩倍。本研究之模式乃是時窗可靠度水準(LOS_j)設定為 0.8。

為了讓車輛巡行順序能夠一目了然，於是將兩模式之巡行結果繪製成圖 5-5 與 5-6 之時空圖。圖 5-5 乃是考量時窗可靠度之求解結果，圖中粗線乃代表該顧客之時窗限制，圓點則為求解所得到之平均抵達時間。由圖中可知，本研究模式所得到之巡行路徑，能使所有的車輛皆準時地在時窗限制內抵達到顧客處提供服務；然而，圖 5-6 為軟時窗之 VRP 模式所得到的結果，由圖中可知，雖然軟時窗之結果也都能準時抵達到顧客處提供服務，但是有些乃是到了最後一刻才抵達。

因此，再將兩個模式的結果彙整如表 5-4。表 5-4 乃列舉出兩模式求解後之各顧客的時窗可靠度值，總旅行時間長和總服務失敗機率。所謂的總服務失敗機率乃指「每個顧客處之時窗可靠度未達到時窗可靠度水準的加總」。由表 5-4 可以發現由於時窗可靠度水準設定其達 0.8 以上，故所求解之所有的時窗可靠度幾乎都在 0.8 以上，最後總失敗機率值僅為 5.8%，乃代表行駛此路徑，未能準時抵達顧客處之機率只有百分之五點八。但是，軟時窗求解時，雖然兩模式求得之總旅行時間長相同，但巡行之路徑卻有差異，因此由 5-4 可知，軟時窗模式所求得之結果，總服務失敗機率達 30.33%，代表此路徑較不可靠。故本研究模式所得之結果較能提供顧客好的服務，及提供物流業者一個較佳，較可靠的服務路徑。

