

考慮護運風險下保全運鈔車路線與 排程模式暨演算法之研究¹

A MODEL WITH AN ALGORITHM FOR CASH TRANSPORTATION VEHICLE ROUTING AND SCHEDULING PROBLEMS CONSIDERING CONVEYANCE RISKS

顏上堯 Shang-Yao Yan²

盧宗成 Chung-Cheng Lu³

徐鶴倫 Guan-Lun Hsu⁴

(102 年 12 月 2 日收稿，103 年 3 月 31 日第 1 次修改，104 年 3 月 15 日定稿)

摘 要

為協助保全業者規劃有效且安全的運鈔車路線與排程，本研究應用時空網路流動技巧，描述運鈔車在需求點間之時空移動情形，以建立營運成本與風險成本最小化之運鈔車路線與排程模式。研究中由具運鈔經驗的專家協助建立風險因素層級架構，採用層級分析法決定各項風險因素權重，再配合各項風險因素估計值，計算風險成本，並將其反映在所建立的模式中。由於此模式可定式為多元商品網路流動問題，屬 NP-hard，因此本研究發展一啟發式演算法以有效地求解模式。為評估模式及演算法之實用績效，本研究根據國內一家保全公司的營運資料產生測試範例並進行求解與分析。

-
1. 本研究承科技部專題計畫(MOST-101-2221-E-008-098-MY2)補助，特此致謝。作者亦感謝二位審查委員提供寶貴的修正意見，使本文更為嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授。
 3. 國立臺北科技大學工業工程與管理系教授 (聯絡地址：106 臺北市忠孝東路 3 段 1 號 臺北科技大學工業工程與管理系；E-mail：jasonclu@gmail.com)。
 4. 國立中央大學土木工程學系碩士。

此外，本研究亦將求解結果與文獻中所發展之運鈔車路線與排程模式結果比較，測試結果顯示本研究之模式優於過去文獻中之模式，應可為實務應用之參考。

關鍵詞：運鈔車；車輛路線與排程；風險成本；時空網路；多元商品網路流動問題

ABSTRACT

This research utilizes the time-space network flow technique to describe the potential movements of cash transportation vehicles among all demand points in the time and space dimensions and develops a cash transportation vehicle routing and scheduling model which minimizes both operating cost and risk cost in order to help security carriers plan efficient and safe cash conveyance routes and schedules. The Analytical Hierarchy Process method is employed to determine the weights of a set of risk factors identified by cash transportation experts. The risk cost of cash transportation, which is computed based on the weights and the estimates of those risk factors, is then incorporated into the proposed model. Because the model can be formulated as a multi-commodity network flow problem, which is characterized as NP-hard, this study develops a heuristic to efficiently solve the model. The model and algorithm are solved and analyzed using a problem instance generated from operational data provided by a domestic security carrier. We also compare our model results with the results of a model presented in the literature. The case study results demonstrate that our model with a solution algorithm outperforms the previous model and could be a useful reference for security carriers in actual practice..

Key Words: *Cash transportation vehicle, Vehicle routing and scheduling, Risk cost, Time-space network, Multiple commodity network flow problem*

一、前言

臺灣自 1989 年開放民間設立新銀行，統計至 2013 年，屬於臺灣本國之銀行共計有 40 家，而外國銀行則有 30 家，若包含郵局、縣市鄉鎮農漁會、合作社等，則臺灣至少有近百家的金融機構。這些金融機構為了便利民眾取款，近年來開始於便利商店、超級市場、大賣場、醫院、車站等地區設置提款機。然而，數量龐大的銀行及其各地分行與提款機卻也增加了現金運輸的需求。一般金融機構通常將運鈔作業委外交由保全公司負責，但是大量且頻繁的現金運輸需求可能會導致現金護運過程中遭遇搶劫的風險提高。例如從 2000 年至 2013 年期間，國內運鈔車在護運作業過程中遭遇搶劫事件就高達 30 件之多（資料來源：內政部警政署）。

雖然各家保全公司皆致力於提升運鈔人員的素質與運鈔車的裝備，以減少運鈔車遇搶的損失，但是透過改善運鈔車護運路線與排程規劃來降低營運成本與護運作業過程遭搶的風險，卻是相對缺乏重視的一個重要環節；目前大多數的保全公司仍是根據經驗法則，以人工方式決定護運路線與排程，較缺乏效率，且未完整考慮護運過程中的各種風險因素。為了提供保全業者在每日運鈔車護運路線與排程規劃之決策參考，本研究將針對保全運鈔車路線與排程最佳化問題發展數學規劃模式與求解演算法，模式中之最佳化目標除了運鈔作業的固定與變動成本外，亦將考慮護運過程中之各種可能的風險因素與其風險成本。

目前文獻中有關運鈔車護運路線與排程問題的相關研究很少。江文毅^[1]運用多目標決策路網模式，考慮不同需求點所面臨環境條件之差異，產生可行駛之路網資訊與禁止使用之道路資訊，從而規劃出最適的行駛路線，使得保全公司管理者於每次護運保全之任務中，可以隨時決定不同之行駛路線。為了避免規劃之護運作業路線與之前的路線有過高的重複性，而被歹徒掌握護運路線進行搶劫，Yan 等人^[2]提出具有時空相似度限制之運鈔車路線與排程模式，使當日規劃之路線能與先前所規劃之路線與抵達服務需求點的時間有所差異，以提升運鈔車護運作業的安全性。Yan 等人^[3]延伸 Yan 等人^[2]之模式以考量隨機旅行時間，並提出啟發式演算法求解隨機最佳化模式。雖然上述的文獻藉由時空相似度之限制能夠降低護運路線之重複性，但卻無法整體反映其它可能影響護運作業之風險因素；實務上，運鈔車護運過程作業之安全性受許多外在環境因素所影響，例如：紅綠燈數量、區域人口密度與安全作業區等。因此，為了能夠有效反映運鈔車護運過程的各項風險因素，本研究提出將路段 (link) 風險成本量化，並納入所發展模式的目標函數中進行求解。類似的方法曾被應用於危險物品運送 (hazardous materials transportation) 路線問題的相關研究中 (如 Erkut 與 Verter^[4]；Erkut 等人^[5])。在評估危險物品運送的風險時，通常必須決定危險物品在路段運送時發生意外或是逸散的機率 (probabilities)，以及發生意外或是逸散的後果 (consequences)，再將此風險評估的結果量化為路段風險成本，以求解總風險成本最低的危險物品運送路線。

本研究從保全業者之立場，以系統成本最小化為目標，利用時空網路流動技巧，以零壹整數流動方式定式各運鈔車於時空中之移動，再考量各服務需求點僅被服務一次與節點流量守恆限制式，建立運鈔車路線與排程最佳化模式。值得一提的是，時空網路流動之技巧已被廣泛應用於許多不同領域，例如 Yan 與 Chen^[6]利用多重時空網路描述人旅次流動與車輛流動，並以此構建一整合旅次需求與班次供給之長途客運業者車隊排程模式；Yan 與 Tseng^[7]建構多重時空網路來描述人旅次流動與飛機流動，再以數學規劃方法構建一直接整合旅次需求與航次供給之多機種多停靠飛航排程模式；Kliwer 等人^[8]利用時空網路流動技巧發展多場站、多車輛型態之公車排程模；Yan 與 Chen^[9]利用時空網路流動技巧，考量航空客運業者的聯盟行為，發展數個飛航排程模式及求解演算法。

不同於以往相關文獻中藉由時空相似度限制來避免產生重複性過高之運鈔車路線，以降低護運過程中遇搶的風險，本研究將護運過程中的風險透過成本的方式反映在所建立的模式中，藉由模式求解，得到營運成本與風險成本最低的運鈔車路線與排程。在風險成本

估計方面，本研究首先分析運鈔車護運作業的各項風險因素，經由訪談具護運經驗之人員、保險人員與運輸領域之學者建構護運作業風險因素層級架構。由於該層級架構複雜，需要以一具系統性、科學性的方法來評估層級架構中的各項風險因素，故本研究透過專家問卷調查，利用多準則決策分析法中的層級分析法 (analytical hierarchy process, AHP) 計算護運作業風險因素層級架構中兩個主要構面 (護運路段風險與滯留作業風險) 下各項風險因素的之權重，且由決策分析相關文獻與護運作業環境之現況，發展護運作業各項風險因素之估計方法。接下來，將各項風險因素權重值與風險因素估計值相乘後加總，得到風險效用值，再以風險管理理論中之方法將風險效用值量化為風險成本，納入本研究所建構之運鈔車路線與排程模式中之成本項中，求解兼顧營運成本與風險成本的運鈔車護運路線與排程規劃。

