

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

包容性啟發式解法在時間窗車輛路線問題上之應用

Applications of Generic Heuristics Methods to Vehicle Routing Problem with Time Windows

計畫編號： NSC - 89 - 2211 - E - 009 - 027

執行期限： 88年 8月 1日至 89年 7月31日

計畫主持人：韓復華 國立交通大學運輸工程與管理學系 教授

一、中文摘要

本計畫為首度應用門檻接受法 (Threshold Accepting, TA) 與大洪水法 (Great Deluge Algorithm, GDA)，並結合傳統交換法，設計多套解題程序以求解「時間窗車輛路線問題 (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)」之研究。本研究選擇Solomon之56個標準測試例題，以ANSI C語言撰寫程式，並在586 PC個人電腦之LINUX環境下進行測試與績效比較。除對TA及GDA之參數進行敏感度測試外，亦設計兩階段模組進行測試。測試結果發現：在解題精確度方面，GDA的表現比TA佳，但執行時間相對較長；與文獻最佳結果比較，56個測試例題當中，本研究突破1題另有8題平手，平均車輛總數誤差為0.20輛，平均總距離誤差為2.10%。與其他國際文獻比較，本研究之方法僅略遜於文獻紀錄，顯示GDA與TA兩種方法皆可做為VRPTW實務應用上的有效解題工具，值得後續深入研究。

關鍵詞：時間窗車輛路線問題、巨集啟發式解法、門檻接受法、大洪水法。

Abstract

The Threshold Accepting (TA) and the Great Deluge Algorithm (GDA) metaheuristics which were developed in early 90's have not been applied to the Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). This research integrated the implementation techniques of traditional local search algorithms with the search strategies of TA and GDA to solve the VRPTW. A bank of Solomon's 56 benchmark instances was utilized for analyzing the efficiency and the accuracy of our developed methods. Computational results showed that GDA seems to yield better average performance than TA on the 56 instances. We have also updated the best solution of one of the 56 instances. The average deviation of vehicles required is 0.20, and the average deviation of traveling distance is 2.10%. This implies that TA and GDA could provide useful tools for solving VRPTW and related problems.

Keywords: VRPTW, Meta-heuristics, Threshold Accepting, Great Deluge Algorithm.

二、緣由與目的

時間窗車輛路線問題 (VRPTW) 為基本車輛路線問題 (Vehicle Routing Problem, VRP) 加上時間窗限制，其問題描述如下 [Solomon (1984)]：考慮單一場站，同質性的車隊，每輛車皆由場站出發再回到場站；假設每個顧客之需求已知且皆小於車輛容量，每位顧客僅能被一輛車服務。在不違反車輛容量限制、路線最大時限及時

間窗限制的情況下，求以最少車輛數及最短路線距離來服務所有顧客。其中，時間窗限制意指必須在顧客要求之時間上下界 $[T_1, T_2]$ 之內開始服務該顧客，否則不為可行解，但是允許車輛可在時間窗下界 T_1 之前到達該顧客點，惟須等到 T_1 時刻始可進行服務。

由於VRPTW之計算複雜度屬於NP-hard，當問題規模龐大時很難保證在有效時間內求得最佳解，因此除少數學者致力於最佳解方法之研究外 [Desrochers et al.(1992)、Fisher et al.(1997)及Kohi and Madsen (1997)]，大多數學者仍著重於啟發式解法的發展，1995年以前VRPTW之求解多屬傳統性之啟發式方法，簡要描述如表1。

表1 應用於VRPTW之傳統啟發式解法

解法	代表方法描述
構建法	節省法、時間導向最近鄰點法、插入法、時間導向掃描法、平行路線插入法。[Solomon (1984, 1987)、Potvin and Rousseau (1993)]
改善法	將傳統VRP改善法應用於VRPTW，如：K-Opt 節線交換、Or-Opt 節線交換、 λ -interchange 節點交換。[Potvin and Rousseau (1993)]
綜合法	不同於改善法先構建路線再進行路線改善。綜合法於構建一部份路線後立刻進行路線改善，逐次將路線擴大後，再逐次進行路線改善。[Russell (1995)]