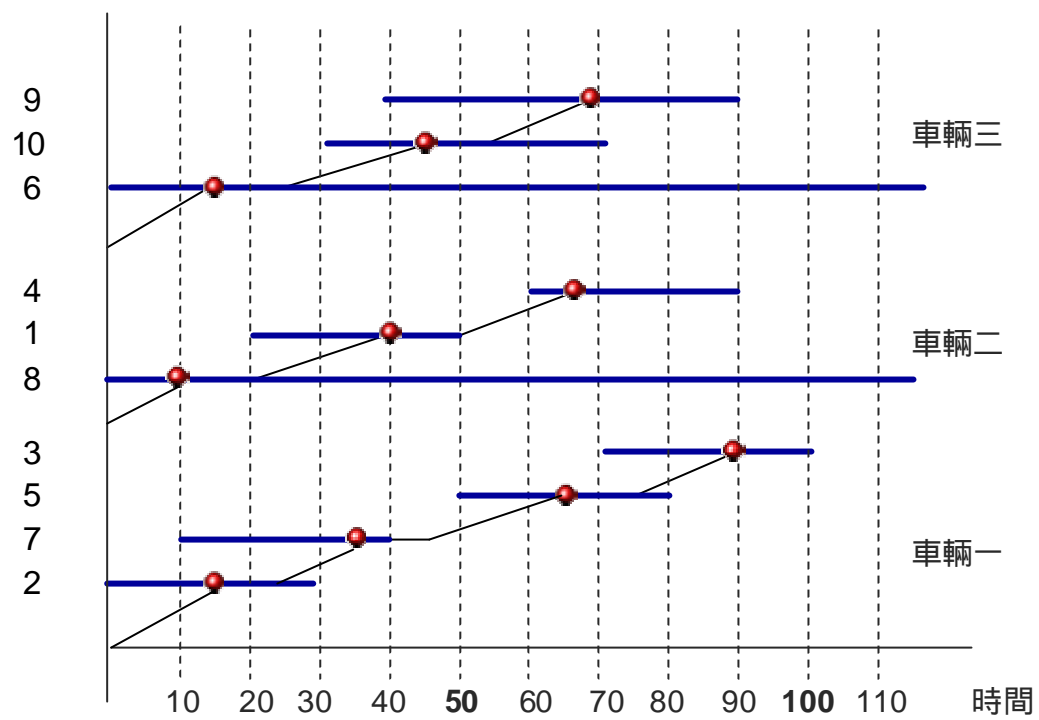


圖 5-5、考量時窗可靠度之求解結果

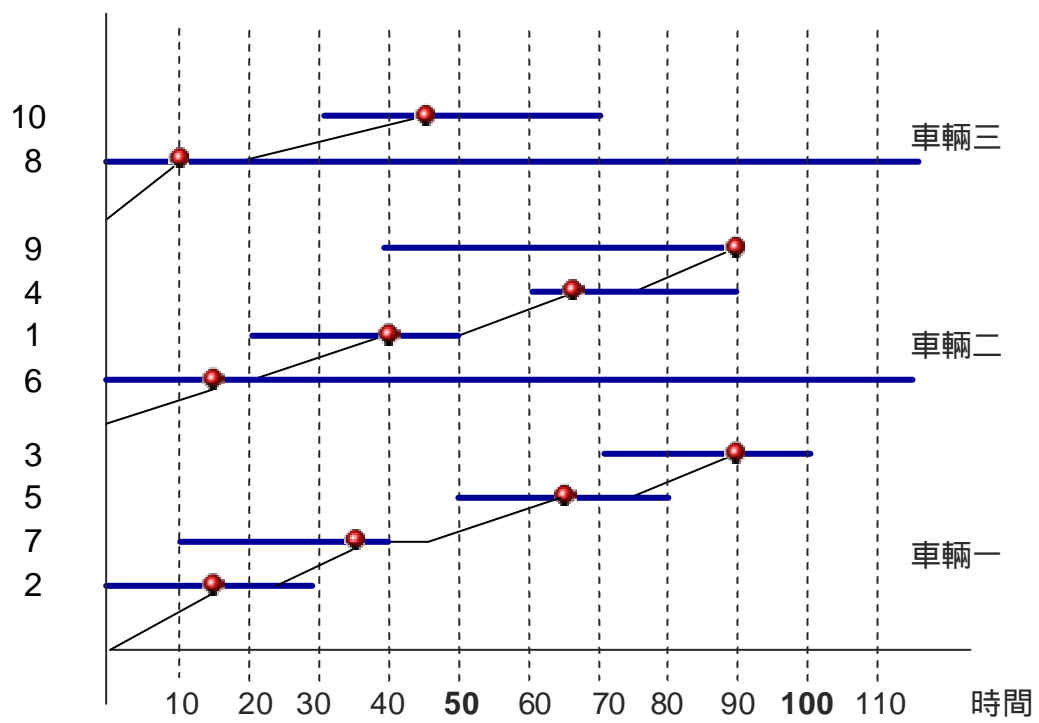


圖 5-6、軟時窗 VRP 之求解結果

表 5-4、測試簡例之求解結果

		本研究模式	軟時窗之 VRP 模式
時窗可靠度	顧客 1	0.9662	0.9662
	顧客 2	1.0000	1.0000
	顧客 3	0.8918	0.8918
	顧客 4	0.7420	0.7420
	顧客 5	0.9623	0.9623
	顧客 6	1.0000	1.0000
	顧客 7	0.8416	0.8416
	顧客 8	0.9995	0.9995
	顧客 9	1.0000	0.5548
	顧客 10	0.9946	0.9946
總旅行時間		205.00	205.00
總服務失敗機率		0.0580	0.3033
總目標		210.80	235.33

資料來源：本研究整理

5.1.4 敏感度分析

本小節中，將以數種不同情境時，針對考量時窗可靠度之 VRP 模式中的參數，予以調整，檢視時窗可靠度之 VRP 模式之求解結果。

情境一、同時調整全體時窗可靠度水準。

當物流業者或顧客所要求的可靠度 / 服務水準愈高時，則表示車輛會選擇旅行時間變異較小，較穩定之路徑，因此，決定最佳巡行路徑時將不單是考量最短距離或是最短平均旅行時間而已，而是最小旅行時間變異，故當要求之 LOS_j 愈來愈高時，旅行成本也會隨之增加。反之，則是愈小。

因此，在情境一中，嘗試同時調整所有顧客之服務水準，得到不同服務水準下之旅行時間長、總服務失敗機率與總目標值，彙整於表 5-5，表中可發現時窗可靠度水準在 0.5 以上時，結果會收斂一最佳解。表示管理者可衡量其所需的服務水準與

所能負擔之成本，能提供服務而決定行駛路徑。

表 5-5、各服務水準之總路徑長

LOS_j	旅行時間長	總失敗機率值	總目標值
0.0	175.0	0.0000	175.00
0.1	180.0	0.1999	209.92
0.2	180.0	0.3999	219.99
0.3	205.0	0.1413	219.13
0.4	205.0	0.0000	205.00
0.5	205.0	0.0000	205.00
0.6	205.0	0.0000	205.00
0.7	205.0	0.0000	205.00
0.8	205.0	0.0580	210.80
0.9	205.0	0.2246	227.46