本研究所建立之運鈔車路線與排程模式為一多元商品 (multi-commodity) 整數網路流動問題，屬於 NP-hard 問題 (Garey 與 Johnson^[10])。當面臨大型實務問題時，難以在合理時間內求得精確解 (exact solutions)，因此本研究發展啟發式解法並配合數學規劃軟體 CPLEX 加以求解。為了評估模式與演算法之實用績效，本研究根據國內一保全公司 (簡稱為 S 保全公司) 在中壢服務區的營運資料產生測試範例並進行求解與分析；此外，亦將求解結果與文獻中所發展之運鈔車路線與排程模式 (Yan 等人^[2]) 之結果比較，探討考慮時空相似度限制之模式與考慮路段風險成本之模式兩種不同模式的差異。

本文的架構如下。第二節介紹運鈔車車流時空網路與運鈔車路線與排程最佳化模式，第三節描述運鈔車護運作業風險評估層級架構，利用層級分析法決定風險因素權重，以及風險效用與風險成本計算方式，第四節介紹本研究所發展之啟發式演算法，第五節展示實際範例測試結果，以及與文獻中運鈔車路線與排程模式比較之結果，第六節提出本研究之結論與建議。

二、保全運鈔車路線與排程模式

本研究從保全公司運鈔車護運路線規劃決策者的觀點，運用時空網路流動技巧與數學規劃方法建立運鈔車護運路線與排程模式。此數學規劃模式考慮運鈔車在確定性旅行時間的情況下，以系統成本最小化為目標，除了考量運鈔車護運作業之營運成本外，亦考慮經過評估之護運風險成本。本節分別描述運鈔車路線與排程模式之基本假設、時空網路架構與數學模式。

2.1 模式基本假設

為便於模式之構建與界定模式使用上的限制，本研究對運鈔車路線與排程模式作以下的基本假設。

1. 保全公司以系統成本最小化為目標

系統成本考量運鈔車護運作業之固定成本、變動成本與風險成本。固定成本包括薪資成本、裝備與耗材成本及其他雜項成本。變動成本是運鈔車之移動成本，包括油料成本及維修與折舊成本。風險成本反映行駛於護運路段之風險與在服務需求點作業滯留之風險；風險之評估與風險成本計算將於第三節中加以說明。上述之固定成本、變動成本與風險成本皆可依保全公司決策單位之需求與實際道路之情況進行調整。

2. 各服務需求點之位置、作業時間及服務時窗已知且固定

在實際營運中，保全公司決策單位於營運規劃前一日事先得知當日現金護運之地點、作業時間及時窗，用於指派運鈔車護運作業路線與其所服務之需求點，故本研究假設各服務需求點之位置、作業時間及服務時窗為已知之固定值。

3. 運鈔車在各路段行駛時間已知且固定

運鈔車在任兩個服務需求點間的路段旅行時間可以由歷史資料估計得知（實務上一般取平均值），故假設運鈔車在各路段行駛時間已知且固定，不考慮隨機旅行時間。

4. 每一條護運作業路線僅由一輛運鈔車進行護運作業服務

護運作業之路線由保全公司之決策單位指派運鈔車進行服務，每輛運鈔車皆有各自之服務需求點與行駛路線，且服務需求點不得重複，因此本研究假設每一條護運作業路線由一輛運鈔車進行護運作業服務。

5. 車隊規模已知

本研究假設運鈔車之車隊規模為已知；實務上，保全公司運鈔車的數量依各地營業所負責之服務地區範圍大小與服務需求點的多寡而有所不同。

6. 不考慮保全人員於運鈔車護運作業時之午餐時間

實務上，保全人員於運鈔車護運作業時皆於服務完指派之服務需求點後直接返回地區營業所，若遇中午吃飯時間則輪流於運鈔車內用餐，故本研究不考慮保全人員於運鈔車護運作業時之中午吃飯時間。

7. 不考慮保全人員監守自盜之事件發生

運鈔車搶案發生之情況大致上可分為行駛過程遇搶、在服務需求點滯留作業時遇搶、保全公司人員監守自盜等；本研究不考慮保全人員監守自盜之事件。

2.2 運鈔車車流時空網路

本研究運鈔車路線與排程時空網路之設計如圖 1 所示 (Yan 等人^[2]), 共有 N 層時空網路 (N 為車隊規模), 每一層網路用來描述一輛運鈔車在時空中之移動, 橫軸代表各服務需求點之空間分佈, 而縱軸為時間軸, 其時間軸長度為運鈔車護運總分析時間, 每一節點間距為 10 分鐘 (數值實驗結果顯示, 若為 5 分鐘會大幅度增加模式之規模, 若為 15 分鐘則會使求解精確度降低; 決策單位未來使用此模式時, 可權衡求解精確度與效率, 依實際需求情況進行調整)。

時空網路中包含節點及節線二要素。節點代表某一服務需求點於某一時間之時空點, 節點上之供給及需求量分別代表進入或流出此節點的車輛數。節點可區分為發車節點、匯集節點及服務需求點之節點 3 種。發車節點與匯集節點為運鈔車護運作業之起迄點, 代表地區總行。實務上, 運鈔車從發車節點出發進行相關護運任務, 護運任務結束後隨即返回匯集節點。服務需求點則為保全公司有需求之客戶端 (如銀行、提款機、簽訂契約之公司行號等)。由於運鈔車之路線是以發車節點為起站, 故將發車節點之供給量車輛數設定為 1, 於營運結束後返回至匯集節點, 故將匯集節點之需求量車輛數設定為 1, 其餘服務需求節點皆屬於轉運點, 並無供給及需求量。時空網路中之節線代表兩時空點間車輛之流動, 節線流量代表通過該節線之車輛數, 節線又可細分為發車節線、旅行節線、匯集節線、滯留節線與不服務節線, 分別說明如下。

1. 發車節線

此類節線連接發車節點 (地區總行) 與服務需求點。節線流量上限為 1, 下限為 0。此類節線成本包括運鈔車固定成本, 從地區總行至各服務需求點間之移動成本 (變動成本), 再加上風險成本 (護運路段與滯留作業風險成本)。

2. 旅行節線

此類節線連接兩個不同服務需求點的時空點, 表示車輛於不同服務需求點間之移動情形。節線流量上限為 1, 下限為 0。節線時間包含運鈔車旅行時間與滯留作業完成時間, 節線成本為運鈔車於服務需求點間之移動成本與風險成本。當運鈔車流過服務需求點時, 表示此區之護運作業已完成。

3. 匯集節線

此類節線連接服務需求點與匯集節點 (地區總行)。節線流量上限為 1, 下限為 0。此類節線成本包括運鈔車從服務需求點回到地區總行間之移動成本與風險成本。

4. 滯留節線

此類節線連接同一個服務需求點在不同時間之時空點, 表示運鈔車在某一服務需求點等待服務時間窗開始而停留一段時間。節線流量上限為 1, 下限為 0。節線成本為運鈔車停留在該服務需求點之風險成本。