新近發展之巨集啟發式解法 (Meta-Heuristics) 主要著重於跳脫局部最佳解以獲得更深度的搜尋，或者擴大解空間的搜尋範圍以達到廣度搜尋的效果。此類解法最具代表性的為「禁制搜尋法(Tabu Search, TS)」，表2列出近年來求解VRPTW問題之巨集啟發式解法。

表2 應用於VRPTW之巨集啟發式解法

作者/年代	巨集策略	鄰域搜尋	總車輛數
Potvin et al. (1996)	禁制搜尋	2-opt Or-opt	426
Chiang and Russell (1996)	模擬鍛鍊	λ -interchange k-node interchange	422
Chiang and Russell (1997)	禁制搜尋	λ -interchange	411 (7題突破)
Taillard et al. (1997)	禁制搜尋	CROSS-interchange Or-opt GENIUS	416 (17題突破)

門檻接受法(TA)[Dueck and Scheuer (1990)]與大洪水法(GDA)[Dueck (1993)]為新近發展之兩種巨集啟發式方法，皆具有跳離局部最佳解 (Local Optimum) 之機制。本期計畫之研究目的在於應用TA及GDA，結合傳

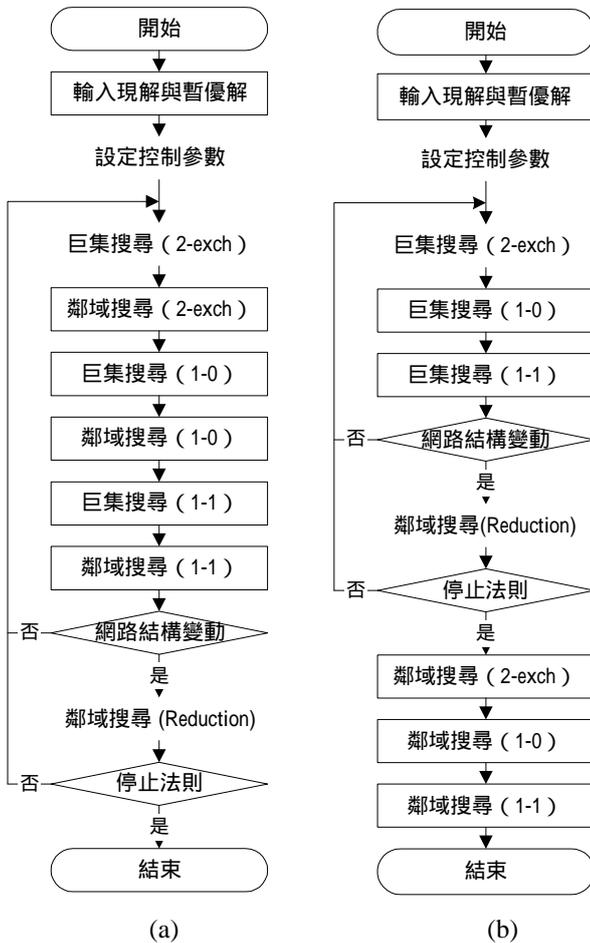


圖3 G1及G2搜尋架構之執行流程

本研究將GDA及TA與搜尋架構G1及G2組合成為四套巨集搜尋模組：G1(GDA)、G2(GDA)、G1(TA)及G2(TA)，然後進行解題績效測試。參數設定方面：TA之控制參數，起始門檻 $T_0=1.3\%$ 、門檻數列長度 $K=30$ ，門檻數列收斂型態採用梯狀遞減型門檻數列；GDA之控制參數，起始水位 L_0 為局部解構建程序之起始解成本、水位下降速度 $d=0.055$ 。