資料來源：本研究整理

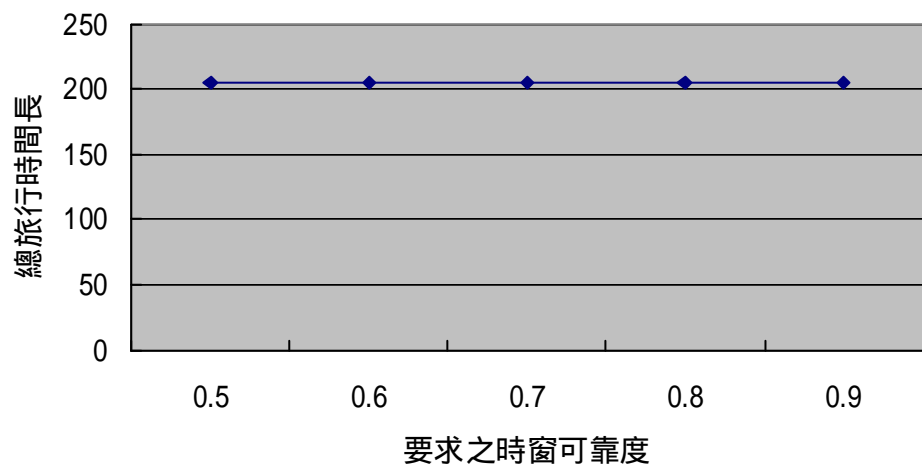


圖 5-7、不同時窗可靠度下之總路徑長

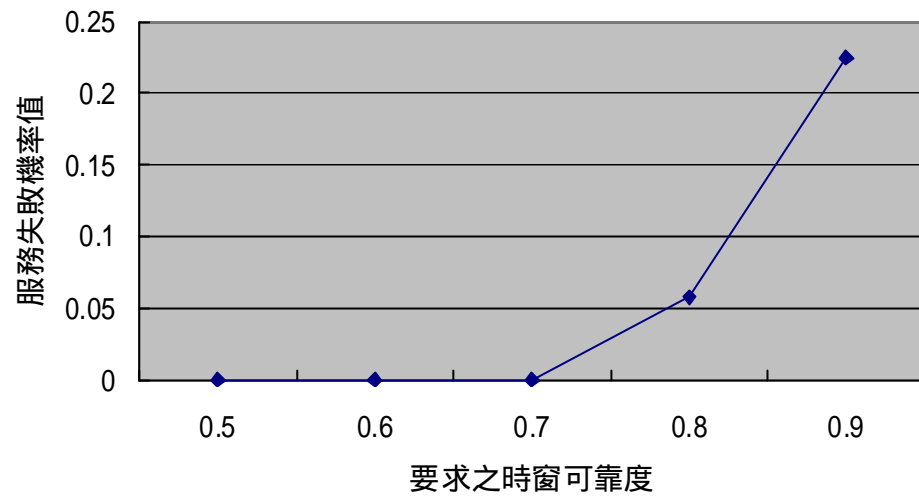


圖 5-8、不同時窗可靠度下之服務失敗機率值

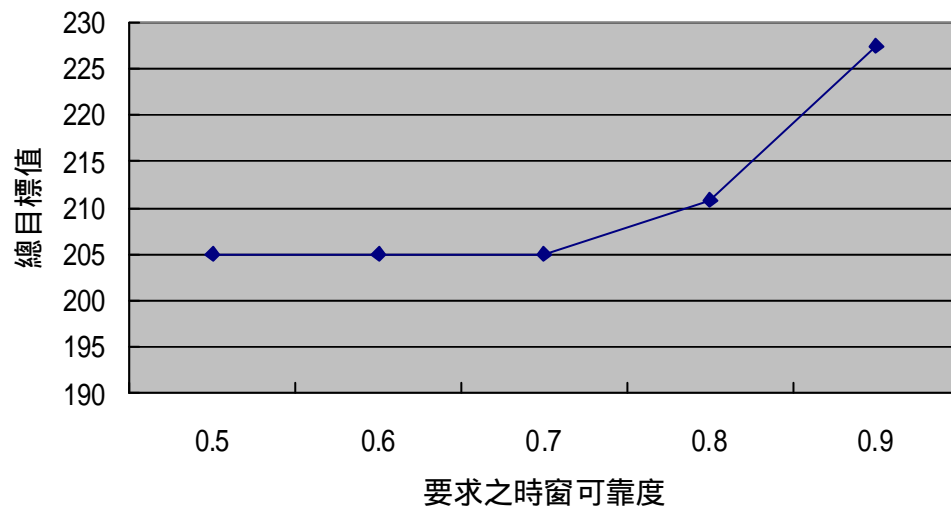


圖 5-9、不同時窗可靠度下之總目標值

表 5-10、不同時窗可靠度之各顧客時窗可靠度

顧客	時窗可靠度				
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
顧客 1	0.9662	0.9662	0.9662	0.9662	0.9662
顧客 2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
顧客 3	0.8918	0.8918	0.8918	0.8918	0.8918
顧客 4	0.7420	0.7420	0.7420	0.7420	0.7420
顧客 5	0.9623	0.9623	0.9623	0.9623	0.9623
顧客 6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
顧客 7	0.8416	0.8416	0.8416	0.8416	0.8416
顧客 8	0.9995	0.9995	0.9995	0.9995	0.9995
顧客 9	0.5548	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
顧客 10	0.9946	0.9946	0.9946	0.9946	0.9946