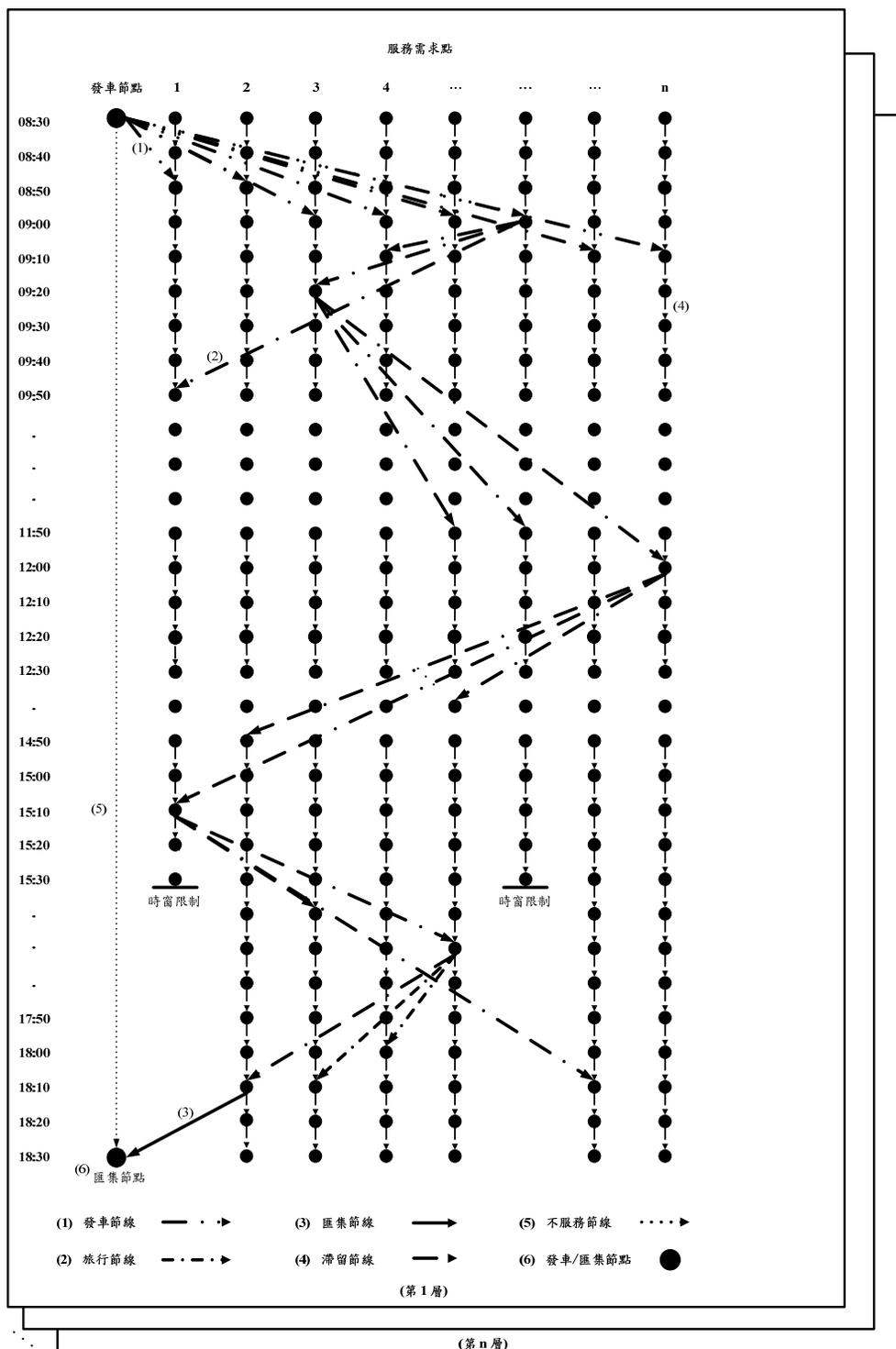


圖 1 運鈔車路線與排程時空網路圖

5. 不服務節線

此類節線連接同一層網路中之發車節點與匯集節點，用以判斷該層網路中是否有運鈔車流入，節線流量上限為 1，下限為 0；若節線流量為 1，表示該層網路無運鈔車流入（即此運鈔車不進行服務），若節線流量為 0，表示該層有運鈔車流入。此類節線成本為 0。

2.3 運鈔車路線與排程模式

1. 符號說明

集合

SP^n 第 n 層網路中所有節點之集合。

SK^n 第 n 層網路中所有節線之集合。

W_d^n 第 n 層網路中所有進入服務需求點 d 的節線（包含發車節線、旅行節線與匯集節線）之集合。

D 所有服務需求點之集合。

N 所有車流網路層之集合。

參數

p_{ij}^n 第 n 層網路中節線 (i, j) 之成本。

q_i^n 第 n 層網路中節點 i 之供給或需求量。

變數

x_{ij}^n 第 n 層網路中節線 (i, j) 之流量。

2. 數學模式

$$\text{Minimize } \sum_{n \in N} \sum_{(i,j) \in SK^n} p_{ij}^n x_{ij}^n \quad (1)$$

限制式

$$\sum_{j \in SP^n} x_{ij}^n - \sum_{k \in SP^n} x_{ki}^n = q_i^n, \quad i \in SP^n, n \in N \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{(i,j) \in W_d^n} x_{ij}^n = 1, \quad \forall d \in D, \quad (3)$$

$$x_{ij}^n = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j \in SP^n, n \in N. \quad (4)$$

此運鈔車護運路線與排程模式為一多元商品整數網路流動問題，目標式 (1) 為最小化護運之總成本，包括固定成本、變動成本與風險成本，而路線成本 p_{ij}^n 可以下式表示：

$$P_{ij}^n = FC_{ij}^n + VC_{ij}^n + TC_{ij}^n \quad (5)$$

其中， FC_{ij}^n 、 VC_{ij}^n 、 TC_{ij}^n 分別表示第 n 層網路中節線 (i, j) 的固定成本、變動成本與風險成本。在運鈔車車流時空網路中，發車節線成本包括固定成本、變動成本與風險成本，旅行節線成本則包括變動成本與風險成本。風險成本的計算將於第 3 節中說明。限制式 (2) 為車流網路中節點之流量守恆限制式，限制式 (3) 表示任一服務需求點恰被服務一次，限制式 (4) 為零壹變數之限制式。

三、運鈔車護運作業風險評估與風險成本計算

本研究根據文獻回顧與專家訪談結果構建運鈔車護運作業時所面臨之風險因素層級構面，再藉由訪問具運鈔車護運作業經驗之人員、保險人員與交通運輸領域之學者，完成專家問卷調查，利用 Saaty^[11] 提出的層級分析法決定運鈔車護運過程之風險因素權重值，並利用效用估計法得到護運作業各項風險因素之估計值，最後，以風險管理中之機率統計法量化出各項風險因素之風險成本；所得到之風險成本將用於前一節所述之運鈔車護運作業排程模式中。

3.1 運鈔車護運作業風險評估架構

本研究透過回顧運鈔車護運作業之相關文獻及訪問保全公司決策單位的結果，彙整出在護運作業上所面臨之風險因素以作為評估準則，此評估準則之層級架構如圖 2 所示，分成兩個構面：護運路段風險與滯留作業風險，與 8 項評估準則。本研究針對所構建之層級構面設計出專家問卷，專家問卷發放的對象包括保全／保險公司運鈔車路線規劃人員、具有(當地)運鈔車護運實際經驗人員(保全員)、以及交通領域學者，這些專家除了非常了解當地各護運路段之道路與風險狀況外，對於運鈔車滯留作業的各種風險亦相當熟悉，因此能夠對於各種風險因素給予適當的權重。經整理問卷回收結果與統計分析後，利用層級分析法計算出各層級要素間之相對重要性，以作為護運作業中各項風險因素的權重值 (Forman 與 Gass^[12])。由 AHP 法所求得之權重的適用期間可由保全公司的決策者所決定，若是運鈔車護運作業風險因素估計值有所調整，則可以重新發放專家問卷，再利用 AHP 法求得新的一組權重值，代入模式中重新求解運鈔車路線。