測試結果顯示：四套巨集搜尋模組中，車輛總數誤差最低為0.53、最高為0.60；總距離誤差最低為8.15%、最高為10.03%。在執行架構方面：G2(GDA)之解題精度較G1(GDA)為佳，G1(TA)之解題精度較G2(TA)佳，惟G1與G2之差異並不顯著。此外，兩種起始解法SSI及SC對巨集搜尋模組之影響亦不顯著。整體而言，GDA之解題精確度較TA為高，其中以SC起始解法配合G2(GDA)模組之解題精確度最佳。CPU執行時間方面，GDA之執行時間明顯比TA長，G1與G2架構以及SSI與SC起始解法之間則無顯著差異。詳細結果請參見[韓與林 (1999)]。

3.2 TA及GDA之參數敏感度測試

本節針對TA及GDA兩種演算法之控制參數進行敏感度測試與分析。根據3.1節之測試結果，G1(TA)與G2(GDA)具有較佳的解題精確度，限於時間，本研究遂以G1(TA)及G2(GDA)模組進行參數敏感度測試。

(1) G1(TA)之參數測試

本研究設定： $T_0=0.3\%$ 、 0.7% 、 1.0% 、 1.3% 、 1.6% 及 1.9% ， $K=30$ 、 60 及 90 ，共18組參數組合進行測試。上

述參數設定對56個測試例題進行測試之結果如下：車輛總數誤差為0.34至0.71輛，總距離誤差為8.49%至19.40%，CPU執行時間13.91至42.22秒。

在敏感度分析方面，當 K 為30時， $T_0=1.3\%$ 之車輛總數誤差最低， K 為60及90時， $T_0=1.6\%$ 之車輛總數誤差最低；三種門檻數列長度之間，以 $K=60$ 及90時車輛總數誤差較小。總距離誤差在 $T_0=1.6\%$ 及 1.9% 時最低；門檻數列長度對總距離誤差則無顯著影響。CPU執行時間大致隨 K 增加而成倍數成長， T_0 增加對執行時間影響不大。綜合上述測試結果，較適之參數範圍： T_0 值為1.3%至1.9%， K 值為60至90，此範圍之解題績效較佳且穩定。

(2) G2(GDA)之參數測試

本研究設定： $d = 0.005$ 、 0.006 、 0.007 、 0.008 、 0.009 、 0.01 、 0.02 、 0.03 、 0.055 、 0.08 共10組參數，至於起始水位 L_0 則固定採用起始解成本。上述參數設定對56個測試例題進行測試之結果如下：車輛總數誤差為0.29至0.41輛，總距離誤差為6.51%至9.44%，CPU執行時間為45.73至757.26秒。

在敏感度分析方面，車輛總數誤差、總距離誤差與CPU執行時間皆受水位下降速度(d)之影響。大致而言，下降速度越小，其解題精確度越佳，解題時間越久；當 d 值在 $0.005\sim 0.01$ 之間，其趨勢較為緩和且呈水平震盪。綜合上述測試結果，較適之 d 值範圍為 0.006 至 0.01 。

3.3 兩階段模組之設計與測試

本研究進一步將G1(TA)及G2(GDA)加以組合，其組合方式為：G1(TA)+G2(GDA)及G2(GDA)+G1(TA)；以循序構建法(SC)為起始解法[Soloman (1984)]，節省值參數為 $(\alpha, \beta, \lambda) = (0.4, 0.4, 0.2)$ 。如圖4所示，G1(TA)+G2(GDA)係先對局部解構建程序之解 X_0 執行G1(TA)模組得到解 X_1 ，然後以 X_1 為起點執行G2(GDA)。本研究發現：若以 $C(X_1)$ 為初始水位之解題績效不彰，因此需將 L_0 調高。至於G2(GDA)+G1(TA)，則先對局部解構建程序之解 X_0 執行G2(GDA)模組得到解 X_1 ，接著執行G1(TA)模組。