資料來源：本研究整理

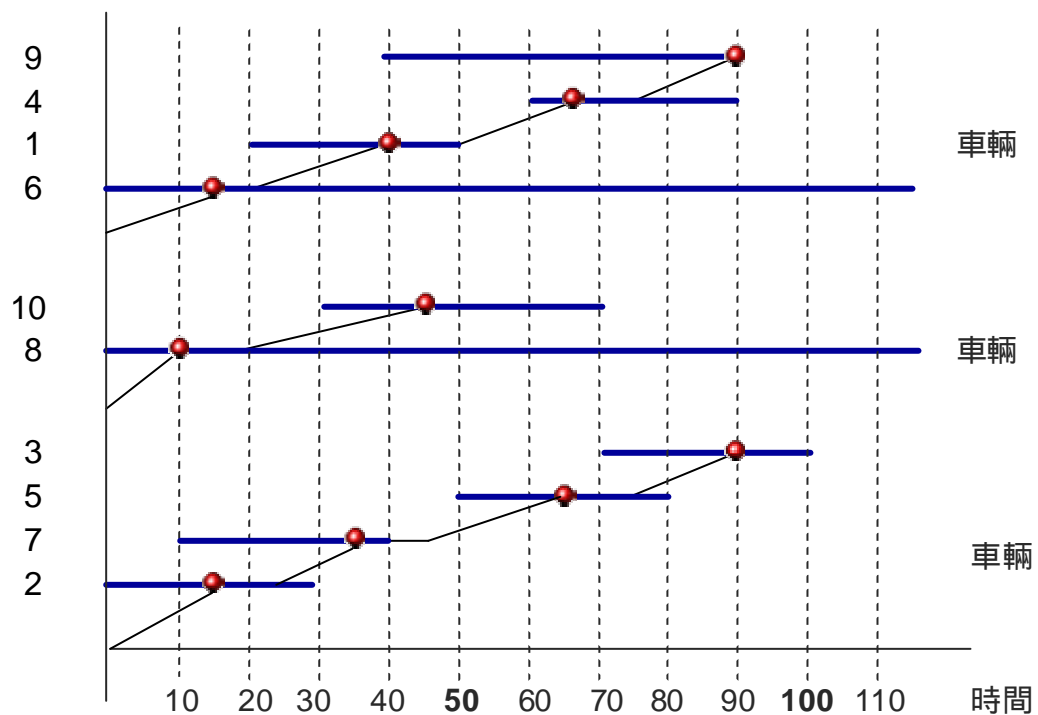


圖 5-10、時窗可靠度為 0.5 求解結果之時空圖

同時，時窗可靠度水準為 0.5，其結果與軟時窗結果相同，因為只要滿足所有顧客處之時窗可靠度水準可達到 0.5 以上即可，故顧客 9 之時窗可靠度只有 0.5548，但仍符合要求的條件，而當時窗可靠度水準要求 0.6 以上時，則巡行路徑有所不同，故整體時窗可靠度較 0.5 為佳。

情境二、調整單一顧客之時窗可靠度水準。

由於考量到服務每位顧客有輕重緩急之分，因此，對於每位顧客之時窗可靠度的要求亦有所差異。在情境二中，將嘗試改變單一顧客之時窗可靠度，以測試模式所求得之最佳路徑是否有所差異。因此情境二中，將顧客 9 之時窗可靠度水準提高至 0.8，其他顧客處皆設定時窗可靠度為 0.8，如表 5-11 所示。

表 5-11、情境二設定之時窗可靠度水準

顧客	時窗可靠度水準
顧客 1	0.5
顧客 2	0.5
顧客 3	0.5
顧客 4	0.5
顧客 5	0.5
顧客 6	0.5
顧客 7	0.5
顧客 8	0.5
顧客 9	0.8
顧客 10	0.5

資料來源：本研究整理

經過 ACS 求解結果彙整成表 5-12。由表中可知，顧客 1 之原始行駛之路徑有所改變，且時窗可靠度已有提升，代表即使當顧客之時窗可靠度水準不同時，本研究模式仍能提供最合適，最穩定的路徑，以減少路網變動對服務準點性的影響，滿足決策者的要求。

表 5-12、情境二時之求解結果

顧客	調整前	調整後
顧客 1	0.9662	0.9662
顧客 2	1.0000	1.0000
顧客 3	0.8918	0.8918
顧客 4	0.7420	0.7420
顧客 5	0.9623	0.9623
顧客 6	1.0000	1.0000
顧客 7	0.8416	0.8416
顧客 8	0.9995	0.9995
顧客 9	0.5548	1.0000
顧客 10	0.9946	0.9946
失敗機率和	0.00	0.00
總路徑成本	205.00	205.00
總目標值	205.00	205.00
巡行順序	0-2-7-5-3- 0-8-10- 0-6-1-4-9-0	0-2-7-5-3- 0-8-1-4- 0-6-10-9-0

資料來源：本研究整理

附註：巡行順序中，0 代表場站

情境三、某些路段之旅行時間變異較一般路段為高時。

在前面測試範例與情境，皆假設任何路段的旅行時間標準差與平均旅行時間皆是為式 5-3 的關係式，也就是說假定任何路段的 α_{ij} 值皆為 1，但是實際上， α_{ij} 值可能隨道路種類、地點等有所差異。因此，情境三中，將原本 α_{ij} 為 10 和 15 的路段，其值都改為 2。

情境三乃固定時窗可靠度水準為 0.8，則調整部分路段之 α_{ij} 值後，特將軟時窗 VRP 模式、原始路徑與情境三求解結果彙整成表 5-13，分別說明如下：調整 α_{ij} 值後，由於軟時窗模式中並沒有考慮旅行時間變異的問題，因此所求解之結果仍與調整值前相同，但是由於部分路段旅行時間變異變大，因此使得總服務失敗機率增加到

86.77%；而原始路徑乃是代表調整 值前之最佳值，然而當路網狀況改變時，雖然總旅行時間不變，但總服務失敗機率也已增加至 54.29%，因此，本研究模式最後求得新的最佳解，其總旅行時間雖較原始路徑高，但是由於總服務失敗機率僅是原始路徑的一半，故總目標值較原始路徑為佳。由此結果可知，為能準時抵達，車輛會避開旅行時間變異大的路段，而寧走旅行成本大的路段，故路段之旅行時間變異發生改變時，模式之指派路徑會隨之選擇其他較有利的路段。