(一) 護運路段風險

是指派運鈔車行駛在路段上之風險因素，此構面共包括紅綠燈數量、路段反應時間、路段人口密度、路段重複性、運送距離等 5 項風險因素。

1. 紅綠燈數量：運鈔車在停等時遭受搶劫之風險相對高於行駛狀況下，故當運鈔車越常處於紅燈停等狀況，被搶劫之風險也較高。

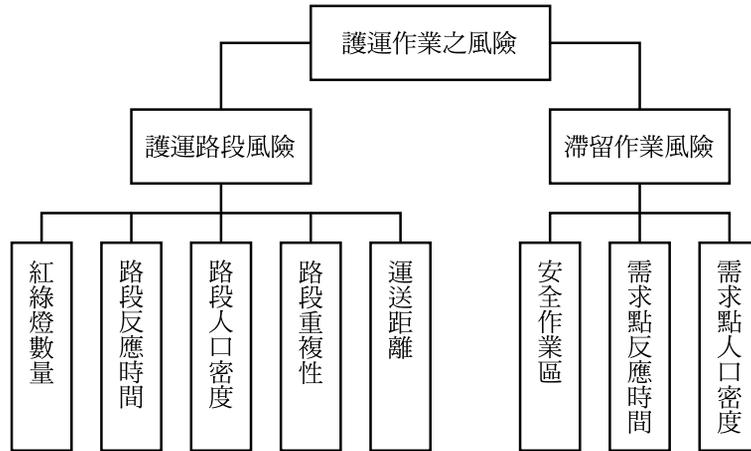


圖 2 運鈔車護運作業風險評估架構圖

2. 路段反應時間：指運鈔車行駛過程中若遭遇到歹徒搶劫，而警方收到報案，派遣警力到達案發現場之反應時間，通常反應時間越長，風險越高。
3. 路段人口密度：指運鈔車行駛路段上所經過區域之人口密度，本研究以里作為區域人口密度單位；當運鈔車行經路段之區域人口密度越低，通常表示此路段較偏僻，風險越高。
4. 路段重複性：指當日規劃之運鈔車護運路段與前一天（不包含周末假日）所規劃路段之路段重複程度。當路段重複性越高時，越容易被歹徒掌握路線，遭受搶劫的風險越高。
5. 運送距離：運鈔車行駛至各服務需求點間之路段距離；當運送距離越長，運鈔車在行駛過程中遭遇搶劫之風險越高。

(二) 滯留作業風險

指運鈔車抵達服務需求點後開始進行作業至作業完畢離開這段時間之風險，此構面包括安全作業區、需求點反應時間、需求點人口密度等 3 項風險因素。

1. 安全作業區：如果服務需求點設有安全作業區，運鈔人員在滯留作業時與外人有所隔離，其安全性相對高於無安全作業區。
2. 需求點反應時間：指服務需求點若遭遇歹徒搶劫，當警方收到報案，派遣警力到達案發現場之反應時間。
3. 需求點人口密度：指服務需求點所在區域之人口密度，本研究以里作為區域人口密度單位；當服務需求點所在位置之區域人口密度越低，通常表示其周圍環境越偏僻，風險越高。

3.2 風險因素權重值

本研究設計問卷，請受訪之專家將上述兩構面下的各層級要素進行兩因素間之重要性

比較。評估尺度可分為 5 個等級，分別為同等重要、稍重要、頗重要、極重要、絕對重要，其衡量值分別為 1、3、5、7、9；問卷詳細內容請參閱徐鶴倫^[13]。本研究訪查回收 25 份專家問卷（包括保險公司人員 5 份、具有運鈔護運經驗人員 10 份、交通運輸領域相關學者 10 份），刪除填答不完整的問卷後，利用統計軟體對每份問卷進行各層級的一致性檢定，若通過 AHP 之一致性檢定則為有效問卷，反之，則為無效問卷。經過一致性檢定後，共計有 13 份有效問卷，有效問卷數占總發放問卷數的 52%，包括保險公司專家 2 份、具運鈔護運經驗專家 5 份、交通運輸學者專家 6 份。關於 AHP 的樣本數，文獻中並沒有相關標準可供參考，但就一般的應用而言，專家問卷數量約在 10 到 20 份之間 (Satty^[14])，本研究的有效問卷數有 13 份，應在合理的範圍內。

接著以此 13 份有效問卷，計算出層級要素與整體層級之權重。分析結果如表 1 所示，在第一層級中護運路段風險構面權重值 0.56，滯留作業風險構面權重值 0.44，可見專家認為運鈔車進行護運作業受護運路段風險因素影響之程度高於滯留作業風險因素。在第二層級中，受訪者認為護運路段風險構面中最重要之風險因素為路段反應時間 (0.37)，其次依序為運送距離 (0.22)、路段重複性 (0.18)、路段人口密度 (0.13) 以及紅綠燈數量 (0.10)；在滯留作業風險構面的風險因素中以安全作業區 (0.58) 為最重要，其次為需求點反應時間 (0.26)、需求點人口密度 (0.16)。將第一層級構面之相對權重值與第二層級風險因素之相對權重值相乘可得到整體權重值，在 8 項要素準則中，以滯留作業風險構面的安全作業區 (0.26) 為相對最重要的要素，而紅綠燈數量 (0.06) 的相對重要性最低。

表 1 護運作業之風險因素權重值

構面	權重值	準則要素	個別權重值	排序	整體權重值	排序
護運路段風險	0.56	紅綠燈數量	0.10	5	0.06	8
		路段反應時間	0.37	1	0.21	2
		路段人口密度	0.13	4	0.07	6
		路段重複性	0.18	3	0.10	5
		運送距離	0.22	2	0.12	3
滯留作業風險	0.44	安全作業區	0.58	1	0.26	1
		需求點反應時間	0.26	2	0.11	4
		需求點人口密度	0.16	3	0.07	7

3.3 風險因素評估

本小節說明兩大構面下各項風險因素之評估方法。

(一) 護運路段風險構面

1. 紅綠燈數量：風險評估函數如下：

$$0 \leq \frac{TLQ}{TLQ_{MAX}} \leq 1, \quad (6)$$

其中， TLQ_{MAX} 為運鈔車行駛於各服務需求點間之護運路段所會經過的最大紅綠燈數量， TLQ 則為運鈔車行駛於某護運路段上所經過的紅綠燈數量。

2. 路段反應時間：風險評估函數如下：

$$0 \leq \frac{Pt + Rt}{Pt + Rt_{MAX}} \leq 1, \quad (7)$$

其中， Pt 為受理報案單位調派警力之時間， Rt 為派遣警力至案發地點之平均時間，估計方法為該護運路段起點至迄點每間隔 500 公尺設一評估點，計算出每一評估點發生搶案時，當地分局派遣警力抵達現場處理之時間，加總後除以評估點個數即為平均時間，而 Rt_{MAX} 為所有護運路段中，受理報案單位派遣警力至案發地點之最大平均時間。

3. 路段人口密度：依人口密度的多寡分為 4 個風險等級，並將風險等級正規化，計算出區域人口密度之風險估計值，如表 2 所示。

表 2 區域人口密度之風險估計值

人口密度 (人/km ²)	風險等級	風險估計值
1000 以下	4	1
1001~5000	3	0.75
5001~10000	2	0.5
10001 以上	1	0.25

而路段人口密度估計值計算如下：

$$AU = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n}, \quad (8)$$

其中， A_i 為護運路段中經過某一區域 i 之人口密度風險估計值， n 為運鈔車所經過之區域數量。

4. 路段重複性：本研究將當日所規劃路線排程之每一護運路段與前一日之各護運路段進行比對。首先根據兩個互相比較的路段的起迄服務需求點是否相同來決定路段空間相似度 ε 值，若兩路段起迄點皆相同，則 $\varepsilon = 1$ ，若僅有起點或迄點相同，則 $\varepsilon = 0.5$ ，若起迄點皆不相同，則 $\varepsilon = 0$ 。接著，根據兩路段抵達迄點服務需求點的時間差來決定 (抵達) 時

間相似度 β 值，例如抵達時間差在小於 30 分鐘，則 $\beta = 1$ ，30 分鐘以上但不到 60 分鐘，則 $\beta = 0.75$ ，60 分鐘以上但不到 90 分鐘，則 $\beta = 0.5$ ，90 分鐘以上，則 $\beta = 0.25$ 。最後，再將所得到的空間相似度估計值與時間相似度估計值相乘，計算出路段重複性之風險估計值。

5. 運送距離：風險估計函數如下：

$$0 \leq \frac{D}{D_{MAX}} \leq 1, \quad (9)$$

其中， D_{MAX} 為運鈔車行駛於各服務需求點間之最大運送距離， D 為某運護路段之運送距離。

(二) 滯留作業風險構面

1. 安全作業區：若服務需求點沒有提供與非相關運鈔人員隔離之安全作業區，則此區域風險估計值為 1；反之，此區域風險估計值為 0。

2. 需求點反應時間：風險評估函數如下：

$$0 \leq \frac{Pt + Rt}{Pt + Rt_{MAX}} \leq 1, \quad (10)$$

其中， Pt 為受理報案調派警力作業時間， Rt 為派遣警力至某案發地點之時間， Rt_{MAX} 為派遣警力到所有服務需求點（案發地點）中之最大時間。

3. 需求點人口密度：參考表 2，依人口密度的多寡分為 4 個風險等級，並計算出區域人口密度之風險估計值。

3.4 運鈔車護運路段風險成本

將每項風險因素權重值（3.2 節）與其風險因素估計值（3.3 節）相乘後，再全部加總，即可得到每個路段的風險效用估計值，如以下公式所示。

$$TU_{ij}^n = TR_{ij}^n + TP_{ij}^n = \sum_a W_{ij}^{n,a} R_{ij}^{n,a} + \sum_b W_{ij}^{n,b} P_{ij}^{n,b} \quad (11)$$