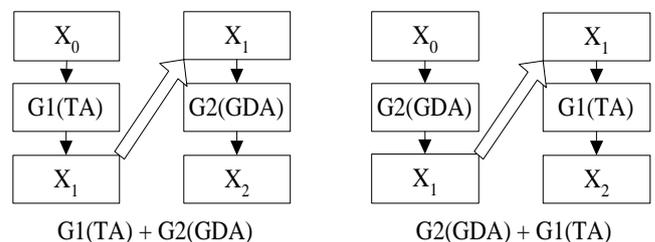


圖4 兩階段模組執行架構之概念圖

(1) G1(TA)+G2(GDA)之測試結果

根據前述測試結果，第一階段G1(TA)之參數 T_0 設定為1.6%， K 為90；第二階段G2(GDA)之 d 值設定為0.01， L_0 設定為 $C(X_1)*1.05$ 。

56題測試例題之平均車輛總數誤差為0.30輛，較相同參數單階段G1(TA)模組之0.34輛誤差，減少0.04輛；平均總距離誤差為6.52%，較G1(TA)模組之8.49%，減少1.97%；平均CPU執行時間為230.48秒，較G1(TA)模組之42.22秒多出188.26秒。以上結果顯示，G1(TA)+G2(GDA)兩階段模組能有效改善G1(TA)單階段

模組之總距離誤差，車輛總數則無明顯改善，所需執行時間則大幅增加。

(2) G2(GDA)+G1(TA)之測試結果

第一階段G2(GDA)之d值設定為0.01， L_0 設定為 $C(X_i)$ ；第二階段G1(TA)之參數 T_0 設定為1.6%，K為90。

56題測試例題之平均車輛總數誤差為0.27輛，較相同參數單階段G2(GDA)模組之0.29輛誤差，減少0.02輛；平均總距離誤差為7.11%，較G2(GDA)模組之7.66%，減少0.55%；平均CPU執行時間為374.28秒，較G2(GDA)模組之366.59秒多出7.69秒。由上述結果可知，在車輛總數誤差及總距離誤差方面，G2(GDA)+G1(TA)兩階段模組之改善效果均不明顯，惟CPU執行時間亦未顯著增加。此乃因G2(GDA)之效果原本就較G1(TA)強，因此先執行G2(GDA)之後，G1(TA)能夠改善的空間不大。

3.4 最佳結果比較分析

(1) 本研究最佳結果與文獻已知最佳解之比較

本研究在所有參數測試過程中得到之最佳結果及其與文獻已知最佳解比較彙整如表3。該表第一欄為各例題代號；第二大欄為文獻已知最佳解，包含車輛數(Fleet)，距離成本(Cost)以及最佳解之文獻；第三大欄為本研究最佳結果，包含車輛數(Fleet)、距離成本(Cost)、車輛數誤差(F)及距離誤差%(C%)。表中字體加粗者表示本研究結果至少與已知最佳解相同，其中例題 r210 更突破文獻已知最佳解，其車輛總數誤差為0、總距離誤差為-1.59%；其他8題與文獻已知最佳解相同，分別為c105、c108、c109、c201、c205、c206、c207與c208，皆為群聚類型之問題。若以VRPTW之第一目標車輛數來看，本研究在56題測試例題中，有45題與已知最佳解之車輛數相同。