表 5-13、調整部分路段 值之求解結果

LOS _j =0.8	項目	結果
軟時窗 求解結果	巡訪順序	0-2-7-5-3- 0-6-1-4-9- 0-8-10-0
	總旅行時間	205.00
	總失敗機率	0.8677
	總目標值	291.77
原始路徑	巡訪順序	0-2-7-5-3- 0-8-1-4- 0-6-10-9-0
	總旅行時間	205.00
	總失敗機率	0.5429
	總目標值	259.29
求解結果	巡訪順序	0-2-8-4- 0-7-1-5-3- 0-6-10-9-0
	總旅行時間	220.00
	總失敗機率	0.2734
	總目標值	247.34

資料來源：本研究整理

表 5-14、情境三之顧客時窗可靠度值

	調整 值前	調整 值後	
顧客	原始路徑	原始路徑	求解結果
顧客 1	0.9662	0.8970	0.6779
顧客 2	1.0000	0.9474	0.9474
顧客 3	0.8918	0.6227	0.6486
顧客 4	0.7420	0.6473	0.8047
顧客 5	0.9623	0.7016	0.8202
顧客 6	1.0000	0.9738	0.9738
顧客 7	0.8416	0.6854	0.9976
顧客 8	0.9995	0.9433	1.0000
顧客 9	1.0000	0.9750	0.9750
顧客 10	0.9946	0.9509	0.9509

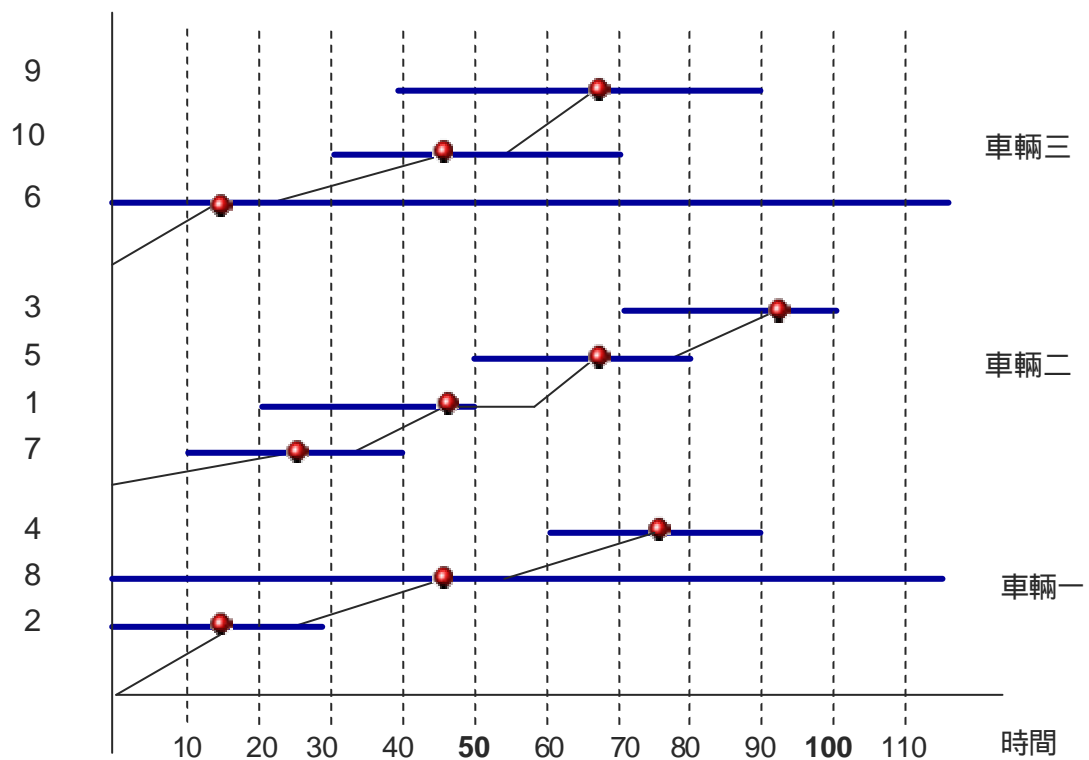


圖 5-11、情境三求解結果之時空圖

5.1.5、小結

由小規模路網之測試中可知，比較本研究模式與軟時窗之 VRP 模式求解結果，本研究模式可以提供較可靠、準點性較高之路徑。在情境一與情境二中，藉由調整時窗可靠度水準 LOS_j ，即可調整巡行路徑以得到最適宜之配送路徑；情境三雖是調整 σ 值，其實是檢視旅行時間標準差之影響，此乃反應現實生活中，有些路段雖然平均旅行時間較小，但是旅行時間變異幅度很大的情況。結果可以發現，本研究模式將會有效反應路網影響結果，同時求得當時之最佳路徑。

5.2 大規模路網

5.2.1 問題說明

Solomon 所提出之標竿範例共有 R1、R2、C1、C2、RC1 和 RC2 共六類，主要可依地理資料分佈和時窗長短區分之：(1)其中，R1 和 R2 之範例，其地理資料乃是以均勻分佈隨機產生；C1 和 C2 則為群聚分佈；RC1 與 RC2 則為半群聚分佈。(2)R1、C1 和 RC1 乃是屬於短時窗的問題，同一輛車只能服務少數顧客。而 R2、C2 和 RC2 則屬於長時窗之問題，可使專一輛車服務許多位顧客。