其中，

TU_{ij}^n ：第 n 層網路中節線 (i, j) 護運作業風險因素之效用值。

TR_{ij}^n ：第 n 層網路中節線 (i, j) 護運路段風險因素之效用值。

TP_{ij}^n ：第 n 層網路中節線 (i, j) 滯留作業風險因素之效用值。

$W_{ij}^{n,a}$ ：第 n 層網路中節線 (i, j) 之第 a 項護運路段風險因素之權重值。

$W_{ij}^{n,b}$: 第 n 層網路中節線 (i, j) 之第 b 項作業滯留風險因素之權重值。

$R_{ij}^{n,a}$: 第 n 層網路中節線 (i, j) 之第 a 項護運路段風險因素之估計值。

$P_{ij}^{n,b}$: 第 n 層網路中節線 (i, j) 之第 b 項作業滯留風險因素之估計值。

接下來參考風險管理中風險成本之概念，利用以下公式量化風險效用值為風險成本：

$$TC_{ij}^n = TU_{ij}^n \times \frac{LM \times MS}{T_q}, \quad (12)$$

其中，

TC_{ij}^n : 第 n 層網路中節線 (i, j) 護運作業風險因素之風險成本。

LM : 運鈔車路線規劃地區平均每年運鈔車被歹徒搶劫之總金額。

MS : 保全公司在規劃地區運鈔護運作業市場上占有率。

T_q : 保全公司在規劃地區平均每年服務旅次數。

本研究參考危險物品運送 (Erkut 等人^[5])、專案風險成本評估 (Carbone 與 Tippett^[15])、飛航安全風險管理 (Lee^[16]) 等相關文獻，將風險成本定義為風險發生的可能性 (possibility) 與風險的影響程度 (Impact) 的乘積。在式 (12) 中，參考前述文獻中應用模糊理論的方法，將等號右邊第一項的風險效用值視為風險發生的可能性，第二項為保全公司平均每趟運鈔車護運作業可能被搶劫的金額，作為影響程度，兩項相乘即為等號左邊的風險成本。經由式 (12) 計算所得之風險成本 TC_{ij}^n 將包含於式 (1) 中的節線成本 p_{ij}^n 中，作為第二節中所述保全運鈔車路線與排程模式的主要輸入資料之一。值得一提的是，本研究為簡化模式構建，故以 AHP 配合風險效用值轉換成機率方式以估計風險成本，未來亦可以其他方式來估計風險成本，而此可為未來的研究方向。

四、求解演算法

本研究之運鈔車護運路線與排程模式為一多元商品整數網路流量問題，屬於 NP-Hard 問題 (Garey 與 Johnson^[10])，當面臨大規模的實務問題時，難以在合理內使用套裝最佳化軟體 (例如 CPLEX) 求得精確解 (exact solutions)，故本研究依問題特性結合數學規劃軟體 CPLEX 發展一個啟發解法，以有效率地求解問題。此啟發解法將問題以切割時空網路時段長度與車流時空網路層數的方式縮小網路規模；在時段長度方面，將原本總時間長度分割為數個階段之方式，以分階段增加時段方式進行求解；時空網路層數方面，則先採用部分車輛進行求解，減少車流時空網路層數，並分階段增加車輛，直到所有服務需求點皆服務完成以及車輛數已達車隊規模時，即可求得啟發解。

本研究參考張佑璿^[17] 與 Yan 等人^[2] 的作法，將問題從時間軸分成三階段求解，也就是將原問題之完整時空網路依照預先選定的各階段的時段長度分割為 3 個小型時空網路，

依序在此 3 個時空網路上，每階段逐步增加車輛數以求解運鈔車路線與排程問題，求解某一階段之問題時須納入之前各階段的求解結果，直至三階段完成（所有服務需求點皆被服務），得到一個啟發解。演算法之詳細步驟說明如下。

步驟 1：設定資料參數

1. 決策者將時空網路從時間軸（平均）分割為三階段，設定各階段時空網路長度。
2. 設定每階段欲使用之車輛數。先用 CPLEX 求得第一階段的最佳解，以此最佳解中所使用之車輛數作為第一階段問題之車隊規模；第二階段問題之車隊規模設定為大於或等於第一階段之車輛數，第三階段問題則是以保全公司之總車輛數作為車隊規模進行求解。
3. 設定每階段問題中需服務之服務需求點數。最簡單的方法是將總服務需求點數除以 3，均分到三個階段的時空網路中；也可以觀察前面階段之模式的細部解，知道運鈔車在各階段已服務完成之服務需求點數，剩餘未完成之需求點作為之後各階段須服務之服務需求點。

步驟 2：建立第一階段車流時空網路並求解

1. 依前一步驟所設定的時間長度、使用車輛數與服務需求點數切割與構建出第一階段問題的時空網路。第一階段時空網路時間長度原為 8：30 至 11：40，於該時段內之所有發車節線、旅行節線、滯留節線及不服務節線均須建立，但其中於 11：20 出發之車輛最晚到達下一服務需求點的時間 12：00，因此網路長度將延長至 12：00。
2. 以 CPLEX 求解第一階段時空網路之運鈔車路線與排程問題。

步驟 3：建立第二階段車流時空網路並求解

1. 依步驟一所設定之時間長度、使用車輛數與服務需求點數切割與構建出第二階段問題的時空網路，第二階段時空網路時間長度為 8：30 至 15：00。
2. 讀入第一階段問題之求解結果，將所得之車輛路線與排程結果納入，亦即在第二階段問題中有一部分的運鈔車路線與排程是給定的。
3. 以 CPLEX 求解第二階段時空網路之運鈔車路線與排程問題。

步驟 4：建立第三階段車流時空網路並進行求解

1. 依步驟一所設定之時間長度、使用車輛數與服務需求點數切割與構建出第三階段問題的時空網路，第三階段時空網路時間長度為 8：30 至 18：30。
2. 讀入第一與第二階段問題之求解結果，將所得之車輛路線與排程結果納入，也就是在第三階段問題中有一部分的運鈔車路線與排程是給定的。
3. 以 CPLEX 第三階段時空網路之運鈔車路線與排程問題。

步驟 5：輸出所得之啟發解。

五、數值測試與分析

5.1 測試資料與參數

本研究參考吳銘偉^[18]與張佑璿^[17]以國內 S 保全公司之中壢服務區作為數值測試範例，相關測試資料包括運鈔車車隊規模 (5 輛)、服務需求點數目 (40 點) 及相關資料 (旅行時間、作業時間、服務時間窗)、護運作業成本資料 (固定與變動成本)，以及過去 1 週 (不包含假日) 的運鈔車路線資料等。在時空網路參數設定方面，因為車隊規模為 5 輛，故時空網路有 5 層，每層中以 8：30 至下午 18：30 為運鈔車護運作業排程規劃時間，時空網路節點間之時距為 10 分鐘。在此設定下之問題規模如表 3 所示：

表 3 運鈔車護運作業排程模式之問題規模

網路規模	
運鈔車護運作業排程時空網路個數	5
運鈔車護運作業排程時空網路節點數	12,202
運鈔車護運作業排程時空網路節線數	424,415
數學式規模	
變數個數	424,415
流量守恆限制式	12,202
額外限制式	40
零壹限制式	424,415