表3：VRPTW測試題庫之最佳結果

題號	文獻已知最佳解			本研究最佳結果				題號	文獻已知最佳解			本研究最佳結果			
	Fleet	Cost	文獻*	Fleet	Cost	F	C%		Fleet	Cost	文獻*	Fleet	Cost	F	C%
r101	18	1607.7	b	19	1696.2	1	5.50	r201	4	1253.2	c	4	1260.9	0	0.61
r102	17	1434.0	b	17	1545.5	0	7.78	r202	3	1207.2	c	3	1229.9	0	1.88
r103	13	1207.0	f	13	1347.2	0	11.62	r203	3	948.7	d	3	975.8	0	2.85
r104	10	982.0	d	10	1018.7	0	3.74	r204	2	855.2	a	3	768.0	1	-10.20
r105	14	1377.1	d	14	1453.3	0	5.53	r205	3	1004.3	c	3	1026.3	0	2.19
r106	12	1252.0	d	12	1300.5	0	3.87	r206	3	833.0	f	3	941.1	0	12.98
r107	10	1124.7	a	10	1169.0	0	3.93	r207	2	914.4	a	3	833.8	1	-8.81
r108	9	968.6	e	9	1005.4	0	3.80	r208	2	738.6	d	2	739.7	0	0.14
r109	11	1214.5	e	12	1201.5	1	-1.08	r209	3	855.0	f	3	943.7	0	10.38
r110	10	1174.5	a	11	1118.2	1	-4.79	r210	3	966.3	c	3	950.9	0	-1.59
r111	10	1104.8	e	11	1111.4	1	0.59	r211	2	923.8	e	3	791.2	1	-14.36
r112	10	953.6	d	10	1016.1	0	3.39	R2平均	2.73	954.51		3.00	950.6	0.27	-0.39
R1平均	12.00	1200.1		12.33	1246.1	0.33	3.66	c201	3	591.6	d	3	591.6	0	0
c101	10	828.9	b	10	849.6	0	2.50	c202	3	591.6	d	3	625.8	0	5.78
c102	10	828.9	b	10	957.5	0	15.51	c203	3	591.2	d	3	611.2	0	3.38
c103	10	828.1	d	10	870.3	0	5.10	c204	3	590.6	d	3	608.4	0	3.01
c104	10	824.8	d	10	850.4	0	3.11	c205	3	588.9	d	3	588.9	0	0
c105	10	828.9	d	10	828.9	0	0	c206	3	588.5	d	3	588.5	0	0
c106	10	828.9	b	10	838.1	0	1.10	c207	3	588.3	d	3	588.3	0	0
c107	10	828.9	b	10	841.2	0	1.48	c208	3	588.3	d	3	588.3	0	0
c108	10	828.9	b	10	828.9	0	0	C2平均	3.00	589.9		3.00	598.9	0.00	1.52
c109	10	828.9	d	10	828.9	0	0	rc101	14	1669.0	f	15	1671.0	1	0.12
C1平均	10.00	828.4		10.00	854.9	0.00	1.52	rc102	12	1554.8	e	13	1544.5	1	-0.66
rc101	14	1669.0	f	15	1671.0	1	0.12	rc103	11	1110.0	f	11	1302.4	0	17.33
rc102	12	1554.8	e	13	1544.5	1	-0.66	rc104	10	1135.8	d	10	1158.5	0	2.00
rc103	11	1110.0	f	11	1302.4	0	17.33	rc105	13	1643.4	e	13	1698.2	0	3.34
rc104	10	1135.8	d	10	1158.5	0	2.00	Rc106	11	1448.3	e	12	1414.8	1	-2.31
rc105	13	1643.4	e	13	1698.2	0	3.34	rc107	11	1230.5	e	11	1261.9	0	2.55
Rc106	11	1448.3	e	12	1414.8	1	-2.31	Rc108	10	1139.8	e	10	1174.4	0	3.03
rc107	11	1230.5	e	11	1261.9	0	2.55	RC1平均	11.50	1366.5		11.88	1406.0	0.37	3.34
Rc108	10	1139.8	e	10	1174.4	0	3.03	總平均	7.25	1017.9		7.45	1039.7	0.20	2.10
RC1平均	11.50	1366.5		11.88	1406.0	0.37	3.34	總數	406			417			
總平均	7.25	1017.9		7.45	1039.7	0.20	2.10	RC2平均	3.25	1124.2		3.38	1135.4	0.12	1.30
總數	406			417				總數	406			417			