本小節所應用之標竿範例乃為 Solomon 所提出之 R111 範例。R111 總共有 100 個顧客，而顧客間之旅行時間即為其對應之距離，除了車輛容量限制為 200 單位外，仍有場站時窗限制時間為 $[0, 230]$ 。同時，本研究乃假設所有顧客間之旅行時間標準差等於其旅行時間(距離)的平方根，也就是 σ_{ij} 值皆為 1。

在應用 ACS 求解 R111 例題時，其參數設定為 $m=10$ ， $q_0=0.9$ ， $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)=(1, 2, 1)$ ， $\beta=0.1$ ， $\rho_0=(200 \cdot n)^{-1}$ 。經過求解後，將結果繪製成圖 5-10、5-11 和 5-12。

5.2.2 結果分析

由圖 5-14 可知，當時窗可靠度水準提高時，則總目標值同時也會提高，故本研究模式會隨著時窗可靠度之要求，而選擇最合適之路徑，以有效利用資源，創造最大利基。

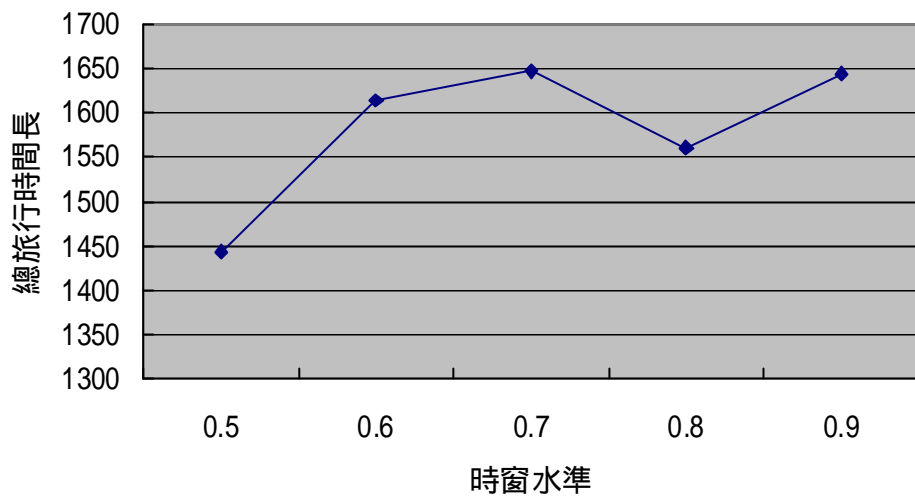


圖 5-12、時窗水準與總路徑長關係圖

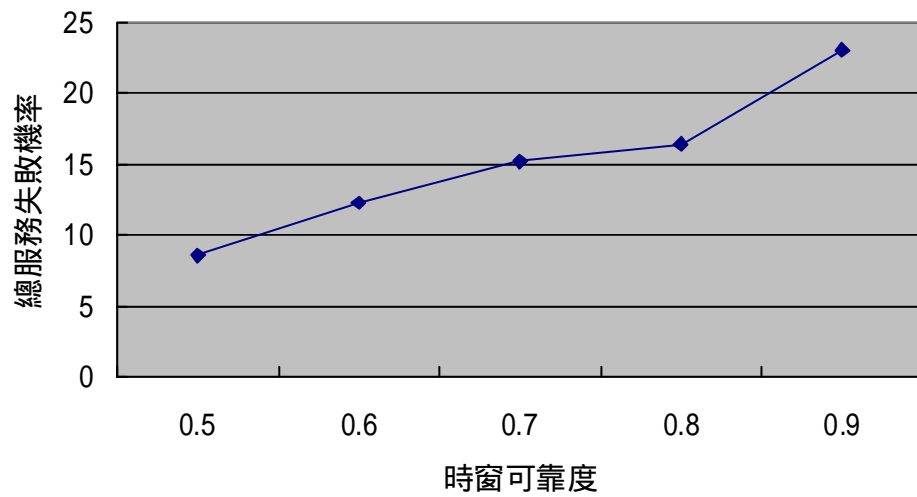


圖 5-13、時窗水準與總服務失敗機率之趨勢圖

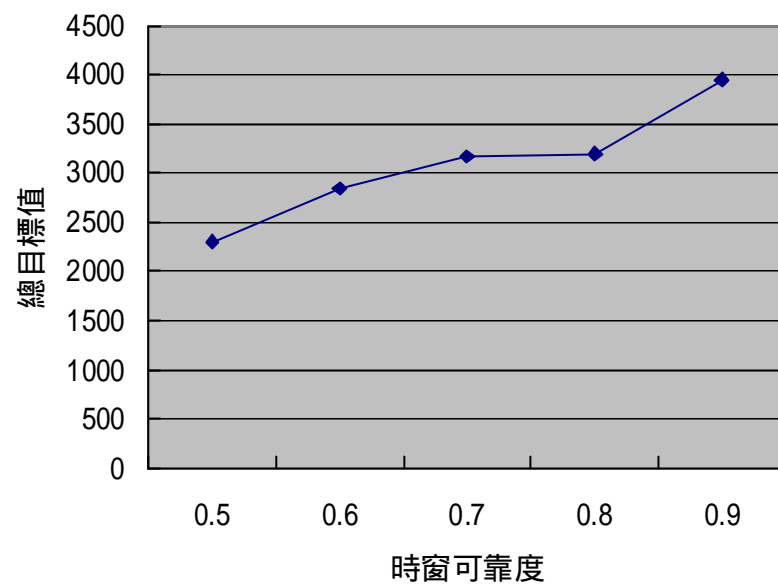


圖 5-14、時窗水準與總目標值之趨勢圖

六、結論與建議

6.1 結論

1. 傳統考量旅行時間可靠度時，往往未處理旅行時間之間的相關性，故本研究考量旅行時間之連續性與隨機性，也就是每當進入路段之時間不同時，則路段之旅行時間便不同。如此，可解決路段間相關性的問題，而且反應出旅行時間的真實狀況，例如尖離峰之情況，因此，本研究模式乃屬動態兼隨機之車輛途程問題。
2. 先前研究多以平均值概括路網狀況，但是因為路網會受到種種干擾，故旅行時間乃是變動的且具有不確定性。本研究導入可靠度工程理論之概念，以機率分佈型態表示旅行時間，可有效反應旅行時間的變動性。
3. 本研究考量時窗限制之車輛途程問題之特性，基於可靠度工程理論，提出「時窗可靠度」之觀念。當時窗可靠度水準要求不同時，則原始之最佳路徑將會有所改變以尋求時窗可靠度最佳且路徑最短的解，有效反應不同條件之結果。故可提供業者在提供足夠服務條件下之最佳路徑，以節省成本，創造最大利基。
4. 由於螞蟻族群演算法求解 VRP 問題之績效已獲驗證且可求解多目標問題等特性，本研究乃利用螞蟻族群演算法求解研究模式，同時修改螞蟻族群法之狀態轉換法，使得螞蟻選擇路徑時，考量時窗可靠度之影響，可有效選擇最佳路徑。
5. 由設計範例之結果，可以發現本研究模式，在準點性或指派路徑結果，都不遜於軟時窗之車輛途程模式，而且可隨規劃者要求之可靠度水準，有效反應求解結果。尤其當路網愈壅擠、旅行時間變動情況愈嚴重時，則愈能突顯本研究模式的效益。

6.2 建議

6.2.1 研究模式方面

1. 由於本模式乃假設旅行時間之期望值與變異數已知，未來可考慮結合有關旅行時間預測之研究等，整合本研究之模式，如此一來，不必一定得蒐集到平均旅行時間和旅行時間標準差等資料才能套用本研究模式。
2. 由於現今苦於實際狀況難以得到平均旅行時間與旅行時間標準差之相關資料，故本研究乃採用測試範例及標竿範例分析研究模式。未來可將利用真實範例驗證之，相信更可感受到此模式之實用性。
3. 本研究模式考量螞蟻族群演算法之特性，只建構單一車種的車輛途程模式，未來建議可特別研究如何利用螞蟻族群演算法求解多車種之車輛途程模式，進而可將本研究模式擴充到考量多車種之車輛途程模式。