本文第二節中所述之時空網路的節線成本包含固定成本、變動成本與風險成本三大項。本研究透過訪談 S 保全公司運鈔車營運部門經理，蒐集相關營運資料，將運鈔車護運作業之固定成本分為薪資成本、裝備與耗材成本與其他雜項成本。在保全人員薪資方面，平均時薪為 180 元，每輛運鈔車護運作業時需 4 名保全人員進行護運作業服務，每天工作時間為 10 個小時；裝備與耗材成本方面，如表 4 所示，各保全裝備與耗材平均使用年限為 3 年，平均每天攤提約 800 元，所以固定成本為每輛車 8,000 元／每日。運鈔車護運作業之變動成本分為油料成本、維修與折舊成本。油料成本方面，95 無鉛汽油每公升 30 元，每輛運鈔車一公升可行駛 10 公里，運鈔車平均時速 30 公里。由於本研究以 10 分鐘為一時點，經換算後油耗成本為每分鐘 1.5 元，維修折舊成本資料由業者提供，每分鐘 3.5 元，所以變動成本為每車每分鐘 5 元。

表 4 保全裝備與耗材之成本

裝備與耗材	價格 (元/個)
防彈背心	20,000
車用 GPS	17,000
運鈔袋 (箱)	10,000
電擊棒 (槍)	5,000
對講機	4,000
甩棍	1,000
S 腰帶	400
鋼盔	200

在風險成本估算方面，風險因素權重值參考表 1。本研究的數值測試資料乃是以 S 保全公司中壢服務區的實際資料為基礎，除了少部分資料因為牽涉到保全公司的商業機密無法以真實資料進行測試，必須根據現況或是訪談保全公司決策者進行合理的假設，對於大部分的相關數據均盡可能採用實際資料進行測試。在護運路段風險估計方面，由於無法取得實際運鈔車的路線與抵達時間，因此在護運路段風險估計方面，參考保全業者的實務經驗，紅綠燈數量計算為假設運鈔車平均每行駛 100 公尺會通過 1 個紅綠燈；在路段反應時間上，派遣單位調派警力之作業時間設為 5 分鐘，派遣單位派遣警力至案發地點之時間，則設以 30 公里/小時作為警車於市區執勤作業之平均行駛速率去推估抵達案發地點之時間；路段人口密度之風險估計值參考表 2；路段重複性之估計值參閱 3.3 節所述之評估方式；運送距離估計值以中壢服務區中任意兩服務需求點最大護運距離，估計值設為 1，其餘護運距離依其相對比例，以決定各自估計值。在滯留作業風險方面，在安全作業區部分，當服務需求點為銀行，估計值設為 1，其餘皆設為 0；反應時間與人口密度風險估計方式與前述護運路段風險估計方式相同。

將所得之風險因素權重值與估計值代入式 (11) 求得風險效用估計值，再將此效用值代入式 (12) 求得風險成本。理論上，在式 (12) 中應該使用中壢地區的平均每年被搶劫金額與保全公司市占率資料。但是，在實務操作上，由於受限於商業機密與樣本數不足等原因，針對某一特定地區之平均每年運鈔車被搶劫之總金額、保全公司之市占率等資料非常不易取得。為了處理此一資料取得上的限制，本研究基於模式測試的出發點，且為了突顯運鈔車被搶劫的嚴重性，在數值測試中以臺灣地區過去 10 年平均每年運鈔車被搶劫金額來代替測試地區平均每年運鈔車被搶劫金額 ($LM = 9,000$ 萬)；此外，假設各地區保全公司市占率均勻且一致，使用臺灣地區的市占率資料來近似測試地區的保全公司市占率 ($MS = 50\%$)，以及 S 保全公司平均每年服務旅次 $T_q = 2,500$ 。將上述這些參數代入式 (12) 可得每趟服務旅次之風險成本約為 72 元。未來在實際應用本模式時，決策者可依當地的特性及本身確切的成本參數，精確地估算模式中相關的成本值，以使決策結果更為準確。

5.2 模式驗證

為了驗證第二節中所述之運鈔車路線與排程模式的正確性，本研究先進行小範例測試，將 S 保全公司中壢服務區的原始資料中選取 1 輛運鈔車與 10 個服務需求點 (包含 1 個銀行) 進行測試。營運時間為 8:30 至 15:10，10 分鐘為 1 時點，共 41 個時點，銀行之服務時窗為 8:30 至 12:30。因為問題規模較小，可由 CPLEX 軟體求得運鈔車路線與排程模式的最佳解，求解結果如表 5，細部解呈現於圖 3。此結果可以簡單的排列組合計算而驗證其正確性。

表 5 小範例測試之結果

運鈔車編號	1
服務需求點數	10
運鈔車護運作業之總時間 (分)	390
服務需求點之平均旅行加作業時間 (分)	39
運鈔車護運作業之系統成本 (元)	9,981
服務需求點之平均系統成本 (元)	998.1
運鈔車護運作業之風險成本 (元)	411
服務需求點之平均風險成本 (元)	41.1
運鈔車護運作業之營運成本 (元)	9,540
服務需求點之平均營運成本 (元)	954

5.2 實際範例求解結果

由於實際範例問題規模太大 (表 3)，無法在合理時間內 (例如 12 小時) 求得精確解，因此本研究利用第四節所述之啟發式演算法求解，以 C++ 電腦語言撰寫程式，結合 CPLEX 11.0 Callable Library 提供的 Solver，並於 INTEL (R) Core (TM) i7-2600CPU@3.40GHz、4.0GB 記憶體之個人電腦上執行運算。以啟發式演算法求解時，將 1 日的 61 個時點分成三階段，第一階段時點 1 至時點 20、第二階段時點 1 至時點 40 與第三階段時點 1 至時點 61，設定總求解時間限制為 1 小時，各階段上、下限之差距 (Gap, CPLEX 內部收斂間距參數) 設定為 1%。

本研究測試結果如表 6 所示，其中啟發解之目標值為 31,585 元。此目標值包含運鈔車護運作業之固定成本、變動成本與風險成本；求解時間為 87.23 秒 (Gap 小於 0.0001%)。若使用 CPLEX 求解，須使用 64,258.93 秒求得精確解，目標值為 31,483 元。啟發解與精確解之目標值間距為 0.32% ($= (31,585 - 31,363) / 31,363 \times 100\%$)，表示本研究之啟發式解法效果頗佳，可求得良好的近似最佳解，亦可大幅縮短求解時間。表 7 為範例測試之細部解結果表，結果顯示僅需使用 3 輛運鈔車即可服務所有服務需求點，各服務需求點平均的

旅行時間與作業時間加總皆在 40 分鐘以內，降低運鈔車於護運過程中遭遇搶劫的風險。在考慮系統成本最小化情況下，各輛運鈔車平均服務一需求點之風險成本約為 40 元，此成本為運鈔車在服務一個需求點時，受風險因素影響所產生之額外成本。