* 文獻來源：

- a. Chiang and Russell (1997)
- d. Rochat and Taillard (1995)

- b. Desrochers et al. (1992)
- e. Taillard et al. (1997)

- c. Liu and Shen (1999)
- f. Thangiah et al. (1994)

在六類例題中，車輛總數誤差均在0.37輛以下，平均為0.20輛；其中以C1及C2類表現最好，誤差均達到0輛，RC1類表現較差，誤差為0.37輛。總距離誤差均在3.66%以下，平均為2.10%；其中以R2類表現最好，誤差達到-0.36%，R1類表現較差，誤差為3.66%。各題最佳結果之路線圖，詳見本研究網站：<http://www.tem.nctu.edu.tw/~network/>。

(2) 本研究最佳結果與其他文獻方法之比較

表4比較數篇發表於國際文獻上之最佳結果與本研究之最佳結果，表中第一欄為各類例題代號、車輛總數及路線總距離，二至六欄分別為五篇文獻之結果，PB為Potvin and Bengo (1996)，CR-sa為Chiang and Russell (1996)，TAI為Taillard et. al. (1997)，CR-ts為Chiang and Russell (1997)，RNETS為Liu and Shen (1998)所用之方法，第七欄為本研究之最佳結果，表中每個欄位所包含的三個數字分別表示車輛總數(Fleet)，總距離(Cost)以及CPU執行時間(單位為分鐘)。表4下之附註為各方法之執行環境。

表4 本研究最佳結果與其他文獻方法之比較

Problem Set		PB ^a	CR-sa ^b	TAI ^c	CR-ts ^d	RNETS ^e	本研究 ^f
R1	Fleet	12.6	12.50	12.17	12.17	12.17	12.33
	Cost	1296.8	1308.82	1209.35	1204.19	1249.57	1246.36
	CPU	11.32	2.86	229.56	89.91	44.28	0.93
R2	Fleet	3.00	2.91	2.82	2.73	2.82	3.00
	Cost	1117.7	1166.42	980.27	986.32	1016.58	951.01
	CPU	39.44	3.93	337.2	101.92	6.64	1.34
C1	Fleet	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	Cost	838.8	909.8	828.38	828.38	830.06	854.89
	CPU	10.02	2.19	243.83	10.74	22.01	0.66
C2	Fleet	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	Cost	589.9	666.3	589.86	591.42	591.03	598.85
	CPU	41.37	2.46	272.92	24.01	3.59	1.79
RC1	Fleet	12.1	12.38	11.50	11.88	11.88	11.88
	Cost	1446.2	1473.9	1389.22	1397.44	1412.87	1405.95
	CPU	11.22	2.57	187.73	47.37	30.46	0.86
RC2	Fleet	3.4	3.38	3.38	3.25	3.25	3.38
	Cost	1360.6	1393.7	1117.44	1229.54	1204.87	1135.37
	CPU	35.57	3.58	193.27	64.43	7.12	2.26
車輛總數		422	422	416	411	412	417
總距離		62579.1	64995.9	57522.8	58502.4	59317.9	58232.8

a. SUN SPARC10 workstation ; b. 486DX2/66 PC ;
c. SUN SPARC10 workstation ; d. Pentium-166 PC ;
e. HP-9000/720 workstation ; f. Pentium pro-180 PC。

表4顯示車輛總數方面，本研究為417輛，次於CR-ts、RNETS及TAI，優於PB及CR-sa；總距離方面，本研究為58232.8，僅次於TAI之57522.8，優於PB、CR-sa、CR-ts及RNETS。R1類問題中，本研究之平均車輛數優於PB及CR-sa，距離成本優於PB，CR-sa及RENT；R2類本研究之平均車輛數與PB相同，距離成本則優於所有其他方法；C1及C2類問題中，本研究之平均車輛數與其他方法相同，距離成本優於CR-sa；RC1類問題，本研究之平均車輛數僅次於TAI，與CR-ts及RENT相同，距離誤差%僅次於CR-ts與TAI；RC2類問題，本研究之平均車輛數次於CR-ts及RENT，距離成本僅次於TAI。就執行時間來看，本研究在六類問題之平均執行時間皆明顯少