4. 可靠度乃為一指標，本研究乃以路網對 VRP 影響的角度研究之，在物流環節上，仍可以其他議題考量可靠度觀念研究之。如供應鍊之可靠度(與風險之差異)。

6.2.2 演算法方面

1. 螞蟻族群演算法有許多參數，利用螞蟻族群演算法求解不同問題時，需注意參數設定的問題，這都將影響最後結果的好壞。如狀態轉換法中，若是決定選擇機率時，可能考量了接近度、時窗可靠度或時窗長短等，這些因素之間的相對關係為何，都會影響選擇結果。
2. 螞蟻族群演算法因為加強學習的效果，可以結果很快收斂求得最佳解。但是由局部更新法與整體更新法的公式中可知，費洛蒙乃是屬於逐次削減的狀況，若是設定循環次數過多，多次運算後，可能會發生費洛蒙逐漸趨近於零的情況，一直到最後等於零時，而失去選擇與加強學習機制。

參考文獻

英文部分：

1. Ahn B.H. and Shin J.Y., “Vehicle –routing with Time Windows and Time Varying Congestion”, Journal of Operation Research Society, 42, 5, pp. 393-400, 1991.
2. Alfa A. S., “A heuristic algorithm for the traveling salesman problem with time-varying travel costs”, Engmg Optim. 12, pp.391-402, 1987.
3. Asakura Y., “Evaluation of network reliability using stochastic user equilibrium”, Journal of Advanced Transportation, 33, 2, pp.147-158, 1999.
4. Bell M.G.H. and Cassir C., Reliability of Transport Networks, Research Studies Press Ltd, 2000.
5. Bell M.G.H. and Iida, Y., Transportation Network Analysis, Wiley, New York, 1997.
6. Changchien S.W., Wu C.S. ,“ An Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Window”, The Seven Conference on Artificial Intelligence and Application, 2002.
7. Chen A. et al. “Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results”, Transportation Research 36B, pp. 225-252, 2002.
8. Corne D., Dorigo M., Glover F., A New Ideas on Optimization, McGRAW-Hill, 1999.
9. Crainic T.G, Laporte G, Fleet Management and Logistics, Kluwer Academic Publishers, 1998.
10. Dantzig G.B., Ramser J.H., “The truck dispatching problem.” Magament. Science. 6, pp.80-91, 1959.