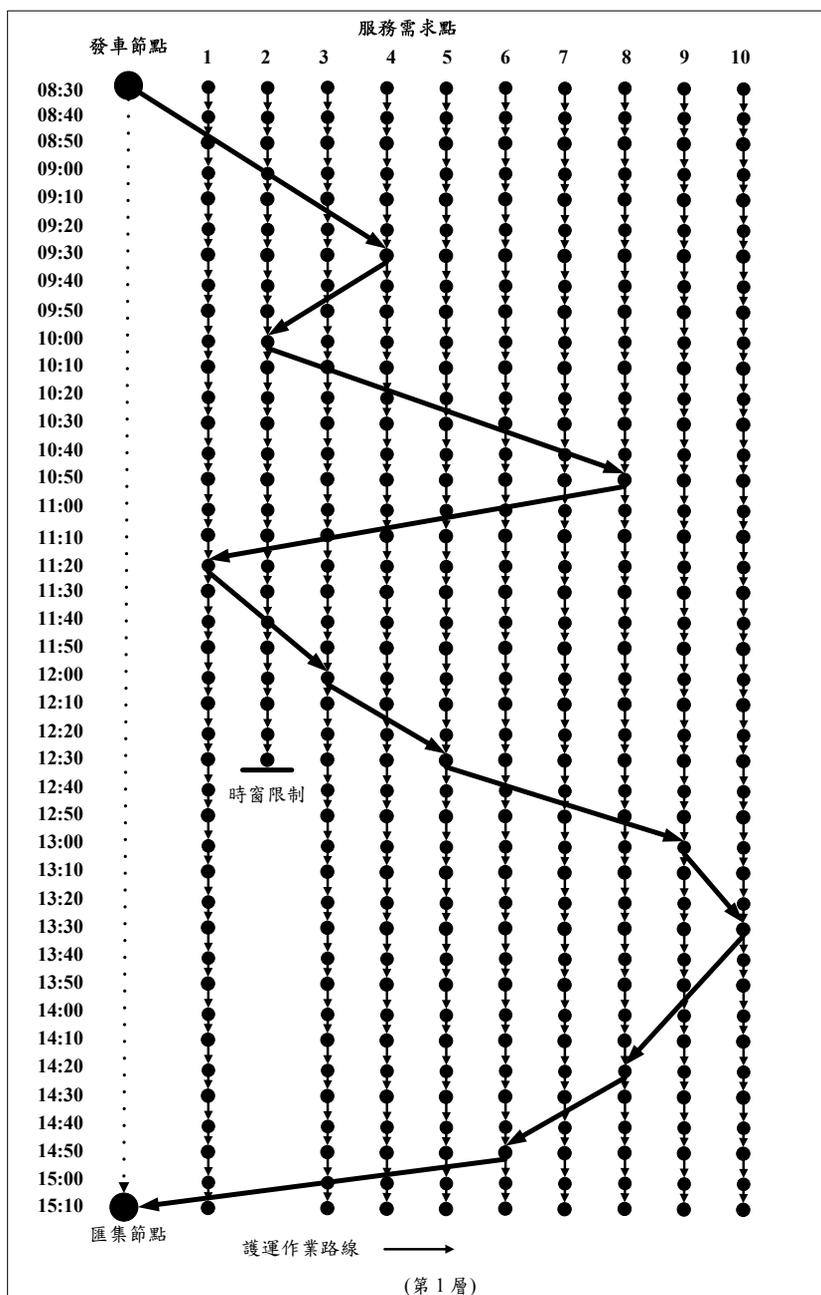


圖 3 小範例測試之細部解

表 6 運鈔車路線與排程模式之實際範例求解結果

啟發解目標值 (元)	31,585
啟發解求解時間 (秒)	87.23
CPLEX 最佳解目標值 (元)	31,483
CPLEX 最佳解求解時間 (秒)	64,258.93
啟發解與 CPLEX 最佳解之間距 (%)	0.32

表 7 運鈔車路線與排程模式之實際範例細部結果

運鈔車編號	1	2	3
服務需求點數	12	14	14
運鈔車護運作業之總時間 (分)	410	490	530
服務需求點之平均旅行與作業時間 (分)	34.17	35.00	37.86
運鈔車護運作業之系統成本 (元)	10,226	10,634	10,725
服務需求點之平均系統成本 (元)	852.17	759.57	766.07
運鈔車護運作業之風險成本 (元)	466	564	575
服務需求點之平均風險成本 (元)	38.33	40.29	41.07
運鈔車護運作業之營運成本 (元)	9760	10070	10150
服務需求點之平均營運成本 (元)	813.33	719.29	725.00

5.3 不同模式間之分析比較

為了比較本研究建立的模式與文獻中之模式，本研究針對以下 3 個運鈔車路線與排程模式進行實際範例之測試求解。

模式 1：本研究建立之考慮護運風險之運鈔車路線與排程模式；

模式 2：Yan 等人^[2]發展之具時空相似度限制之運鈔車護路線與排程模式；

模式 3：Yan 等人^[2]發展之模式，但不考慮時空相似度之限制。

模式 1 並無時空相似度之限制，而是將護運路段之重複性納入風險成本中考量；模式 2 則是以時空相似度作為限制，避免每日規劃護運之路線與過去的路線相似性過高，但是並未考慮其他風險因素與風險成本。模式 1 與模式 2 的另外一個差異點在於：模式一是將規劃路線與前 1 日之路線進行比較以估計路段重複性風險（也就是路段重複性風險因素的權重值與估計值僅考慮規劃路線與前 1 日之路線），而模式 2 中的時空相似度限制是比較規劃路線與之前 5 日之路線（每輛車可能有 5 條不同路線）。為了在相同的基礎上比較兩模式，本研究修改路段重複性風險因素估計值與層級分析法計算之路段重複性風險因素權重值，考慮規劃路線與之前 5 天路線的重複性，根據式 (11) 與式 (12) 分別重新計算風險效用值與風險成本，並將更新的風險成本代入模式一中重新求解。

上述 3 個模式之範例求解結果如表 8 所示。首先，3 個模式的最佳解 (CPLEX) 與啟

發解間目標值的差距皆小於 0.65%，可見啟發式演算法具有良好的求解品質，而且啟發式演算法可以大量減少求解運算時間。值得一提的是，與模式 2 相比，在無時空相似度限制時，模式 1 與模式 3 之最佳解與啟發解的求解時間皆明顯比模式 2 求解時間短，可知時空相似度之限制雖能增加規劃路線之變化性，但也因此增添模式求解上的困難。

模式 1 相較於模式 2 與模式 3 多考慮護運作業風險因素量化成的風險成本，所以其最佳解與啟發解目標值皆大於另外兩個模式求解之目標值；但模式 1 能夠將實際護運作業過程中風險因素之影響有系統地納入考慮，得到兼顧效率與安全的運鈔車路線與排程規劃。若將模式 2 與模式 3 求解結果之路線以模式 1 的方式計算其風險成本與營運成本，則從表 8 得知模式 1 相較於另外兩個模式多考量護運作業風險因素量化成的風險成本，故其風險成本 (1,452) 最低；模式 2 雖有時空相似度限制，但所規劃路線卻可能選擇其他風險影響性較高的路線，而其風險成本甚至大於模式 3。模式 3 既沒有時空相似度的限制，也不考慮護運作業風險成本。雖然此種作法較模式 1 與模式 2 簡單易求解，且最佳解目標值 29,830 元也較另外兩種模式低，但是此模式只考慮效率（營運成本 30,000，在 3 個模式中最低），忽略運鈔車護運作業之安全性（風險成本 1,529，在 3 個模式中最高），無法滿足實務上保全業者的需求。

表 8 3 種模式求解之結果比較

模 式	模式 1	模式 2	模式 3
啟發解系統成本 (元)	31492	31,599	31,516
風險成本 (元)	1,452	1,529	1,516
營運成本 (元)	30,040	30,070	30,000
啟發解求解時間 (秒)	86.73	178	83.82
CPLEX 最佳解目標值 (元)	31,299	29,880	29,830
CPLEX 最佳解求解時間 (秒)	62,623.84	147,682.62	66,217.34
啟發解與 CPLEX 最佳解之間距 (%)	0.61	0.64	0.57

接下來本研究以模式 2 來評估模式 1 範例測試結果。Yan 等人^[2]定義兩條路線（節線）抵達某一需求點的時間差門檻值 β （分鐘），以判斷節線的相似度；當兩條節線抵達某一需求點的時間差小於 β ，則此兩條節線為相似節線。假設 $\beta = 20$ 且前 1 日運鈔車抵達需求點 A 之時間為 9:20 分，如果規劃路線抵達需求點 A 之時間為 9:20 前後 20 分鐘內 (9:00-9:40)，則視為相似節線。另外，Yan 等人^[2]定義時空相似度限制 δ 值 ($0 \leq \delta \leq 1$)，如果相似節線數與前 1 日運鈔車路線節線數（不包括匯集節線）的比值大於 δ ，則判定當日規劃路線違反時空相似度限制。假設 $\delta = 0.2$ 且當日所規劃之路線只須與前 1 日之路線進行比較，前 1 日路線包含 9 條節線，當日規劃路線包含 7 條節線，但有 4 條相似節線，則兩日路線的時空相似度為 $4/9 = 0.44$ ，且 $0.44 > \delta$ ，故當日之規劃路線違反時空相似度限制，在模式

2 中將視為不可行。

上述時空相似度之定義可延伸至與之前數日路線互相比較，其作法為在與不同日的路線進行比較時，給予不同的 β 與 δ 值。本研究參考 Yan 等人^[2] 與前 5 日的路線進行比較，針對與之前 1、2、3、4、5 日路線比較的 β 值分別為 60、50、40、30、20 分鐘， δ 值分別為 0.20、0.40、0.60、0.80、0.90。