於所有其他方法，雖然影響執行時間之因素包括測試環境、資料結構等等眾多因素，但仍然可以感受到本研究相較於其他方法在執行速度上的優越性。

以總車輛數與總距離兩績效目標為XY軸，將各文獻方法之結果與本研究最佳結果繪製成績效比較圖5，越接近左下角表示解題績效越好。由圖中可看出，TAI與CR-ts兩文獻之解題績效優於其他文獻，其中CR-ts之總車輛數目標優於TAI，而TAI之總距離目標優於CR-ts，兩者互有優劣。其次為RNETS與本研究最佳結果，RNETS在總車輛數目標上優於本研究最佳結果，但在總距離目標上，則本研究最佳結果優於RNETS，兩者互有領先。再其次為PB，而離左下角最遠者為CR-sa。

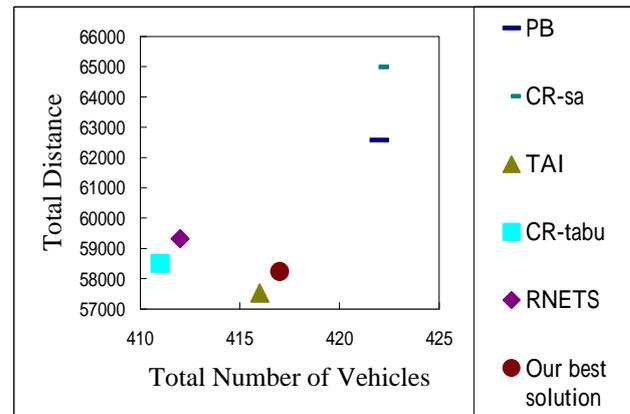


圖5 各文獻方法之績效比較圖

四、結論與討論

TA與GDA為新近發展之巨集啟發式方法，本研究首次將其應用於求解VRPTW問題，包括對TA與GDA控制參數進行敏感度分析，及兩階段模組的設計與測試，最後並比較本研究最佳結果與國際文獻結果。本研究之主要成果與發現如下：

- (1) 在本研究設定之參數範圍內，GDA法之解題績效優於TA法；與G1及G2兩種巨集模組結合，則分別以G1(TA)與G2(GDA)之績效較佳。
- (2) 參數敏感度測試結果顯示，較適之參數範圍如下：G1(TA)之起始門檻比率(T_0)為1.3%至1.9%、門檻數列長度(K)為60至90；G2(GDA)之下降速度d值為0.006至0.01。
- (3) 兩階段模組測試結果顯示，兩階段模組能夠改善單一階段模組之總距離誤差，但車輛總數誤差則無顯著改善。
- (4) 本研究之最佳結果：56個例題之平均車輛總數誤差為0.20輛，平均總距離誤差為2.10%。其中，有一題(r210)優於文獻已知最佳結果，有八題與文獻已知最佳結果相同，另有八題之車輛數誤差多一輛，但路線距離低於已知最佳解。
- (5) 與其他五種文獻方法比較：解題精確度(車輛總數與總距離)方面，以CR-ts與TAI為最佳、其次為本研究與RNETS、再其次為PB、最後為CR-sa。

在後續研究方向與建議方面，本研究發現TA與GDA應用於有時間窗限制之問題時，不如其在無時間窗車輛

路線問題的效果佳[陳國清 (1998)、Han & Cho (1999)]，尤其在車輛總數方面，無法有突破性的發展。後續研究應加強減少車輛數的機制設計，並著重其他鄰域搜尋模組之應用；在廣度化搜尋方面亦可參考其他巨集啟發式方法，例如[韓與卓 (1999)]。