11. Dorigo M, Gambardella L.M., “Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem”, IEEE Transactions in Evolutionary Computation, 1, 1, pp.53-66, 1997.
12. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A., “Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B: Cybernetics, 26, 1, pp.29-41, 1996.
13. Eiichi T., Thompson R.G., Tadashi Y. and Ron V.D.. City Logistics : Network Modelling and Intelligent Transport Systems, Elsevier Science Ltd, 2001.
14. Fu L., “Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion”, Transportation Research 36B, pp.485-506, 2002.
15. Fu L., Rilett L.R., “Expected Shortest Paths in Dynamic and Stochastic Traffic Networks”, Transportation Research 32B, pp.499-516, 1998.
16. Fuessle R., Bill D. and Liebman J., “Air quality planning a general chance-constrained model.”, Journal of Environmental Engineering, 113, 1, pp. 106-123, 1987.
17. Gendreau M., Laporte G. and Seguin R., “ Invited Review : Stochastic vehicle routing”, European Journal of Operational Research 88, pp.3-12, 1996.
18. Golden B.L., Assad A.A., Vehicle Routing: Methods and Studies, North-Holland, 1988.
19. Guldmann, J.M., “Supply, storage, and service reliability decisions by gas distribution utilities: a chance-constrained approach.”, Management Science, 29, 8, pp.884-906, 1983.
20. Iida Y., “Basic concepts and future directions of road network reliability analysis”, Journal of Advanced Transportation, 33, 2, pp.125-134, 1999.
21. Jacobs T., Medina M., Ho J., “Chance constrained model for storm-water

- system design and rehabilitation.” Journal of Water Resources Planning and Management, 123, 3, pp.163-168, 1997.
22. Kohler, U., “An innovating concept for city –logistics.”, 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, Berlin, Germany, CD-ROM, 1997.
 23. Lam W.H.K., Xu G., “A Traffic Flow Simulator For Network Reliability Assessment”, Journal of Advanced Transportation, 33, 2, pp.159-182, 1999.
 24. Lo H.K., Tung Y.K., “Network with degradable links: capacity analysis and design”, Transportation Research 37B, pp.345-363, 2003.
 25. Michael P. and Labbe M., Transportation Planning: state of art, Kluwer Academic Publishers, 2002.
 26. Taniguchi, E., Thompson R.G., and Yamada, T, “Vehicle routing and scheduling using ITS”, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, Seoul, CD-ROM, 1998.
 27. Taylor M.A.P., “Dense Network Traffic Time Reliability and Traffic Management. I: General Introduction.”, Journal of Advanced Transportation, 33, 2, pp.147-158, 1999.
 28. Taylor M.A.P., “Dense Network Traffic Time Reliability and Traffic Management ? : Application to Network Reliability”, Journal of Advanced Transportation, 33, 2, pp.147-158, 1999.

中文部分：

1. Elmer E. Lewis 著，可靠度工程導論，趙淳霖譯，科技圖書股份有限公司，民國七十八年七月。
2. 張明坤，「可靠度理論與其在捷運系統應用上之實務探討」，捷運技術半年刊，第十六期，85~95 頁，民國八十五年。
3. 陳順宇、鄭碧娥，統計學，華泰，民國八十七年。
4. 鐘譽偉，「旅行時間可靠度之研究」，國立台灣大學，博士論文，民國 88 年 6 月。

5. 黃木才,「貨櫃運輸公司 VRP 之研究 模糊多目標遺傳演算法之應用」,國立交通大學,碩士論文,民國 85 年 6 月
6. 張耀明,「台灣城際旅行時間可靠度之分析與量測方法」,國立交通大學,碩士論文,民國 88 年 6 月。
7. 廖田華,「需求不確定下物流中心車輛路線問題之研究」,國防管理學院,碩士論文,民國 89 年 6 月。
8. 洪瑜敏,「供應鏈之多目標產銷模式:以自行車製造廠商為例」,國立交通大學,碩士論文,民國 90 年 6 月。
9. 江文聲,「動態隨機時間相依路網可靠路徑選擇」,國立台灣大學,碩士論文,民國 90 年 6 月。
10. 呂英志,「即時資訊下車輛問題之研究」,私立逢甲大學,碩士論文,民國 91 年 6 月。
11. 藍坤銘,「資料挖掘之順序樣式法於螞蟻理論之改善」,國立台北科技大學,碩士論文,民國 91 年 6 月。
12. 侯政傑,「都會區警察派出所區位設置之研究 模糊多目標組合最佳化之應用」,國立交通大學,碩士論文,民國 91 年 6 月。
13. 張閔嵐,「模糊多階層多目標供應鏈規劃 以紡織業為例」,國立交通大學,碩士論文,民國 91 年 6 月。
14. 吳旻樵,「新 VRP 啟發式解法之開發」,國立交通大學,碩士論文,民國 91 年 6 月。

簡 歷

姓名：朱文正

出生：民國 67 年 12 月 29 日

學歷：高雄市立高雄高級中學(83.6~86.6)

國立成功大學交通管理科學系(86.6~90.6)

國立交通大學交通運輸研究所(90.6~92.6)

地址：高雄市苓雅區林德區 10 巷 14 號

電話：07-7267233