在此時空相似度之設定下，模式 1 與模式 2 之個別車輛規劃路線與前 5 日護運路線互相比對之時空相似度值如表 9 所示。模式 1 中個別車輛分別比對前 5 天之行駛路線，其時空相似度值皆遠低於預設之限制；以編號 1 車輛為例，由於前 1 日有 3 輛運鈔車進行護運作業，因此編號 1 車輛與前 1 日的 3 條護運路線互相比較之時空相似度值分別為 0、0、0，皆滿足限制值 0.20。此外，在本測試範例中，模式 1 得到的路線時空相似度值大多都小於模式 2 得到的時空相似度值，可知模式 1 不但考慮較多的風險因素，而且其將路線重複性風險因素之風險成本納入路線成本的作法同樣也能夠避免護運路線重複的情形。

表 9 不同模式中個別車輛分別比對前五日護運路線之時空相似度值

模式 1 車輛編號	個別車輛分別比對前 5 天之行駛路線實際時空相似度值				
	前 1 日	前 2 日	前 3 日	前 4 日	前 5 日
1	0, 0, 0	0, 0.13, 0	0, 0, 0.17	0, 0, 0.13	0, 0.14, 0
2	0, 0, 0	0.31, 0.13, 0	0, 0.13, 0	0.17, 0, 0	0.17, 0.14, 0
3	0, 0.13, 0.15	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0.33, 0, 0.29
模式 2 車輛編號					
	前 1 日	前 2 日	前 3 日	前 4 日	前 5 日
1	0, 0.13, 0.14	0.14, 0.13, 0.15	0, 0.13, 0	0, 0, 0	0.31, 0.13, 0
2	0, 0.13, 0	0.29, 0.25, 0	0.29, 0, 0.15	0.15, 0.14, 0	0, 0.13, 0
3	0.15, 0.13, 0	0.14, 0, 0.31	0, 0, 0.15	0, 0.14, 0.13	0.15, 0.13, 0

六、結論與建議

本研究利用時空網路流動技巧，從保全業者之立場，建立以系統成本最小化為目標之運鈔車路線與排程最佳化模式，模式中定義之系統成本包括營運成本（固定與變動成本）以及風險成本。不同於以往相關文獻中藉由時空相似度限制來避免產生重複性過高之運鈔車路線，以降低護運過程中遇搶的風險，本研究將護運過程中的風險透過成本的方式反映在所建立的模式中，藉由模式求解，得到營運成本與風險成本最低的運鈔車路線與排程。為了估計護運作業的在風險成本，本研究建構護運作業風險因素層級架構，此架構包含護運路段風險與滯留作業風險兩大構面，每一構面下又有各項風險因素，這些風險因素的權重則是透過專家問卷調查，利用層級分析法來計算。將各項風險因素權重值與風險因素估

計值相乘後加總，得到風險效用值，再量化為風險成本，納入本研究所建構之運鈔車路線與排程模式中之系統成本中，求解兼顧營運成本與風險成本的運鈔車護運路線與排程規劃。

由於本研究運鈔車路線與排程模式屬於 NP-hard，當面臨大型實務問題時，難以在合理時間內求得精確最佳解 (exact solutions)，因此本研究發展啟發式解法並配合數學規劃軟體 CPLEX 加以求解。為了評估模式與演算法之實用績效，本研究參考吳銘偉^[18]與張佑璿^[17]的作法，根據國內一保全公司 (簡稱為 S 保全公司) 在中壢服務區的營運資料產生測試範例並進行求解。求解結果發現啟發解與精確解之目標值間距為 0.32%，表示本研究之啟發式解法可求得良好的近似最佳解，也可大幅縮短求解時間。此外，本研究亦將求解結果與文獻中所發展之運鈔車路線與排程模式 (Yan 等人^[2]) 之結果比較，探討考慮時空相似度限制之模式與考慮路段風險成本之模式兩類不同模式的差異。比較結果發現：(1) 考慮時空相似度限制之模式求解時間較長，顯示時空相似度之限制雖能增加規劃路線之變化性，但也因此增添模式求解上的困難；(2) 考慮路段風險成本之模式其風險成本較低；(3) 考慮路段風險成本之模式將路線重複性之風險成本納入路線成本的作法同樣也能夠避免護運路線重複的情形。因此，本研究中將路段風險成本納入目標函數求解的作法，在實務應用上較優於過去僅考慮護運路線重複性之模式。

有關未來研究方向之建議如下。本研究運用層級分析法計算護運作業風險中各風險因素的權重值，再將風險因素權重值與估計值量化為風險成本，此種風險評估之作法會因受訪者填寫問卷時過於主觀或是對議題不甚了解，而造成判斷偏差，影響風險評估結果，未來相關研究可嘗試使用其它方法來進行護運作業之風險評估。此外，本研究假設各服務需求點間之旅行時間為一固定值，但實務上旅行時間會有擾動與依時性之情形發生，建議後續研究可嘗試透過隨機規劃模式，考量旅行時間之隨機性，始能更加符合現實狀況之模式。營運成本與風險成本可能是兩項衝突的目標，為了探討兩者間可能的抵換 (tradeoff) 關係，在後續研究中，可以多目標規劃模式求解，得到一組非支配解 (non-dominated solutions)，提供保全業者規劃運鈔車護運路線時之決策參考。最後，本研究所發展的啟發式演算法將原本問題切割成數個階段的小問題來縮短求解時間，未來相關研究可嘗試應用先進的巨集啟發式演算法 (例如模擬退火法、蟻群演算法等等) 來進行求解。

參考文獻

1. 江文毅，「運鈔車護運路線決策支援系統建立之研究」，華梵大學工業管理學系碩士論文，民國 90 年。
2. Yan, S., Wang, S. S., and Wu, M. W., "A Model with a Solution Algorithm for the Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling Problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp.464-473.
3. Yan, S., Wang, S. S., and Chang, Y. H., "Cash Transportation Vehicle Routing and

- Scheduling under Stochastic Travel Times”, *Engineering Optimization*, DOI:10.1080/0305215X.2013.768240, 2013.
4. Erkut, E. and Verter, V., “Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials”, *Operations Research*, Vol. 46, No. 5, 1998, pp.625-642.
 5. Erkut, E., Tjandra, S. A., and Verter, V., “Hazardous Materials Transportation”, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 14, 2007, pp. 539-621.
 6. Yan, S. and Chen, H. L., “A Scheduling Model and a Solution Algorithm for Inter-City Bus Carriers”, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 9, 2002, pp. 805-825.
 7. Yan, S. and Tseng, C. H., “A Passenger Demand Based Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing”, *Computers & Operations Research*, Vol. 29, No. 11, 2002, pp. 1559-1581.
 8. Kliewer, N., Mellouli, T., and Suhl, L., “A Time-Space Network Based Exact Optimization Model for Multi-Depot Bus Scheduling”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, No. 3, 2006, pp. 1616-1627.
 9. Yan, S. and Chen, C. H., “Coordinated Flight Scheduling Models for Allied Airlines”, *Transportation Research Part C*, Vol. 15, No. 4, 2007, pp. 246-264.
 10. Garey, M. R. and Johnson, D. S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, San Francisco, CA, 1979.
 11. Saaty, T. L., *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, RWS Publications, Pittsburgh, PA, 1990.
 12. Forman, E. H. and Gass, S. I., “The Analytical Hierarchy Process-An Exposition”, *Operations Research*, Vol. 49, No. 4, 2001, pp. 469-487.
 13. 徐鶴倫，「保全公司運鈔車護運作業風險評估暨排程規劃之研究」，國立中央大學土木工程學系碩士論文，民國 102 年。
 14. Satty, T. L., “Decision Making with the Analytical Hierarchy Process”, *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2008, pp. 83-98.
 15. Carbone, T. A. and Tippett, D. D., “Project Risk Management Using the Project Risk FMEA”, *Engineering Management Journal*, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 25-35.
 16. Lee, W. K., “Risk Assessment Modeling in Aviation Safety Management”, *Air Transport Management*, Vol. 12, 2006, pp. 267-273.
 17. 張佑璿，「隨機旅行時間下保全公司運鈔車護運作業排程規劃之研究」，國立中央大學土木工程系碩士論文，民國 100 年。
 18. 吳銘偉，「保全公司運鈔車護運作業排程規劃之研究」，國立中央大學土木工程系碩士論文，民國 99 年。