五、重要參考文獻

申生元 (1999)，*時窗限制車輛途程問題*，交通大學工業工程與管理系博士論文。

林修竹 (1999)，*包容性啟發式解法在VRPTW問題之應用*，交通大學運輸工程與管理學系碩士班碩士論文。

陳國清 (1998)，*GDA與RRT啟發式解法在VRP問題上之應用*，交通大學交通運輸研究所碩士論文。

韓復華、卓裕仁 (1999)，*混合型AI啟發式解法在週期性車輛路線問題(PVRP)之應用*，行政院國家科學委員會委託研究報告(NSC-88-2218-E-009-036)。

韓復華、林修竹 (1999)，「TA與GDA巨集啟發式解法在VRPTW問題上之應用」，*中華民國第四屆運輸網路研討會論文集*，83-93頁。

韓復華、卓裕仁、陳國清 (1999)，「五種巨集啟發式方法在VRP問題上的應用與比較」，*中華民國第四屆運輸網路研討會論文集*，72-82頁。

Chiang, W. and R. Russell (1996), "Simulated Annealing Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Annals of Operations Research* 63, 3-27.

Chiang, W. and R. Russell (1997), "A Reactive Tabu Search Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Inform Journal of Computing* 9(4), 417-430.

Desrochers, M., J. Desrosiers and M. Solomon (1992), "A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Operations Research* 40(2), 342-354.

Dueck, G. and T. Scheuer (1990), "Threshold Accepting: A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing," *Journal of Computational Physics* 90, 161-175.

Dueck, G. (1993), "New Optimization Heuristics: The Great Deluge Algorithm and the Record-to-Record Travel," *Journal of Computational Physics* 104, 86-92.

Fisher, M. K. Jornsten and O. Madsen (1997), "Vehicle Routing with Time Windows: Two Optimization

Algorithms," *Operations Research* 45(3), 488-492.

Han, A.F. & Y. Cho (1999), "A New Meta-heuristic Approach to the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem," *Journal of EASTS* 3(5), 255-269.

Liu F. and S. Shen (forthcoming), "A Route-Neighborhood-Based Metaheuristic for Vehicle Routing Problem with Time Windows," *European Journal of Operational Research*.

Kohl, N. and O. Madsen (1997), "An Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Lagrangian Relaxation," *Operations Research* 45(3), 395-406.

Potvin, J. and J. Rousseau (1993), "A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows," *European Journal of Operational Research* 66, 331-341.

Potvin, J., T. Kervahut, B. Garcia. and J. Rousseau (1996), "The Vehicle Routing Problem with Time Windows Part I: Tabu Search," *Inform Journal on Computing* 8(2), 158-164.

Potvin, J. and S. Bengio (1996), "The Vehicle Routing Problem with Time Windows Part II: Genetic Search," *Inform Journal on Computing* 8(2), 165-172.

Rochat, Y., and E. Taillard (1995), "Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing," *J. Heuristics* 1, 147-167.

Russell, R. (1995), "Hybrid Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Transportation Science* 29(2), 156-166.

Solomon, M. (1984), *Vehicle routing and Scheduling with Time Window Constraints: Models and Algorithms*, Ph.D. Dissertation, University of Pennsylvania.

Solomon, M. (1987), "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time window Constraints," *Operations Research* 35(2), 254-265.

Taillard, E., P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin and J. Potvin (1997), "A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows," *Transportation Science* 31(2), 170-186.

Thangiah, S., I. Osman and T. Sun (1994), *Hybrid Genetic Algorithms, Simulated Annealing and Tabu Search Methods for Vehicle Routing Problems with Time Windows*, Technical Report UKC/OR94/4, Institute of Mathematics & Statistics, University of Kent, Canterbury, UK.